

Christian Blöss  
Hans-Ulrich Niemitz

# **C14-Crash**

Das Ende der Illusion,  
mit Radiokarbonmethode und  
Dendrochronologie datieren zu können

2. überarbeitete Auflage

Verlag Informationen für  
Technik und Wissenschaft

**IT&W**

»Unsere Muße können wir nicht besser verwenden, als mit den Herrlichkeiten der Vergangenheit vertraut zu werden.«

*Karls Jaspers*

»Kein Mensch, der über die Vergangenheit genau Bescheid weiß, wird die Gegenwart düster oder verzagt sehen.«

*Thomas Babington Macaulay*

»There is no history without dates.«

*Claude Levi Strauss*

»Mit Statistik könne man alles beweisen, wird gesagt. Wir wollen es genauer sagen: Die Statistik der Randverteilungen ist dem Einfluß anonymer - man hört auch: latenter - Variablen in einem Ausmaß ausgesetzt, daß kaum einer vergeblich auf Ergebnisse hofft, die er für 'seinen Beweis' brauchen kann.«

*Friedrich Sixtl*

C14-Crash = <sup>14</sup>C-rashC

*rash (engl.) = voreilig, Hautausschlag, Flut*

Christian Blöss • Hans-Ulrich Niemitz

# C14-Crash

Das Ende der Illusion, mit Radiokarbonmethode  
und Dendrochronologie datieren zu können



Verlag Informationen für  
Technik und Wissenschaft

– IT&W –

Zum Bild auf der vorangegangenen Seite 3: Collage aus dem Schriftzug des Titelbildes der 1. Auflage (Entwurf von Hanjo Schmidt) und dem Querschnitt eines Holzes aus der »Broken Flute« Höhle (Arizona).

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Blöss, Christian:**

CI4-Crash : das Ende der Illusion, mit Radiokarbonmethode und Dendrochronologie datieren zu können / Christian Blöss ; Hans-Ulrich Niemitz. - 2. Aufl. - Berlin : Verl. Informationen für Technik und Wissenschaft, IT-und-W, 2000

ISBN 3-934378-52-8

© Verlag Informationen für Technik und Wissenschaft, April 2000

1. Auflage Oktober 1997 (Mantis Verlag, alte ISBN: 3-928852-15-9)
2. überarbeitete Auflage Juli 2000 (BoD)

Umschlagentwurf: Christian Blöss · Berlin

Herstellung: Georg Lingenbrink GmbH & Co. · Hamburg

Verlag Informationen für Technik und Wissenschaft (IT&W)

Erkelenzdammer 49 · D - 10999 Berlin

Telefon: ..49 30 61401163 · Fax: ..49 30 61401164

Email: itetw@aol.com · Internet: <http://www.itetw.de>

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort zur 2. Auflage (Mai 2000)</b> . . . . .	9
<b>Vorwort zur 1. Auflage (September 1997)</b> . . . . .	13
<b>Danksagungen</b> . . . . .	15
<b>1. Grundsätzliches – eine Einführung zum Gebrauch</b> . . . . .	17
1.1 Der Aufbau des Buches . . . . .	17
1.2 Die Idee der C14-Methode . . . . .	20
1.3 Wesentliche Voraussetzungen für die C14-Methode ... . . . .	21
1.4 ... und die heutige Beurteilung ihrer Gültigkeit . . . . .	24
1.5 Fundamentalprinzip und Simultanitätsprinzip . . . . .	25
1.6 So funktioniert die Dendrochronologie . . . . .	29
1.7 Das Dilemma der Dendrochronologie . . . . .	31
1.8 Absolutdatieren durch »wigggle-matching« . . . . .	33
1.9 »Wigggle« offenbaren eine chaotische Welt . . . . .	37
1.10 Die anderen radiometrischen Datierungsmethoden . . . . .	41
1.11 Wissenswertes über Kohlenstoff C12, C13 und C14 . . . . .	45
1.12 C14 und die Radiomedizin . . . . .	46
<b>2. Geschichtliches – die Chronologie des Skandals</b> . . . . .	47
2.1 Die C14-Methode im Urteil der Historiker ... . . . .	47
2.2 ... und wie man sich arrangiert . . . . .	52
2.3 Chronik einer Kumpanei . . . . .	57
2.4 Die Chronologie der Ereignisse . . . . .	72
2.5 Ein himmlischer Zirkelschluß . . . . .	76
2.6 C14 contra Physik . . . . .	80
2.7 Die Dendrochronologie als Mittläuferin . . . . .	89
2.8 Zusammenfassung . . . . .	103
2.9 Hinweise auf die kommenden Kapitel . . . . .	106
<b>3. Methodisches – C14 auf dem Prüfstand</b> . . . . .	108
3.1 Keine Datierung ohne Chronologie . . . . .	108
3.2 Wie sicher sind C14-Daten? . . . . .	115
3.3 Wie wirken sich die Probleme auf die Kalibrierung aus? . . . . .	121
3.4 Unter welchen Bedingungen können Historiker sorgenfrei C14-Daten verwenden? . . . . .	123
3.5 Dendrochronologie und C14-Methode – eine Heirat unter vorgehaltener Pistole . . . . .	126
3.6 Das Schweigen über Dilemmata . . . . .	128
3.7 Wann können Dendrochronologen sorgenfrei C14-Daten verwenden? . . . . .	131
3.8 Zusammenfassung . . . . .	138

<b>4. Autopsie – Todesursachen einer Methode</b>	141
4.1 Die C14-Methode ist ein Kind des 19. Jahrhunderts	141
4.2 Der Sündenfall der Geschichtswissenschaft	142
4.3 Der Zirkelschluß zwischen Dendrochronologie und C14-Methode	145
4.4 Der Sündenfall der Naturwissenschaft	146
4.5 Das moderne Gesicht der C14-Methode	147
4.6 C14 und Dendrochronologie – eine Beziehung in Bildern	150
<b>5. Tagebuch einer Enthüllung</b>	164
5.1 Chronologierevisionen und Radiokarbonrevolutionen	164
5.2 Vorarbeiten	169
5.3 Unsere Starthypothese	171
5.4 »Dark ages«, Verdoppelungen und die Auswirkungen auf die Kalibrierkurve	173
5.5 Die Rolle der Vordatierung in der Dendrochronologie	176
5.6 Der »Längeneinwand« und seine Schwäche	177
5.7 Libby's Schummelei	179
5.8 Vordatierung durch C14-Mustervergleich	181
5.9 Kaum zu glauben: Alles ist über C14-Mustervergleich vordatiert	184
5.10 »fact-matching« in Sachen »wigggle-matching«	185
5.11 C14-Ideologie und Chaos-Theorie	187
5.12 »Wigggle kann es gar nicht geben!«	187
5.13 Der »Skandal von Uppsala«	191
5.14 Die letzte Bastion	191
5.15 Die »Ozeanischen Transportbänder«	194
5.16 Korrespondenz	195
5.17 Der momentane Stand (1997)	199
5.18 Nachtrag zur Neuauflage (2000)	201
<b>6. Die Entdeckung und Entwicklung der C14-Methode</b>	204
6.1 Die C14-Methode – Findelkind der Medizintechnik	204
6.2 Die Ökonomie der Radiomedizin und die Sachzwänge der C14-Methode	205
6.2.1 Das Kreuz mit der langen Halbwertszeit	209
6.2.2 »Doppel-Fehler« für die C14-Methode	212
6.2.3 Die Kontaminationsgeschichte für C14 muß bekannt sein	215
6.3 An der Wiege der C14-Methode	219
6.4 Chicagoer Lehrjahre	223
6.5 Das »Experimentum crucis«	229
6.6 Die »Curve of Knowns« 1949	232
6.7 Die »Curve of Knowns« debugged	236

<b>7. Statistik muß sein – Lüge oder Unwahrheit?</b>	241
7.1 Fehler helfen beim Überleben	241
7.2 Vom »C14-Alter« zum »historischen Alter« einer Probe	242
7.3 Die Bandbreite der Fehler und Korrekturen	246
7.4 Was bedeutet der $\pm$ -Fehler bei den Altersangaben?	250
7.5 Wie genau kann eine Radioaktivitätsmessung überhaupt sein?	251
7.6 »One date is no date«	255
7.7 »Wie komme ich zu dem Mittelwert, den ich haben will?«	261
7.8 Ein Würfelspiel erhellt die chronologische Unverfrorenheit	263
7.9 Gängige Praxis	267
7.10 Schlußbemerkung	270
<b>8. Verwässerung statt Verbesserung – noch mehr Fehler!</b>	272
8.1 Die »Feinheit« der Methode	272
8.2 Jede Probe hat schließlich auch einmal gelebt ...	279
8.2.1 Isotopenfraktionierung	281
8.2.2 Reservoir-effekte I (örtlich rekonstruierbare und in Grenzen korrigierbare Diffusionsvorgänge)	287
8.2.3 Reservoir-effekte II (örtliche und ohne Vergleich mit einer am selben Ort gewonnenen Kalibrierung nicht rekonstruierbare und deswegen unkorrigierbare Diffusionsvorgänge)	289
8.2.4 Zusammenfassung	291
8.3 Die Probe erlagert sich eine zusätzliche Geschichte	293
8.3.1 Kontamination	293
8.3.2 Wanderung des C14 entsprechend einem C14-Gradienten in der Probe	296
8.3.3 In-situ Produktion von C14	297
8.3.4 Zusammenfassung	298
8.4 Die Probe wird ausgewählt, aufbereitet und verschickt	299
8.4.1 Probenauswahl	299
8.4.2 Identifizierung des Stratums, aus dem die Probe stammt	302
8.4.3 Probenaufbereitung	303
8.4.4 Zusammenfassung	305
8.5 Die Probe kommt ins Labor	305
8.6 Und dann ist da noch ein richtiger Laborfehler ...	308
8.7 Zusammenfassung	318
<b>9. Der radiometrische Tunnel – Kalibrieren? So nicht!</b>	320
9.1 »Kalibrierkurven«: Mißverständnisse durch Umwege	320
9.2 Die Kehrseite der langen Halbwertszeit	330
9.3 Der radiometrische Tunnel	331
9.4 Das Mehrdeutigkeitsproblem	335
9.5 Die Formeln – im einfachsten Fall	340
9.6 Der allgemeine Fall	341

---

9.7 Libbys Grundannahmen . . . . .	349
9.8 Der grundlegende Mangel von Libbys Modell . . . . .	353
9.9 Der Widerspruch zwischen globaler und lokaler Struktur der Kalibrierkurven . . . . .	355
9.10 Die Konsequenzen . . . . .	363
9.11 Anhang: Bilanzgleichung . . . . .	366
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>368</b>
<b>Personen- und Sachregister . . . . .</b>	<b>399</b>
<b>IT&amp;W • Verlagsprogramm . . . . .</b>	<b>407</b>
<b>Programm des Mantis-Verlages . . . . .</b>	<b>408</b>

## Vorwort zur 2. Auflage (Mai 2000)

Nicht ganz drei Jahre nach der Erstveröffentlichung erscheint nun die zweite Auflage unseres Buches »C14-Crash«. Noch immer ist unsere grundlegende Verwunderung im Zusammenhang mit Radiokarbonmethode und Dendrochronologie nicht restlos abgeklungen: Daß Naturwissenschaftler ein so falsches Bild bzw. Theoriegebäude aufbauen konnten und daß das bis heute im Prinzip unhinterfragt geblieben ist! Die Gliederung des Buches spiegelt nach wie vor die unterschiedlichen Anläufe wieder, die wir ursprünglich unternommen haben, um die Materie zu durchdringen und dies nicht zuletzt uns selber darzustellen. Wir möchten hier ein Extra-Vorwort zur zweiten Auflage plazieren, um den Einstieg in das Thema allgemein etwas zu erleichtern.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts wird die bisher (bzw. zuvor) von den Historikern erarbeitete Chronologie von einer kleinen Zahl Wissenschaftlern, die jedoch immer mehr werden, angezweifelt. Die Zweifel betrafen zuerst nur die alte Geschichte, also die Zeit vor Alexander dem Großen (»333 bei Issos Keilerei«). Bald kamen immer mehr Regionen und vor allem immer jüngere Perioden der Geschichte ins Visier dieser Rekonstruktoren. Immanuel Velikovsky entwickelte seit den späten vierziger Jahren neue Chronologien für die ägyptische und griechisch/römische Geschichte. Dabei baute er auf der Erkenntnis auf, daß die Erde noch in historischen Zeiten von planetaren Katastrophen heimgesucht worden sein müsse. Die ägyptische Geschichte befindet sich in chronologischer Verwirrung und ist viel zu lang, die griechische Geschichte ist mit einer Phantomzeit gefüllt: den sogenannten Dunklen Jahrhunderten von ca. -1500 bis -600 u.Z..

Gunnar Heinsohn erkannte in den achtziger Jahren: »Die Sumerer gab es nicht« [1988]. Ihre Erfindung entspricht einer Verdoppelung von jünger anzusetzender Geschichte. Diesmal mußten Jahrtausende als entlarvte Phantomzeit weichen. Gunnar Heinsohn und Heribert Illig rekonstruierten die ägyptische Geschichte neu [1990]. Im Prinzip fanden sie heraus, daß die ägyptische Geschichte verdreifacht worden war: Altes, Mittleres und Neues Reich sind eins! Beide Autoren hatten auch für die europäische Vorzeit zeigen können, daß diese infolge falsch konstruierter Perioden gestreckt worden war. Das galt insbesondere für das Mesolithikum (Mittlere Steinzeit), das als Phantomzeit zwischen der Eiszeit und dem Neolithikum (Jungsteinzeit) plaziert worden war und damit die Überlange der Nacheiszeit weiter zementiert hat. In den neunziger Jahren entdeckte Heribert Illig, von Angelika Müller und einem der Autoren (HUN) auf Verwunderungen und Rätsel der Mittelalterhistoriker hingewiesen, daß auch das Mittelalter seine Phantomzeit hat. Und

zwar müssen mindestens die drei Jahrhunderte zwischen ca. 600 und 900 u.Z. als frei erfunden gelten.

Wie man sich leicht vorstellen kann, stießen diese Chronologie- bzw. Geschichtsrevisionen nicht auf Gegenliebe bei den anderen Wissenschaftlern, insbesondere natürlich nicht bei den Historikern. Zum einen waren diese Neu-vorschläge verbunden mit einer ungewöhnlichen Weltansicht (»Paradigma«), nämlich der des Katastrophismus. Den glaubte doch die Wissenschaft seit etwa 1850 für immer überwunden zu haben. Zum anderen ist den Historikern die Chronologie eine »heilige Kuh«. Die Logik jeder (rekonstruierten) Geschichte baut zuallererst auf einer Chronologie auf. Und diese Logik und damit der Sinn der Geschichte muß in sich zusammenbrechen, sollte die Chronologie eine grundlegende Änderung erfahren. So gesehen kann es keinen radikaleren Einschnitt in das Geschichtsbild geben als über eine Kritik der Chronologie. Das ist der Grund, warum Protest gegen die vorgebrachten Schlußfolgerungen und Thesen auf diesem Gebiet so heftig ausfallen. Dabei müssen wir betonen, daß wir unsere Ergebnisse niemals hätten erreichen können, wenn Wissenschaftler nicht so gründlich gearbeitet und ihre Verwunderungen, ihre ungelösten Probleme und Rätsel nicht selber so akribisch benannt hätten.

In der Diskussion um Chronologierevisionen spielen die naturwissenschaftlichen Methoden der Altersbestimmung von Fundstücken eine besondere Rolle. Diese Methoden stehen im Ruf, objektiv-naturwissenschaftlich zu sein. Und sie stimmen – so wird angenommen bzw. behauptet – mit den von den Historikern erarbeiteten Datierungen bzw. Chronologien überein. Nun ließ gerade die Behauptung, aus der frühmittelalterlichen Geschichte müssten drei Jahrhunderte entfernt werden, sowohl Fachleuten als auch Laien »den Kamm schwellen«. Exemplarisch für die oftmals von keiner Sachkenntnis getriebenen Reaktionen kann folgender Ausschnitt aus einem Leserbrief gelten: »Endgültig widerlegt wird Illigs These jedoch mittels naturwissenschaftlicher Hilfsmittel des Historikers: der Datierungsmethoden Dendrochronologie und C14.« (siehe Bild **5.2**). In verblüffend vielen Diskussionen, die auch die beiden Autoren immer wieder führen durften, bildeten die naturwissenschaftlichen Methoden – insbesondere die Radiokarbonmethode (C14-Methode) und die Baumringmethode (Dendrochronologie) – die letzte Auffangposition vor der Kapitulation. Die Naturwissenschaft könne sich doch nicht so irren – oder? Wir wissen jetzt: Sie konnte! Und das wird in diesem Buch nachgewiesen, und zwar mit einer Argumentation, deren Kern wir im Folgenden benennen wollen.

Die Dendrochronologie nutzt aus, daß die jährlich neu entstehenden Baumringe je nach dem Jahresklima verschieden dick werden. Das Ringdickenmuster soll dadurch so charakteristisch werden, daß man jedes Holz anhand seines Ringdickenmuster in eine zeitliche Beziehung zu anderen Hölzern setzen kann. Will man es absolutdatieren, dann muß man nur von heute ausgehend sich rückwärts durch die Zeit arbeitend ein Referenz-Ringdickenmuster aufbauen – eine Art Kunstbaum, entstanden aus vielen hintereinander gehörenden Bäumen.

Genau das tat Ernst Hollstein seit den Fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Ihm gelang sehr schnell für Eichen in Mitteleuropa zwei Baumringchronologien aufzubauen. Eine für die Römerzeit und eine für die letzten 1200 Jahre. Dazwischen klaffte eine Lücke, die sich einfach nicht schließen lassen wollte. Der aufmerksame Leser ahnt schon, warum. Nicht vorhandene Zeiten erzeugen keine Hölzer. Hollstein und seine Dendrochronologiekollegen hatten ein Problem nicht ausreichend erkannt. Die Datierung von Hölzern – also die richtige Zuordnung des Holzfundes zum Kunstbaum – gelingt nur, wenn man in etwa vorher weiß, wohin der Holzfund zeitlich gesehen gehört. Es gibt nämlich für fast jeden Holzfund eine viel zu große Zahl von Zufallslagen, d.h. falschen Zuordnungen. Und die können nur über eine Vordatierung vermieden werden. Im Klartext: Ohne Vordatierung – bei Hollstein also dem Vorwissen aus von Historikern erstellten Chronologien – funktioniert die Dendrochronologie nicht.

Der dendrochronologische Anschluß der Römerzeit wollte nicht gelingen, doch die Baumringforscher wagten es nicht, die von den Historikern stammenden Vordatierungen anzuzweifeln. Also mußte man den Anschluß »gewaltsam« herstellen und die Lücke irgendwie füllen. Man tat das unter Aufgabe der bisher einigermaßen anschaulichen und damit nachvollziehbaren Methode der Dendrochronologie und durch die Einführung abstrakter statistischer Kaküle und verkaufte das noch als Verbesserung der Methode. Das schien es ja auch zu sein, gelang doch so der gewünschte Anschluß – tatsächlich war eine Chance vertan, die mittelalterliche Chronologie Europas einer Prüfung zu unterziehen. Nachdem die falsche Baumringchronologie stand, war allen kommenden (Fehl-)Datierungen Tür und Tor geöffnet. Einmal im Zirkelschluß zwischen falschen Vordatierungen (Vorgabe der Historiker) und zerstörter Methode der Dendrochronologie (Zurückweichen der Dendrochronologen vor den Forderungen der Historiker) war nun fast jedes gewünschte Datum naturwissenschaftlich »beweisbar«. Dazu gehörte nicht nur das Füllen der Lücke zwischen ca. 600 – 900 u.Z., sondern auch das Füllen von anderen Lücken, z.B. in der alten Geschichte. Ganz besonders richteten wir unser Au-

genmerk auf das dendrochronologische Füllen der Zeit, die vom Ende der Eiszeit (deren Ursache bis heute unerkannt geblieben ist) bis zum Beginn der historischen Zeit reicht, die angeblich vor etwa 2500 Jahren einsetzte. Die Dendrochronologen haben nämlich auch für diesen langen prähistorischen Zeitraum Baumringchronologien erstellt. Wie ist ihnen das gelungen? Genauer gefragt: Wie haben sie das Problem der Vordatierung gelöst? Historische Daten gibt es nicht, wir befinden uns schließlich in der Prähistorie! Woher konnten sie die existentiell notwendigen Vordatierungen bekommen?

Die C14-Methode kann Aufschluß über das Alter organischer Proben geben, denn je weniger C14-Atome in der Probe enthalten sind, desto älter muß sie auch sein. Das Alter der Probe kann aber nur dann aus der Messung der in ihr verbliebenen C14-Menge errechnet werden, wenn zu allen Zeiten und an allen Orten der Erde der C14-Gehalt in der Luft (bzw. im CO<sub>2</sub>) konstant war und damit auch der C14-Gehalt in den jeweils lebenden Organismen. Diese zuerst geglaubte und angesetzte Annahme erwies sich – nach bereits zehnjähriger Anwendung der Meßmethode zur Datierung – um 1960 als falsch (siehe Bild 9.12). Die bange Frage lautete damals: Wie (sehr) falsch?

Die Meßkurve, die die Falschheit der Annahme bewies und zur eben genannten Frage führte, war aus den Baumringen einer amerikanischen, sehr alt werdenden Baumart abgeleitet worden. Konnte diese Meßkurve nicht als Korrekturkurve benutzt und so die C14-Methode gerettet werden? Konnte man diese Meßkurve nicht verlängern, um auch Korrekturen für die Zeiten davor zu erhalten? Der aufmerksame Leser wird vielleicht schon ahnen, daß und wie das Problem gelöst wurde, nämlich über einen neuerlichen Zirkelschluß: Es galt eine Baumringfolge aufzubauen, aus der die Korrekturkurven für C14-Datierungen gewonnen werden sollten. Wie konnte man aber ohne Vordatierung eine korrekte Baumringfolge aufbauen? Die C14-Methode, die das als einzige hätte leisten können, galt doch nicht mehr. Doch, sagten die Forscher, sie sei immer noch genau genug, um zur Vordatierung der Hölzer dienen zu können. Zur Untermauerung dieser Überzeugung führten sie einen alten Glaubenssatz an: »Die Natur macht keine Sprünge«. Es habe in der Vergangenheit zwar gewisse Schwankungen im C14-Gehalt der Atmosphäre gegeben, aber die seien immer klein genug gewesen, um eine Vordatierung nicht unmöglich zu machen. Und damit war der Zirkelschluß komplett:

- 1) C14 datiert Holzfunde falsch vor,
- 2) Dendrochronologie erzeugt daraus falsche Baumringchronologie und
- 3) C14 erfährt nun mit Hilfe der falschen Baumringchronologie kleine Korrekturen (maximal 10%).

So blieb die Chronologie des Postglazial unangetastet und das zugrundeliegende evolutionistische Weltbild unangezweifelt. In diesem Buch zeigen wir die Entstehung dieses Zirkelschlusses und welche Auswirkungen das gehabt hat. Dabei werden wir zeitweise tief in die Materie einsteigen und verständlich machen, daß die Forscher vor lauter Teilproblemen dann das Wesentliche nicht mehr gesehen haben. Wir arbeiten über diesen Nachweis hinaus auch die Bedeutung dieser Erkenntnisse für die Historiker heraus: Die Annahme, daß die Natur- und Menschheitsgeschichte deutlich kürzer ausfällt als bisher angenommen, erfährt durch das tiefere Verständnis der naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden eine neue Stütze.

### **Vorwort zur 1. Auflage (September 1997)**

Dieses Buch füllt entscheidende Lücken im Wissen über zwei der wichtigsten naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden der geschichtlichen Chronologie:

- Radiokarbonmethode (Methode zur zeitlichen Synchronisierung organischer Proben durch Vergleich ihrer C14-Aktivitäten),
- Dendrochronologie (Methode zur zeitlichen Synchronisierung von Holzproben durch Vergleich ihrer Baumringdicken).

Die weitverbreitete Ansicht, daß die aus diesen Synchronisierungen abgeleiteten Altersangaben auf zuverlässiger Basis erfolgen, wird revidiert werden müssen.

Die C14-Methode entstand vor 50 Jahren kurz nach dem Ende des 2. Weltkrieges. Ihre Eleganz und die ihr zugrundegelegten einfachen Grundannahmen prädestinierten sie dazu, von der Geschichtswissenschaft als eine unabhängige Kontrollinstanz berufen zu werden. Dazu kam es aber nicht, weil die C14-Wissenschaftler eine methodische Unabhängigkeit gar nicht in Anspruch nahmen, sondern für die Bewahrheitung ihrer Grundannahmen ausgerechnet die Eckdaten der historischen Chronologie verwendeten, die als erste zur Überprüfung angestanden hätten. Dieser Verzicht hatte schlimme Folgen: Die Grundannahmen der C14-Methode galten nunmehr als nahezu unantastbar, produzierten jedoch in der Folge ein Konvolut an Daten, das keineswegs mehr die ungeteilte Zustimmung der Historiker fand. Daß der anfängliche methodische Fehlgriff unerkannt blieb, trug immer wieder dazu bei, daß niemand die Existenzberechtigung dieser naturwissenschaftlichen Datierungsmethode in Frage zu stellen wagte.

Die Dendrochronologie hat seit je historische Daten zum Aufbau ihrer Baumringchronologien verwenden müssen. Wo diese nicht vorlagen, bestand Bedarf nach Datierungshilfen anderer Art. Für die Fertigstellung der weltweit ersten Baumringchronologie, die weit in die vorgeschichtliche Zeit reichen sollte, erlag sie einem schweren Irrtum. Sie vertraute ausgerechnet der zweifelhaftesten aller Grundannahmen der C14-Methode, nämlich die nahezu gleichbleibender C14-Verhältnisse seit der letzten Eiszeit. Diese Baumringchronologie, als Bristlecone-Pine-Chronologie bekannt, stellte niemals einen Maßstab für Absolutdaten dar, sondern war lediglich das Ergebnis und zugleich Sinnbild eines ausgeprägten aktualistischen Vorurteils.

Später glaubten die Dendrochronologen noch eine weitere, wenngleich bereits abgeschwächte Grundannahme, obwohl sie diese eigenhändig hätten ad absurdum führen können: Sie glaubten, daß die zeitlichen Veränderungen der Verhältnisse für C14, für die es mittlerweile unabweisbare Indizien gab, sich an allen Orten der Erde stets gleichförmig abgespielt hätten. Dabei hielten sie mit Messungen von C14-Werten in ihren Baumringsequenzen starke Gegenbeweise in den Händen. Ihre Daten können nur noch im Rahmen eines hochdynamischen Modells für Atmosphäre und Ozean erklärt werden und lassen für die auch heute noch aufrechterhaltenen Grundannahmen der C14-Methode keinen Raum mehr.

Beide Datierungsmethoden sind aufgrund geschichtlicher Umstände eng miteinander verwoben und sind in ihren chronologischen Angaben gleichermaßen unglaubwürdig, weil sie sich auf falsche und sogar außerhalb ihres Anwendungsbereiches liegende Gewißheiten stützen. Die erste bisher unerschütterliche Gewißheit ist die über »wahre« geschichtliche Daten, insbesondere über das Ende der jüngsten Eiszeit vor rund 12.000 Jahren; die zweite Gewißheit besagt, daß die Verhältnisse der Gegenwart bis in Feinheiten hinein denen der Vergangenheit gleichen. Anstatt einen unabhängigen Beitrag zur Chronologie der Menschheitsgeschichte zu leisten, wurden nur Details im überkommenen und leider falschen chronologischen Rahmen erarbeitet.

Damit sind »C14 und Dendro« nicht mehr als Heldenstücke zu verstehen, sondern als Kriminalfall der Wissenschaftsgeschichte. Wir lösen ihn sowohl durch eine Analyse ihrer methodischen Fundamente als auch durch eine chronologisch-historische Betrachtung der verwobenen Entwicklung dieser beiden Methoden. Wissenschaftler, die uns zuweilen diese historische Betrachtungsweise als »Verwendung veralteter Quellen« angekreidet haben, übersehen dabei, daß ihr Fokussieren auf die »aktuelle Literatur« etwas mit Unterschlagung von Beweismaterial zu tun hat. Wir schrieben dieses Buch, um Debatten über bestimmte Chronologieverkürzungen – insbesondere aber die um eine

Kürzung des Mittelalters – zu versachlichen. Dabei könnte die Unbrauchbarkeit der Datierungsmethoden sogar leichter zu akzeptieren sein, als die Unbrauchbarkeit heute geglaubter Chronologien.

## Danksagungen

Wir sind zahlreichen Personen und Institutionen dankbar für ihre Unterstützung beim Zusammentragen des Materials, bei der Ausleuchtung unterschiedlichster Aspekte des Themas und dem Aufzeigen von Berührungspunkten zu anderen Wissenschaftsgebieten. Am meisten Anregung und zugleich die nötige Besinnung und Rückbesinnung hat uns die Kritik der Gesprächspartner verschafft. Wir danken besonders:

- Herrn Hasan G. Albayrak (Berlin) für Simulationen der atmosphärischen C14-Konzentration mit entsprechenden Entwicklungswerkzeugen für elektronische Schaltungen,
- dem »Berliner Geschichtssalon« für die wiederholte, stets geduldige, konstruktive und kritische Auseinandersetzung mit unseren Thesen,
- Frau Cathrin Blöss (Berlin) für ihre Unterstützung bei der kulturgeschichtlichen Bewertung lateinischer Idiome, die im Zusammenhang mit der C14-Methode verwendet wurden,
- dem »Driburger Kreis« für die Gelegenheit, die Thematik unter sozialwissenschaftlichem Gesichtspunkt vortragen und ausführlich diskutieren zu können,
- Herrn Prof. Dr. Dieter Eckstein (Hamburg) für seine Bereitschaft zur Diskussion auch im Dissens,
- Herrn Frank Forstreuter (Berlin) für seine Erläuterungen zu der Bedeutung des Qualitätsmanagements in der industriellen Produktion für die Schaffung von Kundenzufriedenheit,
- Herrn Dr. Jie Ge (Berlin) für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, daß divergierende C14-Daten dennoch von tatsächlich gleichalten Proben stammen,
- Herrn Prof. Drs. Gunnar Heinsohn (Bremen) für die Überlassung empirischen Materials, sowie für wertvolle Hinweise im Zusammenhang mit seinen Arbeiten zur Chronologie der Menschheitsgeschichte,
- Herrn Harald Heinze (Oberentfelden, Schweiz) für den Hinweis, daß der Sonnenfleckenzyklus die Sicherheit dendrochronologischer Synchronitäten beeinflusst,

- Herrn Dieter Helbig (Detmold) für die Übersendung einer Liste mit knapp 50 Errata aus der 1. Auflage, deren gleichförmige Abfolge im Text ihn zur Frage veranlasste, ob die Versagerquote während des Lektorierens in irgendeiner Weise aktualistisch unterlegt gewesen sei,
- Herrn Dr. Heribert Illig (Gräfelfing) für die hartnäckige Erinnerung daran, daß eine Synthese aus Lesbarkeit des Textes einerseits und vollständiger Argumentation andererseits kein Ding der Unmöglichkeit sein muß,
- Herrn Prof. Thilo Knops (Hamburg) für die Erkenntnis, daß sich im Medium »Fernsehen« atavistische Berichterstattung oftmals besser zu verkaufen scheint als neutrale Berichterstattung,
- Herrn Dr. Maier-Reimer (Hamburg) für die kritische Kommentierung bestimmter Teile des Buches, wodurch wir auf Fehler in unserer Argumentation hingewiesen wurden,
- Herrn Dr. Mathias Neher (Berlin) für die Diskussion statistischer Methoden in der Sozialwissenschaft,
- Herrn Prof. Drs. F. Noll (Berlin) für die Angabe von empirischen Daten über die Kohlenstoffkonzentration im menschlichen Blut,
- Herrn Konrad Noll (Bern, Schweiz) für die Literaturhinweise im Zusammenhang mit der C14-Diffusion zwischen Atmosphäre und Ozean
- Frau Dr. Lee Reichel (Wien, Österreich) für das Material zu Berührungspunkten zwischen Medizin und C14-Methode,
- Herrn Robert Saphier (New York, U.S.A.) für seine Demonstration, wie einfach sich auch scheinbar komplexe Sachverhalte grundsätzlich ausdrücken lassen und seine Mithilfe bei der Übersetzung unseres C14-Sonderdrucks ins Englische,
- Herrn Hanjo Schmidt (Stuttgart) für die gelungene Gestaltung des Buchumschlags der 1. Auflage und seine kritische Begleitung unserer Vortragsvorbereitungen in Hamburg 1996,
- Herrn Prof. Dr. Fritz Hans Schweingruber für die postalische Ermunterung, die Dendrochronologie konsequent unter die Lupe zu nehmen,
- Herrn Klaus Simmering (Leverkusen) für die Gelegenheit, den Standpunkt einer Zuhörer- und Zuschauerschaft, die sich komplexen und fremden Sachverhalten nähern wollen, besser verstehen zu lernen,
- Herrn Uwe Topper (Berlin) für die Überlassung von Material zur Bedeutung der C14-Methode in der Archäologie,
- Frau Michaela Weißenfels (Hamburg) für Erläuterungen zur Bedeutung der Statistik in den Sozialwissenschaften,
- Frau Dr. Beate Ziegs (Berlin) für die Kommentierung von Abschnitten des Buches zur allgemeinverständlichen Darstellung der C14-Methode.

## 1. Grundsätzliches – eine Einführung zum Gebrauch

### 1.1 Der Aufbau des Buches

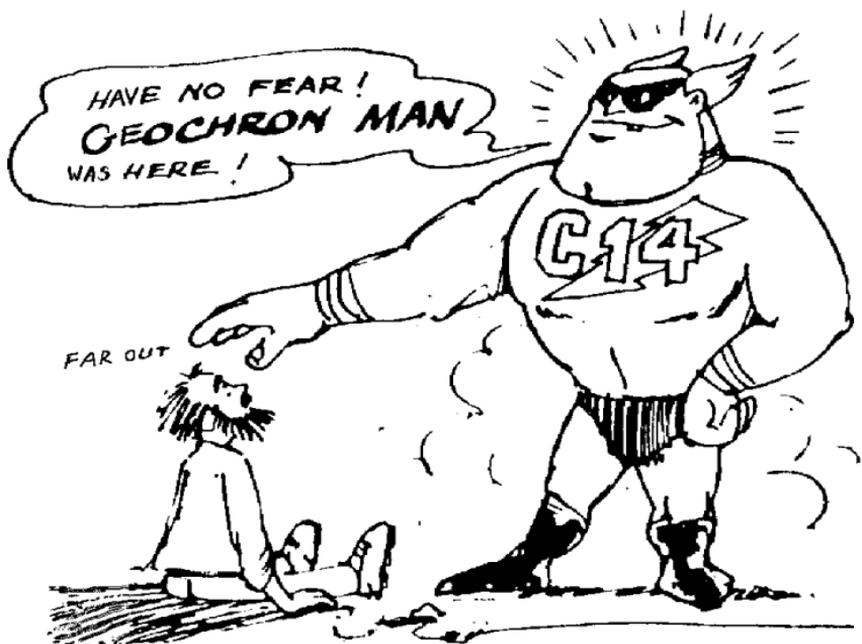
Die Konsequenzen, die aus den Ergebnissen unseres Buches zu ziehen sein werden, reichen weit über das Fachgebiet C14 und Dendrochronologie hinaus. Die chronologischen Fundamente der Geschichte ganz allgemein sind mit Hilfe der beiden wichtigsten naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden – C14 und Dendrochronologie – nicht zu begründen oder abzusichern. Weil das eine allgemeine und wichtige Erkenntnis ist, richtet sich unser Buch sowohl an den Laien als auch an Historiker und Physiker. Laien und Fachleute gehen mit »C14« und »Dendrochronologie« verschieden um – so verschieden, daß diese Verschiedenheit gefährlich geworden ist. Letztlich vertrauen die Laien den Fachleuten zu sehr, und die Fachleute kontrollieren einander nicht genügend, weil sie die Nachbardisziplinen nicht beherrschen oder nicht wagen, ihre Kontrollaufgabe wahr zu nehmen. Damit beide, Laie wie Fachmann, dieses Buch mit Gewinn lesen können, haben wir folgenden Aufbau des Buches gewählt:

- Kurzbeschreibung von C14-Methode und Dendrochronologie: Im ersten Kapitel »Einführung zum Gebrauch« kann der Leser seinen Wissensstand über die C14-Methode und die Dendrochronologie auffrischen, Wissenswertes über angrenzende Bereiche erfahren und erstes Mißtrauen aufbauen.
- Allgemeiner Teil: In den Kapiteln 2, 3 und 4 formulieren und begründen wir unsere Thesen für eine breitere Leserschaft. Das Kapitel 2 ist als Hauptkapitel zu verstehen. Das Kapitel 3 wendet sich an den Historiker. Das Kapitel 4 bringt eine Zusammenfassung der Kapitel 2 und 3 und verdeutlicht mit einer Reihe von Graphiken den Zirkelschluß zwischen C14-Methode und Dendrochronologie.
- Historischer Teil: Im Kapitel 5 schildern wir unseren eigenen Weg bei der Auseinandersetzung mit der C14-Methode und der Dendrochronologie. So entstand eine »Chronologie der Umwege« Sie nachzuvollziehen dürfte das Verständnis unserer Thesen unterstützen. Im Kapitel 6 gehen wir auf die Entstehungsgeschichte der C14-Methode ein. Hier kann man erkennen, wie sehr Vorurteile darüber, wie sich die Natur verhält, eine verhängnisvolle Rolle spielten. Im übrigen sind diese Vorurteile heute noch so wirksam wie damals selbstverständlich.

## 1.1 Geochron Man

»Geochron Man« kann das Alter organischer Proben ermitteln, indem er diese einfach verspeist. Auf diese Weise möchte er auch den betäubt am Boden sitzenden Dendrochronologen unterstützen, hat dieser doch gerade sein Werkzeug abgebrochen, mit dem er einen Tausende von Jahrringen umfassenden Kern aus einem Baum herausarbeiten wollte.

Dieses Bild entstammt einem kurzen Comic, der zusammen mit dem Text des Vortrages von C.W. Ferguson anlässlich der 8. Internationalen Konferenz über Radiokarbon-Datierung von 1972 gedruckt worden war. Nie wieder hat sich ein Wissenschaftler an einer solchen Stelle getraut (oder auch trauen können), dieses ungewöhnliche Mittel einzusetzen, um eine Aussage zu vermitteln. Vielleicht konnte ein solcher Stilbruch auch nur von jener Person hingenommen werden, die drei Jahre zuvor die C14-Methode nach einem Jahrzehnt fortwährender Ungewißheit über ihren Fortbestand vor dem drohenden Untergang gerettet hatte. 1969 hatte Ferguson eine Baumringchronologie zur Umrechnung eines C14-Alters in ein Kalenderjahr präsentiert. Dadurch war der ständig wachsende Zweifel, ob die C14-Methode jemals zu glaubwürdigen chronologischen Aussagen kommen könnte, endlich besänftigt worden. Wir weisen in diesem Buch nach, daß Ferguson dies nur gelungen war, weil er sich fundamental auf bestimmte Grundannahmen der C14-Methode abgestützt hatte, die sich im Nachhinein aber als falsch herausstellten. Seine Baumringchronologie ist falsch – genauso wie alle daraus abgeleiteten Datierungen.



- Spezieller Teil: In den Kapiteln 7, 8 und 9 analysieren wir die Grundlagen insbesondere der C14-Methode, aber auch der Dendrochronologie. Kapitel 7 konzentriert sich auf die Statistik, Kapitel 8 auf die zahlreichen, auch systemimmanenten Fehlereinflüsse auf das Datierungsergebnis und Kapitel 9 auf die Probleme der Kalibrierung; im Kapitel 9 wird ganz systemimmanent der C14-Methode der Todesstoß versetzt.

Um den Umgang mit den umfangreichen Verweisen zu Bildern und Literatur zu vereinfachen, haben wir folgende Maßnahmen ergriffen:

- Auffinden der Bilder: Im Text werden die Verweise auf Bilder oder spezielle Textboxen mit farblich invertierten Ziffern vorgenommen (siehe beispielsweise Bild **1.1**). Das soll das Auffinden von Textstellen erleichtern, in denen auf ein bestimmtes Bild Bezug genommen wird. Gleichzeitig erscheint am rechten Rand der Doppelseite, auf der das Bild oder die Textbox plaziert ist, ein schwarzer Kasten mit der zugehörigen Nummer. So kann jedes gesuchte Bild ohne unnötige Verzögerungen gefunden werden, indem das Buch auf der Suche nach dem Bild wie ein »Daumenkino« durchgeblättert wird.
- Auffinden eines Literaturhinweises: Im Text erscheinen nur Kurzverweise auf weiterführende bzw. zitierte Literatur [Blöss/Niemitz 1997, 15]. Die Literaturliste am Ende des Buches wird – ähnlich wie bei den Bildern – durch die Platzierung der laufenden Anfangsbuchstaben der Autoren unterstützt.
- Unsere Thesen: Im Verlauf des Buches fassen wir jede als Kernaussage zu verstehende These in einer Textbox am Seitenrand erneut zusammen.

Abschließend noch folgende Anmerkungen:

- Gebrauch von »C14«: Wir verzichten aus Gründen der Lesbarkeit im eigenen Text auf die an sich korrekte Formel  $^{14}\text{C}$  für das radioaktive Kohlenstoffisotop und verwenden stattdessen stets »C14«. Dasselbe gilt auch für andere Isotopenbezeichnungen wie N14 etc..
- »C14-Konzentration« und »C14-Aktivität«: Beide Begriffe werden stets so verwendet, daß sie auf das Verhältnis von C14 zu C12 Bezug nehmen. Die »C14-Konzentration« drückt das Isotopenverhältnis C14/C12 aus, die »C14-Aktivität« die Zerfallsrate bezogen auf eine Gewichtsmenge des Gesamtkohlenstoffs (als Einheit z.B. Zerfallsereignisse pro Minute und Gramm Kohlenstoff [counts / min •  $g_{\text{carbon}}$ ]). Aus der C14-Aktivität einer Kohlenstoffprobe kann in Kenntnis der C14-Halbwertszeit also auch auf die C14-Konzentration zurückgeschlossen werden. Die Beschleuniger-massenspektrometrie (AMS) mißt die C14-Konzentration direkt.

Leser, die mit den Themen C14-Methode und Dendrochronologie gut vertraut sind, können ohne weiteres mit der Lektüre des Kapitels 2 beginnen. Diejenigen Leser, die ihr Wissen auffrischen oder ergänzen wollen, finden entsprechende Zusammenfassungen auf den nun folgenden Seiten.

## 1.2 Die Idee der C14-Methode

Die Idee zur technisch-naturwissenschaftlichen Altersbestimmung archäologischer Proben durch die C14-Methode kam W.F. Libby, als er 1939 in einem Artikel von S.A. Korff Hinweise auf die Produktion von C14 in der Atmosphäre entdeckt hatte. Er faßte daraufhin folgende Vermutungen zusammen:

- 1) Neben dem normalen Kohlenstoff C12 müsse ein gewisser (vermutlich unglaublich geringer und möglicherweise nie nachweisbarer) Anteil des atmosphärischen Kohlendioxids radioaktives C14 enthalten.
- 2) In allen lebenden Organismen, deren Stoffwechsel atmosphärisches Kohlendioxid miteinbezieht, sollte dieselbe C14-Konzentration bestehen.
- 3) Da C14 radioaktiv ist und zerfällt, müßte in Überresten toter Organismen weniger C14 vorhanden als in noch lebenden Organismen und zwar um so weniger je älter die Überreste sind.

Somit sollte sich auf Basis des Zerfallsgesetzes für radioaktive Elemente das Alter der jeweiligen Probe aus der Höhe der verbliebenen Radioaktivität errechnen lassen. Libby formulierte seinerzeit drei Voraussetzungen, deren Erfüllung ihm für das ordentliche Funktionieren dieser »C14-Methode« unbedingbar erschien:

- 1) Radioaktives C14 muß in der Atmosphäre ständig und gleichförmig erzeugt werden.
- 2) Die Atmosphäre muß sich immer relativ schnell und zugleich weltweit durchmischt haben, so daß überall auf der Erde seit Zehntausenden von Jahren gleichförmige Bedingungen herrschen.
- 3) C14 muß eine Halbwertszeit von deutlich höher als 1.000 Jahren aufweisen, damit sich auch in allen anderen Kohlenstoffreservoirs – Ozeanen, Humus etc. – ein allseits gleichförmiges Niveau der C14-Konzentration einstellt.

Aus diesen Voraussetzungen leitete Libby ein Szenario ab, welches das allgemeine Verständnis der von ihm technisch realisierten C14-Methode bis heute bestimmen sollte:

- Während des Stoffwechsels zu Lebzeiten stellt jeder Organismus ein Abbild der Isotopenzusammensetzung der Atmosphäre dar. Damit spiegelt er insbesondere das atmosphärische Gemisch der natürlich vorkommenden Isotope des Kohlenstoffs – C12, C13 und C14 – wieder.
- Beendet ein Organismus infolge Todes seinen Stoffwechsel mit der Außenwelt, so tauscht er auch keine Kohlenstoffatome mehr aus. Während die C14-Konzentration in der Außenwelt allzeit konstant bleibt, nimmt sie nun innerhalb des toten Organismus exponentiell nach den Gesetzen des radioaktiven Zerfalls ab.
- Je länger es also her ist, daß ein Organismus seinen Stoffwechsel beendet hat, desto geringer muß der Anteil der C14-Atome im Verhältnis zu der Menge unverändert gebliebener C12-Atome sein.
- Das Ausmaß der Abnahme dieses Verhältnisses kann direkt nach dem Gesetz des radioaktiven Zerfalls in die Zeit umgerechnet werden, die seit dem Ende seines Stoffwechsels mit der Außenwelt verstrichen ist.
- Der Zeitpunkt, an dem der Stoffwechsel einer Probe endete, kann also errechnet werden (Bild **1.2**), wenn
  1. die C14-Radioaktivität in der Probe sowie
  2. die heute herrschende C14-Radioaktivität in der Atmosphäre gemessen wurde und
  3. die Halbwertszeit von C14 bekannt ist.

### 1.3 Wesentliche Voraussetzungen für die C14-Methode ...

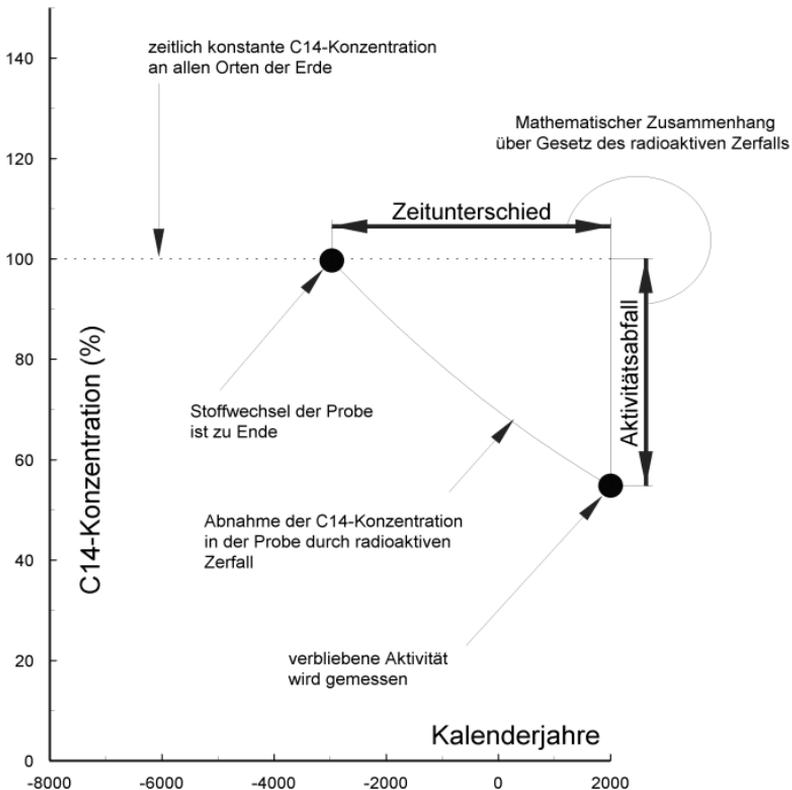
Dieses bestechend einfache Szenario bedurfte Libbys anfänglicher Meinung nach der strikten Gültigkeit folgender 5 Annahmen:

- 1) Meßbarkeit gegenüber der Hintergrundstrahlung: Die zu messende C14-Strahlung muß sich deutlich von der kosmischen und terrestrischen Hintergrundstrahlung abheben, um eine bestimmte Meß- und damit Altersbestimmungsgenauigkeit zu erhalten.
- 2) Abschottung gegen Kontamination: Die untersuchte Probe darf während der Zeit der Lagerung zwischen ihrem Absterben und der aktuellen Untersuchung keinerlei Kohlenstoffaustausch gehabt haben, also nicht durch Fremdkohlenstoff mit abweichender Isotopenzusammensetzung »vergiftet« worden sein.
- 3) Räumliche Invarianz durch sofortige Verteilung in der Atmosphäre (das »Simultanitätsprinzip«): In allen gleichzeitig an verschiedenen Orten le-

## 1.2 Das Fundamentalprinzip: ein Sonderfall der Chronologie der C14-Konzentration der Atmosphäre

Das Fundamentalprinzip sagt die zeitliche Konstanz und die globale Gleichförmigkeit der C14-Konzentration in der Atmosphäre voraus. Damit ist automatisch die Kenntnis der C14-Konzentration gegeben – die sog. »Startaktivität« –, mit der eine beliebige Probe in der Vergangenheit ihren Stoffwechsel beendet hat. In diesem Fall kann die Zeit, die seit dem Ende des Stoffwechsels der Probe bis zur Messung verstrichen ist, unmittelbar aus der gemessenen Restaktivität auf der Basis des Gesetzes für den radioaktiven Zerfall errechnet werden.

Jede Einschränkung des Fundamentalprinzips zieht die Notwendigkeit nach sich, die vergangenen C14-Konzentrationsänderungen in der Atmosphäre chronologisch komplett zu rekonstruieren. Weil ohne Kenntnis der Startaktivität nur der exponentielle Verlauf der radiometrischen Vergangenheit der Probe nicht aber ihr Alter errechnet werden kann (Bild 1.3), erschließt sich dieses ausschließlich aus Vergleichen mit der rekonstruierten radiometrischen Vergangenheit der Atmosphäre (Bild 1.5).



benden Organismen muß zur allen vergangenen Zeitpunkten grundsätzlich dieselbe C14-Konzentration herrschen.

- 4) Organische Invarianz: In allen gleichzeitig an einem Ort lebenden unterschiedlichen Organismen muß dieselbe C14-Konzentration geherrscht haben. Ihr Stoffwechsel darf mithin nicht in unterschiedlichem Maße zwischen den Kohlenstoffisotopen unterscheiden.
- 5) Zeitliche Invarianz durch global konstante C14-Produktion und global konstanten C14-Zerfall (das »Fundamentalprinzip«): Produktion und Zerfall von C14 befinden sich seit mindestens 50.000 Jahren so genau im »Gleichgewicht«, daß die C14-Konzentration seitdem überall auf der Erde konstant gewesen ist. Nur dadurch wird die Aussage möglich: »Aus einem C14-Wert kann das zugehörige Alter direkt errechnet werden.«

Libbys größtes Problem bestand anfänglich darin, Bedingung 1 zu gewährleisten, weil die zu messende Strahlung nur einen Bruchteil der Intensität der störenden Hintergrundstrahlung ausmachte. Als er nach langem Suchen eine meßtechnische Lösung für dieses Problem gefunden hatte, überprüfte er 1949 die Gültigkeit der Bedingung 3 (Simultanitätsprinzip). Dazu untersuchte er bei 18 modernen, gleichaltrigen Hölzern aus aller Welt, ob und wie weit sie dieselbe C14-Konzentration aufwiesen. Das von ihm veröffentlichte Untersuchungsergebnis bezifferte die Unsicherheit in der Altersbestimmung, die wegen örtlicher Streuungen der C14-Konzentration zu erwarten sei, mit wenigen Jahrzehnten. Libby sah damit die Bedingung 3 als erfüllt an.

Noch im selben Jahr konnte er überzeugende Hinweise präsentieren, daß zusätzlich zur Bedingung 3 auch die Bedingung 5 (Fundamentalprinzip) zutreffen müsse. Dazu bestimmte er die C14-Konzentration in ausgewählten archäologischen Proben, deren Absolutalter als genau bekannt galten. Er stellte umfassende Übereinstimmung zwischen ihnen und denjenigen Werten fest, die bei allzeit konstanter C14-Konzentration in der Atmosphäre auch zu erwarten gewesen wären.

Wenn sich die Bedingung 5 (Fundamentalprinzip) so umfassend bewahrheiten ließ, dann mußte die Bedingung 2 – das Ausbleiben von Kontaminationen – automatisch als allgemein erfüllt betrachtet werden. Nur die Bedingung 4 (organische Invarianz), also die Aufnahme der Isotope durch verschiedene Organismen jeweils im gleichen Verhältnis, traf offenbar nicht zu. Man erkannte nämlich bei verschiedenartigen, gleichaltrigen Organismen systematische Abweichungen in der C14-Konzentration.

## 1.4 ... und die heutige Beurteilung ihrer Gültigkeit

Im Laufe der Zeit stellte sich ganz »offiziell« heraus, daß alle oben angeführten und ursprünglich für unverzichtbar gehaltenen Voraussetzungen bis auf die Bedingung 3 (Simultanitätsprinzip) nicht zutreffen. Die C14-Methode versucht sich zu retten. Sie unterstellt den Einflüssen, die die einzelnen Voraussetzungen zunichte machen, einen systematischen Charakter. Dadurch sollen die Einflüsse im Einzelnen quantifizierbar und das gemessene C14-Alter entsprechend »korrigierbar« werden. Die Gründe für die Ungültigkeit der genannten Voraussetzungen und für deren tatsächlich fehlende Korrigierbarkeit stellen sich stichwortartig so dar:

- 1) Während das Problem der Hintergrundstrahlung an sich beherrschbar ist, sind die Abweichungen von Labor zu Labor bis heute von erheblichem Ausmaß. Es gibt immer noch kein Verfahren, wie die Labors systematisch zu vergleichbaren Ergebnissen kommen können.
- 2) Das Problem der Kontamination ist immer gegeben und muß deshalb generell durch chemische Waschungen sowie durch das Ansetzen eines entsprechenden Fehlerbeitrages für diese Korrektur berücksichtigt werden, ohne den Einzelfall quantitativ genauer beurteilen zu können.
- 3) Offiziell kennt man die Verletzung des Simultanitätsprinzips nur als »Reservoir-effekte«, die vereinzelt zu C14-Kontaminationen bestimmter Organismen führen. Aus nicht-atmosphärischen lokalen Reservoiren wie zum Beispiel Vulkanen oder aufsteigendem Tiefseewasser können die unter diesem Einfluss lebenden Organismen über ihren Stoffwechsel Kohlenstoff mit abweichender Isotopenzusammensetzung aufnehmen bzw. einbauen. Tatsächlich tritt aber eine viel allgemeinere Verfälschung durch globale und schnelle Bewegungen von C14 und C12 auf.
- 4) Die Organismen können zwischen den Kohlenstoffisotopen unterscheiden. Sie inkorporieren auf unterschiedliche Weise C14-Atome, was zu Altersdrifts von bis zu 700 Jahren führt. Dieser Effekt der »Isotopenfraktionierung« wird anhand der Messung der C13-Konzentration korrigiert, ohne letztlich Sicherheit darüber zu haben, ob das Inkorporationsverhalten über die Jahrtausende gleich geblieben ist.
- 5) Die Annahme zeitlicher Invarianz der C14-Konzentration in der Atmosphäre erkannte man zuerst als falsch (»Suess-Effekt«, »de-Vries-Effekt« etc.). Durch konsequente wenn auch unzulässige Anwendung der Voraussetzung 3 (Simultanitätsprinzip) gelangte man zur Anerkennung einer glo-

bal gültigen von der Dendrochronologie gelieferten Kalibrierkurve, mit der ein C14-Alter die letzte und zugleich wichtigste Korrektur erfährt.

Jede C14-Datierung verlangt, alle systematisierbaren Einflüsse, die durch diese Fehler bewirkt werden, zu berücksichtigen. Diese Einflüsse korrigieren den eigentlichen Meßwert. Selten werden dabei die entsprechenden Unsicherheiten, denen auch diese Korrekturen unterliegen (Korrekturfehler), in der notwendigen Akribie mit berücksichtigt. Selbst bei Präzisionsmessungen addieren sie sich normalerweise zu mehreren Jahrhunderten. Die Annahmen 1 - 4 (Meßbarkeit, Kontamination, Simultanitätsprinzip und Organische Invarianz) werden im Kapitel 8 eingehend analysiert. Die Annahme 1 findet unter historischen Gesichtspunkten auch im Kapitel 6.4 Berücksichtigung. Die Annahme 5 (Fundamentalprinzip) ist Gegenstand des ganzen Kapitel 9, in welchem die mangelnden Voraussetzungen für eine einheitliche Kalibrierung beschrieben werden.

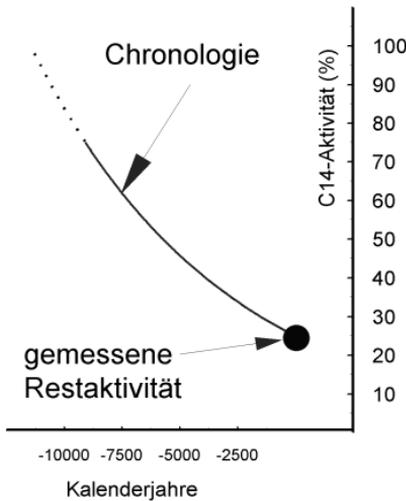
## 1.5 Fundamentalprinzip und Simultanitätsprinzip

Libby kämpfte lange Zeit dagegen, das Fundamentalprinzips fallen zu lassen, und war sogar – im Verein mit etlichen Historikern – bereit, die anerkannte altägyptische Chronologie dort in Frage zu stellen, wo sie im Widerspruch zur C14-Chronologie Altägyptens stand. Doch ab 1958 wurde mit C14-Messungen an langen Baumringsequenzen immer unabweisbarer, daß die C14-Konzentration in der Atmosphäre in der Vergangenheit auf keinen Fall konstant gewesen sein konnte. Mit seiner ursprünglichen und – wie wir heute wissen – leider falschen Verifizierung des mächtigen Fundamentalprinzips hatte Libby den Historikern etwas beschert, was diesen aus eigener Anstrengung heraus noch nie gelungen war: Die Erstellung einer jahrgenaue und lückenlosen Chronologie. In diesem Fall handelte es sich allerdings nicht um die Chronologie einer lokalen Herrscherfolge, sondern um die der globalen Isotopenzusammensetzung der Atmosphäre.

Wer nämlich mit Libby von der Gültigkeit des Fundamentalprinzips ausging, der befand sich automatisch im Besitz des Wissens über die C14-Konzentration der Atmosphäre für jeden beliebigen Ort der Erde und für jeden beliebigen Zeitpunkt der zurückliegenden Geschichte: Zu jeder Zeit und allerorten sollte diese identisch mit dem heute an einem beliebigen Ort gemessenen Wert sein und damit zugleich jenes chronologische Wissen repräsentieren, ohne das die C14-Methode grundsätzlich nicht funktionieren kann. Nur weil sich die C14-Methode im Besitz dieser Chronologie wähnte, durfte und

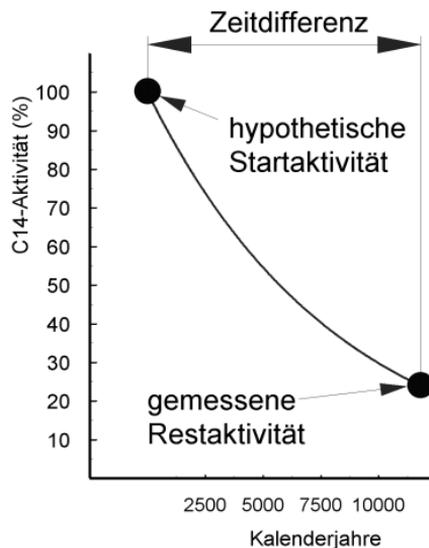
### 1.3 Chronologie ist noch kein Datum

Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls erlaubt die Bestimmung der Zeit zwischen zwei Ereignissen nur, wenn die betreffenden Aktivitätswerte bekannt sind. Von einer archäologischen Probe kann aber nur seine aktuelle Restaktivität bestimmt werden. Die Startaktivität ist dagegen unbekannt, weil die C14-Konzentration in der Atmosphäre tatsächlich nicht konstant und deswegen nicht aus Augenblickswerten extrapolierbar ist. Demnach kann nur die Chronologie der Radioaktivität errechnet werden. Die Altersbestimmung selber geschieht durch Vergleich der C14-Chronologie der Probe mit der der Atmosphäre (Bild 1.5).



Chronologie  
und nicht ...

... "Alters-  
bestimmung"



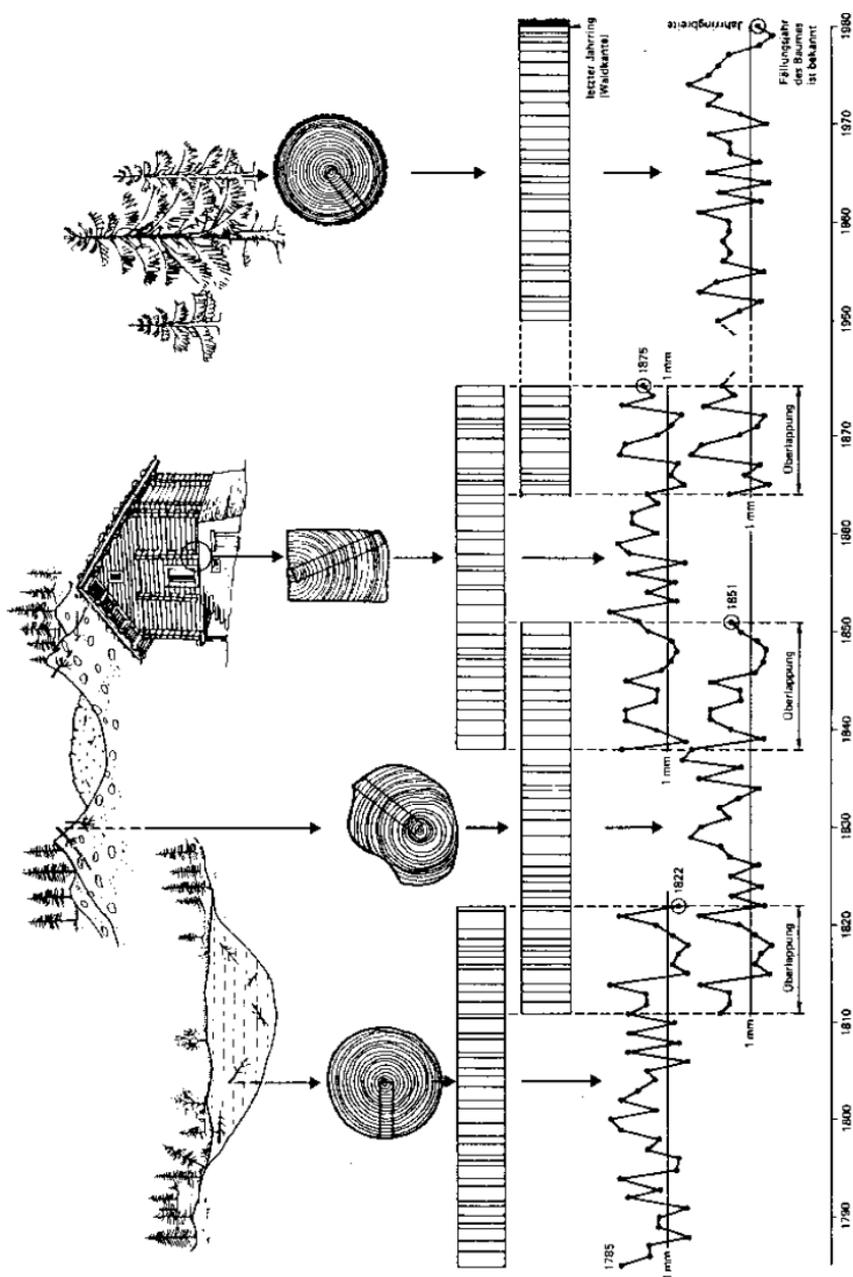
konnte man von der gemessenen Restradioaktivität der Probe unmittelbar auf ihr wahres Alter zurückschließen. Das Bild **1.2** zeigt, wie sich bei Gültigkeit des Fundamentalprinzips das Alter der Probe eindeutig berechnen bzw. geometrisch bestimmen läßt. Es genügen dazu folgende Informationen:

- Meßwert für die aktuelle C14-Aktivität der Atmosphäre,
- Meßwert für die verbliebene C14-Aktivität in der Probe,
- Gesetzmäßigkeit des exponentiellen Verlaufs der Abnahme der C14-Aktivität bzw. der C14-Konzentration innerhalb der Probe (Annahme: keine Verunreinigung während der »Lagerzeit«),
- Halbwertszeit von C14.

Obwohl es nicht sofort ersichtlich erscheint, war die C14-Methode von Beginn an von einer lückenlosen und umfassenden Chronologie abhängig, nämlich der der C14-Konzentration in der Atmosphäre. Solange auf das Fundamentalprinzip gesetzt werden konnte, blieb dieses Angewiesensein auf eine Chronologie allerdings verborgen. Die heutzutage anerkannte Abhängigkeit der C14-Methode von der Dendrochronologie ist nur eine Spielart davon. Daß es ohne Chronologie gar nicht gehen kann, wurde in dem Moment offenbar, als die Gültigkeit des Fundamentalprinzips aufgrund verschiedener Meßergebnisse in Frage gestellt werden mußte. Dieser Befund verbot es, ein »C14-Alter«, das bislang aus der gemessenen Restradioaktivität direkt errechnet worden war, unmittelbar als Absolutalter auszugeben. Nun mußten viele Vergleichsproben unterschiedlichen und bekannten Alters vorgelegt werden, um über den Vergleich mit deren C14-Radioaktivitäten auf eine mögliche Übereinstimmung des Alters zu schließen. Damit war die C14-Methode neu definiert. Sie war nun nicht mehr eine Methode zur Altersbestimmung organischer Proben, sondern eine Methode zur zeitlichen Synchronisierung organischer Proben durch Vergleich ihrer C14-Aktivitäten (vergleiche Bilder **1.3** und **1.5**). Die Bestimmung des Absolutalters konnte nicht mehr direkt vorgenommen werden, sondern blieb anderen Methoden – hier der Dendrochronologie – überlassen.

Wer die Synchronisierung oder auch »Kalibrierung« einer C14-Messung vornehmen wollte, mußte folglich über die komplette Chronologie der offenbar veränderlichen C14-Konzentration der Atmosphäre verfügen. Da sich aber die verführerisch simple Chronologie, die unmittelbar aus dem Fundamentalprinzip abgeleitet werden konnte, als falsch herausgestellt hatte, war nun »Ersatz« zu beschaffen. Die einzig verbliebene Legitimationsbasis für die C14-Methode bestand nunmehr in dem Simultanitätsprinzip (vergleiche oben die Forderung 3), denn eine Kalibrierung ist nur dann sinnvoll, wenn alle

## 1.4 Das Überbrückungsverfahren mit Jahrringkurven



gleichaltrigen und von beliebigen Orten auf der Erde stammende Proben zu Lebzeiten (und natürlich auch nach der gesamten Lagerzeit) stets auch dieselbe C14-Konzentration besessen haben.

In diesem Stadium – Anfang der 60er Jahre – trat folgerichtig die Dendrochronologie auf den Plan. Sie verfügt mit ihren Baumringsequenzen über eine Chronologie, die Jahr für Jahr Auskunft über die einst herrschende atmosphärische C14-Konzentration geben kann – jedenfalls für den Zeitraum, in dem die Jahrringchronologie komplett zur Verfügung steht. Die Dendrochronologie konnte aber erst mit Hilfe der C14-Methode sowohl in Amerika als auch in Europa in die früh- und vorgeschichtliche Zeit vorstoßen. Über ein Jahrzehnt – bis etwa 1970 – gab es also eine Art »Hängepartie«: Einerseits benötigte die C14-Methode eine komplette Baumringchronologie, die sich bis zum Ende der Eiszeit vor 12.000 Jahren erstrecken mußte. Andererseits war die Dendrochronologie dringend auf Hilfe bei der Vordatierung ihrer Hölzer angewiesen, um genau diese erstellen zu können. Wie kam man sich wechselseitig entgegen, um diese Situation der gegenseitigen Abhängigkeit zu überwinden?

Die Antwort lag im systematischen Ausnutzen des Simultanitätsprinzips. Weiterentwickelt als »wigggle-matching« ging es in das methodische Handwerkszeug der Dendrochronologie über. Das »wigggle-matching«, ein Musteranalyse-Verfahren der C14-Konzentrationsschwankungen, bot die Möglichkeit, Baumringsequenzen als zeitgleich zu erkennen (zu synchronisieren), deren forstbotanische Charakteristiken nicht (oder noch nicht) miteinander verglichen werden konnten (siehe Bild **2.5**). Deshalb wurden die Baumringsequenzen statt über Ringdickenmuster ersatzweise über den Vergleich ihrer jeweiligen C14-Muster bzw. C14-Konzentrationsschwankungen zeitlich – vor allem ohne das der Dendrochronologie ansonsten immanente Mehrdeutigkeitsproblem – zueinander plazierte. Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, warum die Dendrochronologie nicht aus eigener Kraft ins Ziel kommen konnte.

## 1.6 So funktioniert die Dendrochronologie

Unter Dendrochronologie wird gewöhnlich ein Verfahren zur Altersbestimmung archäologischer Holzfunde verstanden. Doch ähnlich wie bei der C14-Methode liegt die Leistung der Methode gar nicht in der Altersbestimmung, sondern in der Synchronisierung von Holzfunden anhand eines Vergleichs ihrer Baumringdickenmuster (Ringbreitenfolgen, Jahrringstrukturen). Dabei wird die individuelle Jahrringstruktur interessierender Hölzer mit der Jahr-

ringstruktur einer für die Region gültigen sogenannten »Mittelkurve« (auch »Standard-« oder »Mastersequenz« genannt) verglichen. Wo deutliche Ähnlichkeiten zwischen den Jahrringstrukturen vorliegen, kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit von einer zeitlichen Synchronität ausgegangen werden. Diese Mittelkurve entsteht ihrerseits durch die entsprechende Auswertung möglichst vieler einzelner Hölzer aus einer begrenzten Region. Je mehr synchron laufende Hölzer diese Mittelkurve aufweist, desto typischer kann ihr Verlauf angenommen werden und desto wahrscheinlicher ist das Auffinden weiterer echter Synchronitäten. Die Altersbestimmung selber durch Auszählen von Jahresringen wird dabei wohl kaum als die eigentliche Leistung der Dendrochronologie bezeichnet werden können.

Bei sogenannten jahrringbildenden Bäumen wachsen Jahr für Jahr verschieden dicke Ringe in Abhängigkeit vom jeweiligen Klima. Damit entstehen Ringbreitenfolgen, die typisch sind für die jeweilige

- Baumart,
- Region,
- und Epoche.

Bringt man die Bilder zweier Ringbreitenfolgen von Bäumen derselben Art, die wenigstens teilweise gleichzeitig in demselben Klimagebiet herangewachsen sind, in richtiger Zeitlage zur Deckung, so zeigt sich im allgemeinen eine mehr oder weniger große Ähnlichkeit im Wuchsverlauf. Die in Bild **1.4** gezeigte Ähnlichkeit zwischen den Jahrringkurven [nach Schweingruber 1983, 85] ist allerdings idealisiert schön, »die Wirklichkeit (dagegen) deutlich rauher« [Leuschner 1994, 124]. Durch Variation in Bodentyp, Hangneigung, Exposition und Höhenlage können auch in ideal kleinen Regionen die Jahrringkurvenmuster einzelner Bäume so unterschiedlich ausfallen, daß eine sichere Synchronisation unmöglich wird.

Ein unmittelbarer zeitlicher Bezug ist nur zwischen lebenden (rezent jahrringbildenden) Hölzern gegeben. Deshalb besteht eine wesentliche Aufgabe der Dendrochronologie darin, Kriterien zu entwickeln, nach denen aus einander mehr oder weniger ähnlichen Ringbreitenfolgen von Hölzern unbekanntem Alters die richtige, d.h. jahrgleiche Deckungslage zu bestimmen ist. Nicht jede Ähnlichkeit bedeutet Zeitgleichheit. Die Unterschiedlichkeit lokaler »Baumschicksale« verhindert es, dieses Verfahren des Mustervergleichs zu automatisieren bzw. auf eine rein statistische Auswertungen zu reduzieren. Das Material müsse zusätzlich, darauf wird immer wieder hingewiesen, durch erfahrene Dendrochronologen beurteilt werden [Leuschner 1994, 128]. Das Problem geringer Ähnlichkeit von Einzelkurven sei nämlich im Verein von Me-

thode – durch die sogenannte »Mittelkurvenbildung« – und Tugend – durch Fleiß, Erfahrung und Vorsicht – durchaus lösbar [Leuschner 1994, 125].

In Europa werden Jahrringfolgen einzelner Hölzer, die teilweise zeitgleich und in räumlicher Nachbarschaft gewachsen sind, zu sogenannten »lokalen Mastern« zusammengefaßt. Diese Zusammenfassung möglichst vieler Einzelkurven zu einer »Mittelkurve« führt zur Darstellung eines »Gruppenschicksals«, in der ein statistisch gemittelter Verlauf unter gleichzeitiger Unterdrückung individueller Ausschläge erzielt wird. Während sich einzelne irische Eichen bis zu einem Abstand der Fundorte von 70 Kilometern korrelieren lassen [Smith 1972, A92], erhöht sich dieser Abstand für den Vergleich von Stammlagen der Donau und des Oberen Mains um mehr als das Doppelte [Becker/Frenzel 1977, 46; auch Leuschner 1994, 129]. Lange und gut belegte »lokale Master« lassen sich über eine Entfernung von bis zu 300 Kilometern synchronisieren [Hollstein 1977, 16] und stellen damit einen »regionalen Master« dar. Überregionale Vergleiche wie etwa zwischen dem süd- und dem norddeutschen Raum zeigen jedoch, daß die verschiedenen Eichenholzchronologien nicht übertragbar sind [Eckstein 1984, 40]. Es gibt allerdings Verfahren, die die Auswirkung besonders markanter, überregionaler Klimaveränderungen (Weiserjahre) als Synchronismus auszuwerten versuchen [Leuschner 1994, 127].

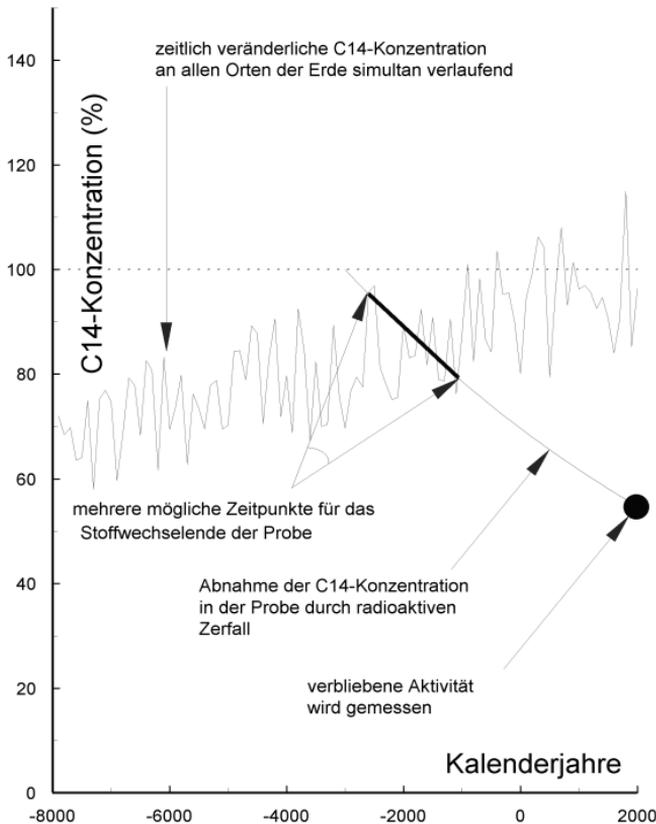
Lokale Master sind also von den individuellen Merkmalen einzelner Baumringfolgen bereinigt und damit regional typische Baumringchronologien, die in der Regel einen begrenzten Zeitraum von einigen hundert Jahren umfassen. Sie sind die Bausteine der eigentlich zu erstellenden durchgehenden Baumringchronologie, die gleichwohl regional bleiben muß. Nicht umsonst werden diese mit »süddeutsch«, »westdeutsch«, »norddeutsch« etc. bezeichnet. Solange lokale Master nicht zueinander synchronisiert sind, bleiben sie als »floating (schwimmende) chronologies« ohne absolutes Datum. Die Verkettung lokaler Master zu einer regionalen Chronologie stellt den Dendrochronologen vor spezifische Schwierigkeiten. Während lokal die zeitliche Zuordnung unter Umständen aus stratigraphischer Evidenz abgeleitet werden kann, fehlen diese Hilfen in regionaler Hinsicht. Aber was tun, wenn diese Hilfen fehlen? Überprüft man alle möglichen Überlagerungen auf Synchronität oder benutzt man als Hilfsmittel die Vordatierung?

## 1.7 Das Dilemma der Dendrochronologie

Eine Überprüfung aller theoretisch möglichen Synchronlagen zwischen zwei Hölzern erbringt in der Regel eine viel zu große Zahl möglicher Synchronitäten (von Dendrochronologen »Zufallslagen« genannt). Das ist der Grund,

## 1.5 Möglichkeiten der Altersbestimmung, wenn das Simultanitätsprinzip gültig ist

Wenn das Fundamentalprinzip (Bild 1.2) ungültig ist, dann besteht keine Möglichkeit mehr zur direkten Altersbestimmung. Deshalb zieht man sich auf das Simultanitätsprinzip zurück. Dieses ist folgendermaßen zu verstehen: In der Atmosphäre wird die C14-Konzentration nicht mehr zeitlich konstant vorausgesetzt, doch die Konzentrationsänderungen sollen sich an allen Orten der Erde gleichförmig (»simultan«) vollziehen. Das Probenalter kann also nicht mehr wie unter Gültigkeit des Fundamentalprinzips errechnet werden, sondern muß aus dem Vergleich zweier Chronologien erschlossen werden: Der errechnete Verlauf der C14-Konzentration in der Probe wird auf Übereinstimmungen mit dem rekonstruierten Verlauf in der Atmosphäre untersucht. Dabei spielt es, solange das Simultanitätsprinzip gültig ist, keine Rolle, von welchem Ort der Erde die Probe stammt und für welchen Ort der Erde die Chronologie der C14-Konzentration erstellt wurde.



weshalb kein Dendrochronologe auf das Hilfsmittel der Vordatierung verzichtet. Nur so kann er die Zahl der Zufallslagen so weit reduzieren, daß eine begründete Entscheidung möglich wird. E. Hollstein schreibt (im Hinblick auf Einzelkurven) für den Fall einer Ablösung von der Historie: »Wenn also zwei Holzproben, von denen man gar nichts weiß, auf vermutete Gleichzeitigkeit untersucht werden sollen, so kann allerdings die a-priori-Wahrscheinlichkeit für das Auffinden des richtigen Datums so klein werden, daß wenig Aussicht besteht, es auch wirklich zu finden« [Hollstein 1970, 147]. Also kann nur eine Vordatierung die Zahl der in Frage kommenden Synchronitäten so weit einschränken, daß wieder eine gute Chance besteht, unter den verbliebenen Kandidaten auch die richtige Synchronität zu bestimmen – wenn die Vordatierung stimmt.

Erschwerend kommt hinzu, daß sich für die schwimmenden Sequenzen immer wieder Synchronitäten herausarbeiten lassen, die im statistischen Sinne als hochzuverlässig angesehen werden dürfen, die aber tatsächlich falsch sind. Deshalb ist auch eine falsche Vordatierung sehr gefährlich, denn im Vertrauen auf diese können Synchronitäten zwischen überlappenden Baumringsequenzen erarbeitet werden, die nicht stimmen und damit die Masterchronologie in eine völlig falsche Richtung treiben. So droht immer Gefahr, wenn eine relativ beste Synchronlage zu früh übernommen wird, ohne sie bei verbesserter Fundlage später noch einmal in Frage zu stellen.

Solange sein regionaler Master bzw. seine Chronologie noch nicht komplett ist, steht der Dendrochronologe sowohl mit einer einzelnen Ringbreitenfolge als auch mit einem schwimmenden lokalen Master in der Hand stets vor einem Dilemma: Selbst die aussichtsreichste Synchronität zwischen der zu plazierenden Sequenz und seiner schon vorhandenen Chronologie kann immer noch schlechter sein als diejenige, die sich mit Bereichen erzielen ließe, die erst bei weiterer Vollständigkeit der Chronologie getestet werden können! Soll er die Sequenz nun teilweise oder vollständig überlappend einbauen oder soll er sie als noch schwimmend plazieren? Angesichts dieses Dilemmas ist er stets auf Hilfsmittel der Vordatierung angewiesen, muß sich zugleich aber die Frage stellen, inwieweit er diesen bei der Lösung des Problems trauen darf.

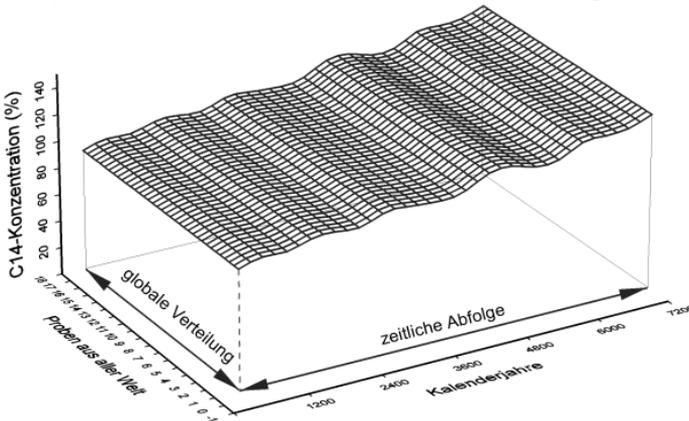
## 1.8 Absolutdatieren durch »wigggle-matching«

Wer um das tiefgreifende Dilemma der Dendrochronologie weiß, kann sich über ihre Versuche, sich umfassend auf eine leistungsfähige Methode der Vordatierung abzustützen, nicht mehr wundern. Wer zusätzlich die Randbedingungen und Tücken einer statistischen Auswertung kennt, wird verlangen

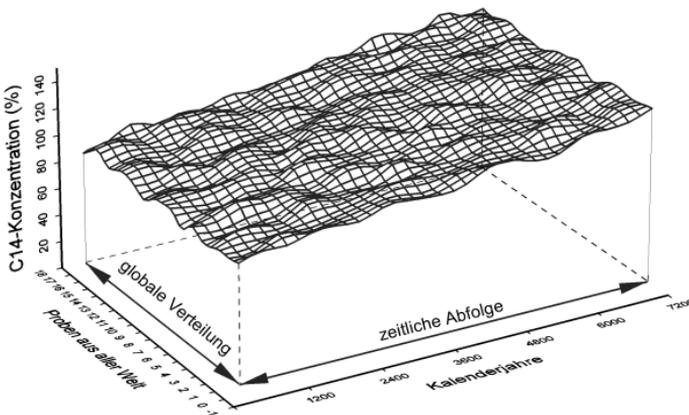
## 1.6 Simultane bzw. ungleichförmige Änderungen der C14-Konzentration in der Atmosphäre

In Bild a) vollzieht sich die zeitliche Änderung der C14-Konzentration in der Atmosphäre auf der ganzen Erde gleichförmig bzw. »simultan«, in Bild b) sind dem allgemeinen Trend lokale Abweichungen überlagert, was die Ungültigkeit des Simultanitätsprinzips bedeutet. Das führt dazu, daß zeitliche C14-Muster von verschiedenen Orten nicht mehr synchron verlaufen und daß mithin nur die C14-Daten von Proben, die vom gleichen Ort stammen, zeitlich synchronisiert werden dürfen.

a) simultane Konzentrationsänderungen



b) ungleichförmige Konzentrationsänderungen



müssen, daß Dendrochronologen unabhängig von Vordatierungen alle möglichen Synchronlagen mit allen zur Verfügung stehenden Hölzern prüfen. Anderenfalls kann nicht anerkannt werden, daß Vordatierungen keinen Einfluß auf die Chronologie genommen haben – so schön und komplett die Chronologie am Ende auch aussehen mag. Damit sind die Gründe umrissen, warum eine Kritik an der C14-Methode unmittelbar auf all diejenigen Baumringchronologien durchschlagen muß, die mit Hilfe von C14-Daten errichtet worden sind. Im Folgenden wird das Verfahren geschildert, auf das sich Dendrochronologen auf beiden Seiten des Atlantik bei der Verwendung von C14-Daten gestützt haben, um chronologische Ordnung in ihre schwimmenden Baumringsequenzen zu bekommen. Dazu muß noch einmal näher auf die Chronologie der C14-Konzentration der Atmosphäre eingegangen werden.

Das Bild **1.5** offenbart ein Dilemma besonderer Art. Selbst wenn man nämlich über eine lückenlose Chronologie der C14-Konzentration in der Atmosphäre verfügen sollte, um mit ihr ein gemessenes C14-Alter kalibrieren zu können, so muß das noch nicht bedeuten, auch das zeitliche Ende des Stoffwechsels des Organismus eindeutig bestimmen zu können. Wenn nämlich für den fraglichen Zeitraum starke Schwankungen rekonstruiert wurden, dann ergeben sich jetzt mehrere mögliche Zeitpunkte. Schwankungen der C14-Konzentration, die zu solchen Mehrdeutigkeiten führen, werden auch »wiggles« genannt. So ärgerlich die ermittelten Schwankungsmuster in der C14-Konzentration der Atmosphäre einerseits auch sein mögen, so hilfreich können sie sich andererseits im Zusammenhang mit dem Versuch erweisen, über den Vergleich solcher Muster zeitliche Synchronisierungen zwischen ihnen zu erreichen. Zusätzlich kann immer dann, wenn eines der Muster bereits mit einem Absolutdatum verbunden ist, auch für die anderen synchronen Muster ein solches abgeleitet werden. Die wichtigste Voraussetzung für diese Vorgehensweise, die letztlich auf einer Mustererkennungsstrategie basiert, ist natürlich die umfassende Gültigkeit des Simultanitätsprinzips, nach dem die C14-Konzentration der Atmosphäre sich global gleichförmig entwickelt.

Jeder Synchronisationsversuch (genauso wie jeder Kalibrierungsversuch für ein einzelnes C14-Datum) wäre sinnlos, wenn die C14-Konzentration an verschiedenen Orten der Erde unterschiedlich rekonstruiert werden muß. Das Simultanitätsprinzip ist zweifellos die wichtigste verbliebene Voraussetzung der C14-Methode. Mit seiner Ungültigkeit wäre das eleganteste Hilfsmittel dahin, mit dem schwimmende Baumringchronologien vordatiert werden können. Das zeigt sehr deutlich das Bild **1.6**: Nur wenn an allen Orten der Erde die atmosphärische C14-Konzentration stets gleich ist und auf identische Weise eingepreßt wurde, können hinterher entsprechende Muster miteinander

## 1.7 Produktion und Zerfall von C14 – konventionell

Die heute gebräuchlichen Kalibrierkurven für C14-Daten beruhen in ihrer Konstruktion auf der Annahme global gleichförmiger Schwankungen der atmosphärischen C14-Konzentration. So soll sich ein An- und Abschwellen der C14-Produktion in global gleichförmig schwingenden »wiggles« widerspiegeln. Daß nur Diffusion zu einem »wiggles« führt und daß dieser damit ein genuin lokales Phänomen ist, wurde erst in jüngster Zeit von Ozeanographen erkannt, ohne daß daraus aber Rückschlüsse über die Verwendbarkeit der aktuellen Kalibrierkurven abgeleitet worden sind.

Aus der Schätzung der Menge an global vorhandenem Kohlenstoff (rund  $42 \cdot 10^{15}$  Kilogramm) und dem relativen C14-Anteil (rund  $1.5 \cdot 10^{-10}$  %) ergibt sich rechnerisch eine Menge von rund 7.5 kg C14, die jährlich radioaktiv zerfällt. Ausschließlich diese Menge müsste jährlich nachproduziert und rasch auf alle Reservoir verteilt werden, wenn von stationären Verhältnissen gesprochen werden soll. Die Realität sieht dagegen anders aus (vergleiche Bild **1.8**).

7.5 kg C14 werden  
jedes Jahr global produziert

■



7.5 kg C14 zerfallen  
global jedes Jahr

verglichen werden. Ein Vergleich von zeitlichen Mustern verschiedener Orte, wie sie in der Graphik b) des Bildes **1.6** zusammengefaßt sind, muß in die Irre führen.

Nur solange, wie sich Schwankungen der C14-Konzentration an allen Orten der Erde auf gleiche Weise abspielen und in die Organismen einprägen, kann auf diese Methode des »wigggle-matching« gesetzt werden. Anderenfalls kommt es zu Fehlsynchronisierungen und damit zur Ableitung falscher Chronologien. Trotz eindeutiger Hinweise, daß das Simultanitätsprinzip nicht in der erforderlichen Strenge gültig sein konnte, wurde »wigggle-matching« jahrzehntelang als sprichwörtliche »ultima ratio« eingesetzt, um die europäischen Baumringchronologien anhand von Mustervergleichen unter Abstützung auf die weltweit einzige komplette Baumringchronologie aus Amerika – die Borstenkiefer- bzw. Bristlecone-Pine-Chronologie – zu erstellen. Wer »wigggle« als Grundlage von Vordatierungen verwendet, muß sich darüber im Klaren sein, wie diese zustande kommen und ob diese mit weltweit synchronen Konzentrationsschwankungen überhaupt vereinbar sind. Genau an dieser Stelle mußten wir die größte von der C14-Methode begangene Verfehlung feststellen. Wer die möglichen Ursachen solcher »wigggle« zu ergründen versucht, wird kaum in Versuchung geraten, diese Muster über größere Entfernungen synchronisieren zu wollen.

## 1.9 »Wigggle« offenbaren eine chaotische Welt

Das Bild **1.7** veranschaulicht die ursprüngliche Vorstellung von dem stabilen Zustand der C14-Konzentration in allen dafür in Frage kommenden Reservoiren der Erde – Atmosphäre, Biosphäre, Humus, sowie Oberflächen- und Tiefenwasser der Ozeane: Die C14-Konzentration sei überall auf der Erde nahezu gleich und habe sich seit langem schon auf ein Niveau eingependelt, bei dem der jährliche Zerfall (ca. 0.12 ‰ des Gesamtvorkommens) gerade von einer seit Urzeiten konstanten C14-Produktion in der oberen Atmosphäre kompensiert würde. Dieser langfristig ausgeglichene Zustand zwischen Produktion und Zerfall wird durch die beiden maßstabsgetreu gezeichneten Kästchen rechts/unten und links/oben von dem großen Kasten wiedergegeben, der wiederum für das globale irdische Kohlenstoffreservoir steht. Die Wirklichkeit ist von solchen stationären Zuständen allerdings weit entfernt.

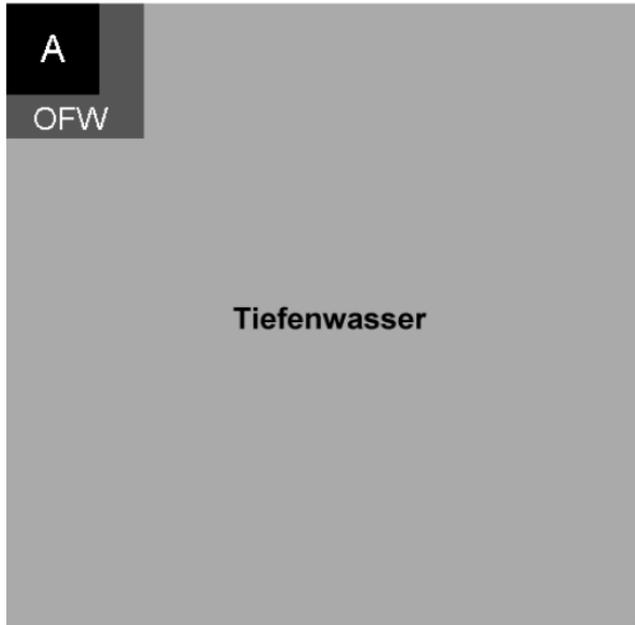
Das ozeanische Tiefenwasser weist eine systematisch geringere C14-Konzentration als das Oberflächenwasser und die Atmosphäre auf. Das hat mit seinem Strömungsverhalten zu tun. Dieses Konzentrationsgefälle ist in dem Bild **1.8** durch die unterschiedlichen Einfärbungen der drei Bereiche ange-

### 1.8 Produktion und Zerfall von C14 – der allgemeine Fall

Die C14-Konzentration ist im Tiefenwasser der Ozeane niedriger als in der Atmosphäre (A). Eine ergiebige Anreicherung durch entsprechenden Austausch mit der Atmosphäre findet nur in den Schichten statt, die aufgrund großräumiger Umwälzströmungen an die Oberfläche gelangen (OFW = Oberflächenwasser). Diese Strömungen sind regional verschieden ausgeprägt und zudem zeitlich veränderlich. Das ist einer der wesentlichen Gründe, warum die Atmosphärenkonzentration von C14 sich nicht in einem globalem Gleichgewicht befindet und weshalb das Simultanitätsprinzip nicht erfüllt sein kann.

Es gab und gibt keinen Grund, von einer seit langem gegebenen Ausgeglichenheit zwischen produzierter und zerfallender Menge an C14 auszugehen. Diese ursprüngliche Annahme Libbys sollte der Eleganz (und der Praktikabilität) der C14-Methode dienen, ist aber durch Messungen am neuseeländischen Kauribaum sowie an der amerikanischen *Sequoia Sempervivens* einerseits und durch die Tatsache des Konzentrationsungleichgewichts zwischen Atmosphäre und Ozean andererseits fast von Beginn an in Frage gestellt gewesen.

Vermutlich wird jedes Jahr global ein Mehrfaches der üblicherweise angenommenen 7.5 kg C14 produziert



7.5 kg C14 zerfallen  
global jedes Jahr

deutet. Was an C14 in der Atmosphäre erzeugt wird, landet zu über 90% in dem gegenüber der Atmosphäre ungesättigten Tiefenwasser der Ozeane, dem ein Mehrfaches des kompletten C14-Inhalts der Atmosphäre »fehlt«. Die Existenz dieses Konzentrationsgefälles muß die Frage aufwerfen, ob und um wieviel die C14-Produktion höher als die globale Zerfallsmenge liegen wird und ob nicht die C14-Konzentration der Atmosphäre noch im Steigen begriffen ist?

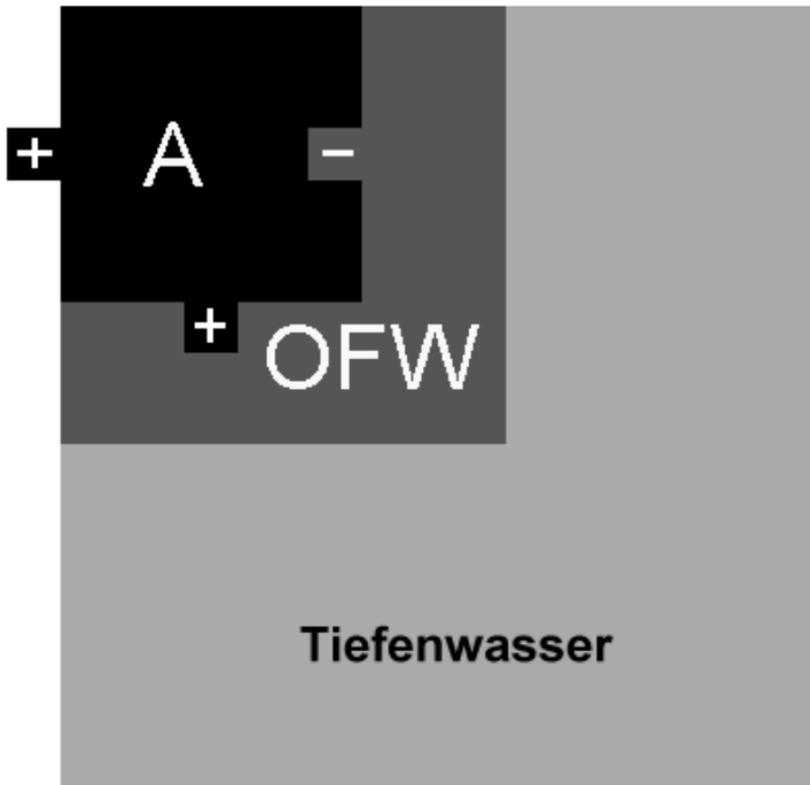
Jeder »wigggle« in einer Baumringsequenz signalisiert, daß die Atmosphäre einmal einen deutlichen Anstieg und dann wieder einen deutlichen Abfall der C14-Konzentration durchgemacht hat. Diese Zu- und Abnahmen können bis zu mehreren Prozent in einem Jahrzehnt betragen. Als Grund des Konzentrationsanstiegs kommt ein Anstieg der Produktion in Frage, genauso aber auch die »Sperrung« des Übergangs – der Diffusion – des weiterhin mit normaler Rate produzierten C14 in die Ozeane, so daß es sich rasch in der Atmosphäre anreicherte. Von einer nachhaltigen Sperre kann aber nur ausgegangen werden, wenn die Zirkulation in den Ozeanen zusammenbricht (und auf diese Weise rasch eine Sättigung des Oberflächenwassers einträte), was aber nur mit sehr seltenen und spektakulären Vorgängen in Verbindung gebracht wird (Einspeisen gigantischer Mengen an Süßwasser infolge von Schmelzvorgängen etc.). Ist die Diffusion nicht gesperrt, muß zur Erklärung des gemessenen Konzentrationsanstiegs von einer zeitweisen Vervielfachung der Produktionsrate (Faktor 10 und höher) ausgegangen werden. Vermutlich liegt ein Mischereffekt aus Produktionssteigerung und Diffusionssperre vor.

Umgekehrt kann ein »wigglemäßiger« Konzentrationsabfall nicht etwa durch eine Produktionsminderung, sondern nur durch starke Diffusion von altem (C14-freiem bzw. armem) Kohlendioxid aus den Ozeanen in die Atmosphäre erklärt werden, wodurch sich die C14-Konzentration entsprechend absenken würde. Ein »wigggle« signalisiert also neben starken Produktionsschwankungen vor allem zeitlich veränderliche Diffusionseffekte. Diese betreffen insbesondere den Übergang zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen, wobei – zumal lokal – auch die anderen Reservoirs eine Rolle spielen können.

Das Strömungssystem der Ozeane ist so komplex, daß primär von räumlich unterschiedlichen Diffusionsvorgängen und nicht etwa von global gleichförmigen Phänomenen ausgegangen werden muß. Das wird zusätzlich unterstützt durch sonstige Reservoirseffekte, die jeweils für eine lokale Absenkung der C14-Konzentration sorgen. In Bild **1.9** ist das mit den unterschiedlichen »Einstülpungen« am Übergang zwischen Atmosphäre und zum Oberflächenwasser angedeutet.

## 1.9 Überproduktion und Diffusion

Das Bild gibt schematisch die drei Hauptursachen für eine C14-Konzentrationsänderung in der Atmosphäre wieder. C14 reichert sich in der Atmosphäre (A) an, wenn mehr produziert als an die angrenzenden Reservoirs abgegeben wird (linkes »+«). Die Anreicherung fällt umso stärker aus, je mehr das Oberflächenwasser (OFW) bereits mit C14 gesättigt ist bzw. je geringer die Aufnahmebereitschaft gegenüber C14 ausfällt (unteres »+«). Je geringer die Sättigung des Oberflächenwassers mit C14 ist, desto mehr C14 gibt dieses an die Atmosphäre zurück (rechtes »-«). Der Verlust durch radioaktiven Zerfall spielt dabei so gut wie keine Rolle.



Wegen der eben erläuterten Gründe ist »wigggle-matching« eine nicht vertretbare Vorgehensweise. In den 70er und 80er Jahren wurden auf diese Weise aber alle wesentlichen europäischen Baumringchronologien durch C14-Mustervergleich mit der kalifornischen Bristlecone-Pine-Chronologie vordatiert und damit in ihrer Grundstruktur formiert. Die Tiefe des Mißverständnisses über die Natur und die Auswirkung der »wigggle« kann aus der unisono geäußerten Ansicht der C14-Gemeinde ermessen werden, daß diese sich nur aus Produktionsschwankungen ableiteten. Genau damit wird aber das Verständnis der lokalen Natur eines »wigggle« als Diffusionsphänomen verfehlt. Es gibt somit zwingende Gründe, die damals erzielten und heute noch genauso verwendeten Ergebnisse in Frage zu stellen.

Die globalen Kohlenstoffreservoirs befinden sich nicht in einem homogenen Gleichgewicht von Produktion bzw. Diffusion und Zerfall. Insbesondere hängt die C14-Konzentration der Atmosphäre auf das sensibelste von dem Isotopenaustausch an den Ozeanoberflächen ab. Ein einfaches Rechenexempel zeigt, daß sich die C14-Konzentration in den Ozeanen nur um 2 Promille in 1.000 Jahren ändern muß, um die Geschwindigkeit der C14-Uhr während dieser Zeitspanne um 50% zu verlangsamen bzw. um 100% zu beschleunigen. Das Bild **1.10** zeigt maßstabsgerecht, wie sich über 1.000 Jahre die C14-Konzentration der Atmosphäre erhöhen muß (um 12%), um die gemessenen C14-Alter aus diesem Zeitraum um 100% zu alt erscheinen zu lassen. Dagegen verlangen die im Gebrauch befindlichen Kalibrierkurven für C14 eine Konstanz der Isotopenverhältnisse hinsichtlich des Kohlenstoffs in den Ozeanen innerhalb von 0.2 ‰ über rund 12.000 Jahre. Eine Forderung, die in dieser Präzision meßtechnisch gar nicht zu verifizieren ist!

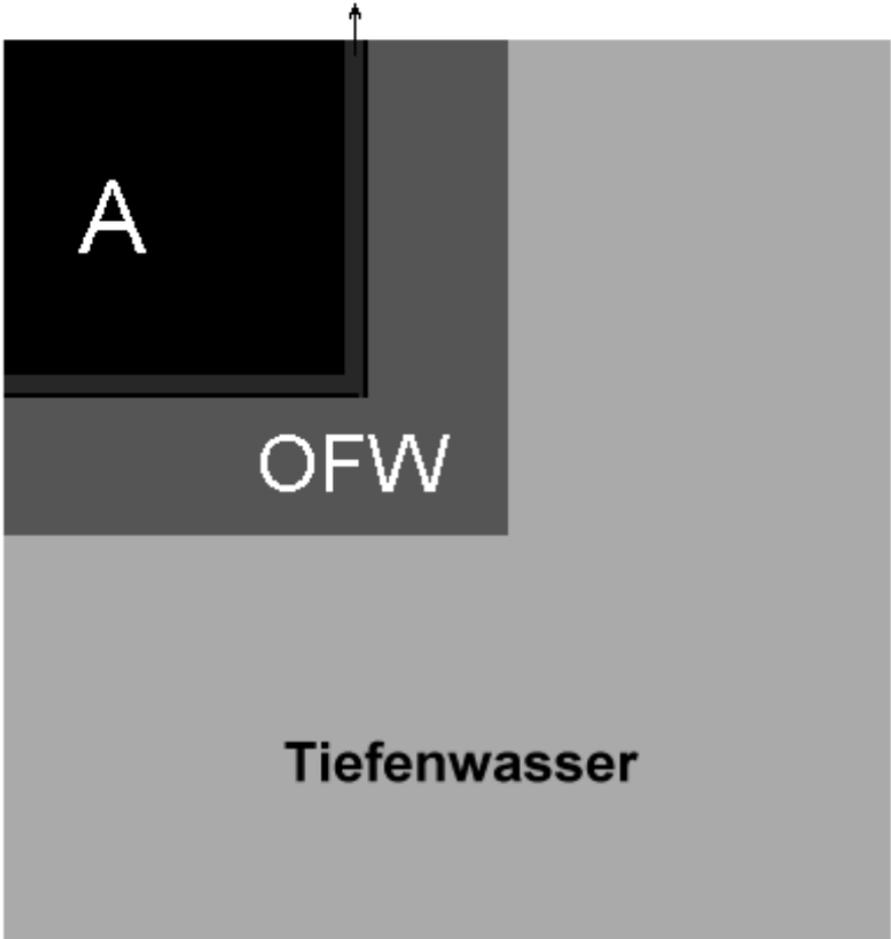
## 1.10 Die anderen radiometrischen Datierungsmethoden

Die C14-Methode ist ein Spezialfall unter allen radiometrischen Datierungsmethoden, von denen die Uran/Blei-, die Kalium/Argon- oder die Rubidium/Strontium-Methode hervorzuheben sind. Allen radiometrischen Datierungsmethoden ist grundsätzlich gemeinsam, aus der Untersuchung nicht eines, sondern zweier oder mehrerer Isotope konsistente Zeitangaben gewinnen zu wollen. Diesen Vorteil bietet die C14-Methode nicht. Zwar wandelt sich ein C14-Atom unter Aussendung eines Elektrons in ein Stickstoffatom N14 um, doch Stickstoff ist in der Regel flüchtig oder von dem ohnehin in der Probe vorhandenen Stickstoff nicht zu unterscheiden. Deshalb fehlt ausgerechnet bei der wichtigsten Datierungsmethode für das Quartär die Möglichkeit, über die Vermessung von Tochter- **und** Mutterisotop die Stichhaltigkeit aller An-

### 1.10 Überproduktion und Altersbestimmung

Wenn die Atmosphäre (A) sich binnen 1.000 Jahren um 12% mit C14 anreichert (dunkelgrauer Rand des schwarzen Kastens für die Atmosphäre), dann geht die C14-Uhr während dieser Zeit doppelt so schnell. 1.000 C14-Jahre sind dann nur 500 Kalenderjahre. Für diesen Effekt reicht bereits eine Änderung des Isotopenhaushaltes der Ozeane um 2 Promille aus (OFW = Oberflächenwasser).

Erhöhung der C14-Konzentration in der  
Atmosphäre um 12% in 1.000 Jahren



nahmen prüfen zu können, die der Auswertung zugrundeliegen. Bei allen anderen geochronologischen Datierungsmethoden wird deshalb das gemeinsame Vorkommen von Mutter- und Tochterisotopen, vorzugsweise in Gesteinen und Mineralien, ausgewertet. Sie können sich dabei auf Mutterisotope konzentrieren, die – im Gegensatz zum C14 – auf der Erde nicht produziert werden, sondern bei der Entstehung der Erde dem Gestein in gewissem Umfang beigemischt gewesen sein müssen. Daraus leitet sich der Anspruch dieser Datierungsmethoden ab, eine radiometrische Chronologie für die ganze Erdgeschichte erstellen zu können. Wir haben bereits an anderer Stelle [Blöss 1988, 105] darauf hingewiesen, daß eine Datierung, die auf der Untersuchung des Vorkommens der schweren Radioisotope beruht, zwangsläufig eine Zeitskala in der Größenordnung von 1 Milliarde Jahre eröffnet, weil die Halbwertszeiten der betrachteten Isotope in dieser Größenordnung liegen. Entsprechend ist zu erwarten, daß die meisten Proben auf 6.000 C14-Jahre und älter datiert werden, ohne daß damit irgendeine stichhaltige chronologische Aussage verbunden sein muß.

Wenn jetzt Evolutionstheorien veröffentlicht werden, die die Entstehung des Lebens auf der Erde – genauso wie alle weiteren Evolutionsschritte – durch Eindringen entsprechender Kohlenwasserstoffe in Gefolge von Kometen bewirkt sehen [New York Times vom 1.4.97], dann sollte daran erinnert werden, daß der uns geläufige Zeitrahmen von mehreren Milliarden Jahren für die Entwicklung des Planeten Erde ursprünglich von der Darwinschen Evolutionstheorie vorausgesetzt bzw. eingeklagt und bereits Anfang dieses Jahrhunderts von der Wissenschaft der Radionuklide gewährt worden ist. Evolutionstheorien, die »nicht mehr ohne weiteres zugeben, daß die verfloßenen Zeiträume ungeheuer lang waren« [Darwin 1981, 432], sollten diesen Zusammenhang neu beleuchten und dabei auch kritische Fragen an die Geochronologie stellen. Der radiometrischen Geochronologie stehen also im Gegensatz zur C14-Methode zusätzliche Kontrollmechanismen zur Verfügung, da in der Regel sogar mehrere Mutter- und Tochterisotope betrachtet werden können. Trotz sorgfältigster Durchführung der an sich schon sehr aufwendigen und anspruchsvollen Messungen muß allerdings festgestellt werden, daß nur wenige Analysen wirklich konsistente Ergebnissen ergeben, wenn alle in Frage kommenden Zerfallsreihen in Betracht gezogen werden [Gilluly et al. 1975, 82]. Große Unterschiede im Verhalten bei Phasenübergängen (Schmelzen, Lösen) und gegenüber chemischen Reaktionspartnern sorgen bei den einzelnen Isotopen über den in Frage stehenden Zeitraum in der Größenordnung mehrerer Milliarden Jahre offenbar für drastische Verschiebungen in den Konzentrationsverhältnissen.

Die Uran-Uhr konnte nur geeicht werden, indem die Verhältnisse meteoritischer Bleivorkommen (Tochterisotope Pb206/207/208) auf die ursprünglichen irdischen Verhältnisse übertragen wurden. Dabei mußte beispielsweise angenommen werden, daß in den Meteoriten niemals Uran vorhanden gewesen ist, das in der Zwischenzeit zu Blei zerfallen wäre. Die Eichung der Strontium-Uhr basiert auf der vergleichenden Untersuchung als gleichaltrig vorausgesetzter Proben. Auch die anderen Methoden können jeweils nur unter diversen Annahmen auf den Weg gebracht werden. Dennoch besteht immer noch ein prinzipieller Vorteil gegenüber der C14-Methode: Während letztere sich auf eine komplette Chronologie der C14-Konzentration stützen muß, machen jene im Rahmen ihrer Zielsetzung Aussagen über Isotopenzusammensetzungen nur für eine begrenzte Zahl von Epochenübergängen.

Die einzelnen Zeitangaben sind untereinander nicht in dem Maße konsistent, wie es die Fehlerbetrachtung für die einzelnen Verfahren jeweils erwarten ließen. Geochronologen werden nicht widersprechen, wenn als Fehler eines radiometrisch gewonnenen Datums – Richtigkeit der zugrundeliegenden Annahmen vorausgesetzt! – mindestens 10% angenommen werden müssen. Ein Datum von beispielsweise  $1.7 \cdot 10^8$  Jahren wäre also mit einem Fehler von sicherlich  $\pm 0.2$  oder sogar  $\pm 0.3 \cdot 10^8$  Jahren verbunden. Das ist genau die Größenordnung, die wir – ohne die Kalibrierung zu betrachten, die noch zu ganz anderen Problemen führt – ganz regulär auch für die Ergebnisse aus der C14-Methode ansetzen müssen, wenn alle Fehlerquellen in Betracht gezogen werden (vergleiche Kapitel 8). Illusionen über die Genauigkeit der C14-Methode halten sich unter anderem aus deshalb, weil die angezeigte routinemäßige Kontrolle durch Vermessung von Tochter- und Mutterisotop ausgerechnet bei der C14-Methode nicht möglich ist.

Die Unsicherheit einer C14-Datierung schlägt letztlich mit mehreren Jahrhunderten zu Buche, wenn nämlich alle möglichen Fehlerquellen konsequent in Rechnung gestellt werden. Zu dieser Offenlegung hat auch die Kontrolle der Geschichtswissenschaft beigetragen, die oftmals C14-Daten nicht akzeptieren will und Rechenschaft über die Genauigkeit der Daten verlangt. Wie wichtig diese Kontrolle grundsätzlich ist, wird am Beispiel der Kalium-Argon-Datierung geologisch gesehen jungen Ergußgesteins deutlich. Hier sind Altersangaben mit einer Unsicherheit in der Größenordnung von  $\pm 10.000$  Jahren üblich, was wegen der hohen Halbwertszeit des radioaktiven Kalium extrem genaue Messungen und eine extrem genaue Kontrolle der Einhaltung der entsprechenden Randbedingungen (Ausschluß von Kontamination etc.) voraussetzt. Auf die C14-Methode übertragen, würde es die Bestimmung eines Alters in der Größenordnung von 10-20 Jahren mit einer Genauigkeit von

±2 Wochen bedeuten [Blöss 2000, 166f.]. Kein C14-Wissenschaftler würde im Traum zu hoffen wagen, derartig genaue Vorhersagen machen zu können.

### 1.11 Wissenswertes über Kohlenstoff C12, C13 und C14

Kohlenstoff (carboneum; carbo (lat.) Kohle) wurde 1775 von A.L. Lavoisier als Element erkannt. Kohlenstoffatome können sich im Gegensatz zu anderen Atomen in praktisch unbegrenztem Maße zu Ketten und Ringen verbinden. Daher sind mit rund 12 Millionen weit mehr Kohlenstoffverbindungen bekannt als solche ohne Kohlenstoff, deren Zahl man auf etwa 400.000 abschätzt. Obwohl Kohlenstoff zum Bestandteil aller Organismen gehört, ist es in der Erdkruste einschließlich Atmosphäre und Hydrosphäre nur das dreizehnhäufigste Element. Außerhalb der Organismen kommt Kohlenstoff sowohl frei (Diamant, Graphit) als auch gebunden vor (Kohlendioxid, Carbonate, Kohle, Erdöl, Erdgas, Schieferöl, Bitumen). Die in der Luft in Form von Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  vorhandene Kohlenstoffmenge (ca.  $6.0 \cdot 10^{14}$  kg) ist nur etwa doppelt so groß wie die in den Organismen gebundene; Meerwasser enthält größenordnungsmäßig die 100fache Menge.

Neben den natürlich vorkommenden Isotopen des Kohlenstoffs – C12 (98.9 %), C13 (1.1 %) und das »Radiokarbon« C14 ( $1.5 \cdot 10^{-10}$  %) – kennt man auch drei weitere Isotope des Kohlenstoffs, nämlich C10, C11 und C15, die erst durch menschliche Technik entstanden und nachgewiesen wurden. Diese haben für den natürlichen Stoffwechsel keinerlei Bedeutung. Ein Organismus trifft also in etwa mit jedem Billionsten Kohlenstoffatom einen Vertreter des uns hier interessierenden radioaktiven Isotops C14 an. Von diesen wiederum zerfällt überschlägig pro Jahr jedes zehntausendste. Darüber, wieviele nun jährlich produziert werden, gehen die Meinungen auseinander:

- W.F. Libby ging von einem Wert von 9.8 kg/Jahr aus [1952, 23],
- S. Bowman nennt einen Wert von 7.5 kg/Jahr [1990, 13] und
- H. Mommsen führt eine Abschätzung von ca. 5 kg/Jahr an [1986, 204].

Die Unsicherheit hat damit zu tun, daß weder die Gesamtgröße des globalen Kohlenstoffreservoirs, noch die Größe des Anteils davon, mit dem das Radiokarbon C14 im dynamischen Gleichgewicht stehen soll, genau bestimmt werden kann. Umgekehrt zeigt das natürlich auch, wie unsicher die Vorstellungen über die Dynamik des Austauschs zwischen den Kohlenstoffreservoirs ist, die naturgemäß eine unterschiedliche Zusammensetzung der Kohlenstoffisotope aufweisen. Deshalb hat sich die einstige Gewißheit, das die Isotopenzusammensetzung in der Atmosphäre (die eines der kleinsten und instabilsten

Reservoir überhaupt darstellt) über geschichtliche Zeit nur Veränderungen im Prozentbereich erfahren haben sollte, zu einer bloßen Hoffnung reduziert, die als absolut trügerisch bezeichnet werden muß.

### 1.12 C14 und die Radiomedizin

Inkorporiertes natürliches Radiokarbon C14 trägt zur durchschnittlichen Strahlenbelastung des Menschen mit einem Anteil von ca. 1% bei. Der entsprechende Anteil von radioaktivem Kalium K40 beträgt zum Beispiel 20%, der Anteil der kosmischen Strahlung 30% und der der terrestrischen Strahlung 43% [zum Winkel 1975, 103]. Die Zerfallsrate bei modernem Kohlenstoff als natürlicher Mischung aus allen vorkommenden Isotopen beträgt ungefähr 15 Zerfallsereignisse pro Minute und Gramm Kohlenstoff entsprechend ca. 7 pCi pro Gramm Kohlenstoff (1 Curie [Ci] =  $3.7 \cdot 10^{10}$  Zerfälle je Sekunde).

Um ein Gefühl für die Größenordnungen zu vermitteln, vergleichen wir die Radioaktivität natürlichen, rezenten Kohlenstoffs mit derjenigen Radioaktivität, der ein Mensch bei einer Blutuntersuchung durch Verabreichung von C14-dotiertem Serotonin ausgesetzt ist (Test der Thrombocytenüberlebenszeit). Die entsprechende Gesamtaktivität wird mit 4  $\mu$ Ci angegeben [zum Winkel 1975, 111]. Bezogen auf eine Blutmenge von 8 Litern entspricht das rund 0.5 nCi pro ml Blut. Bei einem Gewichtsanteil des Kohlenstoffes am Blut von rund 10% hat die extrahierte Kohlenstoffprobe mit 5 nCi pro Gramm Kohlenstoff demnach eine rund 700-fach höhere Aktivität als eine Normalprobe mit natürlichem Kohlenstoff.

Auch der Vergleich mit einer Aktivität im menschlichen Körper, die nach der Strahlenschutzverordnung maximal für eine Inkorporation zulässig ist, erhellt die Nachweisproblematik der Archäometrie. Diese beträgt für das Fett als kritisches Organ 300  $\mu$ Ci [zum Winkel 1975, 102]. Der durchschnittliche Fettanteil bei einem Erwachsenenkörper beträgt rund 10 Kg, also liegt die maximal zugelassene spezifische Aktivität bei 30 nCi pro Gramm Fett. Bei einem Gewichtsanteil des Kohlenstoffes im Fett in der Größenordnung von 25% hat die extrahierte Kohlenstoffprobe mit 120 nCi pro Gramm Kohlenstoff eine rund 17.000-fach höhere Aktivität als die Normalprobe mit undotiertem Kohlenstoff.

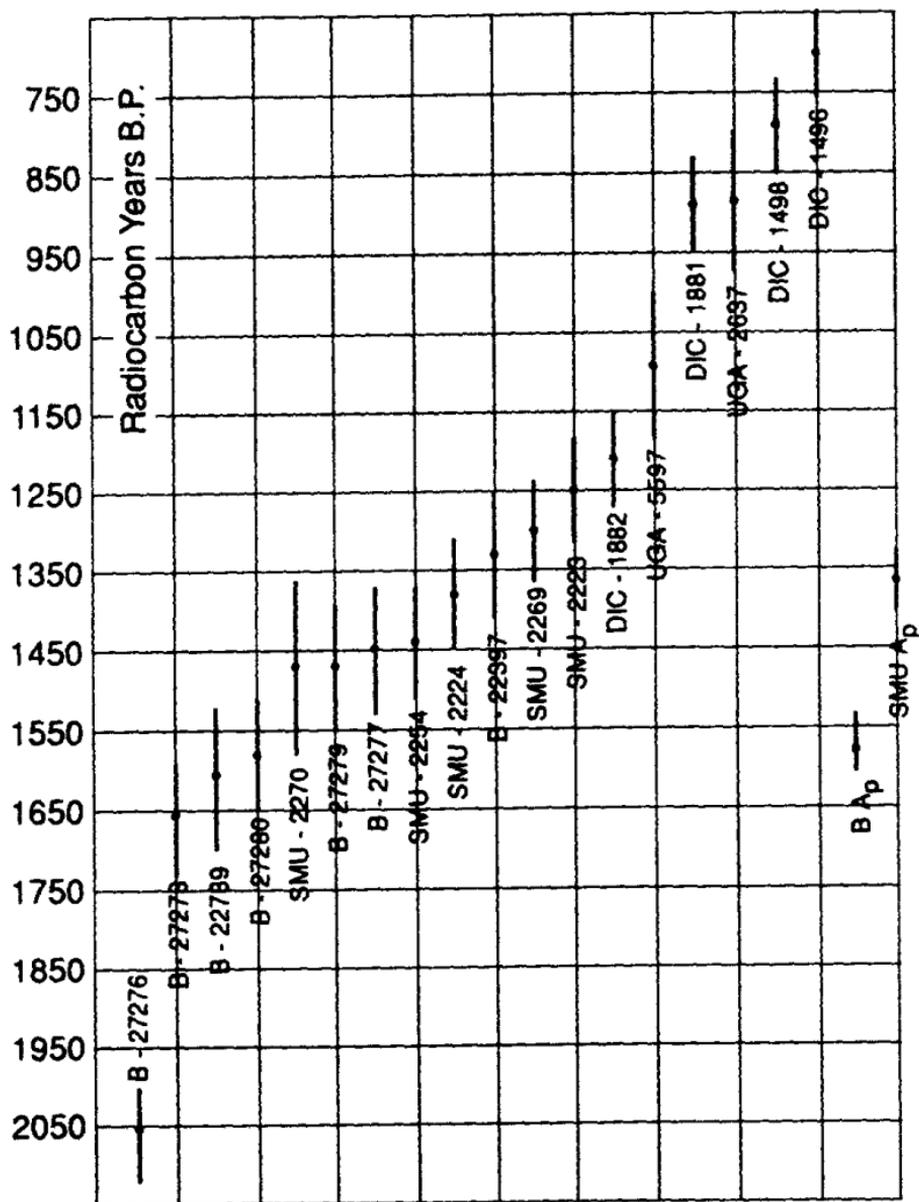
## 2. Geschichtliches – die Chronologie des Skandals

### 2.1 Die C14-Methode im Urteil der Historiker ...

Historiker stehen der C14-Methode mit gespaltenen Gefühlen gegenüber. Einerseits zollen sie der naturwissenschaftlichen Methode ihren generellen Respekt, äußern jedoch andererseits immer wieder Unzufriedenheit angesichts widersprüchlicher Ergebnisse. Der Respekt der Historiker beruht nicht so sehr auf der Eleganz der Methode oder auf dem umfassenden Korrekturapparat, der im Laufe der Jahrzehnte für die Prozedur der Gewinnung eines C14-Datums erarbeitet wurde. Vielmehr sieht man sich mit Ergebnissen konfrontiert, die solange akzeptiert werden müssen, wie nicht wirklich gute Gründe für eine Zurückweisung vorliegen. Historiker neigen in Zweifelsfällen eher zum stillschweigenden Ignorieren als zum offenen methodischen Schlagabtausch.

Zu Recht übt der Historiker Zurückhaltung gegenüber methodischen Details. Eine seit 50 Jahren weltweit eingesetzte Methode muß alle grundlegenden Probleme schon längst gelöst haben. Der Historiker kann auch erwarten, daß das Verfahren nach dem neuesten Stand der Technik durchgeführt wird. Tatsächlich hat es im Laufe der Zeit wesentliche Verbesserungen gegeben, wie etwa den Wechsel von der Zählung der (extrem seltenen) Atomzerfälle hin zu der Zählung der C14-Atome (durch die Beschleunigermassenspektrometrie, engl. Abk.: AMS) selber. Gute Voraussetzungen also, C14-Daten einen entscheidenden Rang in jeder Chronologiedebatte einzuräumen. Doch dazu sind Historiker – aus guten Gründen – in der Regel nicht bereit.

Die Unzufriedenheit speist sich aus dem Maß und der Art der Unzuverlässigkeit, die C14-Daten anhaftet. Der Historiker will Daten verfeinern. Mit der C14-Methode werden dagegen auf unnachvollziehbare Weise Daten unterschiedlichsten Alters erzeugt, die somit keinen Entscheidungscharakter haben können, sondern nur einen durch mehr oder weniger mühselige Detailbetrachtungen gewonnenen Hinweischarakter – oftmals nahe der Indifferenz oder bereits in sich widersprüchlich. Solange die genaue chronologische Platzierung als »zulässiges archäologisches Ziel« verstanden wird [Shott 1992], muß die Tatsache, daß 33% [Lewis 1985, 217] bis 50% [Hassan 1989, 57; Ogden 1977, 173] aller C14-Daten abgewiesen werden, als »Abstimmung mit den Füßen« gegen die C14-Methode angesehen werden. Es ist hauptsächlich der außerordentliche Respekt der Geisteswissenschaftler vor der Naturwissenschaft als Ganzem, der trotz dieses sprachlos bleibenden Mißtrauensvotums die »Abwahl« der C14-Methode verhindert.



## 2.1 Es geht um Kopf und Kragen

Die in dem Bild zusammengefaßten 20 C14-Daten stammen vom Fundort »Childers« in Nord-Ost-Amerika, der der sogenannten »Late Woodland« Periode zugeordnet wird. Die Chronologie dieser Periode überstreicht nach Ansicht der Archäologen den Zeitraum von 400 - 800 AD. Ein wesentliches Merkmal der ihr zugerechneten Besiedlungen sei deren generell kurze Dauer zwischen wenigen Jahren bis wenigen Jahrzehnten. So wird seitens der Archäologen dem hier betrachteten Fundort »Childers« lediglich eine Besiedlungslänge von 15 Jahren zugestanden [Shott 1992, 208]. Die C14-Daten spannen jedoch einen Zeitraum von knapp 1.400 Jahren auf. Eine einfache Mittelwertbildung ist hier völlig ausgeschlossen. Der allgemein erratische Trend resultiert teilweise aus einer systematischen Abweichung zwischen den Labors.

Auf für andere Fundorte spiegeln die jeweiligen C14-Daten die Schlußfolgerungen der Archäologen über die kurzen Besiedlungsdauern nicht wieder. So erbrachte beispielsweise der Fundort »Leonhard Haag« C14-Daten von 1300 - 1910 BP und der Fundort »Turpin and Sand Ridge« solche von 1140 - 1775 BP bzw. 1135 - 1510 BP (jeweils unkalibriert). Oftmals ergeben die C14-Daten für die einzelnen, kurzbesiedelten Plätze längere Zeiträume als der, der für die gesamte Periode angesetzt wird. C14-Daten können zur Chronologie dieser Besiedlungen nichts Konstruktives beitragen.

Nichtsdestotrotz bemühen sich einige Archäologen – wie etwa M.J. Shott für den »single episode« Fundort »Childers« – notdürftigste Ordnung in den Meßwertkorpus zu bekommen und sind dabei nahe daran, sich selber um Kopf und Kragen zu argumentieren. M.J. Shott weiß sich mit anderen Kollegen einig, wenn er gleich zu Beginn 40% der Daten als Ausreißer interpretiert, denn ein Drittel bis hin zur Hälfte aller gemessenen C14-Daten finde, so schreibt er, ohnehin keine Akzeptanz bei den »Kunden« der C14-Methode.

Nach dieser ersten Bereinigung sortiert er die übrig gebliebenen 12 Daten nach den Labors und entscheidet sich für den Datensatz des Labors der Southern Methodist University, womit er eine Ausreißerrate von 75% erreicht hat. Dieser Datensatz verweist dann nach einer – mit Mühe nur »problematisch« zu nennenden – Mittelwertbildung und Kalibrierung auf den Zeitraum von (umgerechnet) 634 - 684 AD. In einer Zusammenfassung sieht Shott sich erneut genötigt, selbst seine sehr rücksichtsvoll begründete und durchgeführte Zurückweisung der C14-Daten rechtfertigen zu müssen: Eine Zusammenschau der Daten aus angrenzenden Gebieten sowie die statistischen Ergebnisse nötigen zur archäologischen Schlußfolgerung, daß »eine unkritische Hinnahme aller gegebenen C14-Daten nicht weiterhelfen« könne. Zu der hier einzig richtigen Reaktion, nämlich der grundsätzlichen Ablehnung, kann er sich nicht durchringen.

Nur eine Minderheit unter den Historikern würde heute noch der Einschätzung G. Daniels folgen, daß »nichts zwischen 1939 und heute von größerer Tragweite für die Archäologie gewesen sei als die 1949 von Libby bekanntgegebene Entdeckung der  $^{14}\text{C}$ - oder Radiokarbondatierung« [1982, 215]. Und von der C14-Methode als einem »gottgesandten Geschenk für die Archäologen« [Renfrew 1979, 53] zu sprechen, wäre mittlerweile wohl mehr als ein kleines Wagnis. Die meisten Historiker könnten sich allerdings dem *DICTIONARY OF CONCEPTS IN ARCHAEOLOGY* anschließen, welches die C14-Methode als das wichtigste und gebräuchlichste Verfahren zur Absolutdatierung organischer Substanzen beschreibt – sofern andere, unabhängige Methoden mit hinzugezogen werden [Mignon 1993, 76]. So scheint ein Kompromiß gefunden zu sein, wie der Gast am Tische geduldet werden kann, ohne ihm allzuvielle Vorrechte einräumen zu müssen: Er kann bleiben als einer unter vielen, der Vorsitz aber bleibt beim Hausherrn.

Die Gründe dafür, daß kaum ein Historiker der C14-Methode die Führerschaft oder gar Entscheidungsgewalt für die schriftlich belegten Epochen zugestehen will, sind relativ einheitlich. Es sind vor allem die immer wieder deutlich hervortretenden Diskrepanzen zwischen Datierungen, die mit eigenen Methoden erstellt werden, und den entsprechenden C14-Daten. Noch schwerwiegender ist jedoch, daß die C14-Daten bereits in sich immer wieder inkonsistent sind. So schwanken zum Beispiel die Daten für Artefakte aus einer Besiedelung von wenigen Jahrzehnten um ca. 1.400 Jahre. Dieses drastische Beispiel wird in Bild **2.1** beschrieben (eine ähnliche Situation auch in Bild **7.10**). Dieses Verrücktspielen, dieser Zufallscharakter der C14-Methode wirkt sich nicht etwa in einer mehr oder weniger großen Streuung um ein wahres Datum aus, sondern so, daß hin und wieder auch zutreffende Daten erzielt werden. Auf scheinkonsistente C14-Daten innerhalb eines an sich unbrauchbaren Konvoluts kann man immer stoßen, solange dieses umfangreich genug ist. Der Fehler aus der Messung des radioaktiven Zerfalls ist bedeutungslos (zumal er technologisch beherrscht wird) gegenüber unbeherrschten Schwankungen – eigentlich müsste man sie Irrläufer nennen – die sich immer wieder in den Werten gleichaltriger archäologischer Proben finden. Im Folgenden gehen wir kurz auf die Situation in unterschiedlichen historischen Disziplinen ein und werden dort bestätigt finden, daß damit eine Regel und nicht etwa die Ausnahme beschrieben wird.

Die *ENCYCLOPEDIA OF HUMAN EVOLUTION AND PREHISTORY* bezeichnet die C14-Methode zwar als die einzige, die direkt auf fossile menschliche Überreste angewendet werden könne, stellt aber zusammenfassend fest, daß »Knochen«-Daten oftmals nicht zuverlässig seien [Tattersall et al. 1988, 225; dazu auch

Kapitel 8.4.1]. Die Daten an sich gleichaltriger Knochen streuen häufig ohne erkennbare Systematik um Jahrtausende. Zugleich schwanken diese aber auch mehr oder weniger systematisch innerhalb verschiedener Bereiche eines einzigen Knochens.

Im südlichen Teil Chinas kommt es sehr häufig vor, daß Proben mit zunehmender Schichttiefe ein jüngeres C14-Alter aufweisen [Zhimin 1991, 198]. Der Grund hierfür wird in der Kontamination (= »Verunreinigung«) von Zwischenschichten gesehen. Altes und aufsteigendes Grundwasser mit C14-freiem Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ließ oben liegende Schichten weit über das Alter der darunter liegenden Schichten hinaus vergreisen – so die Erklärung. Die Datierung von Muscheln sei sogar landesweit abzulehnen, da diese allzuoft in C14-verarmten Gewässern entstanden seien. Im Zusammenhang mit der Absolutchronologie der legendären Geschichte Chinas kritisiert A. Zhimin die Unsitte, nur jene C14-Daten zu verwenden, die die favorisierte Version unterstützen [1991].

Das Problem der Inversion des C14-Alters kennt die Archäologie auch aus anderen Zusammenhängen, in denen von Kontamination aber nicht ausgegangen werden kann. Für bronzezeitliche Hausbauten im bosnischen Feudvar mußte für eine stratigraphisch als eindeutig jünger einzustufende Schicht ein um ca. 100 Jahre älteres C14-Datum hingenommen werden. Angesichts auch hier erkannter enormer Streuungen bei nahezu gleichaltrigen Funden – über 500 Jahre Streuung für Funde, die nicht mehr als 30 Jahre auseinander liegen sollten –, können solche Inversionen nicht mehr als Besonderheit bezeichnet werden (zusammenfassend Heske [1994]). Während ursprünglich eine entscheidende Unterstützung von der C14-Methode für die Feindatierung der Funde in Feudvar erwartet worden war, beschränkten sich die Forscher am Ende auf die Empfehlung, es bei einer Hilfe zur Grunddatierung zu belassen – eine verkappte Bankrotterklärung.

Wo schon mehrere Forschergenerationen die Grunddatierungen nicht mehr angerührt haben und der Fokus auf Details gerichtet ist, wie etwa in der Chronologie Altägyptens, mag man der C14-Methode im allgemeinen gar keinen Wert beimessen. Bereits 1970 hatte I.E.S. Edwards während eines Symposiums über den »Einfluß der Naturwissenschaft auf die Archäologie« recht süffisant fragen können, ob es im Falle der Ägyptologie nicht angemessener sei, die umgekehrte Richtung zu diskutieren? Schließlich könne die Ägyptologie auf das Jahrzehnt genau datieren und damit auch der C14-Chronologie jene Sicherheit verschaffen, von der diese offenbar noch weit entfernt sei [Edwards 1970, 15] (Zur Kritik der Altägyptischen Chronologie siehe Heinsohn/Illig [1999, 20]).

Die seinerzeit angeschlagene Reputation der C14-Methode schien sich bald darauf durch das Angebot global anwendbarer Kalibrierkurven aufgebessert zu haben. Doch für das Alte Reich Ägyptens klaffen auch nach Einführung der »Hochpräzisionskalibrierung« zwischen der historischen und der C14-Datierung im Mittel fast 400 Jahre [Haas et al. 1987]. Versuche einzelner Historiker, ihre Kollegen von der Notwendigkeit zur Korrektur der traditionellen Chronologie zu überzeugen, schlugen fehl [Mellaart 1979]. Am Ende zog sich die Ägyptologie recht elegant aus der Affäre: Die eigenen Datierungsunsicherheiten seien kleiner als der Mindestfehler der C14-Methode und damit müsse die Methode selber als nutzlos erkannt werden [Kitchen 1991, 204].

Es gibt also zahlreiche Probleme bei der Verwendung von C14-Daten: Eine Streuung der C14-Daten in unrealistischer Höhe, Probentypen, die grundsätzlich problematisch sind, es gibt Kontaminationen, Inversionen und infolge dieser ganzen Probleme eine zu hohe Datierungsunsicherheit. Welche Verfahren werden den Historikern empfohlen, um trotz dieser Probleme dennoch zu allgemein akzeptierten C14-Daten zu kommen?

## 2.2 ... und wie man sich arrangiert

Die archäologisch und historisch-methodisch orientierte Literatur bemüht sich natürlich, ihre Leser über die möglichen Ursachen für Diskrepanzen, die bei C14-Datierungen zu erwarten sind, zu informieren. Dabei kristallisiert sich ein fundamentales Mißverständnis heraus, das entscheidenden Anteil daran hat, daß die C14-Methode immun gegenüber der Kritik aus den Reihen der Historiker bleiben kann.

Im REALLEXIKON DER GERMANISCHEN ALTERTUMSKUNDE wird ein irreführender Zusammenhang zwischen dem »±-Fehler« bei der Radioaktivitätsmessung einerseits und der statistischen Sicherheit für das angegebene C14-Alter andererseits hergestellt: »Bei den normalen ±-Werten liegt das gesuchte Datum mit ca. 80% Wahrscheinlichkeit<sup>1</sup> im angegebenen Bereich. Mit ca. 20% Wahrscheinlichkeit liegt es nicht darin. Deshalb sind immer von einer Stelle mehrere Proben nötig, um statistische Sicherheit zu erreichen« [Hoops 1981, 631].

Diese Forderung ist unbegründet und grob irreführend, denn tatsächlich kann der ±-Fehler aus der Radioaktivitätsmessung durch eine entsprechend lange Messung so klein gemacht werden, daß auch eine Feindatierung mit einem Fehler von wenigen Jahren möglich wird (siehe dazu Bild **7.2**). Das zen-

<sup>1</sup> Richtig – in diesem Zusammenhang aber unwesentlich – ist ein Wert von rund 70%.

trale Problem der C14-Methode liegt gar nicht in diesem  $\pm$ -Fehler aus der Radioaktivitätsmessung, sondern in der Tatsache, daß die C14-Daten zweier oder mehrerer vergesellschafteter, gleichaltriger Proben trotz hochgenauer Messung in der Regel viel zu weit auseinander liegen. De facto wird diese chaotische Streuung nur allzu gerne mit dem »naturgegebenen« zufälligen Fehler bei der Messung einer C14-Aktivität verwechselt und durch die Auswertung mehrerer Messungen ungerechtfertigterweise gesund interpretiert. Die Erkenntnis, das eine isolierte C14-Datierung noch gar nichts aussagt, wurde mit dem bekannten Satz »one date is no date« auf den Punkt gebracht. Diese Erkenntnis birgt genau genommen Sprengstoff für die C14-Methode, und dieser Sprengstoff ist in ihrem Zentrum angebracht! Der Ausspruch (»eine Datierung ist keine Datierung«) geht auf M.J. Aitken zurück [Aitken 1990, 95]. Ihm zufolge könne einem vereinzelt Datum keine chronologische Aussagekraft zugesprochen werden, weil die Probe während der Zeit ihrer Lagerung aber auch durch ihre Behandlung im Labor zahllose unrekonstruierbare und deswegen unkorrigierbare Einwirkungen erfahren habe. Aitken zielte damit ausdrücklich nicht auf »Ausrutscher«, die jedem Labor passieren können, sondern auf den Normalfall.

Diese allseits erhobene Forderung nach mehreren Proben von einer Stelle beinhaltet das Eingeständnis, daß das für die Anwendung der C14-Methode unverzichtbare »Simultanitätsprinzip«, nach dem gleichaltrige Proben dasselbe C14-Alter aufweisen müssen, nicht gilt (dazu die Bilder **4.4-6**): Ohne gültiges Simultanitätsprinzip wäre eine Kalibrierung sinnlos, da die Unsicherheit des kalibrierten Alters so groß wäre wie die Streuung in den C14-Daten gleichaltriger Proben. Und diese können, wie wir gesehen haben, sogar in der Größenordnung eines Jahrtausends liegen. Doch da die heute gebräuchlichen Kalibrierkurven nur unter Anwendung dieses Prinzips konstruiert werden konnten, muß ihre Verwendung grundsätzlich in die Irre führen. Dieser Sachverhalt blieb trotz der beunruhigenden Hinweise, die die C14-Wissenschaftler aus den chaotisch streuenden Daten von Anfang an hätten entnehmen müssen, bis heute unverstanden und unbeachtet, weil sie fest an die Erstellbarkeit eines solchen präzisen Vergleichsmaßstabes geglaubt haben.

Kommen wir kurz auf die Interpretation des  $\pm$ -Fehlers zurück. Die statistische Sicherheit für eine Messung, die sich in diesem Fehler ausdrückt, hängt allein von der Länge der Messung bzw. von der Menge der dabei gezählten Zerfallsereignisse ab. Je länger gemessen bzw. je mehr gezählt wurde, desto kleiner ist automatisch auch der anzugebende  $\pm$ -Fehler. Je länger also Proben mit gleicher C14-Aktivität gemessen werden, desto ähnlicher müssen die Ergebnisse am Ende auch werden. Wenn das Simultanitätsprinzip Gültigkeit be-

säße, reichte es völlig aus, eine einzige Probe ausreichend lange zu messen. Es bestünde dann Sicherheit, daß alle anderen Proben bei entsprechend langer Meßzeit dasselbe Ergebnis erbringen würden. Doch die allseits empfohlene mehrfache Probennahme von einer Stelle rührt ausschließlich aus der Erfahrung, daß die Messungen – auch bei jeweils längster Dauer – zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen führen, selbst wenn alle rekonstruierbaren Einflüsse auf die C14-Konzentration in der Probe, die nicht den radioaktiven Zerfall betreffen, »herauskorrigiert«<sup>2</sup> worden sind: Gleichaltrige Proben weisen auch unter idealen Bedingungen signifikant unterschiedliche C14-Alter auf.

Solange Historiker solche Probenensembles nicht als Beweis der Unzulänglichkeit der angetragenen Hilfswissenschaft zurückweisen, sondern die entsprechenden Mittelwerte in der unbegründeten Hoffnung übernehmen, auf diese Weise dem »wahren« Wert näher zu kommen, solange gewähren sie einem totkranken Patienten permanente Akuthilfe. In diesem Zusammenhang wurde seitens der C14-Wissenschaft durchaus konstruktive Kritik an archäologischen Verfahren zur Feststellung der Gleichzeitigkeit (»coevalness«) von Proben geübt und wertvolle Hinweise gegeben, wie allfällige Mißverständnisse vermieden werden können.

Diese drohen zum Beispiel bei der Beurteilung dickerer Hölzer, deren C14-Datum durch länger zurückliegendes Abholzen, oder durch die Verwendung des »alten« Kerns oder auch durch Wiederverwendung erheblich von dem eigentlich zu datierenden Ereignis abweichen kann. Das ändert jedoch nichts an der Tatsache, daß sich die C14-Methode letzten Endes dem Urteil des Archäologen beugen muß, solange sie als Hilfswissenschaft dienen möchten.

Die Verantwortung des Archäologen im Zusammenhang mit der C14-Datierung wird nicht nur darin gesehen, daß er die Zusammengehörigkeit bzw. Abfolge seiner Proben ausreichend exakt analysieren und dokumentieren muß (vergleiche dazu Kapitel 8.4). Er soll zu der Qualität der C14-Daten auch direkt beitragen, indem er sich auf die »richtigen« Proben konzentriert, oder besser: indem er die mit der Fundlage verbundenen Probleme richtig ein-

<sup>2</sup> Versuche, die zurückliegenden Einflüsse auf die C14-Konzentration in der Probe quantitativ in den Griff zu bekommen, werden im Sprachgebrauch »Korrektur« genannt. Daß diese Einflüsse vorhanden sind und starke Auswirkungen auf die Altersbestimmung haben, wird nicht bestritten. Daß die »Korrekturen« oftmals vage ausfallen müssen und selber mit einem gehörigen Fehler verbunden sind, wird dagegen im Eifer des Gefechtes nur allzu gerne übersehen. Im Kapitel 8 unternehmen wir den Versuch, die Größenordnung des aus diesen »Korrekturen« erwachsenden Fehlers, der den reinen Meßfehler um ein Vielfaches übersteigt, zu bestimmen.

schätzt und Proben vermeidet, die erfahrungsgemäß besonders hohe Kontaminationen aufweisen können: Kontamination durch Grundwasser, durch vulkanische Asche oder Gase, durch zweifelhafte, nicht abtrennbare Beimischungen sonstiger organischer Substanzen wie Wurzeln oder Mikroorganismen. Ebenso sollte er jene Probenarten kennen und gegebenenfalls vermeiden, die aus Gründen des inneren Aufbaus zu unterschiedlicher Einlagerung von C14 neigen. Hier sind insbesondere Knochen zu nennen. Aber so oder so sind dem Ausgräber Grenzen gesetzt, die er nicht überschreiten kann. Und da, wie wir festgestellt haben, zwangsläufig inkonsistente Daten erzeugt werden, muß er sich Rechenschaft ablegen, ob er diese Methode überhaupt verwenden darf oder nicht.

Der Archäologe sieht sich in der Mitverantwortung für das Datierungsergebnis, wenn es um die Probennahme und -lokalisierung geht. Mit der letzten und an sich heikelsten Korrektur, der Kalibrierung, wähnt er sich dagegen endlich auf der sicheren Seite, da diese angeblich nur ein »rein technisches Problem« darstelle [Shott 1992, 203]. Bei einer Kalibrierung wird das gewonnene C14-Datum mit einer kompletten Chronologie der atmosphärischen C14-Konzentration abgeglichen. Dadurch kann theoretisch der oder auch die Zeitpunkte in der Vergangenheit bestimmt werden, an dem Probe und Atmosphäre dieselbe C14-Konzentration aufwiesen (vergleiche den Abschnitt 1.5 in dem einführenden 1. Kapitel und zur Beschreibung des Verfahrens auch die Bilder **7.1** und **9.1**). Soweit der rein technische Teil des Vorgangs. Sollten die C14-Daten gleichaltriger Proben jedoch grundsätzlich einer chaotischen Streuung unterliegen, dann gäbe es keine eindeutige Kalibrierkurve mehr. Zugleich wäre die entscheidende Voraussetzung der C14-Methode verloren – das Simultanitätsprinzip, welches besagt, daß gleichaltrige Proben dasselbe C14-Datum haben müssen.

Wir werden zeigen, daß die zur Benutzung freigegebenen Kalibrierkurven auf chaotisch streuenden Meßdaten beruhen und unter Ausnutzung dieser Streubreite in eine bestimmte Richtung getrieben worden sind, eine Richtung, die nicht von der Gesamtheit der vorliegenden Fakten bestimmt wurde, sondern von einem krassen Vorurteil über die Ursachen von Naturprozessen<sup>3</sup>. Dieses Vorurteil beruht auf dem Prinzip des Uniformitarismus, welches besagt, daß stationäre Randbedingungen für alle Naturprozesse herrschen. Daraus leitete man ab, daß diese auf Dauer einen gleichmäßigen Verlauf nehmen werden (»eingeschwungener Zustand«). Auf die C14-Methode angewendet

<sup>3</sup> Heute gehen wir davon aus, daß nicht nur die Richtung, sondern auch die Länge der sinnvoll verwendbaren Kalibrierkurve vorgegeben wurde. Die Länge ergab sich aus dem »bekanntem« Absolutdatum für das Ende der Eiszeit vor rund 10.000 Jahren.

## 2.2 Irrtum und Chaos

Ursprünglich wurde jedes C14-Datum wie die Position eines Wanderers betrachtet, der mit bekannter Geschwindigkeit lief und dessen Abstand zum Startpunkt der Zeit entsprach, die seit dem Startschuß verstrichen war. Dann stellte sich heraus, daß nacheinander antretende Wanderer sich nicht an demselben Startpunkt aufgestellt hatten. Deshalb durfte aus einer späteren Position nicht auf den Zeitpunkt des Startes zurückgeschlossen werden.

Mit folgendem Modell sollten diese »Startfehler« kompensiert werden: Ein Kalibrierläufer hätte auf dem Weg zusätzlich noch eine Stange zu balancieren, die er durch Beschleunigungen und Abbremsungen im Gleichgewicht halten müsse. Damit sollten sämtliche Läufe mit konstanter Geschwindigkeit, aber unterschiedlichen Startpunkten in einen einzigen Lauf mit variabler Geschwindigkeit umgewandelt werden. Immer wieder beschleunigte der Kalibrierläufer auf ein Vielfaches der »normalen« Geschwindigkeit, um danach mit beinahe derselben hohen Geschwindigkeit wieder rückwärts zu sprinten. Trotz dieser Eskapaden folgte er zu keiner Zeit bevorzugt einer Richtung, sondern blieb trotz aller erratisch erscheinenden Sprints stets »brav« in der Nähe eines mit ihm gleichzeitig gestarteten, gemächlich voranschreitenden Idealwanderers.

Ein Reporter, der ohne Kenntnisse der Spielregeln diesen merkwürdigen Lauf zu kommentieren hätte, könnte anfangs gar nicht auf die Idee kommen, daß der hin- und herflitzende Läufer und der gemütlich dahingehende Wanderer am weit, weit entfernten Ziel nur 10% auseinander liegen würden. Er wäre im Laufe der Zeit allerdings immer sicherer geworden, daß der vielfach schnellere Läufer den Stock offenbar gerade so handhaben sollte, daß sich die vorwärts- und rückwärtstreibenden Effekte permanent fast aufhoben und er folglich nur mit dem vergleichweisen Schnecken-tempo des Wanderers vorankam. Sein Fazit wäre gewesen, daß die Aufgabe des schnellen Läufers darin bestanden habe, dem Wanderer zu folgen.

Die Laufgeschwindigkeit des Wanderers steht für die Zerfallsrate von C14, und die des Läufers steht für eine Überlagerung zwischen überschüssiger Produktion und Diffusion einerseits und dem Zerfall andererseits. Produktion und Diffusion sind de facto einzeln jeweils um Größenordnungen stärker als der Zerfall. Der Parcours des Läufers hat mit dem des Wanderers effektiv nichts zu tun, so daß die bekannten Kalibrierkurven aus den einzeln vorliegenden Phasen falsch »zusammengeschnitten« erscheinen, und zwar auf eine Weise, daß der Parcours des »Kalibrierläufers« dem des »Idealwanderers« möglichst ähnlich blieb. Die Prozesse, die mit Produktion und Diffusion verbunden sind, grinsen jedoch in »wilder Natur« einem noch an Frieden und Gleichförmigkeit glaubenden Zuschauer ins Gesicht ...

könnte man von einem seit langer Zeit konstantem C14/C12-Verhältnis in der Atmosphäre ausgehen. Eine korrekte Interpretation der C14-Daten aus den einzelnen Abschnitten der fraglichen Kalibrierkurven beweist ein Maß an Ungleichgewicht in den relevanten Randbedingungen, welches niemals in Betracht gezogen wurde, obwohl es das Vorgehen beim Erstellen der Kalibrierkurven ad absurdum führt.

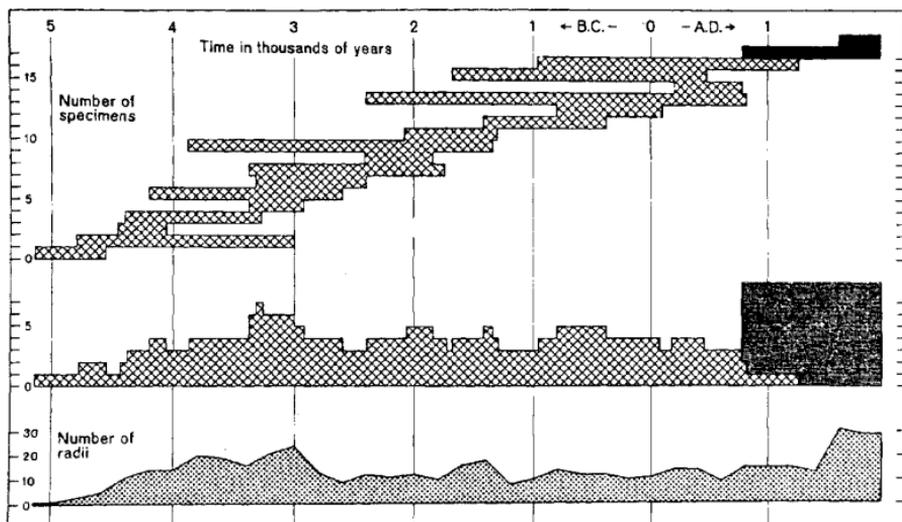
Die Geschichte der Erstellung der Kalibrierkurven ist eine Geschichte der Verdrängung von Meßergebnissen. Diese Meßergebnisse verwiesen auf räumlich und/oder meßtechnisch bedingte Streuungen, die das Projekt »Kalibrierung« unmittelbar hätten in Frage stellen müssen. Es mag bitter sein, daß ausgerechnet die Historiker, denen doch die C14-Forscher mit ihrer Methode helfen wollten, ihnen nun anhand der Geschichte der C14-Forschung nachweisen müssen, daß die Kalibriertechnik auf einem Zirkelschluß beruht und unbrauchbar ist (siehe dazu auch Textbox **2.2**). Im nächsten Kapitel beschreiben wir diese Geschichte.

### 2.3 Chronik einer Kumpanei

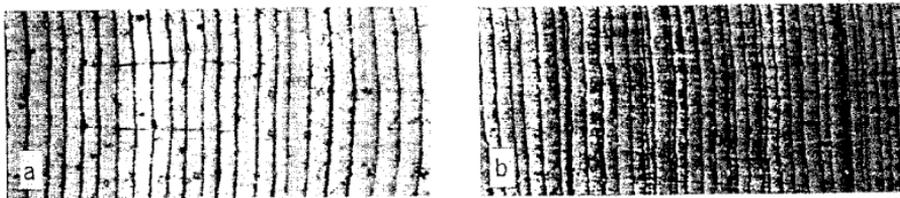
Der Historiker, der durch die regelmäßig disparaten C14-Daten für seine ergrabenen Funde sensibilisiert ist, wird hinsichtlich der schlußendlich anzubringenden Kalibrierung eine wesentliche Frage stellen müssen: Streuten die C14-Daten der archäologischen Funde, mit denen die Kalibrierkurve erstellt wurde, genauso hoch wie seine eigenen Proben? Diese Frage geht an die C14-vermessenen und dendrochronologisch synchronisierten Baumringsequenzen, die heutzutage einzig und allein als angeblich jahrgenaue Kalibriermaßstäbe zur Verfügung stehen. (Die Arbeitsweise der Dendrochronologie ist in den einführenden Kapiteln 1.6 und 1.7 beschrieben.)

Der Historiker wird natürlich eine Versicherung haben wollen, daß C14-Daten für gleichaltrige Bäume grundsätzlich geringer streuen, als er bei seinen eigenen Proben immer wieder hinzunehmen gezwungen ist. Nur dann gibt es eine Berechtigung, C14-Daten – sofern sie überhaupt in sich konsistent sind – zu kalibrieren und damit als Absolutdaten anzusprechen. Streuten hingegen die C14-Daten von Baumringen, die nach dendrochronologischen Kriterien als gleichaltrig erkannt worden sind, in ähnlicher Weise wie sonstige, ebenfalls als gleichaltrig erkannte archäologische Proben [Törnqvist/Bierkens 1994, 11], dann läge nach der Kalibrierung eine summarische Datierungsunsicherheit vor, die in aller Regel in der Größenordnung eines Jahrtausends liegen würde. (Wir zeigen in Kapitel 8 im Detail, daß die Summe der Fehler aus routinemäßig vorzunehmenden Korrekturen auch bei größter Sorgfalt in der

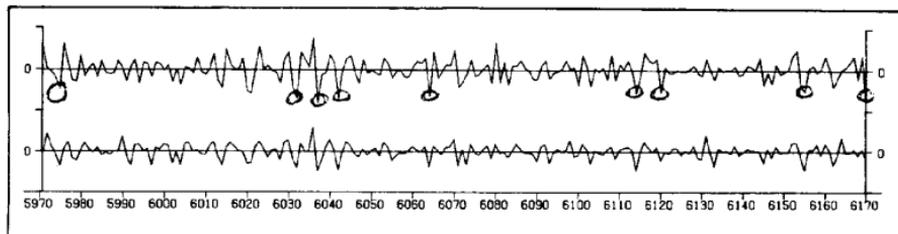
### Funddichte »Bristlecone Pines« (bis 1969)



### Unterschiede in auswertbaren Ringbreiten



### »Pine Alpha« versus »Bristlecone Pine Mastersequenz«



### 2.3 Die Bestandteile der Bristlecone-Pine-Chronologie

Mit Hilfe der Bristlecone-Pine-Chronologie (1969) wurde Anfang der siebziger Jahre die »Zweite Radiokarbonrevolution« ausgelöst und zugleich ein radiometrisches Vorbild für die Europäischen Eichenchronologien kreiert.

- *Bild oben:* Das obere Diagramm zeigt die Zeitintervalle, die von jeder verwendeten Baumringsequenz repräsentiert werden; das mittlere Diagramm gibt die jeweilige Belegdichte in Form eines Histogramms wieder und das untere Diagramm veranschaulicht die tatsächliche Zahl der ausgewerteten Bohrkerne in 200-Jahres-Intervallen [nach Ferguson 1969, 11]. Für die jüngsten 1.000 Jahre wurden kurze Sequenzen von E. Schulman übernommen. Ergänzend zu der nebenstehend im Text vorgenommenen Analyse sei hier erwähnt, daß nicht mit einem, sondern mit mehreren, teils unterschiedlich langen Bohrkernen aus einem Baum gearbeitet wurde.
  - *Bildpaar Mitte:* Der Ausschnitt a) gibt eine Abfolge ausgeglichener, nahezu ununterscheidbarer (»complacent«) Ringdicken wieder, der Ausschnitt b) dagegen eine Abfolge bedingt abwechslungsreicher Ringdicken [nach Ferguson 1968, 843]. Der Signifikanzgrad der Wuchswertfolgen steigt erst, wenn die mittlere Ringdicke sinkt und die Zahl der Fehlringe zunimmt [Fritts 1966, 974], womit verbunden ist, daß die Meßgenauigkeit sinkt und die Unsicherheit aus dem Auftreten von Fehlringen zugleich wächst.
  - *Bild unten:* Es wird die »Pine Alpha« (oben) mit der Bristlecone-Pine-Master-Chronologie verglichen (unten). Es geht um die Systematik der Einfügung vermuteter Fehlringe zur Erlangung dendrochronologischer Synchronität. H.C. Sorensen, der diesen Plot von Ferguson erhalten hatte, konnte nicht angeben, ob die »eingekreisten« Ringe hier bereits zugefügt oder etwa bei anderen Sequenzen als Fehlringe identifiziert worden waren. Ohne Fehlringe würde auch diese Sequenz in dendrochronologischer Hinsicht indifferent gegenüber anderen Ringsequenzen werden [nach Sorensen 1973, 18].

Die Bristlecone-Pine-Chronologie ist ein klassischer Fall von Amnesie betreffs der Genese einer umfassend im Gebrauch befindlichen Theorie. Die meisten Fachleute wissen, daß diese Baumring-Chronologie die erste allgemein anerkannte Kalibrierkurve für C14-Daten darstellte, auf deren Konto erhebliche Chronologierevisionen für die europäische Früh- und Vorgeschichte ging. Weit weniger geläufig ist, daß sich die europäischen Dendrochronologen über »wiggles« mit dieser Chronologie tentative Absolutdaten für ihre schwimmenden Baumringsequenzen verschafften, weil sie anders nicht mehr vorankamen. Niemand hat sich dagegen bis heute der Mühe unterzogen, die Tragfähigkeit dieser Chronologie eingehend zu untersuchen und – für den Fall eines negativen Urteils über sie – die eventuellen Folgen für die an ihr ausgerichteten C14-Chronologien zu untersuchen. Obwohl heutzutage offenbar kein einziger Dendrochronologe mehr seine Hand für diese erste komplette Baumringchronologie ins Feuer legen würde (bemerkenswert die Zurückhaltung bei P.W. Dunwiddie [1979]), ist gleichwohl ihre radiometrische Struktur in allen heute gebräuchlichen Kalibriermaßstäben wiederzufinden.

Routine zu einer Datierungsunsicherheit von im Mittel  $\pm 300$  Jahren führen wird. Einen Überblick gibt die Tabelle **8.14**).

Es ist bekannt, daß in den sechziger Jahren Kritik an der C14-Methode laut wurde, u.a. weil die C14-Daten für altägyptische Funde, die der Zeit vor 2.000 BC zugeordnet wurden, zunehmend von der akzeptierten Chronologie abwichen [Smith 1964]. Ihr angeschlagenes Image konnte die C14-Wissenschaft erst wieder aufbessern, als C.W. Ferguson 1969 die weltweit erste vollständige Baumringsequenz präsentierte – die kalifornische Bristlecone-Pine-Chronologie (Bild **2.3**) –, die mit einer Länge von rund 7.000 Jahren weit in den vorgeschichtlichen Zeitraum vordrang.

Eines der vordringlichsten Ziele Fergusons war es, den C14-Wissenschaftlern eine Chronologie des Verlaufs der atmosphärischen C14-Konzentration an die Hand zu geben [Ferguson 1969, 12]. Damit sollten diese ihre C14-Daten in ein Absolutdatum umwandeln können. Da mit den »kalibrierten« C14-Daten Anfang der siebziger Jahre ganz erhebliche Verwerfungen in verschiedenen historischen Chronologien ausgelöst worden sind, ist es angezeigt, die Entstehung dieser Baumringchronologie im Hinblick auf unsere Frage zu analysieren, ob denn systematisch untersucht wurde, wie groß die Streuung der C14-Daten gleichaltriger Baumringe eigentlich gewesen ist. Wir können folgende Randbedingungen für die Entstehung der Bristlecone-Pine-Chronologie rekonstruieren:

- Die Baumproben stammen von einer äußerst seltenen, nur in einem einzigen begrenzten Gebiet Kaliforniens wachsenden Spezies und sind niemals in Vergesellschaftung mit sonstigen archäologisch datierbaren Proben gefunden worden [Enc.Brit 1997].
- Die Baumproben wurden offenbar größtenteils an der Erdoberfläche gesammelt [Ferguson 1969, 6]. Es wurde nicht diskutiert, warum während der fraglichen 7.000 Jahre kein einziges Feuer zur Zerstörung der ausgetrockneten Hölzer geführt haben sollte.
- Die C14-Daten verschiedener Bohrkerne ein und desselben Baumes wurden nicht verglichen [Ferguson 1970a, 247].
- Die C14-Daten der Bohrkerne unterschiedlicher Bäume wurden als Ausgangsbasis zur dendrochronologischen Synchronisierung, also zur Vordatierung der fraglichen Sequenzen verwendet [Ferguson 1968, 845].
- Den drei für Ferguson arbeitenden C14-Labors wurden die anderen Labors als »sorgfältiger arbeitend« gegenübergestellt [Clark 1979, 53].
- Es wurde davon ausgegangen, daß der Trend der zu erstellenden Kalibrierkurve nur wenig von der Gestalt abweichen würde, die unter stationä-

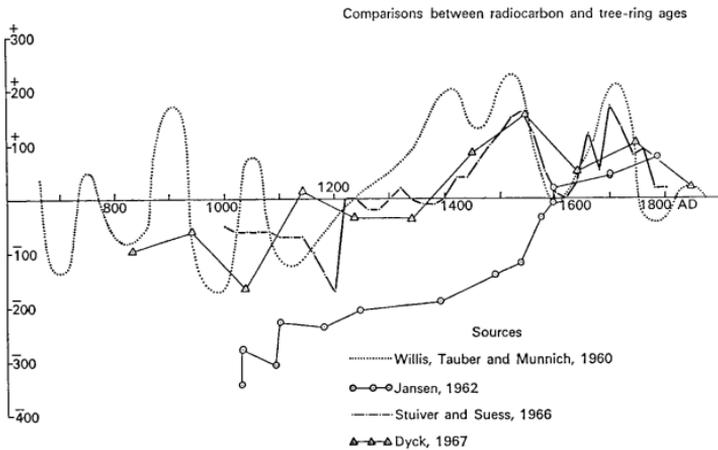
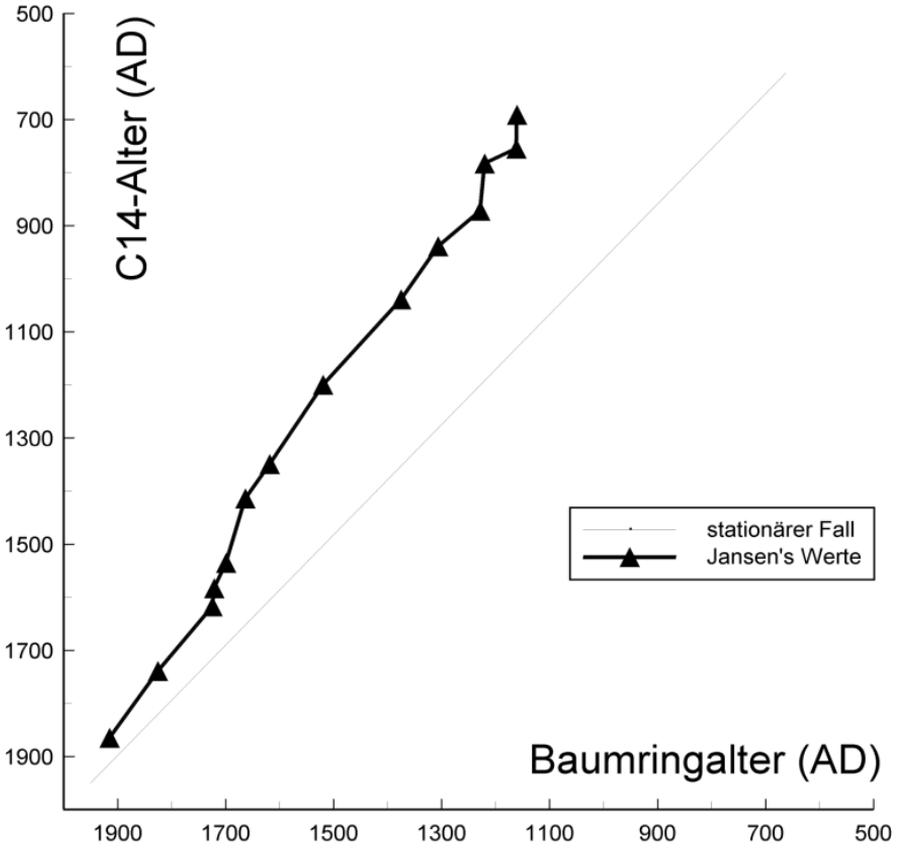
ren Verhältnissen als Winkelhalbierende zu erwarten wäre: »natura non facit saltum« [Suess/Linick 1990, 406].

- Die Ringbreiten dieser Baumart waren teilweise extrem gering – z.B. 1.100 Jahrringe auf knapp 13 Millimeter [Ferguson 1969, 7] – und die Sensitivität von rund der Hälfte der verwendeten Sequenzen so niedrig, daß diese an nahezu jeder Stelle in der Chronologie mit gleicher Wahrscheinlichkeit gepasst hätten [Sorensen 1973, 17].
- Es kann eine Kopplung zwischen der Abfolge der Ringbreiten und der C14-Aktivität und damit der Sonnenaktivität festgestellt werden [Sonett/Suess 1984]. Die Periodizität der Sonnenaktivität muß zu dendrochronologischen Scheinsynchronitäten führen.
- Die komplette Erstellung der Baumringchronologie gelang erst, als man systematisch zu Exemplaren überging, denen man eine erhöhte Neigung zu Fehlringen<sup>4</sup> – bis 5%, teilweise bis zu 10%- unterstellen zu können meinte [Ferguson 1969, 7; Sorensen 1973, 17].
- Das Ausmaß an Fehlringen wurde auch danach beurteilt, wieweit die abgezählten Ringe der vorliegenden Sequenzen »zu alt« waren, d.h. wie weit die aus ihnen direkt ablesbare Kalibrierkurve von der Geraden abwich, die für allzeit stationäre Verhältnisse stand [Suess 1965]. Durch Einfügen entsprechender Fehlringe konnten die »wahren« Verhältnisse also wiederhergestellt werden.
- Die immer wieder als Unterstützung ins Feld geführte Chronologie von V.C. LaMarche und T.P. Harlan [1973] konnte gar nicht in Ansatz gebracht werden, da sie aus einem andersartigen Wachstumsgebiet stammte und mithin keine signifikante dendrochronologische Korrelation aufweisen konnte [Ferguson 1979, 209].

In diesem Stadium der historischen Rekonstruktion der Entstehung der C14-Kalibrierkurven müssen folgende drei Feststellungen gemacht werden:

---

<sup>4</sup> H.C. Sorensen, einer der wenigen Kritiker der Bristlecone-Pine-Chronologie, hatte mehrere persönliche Gespräche mit C.W. Ferguson geführt und von diesem erfahren, daß nicht nur 5% (wie 1969 veröffentlicht), sondern sogar bis zu 10% »missing rings« für einen Bohrkern festzustellen waren [Sorensen 1973, 17]. Da an einem Bohrkern keine Platzkarte hängt, die die Synchronität zu Bohrkernen anderer Bäume verrät, entpuppen sich diese »missing rings« als Flickzeug zur Ermöglichung der dendrochronologischen Synchronisierung. Sorensen betonte in einem entsprechenden Artikel [Sorensen 1973, 18], daß die Signifikanz von C14-plazierten Ringsequenzen erst durch Einfügen von »vermißten« Ringen an der »richtigen« Stelle ausreichend angehoben werden konnte.



## 2.4 Der Skandal von Uppsala

Wir betrachten die Nichtbeachtung und Verdrängung der von H.S. Jansen 1962 und erneut 1969 vorgelegten Meßergebnisse an einem neuseeländischen Kauri-Baum als den »Skandal von Uppsala«. Jansens Meßergebnisse standen in fundamentalem Widerspruch zu der allgemein »gepushten« Bristlecone-Pine-Chronologie, die wenige Jahre später die Plattform für die »Zweite Radiokarbonrevolution« bilden sollte. Die C14-Weltgemeinde war 1969 in Uppsala zu dem 12. Nobel-Symposium zusammengetreten, um darüber zu befinden, wie zuverlässige Absolutdatierungen angesichts allfälliger C14-Konzentrationschwankungen zukünftig möglich sein könnten. Der Titel des Symposiums machte die Zielsetzung deutlich: »Radiocarbon Variations and Absolute Chronology«. Auch Historiker nahmen die dort erzielten Ergebnisse sehr genau zur Kenntnis und erwarteten Lösungen angesichts der angesammelten Probleme.

Es wäre also dringendst angezeigt gewesen, die Bristlecone-Pine-Chronologie eingehend zu verifizieren, ehe man zur Kalibrier-Tagesordnung übergehen konnte, denn diese war für die jüngsten 1.000 Jahre im Gegensatz zum Kauri-Baum aus Einzelsequenzen errichtet worden (vergleiche Bild 2.3) und zeigte für diese Zeit den Trend einer quasi-konstanten C14-Konzentration. Selbst wenn die Bristlecone-Pine-Chronologie einer Überprüfung standgehalten hätte, wäre auf jeden Fall das Simultanitätsprinzip in Frage gestellt und damit der – im übrigen schon längst beschrittene – Weg zum »wigggle-matchen« mit den europäischen Eichenchronologien vorerst verbaut gewesen.

Nichts dergleichen geschah aber. Wie sicher man sich der Quasikonstanz der atmosphärischen C14-Konzentration war, zeigt auch das Beispiel der *Sequoia sempervivens*, die hinsichtlich der C14-Aktivität dieselbe Tendenz wie der Kauri-Baum aufweist und deshalb schlicht unter dem Verdacht stand, entsprechend viele Fehlringe zu produzieren, nämlich zwischen 10 und 20% [Suess 1965, 5938]. Aber sogar rund 50% Fehlringe wären für den Kauri-Baum in Ansatz zu bringen gewesen, um Amerika und Neuseeland miteinander zu »versöhnen«. Da der Kauri-Baum aber eher zur Ausbildung von Doppelringen neigt, war mit diesem Argument nichts auszurichten. Vielleicht machte die Bristlecone Pine nur deshalb Furore, weil das Diffusionsverhalten von C14 innerhalb dieses Baumes [dazu auch Long et al. 1979] zufällig zu Verhältnissen führt, die eine Quasikonstanz der atmosphärischen C14-Konzentration vorspiegelt.

Der Anstieg der hier abgebildeten Kurve weist auf eine ständige 50%-Überproduktion von C14 gegenüber dem radioaktiven Zerfall hin. Um diese durchgängige Tendenz hervorzuheben, wurde das Fällungsjahr im Gegensatz zum dendrochronologischen Befund ungefähr auf das gegenwärtige Jahr gesetzt. Das Bild unten zeigt einen Vergleich der C14-Daten aus unterschiedlichen Baumringsequenzen, die der Historiker W. Shawcross 1969 in der Zeitschrift *WORLD ARCHAEOLOGY* veröffentlichte (siehe auch Bild 9.13). Bezeichnenderweise war es ein fachfremder Wissenschaftler, der – über die enormen Abweichungen untereinander sehr beunruhigt – die »Hausaufgaben« in Angriff nahm, die von der C14-Gemeinde vor jeder Veröffentlichung eines angeblich universell gültigen Kalibriermaßstabes hätten erledigt werden müssen.

- Es wurde ausdrücklich nicht überprüft, ob gleichaltrige Baumringe tatsächlich das gleiche C14-Alter aufweisen, denn nur dann wäre eine seriöse Vordatierung mit C14 in Erwägung zu ziehen gewesen.
- Es wurde die Annahme von der Stationarität der atmosphärischen C14-Konzentration, deren Legitimität sich aus dem Aktualismus ableitete, als Leitfaden für Selektion und Platzierung der Baumringsequenzen nach allen Regeln der Kunst ausgeschlachtet.
- Ohne die rigorose Verwendung von C14-Daten zur Vordatierung hätte es keine Baumringchronologie gegeben, die (weltweit als erste) in den vorgeschichtlichen Zeitraum vorstoßen konnte.

Einem Historiker wäre es hier erheblich sympathischer gewesen, wenn die fraglichen Holzproben aus urkundlich belegten oder sonstwie historisch datierbaren Gebäuden gestammt hätten oder wenn sie wenigstens über die Vergesellschaftung mit anderen charakteristischen Funden mit Hilfe typologisch-komparativer Methoden<sup>5</sup> vordatierbar gewesen wären. (Auf diese Weise wurden die Europäischen Eichenchronologien für die jüngsten 1.000 Jahre aufgebaut.) Aber ausgerechnet für diese im Folgenden so bedeutsame Baumringchronologie waren keinerlei archäologische Anhaltspunkte zu haben.

Vielmehr muß der Historiker konstatieren, daß alle Vordatierungen, die für Synchronisierungsversuche auf dendrochronologischer Basis offenbar unabdingbar gewesen sind, ausschließlich mit der Methode vorgenommen wurden, die er selber immer wieder als höchst zweifelhaft charakterisieren muß. Im Stillen mag er sich zusätzlich die Frage stellen, ob in seinen Chronologien nicht auch manche Schwierigkeit aus der Welt zu schaffen wäre, wenn ihm ebenfalls ein »Reptilienfonds« von bis zu 10% Fehljahren zur Verfügung stehen würde. Auf die eigentliche Frage aber, ob denn wenigstens bei dieser Gelegenheit eine Ausnahme von der Regel »one date is no date« gegolten habe, bekommt er keine Antwort.

Ein hartnäckiger Frager wird in dem Tagungsband, in dem jene Bristlecone-Pine-Chronologie erstmals einer breiteren Öffentlichkeit als zukünftig gültiger C14-Kalibriermaßstab präsentiert worden war, noch eine weitere Baumringchronologie dokumentiert finden, deren radiometrische Charakteristika einen dunklen Schatten auf die Praktikabilität der C14-Methode warfen.

---

<sup>5</sup> Allgemeines Verfahren zum Auffinden chronologischer Ordnungen unter Einbeziehung von Theorien über kulturelle und technische Evolution sowie über die Diffusionsgeschwindigkeit und -richtung entsprechender Entwicklungsstufen. Die chronologische Ordnung wird sowohl regional als auch in überregionaler Verknüpfung angestrebt und wenn möglich zu einer Absolutchronologie verdichtet.

Diese Baumringchronologie stammte aus Neuseeland und hatte den Vorteil, aus einem einzigen sehr alt gewordenen Kauri-Baum gewonnen zu sein, während die Bristlecone-Pine-Chronologie gerade in diesem Abschnitt aus relativ kurzen Sequenzen bestand. Die ausgezählten und C14-vermessenen Baumringe erzeugten über ca. 1.000 Jahre einen viel steileren Anstieg der Kalibrierkurve, als von der Bristlecone-Pine-Chronologie selbst ausgewiesen wurde (vergleiche dazu Bild **2.4**).

Um diese neuseeländische Kurve mit der aus Amerika zur Deckung zu bringen, schien es nur eine Erklärung zu geben: Der Baum hätte im Mittel jedes dritte Jahr bei der Bildung des entsprechenden Jahrringes aussetzen müssen [Jansen 1970, 272]. Doch Botaniker wiesen im Gegenteil daraufhin, daß der Kauri-Baum zur Ausbildung von Doppelringen und nicht von Fehlringen neigt, wodurch die Diskrepanz tendenziell sogar noch verschärft wurde [Shawcross 1969, 192]. H.S. Jansen hatte – vermutlich im Bewußtsein der Brisanz seiner Resultate – die hohe Qualität seines Labors mit Baumproben verifiziert, die zuvor von drei verschiedenen europäischen Labors vermessen worden waren. Tatsächlich lagen die Meßwerte aus Neuseeland bereits seit 1962 vor [Jansen 1962] und waren dem Fachpublikum anlässlich des 12. Nobel Symposiums im schwedischen Uppsala nur erneut und in unveränderter Form vorgehalten worden.

C.W. Ferguson, der ungefähr 1963 in die entscheidende Phase seines Projektes zur Erstellung einer kompletten Baumringchronologie getreten war, wäre eigentlich gezwungen gewesen, sich für seine kalifornischen Borstenkiefern die Tendenz dieser Kurve zum Vorbild zu nehmen, und nicht die der Stationarität. Denn schließlich war man sich wenigstens darüber einig, daß die C14-Werte – wenn sie schon nicht konstant waren – auf der ganzen Welt einheitlich »schwanken« sollten.

Genau genommen macht der Begriff der Schwankung im Zusammenhang mit der neuseeländischen Kalibrierung überhaupt keinen Sinn mehr, denn hier gab es einen klaren einseitigen Trend der Zunahme der C14-Konzentration in der Atmosphäre, ohne erkennbare Neigung zur Rückkehr in einen sogenannten stationären Zustand (ähnlich auch in Bild **2.17**). Aus der Tatsache, daß diese Meßwerte unberücksichtigt blieben, kann auf den unverbrüchlichen Glauben an die Konstanz der physikalischen Randbedingungen geschlossen werden, der letztlich zu einer falschen Anordnung der C14-datierten Ringsequenzen führen mußte.

Es gab seinerzeit nur zwei reguläre Alternativen für die Erklärung der unterschiedlichen Trends in den amerikanischen und den neuseeländischen Baumringen:

- Entweder wiesen amerikanische und neuseeländische Bäume tatsächlich unterschiedliche C14-Konzentrationen auf – dann mußte das Simultani-  
tätsprinzip als falsch anerkannt werden –, oder aber
- die amerikanische Sequenz war mit der falschen Arbeitshypothese schon  
im Ansatz in eine falsche Richtung getrieben worden.

Beide Alternativen wären gleichermaßen schlecht für die Praktikabilität der C14-Methode gewesen. Egal, wofür sich Ferguson letztlich entschieden hätte, jeder Nutzer von dessen Kalibrierkurve wäre angehalten gewesen, sich Rechenschaft über deren Verwendbarkeit für seine Proben abzulegen. Das galt insbesondere, wenn die Proben nicht aus der Nähe des Wuchsortes der Bort-  
stankiefern, sondern vielleicht sogar von einem anderen Kontinent stammten.

Der Chronist verzeichnet für eine kurze Zeit die entsprechende Sensibilisierung im methodischen Diskurs der historischen Wissenschaften. So dokumentiert beispielsweise ANTIQUITY für das Jahr 1971 eine Debatte über dieses Problem, in der J. Collis den »verzweifelten« Wunsch nach einer Baumringsequenz zum Ausdruck brachte, die von der Bristlecone-Pine-Chronologie unabhängig sein sollte, um die Diskrepanzen zu Neuseeland und auch Europa aus der Welt zu schaffen [MacKie et al. 1971, 201]. Tatsächlich startete man in Irland um diese Zeit herum mit dem ehrgeizigen Projekt, binnen weniger Jahre eine entsprechend lange und unabhängige Kalibrierquelle für C14-Daten zu erstellen. Nach wenigen Jahren kam es auch zu einem Eklat mit den amerikanischen Dendrochronologen, der sich an einer Diskussion über die »wahre« Struktur dieser Kurve entzündete, bald darauf aber beigelegt wurde, weil auch die Iren ohne die C14-Daten der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie nicht ans Ziel gelangen konnten (vergleiche dazu Kapitel 3.5 und Bild 2.10).

Doch alle Warnungen kamen um Jahre zu spät. Bereits 1965 – vier Jahre, bevor die dendrochronologischen Charakteristika der Bristlecone-Pine-Chronologie veröffentlicht werden sollten – hatten nämlich die Europäer begonnen, sich über den Vergleich von C14-Werten »tentative Absolutdaten« aus Amerika zu verschaffen. Damit zeigt sich ein weiteres Mal, daß die Gestalt der amerikanischen Kalibrierkurve von vornherein als durch das aktualistische Prinzip gegeben betrachtet wurde und daß die dendrochronologische Synchronisierung ihrer Bestandteile – nämlich anhand eines Vergleichs der entsprechenden Ringwuchswerte – nur untergeordnete Bedeutung besaß.

Die Europäer kalibrierten nicht etwa einzelne Proben, sondern begannen Absolutdaten für ihre schwimmenden Baumringsequenzen zu generieren. Diese wollten sie möglichst rasch zu einer europäischen Eichenchronologie

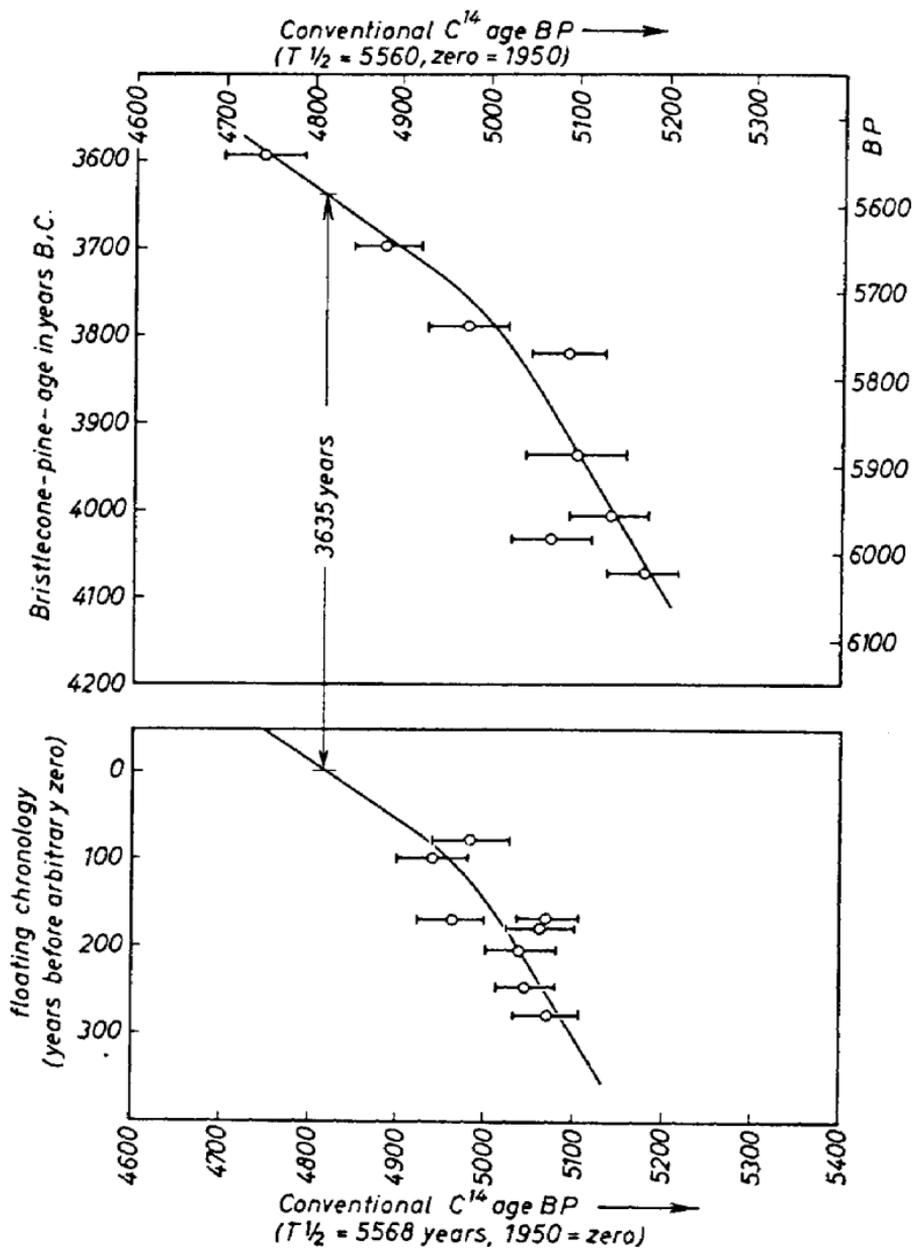
zusammensetzen, die nicht minder lang sein sollte als die kalifornische Chronologie. Die Europäer hatten dieselben Schwierigkeiten wie die Amerikaner: Wo die Anbindung an eine historische Chronologie entfiel, reichten die Mittel der Dendrochronologie allein nicht aus, um schwimmende Sequenzen sicher zu verbinden. Der Pakt zwischen C14 und Dendrochronologie, der bereits in den frühen Sechzigern geschlossen wurde, beruhte auf dem gegenseitigen Versprechen, jeweils ganz bestimmte Leistungen für den Partner zu erbringen:

- 1) Die C14-Wissenschaftler versicherten den Dendrochronologen, daß C14-Muster innerhalb der Baumringsequenzen – über die bloß lokale Vergleichbarkeit der Ringwuchswerte hinausgehend – weltweit direkt miteinander verglichen und synchronisiert werden können. Heute gilt dieses Verfahren des »wiggle-matching« innerhalb der Dendrochronologie als »state-of-the-art« [Baillie 1995, 72] (siehe gegebenenfalls das einführende Kapitel 1.8 sowie die Erläuterungen in Bild **2.5**).
- 2) Die Dendrochronologen versicherten den C14-Wissenschaftlern im Gegenzug, auf diese Weise nunmehr so schnell als möglich eine Kalibrierkurve bereitstellen zu können, die das ganze Postglazial überstreichen würde.

So wuchs das Fleisch der Bristlecone-Pine-Chronologie auf dem Skelett der Winkelhalbierenden als Ur-Kalibrierkurve, genauso wie später – wegen des direkten C14-Mustervergleichs – auch das der Europäischen Eichenchronologien.

J. Collis bezog sich bei seiner Mahnung zum vorsichtigen Umgang mit der Bristlecone-Pine-Chronologie insbesondere auf den Versuch von H.E. Suess, ein Absolutdatum für miteinander verzahnte Baumringsequenzen, die aus Proben vom Neuenburger See in der Schweiz bestanden, zu erhalten. Dazu verglich Suess eine Folge ihrer C14-Werte mit denen der Bristlecone-Pine-Chronologie (siehe dazu Bild **5.7**). Weitere Datierungen wurden auf dieselbe Weise 1966 für Proben aus dem schweizerischen Thayngen (vergleiche das Bild **2.5**) erwirkt, sowie bereits 1965 für Proben aus Middle Littleton in England [Berger 1970b, 101].

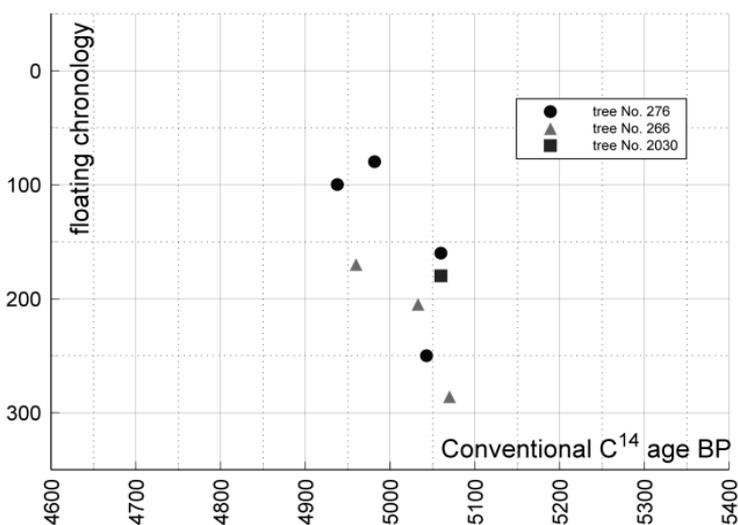
Eingangs dieses Kapitels stellten wir eine Frage von zentraler Bedeutung für die Legitimität der heute gebräuchlichen Kalibrierkurven: Macht Holz eine Ausnahme gegenüber dem global gültigen Befund der Historiker, daß C14-Daten erratischen Charakters sind? Insbesondere den Historiker wird die Antwort darauf brennend interessieren. Schließlich hat er schon Schwierigkeiten genug mit der Unsystematik seiner eigenen Probandaten. Wenn sich



## 2.5 Absolutdatierung durch »wiggle-matching«

1966 demonstrierten C.W. Ferguson, B. Huber und H.E. Suess, wie zukünftig Absolutdaten für schwimmende Baumringsequenzen erhalten werden können: Indem die in ihnen gemessenen C14-Muster (»wiggle«) mit der Kalibrierkurve synchronisiert (»gematcht«) werden, die in Gestalt der kalifornischen Bristlecone-Pine-Chronologie – ausschließlich Fachkreisen – vorlag. Obwohl es noch mehrere Jahre dauern sollte, bevor diese unter dendrochronologischem Gesichtspunkt veröffentlicht wurde, kannte man ihre C14-Struktur zu diesem Zeitpunkt offenbar gut genug, um bereits jahrgenaue Vergleiche mit C14-Mustern aus Europa anzustellen.

- *Bild links:* Das obere Bild zeigt C14-Daten aus der Bristlecone-Pine-Chronologie [Ferguson 1969], das untere solche aus Baumproben eines archäologischen Fundortes (Thayngen etc.) in der Schweiz [Ferguson et al. 1966]. Unter der Annahme, daß sich die C14-Konzentration von gleichaltrigen Proben weltweit stets identisch ausgebildet hat, erhält die »schwimmende« (also ohne Absolutdatum vorliegende) europäische Baumringchronologie ein absolutes »transatlantisches« Kalenderdatum, indem die beiden Ausgleichskurven durch den Vergleich ihrer Lagen synchronisiert werden.
- *Bild unten:* Die fünf ältesten C14-Daten sollen eine Tendenz sinkender C14-Konzentration anzeigen. Separiert man allerdings die C14-Daten für die einzelnen Bäume, dann kann keineswegs einheitlich von dieser Tendenz gesprochen werden. Die Zusammenfassung von C14-Daten unterschiedlicher Proben ist hier ohne weiteres genausowenig zulässig wie das Plazieren einer Ausgleichskurve.



jetzt auch noch sein zweites Standbein, das der Kalibrierung, als tönern erweisen sollte, dann bricht das ganze Datierungssystem endgültig unter ihm weg.

Es lohnt sich, die einzig berechtigte Antwort zu rekapitulieren, die es hierauf insbesondere vor dem Einsetzen der »Zweiten Radiokarbonrevolution« geben konnte: Es gibt schwerwiegende Indizien, daß auch Holz keine Ausnahme macht hinsichtlich des Befundes starker Streuungen der C14-Daten. Zumindest ist größte Vorsicht beim überregionalen Vergleich geboten. Ein Vergleich über den Atlantik hinweg kann ohne weitere Klärung nicht in Frage kommen. Entsprechend vorsichtig äußerten sich auch die Autoren der damals einzigen systematischen Untersuchung zu diesem Thema, indem sie nur für einige untersuchte gleichaltrige Holzproben desselben Ortes eine Gleichheit der C14-Alter bescheinigen wollten [Lerman et al. 1970, 295]. Auch 25 Jahre danach kommen F.G. McCormack et al. zu dem Schluß, daß »<sup>14</sup>C weder heutzutage noch in der Vergangenheit gleichförmig in der Troposphäre verteilt gewesen ist, sondern in seiner Verteilung sowohl auf lokaler Ebene als auch zwischen den Hemisphären geschwankt hat, wie aus dem terrestrischen organischen Material abgelesen werden kann« [1995, 395].

Die darauffolgende Zeit von 1970 bis etwa 1984 sieht zwei parallele Prozesse: Auf der einen Seite schreiten in Europa die Iren und Deutschen bei der Komplettierung ihrer jeweiligen regionalen Eichenchronologien mit Hilfe von Absolutdaten voran, die stets auf der Basis transatlantischen C14-Mustervergleichs gewonnen wurden, ohne dieses Problem jemals wieder – mit einer Ausnahme (vergleiche Kapitel 3.5) – anzuschneiden. Auf der anderen Seite hagelte es scharfe bis vernichtende Kritik an der Qualität der zugrundeliegenden Messungen.

In den Augen dieser Kritiker war »wigggle-matching« gänzlich unseriös (dazu auch Bild **8.7**). Die Kritiker drangen allerdings nicht dazu vor, die Bedeutung ihrer Einsichten für die Qualität der Europäischen Eichenchronologien explizit zu formulieren. Sonst hätten sie feststellen können, daß das offenkundig mühselige Voranschreiten beim Komplettieren der Europäischen Eichenchronologien vor allem auf den Versuch zurückzuführen war, falsche Synchronismen, die über das »wigggle-matching« entstanden waren, verifizieren zu wollen.

Ausgerechnet den drei Laboratorien, die für Ferguson gearbeitet hatten, wurden besonders schlechte Zensuren beim Messen von Baumringproben gegeben. Wir zitieren zum allgemeinen Fehlerstandard der Meßlabore exemplarisch R.M. Clark: »Unabhängige Vergleiche ... weiterer replikativer C14-Daten von hauptsächlich archäologischen Proben haben gleichfalls gezeigt, daß die

tatsächlichen Schwankungen deutlich höher liegen, als sie von den jeweiligen Labors in Gestalt der Standardabweichung angezeigt werden<sup>6</sup>« [Clark 1979, 53].

Diese Einschätzung stammt aus einer Zeit, als die Komplettierung der europäischen Eichenchronologien mit Hilfe der C14-Methode in unmittelbare Griffweite gerückt war. Die amerikanische National Science Foundation (NSF) stoppte die finanzielle Unterstützung des Labors von H.E. Suess auch, weil P.E. Damon et al. [1978] ausführlich begründet hatten, daß signifikante Muster globalen Charakters aus den Proben nicht herausgemessen werden könnten [Suess/Linick 1990, 405; Linick et al. 1984, 22]. Es sollte nicht unerwähnt bleiben, daß P.E. Damon nach dem Tod von H.E. Suess (1993) darauf hinwies, daß die Existenz »der meisten, gleichwohl aber nicht aller« der von Suess behaupteten wiggles bestätigt wurden [Damon 1995, 958]. Indem Damon anfügt, daß solche Ergebnisse zwar interessant seien, aber im Sinne der Wissenschaft eine unabhängige Bestätigung benötigten, erinnert er erneut an die immer noch unbefriedigende Situation voneinander abweichender Laborergebnisse.

Die Komplettierung der europäischen Eichenchronologien ging aber auf der Basis eben dieser Werte munter weiter. Diese galt bereits als abgeschlossen, als man sich endlich zu einer genaueren Untersuchung systematischer Abweichungen zwischen den Meßergebnissen einzelner Labors entschloß. Die Archäologin B.S. Ottaway brachte angesichts niederschmetternder Ergebnisse aus den vorläufigen Vergleichsuntersuchungen das Unbehagen ihres Berufsstandes in der Zeitschrift *RADIOCARBON* unmißverständlich zum Ausdruck: »Warum gibt es immer noch keine kontinuierliche Überwachung der Qualität aller Labore, die hier in *RADIOCARBON* veröffentlichen? Die Vorabergebnisse aus den Laborvergleichsmessungen zeigen doch, wie sehr diese eigentlich nötig wären.« Es seien aber, so fügte sie an, keinerlei Anzeichen zu erkennen, daß etwas in dieser Richtung unternommen würde [Ottaway 1986, 732].

Wie sich herausstellte, zeigten einige Labors derart alarmierende Abweichungen in ihren Meßwerten, daß unwiderrufliche Imageschädigungen zur Kenntnis genommen werden mußten: »Es wird noch einige Jahre dauern, bis die C14-Gemeinde ihr angeschlagenes Image wieder aufpoliert hat. Wichtig ist hier, daß wir einen Prozeß der Selbstheilung in Gang gesetzt haben« [Long 1990, iii]. Es wurde angesichts dieser drastischen Divergenzen dazu aufgefordert, solcherart Daten unveröffentlicht zu lassen [Street et al. 1994, 7] oder zu ih-

<sup>6</sup> »replikativ« steht hier im Zusammenhang mit Messungen an identischen bzw. an ausdrücklich gleichaltrigen Proben durch unterschiedliche Labors.

rer Vermeidung von vornherein durch »realistische Zielstellungen« für die C14-Labors beizutragen [Görsdorf 1992, 279; auch Heske 1994, 88 f.].

Der Befund drastisch voneinander abweichender C14-Daten auch für Hölzer kommt nicht überraschend, denn ein ähnlicher Befund lag den Archäologen für ihre Proben von Anfang an vor. Hier werden C14-Daten infolge Ratlosigkeit entweder unter den Tisch gefegt oder aber infolge Gutmütigkeit oder Not einer »heilenden« Interpretation zugeführt. Im Falle der Hölzer dürfen die Daten prinzipiell nicht derart erratisch sein, wenn man erfolgreich kalibrieren oder »wigggle-matchen« wollte. Die Spaltung in Macher und Kritiker ist nur zu verständlich. Macher durften die Kritik nicht ernst nehmen, wenn sie sich nicht selbst blockieren wollten. Kritiker dagegen haben sich aufgrund ihres vernichtenden Urteils nicht weiter mit Anwendungen des »wigggle-matching« beschäftigt.

## 2.4 Die Chronologie der Ereignisse

Ein Chronist der Entstehung der heute verwendeten Kalibrierkurven für C14 kommt also zu folgendem Ergebnis:

- Bereits **1962** lagen Meßkurven aus Neuseeland vor, die für die letzten 1.000 Jahre einen Überhang der C14-Produktion von fast 50% anzeigten [Jansen 1962; 1970]. Das stand im krassen Widerspruch zum Fundamentalprinzip, das damals noch für einigermaßen realistisch erachtet wurde, und nach dem die C14-Konzentration in der Atmosphäre stets hätte gleich sein müssen. Sofern wenigstens dem (gegenüber dem Fundamentalprinzip abgeschwächten) Simultanitätsprinzip Gültigkeit zuerkannt werden sollte, hätten diese Ergebnisse als Vergleichsmaßstab für jede weitere Kurve herangezogen werden müssen. Ohne ein Simultanitätsprinzip, nach dem alle »Schwankungen« der C14-Konzentration global gleichförmig stattfinden würden, konnte es gar keine effektive Kalibrierung geben und wäre C14 am Ende gewesen.
- C14-Charakteristiken der Bristlecone-Pine-Chronologie wurden **1965** [Berger 1970b] bzw. **1966** [Ferguson et al. 1966] zur Absolutdatierung europäischer Baumringsequenzen eingesetzt. Ihre dendrochronologischen Synchronismen wurden 4 bzw. 3 Jahre später fertiggestellt [Ferguson 1969]. Diese Verkehrung der einzig richtigen zeitlichen Abfolge – nämlich erst Dendrochronologie, dann C14-Kalibrierung – trägt mit am stärksten zur Unglaubwürdigkeit der Bristlecone-Pine-Chronologie als unabhängige C14-Kalibrierquelle bei. Ihre Konstrukteure ordneten nämlich die verwendeten

- Baumringsequenzen im Sinne einer stationären C14-Konzentration in der Atmosphäre an und gaben damit der Synchronisierung der C14-Muster Vorrang vor der der Ringwuchswerte.
- Die Bristlecone-Pine-Chronologie aus Kalifornien und die Kauri-Chronologie aus Neuseeland widerlegten **1970** gemeinsam das Simultanitätsprinzip. Das Projekt »Kalibrierung« war damit obsolet und bis zu einer etwaigen zufriedenstellenden Klärung der Diskrepanz auf Eis zu legen. Diese selbstverständliche Vorsichtsmaßnahme – insbesondere im Hinblick auf die Verantwortung gegenüber den historischen Wissenschaften – ist 1970 fahrlässigerweise unterblieben (vergleiche Bild **2.4**: Der »Skandal von Uppsala«).
  - Irische Dendrochronologen und C14-Wissenschaftler begannen kurz darauf – auch als Reaktion auf die Zweifel an der Bristlecone-Pine-Chronologie – mit dem Aufbau einer eigenen Eichenchronologie. Sie setzten umfassend auf die Verwendung von C14-Daten zur Vordatierung (dazu Bild **2.10**) und erzeugten binnen kürzester Frist eine mehrtausendjährige Folge von kurzen lokalen Mastern [Smith et al. 1972], die sie – nach etwa 10 Jahren vergeblichen Auffüllens – letztlich erst durch »wigggle-matchen« mit der Bristlecone-Pine-Chronologie zu einer Gesamtchronologie zusammenfügen konnten [Baillie 1983].
  - Befürworter und Gegner der ab **1972** angezettelten Datierungsrevolution für die europäische Jungsteinzeit bzw. Bronzezeit, die auf der Basis von C14-Daten stattfand, die an der Bristlecone-Pine-Chronologie kalibrierten worden waren [Renfrew 1979], haben gleichermaßen fahrlässig gehandelt. Ihre Befürworter haben sich über die schwerwiegenden und von einigen Wissenschaftlern auch publizierten Einwände gegen den zugrundegelegten Zeitmaßstab hinweggesetzt. Ihre Gegner haben dagegen die Gelegenheit verstreichen lassen, die Inkonsistenz der zugrundegelegten Baumringchronologie bloßzustellen.
  - B. Becker war der Hauptmotor für die Süddeutsche Eichenchronologie. Er gründete seine chronologischen Bemühungen spätestens ab **1973** auf das »wigggle-matchen« seiner umfangreich angesammelten schwimmenden Baumringsequenzen gegen die kalifornische Bristlecone-Pine-Chronologie (vergleiche Bilder **4.7** und **4.8** für die Zusammenfassung der Probleme der Dendrochronologie) [Becker/Suess 1977]. Damit wurde auch diese Chronologie auf Dauer zum »holzgewordenen« Vorurteil über den aktualistischen Charakter der Natur.
  - Die **1973** als unabhängige Bestätigung für Ferguson von V.C. LaMarche und T.P. Harlan [1973] ins Feld geführte zweite Bristlecone-Pine-Chrono-

logie, die bis heute gebetsmühlenartig zur Verteidigung von Fergusons Chronologie in den Zeugenstand gerufen wird, setzte sich aus Bäumen zusammen, die unter völlig anderen Bedingungen aufgewachsen waren und deren Charakteristika nicht auf signifikante Weise mit denen aus Fergusons Chronologie verglichen werden konnte [Ferguson 1979, 209].

- Von **1975** bis **1980** hat es zahlreiche, am Ende ob der Mißachtung durch die Dendrochronologen zu scharfen Tönen greifende Untersuchungen über die Qualität der C14-Messungen gegeben, die das Verfahren des »wigggle-matching« begründeten [Clark 1975; 1979; 1980; Damon et al. 1978; Pardi/Marcus 1977; Stuckenrath 1977]. Es wurden schlechte Zensuren für die Labors vergeben und ein Vergleich »signifikanter Schwankungen« als aussichtslos charakterisiert.
- Die Irischen Dendrochronologen präsentierten **1977** eine Kalibrierkurve, die ein Schlag ins Gesicht der Amerikaner und der Deutschen darstellte [Pearson et al. 1977]: Diese verlief genau dort stetig und ohne jede Schwankung, wo die charakteristisch gewundenen C14-Verläufe in deutschen Eichen und amerikanischen Borstenkiefern zum Zwecke der Datierung der schwimmenden deutschen Sequenzen ineinander geschmiegt worden waren (Bild **9.16**). Die Iren stellten das Simultanitätsprinzip allerdings nur insoweit in Frage, wie es den Vergleich von Europa und Amerika anging. Ihre eigenen schwimmenden Sequenzen hatten sie stets vorbehaltlos mit C14 datiert und nach dem Simultanitätsprinzip zueinander angeordnet, um mit zusätzlich gefundenem Holz die Überbrückungen zu vollziehen [Baillie et al. 1983].
- Die amerikanische NSF stoppte **1978** auch aufgrund der Stellungnahme von Damon et al. ihre finanzielle Unterstützung für das C14-Labor von H.E. Suess sowie für die umfangreichen Auswertungsarbeiten zum Auffinden der radiometrischen Gleichläufigkeiten zwischen amerikanischen und europäischen Baumringsequenzen [Suess/Linick 1990, 405; Linick et al. 1984, 22].
- Dennoch gaben die Iren spätestens **1980** ihren Protest auf, der sie unter anderem von der aktiven Teilnahme an der 9. Internationalen Radiokarbon Konferenz **1976** abgehalten hatte. Drei Jahre später wurden die süddeutsche und die irische Eichenchronologie für reif zum gegenseitigen Vergleich befunden. Nachdem B. Becker die Synchronisierung an einer besonders dünn belegten Stelle revidiert hatte (der sog. »Kirnsulzbachfehler«), konnten die beiden Eichenchronologien **1984** als neuer Maßstab zur Kalibrierung von C14-Daten ausgegeben werden [Pilcher et al. 1984].

- In RADIOCARBON erschien **1986** das erste »calibration issue« für C14, während sich zunehmend Querelen um die Datierungsabweichungen zwischen den Labors abzeichneten und infolgedessen die Notwendigkeit einer »verbesserten« Ausgabe erkannt wurde.
- Gegen **1990** war die »Mutter aller Kalibrierungen« nur noch unter »ferner liefern« bei der Aufstellung der zur Verwendung empfohlenen »high-precision« Kalibrierungen zu finden [Becker 1992, 45].
- Nur wenige Jahre nach Abstimmung der irischen mit der süddeutschen Eichenchronologie (durch Korrektur des »Kirnsulzbachfehlers« in letzterer) wurden diese bereits als »unabhängige Replikation« ausgegeben [Baillie 1990/91, 22; Newgrosh 1991/92 64].
- **1991**, in der Phase allgemeiner Konsolidierung, müssen G. Lambert und C. Lavier vom Laboratoire de Chrono-Ecologie dagegen kritisch feststellen, daß von vielen europäischen Dendrochronologie-Labors »magic dates« auf der Grundlage von »secret procedures« erzeugt wurden, die von Historikern und Archäologen gar nicht zuverlässig eingeschätzt werden könnten [Lambert/Lavier 1991, 176; Niemitz 1995, 309f.].
- **1993** wurde das vorläufig letzte »calibration issue« der Zeitschrift RADIOCARBON veröffentlicht, während zur selben Zeit immer noch die Auseinandersetzung über die divergenten Laborprozeduren tobte [Roeder 1992, 259].
- Schon längst von Detaildiskussionen absorbiert, können **1996** Synchronisierungsfehler in den Baumringchronologien eingestanden [Kromer et al. 1996] bzw. diskutiert [McCormac et al. 1995] werden, ohne daß irgendwelche Zweifel an den Methoden des mittlerweile 30 Jahre währenden Kampfes um die »post-glaziale Baumringchronologie« aufkeimen wollen.
- Nachdem es **1986** und **1993** jeweils neue Empfehlungen für den Gebrauch von Kalibrierkurven gegeben hatte, wird angesichts von Unstimmigkeiten, die sich aus der letzten Empfehlung ergeben hatten, von der **1997** in Groningen stattfindenden 16. Internationalen Radiokarbonkonferenz eine abermalige Empfehlung hinsichtlich der »wahren Kalibrierkurve« verlangt [van der Plicht/McCormac 1995, 964].

## 2.5 Ein himmlischer Zirkelschluß

Die im vorangegangenen Kapitel skizzierte Chronologie einer Beteiligung der C14-Methode an der Entstehung der Kalibrierkurven von 1962 bis heute verlangt folgende Schlüsse:

- 1) Die Bristlecone-Pine-Chronologie, die für die Wiederherstellung der Reputation der C14-Methode so entscheidend wichtig war, wurde nicht nach dendrochronologischen Maßstäben errichtet, sondern dem Vorurteil quasi-konstanter C14-Verhältnisse folgend zusammengeschnitten. Sie steht zum Beispiel im eklatanten Widerspruch zur neuseeländischen Kauri-Chronologie.
- 2) Die schwimmenden Sequenzen der süddeutschen Eichenchronologie sind während der letzten 10 Jahre ihrer Komplettierung nach dem radiometrischen Vorbild der Bristlecone-Pine-Chronologie ausgerichtet und dann in den Lücken ausgefüllt worden. Ohne Hilfe von C14 wäre weder der Aufbau noch der Abschluß möglich gewesen. Die C14-Datierungen gehen deshalb entscheidend in die Abfolge der Chronologie ein.
- 3) Dasselbe wie für die süddeutsche Eichenchronologie gilt auch für die Irische Eichenchronologie. Im Gegensatz zu den Deutschen wollten die Iren anfänglich eine von den Amerikanern unabhängige Kalibriermöglichkeit schaffen [Baillie 1983, 15], ein Projekt, welches später mit dem systematischen radiometrischen Abgleich mit Hilfe des »wigggle-matching« hinfällig geworden war.
- 4) Alle bis heute gebräuchlichen Kalibrierkurven wurden in unmittelbarer Abhängigkeit von der C14-Methode erstellt. Der Anspruch auf methodische Unabhängigkeit wird oftmals durch rein dendrochronologische Synchronitäten zwischen den verschiedenen Baumringchronologien begründet. Diese Bestätigungen sind wegen der gemeinsamen Abstammung von dem radiometrischen Vorbild der Bristlecone-Pine-Chronologie natürlich zu erwarten und bleiben demzufolge ohne Beweiskraft (den Zirkelschluß faßt das Bild **4.9** zusammen).

Es wäre nicht zu diesem Zirkelschluß gekommen, wenn sich die Dendrochronologie – spätestens angesichts der disparaten Ergebnisse aus Neuseeland und Kalifornien – gewisse Sicherheitsstandards für den Umgang mit der C14-Methode gesetzt hätte. Insbesondere hätte man alle Baumringsequenzen, die zur radiometrischen Vermessung abgeliefert wurden, zuvor ausschließlich mit dendrochronologischen Methoden der Synchronisierung behandeln müssen. Nur wenn diese jeweils eine hohe Wahrscheinlichkeit gezeigt hätten, auch radiometrisch gleich alt zu sein, wäre ihre Verwendung als Kalibriermaßstab – und das vorerst auch nur lokal – wirklich legitimiert gewesen (siehe Diskussion in Kapitel 3.7).

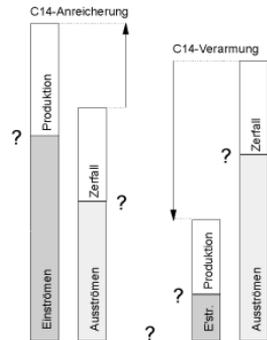
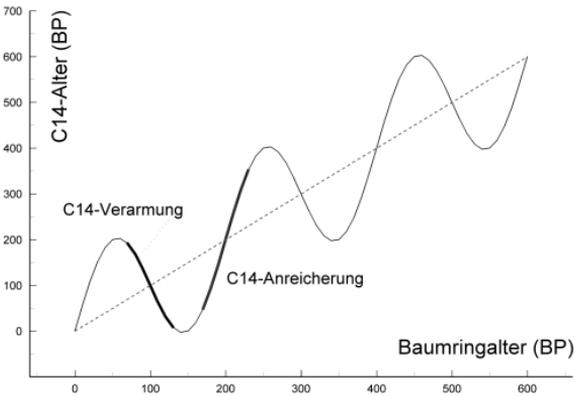
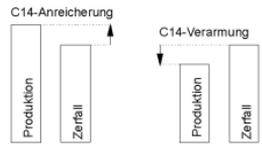
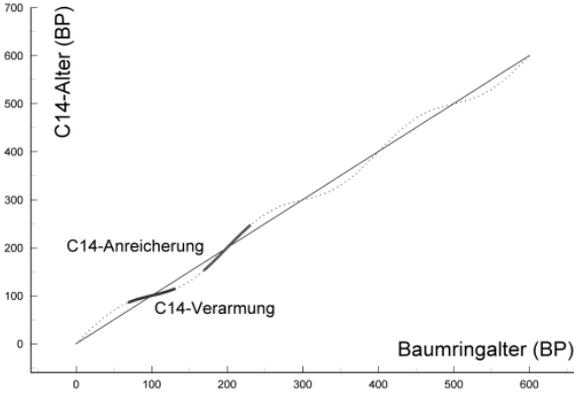
Wo dendrochronologisch synchronisierte Proben vermessen werden konnten, wurde in der Regel eine niedrige Wahrscheinlichkeit erzielt, daß diese ra-

diometrisch tatsächlich gleich alt sind. Das hätte jede radiometrische Synchronisierung, jedes »wigggle-matching« in Frage stellen müssen. Das zentrale Problem bzw. ein Sündenfall der Dendrochronologie besteht denn auch darin, daß sie sich seinerzeit zuerst radiometrisch signifikant synchrone Sequenzen beschafft hat, um hernach dendrochronologische Synchronismen zu finden, anstatt umgekehrt nur solche Sequenzen zur Auswertung als Kalibriermaßstab abzuliefern, die sich zuvor als signifikant synchron im dendrochronologischen Sinne herausgestellt hatten. Das ist ein bißchen wie »Malen nach Zahlen«, nur daß in diesem Fall ein Vorbild verwendet wurde, das in völlig überholten Vorstellungen vom Ablauf der Naturgeschehnisse gründet.

So erkennt man, daß die Dendrochronologie für die regionale, aber auch überregionale Verbindung lokaler Master einen kompletten Methodenwechsel – Synchronisierung von C14-Mustern – vollzogen hat. Ohne diesen Methodenwechsel wäre Erfolg eben nicht zu haben gewesen. Allerdings versagte die neue Methode gerade dort, wo sie den Erfolg garantieren und vor allem den Methodenwechsel legitimieren sollte. Die Forderung »gleichaltrige Baumringe weisen stets den gleichen C14-Gehalt auf« konnte nicht erfüllt werden.

Dendrochronologen weisen diese Argumentation in der Regel weit von sich: Der Vorwurf eines Zirkelschlusses könne sie gar nicht treffen, da das Material am Ende völlig mit den Methoden der Dendrochronologie bearbeitet worden sei und zudem ein mehrfache Replikation auf regionaler wie überregionaler Ebene vorliege. Wir fragen uns dagegen, was geschähe, wenn einem entsprechend ausgestatteten Labor erneut sowohl die verwendeten als auch die nicht verwendeten Baumringsequenzen einer beliebigen Baumringchronologie ohne jegliche Information über vormalige Plazierungen zur Verfügung gestellt würde, mit der Aufforderung diese nach rein dendrochronologischen Methoden zu synchronisieren? Bis zu welcher Länge würde das Projekt tatsächlich gedeihen können und was erbrächten die nun im Nachhinein genommenen C14-Werte der als synchron identifizierten Sequenzen?

Es war ausschließlich der Umstand, daß man alleine nicht weiterkam – weder in Amerika noch in Europa –, der dazu führte, daß man doch auf C14 zurückgriff. B. Huber sprach 1966 von einem »brüderlichen Wettstreit zwischen den beiden Datierungsmethoden der Dendrochronologie und der C14-Methode«. Er sah ihn zugunsten der Dendrochronologie entschieden, nachdem C.W. Ferguson gegenüber Kollegen seine bis dato 6.600 Jahre umfassende Bristlecone-Pine-Chronologie vorgestellt hatte [Stuiver/Suess 1966], ohne sich Gedanken darüber zu machen, wieweit Ferguson sich bereits von dem »wissenschaftlichen Bruder« C14 abhängig gemacht hatte [Huber 1966, 1]. Bis



## 2.6 C14-Bilanz: Zerfall, Produktion, Diffusion

Für das Verständnis der Entstehung von »wobble« ist es von entscheidender Bedeutung, alle möglichen Beiträge zur Bilanz von C12 und C14 in einem beliebigen Kohlenstoffreservoir – nämlich Produktion und Diffusion der Isotope – zu berücksichtigen:

- *Bildpaar oben* (Produktion schwankt um »Gleichgewichtswert«): Bei völliger Ausgewogenheit von Produktion und Zerfall und bei Abwesenheit jeder Diffusion entfällt eine Kalibrierung, denn jedes C14-Alter kann direkt in das Absolutalter umgerechnet werden. Oszilliert dagegen die Produktion um einen »Gleichgewichtswert«, so beginnt auch die Kalibrierkurve um die Winkelhalbierende zu mäandern. Die Kurve wird flacher, wenn die Produktion unter den Gleichgewichtswert sinkt (»Verarmung«), und steiler, wenn diese darüberliegt (»Anreicherung«). Auf die Menge an zerfallendem C14 wirkt sich diese Oszillation aufgrund der ohnehin niedrigen Zerfalls- bzw. Produktionsrate von rund einem 1/100 Prozent des Gesamtvorkommens an C14 kaum aus, solange die Produktion mit einer Periode in der Größenordnung von einigen Jahrhunderten um den Gleichgewichtswert oszilliert.
- *Bildpaar unten* (Zur Bilanz trägt zusätzlich Diffusion bei): Das untere Bildpaar legt die Zusammenhänge zwischen Produktion, Diffusion und Zerfall von C14 offen, wenn es um Kurvenabschnitte geht, die eine Erhöhung des C14-Alters bei an sich jünger werdenden Proben signalisiert (vgl. Bild 2.7): Der C14-Gehalt der Atmosphäre muß hier stärker sinken, als durch den radioaktiven Zerfall allein möglich wäre. Das kann grundsätzlich nur durch Diffusion (»Wanderung«) geschehen. Zur Verarmung an C14 innerhalb eines bestimmten Bereiches trägt neben dem Zerfall von C14 auch die Abwanderung von C14 oder die Zuwanderung von C12 bei (schwach punktierte Bereiche). Zur Anreicherung an C14 innerhalb eines bestimmten Bereiches trägt entsprechend neben der Produktion von C14 auch die Zuwanderung von C14 oder die Abwanderung von C12 bei (stark punktierte Bereiche).

Von den einzelnen Beiträgen zur Bilanz ist allerdings lediglich die Zerfallsmenge einigermaßen bezifferbar, die aus der spezifischen C14-Aktivität einzelner Proben im Hinblick auf das Gesamtvorkommen an Kohlenstoff hochgerechnet werden kann. Über die Menge an produziertem bzw. zu- oder abgewandertem C14 kann dagegen ohne weitergehende Untersuchungen keine Aussage gemacht werden! Lediglich der summarische zeitliche Trend der Zu- oder Abnahme von C14 in der Atmosphäre ist meß- bzw. bilanzierbar. Produktion und Diffusion stehen in ständiger Konkurrenz zueinander. Daß diese zusammen mit dem Zerfall einen quasi-stationären Zustand erzeugen, ist eine unglaubliche Hypothese.

Ganz im Gegenteil ist von einer Entkopplung der Ursachen für Produktion und Diffusion auszugehen, so daß der mittel- und langfristige Trend der Kalibrierkurven – im Widerspruch zu den ausgewiesenen Kalibrierkurven – deutlich von der Winkelhalbierenden abweichen wird.

heute ist diese Art von Gedankenlosigkeit bei den Dendrochronologen gang und gäbe.

Die von uns rekonstruierte Geschichte der Entstehung der C14-Kalibrierung zeigt die existenzgefährdenden Schwachstellen in den Fundamenten der Dendrochronologie auf. Ohne den Nachweis, daß die erzielten Ergebnisse auch ohne die einst zentralen und von uns als irreführend erkannten Hilfsmittel zustande kommen würden, kann man den aufgebauten Chronologien nicht vertrauen. Da keine Hilfsmittel bekannt sind, die die offenbar unverzichtbare C14-Methode ersetzen könnten, wird dieser Nachweis nicht gelingen. Zusätzlich zu unserer Aufdeckung des Zirkelschlusses werden wir im folgenden Kapitel mit physikalischen Argumenten fundamentale Kritik an den heute verwendeten Kalibrierkurven üben.

## 2.6 C14 contra Physik

Wer dieser Geschichte der Entstehung der C14-Kalibrierung bis hierher gefolgt ist, wird den Sinn des Titels unseres Buches nachvollziehen können: Die Fundamente der C14-Methode sind so schwach, daß die Methode in sich zusammenbrechen müßte, wenn sie nicht durch Glauben und Hoffen aufrecht erhalten würde. Historiker, die ihr Unbehagen in dieser Situation offen bekunden, würden vielleicht endgültig zu einem Befreiungsschlag ausholen, wenn sie erfahren würden, daß auch vom physikalischen Standpunkt aus fundamentale Zweifel an den heute verwendeten Kalibrierkurven angebracht sind. Chronologie und Physik weisen gleichermaßen auf dieselbe Schwachstelle in dem gemeinsamen Gebäude von C14 und Dendrochronologie hin. Nachdem wir recherchiert hatten, daß die Geschichte der unterschiedlichen europäischen Eichenchronologien vor allem eine Geschichte transatlantischen Austauschs von C14-Daten war, stellten wir mehr routinemäßig die Frage, welche in der Natur auftretenden Effekte überhaupt jene Muster in den C14-Daten von Baumringsequenzen hervorrufen können, die als wiggle bezeichnet werden. In Anbetracht der Bedeutung, die »wiggle« in der Vordatierung von Baumringen zugemessen wurde, maßen wir dieser Frage eine beträchtliche Bedeutung zu, denn an solch entscheidender Stelle sollten sich keine Widersprüche zu den »essentials« der C14-Methode einstellen. Tatsächlich traten wir mit den Antworten auf diese Frage eine Lawine los: Das harmlos erscheinende Mäandern der »wiggle« um eine nahezu gerade Linie, die erst in ferner Vergangenheit von der Winkelhalbierenden abzuweichen beginnt, birgt tatsächlich Explosivstoff für die C14-Methode.

B. Becker beschreibt in seinem Artikel über die »Geschichte der Dendrochronologie &  $^{14}\text{C}$  Kalibrierung« (für den Jubiläumsband anlässlich des vierzigjährigen Bestehens der C14-Methode), wie problematisch der Nachweis der Existenz realer »wiggles« über lange Zeit gewesen sei [Becker 1992, 43]. Nicht etwa die Kleinheit des Phänomens wäre dabei das Problem gewesen, sondern seine Uneinheitlichkeit. Wegen dieser Problematik hatten etliche Wissenschaftler scharfe Kritik geäußert. Sie bezeichneten die Interpretation von »wiggles« als simultane C14-Schwankungen für unzulässig, weil die Höhe der Meßfehler derartige »wiggles« verschlucken würde und sie als Kunstprodukte angesehen werden müßten.

Doch 1980 – genau 20 Jahre nach den ersten unabweisbaren Indizien für atmosphärische C14-»Schwankungen« – konnte endlich eine 600 Jahre umfassende einheitliche »wiggles«-Messung präsentiert werden. Die Simultanität der C14-Konzentrationsschwankungen wurde durch einen Vergleich schwimmender Baumringsequenzen aus Europa mit der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie nahegelegt [De Jong et al. 1979, 48; Suess 1980, 113; Berger 1985]. Die Berechtigung zu einem solchen Vergleich ist angesichts der ständigen Kritik über chaotisch voneinander abweichende Datierungsergebnisse in Zweifel zu ziehen. Die Lage der 600 Jahre umfassenden Sequenzen aus Europa galt auf diese Weise allerdings als nahezu jahrgenau vorausbestimmt. Dadurch war auch die Suche nach weiteren Sequenzen, die die beiden Lücken zu den angrenzenden Sequenzen zu schließen hatten, vorausbestimmt.

An dieser Stelle fragten wir nach möglichen Ursachen für »wiggles«<sup>7</sup>. Der Grund für Schwankungen der atmosphärischen C14-Konzentration wird üblicherweise in entsprechenden Schwankungen der Produktionsrate von C14 gesehen (siehe oberes Bildpaar in **2.6**), welche vor allem durch Änderungen der Stärke des Erdmagnetfeldes oder der kosmischen Strahlung bzw. auch der Sonnenaktivität ausgelöst werden [Taylor 1987, 31; Barbetti 1980, 192]. Doch die Form der »wiggles« widersetzt sich nicht nur dieser Erklärungen durch extraterrestrische Ursachen, sondern zerstört von sich aus die wichtigste Grundla-

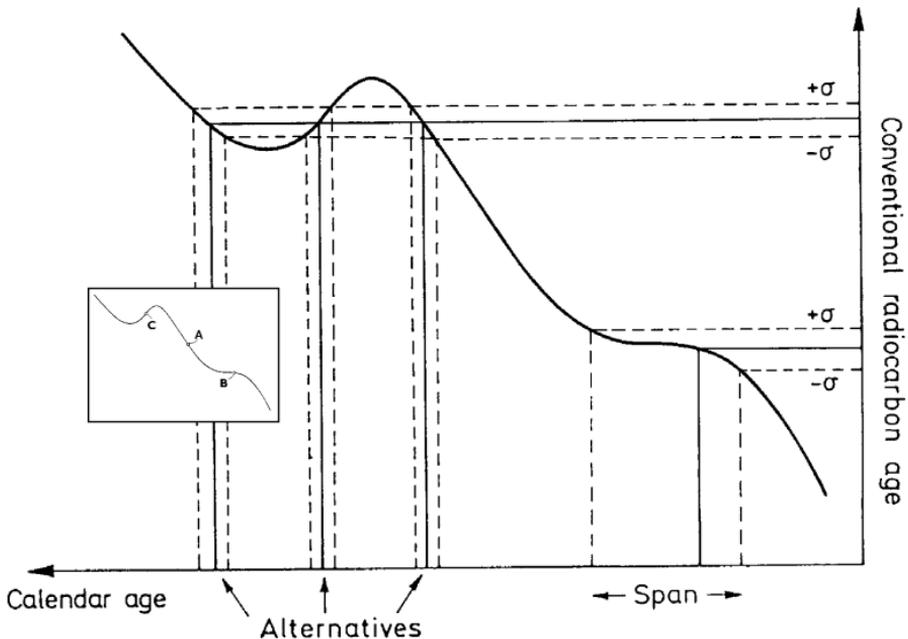
---

<sup>7</sup> P.J. Ashmore und P.H. Hill [1983, 99] etwa geben mit »kurzfristige Schwankungen in der Radiokarbon-Kalibrierkurve in der Größenordnung von 50 - 500 Jahren« eine äußerst dürftige Beschreibung des Phänomens, zumal sie offen lassen, ob es die Schwankungen selber sind, die in dieser Größenordnung vorkommen, oder ob sie sich lediglich über diesen Zeitraum erstrecken. Die entscheidenden Informationen über einen »wiggles« beziehen sich 1) auf die Stärke der Änderung des C14-Inventars der Atmosphäre und 2) auf das Vorzeichen dieser Änderung (Zu- oder Abnahme). In der Kalibrierkurve ist diese Information als Änderung des C14-Alters bezogen auf das entsprechende kalendrische Intervall verschlüsselt und muß für eine sachgerechte Diskussion der Ursachen erst wieder zurückgerechnet werden. Im Bild **9.5** wird diese Rechenprozedur erläutert.

## 2.7 Kalibrierung eines C14-Datums

Diese Kalibrierkurve für C14-Daten liegt in einem Koordinatenkreuz, das auf der waagerechten Achse die Kalenderjahre und auf der senkrechten Achse die C14-Jahre führt (nach Aitken [1990, 100]). Die Kalibrierkurve besteht aus einer Folge von C14-Altern, die aus der heute gemessenen Radioaktivität absolutdatierter Baumjahresringe bestimmt wurde. Nur wenn zu allen Zeiten dieselbe C14-Konzentration in der Atmosphäre geherrscht hätte, dann wäre die Kalibrierkurve mit der Winkelhalbierenden identisch. Ein C14-Alter wird kalibriert, indem von dessen Wert auf der senkrechten Achse eine Waagerechte nach links gezeichnet wird. Jeder Schnittpunkt mit der Kalibrierkurve repräsentiert ein theoretisch mögliches Absolutalter, das jeweils senkrecht auf der horizontalen Achse als Kalenderjahr abgelesen werden kann.

Die Mehrdeutigkeit eines gemessenen C14-Alters kommt durch die Kurvenform »C« zustande: Hier liegt ein steigendes C14-Alter bei sinkendem Absolutalter vor. Diese Kurvenform kann aber nur entstehen, wenn neben Produktion und Zerfall eine Diffusion von C14 bzw. C12 hinzutritt. Die Annahme, daß Diffusion als genuin lokales Phänomen global gleichförmig auftritt (→ Simultanitätsprinzip), ist völlig verfehlt. Alle Vorgehensweisen, die global gleichförmige Diffusion voraussetzen – wie das »wigggle-matching« über den Atlantik oder die Proklamation einer global gültigen Kalibrierung etc. – sind äußerst fragwürdig.



ge der C14-Methode: die Gültigkeit des Simultanitätsprinzips, nach dem alles, was mit der C14-Konzentration geschieht, grundsätzlich global gleichförmig auftreten muß (für eine kurze Darstellung des Simultanitätsprinzips vergleiche das einführende Kapitel 1.5).

Der Stein des Anstoßes sind diejenigen Kurvenbereiche, deren Steigung gegenüber dem übergeordneten Trend umgekehrt erscheint. Sie weisen ein Gefälle statt dem normalen Anstieg auf. Wir haben solche Bereiche in den Bildern **2.7** und **5.5** als »Kurvenform C« gekennzeichnet. In diesen Bereichen muß die C14-Konzentration in der Atmosphäre stärker als innerhalb bereits gestorbener Organismen abnehmen (detaillierte Analyse in Kapitel 9.4 und folgende). Aus dieser simplen Feststellung ergeben sich nun weitreichende Aufschlüsse über die Entstehung von »wiggles«, die absolut konträr zu den Grundannahmen der C14-Methode stehen und die deshalb näher beschrieben werden müssen.

Die Abfolge von Kurvenbereichen starken Anstiegs und starken Abfalls der C14-Konzentration entlang des übergeordneten angeblich stationären Trends der Kalibrierkurve wird als »wiggles« beschrieben. Dabei muß die C14-Konzentration in Bereichen mit gegenläufiger Steigung (»C«) stärker als durch den radioaktiven Zerfall abfallen. Das kann nur durch Diffusion von C12 in den fraglichen Bereich hinein oder durch C14 aus dem fraglichen Bereich heraus geschehen (vergleiche unteres Bildpaar in **2.6**).

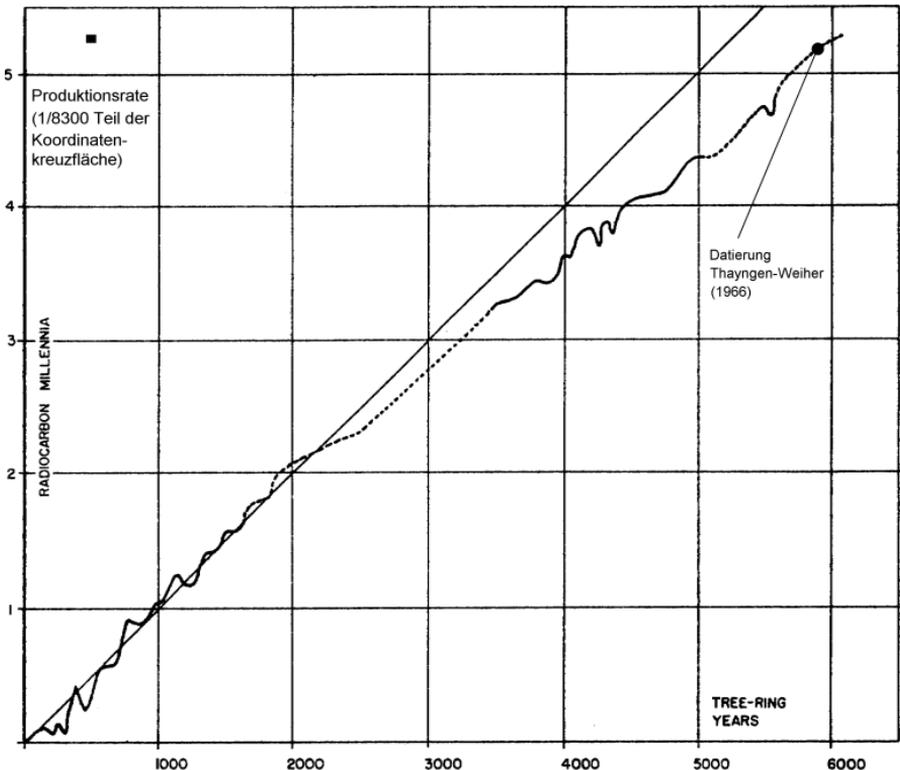
Angesichts der Größenordnung dieser Diffusionsraten – es geht um ein Vielfaches dessen, was durch den radioaktiven Zerfall allein »weggeschafft« wird (Zahlenbeispiele in den Bildern **9.3-5** und **9.14**) – ist die globale Gleichförmigkeit des Diffusionsphänomens die schlechteste aller denkmöglichen Hypothesen. Diffusionen treten aufgrund lokaler Ungleichgewichte auf. Es gibt auch nicht den Schimmer einer Hoffnung, daß diese sich global stets auf gleiche Weise einstellen und damit an jeder Stelle auf der Erde dasselbe »wiggles«-Muster ausbilden können. »Wiggles« sind mithin genuin lokale Phänomene. Ihr überregionaler Vergleich bedürfte jeweils ausführlicher Begründung.

Die übliche Begründung für die Anwendung des »wiggles-matching« gründet sich auf dem schnellen Mix des lokal produzierten (und angeblich den globalen Zerfall gerade kompensierenden) C14 mit allen irdischen Reservoiren. Die ungleich höheren durch Diffusion umgesetzten Mengen wurden dabei niemals betrachtet. Wenn die Kalibrierkurve längs der Winkelhalbierenden angesiedelt wird, so kommt nach Lage der Dinge eine hochspekulative Vorschrift bzw. Randbedingung ins Spiel. Ihrzufolge müßten sich Nettodiffusion plus dem radioaktiven Zerfall auf der einen Seite und die Produktionsra-

## 2.8 Frühe Kalibriervisionen (I)

In dieser Kalibrierkurve von 1970 [Berger 1970b, 96] kommt der Glaube an die Stationarität der C14-Konzentration deutlich zum Ausdruck. Bis zur Zeitenwende ist die Abdeckung der Winkelhalbierenden trotz aller »wiggles« (bzw. gerade infolge ihrer Bändigung) perfekt. Selbst 4 Jahre, nachdem prähistorische europäische Baumringsequenzen über »wiggles-matching« mit dieser Kurve bereits ein Absolutdatum erhalten hatten, stützte sich die Chronologie vor der Zeitenwende immer noch ausschließlich auf die Gewißheit, daß die C14-Konzentration konstant gewesen sein muß (gestrichelte Bereiche).

Tatsächlich repräsentieren diese »wiggles« (als C14-Muster, die einem quasi-stationären Verhalten überlagert sind) einen geradezu dramatischen Anstieg bzw. Abfall der Produktionsrate für C14 in Kombination mit entsprechender Diffusion zur Konzentrationsminderung. Wer wollte darauf vertrauen, daß über Jahrtausende dennoch derselbe Konzentrationswert gehalten wird? Die Fläche des kleinen schwarzen Rechtecks (oben links) repräsentiert für den völlig hypothetischen Fall stationärer Verhältnisse die jährlich produzierte Menge an C14 ( $7.5 \text{ kg/y} \approx 62.500 \text{ kg}/8.300 \text{ y}$ ) verglichen mit dem (ohnehin geschätzten!) ganzen Bestand an C14 (ca.  $62.500 \text{ kg}$ ) in Gestalt der ganzen Koordinatenfläche.



te auf der anderen Seite permanent die Waage halten. Kein Mensch würde das von Prozessen erwarten, die weitgehend voneinander entkoppelt verlaufen – die C14-Wissenschaftler tun's.

Die Kalibrierkurve weist nach offizieller Lesart über die letzten 12.000 Jahre eine monoton verlaufende Abnahme der C14-Konzentration von rund 10% auf. Das entspricht einer Divergenz zwischen der tatsächlichen Produktionsrate und einer Produktionsrate, die im absolut unrealistischen stationären Fall zu erwarten wäre, von größenordnungsmäßig ebenfalls 10%. Gleichzeitig sind in den einzelnen »wiggles« Exzeßproduktions- und Diffusionsraten dokumentiert, die um ein Vielfaches – bis zu 4000% – über bzw. unter diesem stationären Wert liegen. Erneut besteht die schlechteste aller Denkmöglichkeiten in der Annahme, daß diese »Exzesse« sich stets fast zu Null kompensieren, denn nach offizieller Lesart soll gerade noch das übrig bleiben, was durch den vergleichsweise geringen Effekt des radioaktiven Zerfalls dann endgültig zu Null oder jedenfalls fast zu Null gemacht wird.

Der langfristige ausgewiesene offizielle Trend von »fehlenden« 1.000 Jahren auf 12.000 Jahre Gesamtlänge ist verschwindend gering gegenüber der Größenordnung der kurzfristigen Trends in den »wiggles« (Bild **2.8**). Was die Historiker in Ansehung »zu alter« Daten etwa für die Bronzezeit bereits so erregen konnte, sind nur Peanuts verglichen mit dem, was in den »wiggles« als Trend offenbart wird. Klimakundler und Ozeanographen haben den Einfluß der Diffusion von C14 auf die Geschwindigkeit der C14-Uhr klar erkannt. Sie weisen ausdrücklich daraufhin, daß die Änderung des C14-Inventars der Ozeane um nur wenige Promille über einen Zeitraum von einigen Jahrhunderten die Geschwindigkeit der C14-Uhr während dieser Zeit um größenordnungsmäßig 100% verändern würde [Stocker/Wright 1996, 774]. Eine verwendbare C14-Uhr verlange also ein »sehr stabiles« C14-Inventar der Ozeane (vgl. Bilder **1.10** sowie **9.11**).

Wir weisen daraufhin, daß selbst eine Bestandsveränderung, die die C14-Uhr so nachhaltig beeinflussen würde, deutlich unterhalb der Nachweisgrenze bzw. unterhalb des unvermeidbaren Fehlers des Bestimmungsversuchs liegt. Sie kann weder von der Höhe her ausreichend genau gemessen, noch von ihrer Dauer her ausreichend genau rekonstruiert werden. So gesehen ist die Praktikabilität der C14-Methode auf Randbedingungen angewiesen, die von der Hauptursache her gar nicht nachgeprüft werden können. Im Gegenteil, jede Chronologie des ozeanischen C14-Inventars wird höchstens bei prozentgenauen Angaben landen und damit von sich aus die C14-Uhr zu einer eigenwilligen, störrischen Zeitmaschine stempeln.

Eines der ergiebigsten Arbeitsgebiete der Klimakundler ist zur Zeit die Modellierung der globalen Ozeanströmungen z.B. in Abhängigkeit von lokalen Süßwassereinspeisungen, die als Schmelzwasser infolge von Temperaturerhöhungen entstehen. Die Ozeane der Erde werden von einer zusammenhängenden Strömung durchzogen (vergleiche Bild **9.10**), die u.a. für einen Austausch des Oberflächen- und des Tiefenwassers sorgt. Dadurch kommt kontinuierlich C14-armes Wasser an die Oberfläche, das für eine verstärkte Diffusion des C14 von der Atmosphäre in das Wasser sorgt. Wird diese Zirkulation unterbrochen, dann sinkt die Diffusionsrate wegen schnell ansteigender Sättigung und der C14-Gehalt der Atmosphäre muß infolgedessen rasch ansteigen. Kommt die Zirkulation dagegen wieder in Gang, gelangt erneut C14-verarmtes Wasser an die Oberfläche, was zur rapiden Absenkung des C14-Gehaltes der Atmosphäre führt. Auf diese Weise lassen sich »wiggle« wenigstens qualitativ erklären.

Die Wissenschaftler, die sich mit den Ozeanströmungen beschäftigen, mögen solche einschneidenden Ereignisse aber nur für das Ende der letzten Eiszeit ansetzen. Für jüngere »wiggle« kämen doch nur wieder Ursachen wie die Änderung der C14-Produktionsrate in Frage [Beer et al. 1988]. In Bild **2.6** wird jedoch auseinandergesetzt, daß das grundsätzlich nicht ausreicht, um die Feinstruktur der Kalibrierkurven – sofern diese vom Effekt her richtig ausgemessen wurden – zu erklären. Es ist dem heutigen Naturverständnis angemessener, von einer globalen und starken Dynamik des Austauschs zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Reservoirien auszugehen, anstatt von stationären Verhältnissen. Damit ist die C14-Methode von ihrem ursprünglichen Ansatz her, nämlich eine Absolutdatierungsmethode zu sein, gescheitert.

Die um ihr Überleben kämpfende C14-Methode hätte ein »Naturprinzip« zu präsentieren, das auf eine Weise für die Austarierung der Ursachen für Anstieg und Abfall der C14-Konzentration sorgt, daß die Konzentrationsänderung im Mittel an jedem Ort der Erde (fast) Null bleibt (zusammenfassend Bild **2.6**), wohl wissend, daß die ständig schwankenden Niveaus von Produktion und Diffusion immer wieder ein Vielfaches des angeblich vorliegenden stationären Wertes betragen: In den Bildern **9.3-5** und **9.14** sind Konzentrationschwankungen analysiert, die sowohl ein Vielfaches der für »normal« erachteten Produktionsrate verlangen, als auch eine entsprechend hohe zeitweise Diffusion, die den angesammelten Überschuß in erklecklich kurzer Zeit nennenswert wieder abzubauen vermag. Der radioaktive Zerfall geht viel zu langsam vonstatten, um die gemessenen Konzentrationsenkungen leisten zu können.

Doch die C14-Methode wird hier keinen Erklärungsansatz finden können, denn ein solches Naturprinzip gibt es nicht. Wenn »Schwankungen« permanent ein Mehrfaches des angeblichen Normalmaßes ausmachen, dann hat man eine falsche Vorstellung vom Normalmaß oder es liegt gar kein Gleichgewichtszustand vor. Der mittelfristige Trend könnte sowohl eine deutliche Erhöhung als auch eine ebensolche Absenkung der C14-Konzentration bedeuten – mit allen Konsequenzen für die Interpretation zurückliegender C14-Daten. Einmal wären sie deutlich zu alt, das andere Mal deutlich zu jung.

Der in dem Kauri-Baum gemessene Langzeittrend für die Zunahme der C14-Konzentration in der Atmosphäre ist gegenüber den vielfach vorkommenden Trends in den »wiggles« noch ausgesprochen moderat. Dennoch wären die Konsequenzen für C14-Daten, die man an ihm kalibrieren würde, dramatisch zu nennen. Ein C14-Alter von 1.500 Jahren, das nach dem konventionellen Trend bereits einem 10% höheren Alter von 1.650 Jahren entspräche, bedeutete nach der Kauri-Kalibrierung ein tatsächliches Alter von rund 1.000 Jahren (vergleiche Bild 2.9). Dieser Unterschied würde mit zunehmendem Alter immer größer werden<sup>8</sup>.

Wir haben bereits einen Zirkelschluß bei der Erstellung der amerikanischen wie auch europäischen Baumringchronologien historisch rekonstruiert: Am Anfang stand die Idee, wie Kalibrierkurven auszusehen hätten, und an diesem Vorbild wurden alle Baumringchronologien – in Amerika direkt, in Europa indirekt über Amerika – radiometrisch ausgerichtet. Die Geschichtswissenschaft hat das Prinzip des Aktualismus legitimiert und folglich auch Absolutdaten zurückerhalten, die diesem Prinzip entsprachen. Die daraufhin unter physikalischen Gesichtspunkten betrachteten Indizien, daß der Prozeß von Zu- und Abnahme des atmosphärischen C14 nicht um einen »Gleichgewichtszustand« pendeln kann, weisen in genau dieselbe Richtung: Eine Kalibrierkurve mit derartigen »Konvulsionen«, die permanent nahe der Winkelhalbierenden verläuft, ist unwahrscheinlich und muß als Kunstprodukt angesprochen werden.

Die Dendrochronologen haben mit den »wiggles« selber die Indizien vorgelegt, daß dieser gleichbleibende Trend ein »fake« ist, zur Gänze artifiziell und aus dem aktualistischen Dogma geboren, welches die Einflüsse auf die Naturprozesse in der Vergangenheit genauso wirken sieht wie heute. Die

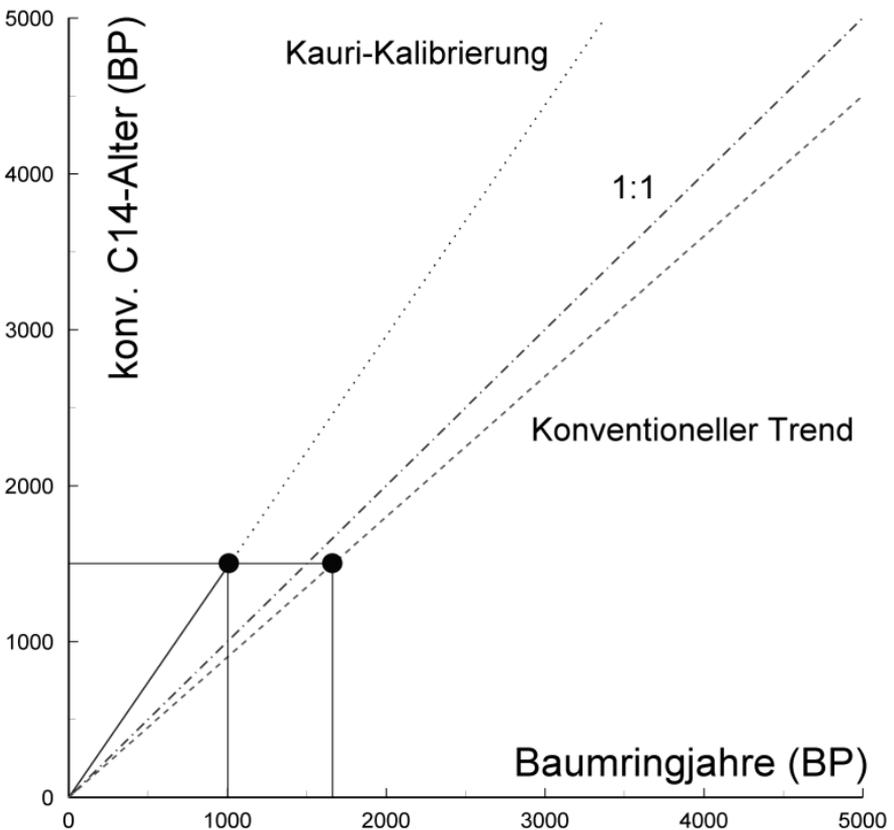
---

<sup>8</sup> Beim Abfassen der Geschichte für das Nicht-Fachpublikum scheint es einen Hang zur Fokussierung auf möglichst »alte« Daten und zum Unterdrücken von »zu jungen« Daten zu geben [Lynch 1990, 29]. Es wäre angesichts der hier vorgelegten Widersprüche einmal darüber nachzudenken, wieweit diese Neigung auch zur unbesehenen Legitimation der konventionellen Kalibrierkurven beigetragen hat.

## 2.9 Auswirkung unterschiedlicher Tendenzen in den Kalibrierkurven auf die Absolutdaten

- 1) Stationärer Fall 1:1 (»Winkelhalbierende«): Falls die C14-Konzentration in historischer Zeit ständig und überall gleich gewesen wäre, könnte ein C14-Alter als identisch mit dem Absolutalter betrachtet werden.
- 2) Kauri-Kalibrierung (»Vergreisung«): Falls die C14-Bilanz ein stetes Anwachsen der C14-Konzentration ausweist, erscheint ein C14-Datum tendenziell immer höher als das tatsächliche Alter.
- 3) Kalibrierung mit konventionellem Trend (»Verjüngung«): Falls die C14-Bilanz ein stetes Absinken der C14-Konzentration ausweist, erscheint ein C14-Datum tendenziell immer niedriger als das tatsächliche Alter.

(BP = »before present«, vergleiche Kapitel 7.2)



Wirklichkeit kann nur in der Betrachtung der umfassenden Dynamik des atmosphärischen und ozeanischen Systems eingekreist werden, bei der Holzhammerargumente wie das des Aktualismus keine Chance mehr haben.

## 2.7 Die Dendrochronologie als Mitläuferin

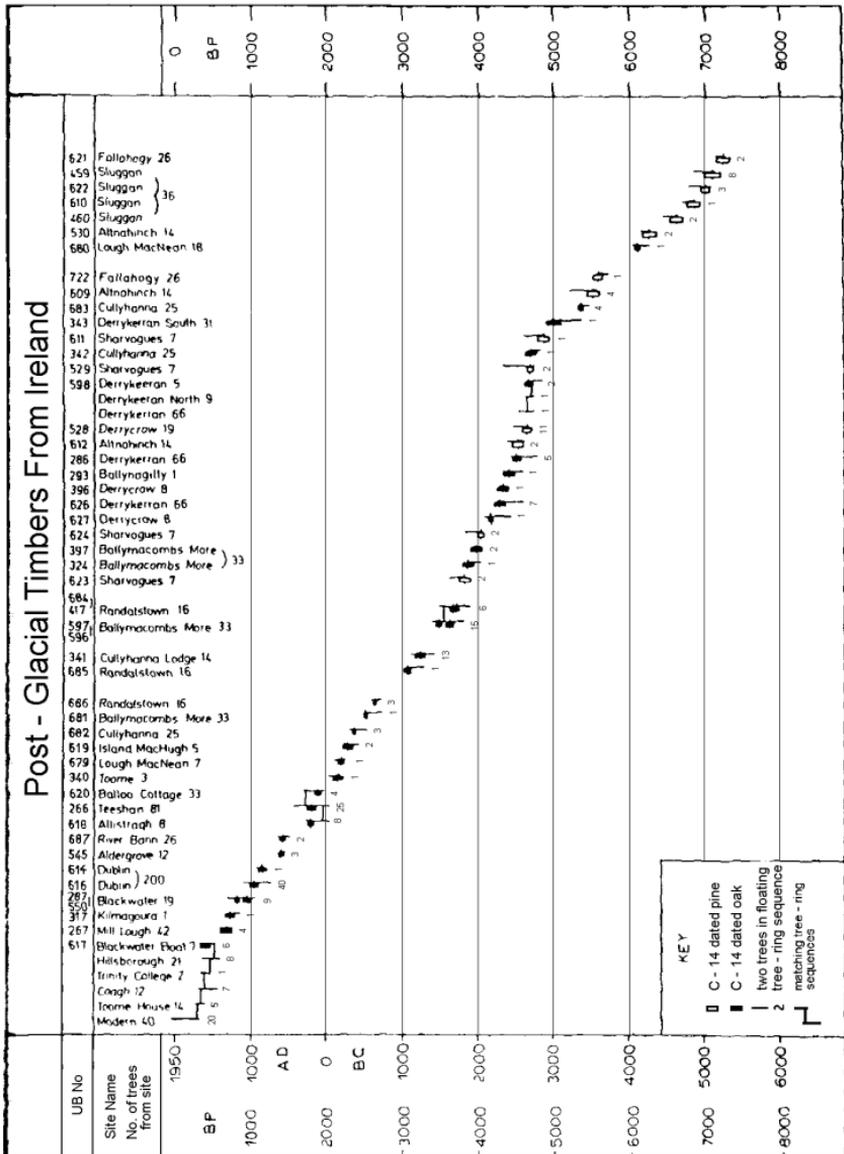
Die im dendrochronologischen Material offenbarten C14-Muster bieten für den seit je beunruhigenden archäologischen Befund des »one C14-date is no C14-date« einen ersten Erklärungsansatz. Da Diffusionsphänomene offensichtlich eine große Rolle spielen, ist anzunehmen, daß lokal gesehen innerhalb weniger Jahre eine markante und lokal begrenzte Änderung in der atmosphärischen Konzentration stattfinden kann. Auf diese Weise sammeln sich unter Umständen sehr schnell C14-Jahrhunderte an, denn 1% Konzentrationsänderung zieht bereits ca. 80 Jahre Altersunterschied nach sich (vergleiche die Erläuterung des Zusammenhangs zwischen Konzentrationsänderung und Verschiebung des C14-Alters in Textbox **7.7**). Dann ist der Verdacht nur allzu berechtigt, daß Holzproben aus Bäumen auseinanderliegender Wuchsorte, die durch eine dendrochronologische Untersuchung als gleichaltrig nachgewiesen wurden, ebenfalls erhebliche radiometrische Altersunterschiede aufweisen können. Ein auf dieser Grundlage statistisch gemitteltes »Alter« hat dann eine völlig andere Bedeutung als unter Gültigkeit des Simultanitätsprinzips. Ein überregionaler Vergleich wie bei dem »wiggle-matching« zwischen Amerika und Europa ist schlichtweg unzulässig.

Die jüngsten 500 Jahre unserer Geschichte zeigen hinsichtlich der C14-Daten ein chaotisches Bild (vergleiche dazu Bild **5.3**, auch Wölfl *[1992, 33]*). Der zeitliche Anteil dieser Schwankungen wird u.a. auf eine Verbrennung C14-armer fossiler Rohstoffe zurückgeführt. Das erklärt aber nicht die Uneinheitlichkeit der C14-Daten für nachweislich gleichaltrige Proben, die sich allerdings zwanglos aus lokal voneinander abweichenden Diffusionsphänomenen erklären lassen. Die Vergangenheit liegt offenbar solange in einem radiometrischen Datierungsnebel, wie sie chronologisch sicher bezeugt ist. Für Zeiträume, die dagegen chronologisch nicht abgesichert sind, müssen wir unterstellen, daß es ganz automatisch Bestrebungen gegeben hat, zu Absolutdaten für die Proben zu kommen, deren C14-Werte die Winkelhalbierende abzudecken vermochten (dazu auch Bild **2.8**).

Das ist prägnant in der Art und Weise zu ersehen, wie die lokalen Master der Irischen Eichenchronologie anfänglich präsentiert wurden *[Smith et al. 1972]*: Alle Master umfassten jeweils wenige 100 Jahre und wurden auf der Winkelhalbierenden monoton nach ihrem C14-Alter angeordnet. Auf diese

## 2.10 In tiefem Vertrauen

Bereits im Frühstadium des Aufbaus der irischen Eichenchronologie setzte man auf strikte Stationarität der atmosphärischen C14-Konzentration [Smith et al. 1972]. So wurde eine dramatische Eingrenzung der zu überprüfenden Deckungslagen erreicht – und manche Chance auf echte Synchronitäten vertan.



Weise entstand eine Sammlung untereinander noch weitestgehend unverzahnter Master, die sich gemeinsam sehr schnell über mehrere tausend C14-Jahre erstreckten (Bild 2.10). Der nachgeschaltete Prozeß einer überregionalen Verzahnung stagnierte dagegen immer wieder. Er gestaltete sich letztlich weit mühseliger als das bloße C14-gestützte Auffüllen des Zeitraums, der für das Postglazial angesetzt worden war. Die Würfel waren in dem Moment gefallen, in dem mit der monotonen Anordnung der lokalen Master nach dem C14-Alter begonnen wurde.

Überreste fossiler europäischer Eichen repräsentieren selten mehr als 300 Jahre. Damit müssen die über einen Stamm ermessbaren C14-Gradienten unter konventionellem Gesichtspunkt deutlich unter 5% bleiben. Akribische Meßreihen über entsprechend lange Sequenzen aus einem einzigen Baum konnten den Trend, wie er nach der Stationaritätsannahme zu erwarten wäre, naturgemäß gar nicht aufdecken, dafür aber permanente Konzentrationschwankungen, die größenordnungsmäßig zehnmal stärker sind als der verlangte Langzeittrend [Schwabedissen 1978, 115].

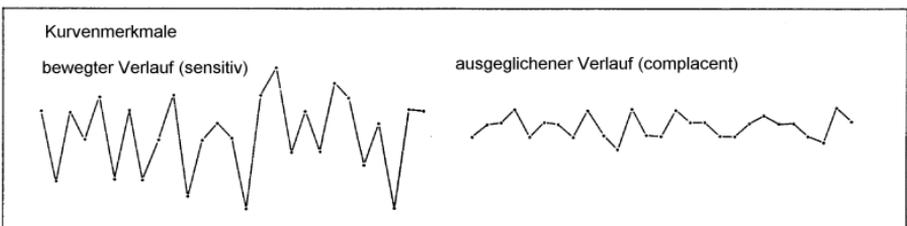
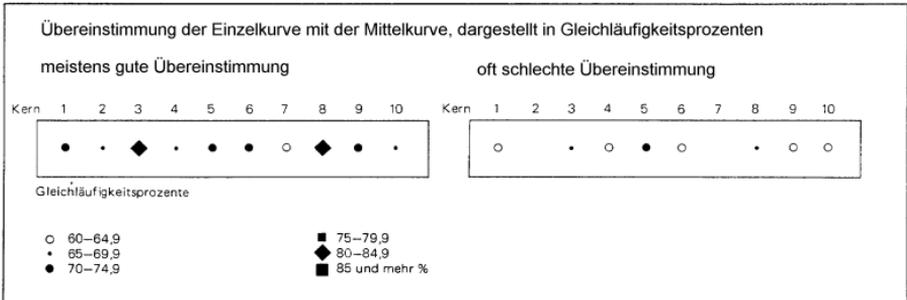
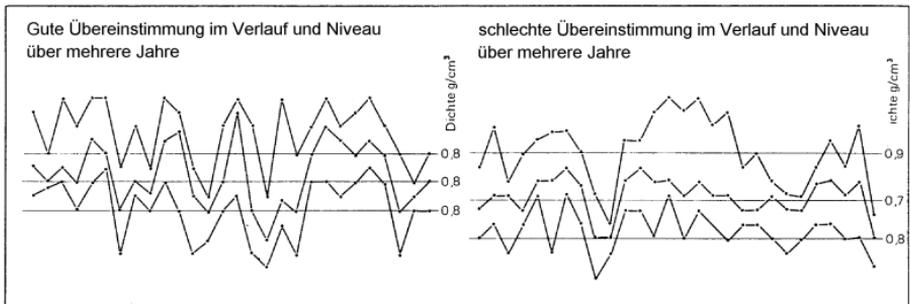
Es ist bekannt, daß innerhalb der Bäume ein dauerhafter Stoffwechsel stattfindet, der die wahre C14-Geschichte der Atmosphäre ohnehin verfälscht, wenn die Hölzer vor der Messung nicht einer umfassenden chemischen Waschung zugeführt werden [McPhail et al. 1983]. Übrig bleiben soll ein Cellulosegerippe, das aus Ringen aufgebaut ist, die tatsächlich jeweils nur ein Jahr gestoffwechselt hätten. R.E. Taylor findet in seiner Monographie über die C14-Methode nur mühsam zu Worten, die sein Unbehagen verhüllen, wenn er schreibt, daß das verbleibende Problem nicht groß ist, falls das Prozedere der Vorbehandlung sorgfältig durchgeführt wird [Taylor 1987, 23].

Wir haben schon an anderer Stelle davon gesprochen, daß Aussagen über die Neigung einer Baumart, Fehlringe zu produzieren, auch auf die Analyse von C14-Verläufen in entsprechenden Baumringsequenzen gestützt wurden. Je stärker das C14-Alter der älteren Ringe im Vergleich zu den Werten sinkt, die unter stationären Verhältnissen resultieren müßten, desto mehr Fehlringe werden angeblich produziert. Mindestens für die *Sequoia sempervivens* und den *Kauri-Baum* wurde dieser Zusammenhang aufgestellt. Da aber die Mikroschwankungen stationäre Verhältnisse generell ad absurdum führen, bekommen wir einen Anhaltspunkt dafür, daß ein steilerer C14-Gradient die tatsächlichen Verhältnisse besser wiedergibt und unsignifikante C14-Gradienten dagegen für einen ausgleichenden Diffusionsvorgang innerhalb der Baumringsequenzen sprechen.

Die vorbehaltlos praktizierte Anordnung C14-datierter Baumringsequenzen unter der Voraussetzung weitgehend stationärer Verhältnisse in Raum

## 2.11 Theorie und Praxis in der Dendrochronologie

Zur Beurteilung der Synchronität zweier Baumringsequenzen wird ihre »Gleichläufigkeit« herangezogen, mit der Jahr für Jahr die Übereinstimmung in der Änderung der jeweiligen Ringbreite – Zu- oder Abnahme – abgefragt wird. Die einzelnen Baumschicksale können so unterschiedlich sein, daß einzig die aus mehreren Dutzend solcher Sequenzen gewonnene Mittelkurve als Vergleichsmaßstab herangezogen wird. Sicherlich ist hier in verstärktem Maße »Fleiß, Erfahrung und Vorsicht« [Leuschner 1994, 126] des Dendrochronologen gefragt.

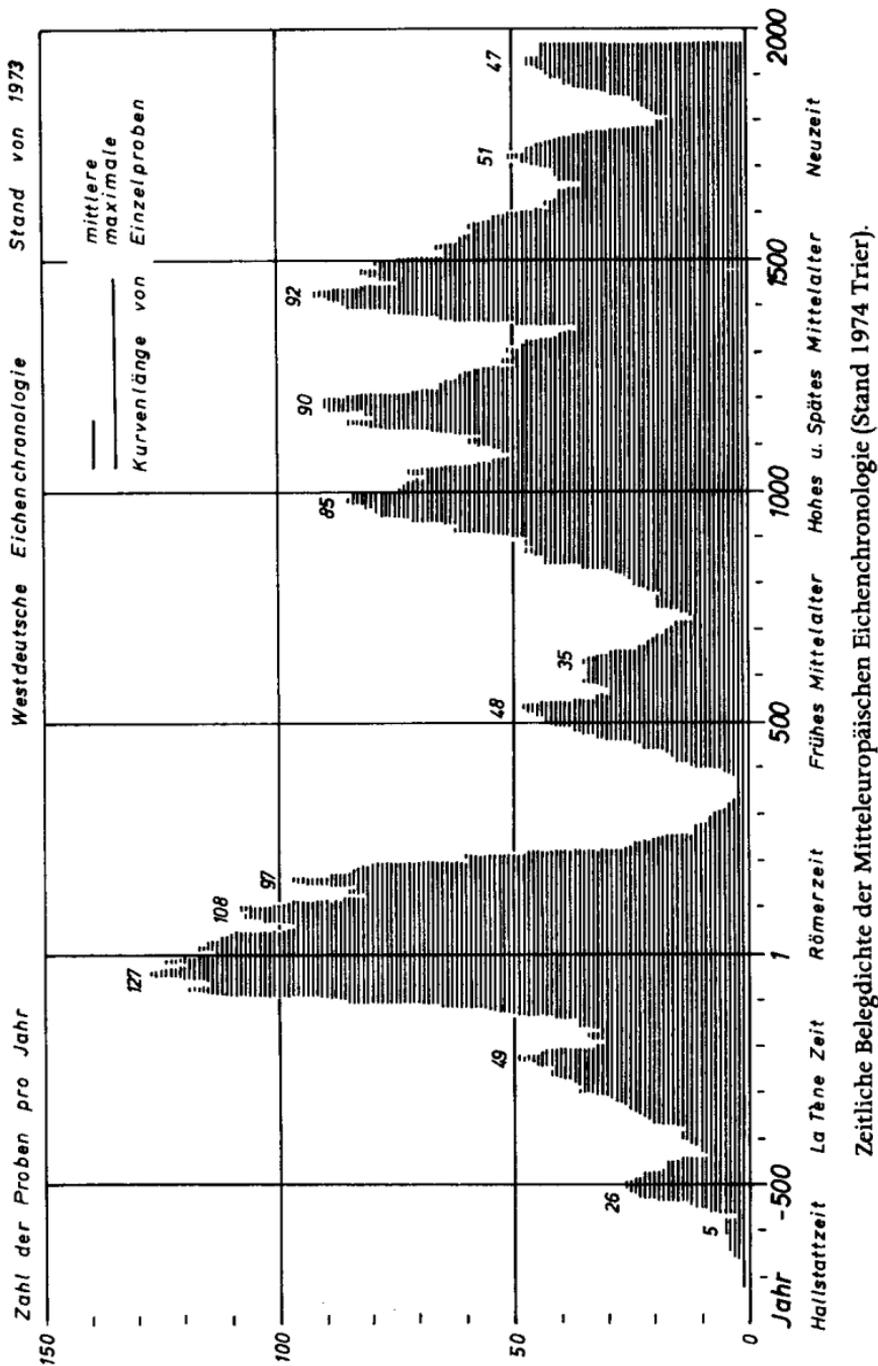


und Zeit muß in die Irre geführt haben. So erschließt sich auch für die süd-deutsche Eichenchronologie B. Beckers ein bedenklicher Umgang mit C14-Daten. Wo Gleichläufigkeitstests keine signifikante Synchronität zwischen lokalen Mastern oder auch zwischen einzelnen Sequenzen erbringen konnten (zu den praktischen Schwierigkeiten vergleiche auch Bild **2.11**), wurden C14-Daten herangezogen, um ihre vorläufige Stellung zueinander zu bestimmen. Dabei kann von einer deutlichen Neigung gesprochen werden, widersprüchliche Daten einfach zu ignorieren. Für alle Haupthorizonte lagen phasenweise solche widersprüchlichen Daten vor.

Für den Haupthorizont »Donau 5« (217 - 618 AD) lagen C14-Daten vor, die in Ansehung der dendrochronologischen Datierung um 230 bzw. 500 Jahre zu alt sein sollten. Ähnliches muß auch 1990 für Dendro-Daten aus der Frühgeschichte der Lausitz festgestellt werden [Becker/Wetzel 1990, 247]. Die Autoren schlossen deshalb seinerzeit nicht aus, daß es im Frühmittelalter ganz erhebliche C14-Schwankungen gegeben habe (vergleiche dazu Annahme 5 in Bild **2.12**). Innerhalb des Haupthorizonts »Donau 4 - Main 12 (397 BC - 216 AD) mußte sogar zugestanden werden, daß 100 Baumring-Jahre knapp 1.000 C14-Jahre [Becker/Frenzel 1977, 48] repräsentierten, wobei die Autoren den störenden, rund 900 Jahre älteren Wert unter der Vermutung ausscheiden, daß es sich um eine Verwechslung im Labor gehandelt haben müsse. Es wird erwähnt, daß die zeitliche Einordnung der fraglichen Sequenz in früheren Publikationen »leider« noch nach diesem Datum vorgenommen worden sei. Wie oft, so muß man dann fragen, hat man sich unerkant oder auch nur unwidersprochen auf ähnliche Daten für den weiteren Aufbau der Chronologie verlassen, um nach vielen Mühen am Ende durch eine »geglückte Synchronität« belohnt zu werden?

Die dendrochronologische Literatur atmet durchweg ungetrübte Vertrauensseligkeit hinsichtlich der Grundvoraussetzung der Stationarität der C14-Verhältnisse. Das ist verständlich, wenn das allgemeine Dilemma der Dendrochronologie bedacht wird: Ohne Vordatierung der vorgefundenen Baumringsequenzen wird ein Versuch der Synchronisierung immer wieder aussichtslos sein.

Die Not der Dendrochronologen angesichts schwimmender und nicht vordatierbarer Baumringsequenzen war und ist groß. Die vorhandenen schwimmenden Chronologien sollten und mußten in eine Baumringchronologie eingearbeitet werden, die am Ende das Postglazial von wohl 12.000 Jahren Länge lückenlos zu überdecken hatte. Wenn eine unbekannte Holzprobe auf eine Brauchbarkeit zur Erweiterung des »Masters« (der Standardsequenz) hin untersucht wird und kein Anhaltspunkt existiert, in welchen Bereich der Chro-



### 2.12 E. Hollstein und die Völkerwanderungslücke

Bereits 1995 hatte einer von uns (H.-U. Niemitz) die Entwicklung der europäischen Dendrochronologie im Hinblick auf bevorstehende Kontroversen um die These der mittelalterlichen Chronologierevision untersucht. Welche Probleme, so lautete damals die Frage, hätten sich in der Geschichte der Dendrochronologie zeigen müssen, wenn drei Jahrhunderte zu viel in der heute akzeptierten Chronologie stecken würden [Niemitz 1995, 298]? Im Hinblick auf den als fiktiv erkannten Zeitraum zwischen rund 600 - 900 AD wären folgende Umstände zu erwarten:

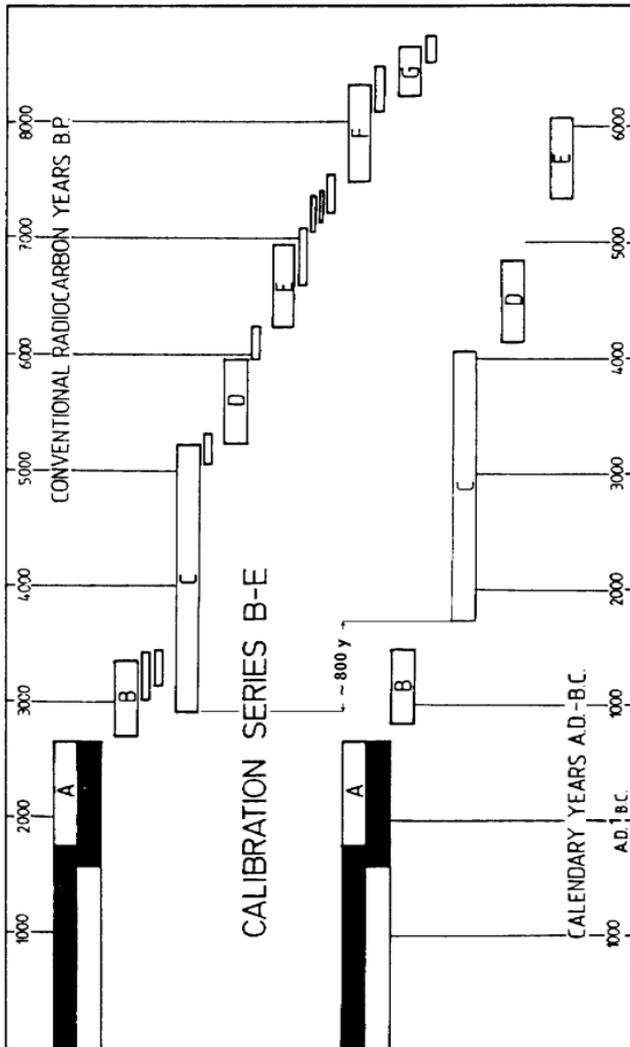
1. Mangel an Holzfunden für diesen Zeitraum (wegen einer Verteilung ohnehin seltener Funde auf einen doppelt so langen Zeitraum).
2. Besonders schwerwiegende Datierungs- bzw. Synchronisationsprobleme, Tendenz zum Erproben neuer Methoden bis hin zum Methodenwechsel.
3. Baumringfolgen aus diesem Zeitraum würden den folgenden oder ihnen vorgehenden Baumringfolgen von vergleichbarer Länge ähnlich sein; Willkür bei der Zuordnung der Proben
4. An zwei Stellen wären extreme Probleme zu erwarten, die Standardsequenz zu schließen.
5. C14-Daten und Dendro-Daten klafften im Bereich zwischen diesen Stellen stärker als sonst auseinander.

Alle diese Umstände liegen in ausgeprägter Weise für den fraglichen Zeitraum vor. Hier zeigen wir das Diagramm (aus Hollstein [1980, 11]) der zeitlichen Belegdichte, d.h. der Anzahl der Holzproben, die E. Hollstein zum Aufbau der Mitteleuropäischen Eichenchronologie heranzog, das (im Jahre 1974 und auch noch 1980) zwei bemerkenswerte Minima im Abstand von etwa 330 Jahren aufweist (vgl. Punkt 4). Je weniger Holz zur Verfügung steht, desto kleiner wird die Sicherheit gegen Irrtum beim Aufbau der Chronologie. Es ist offensichtlich, daß sich die Dendrochronologen hier an den Stellen minimaler Belegdichte – etwa um 350 und erneut um etwa 700 AD – der größten Gefahr eines Irrtums ausgesetzt haben. Sie wagten nicht, in diesem Zeitraum unabhängig von der historischen Chronologie zu datieren, weil das zur als absurd empfundenen Notwendigkeit hätte führen können, Jahrhunderte aus dieser zu streichen.

Deshalb schwächten die Dendrochronologen ihre Methoden so stark ab, daß sie den vorgegebenen Chronologien der Historiker folgen konnten (nicht zuletzt bedurften sie auch deren Anerkennung, um ihre Forschung weiterhin bezahlt zu bekommen). Damit waren sie methodisch aber auch nicht mehr in der Lage, etwaigen Widersprüchen zu C14-Daten die Stirn zu bieten.

## 2.13 Absolutdatierung durch »wigggle-matching«

Das Bild veranschaulicht die Lage der postglazialen Eichenringchronologie für Süddeutschland um 1980. Ursprünglich wurden die schwimmenden Chronologien nach dendrochronologischen Charakteristiken sowie nach ihren konventionellen C14-Altern angeordnet (oben), später dann (unten) nach Synchronlagen ihrer jeweiligen C14-Muster gegenüber denen aus der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie [Becker 1980, 220]. Im Vertrauen auf die jahrgenaue Treffsicherheit dieses »wigggle-matching« wurden die so entstandenen Lücken in den folgenden Jahren nach und nach aufgefüllt.



nologie sie hingehört, dann könne » ... die a-priori-Wahrscheinlichkeit für das Auffinden des richtigen Datums [d.h. die richtige Synchronlage] so klein werden, daß wenig Aussicht besteht, es auch wirklich zu finden« [Hollstein 1970, 147]. Für E. Hollstein war die Erarbeitung einer Baumringchronologie ohne Vordatierung durch die Geschichtswissenschaft unseriös, barg eine Vorgehensweise ohne diese Unterstützung doch die Gefahr einer Fehldatierung, indem unter den nunmehr vieltausendfachen Möglichkeiten eine falsche »Synchronisierung« den Zuschlag bekommen könnte.

Die meisten Kollegen Hollsteins verließen sich dagegen bei der Vordatierung auf die C14-Methode, mit deren Hilfe man in Ermangelung jeglicher absolutdatierbarer Holz-Artefakte bis ins frühe Postglazial vorstoßen wollte. H. Schwabedissen [1983, 284] bemerkte allerdings, daß Untersuchungen von C14-Physikern und Dendrochronologen allein nicht zum Ziel führen können, sondern »stets kompetente Archäologen« eingeschaltet sein müßten.

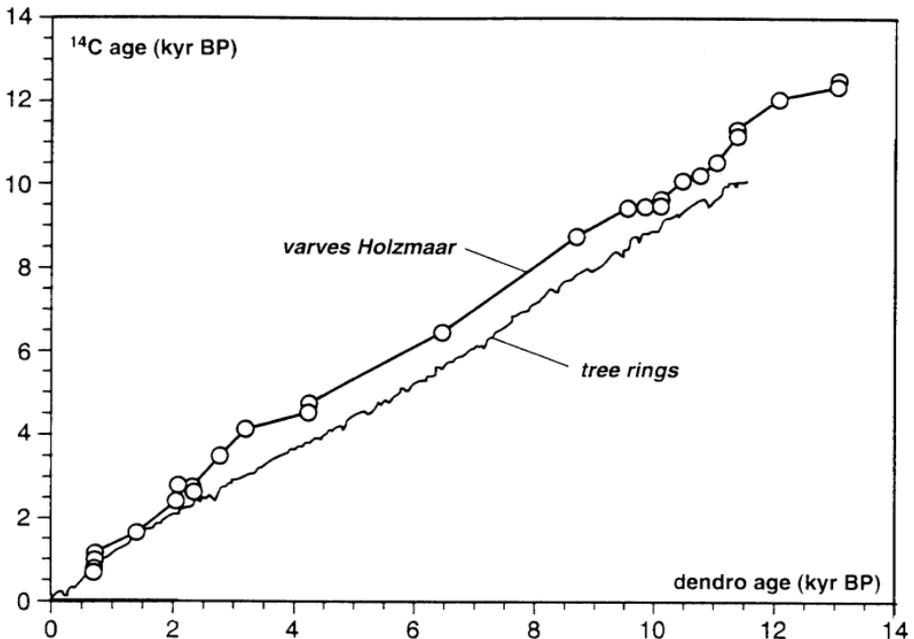
Wir teilen die Ansicht Hollsteins über die grundsätzlichen Schwierigkeiten, voraussetzungslos die Synchronlagen für eine Baumringsequenz zu erkennen: Ohne Vordatierung ist ein Erfolg bei der Synchronisierung generell nicht zu haben. Die vorbehaltlose Anerkennung der historischen Chronologien durch Dendrochronologen wie Hollstein, die ihre Synchronlagen bedenkenlos dem Regime einer nach teils zweifelhaften Kriterien entstandenen christlichen Zeitrechnung unterwerfen, lehnen wir dagegen ab. Wer auf die Hilfe anderer Methoden zurückgreifen möchte, muß sich über deren Tauglichkeit informieren.

Bei dem Rückgriff auf historische Daten, die in den Kontext europäischer Geschichte eingebunden sind, wähnt sich die Dendrochronologie absolut sicher. Es wird solange verglichen, bis das Auffinden einer adäquaten Synchronlage gelingt. Dendrochronologen sprechen in diesem Zusammenhang gerne von einer am Ende »geglückten« Synchronisierung (vergleiche dazu etwa Becker/Schmidt [1982, 104]), doch selbst eine »überzeugende Synchronität« [Schwabedissen 1983, 282 über den Master von »Kirnsulzbach«] kann sich im Nachhinein als falsche Datierung erweisen [zusammenfassend z.B. Schmidt/Freundlich 1984, 234]. H.-U. Niemitz [1995; auch Illig 1991] hat für den Zeitraum der sogenannten Völkerwanderungslücke zwischen dem Ende der Römerzeit (ca. 400 AD nördlich der Alpen) und dem Frühmittelalter eine auffällige Häufung von Bedingungen beschrieben, die auch nach den immanenten Kriterien für die Dendrochronologie inakzeptabel sind, und die wahrscheinlich erst nach einer Loslösung vom Primat »überlieferte Chronologie« durch andere Synchronlagen aufgelöst werden könnten (vgl. Text zum Bild **2.12**).

## 2.14 Widersprüche zwischen jahrgenaue Chronologien

Die Autoren dieser warvenchronologischen Studie von 1994 stellen eine Übereinstimmung der C14-Werte in ihrer jahrgenaue Chronologie mit denen der Dendrochronologie für die letzten 2.000 Jahre fest [Brauer et al. 1994, 329]. Bei höherer Auflösung lassen sich für diesen Zeitraum allerdings Diskrepanzen von mehreren C14-Jahrhunderten konstatieren, was für jahrgenaue Chronologien einerseits und unter strikter Gültigkeit des Simultanitätsprinzips andererseits nicht akzeptabel ist. In einer der beiden Prämissen – in der Jahrgenauigkeit beider Chronologien oder dem Simultanitätsprinzip – muß ein Fehler stecken. Unabhängig davon ergibt sich für den Zeitpunkt vor 2.500 BP ein Versatz der Kurven von über 1.000 C14-Jahren, dessen Ursache »allerdings noch nicht genau bekannt« [329] sei.

Für diese warvenchronologische C14-Kalibrierkurve mußten »Messungen an umgelagertem Material« ausgeschlossen werden. Es ist schon auffällig, daß zwischen rund 4.000 und 9.000 BP nur ein Meßwert vorkommt. Deshalb fragen wir uns auch, ob die Massierung der Meßwerte einschließlich des Anstiegs der Kurve bei etwa 11.000 BP auf eine »Kalibrierung« am konventionellen Datum für den Beginn des Postglazial zurückzuführen ist? Nachtrag zur Neuauflage: In einer späteren Arbeit wurden Warven- und Baumringchronologie wieder zur Deckung gebracht – ein starker Hinweis, wie unsicher die Interpretation jahrgenauer Entstehung der Warven tatsächlich ist! (vgl Blöss/Niemitz 1998a; 1998b; auch Hajdas et al. [1995, 75])

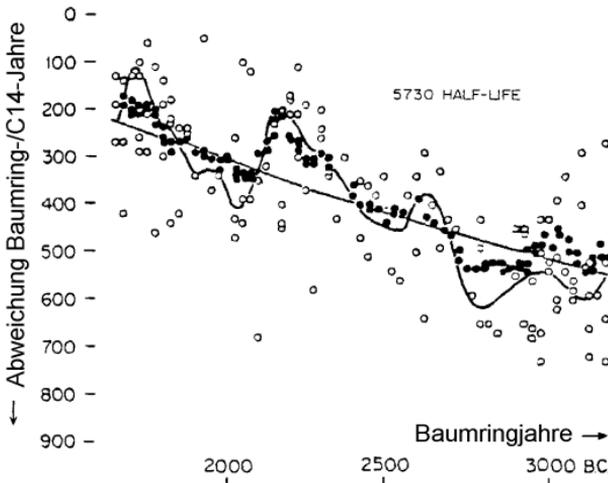


Auf die Abhängigkeit von der Vordatierung angesprochen, versichern Dendrochronologen gewöhnlich, daß die Stichhaltigkeit einer Hilfswissenschaft, die für die Vordatierung von Baumringsequenzen hinzugezogen wurde, ohne Belang sei, da am Ende ausschließlich der methodisch hochverläßliche Maßstab der Dendrochronologie angelegt werde. Dem stehen sowohl die offen verhandelten und hernach korrigierten als auch die nur indirekt zu erkennenden Fehler und Widersprüche in den einzelnen Baumringchronologien entgegen [Orcel 1985, 115; Baatz 1983, 719; Schmidt/Freundlich 1984, 233; Kromer et al. 1996, 607]. Ebenso sei die Frage erlaubt, wozu man diese Hilfswissenschaft überhaupt verwendet, wenn sie am Ende eigentlich doch nicht zur Wirkung gekommen ist? Die Behauptung, daß Vorplazierungen durch C14 keinerlei Vorentscheidung über die spätere Synchronlage beinhalte, ist schlicht falsch.

Wir möchten dem Leser ein drastisches Beispiel vor Auge führen, um die Abhängigkeit der Dendrochronologie von C14 zu verdeutlichen (Bild **2.13**): Die Lage der schwimmenden Sequenz »C« der süddeutschen Eichenchronologie – sie umfasste seinerzeit [Becker 1980, 219] immerhin 2.350 Jahre – erhielt eine erste zeitliche Verankerung auf der Basis des Fundamentalprinzips (prinzipiell eines C14-Werts) mit dem ungefähren Datum »900 v.Chr.« für den jüngsten Ring. Nach dem Abgleich einer großen Anzahl zusammengehöriger C14-Werte mit entsprechenden Werten einer bereits absolut datierten Ringsequenz jenseits des Atlantiks verschob sich dieses Datum um knapp 1.000 Jahre in die Vergangenheit. In der später erfolgten dendrochronologischen Verzahnung verifizierte man die Treffsicherheit dieser gewaltigen Verschiebung mit einer unscheinbaren Korrektur von weniger als 10 Jahren [Linick et al. 1985, 21]. Wenn die dendrochronologische Verzahnung über jeden Zweifel erhaben wäre, dann wäre im Nachhinein wiederum das Simultanitätsprinzip aufs Glänzendste bestätigt. Da das Simultanitätsprinzip aber bei Lichte betrachtet als falsch angesprochen werden muß, so muß sich zugleich die Dendrochronologie kritische Fragen gefallen lassen, etwa, ob sie es wirklich für einen Zufall hält, daß sie ein korruptes C14-Ergebnis so genau getroffen hat?

Wissenschaft schreitet ausgehend von bewährten Prämissen voran. Wenn sich Schlußfolgerungen als falsch erweisen, werden die Ableitungen aus den Prämissen und am Ende auch die Prämissen selber kritisch untersucht und in einer Weise angepaßt, daß sich die Schlußfolgerungen wieder als richtig erweisen. Die hier in Frage stehende und von der Dendrochronologie die längste Zeit weidlich ausgeschlachtete Prämisse ist die von der Quasikonstanz des C14-Gehaltes der Atmosphäre einhergehend mit der globalen Synchronisierbarkeit von C14-Mustern. Wenn diese Prämisse falsch ist – und wir müssen diesen Schluß aus den vorliegenden Indizien ziehen –, dann sollte das auch

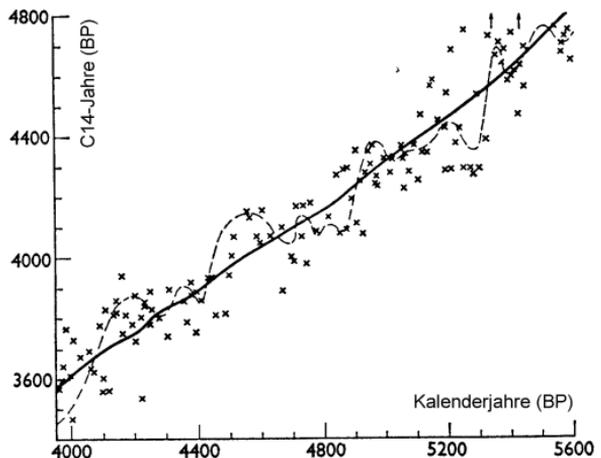
## 2.15 Meßfehler oder »wiggel«?



In beiden Bildern kommt die ungeheure Anstrengung zum Ausdruck, aus einem an sich erratischen Meßwertkorpus ein systematisches Verhalten herauszumessen. Im Bild links [Ralph, Klein 1979, 552] werden die unbehandelten Daten (unter Weglassung von »Ausreißern«) durch die ungefüllten Punkte (○) dargestellt, die gefüllten Punkte (●) sind bereits aus einer digital-

len Filterung entstanden und werden ansatzweise durch sinusoidale lokale Kurvenzüge wiedergegeben. Die glatte Kurve rührt hingegen aus einem Polynom 6. Ordnung. Im Bild unten setzt R.M. Clark [1979, 54] seine glatte Ausgleichskurve gegen die geschwungene Kurve von H.E. Suess, um seiner Ansicht von der Künstlichkeit von »wiggel« Nachdruck zu verleihen.

Diese Schwierigkeit, einen »wahren« Trend in die Meßwerte hineinlesen zu können, bewirkten, daß u.a. Damon et al. [1978, 488] feststellten, daß der gegenwärtige Stand der Dinge kaum erlaube, die jüngsten aus Sonnenaktivitäten rührenden C14-Fluktuationen eindeutig zu bestimmen. Nichtsdestotrotz verließen sich die europäischen Dendrochronologen auf die Realität weltweit identischer C14-Muster, um sich via »wiggel-matching« tentative Absolutdaten für ihre schwimmenden Baumringchronologien zu beschaffen.



von Widersprüchen in den abgeleiteten Schlußfolgerungen reflektiert werden. Mit der Versicherung, daß die Baumringchronologien absolut in Ordnung seien, entsteht also die paradoxe Situation, daß die Prämisse wohl falsch sein mag, die Schlußfolgerungen hingegen in jedem Fall unantastbar richtig wären.

Die Dendrochronologie ist eine der ganz wenigen historischen Disziplinen, die für sich in Anspruch nehmen kann, jahrgenaue Chronologie auch für die vorgeschichtliche Epoche darstellen zu können. Die damit verbundene Historie bezieht sich dabei jedoch bis auf wenige Ausnahmen auf sehr spezifische Ereignisse:

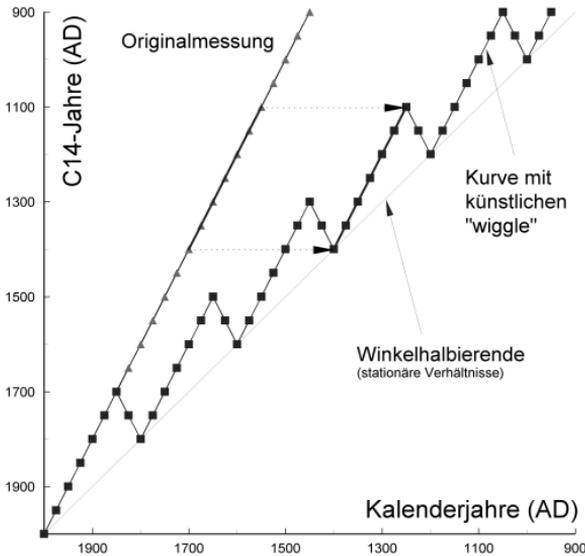
- Regionale und baumtypische Ausbildung von Ringbreiten
- Indizien für die regionale Entwicklung des Klimas
- Lokales Abbild der atmosphärischen C14-Konzentration
- Historischer Bezug bei archäologischer Vergesellschaftung mit Hölzern

Aus diesen historischen Elementen läßt sich leicht ableiten, wie selten es synchronistische Klammern zur menschlichen Früh- und Vorgeschichte geben wird, die zu einer substantiellen gegenseitigen Überprüfung der Chronologien verwendet werden könnten. Mit anderen Worten: Baumringchronologien stehen relativ einsam auf chronologischer Flur<sup>9</sup>. Uns überrascht es daher nicht, wenn es zu Widersprüchen mit anderen jahrgenaunen Chronologien wie etwa der Warvenchronologie kommt (Bild **2.14**).

Wir müssen vermuten, daß in dem zurückliegenden, rund 2.500 Jahre umfassenden Zeitraum, in dem eine Synchronität zur Chronologie der Historiker vorliegt, für die Europäischen Eichenchronologien letztlich nur die Baumringsequenzen Berücksichtigung fanden, die mit ihren C14-Werten den Anschluß an die zurückliegenden, über »wiggles« angepaßten Bereiche ermöglichten. Dabei wird es eine entscheidende Rolle spielen, welche Baumringe letztlich beprobt wurden und welche radiometrische Altersstreuung diese tatsächlich aufweisen. Wir gehen davon aus, daß diese Streuung der C14-Daten für dendrochronologisch tatsächlich synchronisierbare Ringfolgen außerordentlich hoch ist (vergleiche dazu Bild **2.15**), und daß innerhalb dieses Intervalls Proben letztlich so gewählt wurden, daß der lokale Trend am Ende immer zu dem übergeordneten Trend der Bristlecone-Pine-Chronologie pass-

<sup>9</sup> Im Gegensatz zur Dendrochronologie, die eine generelle Jahrgenauigkeit beansprucht, will S. Bowman [1990, 62] die C14-Methode bezeichnenderweise nur für das Verständnis der ungeschriebenen Geschichte als unverzichtbares Hilfsmittel verstanden wissen. Die Methode ist auch nach offiziellem Verständnis zu ungenau, um der geschriebenen Geschichte mehr als nur vage Anhaltspunkte geben zu können.

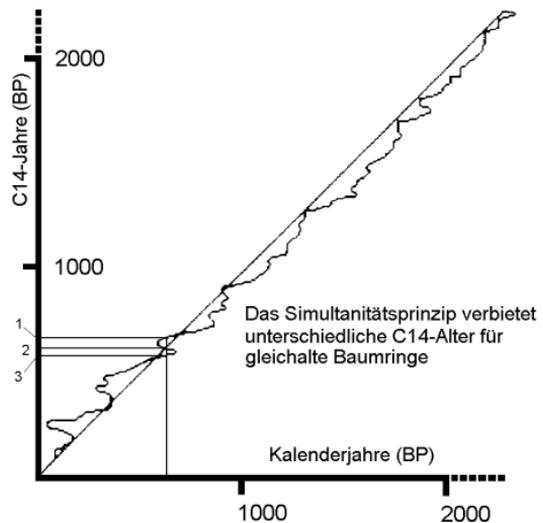
## 2.16 Chronologisch verzerrte Sequenzen erzeugen »wiggles«



»Wiggles« können auch entstehen, indem die aus Baumringen gewonnenen C14-Sequenzen systematisch auf der Winkelhalbierenden (als Repräsentantin des stationären Zustandes der C14-Konzentration in der Atmosphäre) plaziert werden – allerdings nur für den Fall, daß die Gesamtproduktion für C14 tatsächlich systematisch höher als die summarische Zerfallsmenge liegt. In dem Bild links werden »wiggles« durch eine zwangsweise Anordnung von Teilsequenzen auf der

Winkelhalbierenden erzeugt. Die gegenläufigen Teilstücke entsprechend Kurvenform C (vergleiche Bild 2.7) wären in diesem Fall artifiziell und würden auf irreführende Weise eine *Mehrdeutigkeit der C14-Jahre* hervorrufen.

Wenn die Produktionsrate für C14 dagegen systematisch niedriger liegen würde als im stationären Zustand, dann müßten Teilstücke mit einer *Mehrdeutigkeit der Baumringjahre* entstehen. Das sollte eigentlich sofort als Widerspruch zum Simultanitätsprinzip auffallen, kann aber sogar der kompletten Leserschaft eines wissenschaftlichen Bestsellers entgehen (Bild rechts aus D. Rohl [1996, 454], wo in diesem Fall jedoch »nur« C14- und Kalenderjahre vertauscht wurden).



te. Wir weisen an dieser Stelle darauf hin, daß die Kurvenbereiche »C« mit retrogradem Verlauf auch dadurch entstehen können, daß eine tatsächlich viel steiler verlaufende Kalibrierkurve in mehrere Teilstücke auseinandergerissen und diese Teilstücke dann auf die Winkelhalbierende verschoben werden. Das künstliche Flickern der Bruchstellen kann grundsätzlich nur mit Kurvenbereichen geschehen, die ein wachsendes C14-Alter bei tatsächlich fallendem Absolutalter aufweisen (vergleiche die Bilder **2.16** und **9.2**, auch Zeller [1996, 519]).

## 2.8 Zusammenfassung

Die C14-Wissenschaft hat ein ganz großes Problem mit unzuverlässig ausfallenden C14-Daten. Aber es ist ihr bis zu einem gewissen Grade gelungen, dieses Problem auf die Archäologen abzuwälzen, indem von diesen verlangt wird, möglichst viele Proben zu sammeln, deren C14-Daten in einer Zusammenschau dann auf statistischem Wege geheilt werden könnten. Mehr gefühlsmäßig als argumentativ gut begründet lehnen hier aber viele Historiker die ausgemittelten Zeitangaben ab. Das Gefühl trügt sie nicht: Nicht nur, daß ein solcher Mittelwert ohne Aussagekraft und zugleich die angegebene Fehlerschranke illegal ist, auch der große Retter-Komplex »Kalibrierung« steht infolgedessen auf tönernen Füßen: Die heute angewendete sogenannte »Präzisionskalibrierung« ist nicht aus einer in sich stimmig erstellten Baumringchronologie gewonnen, sondern hat vielmehr in der Ur-Form der Winkelhalbierenden von Anfang an den Aufbau aller relevanten Baumringchronologien gelenkt und geleitet. Wir gehen heute mit der Vermutung soweit, daß am Ende nur die Baumarten zur Auswertung zugelassen wurden, deren Inkorporations- und Diffusionsverhalten zur Annäherung der C14-Konzentration an den fiktiven stationären Trend führt.

Der Glaube an die Gleichförmigkeit der Naturprozesse konnte durch einen einzigen Hinweis (Bild **9.12** nach Willis et al. [1960]), daß die atmosphärische C14-Konzentration in den vergangenen 1.000 Jahren um einige wenige Prozent geschwankt haben müsse (und nicht einmal gestiegen bzw. gefallen sei), in eine tiefe und langanhaltende Krise gestürzt werden. Man vergleiche dagegen die Nonchalance, mit der heutzutage »Schwankungen« bilanziert werden, die in der Größenordnung des Nominalwertes selber liegen (dazu Bild **2.17**). Die Rettungsanstrengungen zielten darauf, diese wenigen Prozent Schwankungen zu beherrschen und sie gründeten darauf, daß damit die alleroberste Grenze aller möglichen Veränderungen bekannt und am Langzeittrend somit keinerlei Zweifel möglich war. Diese Absicht wird in der in

## 2.17 »Schwankungen« oder Trend?

In einem Artikel für RADIOCARBON versuchen H. Zbinden et al. [1989], den C14-Gehalt der Atmosphäre für die letzte Phase der Eiszeit zu rekonstruieren. Die Grundlage bilden 6 Bohrkern aus Sedimenten schweizerischer Seen. Die Absolutdatierung einzelner charakteristischer Perioden geschieht über die Synchronisierung der Periodenübergänge, die mit deutlich dokumentierten Temperatursprüngen verbunden waren, zur schwedischen Warvenchronologie. Die Autoren merken an, daß die Warvenchronologie »mehr oder weniger subjektiv« durch Vergleich geomorphologischer Muster entstanden sei.

Es wird festgestellt, daß ein »dramatischer Anstieg« des C14-Gehaltes von 10% während des Allerød – also binnen ca. 800 C14-Jahren – stattgefunden haben muß [Zbinden et al. 1989, 800]. Eine unbefangene Sichtung der Daten wird für den gesamten betrachteten Zeitraum einen Konzentrationsanstieg konstatieren, dessen Größenordnung durch das Maß des Koordinatenkreuzes gegeben ist: 20% in 4.000 Jahren – ohne die Absolutdatierung an dieser Stelle diskutieren zu wollen. Dieser Anstieg ist – auch nach konventionellen Gesichtspunkten – mit einer Erhöhung der stationären Produktionsrate von rund 40% verbunden. Allen Grund also, hier von einem Trend zu sprechen und nicht etwa von »Schwankungen«.

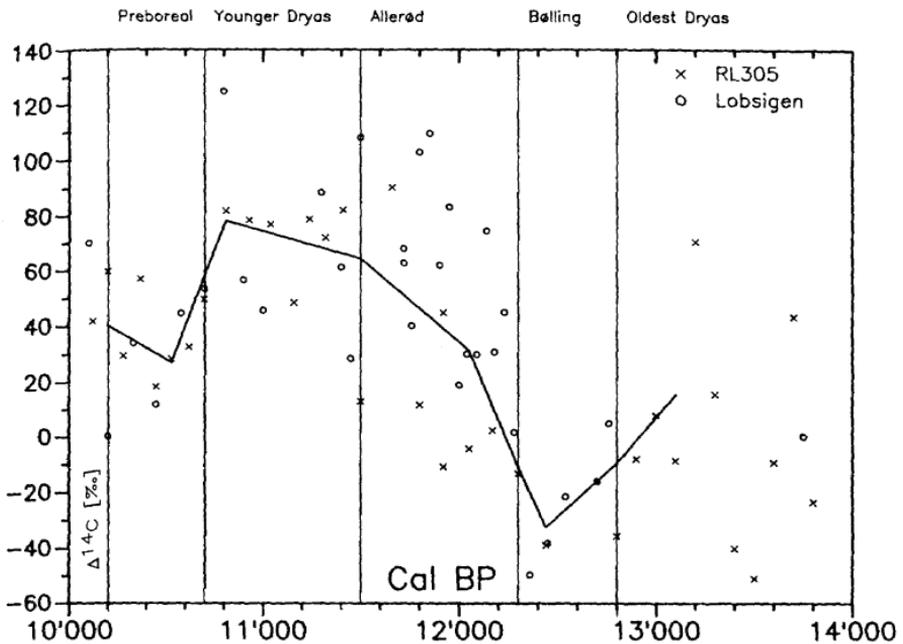


Bild **9.12** wiedergegebenen suggestiven Darstellung der gemessenen Abweichungen als reine Schwankungen deutlich.

Es ist von besonderer Ironie, daß die Protagonisten dieser jahrzehntewährenden, nahezu permanenten Rettungsaktion mit lokalen – teilweise nur handgezeichneten – Kurvenformen operierten, deren mathematische Analyse umgehend zur Sprengung ihres aktualistischen Leitgedankens geführt hätte. Jeder mit »kosmischem Schwung« [Suess 1970a, 310; Suess 1990, 8] gezeichnete »wiggles« bedeutete eine lokale Kleinkatastrophe mit Produktionsexzessen und Diffusionsströmen, die für ein Vielfaches des für wahr gehaltenen stationären Umsatzes an C14 standen. Daß niemand jemals auch nur eine einzige quantitative Analyse dieser lokalen Approximation der vorliegenden Meßwerte vorgenommen hatte, kann nur mit dem tiefen Glauben an die Gleichförmigkeit der Naturprozesse erklärt werden.

Die Entwicklung der Natur- und der Geistesgeschichte ist heute über die Idee, daß Naturprozesse seit langem in grundlegend stationäre Verhältnisse gemündet sein müßten, weit hinausgegangen und hat die Vorstellung von permanenten chaotischen Übergängen zwischen dynamisch stabilen Zuständen geprägt: Naturgeschichte ist eine Abfolge von Umwälzungen lokalen bis hin zu globalen Ausmaßes. Ein stationärer Zustand ist nicht mehr das Sinnbild einer zum Frieden immerwährender Prosperität gelangten Natur, sondern das Synonym einer allzeit gefährdeten Ruhe vor dem Sturm, die durch kleinste Veränderungen in den Randbedingungen beendet und in Form einer Katastrophe innerhalb eines kurzen Zeitraumes in einen völlig anderen Zustand übergehen kann.

Würde die C14-Methode erst heute erfunden werden, käme niemand mehr auf die Idee, diese zur globalen Absolutdatierung aufbauen zu wollen. Die vielfältigen Erfahrungen mit Fluktuationen und Umschwüngen ließen realistisch lediglich die Idee entstehen, nach einheitlichen und – vor allem – signifikanten Veränderungen in der C14-Konzentration als überregionale zeitliche Klammer zu suchen. Man würde auf C14-Konzentrationssprünge zeitlich eng benachbarter Proben achten, ohne streng zu verlangen, daß die absolute Konzentration dabei in allen in Frage kommenden Orten bzw. Proben unbedingt gleich sein müsse. Von dieser Warte aus würde eine moderne C14-Wissenschaft niemals die Führerschaft in der Frage nach Absolutdaten beanspruchen wollen oder können.

Die »Bruderwissenschaft« der Dendrochronologie hat ihre Baumringsequenzen in ein Stadium getrieben, das sie ohne C14 niemals erreicht hätte. Wenn manche ihrer Vertreter auch von sämtlichen anderen existierenden Absolutchronologien als ihr »untergeordnet« sprechen [Baillie 1995, 12] und die

dendrochronologische Methode als »gleichsam atemberaubend in ihrer Eleganz und Einfachheit« [1995, 17] bezeichnen und ihre Ergebnisse aus einem »ultimativen chronologischen Maßstab« [1990/91, 27] abgeleitet sehen, die »unglaublich genau« [1995, 17] und gegebenenfalls »absolut sicher« [1995, 26] seien – so bräche sie doch sofort zusammen, wenn sie ohne Hilfe durch C14 und unter Berücksichtigung aller jemals gesammelten Proben das nach jahrzehntelanger Arbeit erzielte Ergebnis noch einmal reproduzieren sollte. Trost könnte allenfalls darin bestehen, daß auch andere Absolutchronologien in eine ähnliche Verlegenheit gebracht werden können.

## 2.9 Hinweise auf die kommenden Kapitel

Mit diesem Kapitel wollten wir zeigen, daß von zwei völlig unterschiedlichen Standpunkten aus – von dem der Chronologie und dem der Physik – zentrale Schwachstellen der C14-Methode gleichermaßen ausgeleuchtet werden können. Es ist wichtig, von Beginn an die Tiefe der Verstrickung sowohl der C14-Methode als auch der Dendrochronologie in unreflektiert ausgeschlachtete künstliche und falsche Ordnungsprinzipien zu erkennen. Erst daraus kann das richtige Verständnis des offiziellen Umgangs mit all den vielen, vielen nur scheinbar peripheren Problemen erwachsen.

Diese Probleme lassen sich weitestgehend aus dem fundamentalen Irrtum ableiten, der in der Anwendung des Aktualismus liegt: »natura non facit saltum«. Die jeweiligen Lösungsversuche zeigen ein ums andere Mal, daß das Ausmaß der Fehlgriffs nicht erkannt und das richtige Fazit aus der Summe der Probleme nicht gezogen werden kann, solange diese jeweils als nur klein und isoliert wahrgenommen werden.

Im folgenden (dritten) Kapitel versuchen wir für die Geschichtswissenschaft im Allgemeinen und für die Dendrochronologie im Besonderen jeweils eine Position zu bestimmen, von der aus die Leistung der C14-Methode nach unvoreingenommenen Kriterien beurteilt werden kann, ohne sich bereits in irgendeiner Form von ihr abhängig gemacht zu haben. Daraus ergibt sich zwangsläufig, daß wir die C14-Methode an ihren eigenen Ansprüchen messen und demzufolge kritisieren müssen. Das darauf folgende 4. Kapitel faßt die vorangegangenen Kapitel in Verbindung mit mehreren Graphiken zusammen.

Die Kapitel 5 und 6 sind historischen Betrachtungen gewidmet und gliedern sich wie folgt:

- Unter welchen Vorstellungen (und nicht zuletzt mit welchen Vorurteilen) wir diese Untersuchung gestartet haben und anhand welcher Erkenntnisse wir jeweils unser Urteil weitergebildet haben (Kapitel 5).
- Wie denkbar schlecht die meßtechnischen und probenspezifischen Voraussetzungen etwa im Vergleich mit (durchaus ökonomisch orientierten) radiomedizinischen Untersuchungen ausfallen (zu Beginn des Kapitel 6).
- Wie und unter welchen allgemeinen Bedingungen die C14-Methode bis zur Veröffentlichung 1949 entwickelt wurde (Kapitel 6).

In den restlichen drei Kapiteln 7, 8 und 9 werden mehrere Problemkreise vertieft erörtert:

- Wie das Instrument der Statistik zur Vertuschung der unverstanden gebliebenen Streuung und damit letztlich zur scheinbaren Gesundung der C14-Absolutdaten eingesetzt wird (Kapitel 7).
- Zu welcher Höhe sich die Einzelfehler tatsächlich summieren, wenn alle offiziell bekannten, in der Regel aber nur im Einzelfall behandelten Probleme einmal konsequent zusammenschaut werden (Kapitel 8).
- Was im Einzelnen für Einschränkungen (etwa im Umfang der Bilanzgleichung für C14) vorgenommen und welche Umwege (besonders bei dem Verfahren der Kalibrierung selber) eingeschlagen worden sind, um den Mythos von der Absolutdatierbarkeit durch C14 am Leben zu erhalten (Kapitel 9).
- Wie das Bild, das sich die Wissenschaftler von der quasi-stationären zeitlichen Entwicklung der C14-Konzentration der Atmosphäre trotz klarer Indizien für den gegenteiligen Trend ausgemalt hatten, das Verfahren der Kalibrierung geprägt hat (Kapitel 9).

In diesen letzten drei Kapiteln finden sich alle Argumente und Betrachtungen, auf die sich auch die vorangegangenen Kapitel des Buches gestützt haben, die wir zur Wahrung des allgemeinen Verständnisses von fachspezifischen Diskursen jedoch möglichst frei halten wollten.

### 3. Methodisches – C14 auf dem Prüfstand

#### 3.1 Keine Datierung ohne Chronologie

Sowie es um die C14-Methode geht, wird auch ein eher unsensibler Beobachter ein gespanntes Verhältnis zwischen Historikern und Naturwissenschaftlern bemerken. Wir haben bisher nur Historiker getroffen, die privatim aus dem Stand heraus mit Vorbehalten gegenüber der C14-Methode reagierten. Diese Aversion erwächst vor allem aus dem Gegensatz zwischen dem programmatisch gegebenen Absolutheitsanspruch der C14-Methode auf der einen Seite und deren ungelösten Widersprüchen in Verbindung mit anhaltenden Kontroversen zu Datierungsfragen auf der anderen Seite.

Dabei war die Haltung der Altertumswissenschaftler in der Frühphase der Entwicklung der C14-Methode durchaus wohlwollend. Man versprach sich dringend benötigte Hilfestellung bei der Datierung. Das Zerschlagen ganzer Chronologiesysteme, wie es sich dann im Laufe der siebziger Jahre abzeichnete, wurde dagegen weitgehend als unzumutbare Einmischung abgelehnt. Der Wandel in der Haltung gegenüber der C14-Methode kann am Beispiel H. Müller-Karpes, einem der angesehensten deutschen Altertumsforscher, verdeutlicht werden.

1966 teilte H. Müller-Karpe mit vielen seiner Fachkollegen jene wohlwollende, wenngleich noch vorsichtige Zuversicht, daß die C14-Methode Licht in das verbliebene chronologische Dunkel bringen könnte, das die Altertumsforschung bis dahin aus eigener Kraft nicht hatte vertreiben können. Im ersten Band seines Handbuches der Vorgeschichte muß er nämlich das Fehlen einer verlässlichen Methode beklagen, die die Synchronisierung von Erscheinungen weit auseinanderliegender Gebiete ermöglicht. Erst dadurch werde aber die Paläolithforschung in die Lage versetzt, parallele oder auch zeitlich aufeinanderfolgende Entwicklungen aufzudecken. Doch es bestünde nunmehr Hoffnung, »daß die nach dem zweiten Weltkrieg entwickelte sog. C 14-Methode in der Lage sein wird, ein solches universales chronologisches Bezugsnetz zu schaffen« [1966, 17].

Zwar sei die Methode noch mit mancherlei Unvollkommenheiten behaftet, aber: »Die Messungen werden verfeinert, Fehlerquellen aufgespürt und möglichst ausgeschaltet, Unsicherheiten einkalkuliert« [ebd. 131]. Es könne sein, daß diese Methode in Zukunft, wenn genügend große Untersuchungsserien vorliegen, zu einem verlässlichen Gerüst der absoluten Zeitbestimmung verhelfen werde [ebd. 131].

Bereits Jahre zuvor, seit spätestens 1958, wurden verstärkt Indizien diskutiert, daß das Fundamentalprinzip ungültig sei und C14-Daten deshalb nicht direkt in ein Absolutdatum umgerechnet werden dürften. Diese Indizien bewiesen einheitlich, daß die C14-Konzentration der Atmosphäre sich in den zurückliegenden Jahrhunderten verändert haben müsse. Also bestand die Notwendigkeit, zuerst den zeitlichen Verlauf der C14-Konzentration vollständig zu rekonstruieren, bevor ein C14-Datum kalibriert und damit in ein annäherndes Absolutalter umgerechnet werden konnte. Das bedeutete aber, daß die erhoffte Datierungshilfe von der C14-Methode erst dann zu erwarten war, wenn eine lückenlose Chronologie der atmosphärischen C14-Konzentration vorlag.

Libbys »Fundamentalannahme« war nichts weniger als der erste vollständige Entwurf jenes global gültigen Chronologienetzes gewesen, von dem die Altertumswissenschaftler für ihren Bereich seinerzeit höchstens träumen konnten. Die ursprüngliche Annahme, daß die atmosphärische C14-Konzentration an allen Orten der Erde und zu allen Zeiten konstant gewesen sei, ist zwar trivial, repräsentiert nichtsdestotrotz eine reguläre globale und zeitlich umfassende Chronologie.

Als sich die Fundamentalannahme als falsch herausgestellt hatte, stand sofort die detaillierte Rekonstruktion der Chronologie der C14-Konzentration der Atmosphäre an oberster Stelle der Tagesordnung. Die C14-Methode war nunmehr selber auf die Notwendigkeit zurückgeworfen, eine lückenlose Chronologie für die C14-Konzentration der Atmosphäre zu erstellen! Solange dies nicht geschehen war, mußten die C14-Meßdaten eigentlich mit entsprechender Zurückhaltung verwendet werden. Die bereits erfolgte Verwendung von C14-Daten zur Stützung historischer Theorien tat aber das ihrige, um C14-Daten gegebenenfalls auch weiterhin zu verwenden.

Müller-Karpe, und mit ihm auch der größte Teil der Fachkollegen, erkannte nicht, daß sich die C14-Methode bereits seit Jahren in derselben Notlage befand wie seine eigene Wissenschaft und an sich zu größter Zurückhaltung verpflichtet gewesen wäre. Was ihm aber nach und nach von der C14-Wissenschaft präsentiert wurde, konnte und wollte er ohnehin nicht akzeptieren. Bereits im II. Band des Handbuchs macht er seinem Ärger Luft: »Wenn neuerdings unter Berufung auf C 14-Bestimmungen gewisse neolithische Kulturäußerungen Ostasiens für extrem alt gehalten werden, so daß sich ein vom übrigen altweltlichen Neolithikum unabhängiger und diesem sogar zeitlich vorausgehender Ursprung dieser Eigenheiten ergeben würde, so erscheint dies wenig glaubhaft« [1968, 14]. Müller-Karpe nimmt das Wetterleuchten am Horizont wahr, das sich in wenigen Jahren in der sogenannten »Zweiten Radiokarbonrevolution« entladen wird.

### 3.1 Das Erfinden künstlicher Zeiträume mit C14: »Besiedelung Neuseelands schon vor 2.000 Jahren«

In einem kurzen Zeitungsartikel aus der F.A.Z. vom 4. September 1996 fanden wir folgende Argumente auf der Basis von C14-Daten zusammengestellt, wonach die Erstbesiedelung Neuseelands durch die Maoris bereits 1.200 Jahre vor dem bislang als wahrscheinlich geltenden Datum möglich erscheinen würde:

- Bisherige Vermutung: Erste Maoris in Neuseeland um 1100 bis 1150 AD.
- Neuer Befund: C14-Datierung von neuseeländischen Rattenskeletten ergeben ein Alter von bis 2.000 Jahren.
- Zugrundeliegende Theorie: Ratten (und andere Säugetiere) sind erst im Gefolge von Maoris auf die Insel gekommen.
- Aus den C14-Daten ergibt sich also, daß eine erste Besiedelung Neuseelands durch die Maoris bereits vor 2.000 statt vor 800 bis 850 Jahren stattgefunden hat.
- Aus der sonstigen Fundlage für Artefakte muß nunmehr auf eine Besiedelungslücke von mehr als 1.000 Jahren geschlossen werden, wobei der Grund für die Aufgabe der Besiedelung unklar ist.

Die gemessenen C14-Alter von rund 2.000 Jahren BP wurden mit Hilfe angeblich global gültiger Kalibrierkurven in ein historisches Alter umgerechnet. Grundsätzlich ist für die betrachtete Zeit eine ungefähre Übereinstimmung von C14- und Kalenderalter ausgewiesen. Wenn man dagegen die Kalibrierung zugrundelegt, die auf Messungen beruht, die aus Neuseeland selber stammen (vergleiche Bilder 2.4 und 2.9), dann resultiert ein um 800 Jahre kürzeres Ergebnis für die angebliche Besiedelungslücke. Und da die erratische Schwankungsbreite von C14-Daten für an sich gleichaltrig zu behandelnde Artefakte in der Größenordnung mehrerer Jahrhunderte liegen kann, darf diese Besiedelungslücke getrost als »C14-Kunstprodukt« angesprochen werden.

Es waren Eventualitäten dieser Art, die die Vorbehalte der Altertumswissenschaftler bei der universellen Verwendung von C14-Daten zur Errichtung eines globalen Datierungsnetzes erregten. Falsch konstruierte Chronologien erzeugen Lücken, in die dann Kulturen verdoppelnd und verdreifachend hineinprojiziert werden. Beispiele dafür rekonstruierten G. Heinsohn in der Verdoppelung der Chaldäer als Sumerer [Heinsohn 1988] und G. Heinsohn und H. Illig in der Verdreifachung der altägyptischen Chronologie in Altes, Mittleres und Neues Reich [Heinsohn/Illig 1997]. Und um die Existenz des »Dark Age« Griechenlands (etwa 1.200 - 700 BC) rang man schon zur letzten Jahrhundertwende. Diese Diskussion wurde von I. Velikovskij 1945 neu entfacht (vgl. Illig [1988, 64ff.]) und ist seitdem nicht mehr zur Ruhe gekommen [Peiser 1993; Heinsohn/Illig 1997].

Ähnliches schält sich auch für die Bewertung des Mesolithikums heraus, der sogenannten »Mittleren Steinzeit«, die den Zeitraum vom Ende der jüngsten Eiszeit (ca. 10.000 BP) und dem Einsetzen des Neolithikums abdecken soll. Die generell festzustellende Fundarmut für diesen Zeitraum [Heinsohn 2000] kann darauf zurückgeführt werden, daß das Eckdatum für das Ende der Eiszeit falsch gesetzt worden bzw. erheblich jünger anzusetzen ist [Blöss 2000].

Für Mesopotamien – einer Region, die noch am besten absolutdatiert erschien – hoffte Müller-Karpe, daß durch zukünftige Ausgrabungen das Netz archäologischer Vertikalabfolgen und Horizontalverknüpfungen immer fester und feinmaschiger wird (siehe zu den Gründen des Mißtrauens gegenüber der C14-Methode auch Textbox 3.1). Erst dann sollte über die Brauchbarkeit der C14-Methode neu verhandelt werden: »Im selben Maße, wie dies der Fall ist, wird sich auch klarer beurteilen lassen, inwieweit Radiokarbonbestimmungen für die Gewinnung einer absoluten Chronologie (...) nutzbar zu machen sind. Bereits jetzt liegen zahlreiche C 14-Untersuchungen vor, und man ist wohl berechtigt, sie bis zu einem gewissen Grad mitzuberechnen. Ausschließlich oder auch nur primär von den C 14-Werten auszugehen, würde im gegenwärtigen Stand der Erprobung dieses physikalischen Forschungszweiges nicht gerechtfertigt sein und würde zudem kein widerspruchsfreies System ergeben« [1968, 72].

Denn so verlockend es angesichts nicht vollkommener Horizontalverflechtungen insbesondere zwischen den mediterranen und den ägyptischen bzw. mesopotamischen Erscheinungen sei, den »facheigenen methodischen Weg subtiler archäologischer Analysen und Verknüpfungen zu verlassen und primär Radiokarbonbestimmungen zur Grundlage einer Chronologie zu machen, so scheint dies augenblicklich doch wohl nicht gerechtfertigt zu sein, wengleich die vorliegenden C 14-Untersuchungen natürlich allgemein mit berücksichtigt werden müssen« [1968, 83]. Endgültig genug von der C14-Methode hat Müller-Karpe aber im Zusammenhang mit der Beschreibung der Kupferzeit und den »extrem hohen C 14-Werten« für die westeuropäischen Megalithkulturen und für frühkeramische Komplexe Ostasiens, und er läßt sich noch auf diese letzte abschließende Kommentierung ein: »Hier sieht sich der Prähistoriker heute in einem Wissenskonflikt: soll er dieser naturwissenschaftlichen Methode strikt vertrauen, obgleich er sieht, daß immer neue Fehlerquellen dieser Methode gefunden werden und eine Menge Bestimmungen bekannt sind, die irgend etwas, nur nicht das Alter in Sonnenjahren ausdrücken; oder soll er im Hinblick darauf es vorziehen, in facheigener Verantwortung zunächst den historischen Quellen und Methoden zu vertrauen und naturwissenschaftliche Bestimmungen nur insoweit zu verwenden, als die dabei angewandten Methoden hinreichend erprobt sind und ihre Anwendungsart in einem überprüfbareren Verhältnis zu den erzielten Ergebnissen steht?«

Angesichts des augenblicklichen Forschungsstandes, so formuliert Müller-Karpe vornehm zurückhaltend, scheine die letztere Einstellung die Berechtigtere zu sein [1974, 13 f.]. Im vierten Band, der die Bronzezeit behandelt [1980], verweist Müller-Karpe nicht einmal mehr auf irgendwelche C14-Daten, wie

er es – wenn auch zuweilen geradezu angewidert – in den drei Bänden zuvor getan hatte. Durch das Lager der Altertumswissenschaftler geht im Laufe der siebziger Jahre zunehmend ein Riß. Der Grund liegt in der Veröffentlichung einer ersten kompletten Chronologie der C14-Konzentration der Atmosphäre, der Bristlecone-Pine-Chronologie. J. Hoops, der das Stichwort »Radiokarbonmethode« im REALLEXIKON DER GERMANISCHEN ALTERTUMSKUNDE [Bd.4 1981, 629] bearbeitete, kommt damit zu ganz anderen Schlußfolgerungen als Müller-Karpe.

Insbesondere in der Bronzezeit sei es nach der dendrochronologischen Korrektur der  $^{14}\text{C}$  Daten verschärft zu Schwierigkeiten gegenüber der komparativ-typologischen Methode gekommen. Die C14-Datierungen schlugen nunmehr für das mittel- und nordeuropäische Neolithikum sowie für den kupferzeitlichen Abschnitt deutlich höhere Altersangaben vor. Während die nord-europäischen Fachkollegen rasch die Möglichkeiten der Radiokarbonatierung aufgegriffen und genutzt hätten, »hielt die mittel- und südeuropäische Forschung, von Ausnahmen abgesehen, noch lange an der herkömmlichen archäologisch-historischen Datierung fest und verteidigten diese mitunter sogar hartnäckig« [ebd., 637]. Die absolute Chronologie des Neolithikums, die durch naturwissenschaftliche Methoden der relativen Chronologie den Rang ablaufe, zeige auf vielen Bereichen die Schwächen der empirisch-stilistischen Verknüpfung zwischen einzelnen Kulturen und der typologischen Vorgehensweise.

Das Gros derjenigen Altertumswissenschaftler, die sich auf C14-Daten stützen, wähnt sich vollkommen auf dem Boden einer naturwissenschaftlichen Datierungsmethode. Sie erwarten Aussagen, die letztlich ausschließlich aus mathematischen Gleichungen abgeleitet sind. Da die C14-Methode unter allen Umständen auf eine globale und zeitlich umfassende, lückenlose Chronologie der atmosphärischen C14-Konzentration abgestützt sein muß, steht an der Basis der naturwissenschaftlichen C14-Methode eine Chronologie, die ihre Wurzeln nicht in der Mathematik, sondern erneut in der »komparativ-typologischen« Methode hat.

Diese Chronologie liegt in Gestalt der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie bzw. der europäischen Eichenchronologien vor, die genauso mit Hilfe einer »komparativ-typologischen« Methode erstellt wurden, wie die relativen bzw. quasi-absoluten Chronologien der Altertumswissenschaft vor der Verwendung naturwissenschaftlicher Datierungsmethoden. Das geschah durch den Vergleich und die Verzahnung von Wuchswertfolgen in Baumringsequenzen mit dem Ergebnis einer Baumringchronologie. So überrascht es auch nicht, daß die »komparativ-typologische« Methode der Dendrochro-

nologie ebenfalls nicht umfassend greifen konnte, sondern bei der Erstellung einer korrekten chronologischen Abfolge wie die Kollegen der Altertumswissenschaft auf externe Hilfen angewiesen war. Diese Hilfe kam anfangs durch historische Vordatierungen der fraglichen Hölzer und später dann vor allem durch Vordatierungen und Synchronisierungen mit Hilfe der C14-Methode.

Die C14-Methode eilte der Dendrochronologie, die das zeitliche und räumliche Abbild der C14-Konzentration der Atmosphäre erst noch erstellen sollte, unter Einsatz überholter Prämissen für dessen räumliches und zeitliches Verhalten zur Hilfe. Wenn ausgerechnet die C14-Methode selber hinzugezogen wurde, um den unvermeidlichen Schwächen dieses Vorgehens entgegenzutreten, dann müssen die Alarmglocken schrillen (vergleiche die Kapitel 2.3 bis 2.5). Insbesondere kam diejenige Prämisse zur Geltung, die für das Überleben der C14-Methode unabdingbar ist: Die uneingeschränkte Gültigkeit des Simultanitätsprinzips. Lokale, autonom erstellte Chronologien sind deshalb auch niemals (bis auf eine Ausnahme, vergleiche dazu Kapitel 3.5) ernsthaft miteinander in radiometrischen Vergleich gesetzt worden, um dieses Simultanitätsprinzip zu überprüfen. Sie dienten vielmehr wechselseitig als Vorlage, um schwimmende Baumringsequenzen über den Vergleich von C14-Mustern synchronisieren zu können.

Die »erfolgreiche« Kompletierung der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie sowie später dann der europäischen Eichenchronologien schwächte die Position der Kritiker der C14-Methode, die die vorgegebenen Datierungen aus immanenten Gründen aber weiterhin nicht akzeptieren wollten. Wir werden in diesem dritten Kapitel zeigen, wie vorgegebene C14-Daten beurteilt werden können, ohne bereits von unbewiesenen oder unzutreffenden Prämissen abhängig zu sein.

Auf Historiker, die die C14-Methode verwenden, ohne die chronologischen Grundlagen dieser Methode ausreichend analysiert zu haben (was ihre ureigenste Aufgabe wäre), ist in etwa auch die Schelte anwendbar, die B. Hrouda, ein Spezialist für vorderasiatische Archäologie, unabhängig davon an Kollegen austeilte, die sich zu einseitig auf die Naturwissenschaft verlassen würden: »Wir wollen nur am Rande erwähnen, daß auch Leichtfertigkeit oder ein gewisses Ersatzdenken in eine neue Richtung führen können, wie es z.B. bei der Anwendung der C14-Daten zu beobachten ist. Durch die Entdeckung von Libby glaubten einige Archäologen bei ihren Datierungen nunmehr auf die für manche recht mühevollen Stilvergleiche verzichten zu können; man bekam ja die Daten 'frei ins Haus' geliefert und dazu noch von einer exakten Naturwissenschaft« [Hrouda 1978, 16].

Grundsätzlich scheint es so zu sein, daß Arbeitsgebiete, die lange vor der Entwicklung der C14-Methode über eine ausgefeilte Absolutchronologie verfügten, diese trotz aller gegenteiligen Versuche und unter Nichtbeachtung von C14-Daten methodisch unverändert weiterführen. So stellt das Lexikon der Ägyptologie fest, daß C14-Daten grundsätzlich nicht als genügend zuverlässig angesehen werden könnten und allenfalls für die Vorgeschichte einen ungefähren zeitlichen Anhalt geben würden [Helck et al. 1975, 970].

Während 1992 mit »Chronologies in Old World archaeology« [Ehrich 1992] eine umfassende C14-basierte Chronologie Vorderasiens und insbesondere Ägyptens erscheint (vergleiche auch Hassan/Robinson [1987]), stellt zur gleichen Zeit K.A. Kitchen in einem Übersichtsartikel zum Stand der Ägyptologie in *World Archaeology* fest, daß C14-Daten bei Chronologieproblemen der Ägyptologie grundsätzlich nicht helfen könnten, weil deren summarische Fehler über den strittigen Datierungsintervallen liegen würden [Kitchen 1991, 204].

Anders sieht es für Bereiche aus, die weitgehend ohne Absolutchronologie bzw. ohne überregionale Verzahnung relativer Chronologien geblieben sind, wie etwa weite Bereiche Afrikas. Für Regionen, in denen wegen mangelnder vertikaler Kontinuität der Fundsituation die traditionellen Methoden der Chronologie nicht greifen konnten, wurde nunmehr mit Hilfe der C14-Methode ein vertikales und zugleich horizontales Datierungsnetz gesponnen [Henry 1992].

Während eine relative Chronologie, die auf der typologischen Abfolge von Artefakten aufbaut, zu einer Absolutchronologie verdichtet wird, indem bestimmte Innovations- und Diffusionsraten (und natürlich auch Diffusionsrichtungen) für technologische Verfahren zugrundegelegt werden, kann der auf sich allein gestellte C14-Chronologe die von ihm herausgemessenen asynchronen Technologieentwicklungen in unterschiedlichen Regionen nur noch anhand ökologischer Modelle interpretieren. Dabei muß er sich dann (in weitgehendem Widerspruch zum traditionellen Erklärungsansatz) auf die Unabhängigkeit der jeweils betrachteten Gesellschaften stützen.

Nach wie vor wird die Stimmung der meisten Historiker vielleicht am besten durch einen Ausspruch wiedergegeben, den T. Säve-Söderbergh und I.U. Olsson als Zitat eines »berühmten amerikanischen Kollegen« in einem Vortrag über C14 und Ägyptologie [1970, 35] wiedergaben: »Wenn ein C14-Datum unsere Theorien untermauert, dann erscheint es direkt im Text der Veröffentlichung. Wenn es diesen nicht völlig widerspricht, findet es in einer Fußnote Erwähnung. Wenn es jedoch völlig aus dem Rahmen fällt, so lassen wir es einfach fallen.«

Im Wortsinne dieser sarkastischen Differenzierung dürften die C14-Wissenschaftler die allermeisten ihrer Daten sowieso nur als Fußnoten veröffentlichen, denn die Qualität ihrer Daten steht zu häufig in diametralem Gegensatz zu den Anforderungen, die die Historiker im Interesse ihrer Arbeit an sie eigentlich stellen müssen. Wenn wir eine weitere Parallele ziehen wollen, so sitzen auch die C14-Wissenschaftler an einem mächtigen Tisch, unter den sie alle völlig aus dem Rahmen fallenden Daten verschwinden lassen. »Nicht völlig« und »völlig« aus dem Rahmen fallende Daten halten sich oft genug die Waage – ein Hinweis, wie nahe die Qualität akzeptierten Daten der Qualität der verworfenen Daten tatsächlich ist!

Historiker haben sich – über die selektive Kenntnisnahme von C14-Daten hinaus – immer wieder auf verschiedenste Weise mit dem Thema »C14-Datierung« inhaltlich auseinandergesetzt, ohne je wirklich sicher gewesen zu sein, der Hydra alle Köpfe abgeschlagen zu haben. So überrascht es nicht, daß zum Beispiel R.D. Long 1973 in der PRÄHISTORISCHEN ZEITSCHRIFT den Kulminationspunkt seiner klugen und klarsichtigen Kritik mit dem Hinweis auf die Variabilität der Halbwertszeit von C14 setzen möchte, um auf diese Weise die Auseinandersetzung endlich ein für allemal beenden zu können.

Historiker wären dankbar für die C14-Methode, wenn sie sicher sein könnten, daß die ihnen zur Kenntnis gegebenen Daten zuverlässig sind. Nach Lage der Dinge erfüllen nur die wenigsten der im Umlauf befindlichen Daten tatsächlich die selbstverständlich zu nennenden Sicherheitsbedürfnisse der historischen Wissenschaften. Wir werden versuchen, einen Sicherheitsstandard für C14-Daten zu definieren, nach dem diese bedenkenlos verwendet werden könnten.

Tatsächlich sind die Gepflogenheiten der C14-Labors – was die Herausgabe »sicherer« Daten betrifft – äußerst fragwürdig und an Maßstäben orientiert, die allenfalls für genuin erratische Datensätze (wie etwa aus Meinungsumfragen resultierend) und auch dann nur unter klarster Offenlegung der tatsächlichen Sicherheiten angemessen erscheinen.

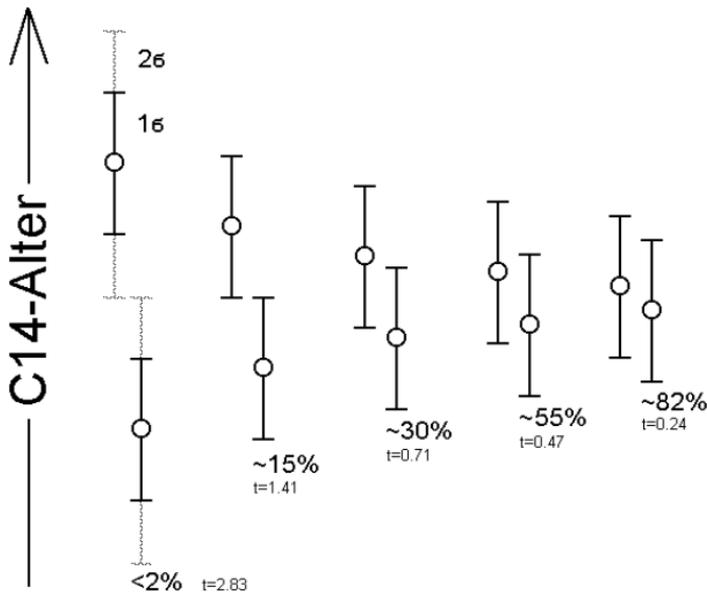
### 3.2 Wie sicher sind C14-Daten?

Der Sicherheitsstandard für die Veröffentlichung von C14-Daten läßt sich unmittelbar aus der Analyse der statistischen Verfahren ablesen, die von der C14-Methode angewendet werden. Der Naturwissenschaftler M.J. Aitken hat den Ausspruch »one date is no date!« geprägt. Diese Bemerkung ist zuvorderst ein unmißverständlicher Hinweis auf die Unzuverlässigkeit jedes einzelnen Probandatums, die trotz aller Korrekturbemühungen bleiben wird und

### 3.2 Mit welcher Wahrscheinlichkeit stammen zwei divergente C14-Alter von tatsächlich gleichaltrigen Proben?

Wenn trotz gleichen Absolutalters beider Proben zwei unterschiedliche C14-Daten gemessen werden, dann dürfen die Unterschiede der C14-Alter ausschließlich aus der begrenzten Meßzeit für die radioaktiven Zerfallsereignisse rühren. Mit anderen Worten: Je länger die fraglichen Proben gemessen werden, desto näher müssen die Meßwerte auch zueinander rücken. Als Faustregel kann gelten, daß zwei Proben eher gleichzeitig als ungleichzeitig interpretiert werden können, wenn der Abstand ihrer C14-Mittelwerte deutlich kleiner (etwa 2/3) als die mittlere Standardabweichung  $\sigma$  ist (zu Einzelheiten vergleiche Long/Rippeteau [1974]).

Aitkens Formulierung, daß das Vertrauen in die Gleichzeitigkeit dann deutlich gestärkt wird, wenn die beiden  $1\sigma$ -Fehler noch überlappen, macht die prekäre Lage bei der Interpretation von C14-Daten deutlich. Obwohl die Wahrscheinlichkeit dafür nur noch 15% beträgt, muß das offenbar ausreichen, weil in der Regel mehr einfach nicht zu erwarten ist. Dieses Vertrauen zeigt sich erst dann endgültig erschüttert, wenn die  $2\sigma$ -Fehler nicht mehr überlappen, obwohl damit die statistische Wahrscheinlichkeit für Gleichzeitigkeit bereits auf unter 2% gesunken ist.



sich in einer übermäßigen Streuung der C14-Alter an sich gleichaltriger Proben niederschlägt. Zugleich wird damit der Vorrang der Geschichtswissenschaft bei der Beurteilung der Gleichaltrigkeit anerkannt.

Die allgemein übliche Interpretation möchte dieses Dilemma allerdings ins Positive wenden: Mit der Auswertung mehrerer Proben aus demselben archäologischen Zusammenhang könne man ein zuverlässigeres Datum erhalten, als wenn man nur eine Probe auswerte. Damit wäre die Weiterverarbeitung genuin unzuverlässiger Daten zu einem teilweise als hochzuverlässig dokumentierten Datum zwar legitimiert, aber im wörtlichen Sinne noch längst nicht legal.

Anwender der »komparativ-typologischen« Methode wären zutiefst beunruhigt, wenn das Merkmal, dessen Ausprägung zur Einordnung in eine der zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen dient, so außerordentlich streuen würde wie C14-Daten es im allgemeinen tun. Auf der anderen Seite sollen die Merkmalsausprägungen verschiedener Zeitstufen so deutlich voneinander verschieden sein, daß ein gewisses Schwanken nicht auf Kosten der Signifikanz gehen muß.

Für die C14-Methode gelten solche Überlegungen nicht. Gleichaltrige Proben müssen nach Ausübung aller gängigen Korrekturmöglichkeiten statistisch signifikant dasselbe C14-Alter darstellen – oder mit den Prämissen der C14-Methode ist etwas nicht in Ordnung. Wie hilflos die streuenden C14-Werte letztlich gehandhabt werden, wird in Bild 3.2 dargestellt. Daß die Kriterien, wann einzelne C14-Daten noch als »gleichzeitig« angesehen werden dürfen, so lasch gehandhabt werden, liegt nicht an der Gleichgültigkeit der Wissenschaftler, sondern an ihrer Not, aus den vorliegenden Daten etwas herauszumessen zu müssen.

Am Ende der Auswertungsmühle für einen Satz an C14-Daten für ein spezielles, zeitlich begrenztes Ereignis stehen seriös erscheinende Angaben wie z.B. »4000 ± 40 Jahren BP (kalibriert)«. Solche Angabe werden in aller Regel aus mehreren Proben gewonnen, die im paarweisen Vergleich als disparat bzw. im statistischen Test auf Gleichzeitigkeit als hochwahrscheinlich zeitlich auseinanderliegend charakterisiert werden müssen.

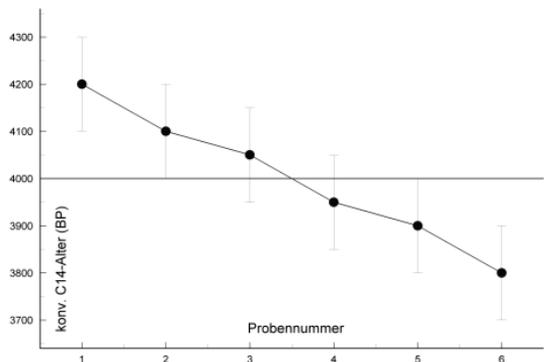
Das Ergebnis eines solchen statistischen Tests wird beispielsweise als »Irrtumswahrscheinlichkeit hinsichtlich der tatsächlichen Gleichzeitigkeit der Proben« angegeben und in der Regel mit 1 bis 5% beziffert. Eine solche Irrtumswahrscheinlichkeit wäre sicher akzeptabel, wenn sie sich auf das beziehen würde, was der Historiker erwartet: Daß man sich möglichst nicht irren möge bei der Voraussetzung, gleichaltrige Proben verwendet zu haben – sonst könnte man mit den Mitteln der Statistik radiometrisch ungleichaltrige

### 3.3 Künstlich erstellter Mittelwert

Ein derartiges Ensemble aus Proben, die archäologisch für gleichzeitig befunden wurden, ist nach herkömmlicher Auswertungsgepflogenheit der C14-Gemeinde für ein Datum »4.000 ± 40 Jahre BP« gut. Insbesondere weil die »2/3 Regel« gilt, nach der mindestens 2/3 der Werte mit ihrem Fehlerbalken den gemeinsamen Mittelwert einschließen (vgl. Kapitel 7.6) sollen. Die 4.000 Jahre entsprechen dem arithmetischen Mittel aus den 6 Meßwerten und die ±40 Jahre folgen (als unmittelbar gegebene »Erhöhung« der Sicherheit über den Mittelwert) aus der Formel für die resultierende neue mittlere Fehlerbreite  $100/\sqrt{6} \approx 40$ . Eine leidenschaftslosere Analyse würde feststellen, daß

- lediglich die Proben 2 und 3 sowie die Proben 4 und 5 überhaupt eine Wahrscheinlichkeit >50% aufweisen, hier paarweise gleichzeitig zu sein,
- und ein F-Test zur Beurteilung der zeitlichen Kohärenz ohnehin zu einer Wahrscheinlichkeit > 90% kommen würde, daß die eingeflossenen Daten nicht von tatsächlich gleichzeitigen Proben stammen.

Nur Wissenschaftler mit einem unerschütterten Vertrauen in die C14-Methode könnten hier zur Feststellung vorstoßen, daß die Wahrscheinlichkeit von annähernd 10%, sich beim Verwerfen der Gleichzeitigkeitshypothese zu irren, noch zu hoch sei, und man lieber bei der »bewährten« Annahme bleiben möchte, daß Gleichzeitigkeit vorliege. Während herkömmlich auch die Proben 1 und 6 noch einen gewissen Beitrag zur Vertrauenswürdigkeit der Gleichzeitigkeitsaussage leisten – ihre 2σ-Fehler stoßen schließlich noch aneinander (dazu Bild 3.2) – sind diese in der paarweisen Betrachtung nahezu völlig sicher (> 98%) als ungleichzeitig zu betrachten. Die restlichen Vergleiche lassen mit Wahrscheinlichkeiten grundsätzlich <30% für Gleichzeitigkeit ebenfalls keine weiteren vertrauenerweckenden Schlüsse zu. Eine unvoreingenommene Beurteilung der vorliegenden Daten wird darauf abstellen, daß wahrscheinlich zwei verschiedene Ereignisse vorliegen, die in der Größenordnung von 200 bis 300 Jahren auseinander liegen und einzeln nur mit einer Genauigkeit von kaum weniger als ±100 Jahren bestimmt werden können. Es sollte deutlich werden, daß von derart gewonnenen Altersangaben kaum je eine höhere Qualität zu erwarten ist, als in diesem Fall auseinandergesetzt. Insbesondere niedrige Fehlerbreiten für abgeleitete Mittelwerte sollen nicht darüber hinwegtäuschen, daß Ensembles meistens gar nicht in dieser Weise bearbeitet werden dürfen und folglich ohne C14-Datum bleiben müßten.



Proben gleichaltrig machen und mit dem dazugehörigen Mittelwert gehörige Verwirrung stiften. Ganz im Gegensatz zum Historiker möchte sich ein C14-Labor aber nur darin nicht irren, aus Versehen doch einmal ein Ergebnis aus tatsächlich gleichaltrigen Proben zu verwerfen. Mit anderen Worten: Das Labor akzeptiert, daß von 100 veröffentlichten Daten bis zu 99 falsch sind, damit das eine richtige Datum, daß sich statistisch gesehen unter den 100 befinden muß, keineswegs unveröffentlicht bleibt.

Es ist für das Verständnis des schwelenden Zwistes zwischen C14-Wissenschaftlern und Historikern von entscheidender Bedeutung, diese extrem unterschiedlichen Voraussetzungen endlich zu erkennen. Der Historiker möchte möglichst wenig Zweifel an der Brauchbarkeit der C14-Daten haben. Der C14-Wissenschaftler hingegen möchte alle Daten veröffentlichen, für die nicht hundertprozentig nachgewiesen werden kann, daß sie unbrauchbar sind. Damit folgt, daß Historiker offenbar explizite Forderungen an die Genauigkeit der Meßwerte aufstellen müssen, um die unterschiedlichen Standards von Produzent und Nutznießer unmißverständlich abzugleichen.

Tatsächlich beruhen viel zu viele veröffentlichte C14-Daten auf Probenensembles, die (radiometrisch gesehen) mit mehr als 90%iger Wahrscheinlichkeit nicht aus gleichaltrigen Proben zusammengesetzt waren. Damit repräsentiert der angegebene Alterswert auf keinen Fall mehr den statistischen Mittelwert, wofür er aber ausgegeben bzw. als der er mangels Verständnis für die Feinheiten der Statistik verstanden wird (vergleiche auch [Dehling/van der Pflicht 1993; Vincent 1988; Ward/Wilson 1978; Thomas 1978; Doran/Hudson 1975; Long/Rippeteau 1974]).

Diese Illusion, ein tatsächlich gleiches Alter für die Proben vor sich zu haben, wird zusätzlich noch dadurch gesteigert, daß bei der (nunmehr unzulässigen) statistischen Mittelung eines solchen Ensembles mit beispielsweise 6 Proben (siehe Bild **3.3**) der angegebene summarische Fehler nur noch 40% des mittleren Fehlers der einzelnen Proben ausmacht und damit natürlich eine Genauigkeit vorspiegelt, die mit der Anzahl der berücksichtigten Proben auf beeindruckende Weise zunimmt und den erratischen Charakter der einzelnen Daten selber in den Hintergrund drängt.

Worauf ist dieses Dilemma zu stark streuender Daten zurückzuführen? Schließlich werden alle Daten aus den reinen C14-Messungen mehrfach probenspezifisch korrigiert – wegen zahlreicher »systematischer« Abweichungen einerseits und diverser physiko-chemischer Behandlungen andererseits (detaillierte Diskussion im Kapitel 8). Von der anschließenden Kalibrierung soll noch nicht die Rede sein, weil diese für alle Proben grundsätzlich gleich ist und gesondert betrachtet werden muß. Nach erfolgreich vorgenommenen

Korrekturen (ohne Kalibrierung) müßte der Test auf Gleichzeitigkeit bei archäologisch als gleichaltrig eingestuften Proben eine hohe Wahrscheinlichkeit für Gleichzeitigkeit erbringen. Und wenn dem so ist, dann darf auch der Mittelwert gebildet, der Fehler »eingeschrumpft« und das Ganze kalibriert werden. So wäre tatsächlich alles okay.

Wenn bei dem anschließend an sich vorgeschriebenen Test auf Gleichzeitigkeit beispielsweise von einer »Irrtumswahrscheinlichkeit größer 5%« gesprochen wird, dann ist damit nur gemeint, daß die Wahrscheinlichkeit, sich bei dem Verwerfen der Eingangsthese von der radiometrischen Gleichaltrigkeit zu irren, mindestens 5% beträgt. Wird aber 5% als maximale Wahrscheinlichkeit für einen solchen Irrtum zugelassen, dann gehen die Proben »durch«, selbst wenn sie mit 5.1% errechnet wurde. Das geht soweit, eine Irrtumswahrscheinlichkeit von < 1% zu verlangen, um auch wirklich ganz sicher sein zu können, hier nicht ein tatsächlich »sauberes«, in sich konsistent gleichaltriges Ensemble zu verwerfen.

Diese Toleranz mag in Soziologie, Psychologie, Wirtschaft etc. üblich sein, um gewisse Informationen aus dem vorliegenden Material extrahieren zu können. Im letztlich jahrgenaue archäologisch-historischen Zusammenhang ist sie dagegen vom Ansatz her verfehlt, zumal für C14-Daten alle zurückliegenden Fehlereinflüsse am Ende wieder korrigierbar sein sollen. Das ist von grundlegender Bedeutung, denn nur wenn C14-Daten konsequent korrigierbar sind, dann können sie auch sauber kalibriert werden. Ohne eine nach Durchführung aller Korrekturen gegebene radiometrische Gleichzeitigkeit historisch gleichaltriger Proben ist jede relative Chronologie in Frage gestellt und das Projekt »global gleiche Kalibrierung« – mit allen Folgen etwa für das »wigggle-matching« etc. – undurchführbar geworden.

Das unmittelbare Fazit lautet also: Es bleiben trotz diffizilster Korrekturen Abweichungen erheblichen Ausmaßes übrig. So können Proben aus gleichem archäologischen Kontext nicht verglichen werden, wenn man mit dem Historiker verlangt, daß hohe Sicherheit dafür bestehen möge, daß das Ergebnis aus dem Vergleich der C14-Daten mit seinem Befund übereinstimmen soll. Die Labors vergleichen diese aber trotzdem und haben am Ende eines Betriebsjahres tatsächlich nur eine hohe Sicherheit, auch die wenigen womöglich richtigen Ergebnisse dem Einsender nicht vorenthalten zu haben.

Eine der wenigen, die diesen für Historiker unakzeptablen Zusammenhang jemals unmißverständlich angesprochen haben, sind A. Long und B. Rippeau [1974, 210]. Deren Veröffentlichung von 1974 wurde zwar oftmals zitiert, aber nie in ausreichender Sorgfalt zur Kenntnis genommen. Vom rein statistischen Gesichtspunkt aus betrachtet ist ein unangemessen hoher Anteil der

veröffentlichten C14-Ergebnisse nicht-signifikant (ohne schon von der Kalibrierung gesprochen zu haben, wo zusätzliche und noch ernstere Probleme auftreten).

Signifikant im statistischen Sinne wäre nur das Nichtveröffentlichen der Ergebnisse. Damit wäre die Wahrscheinlichkeit, ein tatsächlich sauberes Ensemble irrtümlich verworfen zu haben, ausgesprochen niedrig! Long und Rippeau sagen nichts anderes, als daß im Sinne des sarkastischen Eingangszitats über die selektive Zurkenntnisnahme von C14-Daten durch die Historiker so gut wie alle C14-Daten allenfalls als Marginalien bzw. Fußnoten veröffentlicht werden dürften.

Einer der markantesten Hinweise auf die immanente Widersprüchlichkeit des C14-Datenkorpus besteht in der Unfähigkeit der C14-Gemeinde, eine verbindliche und zugleich integrierende Form der Veröffentlichung ihrer Daten zu etablieren. Während sich in dieser Hinsicht das 1959 gegründete »relativ obskur gebliebene« Journal *RADIOCARBON* trotz aller Bemühungen als eine »Enttäuschung« herausgestellt hat [Kra 1988, 119 u. 121], ist es zugleich nicht gelungen, die auf der ganzen Welt produzierten C14-Daten in eine einheitliche Datenbank einzuspeisen.

Kaum 10% dieser Daten wurden als Datenlisten einheitlich in *RADIOCARBON* veröffentlicht. Der Rest sei von den seinerzeit weltweit existierenden 129 Laboratorien möglicherweise ausschließlich den Einsendern der Proben zur Verfügung gestellt und von diesen in irgendeiner Form weiterverarbeitet worden. Der Grund dafür sei auch in der fehlenden Bereitschaft zu suchen, Zeit und Anstrengung in die Aufbereitung einer angemessenen Dokumentation zu investieren [Beck 1987, 491]. So existiert ein Konvolut von mehreren hunderttausend C14-Daten, die im Rahmen eines gültigen Simultanitätsprinzip für eine weltumspannende Chronologie wenigstens des Postglazials ausreichen müßten. Daß diese Chronologie aber nicht vorliegt, kann nur bedeuten, daß allzu viele C14-Daten zueinander im Widerspruch stehen und mithin nicht gemeinsam veröffentlicht werden können, ohne daß dies zu Tage treten würde.

### 3.3 Wie wirken sich die Probleme auf die Kalibrierung aus?

Nur der reguläre Mittelwert eines konsistenten Ensembles von C14-Daten darf einer Kalibrierung zugeführt werden. Kalibrierung ist also kein Allheilmittel, um aus einem suspekten Datum ein glaubwürdiges zu machen. Tatsächlich potenziert sich im Hinblick auf eine »Präzisionskalibrierung« (etwa mit Hilfe einer der Europäischen Eichenchronologien) das eben offengelegte

Dilemma, denn die Konstruktion dieser Kalibrierquellen beruht essentiell auf der Verwendung nicht-signifikanter C14-Daten.

Die Konstruktion der Baumringchronologien, die heutzutage zur C14-Kalibrierung verwendet werden, basierte ursprünglich durchweg auf dem Vergleich einzelner C14-Muster aus »schwimmenden« Baumringsequenzen mit einem großen, zusammenhängenden und als absolutdatiert ausgewiesenem Muster – der kalifornischen Bristlecone-Pine-Baumringchronologie (Kapitel 2.3 bis 2.5 und Bild 2.5). Die C14-Muster der Bristlecone-Pine-Chronologie setzten sich aus Werten zusammen, die im Detail jeweils nur mit geringer Wahrscheinlichkeit als radiometrisch synchron zu betrachten waren.

Wir verweisen an dieser Stelle erneut auf die nahe der Bissigkeit formulierten Stellungnahmen diverser Wissenschaftler zu den allfälligen Meßwertstreuungen, in welche Muster hineingelesen wurden, die es nicht einmal wert gewesen wären, als Fußnoten veröffentlicht zu werden (vergleiche Kapitel 2.3 und Bild 8.7).

Damit waren aber alle Vorplazierungen innerhalb der Europäischen Eichenchronologien, die via transatlantischen Vergleichs mit Amerika erzielt worden waren, in hohem Grade als willkürlich anzusprechen. Die jeweilige dendrochronologische Verifizierung dieser als sicher geglaubten Vorplazierungen war umso fraglicher, je weniger Alternativen zusätzlich erprobt worden sind. Somit sind auch die statistischen Methoden der Dendrochronologie in Frage gestellt und den heute üblichen Kalibrierverfahren ein grundlegender systematischer Fehler zu unterstellen.

Die grundlegende Problematik der dendrochronologischen Kalibrierung von C14-Daten als letzter systematischer Anpassung erhellt sich im übrigen auch unmittelbar aus der ansonsten gegebenen Erfolglosigkeit von C14-Korrekturen<sup>10</sup>: Die Kalibrierbarkeit eines beliebigen C14-Wertes setzt die Gleichheit der C14-Daten für alle gleichaltrigen Proben voraus (Simultanitätsprinzip), also genau das, was durch die verbleibende signifikante Ungleichzeitigkeit an sich gleichaltriger Proben sozusagen tagtäglich widerlegt wird. Überflüssig zu betonen, daß es dieses Simultanitätsprinzip war, auf das die C14-Methode sich zur Beihilfe bei der Erstellung der (für sie selber ebenso dringlich benötigten) dendrochronologischen Kalibrierkurven offiziell abstützte.

---

<sup>10</sup> Unter C14-Korrekturen werden alle Maßnahmen verstanden, die unerwünschte, über den radioaktiven Zerfall hinausgehende Einflüsse auf die C14-Konzentration entweder im nachhinein physikalisch-chemisch beseitigen oder quantifizieren und aus dem Meßwert für die Aktivität herausrechnen. Solche Maßnahmen bleiben oftmals spekulativ und richten sich nicht selten nach bekannten Vordatierungen für die Probe. In Kapitel 8 wird die häufig unterschätzte Summe der sich nach und nach anhäufenden Korrekturfehler abgeschätzt.

Die Fehlerfortpflanzung bei dieser Erstellung der heute gültigen Kalibrierkurven kann also wie folgt rekonstruiert werden: Alle europäischen Eichenchronologien sind ursprünglich radiometrisch und deswegen statistisch hochunsicher an der kalifornischen Bristlecone-Pine-Chronologie ausgerichtet worden. Die Konstruktion dieser Chronologie selbst beruhte dagegen fundamental auf der unzulässigen Annahme, daß sich die C14-Konzentration in der Atmosphäre im wesentlichen nicht geändert hat (Details in Kapitel 2.3).

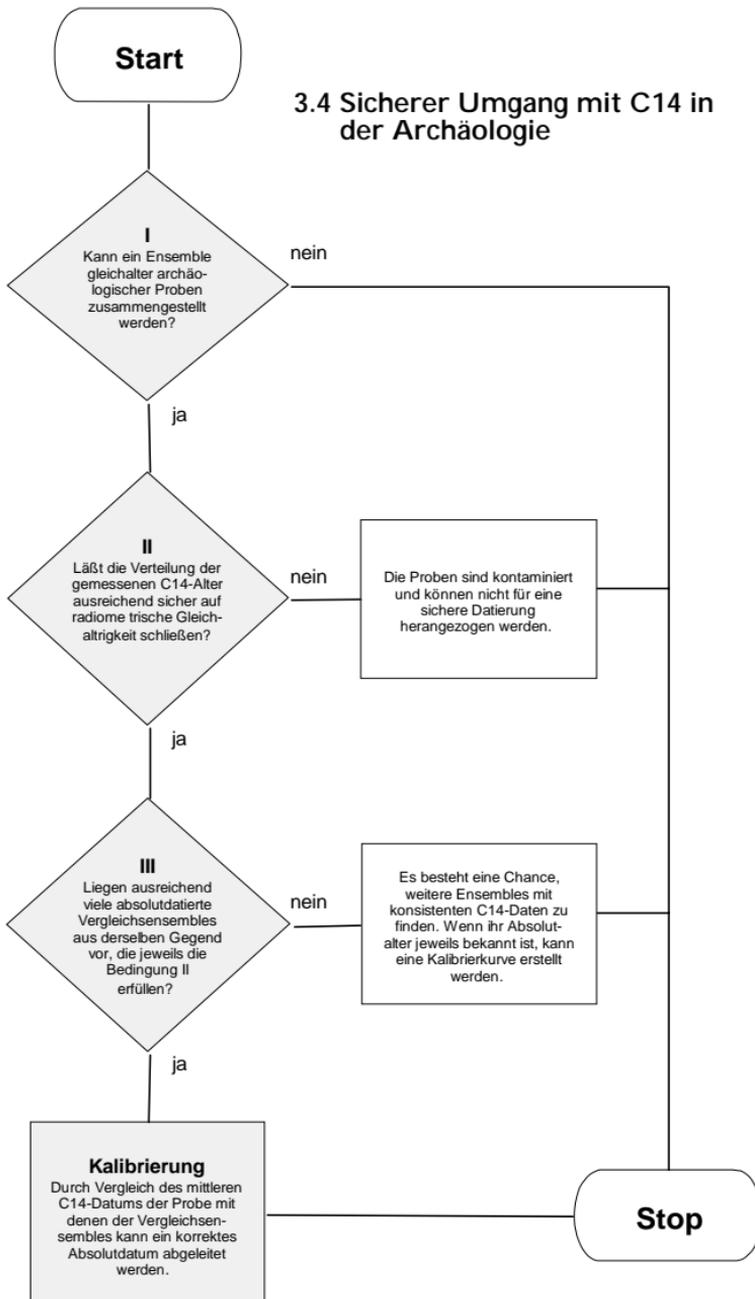
Am Ende hat der Geschichtswissenschaftler aber lediglich zwei Dinge zu beurteilen, und zwar nacheinander: Ist sein C14-Datum richtig korrigiert und, falls ja, ist die Vorlage, nach der er dieses Datum in ein Absolutdatum umrechnen kann, korrekt erstellt worden? Wie er das überprüfen kann, soll jetzt genauer dargelegt werden.

### 3.4 Unter welchen Bedingungen können Historiker sorgenfrei C14-Daten verwenden?

Der Historiker muß nach folgenden Regeln vorgehen (graphisch in Bild **3.4** dargestellt), wenn er für eine von ihm bestimmte Probe ein sicheres Absolutdatum erhalten will:

- H1. Er muß ein Ensemble archäologisch bzw. historisch sicher gleichaltriger Proben zusammenstellen, das auch das eigentlich zu datierende Stück enthält. Sicherzustellen, daß diese Stücke wirklich gleichaltrig sind, obliegt seiner fachlichen Kompetenz. Nur damit bekommt er eine Prüfmöglichkeit, ob die kommenden C14-Datierungen vertrauenswürdig sind. Bei zu großer Streuung ist der Versuch einer zeitlichen Zuordnung mit Hilfe von C14-Daten schon gescheitert.
- H2. Das C14-Labor hat Dreierlei durchzuführen:
- Die Probenbehandlung zur Korrektur aller zurückliegenden unerwünschten Einflüsse auf die zu messende C14-Konzentration.
  - Die Messung der C14-Aktivität der Proben.
  - Die statistische Auswertung der Meßergebnisse unter der Nullhypothese »Die Proben sind ungleichzeitig«, wodurch nur Daten weiterverarbeitet werden, die statistisch zuverlässig sind.
- H3. Die Umwandlung des auf diesem Wege erhaltenen und damit konsistenten C14-Alters in ein Absolutalter darf nur mit Hilfe von Vergleichsproben erfolgen, die ebenfalls gemäß Schritt H1 und H2 radiometrisch vermessen worden sind.

### 3.4 Sicherer Umgang mit C14 in der Archäologie



Diese Regeln fassen Selbstverständlichkeiten zusammen. Dennoch muß man sich fragen, ob jemals ein C14-Datum veröffentlicht worden wäre, wenn sie von Anfang an hätten berücksichtigt werden müssen. Das übliche Vorgehen folgt anderen Regeln und muß unter Zugrundelegung der eben beschriebenen Selbstverständlichkeiten – sozusagen der Sicherheitsstandards – als ungenügend bezeichnet werden:

- R1. Man stellt die Gleichaltrigkeit der Proben innerhalb eines Ensembles im Allgemeinen im sofortigen Vergleich mit bereits vorliegenden C14-Daten fest. Die Konsistenz der Daten bzw. der C14-Alter wird also unbesehen vorausgesetzt. Nach diesen Aktionen ist ein regulärer Konsistenztest (analog H1) sinnlos.
- R2. Das Labor unterzieht die C14-Daten von den vorbehandelten und vermessenen Proben einem statistischen Test unter der Nullhypothese, daß die Proben gleichzeitig sind, wodurch auch die statistisch unzuverlässigen Daten weiterverarbeitet werden.
- R3. Die Umwandlung dieser statistisch unzuverlässigen C14-Alter in Absolutalter erfolgt mit dendrochronologischen Maßstäben, die selber statistisch unzuverlässige Sequenzen von C14-Daten aufweisen, d.h. die den Regeln H1 und H2 (bzw. D1 und D2, siehe Kapitel 3.7) nicht genügen.

Wir erinnern daran, daß die tentativen Absolutdatierungen der heutzutage vorwiegend benutzten europäischen Baumringsequenzen über die Synchronisierung mit der Bristlecone-Pine-Chronologie (»wigggle-matching«) erfolgten, die ebenso aus unzuverlässigen C14-datierten Proben aufgebaut war.

Aufgrund der zuletzt beschriebenen realen Umstände besteht das Konvolut veröffentlichter – kalibrierter wie unkalibrierter – C14-Daten größtenteils aus nicht-signifikanten (andere sagen hier »falschen«) und aufgrund des unaufgeklärten statistischen Sachverhaltes sogar irreführenden Angaben. Die C14-Methode könnte sich hier nur retten, indem sie den Historikern grundsätzlich die Fähigkeit abstreiten würde, die historische Gleichaltrigkeit von Proben feststellen zu können, und den Spieß dadurch umdreht, daß sie nur Proben nimmt, die im statistischen Test zu signifikanter Gleichzeitigkeit anstatt zu einem gerade eben noch nicht ganz besonders signifikantem Irrtum führen. Das wäre angesichts des Vertrauens in die C14-Methode, das von den beteiligten Wissenschaftlern durch die Veröffentlichung der C14-Daten ja ein ums andere Mal demonstriert wird, nur konsequent. In den meisten Fällen könnten Historiker jedoch die Daten nicht akzeptieren und müßten sich letztlich von dieser Hilfswissenschaft trennen.

### 3.5 Dendrochronologie und C14-Methode – eine Heirat unter vorgehaltener Pistole

Nicht alle Dendrochronologen vertrauten sich jederzeit der C14-Methode in letzter Konsequenz an. Sie bemängelten sogar dieselben Fehler, auf die auch wir hier immer wieder hinweisen, insbesondere die Ungültigkeit des Simultanitätsprinzips. Es fehlte aber an einer konsequenten Verfolgung der entsprechenden Indizien, denn die Dendrochronologen hatten ihre eigenen Probleme und sahen sich zurecht nicht als Hüter ihres wissenschaftlichen Bruders (zur Wortwahl vgl. B. Huber [1966]).

1977 – in dem Jahrzehnt ungeheurer Anstrengung, die mitteleuropäischen Eichenchronologien aus sich heraus zu komplettieren – veröffentlichten G.W. Pearson et al. eine Kalibrierkurve, die auf einer schwimmenden Baumringchronologie Irischer Eichen beruhte und damit keine Absolutdaten geben konnte. Dafür sollte sie aber den Vorteil hoher Genauigkeit in der Vermessung der C14-Werte haben. Die Autoren stellten fest, daß Versuche zur Kalibrierung von C14-Daten anhand von Proben bekannten Alters immer wieder die Ungenauigkeit der üblichen Methoden gezeigt hätten, was letztlich auch zu einem Vertrauensverlust der C14-Methode bei den europäischen Prähistorikern geführt habe.

Diese schwimmende Eichenchronologie bildete den Ausgangspunkt für einen schweren Vorwurf an die Wissenschaftler, die die Bristlecone-Pine-Chronologie erstellt und ausgewertet hatten: Da die irischen Präzisionsmessungen einen glatten Verlauf der atmosphärischen C14-Konzentration nachzeichnete, mußte die in sich geschwungene Kalibrierkurve der Bristlecone-Pine-Chronologie auf falschen Meßdaten beruhen. Als einzige Alternative zu fehlerhaften Messungen bestünde die Möglichkeit, daß die Strömung des dem Wuchsort der Bristlecone Pines benachbarten Pazifik die C14-Konzentration lokal »verzerrt« habe. Zu der Überlegung, ob die ungleich näher liegende Irische See ähnliche Wirkungen bei ihren eigenen Proben gehabt haben könnte, sehen sich die Autoren nicht veranlaßt. Ihre Vorgehensweise tut darüberhinaus ein Übriges, jeden solchen Effekt auszumitteln und signalisiert damit blindes Vertrauen gegenüber dem Simultanitätsprinzip. Dieses bildete die Basis zum unmittelbaren Abgleich der C14-Daten jeglicher gefundener Hölzer, wodurch dendrochronologische Synchronismen nur noch in eng begrenzten Zeiträumen gesucht wurden. Ein »glatter« Verlauf der Kalibrierkurven ist so natürlich vorprogrammiert.

Pearson et al. beanspruchen zwar hohe Genauigkeit für die C14-Daten aus den jeweils bis zu 200 Gramm umfassenden Proben von ihrer Mastersequenz,

die seinerzeit aus etwa 300 Bäumen bestand und rund 1.000 Jahre umfaßte. Doch dem Artikel ist zu entnehmen, daß jeweils eine große Zahl von Sequenzen zu 200-Gramm-Proben zusammengefaßt wurden, ohne daß geprüft worden war, ob die C14-Daten denn untereinander – im Sinne der Regeln H1 bzw. D1 – ausreichend konsistent waren. Für den Fall unzureichender Konsistenz hätten die irischen Dendrochronologen auch die Art und Weise in Frage stellen müssen, mit der man zuvor die Suche nach möglichen Synchronlagen für einzelne Baumringsequenzen einzugrenzen versucht hatte. Dazu waren diese unter der Annahme genereller Gültigkeit des Simultanitätsprinzips vergesellschaftet worden (Bild **2.10**). Dieses Vorgehen erschien den Forschern so selbstverständlich, daß sie glauben, es nicht erwähnen zu müssen. Doch es widerspricht den in Kapitel 3.4 bzw. 3.7 aufgestellten Sicherheitsregeln.

Das Ergebnis bestand in einem fast linearen Zusammenhang zwischen C14-Alter und Baumringjahr – ganz im Gegensatz zu der dazu synchron laufenden Sequenz aus der Bristlecone-Pine-Chronologie (Bild **9.16**), die aus einer Abfolge von »wiggles« bestand und von den Iren auch als entsprechend suspekt eingeschätzt wurde, denn »jede Kalibrierung, die mehr als marginale Abweichungen [zu der irischen Kalibriergerade] aufweist, muß ultimativ als falsch bezeichnet werden« [Pearson et al. 1977, 28].

Der einzige nicht-zufällige Fehler, der überhaupt noch für eine Erklärung der Abweichungen in Frage käme, wäre das permanente Hochspülen von Wasserschichten an der amerikanischen Pazifikküste mit deutlich abweichender C14-Konzentration. In jedem Falle wäre die Benutzung des »wiggles-matching« wenigstens für den betrachteten Zeitraum unstatthaft, da mit entsprechend hohen unkorrigierbaren Fehlern in den Messungen zu rechnen wäre.

Wir haben bereits an anderer Stelle (Kapitel 2.4) die Rückbesinnung der irischen Dendrochronologen auf das »wiggles-matching« mit der Bristlecone-Pine-Chronologie angesprochen. Nicht höhere Einsicht in die Qualitäten dieser Chronologie oder in das Verfahren an sich war den Iren zuteilgeworden, sondern ein immer stärker wachsender Druck zur Komplettierung ihrer von der Zusammensetzung her stagnierenden Chronologie. Ohne Hilfe bei der Vordatierung war nichts mehr zu machen gewesen und so erkannte man am Ende doch »sufficient agreement« zu der Suess-Kalibrierung [Pearson et al. 1983, 180; Baillie 1995, 38]. Dem muß vorausgegangen sein, daß bestimmte Sequenzen aus den lokalen Mastern herausgenommen und/oder die Synchronismen neu bestimmt worden waren, um nun ebenfalls »wiggles« herausmessen zu können.

Nichtsdestotrotz mögen Dendrochronologen ihrem einstigen Steigbügelhalter dann nicht mehr die Stange halten, wenn es diesem methodisch an den Krügen geht. Sie wollen vielmehr einen autonomen Erfolg bei der mehrfa-

chen Replizierung ihrer Chronologien auf rein dendrochronologischer Basis in Anspruch nehmen und damit – was die Glaubwürdigkeit des Status-quo angeht – auf die C14-Methode nicht mehr angewiesen sein. Doch dieser Anspruch ist unerfüllbar: Wo C14 zur Vordatierung benutzt wurde, dort ist auch die methodische Unabhängigkeit ein für allemal dahin. Das ergibt sich direkt aus bestimmten methodischen Schwächen der Dendrochronologie, die wir im Folgenden herausarbeiten wollen.

### 3.6 Das Schweigen über Dilemmata

Die Dendrochronologen arbeiten methodisch-statistisch völlig anders als die C14-Forscher – im Prinzip genau entgegengesetzt. Die Dendrochronologen verlangen eine niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit für den Irrtum, dessen Vermeidung ihnen am wichtigsten ist: Dieser bestünde darin, eine falsche Synchronlage als richtig zu übernehmen. Man will natürlich möglichst gar keine oder wenigstens möglichst selten falsche Synchronlagen in die Chronologie einbauen. Würden sie so vorgehen, wie die C14-Wissenschaftler es tun, dann würden sie eine hohe Wahrscheinlichkeit für einen Irrtum zulassen. Allerdings fürchten diese sich vor einem ganz anderen Irrtum, nämlich dem, eine richtige Synchronlage als falsch zu verwerfen. Diese Unterschiede lassen sich direkt aus den verschiedenen Ansätzen zur Interpretation des vorliegenden Meßmaterials ableiten. Nehmen wir an, einem C14-Wissenschaftler und einem Dendrochronologen werden je zwei Proben mit der Aufgabe ausghändigt, ihre Gleichzeitigkeit zu beurteilen:

- Dem C14-Wissenschaftler stehen zur Lösung der Aufgabe grundsätzlich nur zwei Meßwerte zur Verfügung. Für ihn gelten die Proben solange als gleichaltrig, wie die statistische Wahrscheinlichkeit dafür noch größer 1 bis 5% ist. Ein Argument für diese »Toleranz« mag darin bestehen, daß in Anbetracht eines grundsätzlich möglichen Altersunterschiedes in der Größenordnung von rund 100.000 Jahren eine Differenz von womöglich nur wenigen hundert C14-Jahren nicht ins Gewicht fallen könne. Man kann auch sagen, daß er so wenig Meßmaterial zur Verfügung hat, daß er es bedauern würde, eine tatsächlich vorliegende Gleichzeitigkeit irrtümlicherweise nicht erkannt zu haben.
- Dem Dendrochronologen müssen zur Lösung der Aufgabe ungleich mehr Meßwerte zur Verfügung stehen. Wenn nicht eine der beiden Proben Jahrringe für den ganzen in Frage kommenden Zeitraum aufweist, kann er auch kein Urteil abgeben. Alle möglichen Synchronlagen zwischen den

beiden gemessenen Folgen von Baumringwuchswerten können nach bestimmten Kriterien untersucht und bewertet werden, ob ein besserer oder schlechterer Kandidat dafür vorliegt. Natürlich wählt er aus allen nur den sichersten Kandidaten aus. Schließlich hat er – im Gegensatz zu seinem Kollegen von der Radiometrie – genug zur Auswahl und er kann es sich deshalb leisten, nur wirklich aussichtsreiche Konstellationen in Betracht zu ziehen.

Nicht nur die Informationsbasis ist völlig verschieden, auch das sich daraus ergebende Dilemma der Dendrochronologie ist ein völlig anderes als das der C14-Methode. Die dendrochronologische Methode läßt in der Regel nicht nur einen, sondern sogar mehrere aussichtsreiche Kandidaten für die richtige Synchronlage zu [Eckstein/Bauch 1969, 246]. Während der C14-Wissenschaftler um ein Minimum an Vertrauenswürdigkeit seiner Meßwerte ringt, wäre es dem Dendrochronologen lieber, er hätte am Ende noch viel mehr vertrauensunwürdige Kandidaten, denn wonach soll er beurteilen, welcher von den Vertrauenswürdigen der Richtige ist? Je länger der abzugleichende Bereich ist, desto größer wird die Gefahr, sich für den auserwählten Kandidaten irrtümlich zu entscheiden, denn es ist bekannt, daß mit der »wahren« Synchronlage rechnerisch noch nicht einmal die niedrigste Irrtumswahrscheinlichkeit verbunden sein muß.

So deckte D.K. Yamaguchi [1986, 49] bei einem Versuch, nach allgemein üblichen statistischen Verfahren eine Douglas-Fichte in den zugehörigen lokalen Master einzubauen, eine inflationäre Anzahl von Synchronlagen auf, die nach herkömmlichen Kriterien höchstes Vertrauen genießen würden. Yamaguchi kritisierte darauf hin insbesondere die zur Erstellung der Irischen Eichenchronologie eingesetzten statistischen Verfahren, die die häufig gegebenen Autokorrelationen zwischen Baumringsequenzen nicht ausreichend berücksichtigen könnten und damit ihre Anwender der Gefahr von Fehlsynchronisationen aussetzen würden [Yamaguchi 1986, 51; vgl. auch Newgrosh 1991/92, 66]. Eine Ursache für die »Selbstbezüglichkeit« von Baumringsequenzen liegt in der Abhängigkeit der Ringdicken von der Sonnenaktivität. Ihre Periodizität – Stichwort: Sonnenfleckenzyklus [Bäsemann 1992, 106ff.; Hanover 1980, 756ff; Glock 1937] – prägt sich auch in die Abfolge der Ringdicken der Bäume ein.

Je größer das Gebiet ist, aus dem die dendrochronologisch zusammengefaßten Bäume stammen, und je individueller diese ohnehin im Wuchsverlauf sind, desto größer wird die Gefahr, daß die Sequenzen anhand dieses global hervorgerufenen periodischen Musters und nicht auf der Grundlage regional oder lokal typischen Wuchsverlaufs synchronisiert werden. Die Synchronisa-

tion periodischer Muster kann aber den gemeinsamen zeitlichen »Nullpunkt« nicht auffinden und muß in dieser Hinsicht eine »Scheinsynchronität« bleiben.

Die resultierende Mittelkurve wird den globalen Trend demnach umso stärker widerspiegeln, je individueller die zusammengefaßten Hölzer in ihrem Wachstum gewesen sind. Das mag ein Hinweis sein, daß der inflationär einsetzende Abgleich der europäischen Eichenchronologien zu Beginn der achtziger Jahre sich auf solche globalen Muster konzentrierte, die durch vorangegangenen exzessiven Gebrauch statistischer Vergleichskriterien in die Mittelkurven Einzug gehalten hatten. Solche Vergleiche sind per se wertlos und etwaige Aussagen über »jahrgenaue Übereinstimmungen« trügerisch, weil periodische Muster naturgemäß beliebig viele Synchronitäten erzeugen.

Zu Beginn des Jahrhunderts wollte der Begriff »Teleconnection« eine informelle Kopplung aller Bäume im Hinblick auf ihr Wachstum umschreiben. Er kann in abgewandeltem Sinne zur Bezeichnung der »kosmischen Triggerrung« des Baumwachstums herangezogen werden. Die Dendrochronologie ist aus der Idee heraus geboren, den zeitlichen Verlauf der Sonnenaktivität aus dem Wachstumsverlauf eines einzelnen Baumes ablesen zu können [Niemitz 1995, 292]. Es besteht die Gefahr, daß die modernen statistischen Verfahren der Dendrochronologie nicht ausreichend zwischen global auftretenden periodischen und regional typischen zufälligen Mustern trennen können und auf diesem Wege falsche Synchronitäten erzeugt haben.

Nicht nur wegen dieser Gefahr von Fehlsynchronisationen, sondern auch wegen der Möglichkeit zur radikalen Reduzierung des Arbeitsaufwandes, erscheint es nur zu verständlich, daß Vordatierungen gefragt sind. Diese sollen ohne viele Umwege dazu führen, nur einige aussichtsreiche und deswegen auch möglichst wenig irreführende zusätzliche Kandidaten für die Synchronlage zu erhalten. Letzten Endes sei immer die »einschlägige Erfahrung (relevant experience)« [Baillie 1995, 21] des Dendrochronologen für eine »visuell sichere Altersbestimmung« [Eckstein/Bauch 1969, 248; Leuschner 1994, 127; Schweingruber 1983, 86] ausschlaggebend. Diese kann sich aber erst wirklich sicher zur Geltung bringen, wenn der zu beurteilende Zeitraum zuvor stark genug eingegrenzt wurde. Darin liegt eines der stärksten Motive für den Einsatz der C14-Methode in der Dendrochronologie, in der die immanenten Methoden allein nicht zum Erfolg führen können.

In diesem Zusammenhang geben die mehrfach offengelegten Synchronisierungsfehler in der Größenordnung von einigen Jahrzehnten – um 10 bis 30 Jahre verschobene Neuplazierungen anlässlich der Veröffentlichung der Mitteleuropäischen Eichenchronologie [Hollstein 1980], rund 40 Jahre Diskrepanz

zwischen Hohenheimer und Göttinger Eichenchronologie vor 5.241 BC [Kromer et al. 1996, 607], rund 70 Jahre für den »Kirnsulzbachfehler« [Schmidt/Freundlich 1984, 234] – einigen Aufschluß über die Möglichkeit, mit Fehlern leben zu können, ohne daß es methodisch auffällig wird. Warum umfassen diese Korrekturen in aller Regel Jahrzehnte und nicht wenige Jahre einerseits oder sogar Jahrhunderte andererseits? Liegt es grundsätzlich daran, daß der Grad der Autokorrelation in den Baumringchronologien im Mittel alle paar Jahrzehnte eine aussichtsreiche Synchronlage vorspiegelt?

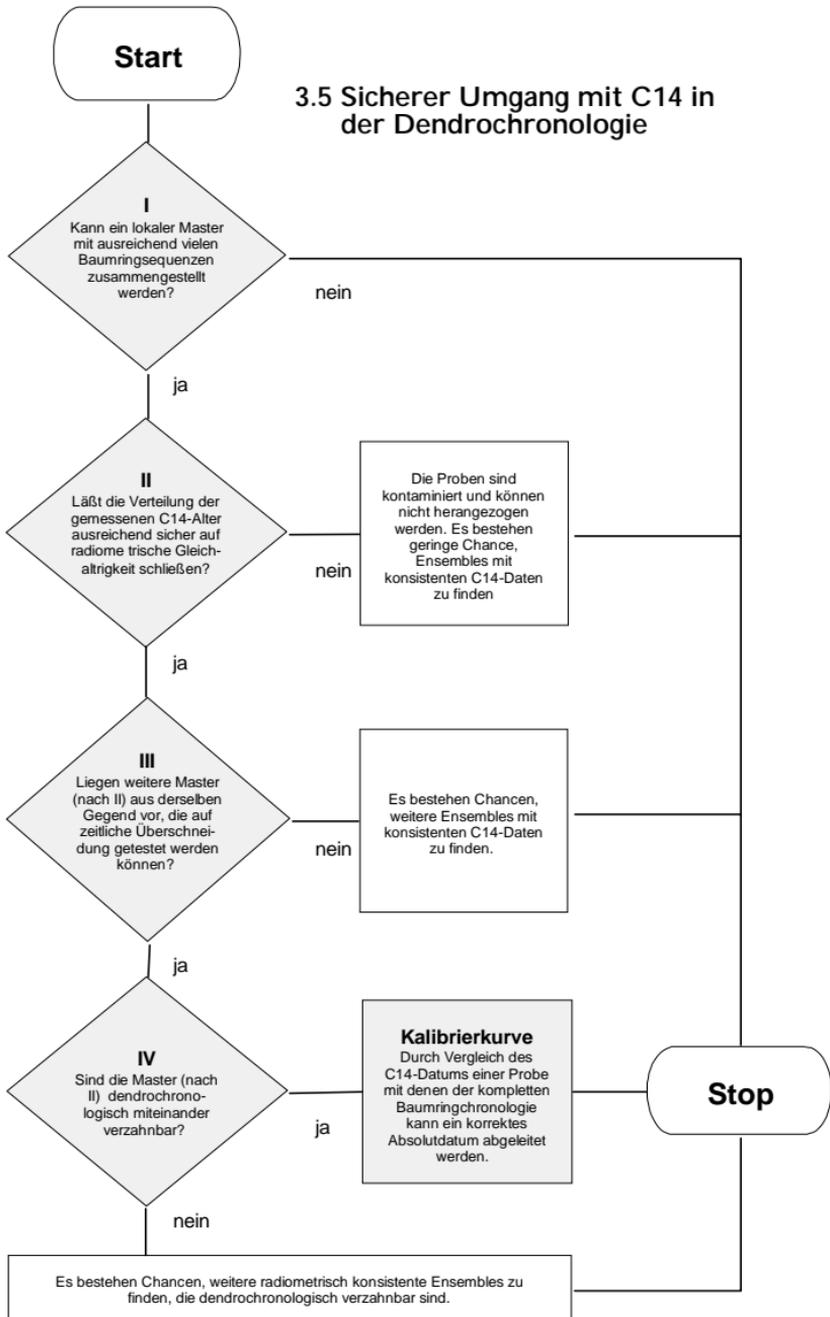
Es gibt keinen dendrochronologischen Indikator, der einen Irrtum um Jahrhunderte deutlicher anzeigt, als einen um ein einziges Jahr. Ein Fehler wiegt hier so schwer wie der Andere. Da besagte Synchronisierungsfehler meistens beim Vergleich mit Baumringchronologien aus zwangsläufig anderen Wuchsgebieten entdeckt werden, kommen offenbar Vergleichskriterien zur Anwendung, die einen jahrgenaue Abgleich im Einzelfall ohnehin nicht erlauben. Auf der anderen Seite ist völlig klar, warum die Korrektur nie in die Jahrhunderte gehen muß: Die vormaligen C14-Vordatierungen über das »wigggle-matching« mit der Bristlecone-Pine-Chronologie haben sämtliche europäischen Eichenchronologien in einen »chronologischen Korridor« gepfercht, in dem sich dann nur noch eine jahrzehntweise Korrektur abspielt.

Wir können aus unserer bisherigen Erfahrung mit der Untersuchung naturwissenschaftlich erarbeiteter Chronologien ableiten, daß für jede dieser Chronologien eine methodische Unzulänglichkeit existiert, die es unmöglich macht, ohne externe Hilfe ans Ziel – also Lückenlosigkeit und prinzipielle Jahrgenauigkeit – zu kommen. Das allein ist kein Anlaß zur Besorgnis. Es müssen nur die Spielregeln formuliert sein, nach denen Sicherheit bei der Inanspruchnahme externer Hilfe herrscht. Diese Spielregeln wollen wir im nächsten Kapitel für die Verwendung von C14-Daten durch die Dendrochronologie aufstellen.

### 3.7 Wann können Dendrochronologen sorgenfrei C14-Daten verwenden?

Ein Dendrochronologe steht ursprünglich vor derselben Aufgabe wie ein Historiker: Er soll eine Chronologie von Ereignissen für eine bestimmte Region aufstellen. In seinem Fall geht es um die jährliche Abfolge von Baumringwuchswerten für einen geographischen Bereich, in dem in etwa stets ein einheitliches Klima herrscht. Solange er seine Chronologie vorwiegend mit dendrochronologischen Hilfsmitteln und Methoden erstellt, gelten für ihn beim Umgang mit C14-Daten dieselben Sicherheitsregeln wie für den Historiker. Die Verwendung einzelner C14-Daten muß noch nicht bedeuten, daß er

### 3.5 Sicherer Umgang mit C14 in der Dendrochronologie



sich von der C14-Methode abhängig macht, oder daß er im Extremfall sogar C14-Chronologie betreibt. Es kommt nur darauf an, daß die von ihm verwendeten C14-Daten korrekt erzeugt und verwendet wurden. Der Dendrochronologe setzt C14-Daten ein, wenn er Folgendes bestimmen oder überprüfen will:

- die mögliche Zusammengehörigkeit einzelner Hölzer,
- die Zugehörigkeit eines einzelnen Holzes zu einer vorhandenen und schon mehrfach belegten Sequenz,
- die Synchronität zwischen zwei gut belegten Sequenzen, die nicht mehr aus demselben geographischen Bereich stammen.

Im Grunde setzt er C14-Daten ein, wenn er vordatieren will, wenn er also die Zahl der zu überprüfenden Deckungslagen nachhaltig einschränken will. Da immer wieder dendrochronologische Synchronisationsfehler in der Größenordnung einiger Jahrzehnte korrigiert werden, müssen befriedigende Deckungslagen ganz offenbar in etwa in diesem zeitlichen Abstand existieren. So bekommen wir einen Anhaltspunkt, wie genau die Vordatierung im Falle der Dendrochronologie immer wieder zu sein hat, um die Gefahr von Fehlsynchronisationen gering zu halten.

Der Dendrochronologe wird von alleine kaum je alle Voraussetzungen abklären können, die für eine entsprechende Genauigkeit der Hilfsdatierung erfüllt sein müssen. Aber er wird von seiner Seite aus wenigstens einige Bedingungen überprüfen, die für die gewünschte Inanspruchnahme der Hilfswissenschaft erfüllt sein müssen. Betrachten wir den Fall, daß er ein einzelnes Holz mit einer bereits vorhandenen, mehrfach belegten Sequenz vergleichen will. Was kann er tun, um von seiner Seite aus einige Zweifel an der gewünschten Genauigkeit auszuschließen (Bild **3.5**)?

D1. Er muß dem C14-Labor nicht nur einen Teil des zu datierenden Holzes übergeben, sondern zusätzlich etliche weitere gleichaltrige Baumringsequenzen. Nur so kann er klären lassen, ob das C14-Datum seiner Probe überhaupt vertrauenswürdig ist. Ist die Abweichung von der Normalverteilung zu groß – und es liegt an ihm zu beurteilen, was »zu groß« ist –, dann ist der Versuch der zeitlichen Zuordnung des Holzes mit Hilfe der C14-Methode bereits an diesem Punkt gescheitert.

D2. Auch die Sequenz, mit der er sein Holz dendrochronologisch vergleichen will, muß er wie unter D1 beschrieben untersuchen lassen. Dabei ist sogar die komplette Sequenz auf eine statistisch signifikante radiometrische Gleichzeitigkeit aller beteiligten und voraussetzungsgemäß je-

weils gleichaltrigen Ringe (bzw. kurzen Ringsequenzen) zu untersuchen. Erst dann kann er eine korrekte Prüfung auf radiometrische Synchronität zwischen seiner mehrfach belegten Sequenz einerseits und seiner Probe andererseits durchführen.

- D3. Beide Voraussetzungen D1 und D2 müssen erfüllt sein, anderenfalls sind die Proben entweder kontaminiert oder haben zu Wuchszeiten trotz gleichzeitiger Ausbildung des Jahrringes unterschiedliche Mengen an C14 aufgenommen. Wenn die beiden unter D1 und D2 genannten Bedingungen erfüllt sind, darf mit Hilfe der C14-Daten über eine Gleichaltrigkeit bzw. Synchronität entschieden werden. (Streng genommen müssen auch bei der vorzudatierenden Probe mehrere C14-Daten von unterschiedlichen Bereichen erstellt werden, da ein einziges C14-Datum wegen der möglichen Mehrdeutigkeit infolge des schwankenden C14-Konzentrationsverlaufs nicht ausreicht.)

Vor die Aufgabe gestellt, die Voraussetzungen für eine sichere Vordatierung mit Hilfe der C14-Methode zu überprüfen, muß der Dendrochronologe feststellen, daß er die ganze Datierungsarbeit ohne Verwendung auch nur eines C14-Datums zu leisten hätte. C14-Daten kann er nämlich nur für den Vergleich bereits existierender lokaler Master, nicht aber für den Vergleich einzelner Baumringsequenzen heranziehen, weil er schließlich sicher gehen will, daß die C14-Daten »sauber« sind, und das läßt sich nur anhand einer größeren Menge von C14-Daten gleichaltriger (und das heißt hier: dendrochronologisch synchronisierter) Proben nachweisen. Will er die Vergleichbarkeit von C14-Daten in seiner Region grundsätzlich abklären, so muß er sogar zuvor die lokalen Master dendrochronologisch synchronisiert haben, um sicher in der Anwendung des Simultanitätsprinzips sein zu können. Dann wäre er aber bereits an dem Ziel, zu dessen Erreichen er ursprünglich die C14-Methode einspannen wollte.

Nur solange Hölzer mit dendrochronologischen Mitteln ausreichend sicher datierbar sind, kann parallel dazu auch die Vertrauenswürdigkeit der entsprechenden C14-Daten überprüft werden, ohne daß C14 Einfluß auf die Datierung nehmen muß. Wenn die Dendrochronologie das leisten kann, was sie verspricht (nämlich insbesondere die methodische Unabhängigkeit von der C14-Methode), dann dürfte die C14-Methode für die Erstellung einer regionalen Baumringchronologie gar nicht in Anspruch genommen werden: Diese wäre in dem Moment bereits fertig, ab dem eine Anwendung der C14-Methode freigegeben werden könnte.

Wo also zur C14-Methode gegriffen wird, um sich bei der Datierung helfen zu lassen, da konnten ihre Voraussetzungen nicht überprüft, sondern mußten blindlings geglaubt werden. Die Tatsache umfassendster Anwendung der C14-Methode bei der Erstellung regionaler Baumringchronologien ist also mit dem konsequenten Verzicht auf die Überprüfung ihrer Anwendbarkeit verbunden. Dafür kann es nur einen Grund geben: Die Unfähigkeit, aus eigener Kraft umfassende Baumringchronologien zu erstellen.

Sobald ein Dendrochronologe zum Zwecke der Eingrenzung der zu überprüfenden Deckungslagen zur C14-Methode greift, verläßt er seine eigene methodische Basis. Was nützt hinterher der Verweis auf statistische Signifikanz der im vorgegebenen Intervall erarbeiteten Synchronität, wenn etliche weitere Kandidaten infolge der Vordatierung gar nicht erfaßt werden, welche aber nach rein dendrochronologischen Maßstäben dieselbe Aufmerksamkeit verdienen, wie die durch die Vordatierung selektierte Synchronität. Hinter der sogenannten »temporären Inanspruchnahme einer Hilfswissenschaft«, von der die Dendrochronologie in diesem Zusammenhang gerne spricht, verbirgt sich also ein kompletter Methodenwechsel: Es wird – ohne C14 – entweder auf der Basis dendrochronologischer oder – mit C14 – auf der Basis radiometrischer Methoden synchronisiert.

So ruppig diese Aussage erscheinen mag, so ergibt sie sich doch zwingend aus der Forderung, daß für die Verwendung von C14 zur Vordatierung auch nachzuweisen war, daß die C14-Methode in dem angestammten Arbeitsgebiet der Dendrochronologie gemäß ihrer grundlegenden Prämissen funktioniert. Das ist keine übertriebene Forderung angesichts der Probleme, die immer wieder ans Tageslicht kommen. Daß radiometrisch vordatierte Sequenzen später eine zusätzliche dendrochronologische Behandlung erfahren, ändert nichts an dem ursprünglichen Grund für den Einsatz der C14-Methode: Die unzureichende Signifikanz der dendrochronologischen Methode und/oder das Übermaß an zu überprüfenden Deckungslagen. Dieses Signifikanzproblem wird nicht dadurch besser, daß eine relativ beste Signifikanz plus dendrochronologischer Erfahrung ins Feld geführt wird – hätten diese doch ohne C14 schlichtweg nicht ausgereicht.

An dieser Stelle offenbart sich ein weiteres Dilemma der Dendrochronologie. Es ist im Rahmen ihrer Methode zwar möglich, die Korrigierbarkeit der C14-Daten in lokalen Mastern zu verifizieren (und das u.U. deutlich sicherer, als durch andere archäologische Funde). Dasselbe kann aber nicht in vergleichbarer Strenge für die überregionale Gültigkeit des Simultanitätsprinzips erreicht werden. Und zwar deshalb nicht, weil die Vergleichskriterien der

Dendrochronologie die Herkunft der betrachteten Baumringsequenzen aus Wuchsgebieten mit einheitlichen klimatischen Voraussetzungen verlangen.

Diese Wuchsgebiete umfassen in Europa höchstens einige hundert Kilometer im Durchmesser. Während sich einzelne irische Eichen bis zu einem Abstand der Fundorte von 70 Kilometern korrelieren ließen [Smith 1972, A92], erhöhte sich dieser Abstand für den Vergleich von Stammlagen der Donau und des Oberen Mains um mehr als das Doppelte [Becker/Frenzel 1977, 46]. Lange und gut belegte »lokale Master« ließen sich dagegen generell über eine Entfernung von bis zu 300 Kilometer synchronisieren [Hollstein 1977, 16]. Überregionale Vergleiche wie etwa zwischen dem süd- und dem norddeutschen Raum zeigen jedoch, daß die verschiedenen Eichenholzchronologien nicht übertragbar<sup>11</sup> sind [Eckstein 1984, 40]. Die Dendrochronologie muß das Simultanitätsprinzip also weitgehend glauben, ohne es mit eigenen Mitteln substantiell überprüfen zu können [Pilcher et al. 1984, 151], solange sie nicht voneinander absolut unabhängig entstandene Absolutchronologien (statt lediglich schwimmender Chronologien) von verschiedenen Orten aufführen kann.

Wir erinnern daran, daß die ernsthafteste Attacke gegen das Simultanitätsprinzip von der Dendrochronologie selbst geführt wurde: Der Vergleich der Bristlecone-Pine-Chronologie mit dem neuseeländischen Kauri-Baum (vergleiche Bild 2.4) hatte nicht nur die Möglichkeit aufgeworfen, daß starke lokale Unterschiede der C14-Konzentration herrschen können, sondern daß zusätzlich die C14-Konzentration der Atmosphäre sich in einem Ungleichgewicht befindet und seit langem im Steigen begriffen ist. Allein angesichts dieser Ergebnisse hätten die europäischen Dendrochronologen auf jegliches »wigggle-matching« mit der Bristlecone-Pine-Chronologie verzichten müssen, bis die uneingeschränkte Gültigkeit des Simultanitätsprinzips nachgewiesen bzw. bis der Widerspruch zwischen Kalifornien und Neuseeland aus dem Weg geräumt gewesen wäre.

Zu diesem Schritt sah man sich offensichtlich nicht genötigt. Zur Errichtung lokaler wie überregionaler Master wurden vielmehr archäologische und/oder radiometrische Hinweise benutzt, wo und wie auch immer man sie bekam. Sie werden hier allerdings nicht als Hinweise betrachtet, sondern als

<sup>11</sup> Die Auswirkung extremer Dürre sowie extremer Feuchtigkeit auf die Ringbreiten wird als überregionale synchronistische Klammer gewertet und als »Weiserjahre« in den Ringsequenzen gesucht. Bezeichnenderweise wurde diesen Weiserjahren während der »visuellen« Ära, also vor der umfassenden Einführung statistischer Methoden in die Dendrochronologie, kein solcher Wert beigemessen wie in der nachfolgenden »statistischen« Ära. Selbst wenn visuell »grundverschiedene Ausschläge« [Huber 1968, 149] vorliegen, kann der Fall jetzt durch einen Vergleich von Wahrscheinlichkeiten (und mögen sie noch gering sein) mathematisch-statistisch entschieden werden.

»Evidenzen« interpretiert [etwa Baillie 1995, 28/33]. In Deutschland lehnte E. Hollstein die C14-Methode über weite Strecken ab und wertete historische »Evidenzen« aus, während etwa B. Becker von Anfang an auf C14 setzte, ohne für deren methodische Probleme besonderes Interesse zu zeigen. Das gleiche gilt unter dem Strich für die irischen Dendrochronologen und vor allem für C.W. Ferguson mit seiner Bristlecone-Pine-Chronologie. In allen Fällen griff die Nullhypothese »C14 wird schon richtig sein« in voller Konsequenz: Man hätte erst ganz sicher sein wollen, daß sie komplett falsch ist, bevor man dieses schöne Hilfsmittel aufgegeben hätte.

Die Regel H1 bzw. D1 (= notwendiger Nachweis der sauberen Korrektur des C14-Datums einer einzelnen Probe) rückt die Bedeutung der radiometrischen »Vorplazierung« einzelner Baumringsequenzen gegenüber der dendrochronologischen Methode zurecht: Ohne einen Satz gleichaltriger Baumringsequenzen kann die Korrektur der C14-Daten gar nicht verifiziert werden. Deshalb müssen die lokalen Master – insbesondere wenn sie nur wenige Jahrhunderte umfassen – ohne jegliche C14-Hilfsdatierung erstellt werden. Der Regel D3 zufolge können nur die lokalen Master zum radiometrischen Vergleich in Ansatz gebracht werden, die jeweils in sich radiometrisch signifikant gleichzeitig sind. Erst dadurch wird die Suche auch nach überregionalen Synchronitäten legitimiert.

Dabei bleibt immer noch die Frage zu beantworten, ob die C14-Konzentration nicht von Ort zu Ort geschwankt hat, wodurch die überregionale Synchronisierung bzw. das »wigggle-matching« grundsätzlich unzulässig werden würde. Mithin müßte die Dendrochronologie aus sich heraus überregional gültige Synchronismen nachweisen oder über vollkommen »C14-freie« Absolutchronologien verfügen, um eine ausreichende Grundlage für die Verifizierung des Simultanitätsprinzips zu schaffen.

Sinnlos ist das »wigggle-matching« in allen Fällen, in denen die zu synchronisierenden Master in sich zwar dendrochronologisch, nicht aber radiometrisch signifikant gleichzeitig sind. Jeder Vergleich von »wigggle«, die aus radiometrisch nicht-signifikantem Datenmaterial erzeugt wurden, ist wertlos und irreführend zugleich. Die Kritiken zur starken Streuung von C14-Daten für gleichaltrige Baumringe sind Legende (Bild 2.15). Eine solche Kritik darf nicht bei der Qualität der Messungen stehenbleiben, sie muß auch den Vergleich »mittlerer« Verläufe der C14-Konzentration – d.h. das »wigggle-matching« – in Frage stellen.

Wo von einer Übereinstimmung im C14-Verlauf zwischen zwei regional weit auseinanderliegenden Mastern erheblicher Länge (2.000 Jahre) von 3±5 Jahren berichtet wird [Pearson et al. 1983, 183], da müssen wir die Frage stellen,

auf welche Weise und unter Ansatz jeweils welcher Sequenzen innerhalb eines Masters bei welcher internen Streuung die »ermittelten« Verläufe entstanden sind – zumal in diesem Fall der eine Master zuvor aus dem Mustervergleich mit dem anderen entstanden ist!

»Wiggle-matching« kann nur »state-of-the-art« [Baillie 1995, 72] sein, solange die oben aufgeführten Regeln eingehalten werden. Auf die Vergangenheit bezogen möchten wir deshalb ganz klar festhalten: Die Menge an C14-Daten, die bei dendrochronologisch-statistischen Synchronisationsversuchen ohne Befolgung der oben aufgestellten Regeln benutzt wurde, bestimmt den Anteil dendrochronologischer Fehlsynchronisationen. Dieser Anteil ist demnach weitaus größer, als nach den verwegenen Äusserungen der Dendrochronologen zu vermuten wäre (vergleiche dazu den Schluß des Kapitels 2.8).

### 3.8 Zusammenfassung

Würden Historiker ihr Sicherheitsverlangen in statistische Termini münzen und als Schwelle für methodenfremde Datierungen formulieren, wären sie plötzlich wieder allein auf weiter Chronologieflur. Es steht uns an dieser Stelle nicht an, die methodeninternen Sicherheitsstandards der Geschichtswissenschaft dagegen abzuwägen.

Die C14-Wissenschaftler beherrschen die sogenannten systematischen Korrekturen der C14-Methode so schlecht, daß sie einen eigenen, jedoch bis zur Fahrlässigkeit strapazierten Standard entwickeln mußten, um noch mitreden zu können. Die meisten C14-Daten verdienen es allenfalls, als Fußnoten erwähnt zu werden. Damit gelangen wir an einen Punkt, an dem alle C14-Daten in Zweifel gezogen werden müssen. Die Grundlagen der Methode können nicht in Ordnung sein, wenn – wie beschrieben – so viele zweifelhafte Ergebnisse entstehen. Diese Schlußfolgerung gilt ebenso für die Kalibrierung, denn in die Erstellung der heute verwendeten dendrochronologischen Kalibrierkurven sind durch das jahrzehntelange Hin- und Herschieben radiometrisch »datierter« Baumringsequenzen alle Vorurteile eingeflossen, die aus dem seinerzeitigen Naturverständnis im Hinblick auf das »wahre« Aussehen einer C14-Kalibrierkurve abgeleitet werden konnten. Dies war möglich, weil letztlich nicht-signifikante Daten miteinander verglichen wurden, die – ob nun durch »kosmischen Schwung« oder durch »Polynome 6ten Grades« beherrscht – der gewünschten Tendenz hinterhergeschoben werden konnten.

Eine Prüfung der Zuverlässigkeit von C14-Daten fällt so nachteilig für die naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden aus, daß empfohlen werden muß, daß die Historiker diesen Methoden bestimmte Sicherheitsstandards

vorgeben müssen, wenn sie vor ungerechtfertigten Einflüssen sicher sein wollen. Dieses Kapitel stellte den Versuch dar, einige Stichworte für das Formulieren entsprechender Stichworte zu liefern

## Das Credo des Aktualismus...

»Glaubt (der angehende Geologe) fest an die Ähnlichkeit oder Gleichheit des alten und des jetzigen Systems der irdischen Veränderungen, so wird er jede über die Ursachen der täglichen Wirksamkeit gesammelte Tatsache als einen Schlüssel zur Erläuterung irgend eines Geheimnisses der Vergangenheit ansehen.« [Charles Lyell 1830]

... und was zum Ausgang des 20. Jahrhunderts davon übrig geblieben ist:

»Da selbst die kleinsten Schwankungen anwachsen und dadurch die gesamte Struktur verändern können, ist das persönliche Handeln nicht zur Bedeutungslosigkeit verurteilt. Das ist aber andererseits auch bedrohlich, da nun in unserer Welt die Sicherheit von stabilen, dauerhaften Regeln für immer dahin ist.« [Ilya Prigogine 1985]

### 4.1 Die naturphilosophischen Wurzeln der C14-Methode

Die Idee des Aktualismus wurde ursprünglich mittels eines Beweises untermauert, der durch die Widerlegung einer Schlußfolgerung aus der gegenteiligen Annahme geführt wurde: Die Bewohner der Erde könnten unter veränderlichen Bedingungen kaum überleben und keinesfalls sich entwickeln. Da aber die Erde auf vielfältigste Weise belebt sei, dürfe davon ausgegangen werden, daß die Erde ein Ort friedlichen Lebens und stetiger Entwicklung sei. Charles Darwin fand darin ein zentrales Argument für seine Theorie der Evolution, nach der die Entwicklung der Arten umso weniger unwahrscheinlich sei, in je kleineren Schritten und umso ungestörter diese sich vollziehen könne. (Für eine Erörterung des Begriffs »Aktualismus« vergleiche Huggett [1990, 45])

Hinter dem »Fundamentalprinzip«, mit dessen Formulierung die Ära der C14-Datierung eingeläutet wurde, steckte die geballte Kraft dieses Widerspruchsbeweises, nach dem eine gegenteilige Annahme mit einer Bedrohung für die Lebewesen auf der Erde in Verbindung gebracht wurde und deswegen überhaupt nicht in Frage kam. Das Tempo ihrer Verbreitung und das fast völlige Ausbleiben von Kritik in dem ersten Jahrzehnt ihrer Existenz ist ohne Berücksichtigung dieser Ausgangssituation nicht wirklich zu verstehen.

## 4. Autopsie – Todesursachen einer Methode

### 4.1 Die C14-Methode ist ein Kind des 19. Jahrhunderts

Von der ersten Minute an bestimmte das Wunschdenken der Naturwissenschaftler und Historiker die Datierung archäologischer Proben mit der C14-Methode. Ansätze zur kritischen Hinterfragung der C14-Methode, die sich zum Beispiel aus widersprüchlichen Datierungen ergaben, erstickten regelmäßig im Keim, da ihre zentralen Voraussetzungen von der Debatte niemals erreicht wurden. Diese Voraussetzungen legen Zeugnis ab von einem Vorurteil wahrhaft historischen Ausmaßes: Seit je und zugleich überall auf der Erde sollen sich die Naturkräfte so ausgewirkt haben, wie wir es hier in diesem Augenblick zu erkennen vermögen.

Diesem Konzept des »Aktualismus« zufolge genügt die Kenntnis der heute beobachtbaren Naturkräfte, um den Ablauf sämtlicher Epochen der Erdgeschichte nachvollziehen und erklären zu können. Die damit verbundene Idee, daß sich angesichts einer zweifellos friedfertigen Natur allerorten seit langem schon zeitlich konstante Zustände eingestellt haben müssen, hat die Naturgeschichte der letzten 100 Jahre maßgeblich bestimmt.

So fundamental falsch, wie sich diese Prämisse mittlerweile erwiesen hat, so abwegig ist auch der Gedanke, mit der C14-Methode zu verlässlichen Absolutdaten kommen zu können. Die Naturgeschichte hat sich in den letzten 20 Jahren von diesem Vorurteil über die Dynamik der Naturkräfte zu lösen begonnen, das lange Zeit zuvor in aller Härte durchexerziert worden war. Sie hat es jedoch versäumt, ihr Naturbild nach unmittelbaren Folgen aus dieser Geisteshaltung zu durchforsten und diese gegebenenfalls einer vorbehaltlosen Kritik zu unterwerfen (siehe auch Textbox **4.1**).

Das Vorurteil von der immerwährenden Konstanz der Randbedingungen lockte erst die Erfinder der C14-Methode und dann auch ihre Anwender auf trügerischen Grund. Sie ist ohne jede Chance, sich durch Querverbindungen auf festerem Grund abzustützen. Das schwächt sie entscheidend im Vergleich zu anderen naturwissenschaftlich-chronologischen »Bruderdisziplinen«, insbesondere im Vergleich zur Dendrochronologie. Diese hat in Ansehung der Schwäche eigener Verfahren die C14-Methode zwar verwendet, kann sich jedoch unter Korrektur der Fehler, die daraus erwachsen sind, auf die eigenen Grundlagen zurückbesinnen und damit fortexistieren.

Wir haben in der Vergangenheit öfters die Empfehlung gehört, uns mehr auf die aktuellen Ergebnisse der C14-Methode zu konzentrieren, anstatt uns immer wieder mit Dingen und Aussagen aus den letzten 50 Jahren zu be-

schäftigen, die zudem schon längst überholt sein könnten. Wir kennen auch die Empfehlung von Seiten einiger C14-Labore, Daten, deren Entstehung länger als 5 Jahre zurückliegt, besser nicht zu verwenden, da die Technik sich in der Zwischenzeit geändert habe. Wir halten es dagegen für eine Selbstverständlichkeit, daß eine Wissenschaft, die chronologischen Aufschluß über die zurückliegenden 50.000 Jahre geben will, zugleich Rechenschaft über die 50 Jahre ihrer Existenz gibt (und ihre Vergangenheit, die länger als 5 Jahre zurückliegt, nicht laufend einfach abschneidet).

Es erscheinen derzeit immer mehr Bücher über aktuelle Ergebnisse der Naturgeschichte, in denen vor allem eine Sicht rasanten, teilweise katastrophischen Wandels in der Natur vermittelt wird. Kaum einer der Autoren versäumt es, im Sinne einer Selbstreflexion der Wissenschaft die Gründe zu analysieren, wie es etwa zu der »anti-katastrophistischen Verirrung« der zurückliegenden fast eineinhalb Jahrhunderte seit Darwin und Lyell gekommen sein könnte. (Natürlich gehörte es während der letzten rund 150 Jahren ebenfalls zum guten Ton, die »katastrophistischen Verirrungen« der Vorläufer von Darwin und Lyell aufzuzählen und gehörig zu geißeln.) Nichts anderes unternehmen wir hier zum Thema C14-Methode, wobei wir allerdings weitgehend darauf verzichtet haben, verbleibende Perspektiven für die C14-Methode zu skizzieren.

## 4.2 Der Sündenfall der Geschichtswissenschaft

Würde die Geschichtswissenschaft allgemein übliche Qualitätsansprüche auch an die Zuarbeit der C14-Methode stellen, dann entpuppten sich die Datierungsschwierigkeiten, die in 50 Jahren Praxis zu einer bedenklichen Normalität geronnen sind, als unannehmbare Widersprüche. Es wird seit Jahrzehnten nur darum gerungen, die Voraussetzungen der Anwendbarkeit der C14-Methode den bekannten Tatsachen so anzupassen, daß ihr globaler Gültigkeitsanspruch nicht gänzlich verloren geht. Dieses Ziel ist jedoch unerreichbar.

Die Geschichtswissenschaft würde demnach unmittelbar zu chronologischer Eigenständigkeit zurückkehren, wenn sie von der C14-Methode nur konsequent das einforderte, was diese selber einmal offiziell als Grundlage ihrer universellen Anwendbarkeit formuliert hat. Diese Eigenständigkeit war in Ansehung des Allheilmittels C14 voreilig aufgegeben worden und schien – auch während jahrzehntelanger Bedrückung durch Ergebnisse, die ihren eigenen diametral entgegenstanden – nicht zurückeroberbar zu sein.

In historischen Abhandlungen werden C14-Daten diskutiert, um sich keine Unterlassungssünde nachsagen lassen zu müssen. Auf Gebieten, in denen die eigenen Methoden zu substantiellen Ergebnissen führen, werden immer wieder inkonsistente C14-Daten »gesundinterpretiert«, ohne sie dann für den Aufbau oder die Stärkung einer Argumentation nutzen zu können. Viele Geschichtswissenschaftler sehen sich wahrlich nicht in der Rolle eines Nutznießers der C14-Methode, sondern in der ihres widerwillig-duldenden Pflegers.

Die größte chronologische Wunde hat sich die Geschichtswissenschaft freilich eigenhändig geschlagen, und zwar durch die Ausstellung eines Persilscheins namens »Kalibrierkurve«. Die Geschichtswissenschaft trägt in diesem Fall selber die Verantwortung, denn es war die Dendrochronologie als eine historische Teildisziplin, die 1969 zur Rettung der C14-Methode in letzter Minute eine Baumringsequenz präsentiert hatte, die eine »Korrigierbarkeit« von C14-Daten sicherstellen sollte. Insbesondere den Archäologen und Historikern waren diese aufgrund allfälliger Diskrepanzen zu allgemein anerkannten Daten zunehmend suspekt geworden.

Es ist bis auf den heutigen Tag unerkannt geblieben oder einfach übergegangen worden, daß die Konstruktion dieser Kalibrierkurve fundamental auf allen zweifelhaften C14-Prämissen beruhte, die es seinerzeit eigentlich dringendst zu überprüfen gegolten hätte. Es ist eine Illusion, von einer »unabhängig gewonnenen Baumringchronologie« zu sprechen. Diese Baumringsequenz, die damals rund 7.000 Jahre umfaßte, wäre allein mit den Methoden der Dendrochronologie niemals zustande gekommen und so erlagen ihre Akteure der Versuchung, sich mit der C14-Methode ans Ziel bringen zu lassen.

Mit der Dendrochronologie hatte die C14-Methode eine Bundesgenossin gewonnen, die sich die längste Zeit schützend vor sie stellen sollte, da ein Fallenlassen von C14 andererseits ein für allemal die Chance zunichte gemacht hätte, auch für Europa eine vollständige Baumringsequenz für das Postglazial abliefern zu können. Die Dendrochronologie stand zumindestens in Deutschland unter hohem Erfolgsdruck, diese in sie gesetzte Erwartung – nicht zuletzt wegen der Abhängigkeit von öffentlicher finanzieller Förderung – zu erfüllen.

Die Wunde, die sich die Dendrochronologie mit der fundamentalen Abstützung auf C14 selbst – und damit zugleich auch der gesamten Geschichtswissenschaft – zugefügt hatte, sollte im Laufe der nächsten 15 Jahre weitgehend unbemerkt von der wissenschaftlichen Öffentlichkeit immer stärker klaffen, stand doch die C14-Methode auch allen europäischen Baumringchronologien vom Anfang bis zum Ende ihrer Entstehung als einzige Geburtshelferin zur Seite (Bild **4.2**). Das unverzichtbare Vorplazieren »schwimmender«

## 4.2 Geständnisse in Edinburgh

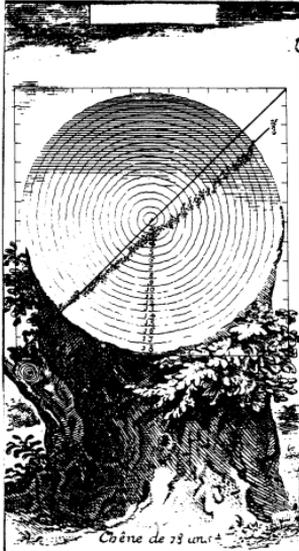
Das Bild zeigt das Cover des 1983 von B.S. Ottaway herausgegebenen Tagungsbandes »Archäologie, Dendrochronologie und die Kalibrierkurve für Radiokarbon« [Ottaway 1983]. Mit diesem Cover sollte die zeitlose Verbundenheit zwischen der C14-Methode und der Dendrochronologie symbolisiert werden. Zusätzlich – und so sicherlich nicht gewollt – gibt das Bild Aufschluß über die methodische Schwäche der Dendrochronologie bei der Abstützung auf die C14-Methode.

Der aufgeschnittene Baumstamm läßt das Prinzip der Aufeinanderfolge von Jahresringen erkennen. Ein Dendrochronologe müßte allerdings darauf hinweisen, daß die Ringbreiten so gleichförmig (»complacent«) sind, daß dieser Stamm für den Aufbau oder zur Erweiterung einer größeren zusammenhängenden Sequenz gar nicht in Frage käme, weil unter diesen Bedingungen sich keine unterschiedliche Signifikanz der in Frage kommenden Deckungslagen einstellen würde.

Aber ganz wertlos scheint der Stamm nun doch nicht zu sein, denn er wird als Bestandteil einer Art »Sonnenuhr« dargestellt. In diesem Fall kommt das Licht aber nicht von der Sonne, sondern von der Radioaktivität in ihm enthaltener C14-Atome. Diese Radioaktivität wirft eine Art »radiometrischen Schatten«

in den aufgeschnittenen Stamm, der mit einem »Ziffernblatt« verbunden ist, das sich als die übliche Form der Kalibrierkurve entpuppt:

*Archaeology  
Dendrochronology  
— and the —  
Radiocarbon Calibration Curve*



UNIVERSITY OF EDINBURGH  
DEPARTMENT OF ARCHAEOLOGY

- Senkrechte Teilung für das direkt gemessene C14-Alter eines jeden einzelnen Baumringes,
- waagerechte Teilung für das jeweilige Kalenderalter der vermessenen Baumringe und die
- Winkelhalbierende als Vergleichs- oder Normalmaß örtlich und zeitlich konstanter C14-Konzentration in der Atmosphäre.

Ganz folgt der radiometrische Schatten nun nicht dem Normalmaß, doch sein Verlauf ist diesem ausreichend ähnlich, um die Punktwolke über den Stamm hinaus nach oben rechts als Parallele zur Winkelhalbierenden zu extrapolieren. Dort (oben rechts) im Zifferblatt wartet an der »richtigen« Stelle in einem entsprechenden zeitlichen Abstand bereits die nächste Punktwolke eines anderen Stammes (der womöglich genauso nicht-signifikant ist wie der hier sichtbare), um den radiometrischen Schatten weiter in die Vergangenheit fortzusetzen. Mittels dieses Vergleichs radiometrischer Eigenschaften erscheint dieser nahezu exakt vordatiert. Jetzt muß die Datierung nur noch irgendwann dendrochronologisch verifiziert werden ...

Ringsequenzen sowie das Auffüllen der vielen »Lücken«, die dabei zwangsläufig entstanden, wurde fast ausschließlich durch das Synchronisieren ihrer C14-Werte mit denen der amerikanischen Sequenz ermöglicht, die im wesentlichen zwischen 1963 und 1965 erstellt worden war.

Auch der Theaterdonner der sogenannten »Zweiten Radiokarbonrevolution« in den frühen Siebzigern war lediglich ein Echo dieses Verbrüderungsaktes zwischen C14 und Dendrochronologie. Mit ihm war die europäische Bronze- und Jungsteinzeit mit der fragwürdigen Hilfe »naturwissenschaftlich abgesicherter« C14-Daten vor die entsprechenden Epochen Vorderasiens verbracht worden. Bis dahin waren sich Historiker immer einig gewesen, daß die entscheidenden Impulse für die Entwicklung der europäischen Kultur aus dem asiatischen bzw. vorderasiatischen Kulturraum gekommen waren. Die ob dieser Umkehrung von Ursache und Wirkung größtenteils entsetzten Vor- und Frühgeschichtler hätten gelassen bleiben können, wenn sie den unzulässigen Methodenwechsel der Dendrochronologie erkannt und diese darauf hin schleunigst zur Rechenschaft gezogen bzw. zurückgepiffen hätten.

### 4.3 Der Zirkelschluß zwischen Dendrochronologie und C14-Methode

Die Lage der C14-Nation war nach der Entdeckung entscheidender Fehler in ihren Prämissen ab 1958 immer verzweifelter geworden. Zur Rettung ihrer Disziplin mußten die C14-Wissenschaftler nun zeigen, daß Abweichungen zwischen gemessenem C14-Alter und dem wahren Absolutalter nicht ausufern und daß diese zugleich »korrigierbar« waren.

Das gelang ihnen mit der Hilfe amerikanischer Dendrochronologen, die sich mit der Chronologie der kalifornischen Borstenkiefer (Bristlecone Pine) beschäftigten. Bevor das aber geschehen konnte, mußte denselben Dendrochronologen mit C14-Daten erst einmal zur Synchronisierung der zugrundeliegenden Baumringsequenzen verholfen werden. Erst dadurch konnten die weiter zurückliegenden Zeiträume erobert werden, die im Rahmen rein dendrochronologischer Verfahren niemals erreicht worden wären. So konnte man aber schwimmende Baumringsequenzen nach Maßgabe ihrer C14-Daten vorplazieren und die Anordnung unter Vergleich der Ringwuchswerte dann nach relativ geringfügigen Korrekturen erfolgreich verifizieren. Dabei half insbesondere eine jeweils angemessene Kompensation von vermuteten Fehlringen, um die dendrochronologische Signifikanz der radiometrischen Vorplazierung zu stärken.

Die sanft zurechtgerückten C14-Werte galten damit als kalibriert und waren nunmehr unantastbar. Zu keiner Zeit kam den Wissenschaftlern die Idee,

daß sich die C14-Verhältnisse in der Atmosphäre über die Jahrtausende geändert haben könnten, obwohl seinerzeit eindeutige Hinweise vorlagen, daß die Atmosphäre sich nicht im C14-Gleichgewicht befunden, sondern vielmehr eine permanente Anreicherung mit C14 durchgemacht hatte. Damit wären C14-Alter nicht tendenziell 10% zu niedrig gewesen, wie am Ende allgemein erkannt wurde, sondern 50% zu hoch.

Die C14-Methode konnte sich 1970 durch diesen furiosen Zirkelschluß retten, da beide Seiten – die Dendrochronologie auf der einen und die C14-Methode auf der anderen – gleichermaßen Nutznießer waren und wenig Interesse an weitergehenden Fragen hatten. Diese blieben – von einer Ausnahme abgesehen (Kapitel 3.5) – auch in den nächsten 15 Jahren aus, während der deutsche und irische Dendrochronologen ihrerseits die Bristlecone-Pine-Chronologie als Vorbild für die Formierung ihrer Eichenchronologien verwendeten. Diese Neuauflage des ersten Zirkelschlusses bescherte der Geschichtswissenschaft die Zementierung von langen C14-Chronologien. Vielleicht gereicht es ihr zum Trost, daß vor allem eine historisch orientierte Untersuchung der C14-Methode diesen Zirkelschluß aufdecken konnte.

#### 4.4 Der Sündenfall der Naturwissenschaft

Es wäre niemals soweit gekommen, wenn erkannt worden wäre, auf welche Weise 1949 W.F. Libby das Vertrauen in die C14-Methode zu begründen versucht hatte. Hätte seinerzeit die Geschichtswissenschaft, die als Nutznießerin dieser Methode im Fokus der Aufmerksamkeit stand, ihre eigenen Maßstäbe bei der Beurteilung der von Libby präsentierten Ergebnisse angelegt, dann hätte sich C14 sogleich als Totgeburt erwiesen. Was Libby als Beweis einer Gleichförmigkeit der C14-Verhältnisse in Ort und Zeit, die für die Einsetzbarkeit der Methode zweifellos als unverzichtbar angesehen werden mußte, präsentiert hatte, war gar kein Beweis, sondern lediglich eine Art von Willenserklärung. Libby erklärte damit nämlich nur, daß er die fast hundertprozentige Widerlegung seiner Hypothese als Nichtwiderlegung auffassen wolle, aus dem einfachen Grunde, weil »fast 100%« eben nicht »ganz 100%« sind.

Die C14-Methode ist der Feuerprobe einer Ablehnung bis zum fast sicheren Beweis ihrer Richtigkeit niemals ausgesetzt gewesen. Im Gegenteil: Von Anfang an galten Maßstäbe wie für eine seit langem bewährte Theorie, deren Verfechter möglichen Einwänden in der Regel mit guten Argumenten und auch mit Erfolg – denn darin liegt das Wesen einer »bewährten Theorie« – entgegneten können. In solch einem Fall dürfen die Befürworter der bewährten Theorie mit gutem Recht höchste Sicherheit für den Fall verlangen,

daß sie diese bewährte Theorie tatsächlich zugunsten einer anderen Theorie aufgeben sollten. Man muß nicht K.R. Poppers Regeln zum richtigen Umgang mit einer wissenschaftlichen Theorie im Kopf haben, um erkennen zu können, daß bei der Verifizierung der C14-Methode regelrecht geschummelt wurde. Die Idee der C14-Methode war einfach zu schön, als daß sie falsch sein konnte!

Auch die Historiker haben sich der Illusion hingegeben, daß Libby seine Theorie bewiesen hatte. Ihre ablehnende Haltung wäre allerdings programmiert gewesen, wenn er den Fakten entsprechend zugegeben hätte, daß er lediglich vom Standpunkt des Verfechters einer bereits seit langem bewährten Theorie ins Feld führen konnte, daß er eine Widerlegung zu rund 95% als nicht ausreichend betrachten könne und deswegen an seiner eleganten Theorie festhalten wolle.

Hier liegt wieder ein Gutteil der Verantwortung bei der Geschichtswissenschaft, denn Libby rief an dieser Stelle den »von Grund auf bewährten« Aktualismus als Kronzeugen der Verteidigung in den Zeugenstand und wußte damit seinerzeit die Sentiments der Historiker grundsätzlich auf seiner Seite. Es wird die Historiker mit Sicherheit nicht unberührt lassen, sondern vielmehr ihre Ressentiments verstärken, daß seit dem Moment der Zusammenarbeit von C14-Methode und Dendrochronologie ironischerweise eindeutige Hinweise auf Naturprozesse vorliegen, die das Prinzip des Aktualismus zutiefst konterkarieren und damit das Gebäude der C14-Methode zum Einsturz bringen müssen.

#### 4.5 Das moderne Gesicht der C14-Methode

Die jährlichen Abdrücke einstiger C14-Konzentrationen, die in aufeinanderfolgenden Baumringen gemessen werden, machen dem Märchen vom Gleichgewicht zwischen Produktion und Zerfall des C14, das für den Fortbestand der Methode unverzichtbar wäre, den Garaus. Auf ein C14-Atom, das irgendwo auf der Erde zerfällt, kommt nicht ein in der Atmosphäre produziertes C14-Atom. Tatsächlich können um ein bis zwei Größenordnungen (Faktor 10 bis 100) mehr C14-Atome in der Atmosphäre produziert werden und ebenso viele durch Diffusion in ungesättigte nichtatmosphärische Reservoirs auch wieder verloren gehen. Das eine einzige radioaktiv zerfallende C14-Atom, das man durch Messungen detektieren kann, spielt dabei so gut wie keine Rolle (eine einfache Modellbetrachtung ist mit dem Kommentar zu Bild **4.3** gegeben).

### 4.3 Die Tücken der Halbwertszeit

Diese Sache mit der Halbwertszeit ist gar nicht so einfach. Müßten wir die Artikelüberschrift [TK-Aktuell 1/96] tatsächlich wörtlich nehmen, dann stünde die Menschheit binnen weniger Jahrzehnte vor Regalen, in denen ausschließlich Bücher mit überholtem Wissen stehen würden. Dem Autor ist nämlich nicht aufgefallen, daß er die »Zerfallsrate« des Wissens höher als seine »Produktionsrate« angesetzt hat. Eine Konkurrenz von exponentiellem Zuwachs und exponentiellem Zerfall des Wissens mündet entweder in konstanter Ignoranz (Zerfall > Zuwachs) oder in einen entsprechend flacher einsetzenden exponentiellen Wissenszuwachs (Zuwachs > Zerfall). Nur wenn beide Halbwertszeiten gleich groß wären, bliebe das Niveau des Wissens erhalten. Der Fall »C14« liegt einfacher. Die Produktion kann zwar schwanken, aber auf Dauer nicht unberentz zunehmen. Das verhindert schon die begrenzte Zahl von N14-Atomen, aus denen die C14-Atome erzeugt werden.

Rasante Entwicklung

# Halbwertszeit des Wissens

Alle fünf Jahre verdoppelt sich das Wissen der Menschheit.

Aber: Nach drei bis vier Jahren ist die Hälfte davon schon wieder überholt.

In einer Phase konstanter Produktion wird die »C14-Bibliothek« solange an- oder abschwollen, bis der Zerfall, der stets proportional zu der aktuell vorhandenen Menge ist, die Produktion gerade aufhebt – aber nur, solange auf anderem Wege nichts dazukommt oder verschwindet! Mit dem Modell »Buchbestand in einer Leihbibliothek« möchten wir die C14-Realität einmal auf anderem Wege beschreiben. In der folgenden Tabelle werden alle denkbaren Ursachen für die »Bestandsveränderung« in den beiden betrachteten »Bibliotheken« aufgelistet, in der linken Spalte die für das Modell »Bücherei«, in der rechten Spalte die vergleichbaren Vorgänge für die C14-Realität:

Bibliothek	Atmosphäre
Buchbestand	C14-Gehalt
Bücherwurmfraß	radioaktiver Zerfall des C14
Schriftstellerei	C14-Produktion
Diebstahl, Zensur	C14-Diffusion ⇔ in Ozeane etc.
Anschaffung, Schenkung	C14-Diffusion ⇐ aus Ozeanen etc.

Es ist naheliegend, daß die Abteilung »Schriftstellerei« so gut wie arbeitslos wäre, wenn sie immer nur Bücher verfassen müßte, um den Platz derjenigen Bücher zu besetzen, die dem Bücherwurmfraß zum Opfer gefallen sind. Es wäre auch reiner Zufall und nicht auf Dauer zu erwarten, wenn Kreativität, Anschaffungsetat und Schenkungen einerseits sowie Bücherwurmfraß, Diebstahl und Zensur andererseits sich in ihren Wirkungen gerade so kompensieren würden, daß der Buchbestand der Bibliothek konstant bliebe. Die Bestandsänderung in einer Bücherei folgt anderen Regeln. Ihr Bestand kann also sowohl erheblich zu-, als auch erheblich abnehmen.

Es ist aus allen publizierten Kalibrierkurven für C14 einwandfrei ersichtlich, daß innerhalb der C14-Bibliothek, die meßbar vom »Wurmfraß« befallen ist, Vorgänge von Produktion und Diffusion ablaufen, die – jeweils über kurze Zeiträume betrachtet – auf keinen Fall die Tendenz haben, diesen geradezu mickrigen Effekt zu kompensieren. Aber jeweils über längere Zeit betrachtet sollen sich diesen Kurven zufolge »Kreativität« (Produktion), »Anschaffung, Schenkung« (Zufluß) und »Diebstahl, Zensur« (Abfluß) gemeinsam merkwürdigerweise so auswirken, daß sie den »Fraß« (radioaktiver Zerfall) weitestgehend kompensieren.

Es war ein Irrtum mit Folgen, aus der aktuellen »Freßrate der Bücherwürmer« (Rate des radioaktiven Zerfalls) in der atmosphärischen »C14-Bibliothek« direkt auf die »Kreativität« der C14-Beschaffungsabteilung zurückzuschließen, nur um davon ausgehen zu können, daß der »Buchbestand« über einen Zeitraum von Tausenden von Jahren konstant oder jedenfalls nahezu konstant gewesen sei. Die These von der Konstanz des atmosphärischen Bestandes an C14 war verlockend, weil dann und nur dann ein gemessenes C14-Datum ohne weitere Kenntnisse in das Absolutalter umgerechnet werden konnte. Sie ist jedoch grundlegend falsch.

Der Gedanke einer Identität zwischen produzierter und weltweit zerfallender Menge, der zur Etablierung der C14-Methode notwendig gewesen war, hat mit den tatsächlichen Gegebenheiten nichts zu tun: Produktion von C14 in der Atmosphäre und Abwanderung des C14 aus ihr heraus bzw. in sie hinein sind drei voneinander völlig unabhängige Prozesse und regulieren die atmosphärische C14-Konzentration auf bislang unverstandene Weise. Der radioaktive Zerfall ist daneben ein unbedeutendes Regulativ. Die Betrachtung des C14-Alters als Annäherung des tatsächlichen Alters stellt einen fundamentalen Irrtum dar.

Ausgerechnet die Dendrochronologie verfügt über die entscheidenden Hinweise, daß eine unverfälschte Chronologie des atmosphärischen C14-Haushaltes sehr weit von einem Gleichgewicht entfernt befindlich ist, und daß jede Rekonstruktion, die sich auf ein solches (annäherndes) Gleichgewicht stützen will, in die Irre gehen muß. So gesehen verfügte die C14-Methode sehr frühzeitig über Indizien, die den gerade vollzogenen Wechsel zu neuen Paradigmen aus der Chaostheorie und dem naturgeschichtlichen Katastrophismus nahegelegt und gestützt hätten.

Es gibt insgesamt unmißverständliche Hinweise darauf, daß die radiometrische Vergangenheit ganz anders war, als sie heute in Form der bekannten Kalibrierkurven angezeigt wird. Die Konsequenzen für bislang – trotz aller Bedenken – für wahr gehaltene C14-Chronologien sind unabsehbar.

#### 4.6 C14 und Dendrochronologie – eine Beziehung in Bildern

Auf den folgenden Seiten wird der entscheidende Zirkelschluß in dem Beziehungsgeflecht zwischen C14, Dendrochronologie und Geschichtswissenschaft mit graphischen Mitteln herausgearbeitet. Dazu beginnen wir mit einer Darstellung der Leistungen, die die C14-Methode anderen Wissenschaftsdisziplinen gegenüber erbringt und die diese von ihnen empfängt (Bild 4.4). Es besteht tatsächlich ein enger gegenseitiger Austausch von Hilfestellungen. Eine Aufstellung der offiziell benannten Probleme der C14-Methode (Bild 4.5) wird von uns im darauffolgenden Bild durch Offenlegung weiterer Schwachstellen entscheidend erweitert (Bild 4.6). Eine konsequente Interpretation aller Probleme muß auch hier zur Feststellung kommen, daß die Voraussetzungen für eine global gültige Kalibrierung überhaupt nicht gegeben sind.

Daß es eine global gültige Kalibrierung nicht geben kann, bedeutet nicht nur, daß C14-Daten von Proben aus unterschiedlichen Regionen grundsätzlich nicht synchronisiert werden können und dürfen, sondern auch, daß es keinen voraussagbaren Trend in dem zeitlichen Verlauf der atmosphärischen

C14-Konzentration gibt. An dieser Stelle hat sich die Dendrochronologie bereits sehr früh schwerwiegende Probleme eingehandelt, indem für die Erstellung der Bristlecone-Pine-Chronologie von einer Quasi-Konstanz der atmosphärischen C14-Konzentration ausgegangen wurde.

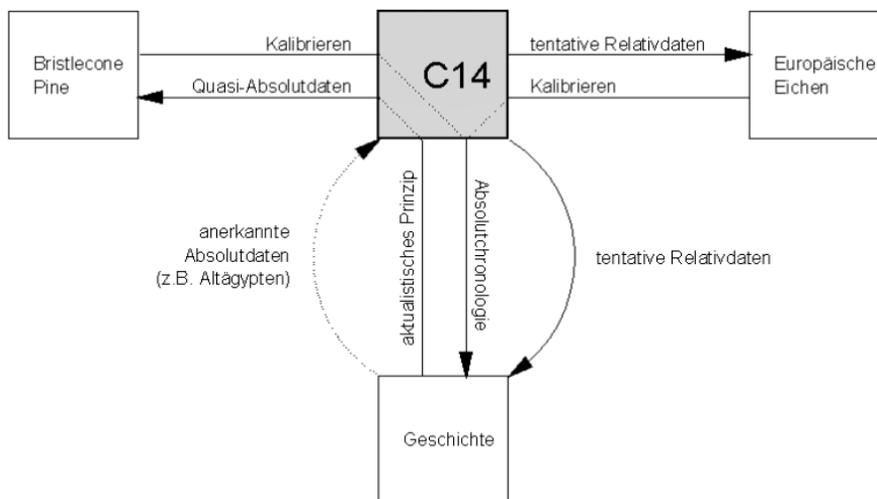
Wenn für die Erstellung der europäischen Eichenchronologien nun Vordatierungen durch C14-Daten und tentative Absolutdatierungen durch einen Vergleich der C14-Muster mit denen aus Amerika in Anspruch genommen wurden (Bild 4.7), dann kann davon gesprochen werden, daß alle wesentlichen Baumringchronologien von den fundamentalen Schwächen der C14-Methode infiziert worden sind. Wie dringend die Dendrochronologie einerseits auf Datierungshilfe angewiesen ist, und welche Probleme daraus andererseits erwachsen, verdeutlicht das Bild 4.8. In dem Bild 4.9 werden die zuvor getrennt aufgeführten Hilfestellungen zwischen C14, Dendrochronologie und Geschichtswissenschaft zusammengefaßt und lassen den Zirkelschluß bei der Verwendung von C14 erkennen:

- Die Geschichtswissenschaft legitimierte – in der entscheidenden Anfangsphase der C14-Methode – die konsequente Ummünzung des Aktualismus in ein Bild quasi-konstanter C14-Verhältnisse in der Atmosphäre.
- Die auf dieser Voraussetzung errichtete Bristlecone-Pine-Chronologie lieferte die radiometrische Blaupause für alle Europäischen Eichenchronologien.
- Die Europäischen Eichenchronologien liefern nunmehr den fälschlicherweise als »unabhängig« bezeichneten Maßstab zur Kalibrierung von C14-Daten für die Geschichtswissenschaft.

#### 4.4 C14-Datierung – Geben und Nehmen

Auf folgende Hilfestellungen war die C14-Methode von Anfang an bzw. alsbald nach Entdeckung der Ungültigkeit des Fundamentalprinzips angewiesen:

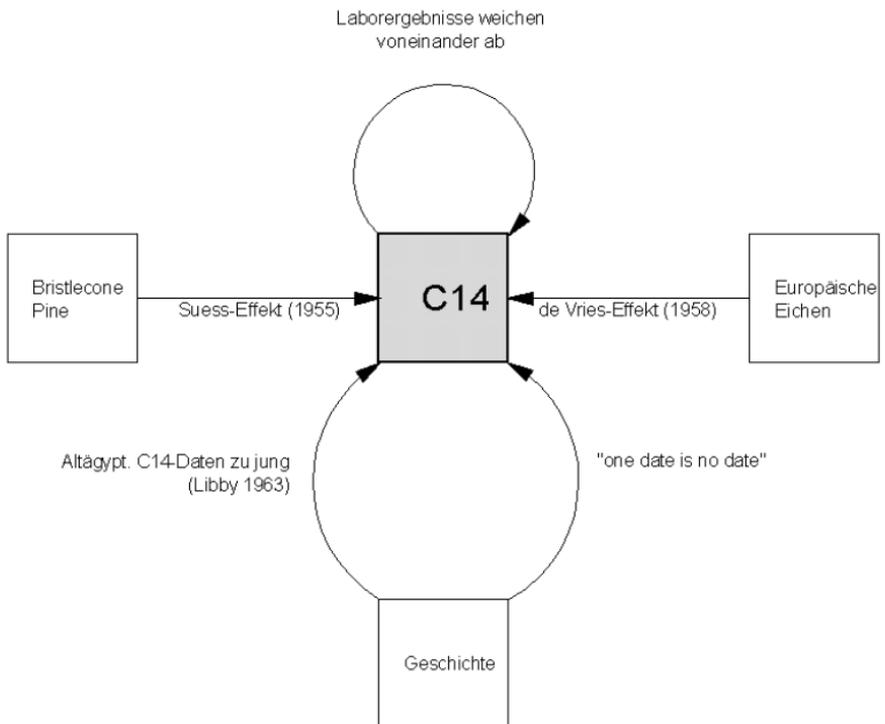
- **»Altägyptische Absolutdaten zur Initialverifizierung des Fundamentalprinzips«:** In seiner berühmten »Curve of Knowns« von 1949 (Bild **6.8**) führte W.F. Libby historisch datierte Proben aus 5.000 Jahren auf, deren C14-Daten seine Annahme von der Invarianz der atmosphärischen C14-Konzentration bestätigen sollten.



- **»Aktualismus als notwendige Voraussetzung für die Legitimation des Fundamentalprinzips«:** Der Aktualismus galt als so blendend bestätigt, daß weder der fast sichere Irrtum bei der Aufstellung des Simultanitätsprinzips – gleichzeitig lebende Organismen sollen gleiche C14-Konzentration aufweisen – noch die starke Streuung bei den einzelnen archäologischen Proben ihn von einer Erfolgsmeldung abhalten konnten. »Kalibrierung mit Hilfe der Bristlecone-Pine-Chronologie«: Wer es wollte, benutzte die seit 1965 veröffentlichten Kalibrierkurven mit der Konkordanz zwischen Baumringalter und C14-Alter; wer nicht, der verwies auf die Meßfehler der beteiligten Labors oder auf die Probleme bei der Übertragung auf Europa. Sowie die europäischen Chronologien fertig waren, wurde die Bristlecone-Pine-Chronologie sang- und klanglos aus dem Verkehr gezogen.
- **»Kalibrierung mit Hilfe der europäischen Eichenchronologien«:** Die europäischen Eichenchronologien gelten heute als Kalibrierstandard. Daß sie ihre Urgestalt über C14-Mustervergleich (»wiggle-matching«) mit der Bristlecone-Pine-Chronologie erhalten haben, ist entweder unbekannt, oder wird in seiner Relevanz bestritten.

Wenn akzeptiert wird, daß die Kalibrierung eines C14-Datums als Leistung derjenigen Chronologen anzusehen ist, die den Maßstab für die Umrechnung erstellt haben, dann sind nur noch folgende Leistungen der C14-Methode zu nennen:

- **»Quasi-Absolutdaten an die Bristlecone-Pine-Chronologie«:** Zur Zeit der Erstellung der Bristlecone-Pine-Chronologie gab es nur das Modell der Quasikonstanz der atmosphärischen C14-Konzentration. Auf dieser Basis wurden die C14-vermessenen Baumringsequenzen angeordnet und unter Platzierung hypothetischer Fehlringe nach und nach dendrochronologisch synchron gemacht. So konnten bereits Kalibrierkurven ausgegeben werden, als die dendrochronologische Verifizierung noch gar nicht abgeschlossen war: Man wußte ohnehin, wo die Sequenz hingehörte.
- **»Tentative Relativdaten an die europäischen Eichenchronologien«:** Die Geschichte der europäischen Eichenchronologien ist eine Geschichte permanenter C14-Datierung. Die Daten wurden zur Platzierung der Sequenzen sowohl untereinander als auch gegenüber der Bristlecone-Pine-Chronologie benutzt, um so noch vor der dendrochronologischen Synchronisierung ein sogenanntes »tentatives« Absolutdatum zu erhalten. Ohne diese Fixierung wäre die Zahl der zu überprüfenden Synchronismen zu groß gewesen und hätte demzufolge die Gefahr, falsche Synchronismen als wahre zu identifizieren, überhand genommen.
- **»Tentative Relativdaten an die Geschichte«:** Diese konnten zur Aufstellung relativer Chronologien benutzt werden, da das als gültig angenommene Simultanitätsprinzip die globale Synchronisierung erlaubte. Gleichwohl ist die C14-Datierung besonders dort beliebt, wo man wegen mangelnder überregionaler Bezüge in der Chronologie regional und deswegen ohne externe Prüfmöglichkeit bleiben muß.



#### 4.5 Die anerkannten Probleme der C14-Methode

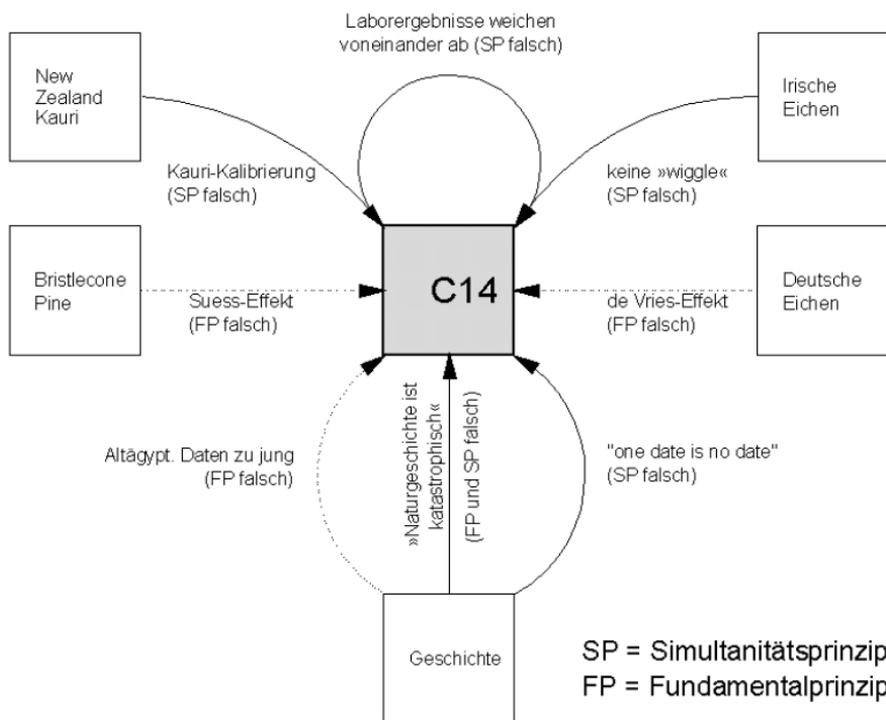
Die folgenden drei, offiziell erkannten Probleme der C14-Methode hatten im Laufe der sechziger Jahre zur Revision der bis dahin gültigen Grundlagen der C14-Methode geführt:

- **»Suess-Effekt«:** Dieser bezeichnet die Entdeckung, daß in den vergangenen 2 bis 3 Jahrhunderten die C14-Konzentration der Atmosphäre ständig gesunken ist. Die Ursache wird in dem Verbrennen fossiler Rohstoffe gesehen, die natürlicherweise kein C14 mehr enthalten sollten.
- **»de-Vries-Effekt«:** Darunter versteht man generell die Abweichungen der C14-Konzentration von einem (fiktiven) Normalmaß. Dieser Effekt wird mißverständlich auch gerne als »Schwankung« bezeichnet. Das Vorurteil, daß der Konzentrationswert im wesentlichen um stets denselben Wert schwanken müsse, hat zu irreführenden dendrochronologischen Konstruktionen und damit letzten Endes zur Etablierung falscher Kalibrierkurven geführt.
- **»Altägyptische C14-Daten sind zu jung«:** Eine systematische Drift zwischen den gemessenen C14-Altern und den historischen Daten für altägyptische Funde hatte ab 1960 – zumal unter dem Eindruck der Funde von de Vries, Suess und anderen – zu einer kritischeren Auseinandersetzung mit der Leistungsfähigkeit der C14-Methode geführt, in die Libby selbst 1963 mit einem entsprechenden Artikel in SCIENCE eingriff, indem er Zweifel an der Zuverlässigkeit sowohl dendrochronologischer als auch historischer Datierungen äußerte.

Die Anerkennung der drei zuvor genannten Effekte hatte Anfang der sechziger Jahre zur Revision des »Fundamentalprinzips« (zeitlich konstante C14-Konzentration in der Erdatmosphäre) geführt. Die Einschränkung auf ein »Simultaneitätsprinzip« gestand die Existenz von Schwankungen zu, setzte aber ihre globale Gleichförmigkeit voraus.

Die nachfolgenden beiden Probleme stellen auch dieses Prinzip in Frage, wodurch der C14-Methode jede Grundlage genommen wäre. (In Bild 4.6 werden weitere Probleme benannt, die konvergent auf eine Aussage zielen: Das Simultaneitätsprinzip als Grundlage der C14-Methode ist falsch.)

- **»one date is no date«:** Anerkanntermaßen sind C14-Daten gleichaltriger Proben trotz vorausgegangener akribischer Korrekturmaßnahmen nicht konsistent. Die Abweichungen können mehrere Jahrhunderte bis zu Jahrtausenden betragen. Dem versucht man, durch Bündelung von C14-Daten mehrerer Proben zu begegnen, daher das bereits geflügelte Wort von dem einen Datum, das (alleine) keines ist. Zu der naheliegendsten Schlußfolgerung, daß nicht nur unterschiedliche Verunreinigungen sondern auch lokal unterschiedliche C14-Konzentrationen vorlagen, ist man bisher nicht vorgedrungen.
- **»Laborergebnisse weichen voneinander ab«:** Inwieweit das unter dem vorherigen Punkt angesprochene Phänomen auch auf Laborfehler zurückzuführen ist, die sich im Rahmen systematischer Vergleichsuntersuchungen als sehr prägnant erwiesen haben, und/oder auf erratische Schwankungen in den Proben, darüber herrscht keine Klarheit.



#### 4.6 Die tatsächlichen Probleme der C14-Methode

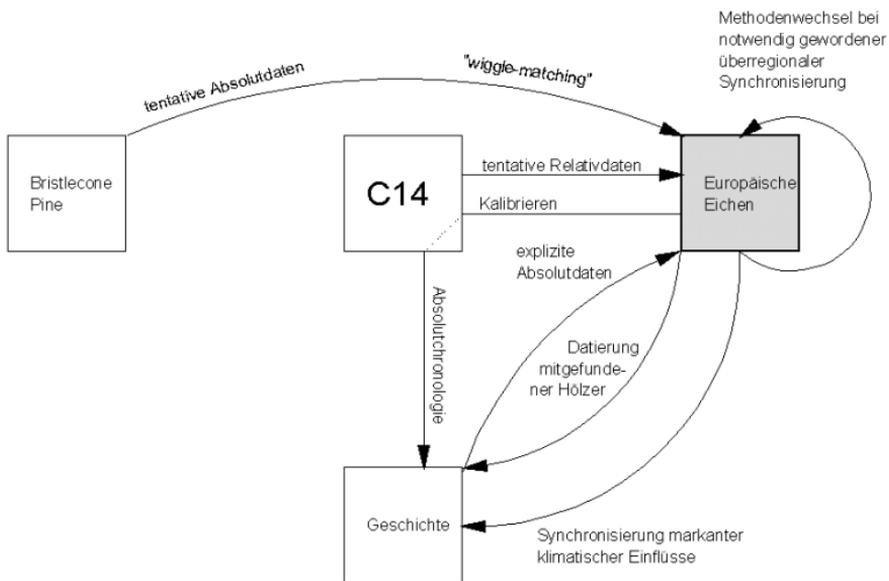
Alle Probleme der C14-Methode werden hier in ihrer Auswirkung auf das Simultanitäts- (SP) bzw. Fundamentalprinzip (FP) beschrieben. Dabei sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Ein gültiges Fundamentalprinzip würde die umfassende Anwendbarkeit der C14-Methode ohne Kalibrierung begründen.
- Ein gültiges Simultanitätsprinzip würde die umfassende Anwendbarkeit der C14-Methode unter Verwendung einer einzigen global gültigen Kalibrierung begründen.
- Ohne gültiges Simultanitätsprinzip wäre nur noch die lokale Anwendbarkeit der C14-Methode unter Verwendung einer lokal gültigen Kalibrierung möglich, was als nicht mehr praktikabel angesehen werden müßte.

Die von Libby 1949 als Basis der C14-Methode eingeführten beiden Prinzipien sind folgendermaßen zu verstehen:

- Das Fundamentalprinzip (FP) besagt, daß die atmosphärische C14-Konzentration global und über historische Zeiträume hinweg konstant gewesen sei.
- Das Simultanitätsprinzip (SP) besagt, daß die atmosphärische C14-Konzentration über historische Zeiträume hinweg an allen Orten der Erde jeweils gleich gewesen sei, was die global gleichförmige zeitliche Veränderung mit einschließt.

Während also das Fundamentalprinzip sowohl lokale als auch zeitliche Konstanz beinhaltet, beschränkt sich das Simultanitätsprinzip auf die Forderung allzeit lokaler Gleichförmigkeit, was demnach auch Konzentrationsveränderungen zuläßt, solange diese an allen Orten der Erde gleich auftreten. Das Simultanitätsprinzip ist Voraussetzung für die globale Kalibrierung mit nur einem einzigen Maßstab. Wenn es ungültig ist, müssen jeweils lokale Kalibrierungen erstellt werden. Zugleich ist der radiometrische Vergleich archäologisch als gleichhalt angetroffener Proben fragwürdig, da sie nicht notwendig an einem Ort entstanden sein müssen. Alle Effekte, die hier als dem Simultanitätsprinzip widersprechend gekennzeichnet sind, gelten entweder als korrigierbar (»one date is no date« und »Laborfehler«) oder werden nicht weiter beachtet. Dabei wird übersehen, daß es die offensichtliche Unkorrigierbarkeit erraticischer Schwankungen war, die zur Ausgabe der Devise geführt hat, daß nur größere Mengen an Proben für ein bestimmtes historisches Ereignis zu einer »zuverlässigen« Datierung führen können. Weder die divergierenden C14-Daten des neuseeländischen Kauribaums noch beispielsweise die 1977 von irischen Dendrochronologen ins Feld geführten eigenen Messungen, die als Antithese zu den »wiggles« in der Bristlecone-Pine-Chronologie verstanden werden sollten, zeigten dauerhaft Wirkung. Letztere wurden sogar wieder zurückgezogen, um sich Datierungshilfe durch »wiggles« mit eben jener Bristlecone-Pine-Chronologie am Ende nicht versagen zu müssen. Da auch das Simultanitätsprinzip nicht aufrechterhalten werden kann, ist eine systematische Korrigierbarkeit von C14-Daten nicht gegeben. Deshalb muß die C14-Methode endgültig aufgegeben werden.



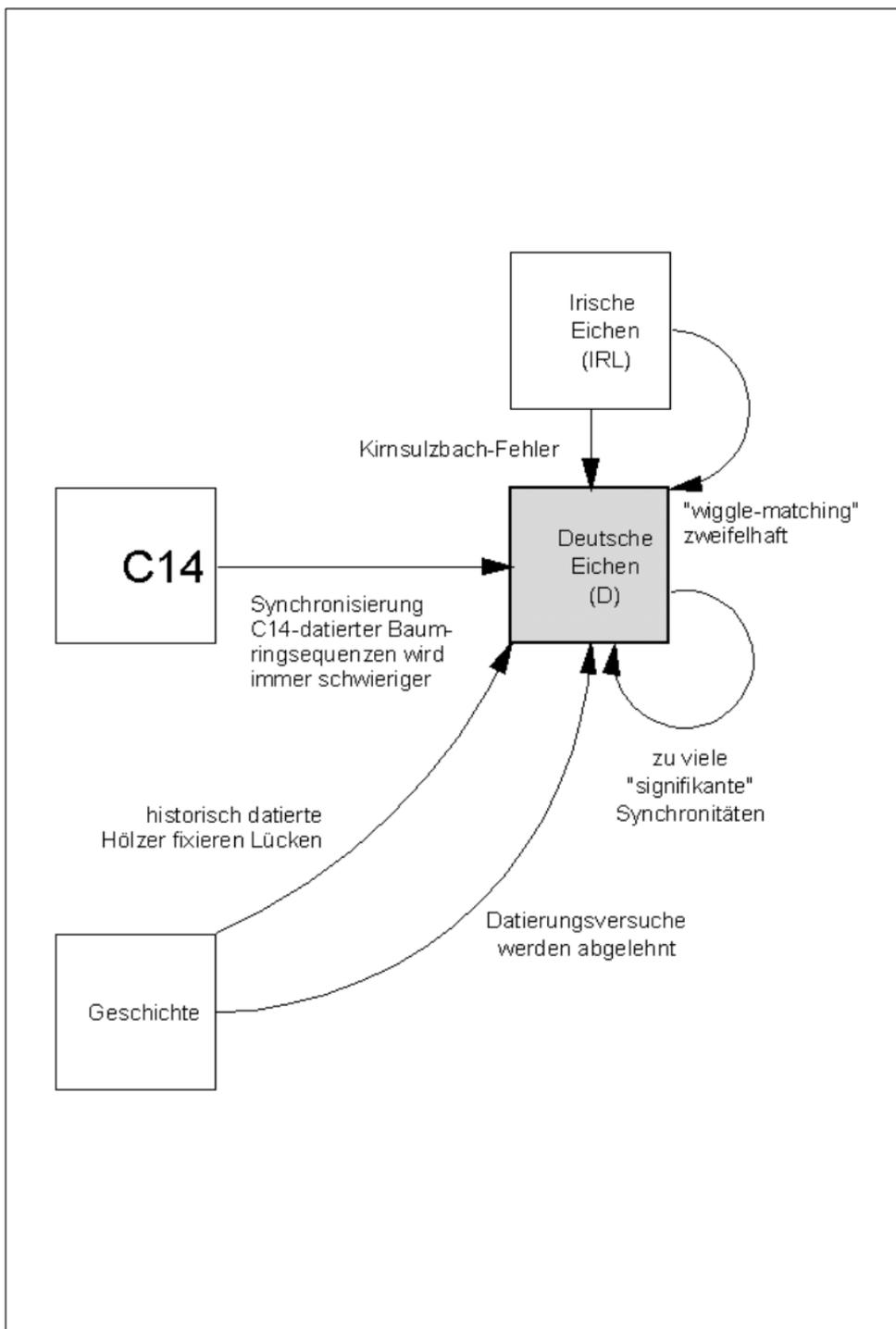
#### 4.7 Dendrochronologie – Geben und Nehmen

Von folgenden Hilfestellungen war oder ist die Dendrochronologie angewiesen:

- **»Tentative Relativdaten«:** Für alle Baumringchronologien, die für die spätere Kalibrierung von C14-Daten erstellt wurden, sind C14-Daten zwecks Vorsortierung und -platzierung herangezogen worden. Dabei haben sich die Dendrochronologen von dem Gedanken leiten lassen, daß ein C14-Alter nahezu das wahre Absolutalter darstellt.
- **»Tentative Absolutdaten durch 'wiggles-matching'«:** Die Unsicherheit, die bei Verwendung separater C14-Daten verblieb, konnte überwunden werden, wenn darüberhinaus Muster ausreichend vieler C14-Daten mit entsprechenden Mustern aus der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie synchronisierbar waren. Dadurch ließen sich schwimmende Sequenzen »fixieren«, bis am Ende ausreichend viele Hölzer zum Anschluß an den davor liegenden eigenen Master gefunden waren.
- **»Explizite Absolutdaten«:** Sofern das Holz aus historisch datierten Zusammenhängen stammte, war ein Absolutdatum vorgegeben, das auf Dauer niemals abgewiesen wurde.
- **»Methodenwechsel«:** Ende der sechziger Jahre machte die Dendrochronologie den Schritt von der »visuellen« in die »statistische« Ära: Die Entscheidung, ob eine Synchronität vorliegt oder nicht, wurde an statistische Parameter delegiert. Auch weil die Bedeutung der Gleichläufigkeitswerte im Falle überregionaler Synchronisierung erheblich sinkt, mußte ein weiterer Methodenwechsel vorgenommen werden. Hier hatte man Hoffnung auf die Auswertbarkeit von Indizien überregional wirksamer Klimaeinflüsse (Weiserjahre etc.) in den Baumringwuchswerten.

Und folgende Leistungen erbringt die Dendrochronologie anderen Wissenschaften gegenüber:

- **»Absolutchronologie durch C14-Kalibrierung«:** Dazu existieren auch Empfehlungen, welche regionalen Baumringchronologien für welchen Zeitraum zur Kalibrierung Verwendung finden sollten.
- **»Absolutdatierung durch direkten Vergleich zu mitgefundenen Hölzern«:** Wegen der regionalen Begrenzung der Anwendbarkeit einzelner Baumringchronologien können mitgefundene hölzerne Artefakte nicht automatisch synchronisiert werden. Darin liegt zugleich ein versteckter Widerspruch zu der Tatsache, daß das Komplettieren der europäischen Eichenchronologien letztlich nur auf überregionalen Umwegen erreicht worden ist.
- **»Synchronisierung von Zeugnissen drastischer Naturereignisse«:** Sofern sich Naturereignisse über mehrere Jahre hinweg drastisch und gegebenenfalls überregional auf das Klima auswirken, können unter Umständen Spuren davon in Überresten von seinerzeit wachsenden Bäumen wiedergefunden werden (z.B. Vulkanausbrüche). Auf diese Weise können an sich schwimmende Chronologien zueinander synchronisiert oder die Stimmigkeit unterschiedlicher Absolutchronologien überprüft werden.



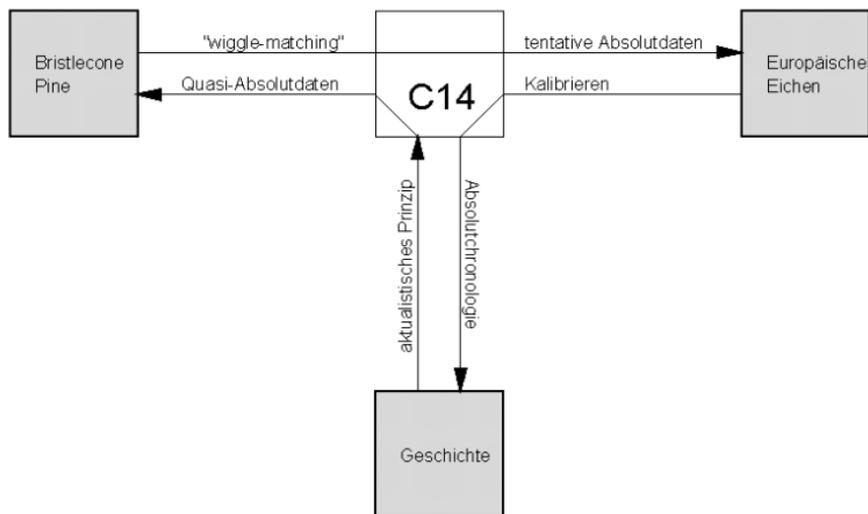
#### 4.8 Die Probleme der Dendrochronologie

Die im Folgenden aufgeführten Probleme lassen in der Gesamtdarstellung unter anderem die Abhängigkeit der Dendrochronologie von Vordatierungen – sei es durch die Historie, sei es durch C14 – erkennen:

- **»Datierungsversuche werden abgelehnt«:** Was passiert, wenn die Dendrochronologie ein Datum für ein Objekt präsentiert, das von der historischen Datierung abweicht, konnte E. Hollstein 1968 erleben, als seine um ca. 100 Jahre gegenüber der offiziellen Geschichte abweichende Datierung der Baumsärge von Oberflacht vehement zurückgewiesen wurde.
- **»Historisch datierte Hölzer fixieren Lücken«:** Aus geschichtlich »unabweisbaren« schwimmenden Vorplazierungen erwächst die Aufgabe, die entstandene Lücke zu der an die Jetztzeit angebundenen Chronologie zu schließen. Es sind solange Hölzer zu suchen, bis die Lücke von beiden Seiten her geschlossen ist ...
- **»Synchronisierung wird immer schwieriger ...«:** Diesen Effekt beschreiben explizit die Irischen Dendrochronologen, die mit Hilfe der C14-Methode ihre schwimmenden Sequenzen vorplazieren und nun die Brücken zwischen ihnen finden müssen. Wenn das vorhandene Holz dafür gut ist, muß es am Ende immer leichter gehen. Tatsächlich gestaltete sich die Komplettierung aber immer schwieriger, was auf die Künstlichkeit mancher Synchronität hinweist.
- **»Kirnsulzbachfehler«:** Bei dem europaweiten Abgleich der jeweils über Amerika »gewiggle-matchten« süddeutschen und irischen Eichenchronologien wiesen die Iren den Deutschen eine fehlerhafte 71 Jahre umfassende Verschiebung nach.
- **»Wiggle-matching zweifelhaft«:** Im Laufe der siebziger Jahre trieb B. Becker die süddeutsche Eichenchronologie mit Hilfe des »wiggle-matching« auf die Zielgerade. Die Iren verweigerten sich anfänglich dieser Methode und verbanden damit harsche Kritik an dem Vorgehen von H.E. Suess bei der Erstellung der Bristlecone-Pine-Chronologie. Indem sie explizit das Simultanitätsprinzip in Frage stellten, zielten sie eigentlich mitten in das methodische Herz ihres deutschen Kollegen (siehe dazu den Kommentar bei Baillie [1995, Vorwort]). Zugleich stellten sie – ohne es aber zu merken – ihre Vorgehensweise bei der Erstellung einer relativen C14-Chronologie für die eigenen Baumringsequenzen in Frage, die erst mit Hilfe des »wiggle-matching« zu einer absoluten Baumringchronologie verdichtet werden konnte.
- **»Zu viele 'signifikante' Synchronitäten:** Ohne die langjährige Erfahrung eines Dendrochronologen – so lesen wir immer wieder in der Fachliteratur – könne es keine zuverlässige Auswahl aus den statistisch ermittelten Kandidaten für eine richtige Deckungslage geben. Auf die statistischen Verfahren zur Bewertung der Wahrscheinlichkeit eines Irrtums bei der Übernahme einer Deckungslage ist also kein unbedingter Verlaß, insofern die richtige Deckungslage durchaus eine mit niedrigerer Irrtumswahrscheinlichkeit sein könne.

#### 4.9 Der Zirkelschluß zwischen C14 und Dendrochronologie

Die europäischen Eichenchronologien fertigzustellen konnte nur gelingen, weil die europäischen Dendrochronologen die radiometrischen Muster ihrer schwimmenden Baumringsequenzen mit denen der Tausende von Jahren umfassenden Bristlecone-Pine-Chronologie abglichen (= »wigggle-matching«).



### Der Zirkelschluß

Die Fertigstellung der Bristlecone-Pine-Chronologie konnte ihrerseits nur gelingen, weil die amerikanischen Dendrochronologen deren schwimmende Baumringsequenzen per C14-Messungen unmittelbar in eine Absolutchronologie verwandelt hatten. Sie betrachteten das C14-Alter in erster Näherung als Absolutalter und korrigierten das im Einzelnen nur soweit, wie es die C14-Muster in den verwendeten Baumringsequenzen verlangten. Das »wigggle-matching« wurde erfunden, um die Bristlecone-Pine-Chronologie zu erstellen. Die Überprüfung dendrochronologischer Charakteristika wurde als Letztes vollzogen.

Der Erfolg der amerikanischen Dendrochronologen fußte ausschließlich auf der unkritisiert gebliebenen Ausschlichtung des aktualistischen Prinzips für die Vorplazierung der noch schwimmenden Sequenzen. Diesem Prinzip zufolge seien die ökologischen Randbedingungen seit Menschengedenken und schon lange Zeit davor konstant gewesen, was folglich auf lokaler wie auch globaler Ebene zu stationären Verhältnissen in den Austauschvorgängen geführt habe. Zugleich war dieses Prinzip der einzige Weg, ausreichend sichere chronologische Vorgaben für die vorgeschichtliche Ära ableiten zu können, die in Amerika deutlich später endete als in Europa. Die zeitgleich entstandene neuseeländische Kauri-Chronologie offenbarte dagegen einen Trend, der stark von dem der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie abwich – und deshalb in Amerika für falsch gehalten bzw. ignoriert wurde.

Die Geschichtswissenschaft muß sich selber einen Gutteil der Versäumnisse anlasten. Sie hätte mit Blick auf die ihr bekannte katastrophische Naturgeschichte vor dem unvorsichtigen Umgang mit dem Prinzip des Aktualismus warnen müssen.

Die zwanzigjährige Ära des »wigggle-matching« (ca. 1965 - 1985) zur Komplettierung der europäischen Eichenchronologien ist auch eine Ära der harschen Kritik an den inkonsistenten Meßergebnissen der daran beteiligten Meßlabors. Weiter als bis zu dieser Kritik mochten sich die Hüter wissenschaftlicher Akribie aber leider nicht vorwagen. Mit etwas weniger vornehmer Zurückhaltung hätten jene Kritiker ihre Kollegen auffordern müssen, nicht nur die Messungen ernsthaft in Frage zu stellen, sondern zugleich auch die Folgerungen, die sie mit deren Hilfe für die Chronologie der europäischen Eichensequenzen und damit letztlich für einen allseits erwarteten, weltweit gültigen objektiven Zeitmaßstab gezogen hatten.

Wir nehmen an, daß die Kritik über die Infragestellung einzelner Meßergebnisse nicht hinausging, weil eines niemand wollte: Das Simultanitätsprinzip in Frage stellen. Anderenfalls wäre es das Ende der C14-Methode gewesen. Die Kritiker erkannten nicht, daß auch bei größten Meßanstrengungen Differenzen im C14-Alter gleichaltriger Baumringe blieben und folglich als Zentralangriff auf das Simultanitätsprinzip hätten interpretiert werden müssen. So blieb den »wigggle-matchern« bis heute das Schlupfloch der Selbstbeschwichtigung, man selber habe aber gut gemessen. Man könnte auch sagen, daß dieser Zirkelschluß über den Atlantik hinweg nur möglich war, weil in dem Meßmaterial so viele Fehler steckten, daß auch den dendrochronologischen Methoden ein letzter Freiraum blieb, innerhalb dieses Zeitraumes eine befriedigende Plazierung zu finden.

## 5. Tagebuch einer Enthüllung

Unsere Argumente sind das Ergebnis zahlreicher Überlegungen und Diskussionen und noch zahlreicherer Vermutungen, die jedoch keineswegs alle überlebt haben. Die zugehörige Literatur haben wir im Laufe der Zeit jeweils nach unserem Stand der Diskussion gezielt recherchiert oder auch in unseren Archiven neu »entdeckt«. Es gab immer wieder Momente, in denen es uns wie »Schuppen von den Augen« fiel und durchaus mehr als eine Phase, in denen wir schwer ins Grübeln gerieten, weil uns der Kontrast zwischen unseren Vermutungen und den zur Verfügung stehenden »facts« allzu ausgeprägt erschien.

Der Weg, auf dem sich unsere wesentlichen Argumente und letztlich unsere Einschätzung über die Substanz von C14 und Dendrochronologie herausgebildet haben, macht Windungen und Umwege. Der wesentliche Grund dafür liegt in unserer eigenen Gefangenschaft in »Wahrheiten«, die wir erst nach und nach als eigentlich wertlose, jedoch zugleich für unverzichtbar gehaltene Krücken der Königin unter den naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden entziffern konnten. Die chronologisch orientierte Wiedergabe der Irrungen und Wirrungen einerseits und der unseren Durchbruch ermöglichenden Annahmen andererseits kann dazu beitragen, die Motive für unsere fundamentale Kritik besser zu verstehen und ihre Substanz direkter zu prüfen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß hier manche Schlußfolgerung noch ungeschminkt im Gewand ursprünglicher Spekulation auftritt.

### 5.1 Chronologierevisionen und Radiokarbonrevolutionen

Seit unserer ersten, Anfang der achtziger Jahre einsetzenden Konfrontation mit Immanuel Velikovskys grundlegender, in mehreren Bänden niedergelegten Revision der Chronologie der Altertumsgeschichte [Velikovsky 1978a, 1978b, 1979, 1980] stand für uns fest, daß jeder, der Velikovskys Theorie Kredit gab, über kurz oder lang eine Auseinandersetzung mit den naturwissenschaftlichen Methoden der Absolutdatierung, insbesondere mit der C14-Methode, zu führen hatte. Velikovskys Ansatz wurzelte in einem katastrophistischen Weltbild und war insbesondere gegenüber der überkommenen vorderasiatischen Chronologie absolut respektlos. Er verschob ägyptische Dynastien um Jahrhunderte, legte aber ebenso Hand an den Gradualismus von Darwin und Lyell, indem er deren Millionen von Jahren benötigende Evolutionismen in schlagartig stattfindende katastrophische Szenarien ummünzte.

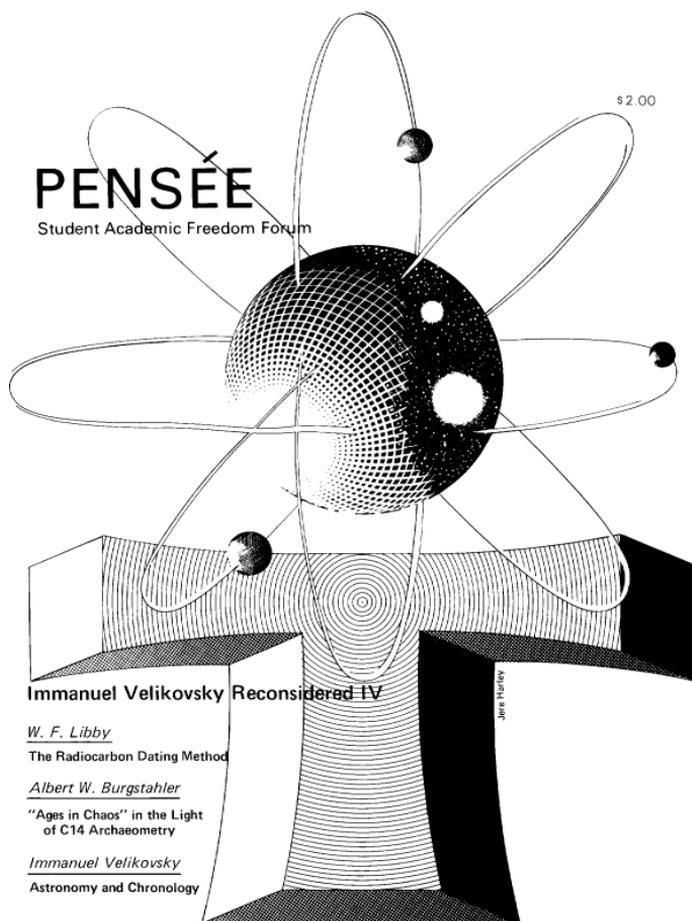
Wer Velikovskys Kredit gab, legte sich also zwangsläufig mit den Hütern naturgeschichtlicher Zeitvorstellungen an. Überflüssig zu erwähnen, daß die C14-Methode hier in der ersten Reihe stand, um den vorgegebenen Zeitrahmen mit Verve zu verteidigen. Die Geschichte der Bekämpfung dieses außergewöhnlichen Wissenschaftlers einerseits und die Geschichte der Inauguration der C14-Methode in der 50er Jahren andererseits sind zwei Seiten einer einzigen Medaille: Velikovskys war zu seiner Zeit chancenlos, weil seine Geschichtsrekonstruktion gegen die unhinterfragte Leitschnur der Naturgeschichte verstieß: den Aktualismus. Libby und seine Anhänger schwammen auf der Erfolgswelle, weil sie sich dieses Dogma zunutze machen konnten, denn ein ernsthafter Kritiker der Grundlagen der C14-Methode »outete« sich automatisch als Katastrophist und war damit seinerzeit in der Gemeinde der Wissenschaftler nur ganz schlecht gelitten.

Heutzutage ist der Katastrophismus modern, was aber nicht bedeutet, daß bereits alle Folgen eines vormals dogmatischen Antikatastrophismus erkannt und bewertet worden sind. Die C14-Wissenschaft gehört genuin zum Kernbestand aktualistischer Naturgeschichte. Sie hat sich im Laufe ihrer mehr als fünfzigjährigen Geschichte zu einem methodischen Monstrum entwickelt, das Kritik, die sich auf Details kapriziert, äußerst geschickt abzuwehren weiß. Wir legen den Finger nur en passant in die zahllosen kleineren Wunden, die sich zu lecken die C14-Wissenschaft im Laufe der Zeit gezwungen worden ist. Wir fokussieren vielmehr auf die unter dem vormaligen Regime dogmatisch aktualistischer Naturgeschichte abgeschirmt gebliebenen »Selbstverständlichkeiten«, die tatsächlich – zumal im Licht des sich abzeichnenden Paradigmenwechsels vom Aktualismus zum Katastrophismus – den Tatbestand eines verschleppten Bankrotts erfüllen.

In den 70er Jahren erfuhren die Thesen Velikovskys erneute und diesmal nicht ausschließlich mit Ablehnung verbundene Beachtung. Der Grund dafür wurde auch in den Ergebnissen der U.S.-amerikanischen Apollo-Missionen zum Mond gesehen, die etliche von Velikovskys Folgerungen über die Eigenschaften der Himmelskörper bestätigt hatten. Parallel dazu spielte sich die sogenannte »Zweite Radiokarbonrevolution« ab, die die Absolutdaten für wichtige neolithische Epochen Mitteleuropas erheblich in die Vergangenheit schieben wollte, was weltweit zu energischstem Widerstand fast der gesamten Vor- und Frühgeschichtler führte. (Wir möchten anmerken, daß nur die – zahlenmäßig ursprünglich weit unterlegenen – Befürworter dieser Neudatierungen den Begriff Revolution für angemessen erachteten, der Rest vermochte darin seinerzeit allenfalls eine Verirrung zu erkennen.)

## 5.1 Velikovsky und die C14-Methode

1973 erschien eine Ausgabe der Zeitschrift *Pensée* exklusiv zum Thema »Radio-karbon«. Auch W.F. Libby steuerte einen Artikel bei, der sich ziemlich differenziert mit der seinerzeit aktuellen Kritik an der von ihm begründeten Methode auseinandersetzte. Libby war bereit, die offiziell anerkannte (astronomisch begründete) altägyptische Chronologie in Frage zu stellen, weil C14-Daten für die frühen Dynastien zu jung ausfielen. Velikovsky griff die C14-Methode auf, weil C14-Daten für die späten Dynastien in auffälliger und zugleich seine Theorie stützender Weise zu jung ausfielen. Wir vermuten, daß Libby persönlich davon ausging, daß eine Widerlegung des sog. Fundamentalprinzips (allzeit gleiche C14-Konzentration in der Atmosphäre) den Anfang vom Ende seiner 1949 als äußerst elegant eingeführten Methode bedeutet hätte.



In dieser Phase wäre eine kritische Durchleuchtung der Grundlagen der C14-Methode angebracht gewesen, zumal damals die Vermessung der kalifornischen Bristlecone-Pine-Baumringchronologie endgültig gezeigt hatte, daß die noch von Libby formulierten Grundannahmen der C14-Wissenschaft unzutreffend waren. So gesehen waren jene »Radiokarbonrevolutionäre«, die sich im übrigen nur auf diese neuen dendrochronologischen Ergebnisse stützten, die wahren Hüter des alten, vom Aktualismus geprägten Weltbildes.

Velikovskys und seine Mitarbeiter sowie auch das Gros der Früh- und Vorgeschichtler unterschieden in ihrem Verhältnis zur C14-Methode gleichermaßen zwei Möglichkeiten: Entweder die C14-Methode konnte die Chronologierevision bzw. die herrschende Chronologie stützen – dann war sie willkommen –, oder sie stützte die jeweils andere Seite – dann war sie zu bekämpfen, wobei die »Konservativen« des Faches eher in den C14-Revolutionären als in Velikovskys den Feind erkannten. Die Debatte um die von Velikovskys betriebene Verjüngung der Historie im Lichte der C14-Wissenschaft wurde mit einer Ausgabe von *Pensée* im Sommer 1973 eröffnet, zu der neben »mainstream«-Wissenschaftlern wie A.W. Burgstrahler oder auch E.W. MacKie selbst W.F. Libby mit einem Derivat eines Vortragstextes von 1970 beigetragen hatte (vergleiche Bild **5.1**).

Da sich Velikovskys neuer Chronologieansatz im wesentlichen mit Ägypten beschäftigte, wurde stark auf einzelne Datierungsprobleme abgehoben. Die Stoßrichtung in der erwähnten Debatte blieb unentschieden zwischen »stützen« und »stürzen«. Für beide Haltungen gab es Verfechter. Hauptkritik von Velikovskys selber war die unseriöse Handhabung der zur Verfügung stehenden Proben, deren unliebsame Daten unveröffentlicht blieben. Es gab auch eine Kritik an der Bristlecone-Pine-Baumringchronologie durch H.C. Sorensen, der ihren »wissenschaftlichen Vater« C.W. Ferguson dazu interviewt hatte und Schwachpunkte hervorhob, deren Kenntnis uns später weiterhelfen sollte.

Unser Eindruck war und ist, daß sich die Schulen in der offiziell gelehrten Altertumswissenschaft beim Thema C14 aufspalteten und einander von da an mehr oder weniger ignorierten. Die einen behielten das Handwerkszeug der sorgfältigen und zugleich mühseligen, synchronistischen Ummünzung relativer in absolute Chronologie bei, die anderen wechselten einfach das Pferd und datierten fürderhin vorwiegend lokal ohne methodische überregionale Synchronisierung mit Hilfe der C14-Methode (die dabei auch ihre größten Schwächen aufweist, vergleiche die entsprechenden Abschnitte in Kapitel 3.1).

## 5.2 C14 in der öffentlichen Diskussion

Wir bringen hier zwei Beispiele für das gedankenlose Ins-Feld-Führen sowohl der C14-Methode als auch der Dendrochronologie (jeweils Leserbriefe aus Die Zeit vom 26. Januar 1996 als Reaktion auf den Beitrag des ZEIT-Magazins »Der Zeitraffer« über die These des erfundenen Mittelalters von H. Illig).

H. Illig diskutiert eine Chronologierevision, die eine Fehldatierung von 300 Jahren in der jüngeren Vergangenheit (ca. 600 - 900 AD) bedeutet. Dies fände gewissermaßen vor den Augen der Dendrochronologen statt, die doch diesen Zeitraum fest im chronologischen Griff wännen, während die C14-Wissenschaft sich hier tatsächlich eher bedeckt halten würde, weil der schon offiziös und seriös zu veranschlagende Datierungsfehler regelmäßig über den Rahmen von dreihundert Jahren hinauszugehen pflegt. Hier bewegen wir uns bereits im Nebel der zahllosen kleineren Problematiken der C14-Methode, die dem gebildeten Publikum gar nicht bewußt sind und von den Hütern der Methode auch nicht gern angesprochen werden. Der Laie schwingt ein schartiges Schwert, während der Fachmann, der eigentlich eine deutliche Warnung äußern müßte, sich in der Regel die Hand vor den Mund hält.

werden ja nicht deswegen von „der Wissenschaft“ unter den Tisch gekehrt, weil sie so revolutionär sind, sondern weil sie so leicht falsifiziert werden können, daß sich die Auseinandersetzung gar nicht lohnt. Der Schlüssel zur Widerlegung des dreihundertjährigen Zeitsprungs liegt im Vergleich verschiedener voneinander unabhängiger Zeitmessungssysteme. Dazu gehören nicht nur geschriebene Chronologien, etwa der arabischen, jüdischen oder chinesischen Kalender, sondern auch natürliche „Uhren“ wie die altbekannte Radiokarbonmethode oder die Dendrochronologie (mittels Abzählen der Baumringe). Einer „Kalenderverschwörung“ müßten dann also nicht nur mittelalterliche Autoren völlig unabhängiger Kulturen angehört haben, sondern auch Bäume und bestimmte Kohlenstoffatome.

...samte  
...samt: tatsächlich war Europa nach dem Zusammenbruch des Römischen Reiches in einen Haufen regionaler Herrschaftsgebiete zerfallen.

Endgültig widerlegt wird Illigs Idee jedoch mittels naturwissenschaftlicher Hilfsmittel des Historikers: der Datierungsmethoden Dendrochronologie und C-14. Sowohl die vergleichende Addierung von witterungsbedingten Schwankungen in Baumringstärken als auch der nach dem Absterben konstant nachlassende Anteil des radioaktiven Kohlenstoffisotops C-14 in organischer Materie dürfen als wissenschaftlich abgesichert gelten. Mit der Dendrochronologie kann man in bestimmten Regionen über dreitausend Jahre alte hölzerne Artefakte auf das Jahr genau datieren; und bei C-14 rechnet man zwar mit einer Unsicherheit von circa fünf Prozent

Mit den noch weit radikaleren chronologischen Ansätzen für Mesopotamien und Ägypten durch G. Heinsohn [1988] sowie G. Heinsohn und H. Illig [1990] und für das Neo-, Meso- und Paläolithikum durch H. Illig [1988] und G. Heinsohn [1991], erwies sich die Klärung der Wertigkeit der C14-Methode erneut als dringlich zu erledigende Aufgabe. Seit die Debatte um ein zu langes Mittelalter immer höhere Wellen zu schlagen begann [Illig 1994; 1996; 1999], wurde uns die Tatsache, daß eine bloße Erwähnung von C14 und Dendrochronologie entsprechende Ablehnungsreflexe des normal Gebildeten auslöst (siehe Bild **5.2**) und damit zum Totschlagsargument wird, erneut bewußt und das Problem als nunmehr unaufschiebbar auf die Tagesordnung gesetzt.

## 5.2 Vorarbeiten

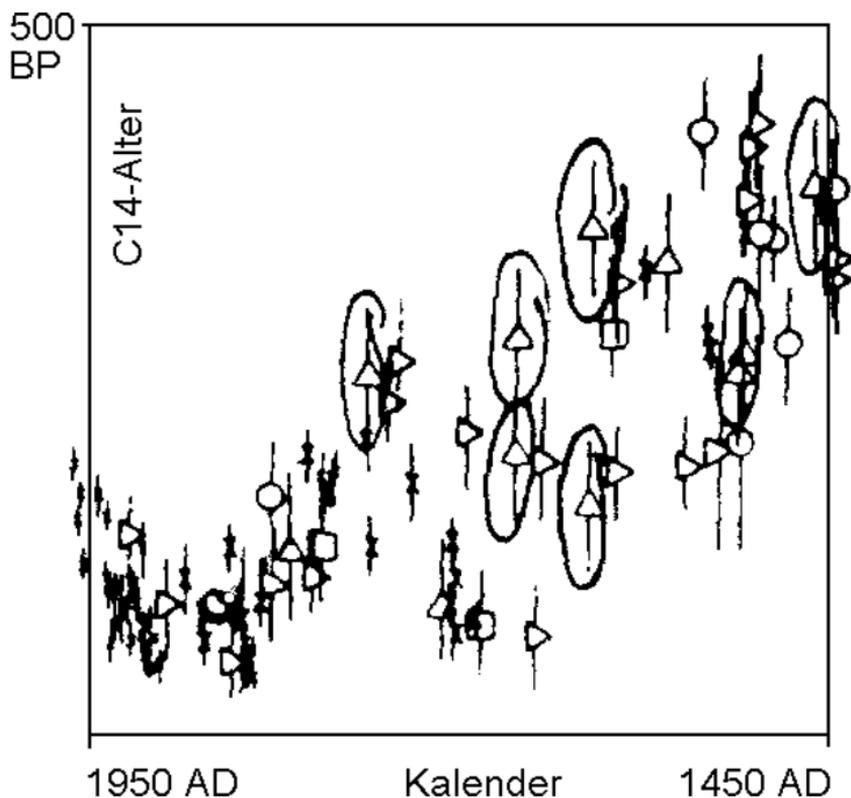
Mit der Schlußfolgerung, daß eine Chronologie der Prähistorie mit erheblich weniger Zeit auskommen muß, als ihr bislang unterstellt wird, hatte sich H. Illig bereits 1988 auf Kollisionskurs mit C14 und Dendrochronologie begeben. Neben der häufigen Widersprüchlichkeit der Datierungsergebnisse war ihm aufgefallen, daß überall dort, wo bereits vor der Ära der naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden Absolutchronologien etabliert waren, diese bei Datierungsfragen keinen Fußbreit nachgaben, während in anderen Bereichen mit weniger fundierten Chronologien sich von Beginn an ein Trend zur »Vergreisung« der Funde abzeichnete [Illig 1988, 24-29].

Bereits 1991 hatten wir Vorarbeiten zu diesem Buch in Angriff genommen, indem wir versuchten, durch das in der Literatur dokumentierte Formelwerk eine Modulation der C14-Produktion durch Schwankungen in der Stärke des Erdmagnetfeldes modellmäßig zu erfassen. Wir erkannten, daß ganz unterschiedliche »Geschichten« des Erdmagnetfeldes gleichermaßen zu der heute gemessenen C14-Konzentration führen können, wobei die Beurteilung aktueller Messungen von C14-Restaktivitäten an Artefakten dann natürlich auf je unterschiedlichen Umrechnungen, d.h. Kalibrierungen basieren müßten – wobei doch nur eine als die gültige erachtet werden kann. Wir waren erstaunt über die Mannigfaltigkeit der von verschiedenen Autoren rekonstruierten Magnetfeldverläufe und der sich daraus ergebenden Bandbreite möglicher Kalibrierungen. Wir vermißten den sensiblen Umgang mit den Magnetfeldmodellen angesichts der direkten Abhängigkeit, die für die C14-Kalibrierung gegeben ist und deren Gestalt schließlich jahrzehntgenau rekonstruiert worden war.

### 5.3 C14-Datierung in jüngster Vergangenheit

Dieses Diagramm [Suess 1970a] diene uns als Einstieg in die Diskussion, warum die vorliegenden Kalibrierkurven für die fernere Vergangenheit eigentlich so genaue Angaben machen können, wenn doch ausgerechnet für den Zeitraum, in dem ausreichend viele der untersuchten Objekte in der Regel aufs Jahr genau datiert werden können, ein dermaßenes Konvolut an divergierenden Meßwerten vorliegt? Gerade ein Aktualist müßte die Extrapolation vergangener Verhältnisse aus den gegenwärtig herrschenden an dieser Stelle verweigern: Die Unschärfe des Trends ist viel zu groß.

Erfahrungsgemäß streuen die Meßwerte aus einem Labor nicht so stark. Die Streuung zwischen den Laboren ( $\Delta$ ,  $\triangleright$ ,  $\circ$ ,  $\square$ ) ist – wie hier allgemein zu sehen – größer, als die angegebenen Fehler vermuten lassen, und hat auch immer wieder interne Kritiker auf den Plan gerufen. Wir hakten nicht bei der Diskussion von Fehlerbreiten ein, sondern bei der Frage, ob diese Streubreite ausreichen könnte, die via C14-Daten vordatierten Baumringsequenzen so »freizügig« zu plazieren, daß eine zuvor imaginierte Form für die Kalibrierkurve abgedeckt werden kann.



1994 veröffentlichte I. Heske einen Artikel in ZEITENSPRÜNGE [Heske 1994] über die Probleme der C14-Methode am Beispiel einer archäologischen Kampagne in Feudvar, dessen klare Analyse etliche unserer hier präsentierten Ergebnisse vorwegnahm. 1995 erschien dann als Reaktion auf vielfache Entgegnungen zu dem chronologischen Neuansatz für das Mittelalter ein ausführlicher Artikel über die Probleme der Dendrochronologie in ZEITENSPRÜNGE [Niemitz 1995], dem bereits 1991 an selber Stelle erste Überlegungen zur Datierung mittels Baumringchronologien durch H. Illig [1991] vorausgegangen waren.

Mit schöner Regelmäßigkeit war immer wieder das Argument aufgetaucht, daß schließlich die bestehende Chronologie durch die Dendrochronologie blendend verifiziert worden sei. Die Brücke zur C14-Methode ergab sich auch hier unmittelbar aus der Tatsache, daß die Dendrochronologie an die erste Stelle als Hilfswissenschaft der Chronologie gerückt war, weil die C14-Methode ohne deren Kalibrierhilfe wertlos geworden war.

Den Stand unserer Arbeit zu C14 und Dendrochronologie faßten wir in einem längeren Artikel zusammen, der im August 1996 in ZEITENSPRÜNGE erschien. Er gab eine Ansicht über die Ursachen für die in Baumringsequenzen dokumentierten Schwankungen der C14-Konzentration wieder, die wir in der Folgezeit erheblich differenziert haben.

### 5.3 Unsere Starthypothese

Eine unserer ersten Verwunderungen – wir begannen unsere Diskussionen zu diesem Thema Mai 1995 während einer Autofahrt von München nach Berlin – bezog sich auf die Tatsache, daß Aktivitätsmessungen an Baumringen der letzten 500 Jahre zeigten, daß eine radiometrische Zeitbestimmung in diesem Zeitraum sinnvoll gar nicht möglich ist (vergleiche dazu Bild **5.3**). Während jede dendrochronologische Kalibrierkurve für C14 zunächst vom übergeordneten Trend her einen vernünftigen Eindruck macht, ergibt ein Zoom auf die zurückliegenden jüngsten Jahrhunderte ein derart erratisches Schwanken der Aktivität, daß ihre Zuordnung auf die historische Zeitachse ohne Vorwissen unmöglich wird.

Uns erschien es schon als ausgesprochen merkwürdig, daß gerade für den Zeitraum, der historisch am besten bezeugt ist, Datierungen mit der C14-Methode unmöglich sind. Sollte die grundlegend bessere Situation für die Zeit darauf zurückzuführen sein, so fragten wir uns, daß dort die Synchronisierungen der Baumringe so vorgenommen worden waren, daß sich die Kalibrierkurven glätteten – und sei es auch nur, weil weniger Material zur Verfügung

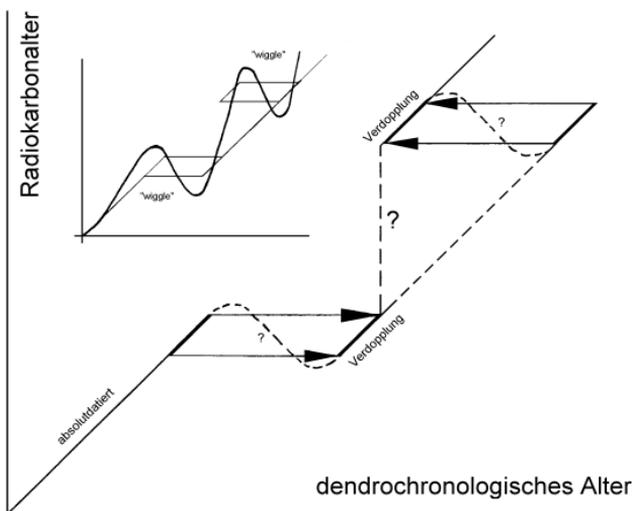
## 5.4 Wie entstehen »wiggles«? (I)

In dieser Phase unserer Untersuchung der C14-Methode waren wir noch gar nicht auf die Idee gekommen, daß ein Generalfehler der C14-Methode in dem bedingungslosen Anvisieren der Winkelhalbierenden bestehen könnte. So versuchten wir also, die ausgewiesene geschwungene Form der Kalibrierkurven einerseits und den sich aus der Mittelalterthese ergebenden Verdacht auf Verdopplung von Baumringsequenzen andererseits mit der von uns noch nicht hinterfragten Tendenz der Winkelhalbierenden zu vereinbaren.

Durch die Aufteilung und Hintereinanderlegung einer aus vielen Hölzern bestehenden Baumringsequenz (deren C14-Werte stationären Verhältnissen gemäß ausgebildet sein sollten) flachte sich die resultierende mittlere Kurve aber so sehr ab, daß im Anschluß daran wieder ein besonders steiler Bereich (in dem Bild schematisch als Senkrechte gezeichnet) anzufügen war, um wieder auf die Winkelhalbierende zurückzukommen. Sowohl diesen steilen Verlauf als auch die gegenläufige Verbindung der verdoppelten Sequenz (in dem Bild jeweils mit Fragezeichen versehen) hielten wir zu der Zeit für undenkbar. Wie soll die Kalibrierkurve das Vorzeichen umkehren können (ein älterer Ring sollte schließlich immer auch ein höheres C14-Alter aufweisen) und aufgrund welchen Effektes soll sich ein so steiler Verlauf herausstellen?

Wenn man das Ganze dann – wie in der oberen kleinen Grafik ausgeführt – durch eine Kurve mit jenem »cosmic schwung« ausgleichen würde, den bereits H.E. Suess [1970a, 310] bei der Vorstellung der ersten längeren Kalibrierkurve anlässlich des 12. Nobel-Symposiums für sich in Anspruch genommen hatte, dann machte das zwar einen besseren Eindruck, aber die Fragen nach möglichen Ursachen für die Umkehrung der Steigung wie auch für ihre Erhöhung gegenüber der Winkelhalbierenden waren damit nicht beantwortet. Erst später erkannten wir den Zusammenhang zwischen einem Ungleichgewicht von C14-Produktion und C14-Zerfall mit der

Steigung der Kalibrierkurve. Wenn die Produktion höher liegt als der Zerfall, dann liegt die Steigung der Kalibrierkurve oberhalb der Winkelhalbierenden, anderenfalls liegt sie darunter. Solange man aber nur Produktion und Zerfall betrachtet, kann es keine Umkehrung der Steigung geben (dazu weiter Bild 5.9).



stand? In jedem Fall erschien es uns angebracht, diese »wilde« Tendenz der C14-Aktivität grundsätzlich auch für die weiter zurückliegende Vergangenheit zu unterstellen. Wir waren damit aufgefordert, die zweifellos ästhetischen Kalibrierkurven erst einmal grundsätzlich anzuzweifeln. Aber wo sollte der methodische Fehler liegen?

H.-U. Niemitz hatte einen um 1980 herum stattgefundenen Methodenwechsel innerhalb der Dendrochronologie, nämlich von der visuellen zur statistischen Signifikanz, als ihren »Sündenfall« bezeichnet, denn von diesem Zeitpunkt an war die Vorgehensweise von Außenstehenden nicht mehr zu beurteilen und der Willkür (und der Willfähigkeit) eine Tür geöffnet. Kritiken an den »secret procedures« und »magic dates« auch von anderen Wissenschaftlern unterstrichen dieses Urteil [Niemitz 1995].

Wir waren uns im Klaren darüber, daß der in Frage stehende »Sündenfall« der C14-Wissenschaftler nun keineswegs darin bestand, die Notwendigkeit einer Kalibrierung an sich eingestehen zu müssen. Angesichts des erratischen Streuens der C14-Werte für die jüngsten zurückliegenden Jahrhunderte konnte dieser Sündenfall, so vermuteten wir eingangs, eigentlich nur darin bestehen, daß gleichaltrige Baumringe unterschiedliche C14-Werte aufweisen würden, man dies aber nicht zur Kenntnis nehmen wollte, weil dadurch jede Kalibrierung unmöglich geworden und damit das Ende der C14-Wissenschaft besiegelt gewesen wäre. Diese Ungenauigkeit würde vielmehr – so unser weitergehender Verdacht – dazu ausgenutzt, um ein Vorurteil über die Gestalt der Kalibrierkurve bedienen zu können: Stationäre Verhältnisse hätten in den vergangenen Jahrtausenden geherrscht, weshalb die Kalibrierkurve im wesentlichen der Form der Winkelhabierenden nachempfunden worden sei. Diese These erschien uns anfänglich aber als zu »eckig« und viel zu radikal, um sie mit Nachdruck weiter zu verfolgen. Wir vergaßen diese Argumentation sogar wieder und stießen später, als wir auf »Umwegen« zu eben dieser Schlußfolgerung gekommen waren, verwundert auf unsere diesbetreffenden Notizen, auch um festzustellen, daß wir – ebenso wie alle anderen – dem überragenden Image der C14-Methode und der Dendrochronologie aufgesessen waren. Trotz aller unbewußten Loyalität verfügten wir dennoch über einen gedanklichen Ansatz, der zu folgenreichen Fragen Anlaß geben sollte.

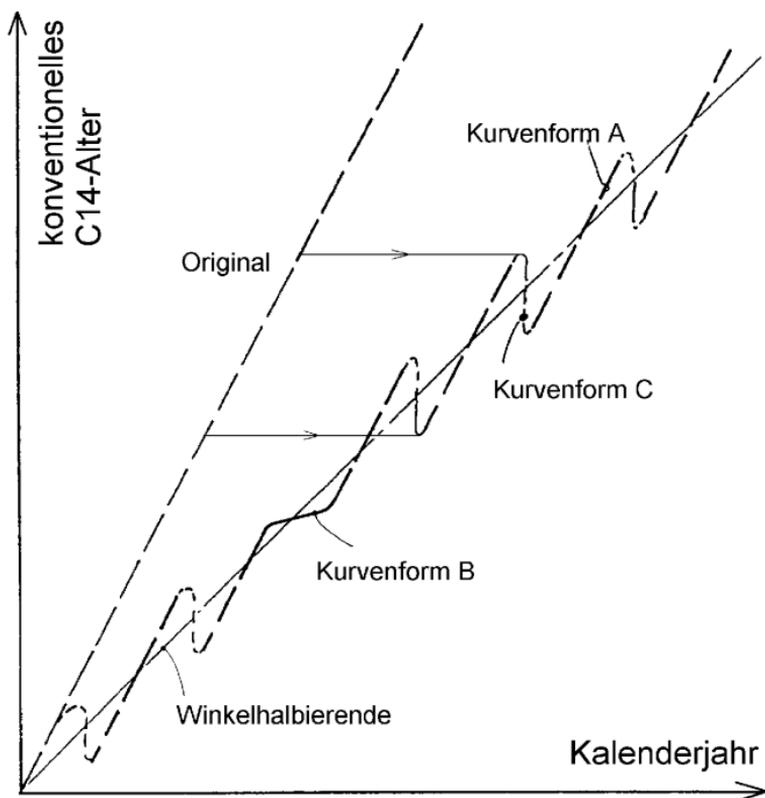
#### 5.4 »Dark ages«, Verdoppelungen und die Auswirkungen auf die Kalibrierkurve

Ausgangspunkt für unsere Suche nach einem möglichen methodischen Sündenfall der C14-Methode war eine Behauptung, die der These vom künstlich verlängerten Mittelalter inhärent ist, nämlich daß alle relevanten Baumring-

### 5.5 »Wiggle« können durch Verdopplungen entstehen

Mit den C14-Werten vor Augen, die an einem neuseeländischen Kauri-Baum gemessen worden waren (Bild 2.4), und der Tatsache gewärtig, daß noch weitere Bäume signifikant steilere Kalibriergeraden aufwiesen (vgl. Kapitel 2.3), identifizierten wir zeitweise als wahren Grund eines »wiggle« die erzwungene Platzierung derartiger schwimmender Baumringsequenzen auf der für stationäre Verhältnisse stehenden Winkelhalbierenden.

Die Bereiche »C« mit umgekehrter Steigung wären damit dem gewaltsamen Auseinanderreißen der steiler verlaufenden Kurve geschuldet und hätten sich auch durchaus unter dem Deckmantel ohnehin bekannter Meßwertstreuungen in die erkünstelte flachere Kurve einschleichen können. Erst als uns klar wurde, daß auch eine Diffusion – nämlich von C14-armem Kohlendioxid aus den Ozeanen in die Atmosphäre – diese Umkehrung der Kurve erzwingen kann, waren wir bereit, auch andere Erklärungen zu akzeptieren. Die C14-Methode kam dadurch aber nur vom Regen in die Traufe, denn die augenscheinliche Dynamik von Produktion und Diffusion machte jeden Gedanken an eine Stationarität der Verhältnisse zunichte.



chronologien (zeitlich gesehen) hinter dem fraglichen, künstlich eingeführten Zeitraum eine dreihundertjährige Wiederholung aufweisen müssen: Hölzer, die über einen Zeitraum von rund 300 Jahren synchron laufen, wären quasi halbiert und – diesen Zeitraum verdoppelnd bzw. den künstlichen Zeitraum wohl oder übel füllend – hintereinander gelegt worden [Illig 1991]. Das bedeutete, daß dann die Kreuzdatierung genau an der Nahtstelle, wo die richtigen 300 Jahre mit den verdoppelten aneinanderstoßen, falsch sein muß.

Was wären die Methoden der Dendrochronologie wert, wenn ein solcher Fehler – ohne Murren und ohne Aufmerken – praktiziert worden war? Tatsächlich sind zwei Zeitpunkte im Bereich des fraglichen Zeitraumes ausgesprochen dünn belegt – so dünn, daß nach den anerkannten Regeln der Dendrochronologie hier von einem gesicherten Anschluß nicht gesprochen werden kann [Niemitz 1995, 298f.]. Hilfe an dieser Stelle kam nur durch Einbindung von Hölzern, für die »historisch gesicherte« Daten beansprucht werden konnten. Das läuft im Sinne der chronologischen Kritik natürlich auf einen Zirkelschluß hinaus. Nirgendwo schien die Möglichkeit einer Fehlsynchronisierung und damit auch einer Verdopplung, d.h. Hintereinanderlegens eigentlich zeitgleicher Sequenzen so evident wie für die Nahtstellen des in Abrede gestellten Zeitraumes von 600-900 AD (siehe Bild 2.12).

Uns fiel natürlich auf, daß eine Kalibrierkurve durch solcherart Verdopplungen tendenziell verflacht wird (vergleiche Bild 5.4). Aber erst viel später stellten wir die Frage, ob die Kalibrierkurve nicht in Wirklichkeit viel steiler ausfallen müßte und ob sie nicht durch womöglich wiederholtes Auseinanderreißen und Verdoppeln lediglich künstlich auf stationärem Kurs, also auf der Winkelhalbierenden gehalten wurde, auf diese Weise die immergleichen Verhältnisse in der Natur suggerierend (vergleiche Bild 5.5)? Dann wäre die künstliche Mittelalterverlängerung ein Glücksfall für die C14-Wissenschaft, die mit einer viel steileren Kalibrierkurve in diesem gefährlichen, weil historisch noch relativ gut belegten Zeitraum erhebliche Probleme hätte, wieder auf den Pfad der aktualistischen Tugend – sprich: auf die Winkelhalbierende – zurückzukommen.

Es sei angemerkt, daß wir grundsätzlich stets sehr intensiv nach Indizien für künstliches Ältermachen (z.B. durch Verflachen der Kalibrierkurve) Ausschau hielten, denn alle Chronologierevisionen waren grundsätzlich mit Zeitverkürzungen (bzw. -eliminationen) verbunden. Zu diesem Zeitpunkt hatten wir die Brisanz der C14-Muster, die sowohl steilere als auch im Vorzeichen umgekehrt orientierte Kurvenabschnitte enthielten, aber noch nicht erkannt. So operierten wir mit der Verdopplung von Stücken der Winkelhalbierenden selber, die diese natürlich nur noch weiter verflachen konnten. Teilstücke mit

negativem Vorzeichen lösten noch keinen Alarm aus (siehe Diskussion in dem Bild **5.4**).

## 5.5 Die Rolle der Vordatierung in der Dendrochronologie

Die Komplettierung der europäischen Baumringsequenzen durch Zusammenfügen ihrer bis dahin gewonnenen schwimmenden Teilkalender ging, wie wir der Literatur entnehmen, mit ganz erheblichen methodischen Schwierigkeiten einher (vergleiche dazu Niemitz [1995]). Nur der Teil einer Sequenz, der komplett an die Jetztzeit angeschlossen war, konnte als Kalibriermaßstab für C14 genommen werden und deswegen mußte diese Mastersequenz ja auch so schnell wie möglich in die Vergangenheit ausgebaut werden. Während die Erstellung relativ kurzer Baumringsequenzen aus lokal gemeinsam aufgefundenen Proben noch recht gut vonstatten ging, war das Geschäft der weitergehenden Synchronisierung dieser Sequenzen bis hin zur Verschränkung mit dem an die Jetztzeit angeschlossenen Master äußerst mühselig. (Wir verstanden erst später, daß über die Komplettierbarkeit einer Baumringchronologie vor allem die Möglichkeit zur Vordatierung der zuzuordnenden Teilsequenzen entschied.)

Die an die Jetztzeit angeschlossene Chronologie wuchs in der historisch gut bezeugten Zeit quasi mit jeder gefundenen Baumprobe, solange diese mit anderen unabhängig datierbaren Funden vergesellschaftet war und als brauchbar im dendrochronologischen Sinne ausfiel. Eine Probe ohne Vordatierung synchronisieren zu wollen, bedeutete eine Sisyphusarbeit und wurde folgerichtig so weit es eben ging vermieden. Wir haben uns anlässlich der Diskussion dendrochronologischer Synchronisierungen immer gefragt, wie groß eigentlich das Verhältnis ist zwischen »schlechten«, d.h. von ihren abweichenden Eigenschaften her unsynchronisierbaren und entsprechend »guten« Baumringsequenzen, wobei natürlich nur letztere dann zu den »schwimmenden« Teilkalendern zusammengefügt wurden. Je mehr Baumringsequenzen am Ende als unbrauchbar übrig bleiben, desto dringlicher stellt sich die Frage, wie groß eigentlich die Wahrscheinlichkeit ist, daß die verwendeten Baumringsequenzen rein zufällig gepaßt haben?

Es war von Anfang an klar und in der Literatur auch immer wieder erwähnt, daß die C14-Methode die alles entscheidende Rolle bei der Vorsortierung und Vorplatzierung der »floating chronologies« in der gesamten Zeit vom Beginn des Postglazial bis mindestens zur Römerzeit spielte. Da C14 und Dendrochronologie Arm in Arm gingen und gehen, mußte ein Angriff auf C14 auch von der Dendrochronologie als Kampfansage verstanden werden.

Wir machten die Erfahrung, daß die Dendrochronologie nach Komplettierung der Baumringchronologien, d.h. nach dem Schließen aller Lücken zwischen den schwimmenden Teilchronologien durchaus bereit war, die C14-Methode wieder fallen zu lassen. Jegliche methodische Schwierigkeiten, die der C14-Methode nachzuweisen sei, färbe nicht auf die Dendrochronologie ab, da diese am Ende ausschließlich mit immanenten Methoden gearbeitet habe. Die Dendrochronologien seien nicht »C14-kontaminiert«.

Diese Argumentation seitens der Dendrochronologen überzeugte uns am Ende nicht. Es waren schließlich etliche Fehler bei der Synchronisierung bekannt geworden, die korrigiert werden mußten. Die bekanntgegebenen Synchronlagen können von Außenstehenden nicht überprüft werden, da das zugrundeliegende Material nicht veröffentlicht wird. Dendrochronologen waren sich untereinander teilweise in den verwendeten Methoden nicht einig. Und die Methoden, wie die regional gewonnenen Chronologien dann am Ende europaweit abgeglichen wurden, hatte nichts mehr mit den Methoden zu tun, die für den Umgang mit einzelnen Baumproben aus demselben Wuchsgebiet anerkannt waren, weshalb mindestens hier zusätzliche Hilfe in Anspruch genommen worden sein mußte.

Das war uns am Beginn unserer Untersuchung alles nicht bekannt. Deshalb beschränkten wir uns auf eine einfache Frage, die mit unserem Anfangsbefund zusammenhing: Wenn die C14-Aktivität für Baumringe, die aufs Jahr genau passen mußten, schon immer so geschwankt hatte wie in den letzten 500 Jahren, wie sollte eine radiometrische Vordatierung dann praktisch funktionieren? Wir erkannten an dieser Stelle, daß aus der Not eine Tugend gemacht worden war, indem die Schwankungen nunmehr anerkannt, zugleich aber als an allen Orten der Erde simultan auftretend angenommen worden waren (Simultanitätsprinzip) und damit letztlich sogar als zusätzliches Mittel der Synchronisierung herangezogen werden konnten.

## 5.6 Der »Längeneinwand« und seine Schwäche

Natürlich überprüften wir parallel zur Einkreisung des entscheidenden Hebels an der C14-Methode mögliche Argumente gegen unseren Ansatz. Wir formulierten als Antithese zur Annahme erheblich höherer Streuungen als eingestanden den auf uns selbst gerichteten »Längeneinwand«: Wenn auch nur eine Messung an einer jahrtausendalten zusammenhängenden Baumringsequenz existierte, die den unserer Meinung nach falschen Trend der bekannten Kalibrierkurven wiedergab, dann konnten wir »einpacken«.

## 5.6 »Notlügen und andere Statistiken«

Die Statistik bietet die Unterscheidung zwischen Nullhypothese, die man möglichst selten irrtümlich ablehnen will, und Alternativhypothese, die man erst übernehmen will, wenn ein Irrtum bei der Ablehnung der Nullhypothese nahezu ausgeschlossen ist. Erst wenn die Wahrscheinlichkeit, sich bei dem Verwerfen der Nullhypothese zu irren, unausweichlich niedrig geworden ist – üblicherweise kleiner 5 bis 1% –, dann wird man die Nullhypothese verwerfen.

Folgendes Beispiel aus dem »Handbuch der Statistik« verdeutlichte uns, daß man mit der Wahl der Nullhypothese das Ergebnis der Interpretation des Testergebnisses bestimmen kann: Auf einer vorhandenen Produktionsmaschine werden Teile mit einer bestimmten Ausschußquote gefertigt. Es ist zu testen, ob mit einer neuen Maschine Teile mit weniger Ausschuß gefertigt werden können. Die Bewertung des Ergebnisses aus einem Probelauf mit der fraglichen neuen Maschine hängt nun davon ab, was als Nullhypothese bevorzugt wird:

- a) Möchte man sich lieber sicher sein, die alte Maschine nur aus gerechtfertigten Gründen zu verschrotten, oder
- b) möchte man eher vermeiden, sich die Chance auf eine neue Maschine dadurch zunichte zu machen, daß man eine im Probelauf zufällig erhöhte Ausschußquote irrtümlich als Indiz für eine schlechtere Eignung nimmt?

Falls a) als Nullhypothese gewählt wird, dann dürfen (dem Beispiel entsprechend) höchstens 2 Fehlteile bei einem Probelauf der neuen Maschine gefertigt werden, falls hingegen für b) als Nullhypothese entschieden wurde, dann dürfen dabei bis zu 10 Fehlteile entstehen, ohne daß der Kauf der neuen Maschine in Frage gestellt wird. Es dürfte an dieser Stelle ausreichen, wenn wir für Libby's statistischen Umgang mit den neuzeitlichen Proben herausstellen, daß er »Gleichzeitigkeit« (und nicht etwa Ungleichzeitigkeit) als Nullhypothese ansetzte. Das Ergebnis aus einem üblichen Test zur Ermittlung der zugehörigen Irrtumswahrscheinlichkeit (F-Test) läßt sich wie folgt zusammenfassen: Libby zog es vor, lieber bis zu 97% der Proben irrtümlich als gleichzeitig, als auch nur 3% irrtümlich als ungleichzeitig einzuordnen. Als »Advocatus diaboli« in eigener Sache, als den Libby sich mit dieser Veröffentlichung durchaus verstand, hätte er selbstverständlich »Ungleichzeitigkeit« als Nullhypothese wählen müssen, wobei nach dem damaligen Stand der Technik eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 50% sicherlich akzeptiert worden wäre. Mit der festgestellten Irrtumswahrscheinlichkeit von mehr als 95% für die Nullhypothese der Ungleichzeitigkeit, die angesichts der Bedeutung der neuen Datierungsmethode für die Geschichte die einzig Angemessene gewesen wäre, hätte er die Akten über den Fall C14 schließen müssen.

Zweifellos liegt der oft unversöhnlichen Haltung von Vertretern unterschiedlicher wissenschaftlicher Theorien ein ganz ähnlicher Konflikt zugrunde. Während der Vertreter einer bereits seit langem etablierten Theorie nur ihre hundertprozentige Widerlegung als ausreichende Basis erscheint, eine Alternative zu ihr in Erwägung zu ziehen, ist der Vertreter einer davon abweichenden Theorie dazu weder in der Lage, noch sieht er sich überhaupt angehalten, eine Hürde von deutlich mehr als 50% überschreiten zu müssen.

Tatsächlich war das viel zu kurz gedacht, denn es müssen mindestens zwei, zumal örtlich weit auseinanderliegende Sequenzen existieren, um jenes für die Dendrochronologie so wichtige Simultanitätsprinzip zu bestätigen, und natürlich muß auch jede weitere Sequenz ebenfalls dazu passen. So gesehen zeigte die ganz wesentlich von dem Standard abweichende C14-Kurve des neuseeländischen Kauri-Baumes unmittelbar, daß das Prinzip als solches nicht stimmt (siehe Kapitel 5.13). Keineswegs darf diese selber aber als gültige Kalibrierkurve gewertet werden.

## 5.7 Libby's Schummelei

Wenige Wochen nach Beginn unserer intensiven Auseinandersetzung – wir waren sozusagen noch im Stadium des »Hausaufgabenmachens« – mußten wir zur Kenntnis nehmen, daß es gerade die größten Selbstverständlichkeiten sind, die sich am Ende als falsch herausstellen und die sich deswegen so hartnäckig halten können, weil über die ganze Zeit niemand es für möglich hält, daß nun gerade da etwas faul sein könne.

Wir stolperten zwar permanent über Indizien für große Streuungen der C14-Aktivität, hatten aber mit der daraus zu ziehenden, naheliegendsten Schlußfolgerung Probleme, weil eines doch ganz sicher zu sein schien: Gleichaltrige Proben weisen auch den gleichen C14-Gehalt auf, weil sich das produzierte C14 so schnell vermischt. Diese Gebetsmühle stellten wir auch deswegen nicht in Frage, weil Libby, der Mentor der C14-Methode, das nun als erstes überprüft und auch verifiziert hatte. Die Ergebnisse waren 1949 in einem der renommiertesten Wissenschaftsjournale erschienen, in SCIENCE. Für uns gab es keinen Grund, gerade das in Frage zu stellen. Wir konnten davon ausgehen, daß seinerzeit eine Überprüfung mit negativem Resultat zwar Bedauern ausgelöst hätte, aber doch zum Abbruch des noch völlig unbekanntem Verfahrens geführt hätte. Weit gefehlt!

Eigentlich nur als »Pflichtübung« vorgesehen, analysierten wir Libby's »Weltweite Untersuchung moderner C14-Proben« von 1949, für die er eine wahrlich beruhigende Streubreite von  $\pm 50$  Jahren angab. Die routinemäßige graphische Aufbereitung seiner zugrundeliegenden Meßwerte ergab aber ein völlig anderes Bild, nämlich eine unsystematische Streuung von  $\pm 500$  Jahren. Nur durch einen statistischen Trick konnte er diesen Fehler letztlich um 90% reduzieren (zur Einstimmung in das Thema »Statistik« vgl. Textbox **5.6**, für entsprechende Details Kapitel 7).

Auch vierzig Jahre nach dieser Pioniertat ist die statistische Schönrechnung derart hoher Streuungen gang und gäbe, und wir sind mittlerweile sehr

vorsichtig bei der Interpretation bloßer Jahresangaben inklusive Fehlerbreite geworden (ob nun kalibriert oder nicht), weil wir lernen »durften«, wie man aus einer Menge an sich zweifelhafter Meßwerte just den Mittelwert konstruieren kann, den man eigentlich erwartet. Die Unterstellung, vor der man sicher am stärksten zurückschreckt, nämlich die der Daten-Manipulation, ist offenbar doch gerechtfertigt, wobei wir annehmen, daß hier ein »Aber das ist doch üblich so!« als Erwidern zu erwarten ist und alle auf Libby verweisen können, weil dieser schließlich damit angefangen hat.

Erst viel später machten wir uns klar, daß das, was wir heute »Schummelei« nennen müssen, damals keine gewesen ist, sondern eher die konsequente Ausbeutung<sup>12</sup> eines für wahr gehaltenen Arbeitsprinzips der Natur, des Aktualismus. Dieser besagt, daß wesentliche Randbedingungen für die irdischen Lebewesen sich nicht ändern, weil diese sonst nicht überlebt hätten und – über weit längere Zeiträume betrachtet – sich auch nie hätten entwickeln können. Auf der Basis dieses Prinzips vollzog man keine statistische Schönfärberei, sondern brachte vielmehr das zweifellos nicht einwandfreie Meßmaterial so in Ordnung, daß wieder Einklang mit gewissen Selbstverständlichkeiten herrschte. Es ist diese spezielle Ökonomie Libby's, die uns letztlich zu dem Schluß veranlaßt, daß die C14-Methode in der an Bedeutung gewinnenden katastrophischen Natursicht keinen Bestand haben wird. Und es sind die vielen anderen Fakten, die uns zu der Aussage führen, daß diese Methode auch für einen überzeugten Aktualisten von entscheidend geringerem Wert ist, als ihr heute sowohl in Fachkreisen als auch in der Öffentlichkeit zugebilligt wird.

Mit der Entdeckung von Libby's Schummelei fielen einige unserer Hemmungen ab. Wir hatten immer gehant, daß bei den Anwendern der Methode stets ein gerüttelt Maß an Blindheit gegenüber eigenen dummen Fehlern im Verein mit entwaffnender Selbstsicherheit, am Werke gewesen sein mußte. Hier hatten wir nun ein hartes Indiz dafür, daß sich die C14-Gemeinde tat-

---

<sup>12</sup> Uns fiel ein ähnlicher Fall auf, wonach dem berühmten Naturforscher E.H. Haeckel (1834-1919) vorgeworfen wird [F.A.Z. 20.08.97], er habe seinerzeit die Beweise für das »Biogenetische Grundgesetz« erfunden bzw. gefälscht. Tatsächlich hatte Haeckel in der Berliner Volkszeitung vom 29.12.1908 freimütig bekannt, »daß ein kleiner Teil meiner zahlreichen Embryonenbilder wirklich gefälscht ist – alle jene nämlich, bei denen das vorliegende Beobachtungsmaterial so unvollständig und so ungenügend ist, daß man bei der Herstellung einer zusammenhängenden Entwicklungskette gezwungen ist, die Lücken durch Hypothesen aufzufüllen.« Haeckel konnte in dieser Tat gar nichts Verwerfliches erkennen, weil er sich absolut sicher war, daß das Leben einer schrittweisen Höherentwicklung folgte und er folglich nichts dazu erfunden, sondern die Natur lediglich gemäß ihren »wahren« Arbeitsprinzipien ergänzt hatte.

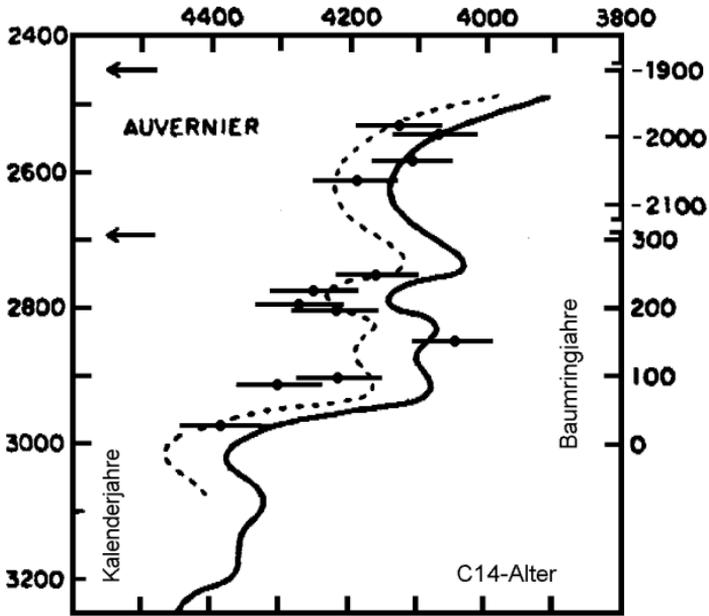
sächlich ein »dickes Ding« geleistet und zugleich kein Mensch bis heute öffentlich die entscheidenden dummen Fragen gestellt hatte. Es wurde am Anfang offenbar Hazard gespielt, ohne die Folgen (weltweite Beachtung und Verwendung sowie eine Fundamentierung aller Absolutchronologien der Menschheitsgeschichte) richtig zu gewärtigen. Später fanden wir einen Redebeitrag Libby's von 1965, der die Entwicklung der C14-Methode auf eine Sehnsucht, der Realität entfliehen zu können, zurückführte, die gerade in den Wissenschaftlern gewurzelt habe, die sich zuvor während des 2. Weltkriegs in Projekten mit kriegsentscheidender Bedeutung engagiert hatten. Es sei ihr Verlangen gewesen, etwas Nutzloses, etwas Unpraktisches zu entdecken, etwas, das wohl interessant, letztlich aber unbedeutend, sprich: keine Mega-Waffe mehr sein sollte.

## 5.8 Vordatierung durch C14-Mustervergleich

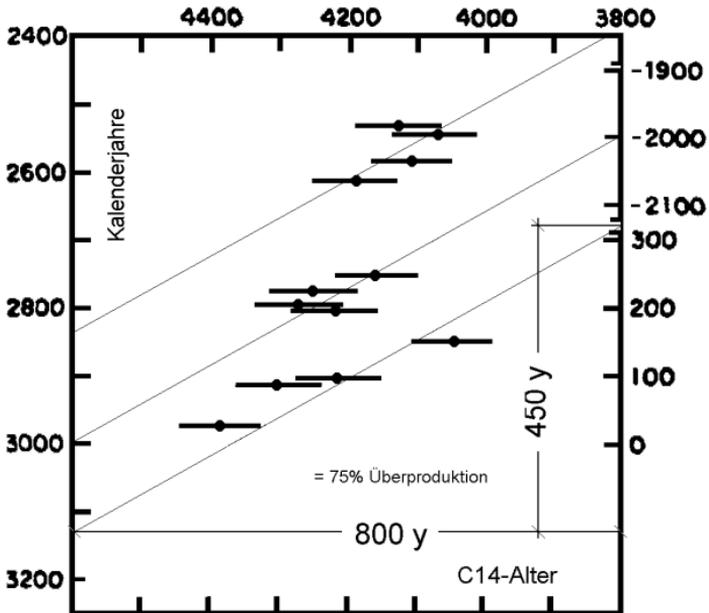
Den ersten Hinweis auf den Vergleich charakteristischer (also nicht-erratischer) C14-Muster fanden wir in einem Artikel von B. Becker aus einem Tagungsband, der den vierzigsten Jahrestag der Veröffentlichung von Libby's entscheidenden Artikeln in SCIENCE feierte. Becker verwies in dem Zusammenhang auf einen mittlerweile mehr als dreißig Jahre alten Artikel über die Absolutdatierung einer »schwimmenden« Baumringchronologie, die seinerzeit drei neolithische Ausgrabungsstätten in der Schweiz umfaßte (vergleiche Bild 2.5). Diese Teilchronologie konnte an die damals existierenden europäischen Eichenchronologien nicht angeschlossen werden, weil diese nicht weit genug in die Vergangenheit zurückreichte. Wie konnte es dann trotzdem zu der Absolutdatierung kommen?

Ein charakteristisches Muster der C14-Aktivitätsschwankungen innerhalb dieser Schweizer »schwimmenden Chronologie« war (anstatt sie als Indiz für die Fragwürdigkeit der Methode an sich zu nehmen) mit einem entsprechenden Muster aus einer kompletten Chronologie abgeglichen worden, die zuvor C.W. Ferguson aus Sequenzen der amerikanischen Bristlecone-Pine errichtet hatte. Diese komplette Chronologie wurde allerdings erst drei Jahre später, nämlich 1969, in Auszügen veröffentlicht. Zu diesem Zeitpunkt wunderte uns diese »Verzögerung« noch nicht, erst als uns klar geworden war, daß die Bristlecone-Pine-Chronologie nur mit Hilfe der Vorgabe quasi-konstanter C14-Konzentration in der Atmosphäre entstanden war, fiel uns auch diese methodisch unzulässige zeitliche Inversion auf.

Die »Muster« waren in unseren Augen wenig aufschlußreich, ja geradezu nichtssagend. Deshalb vermuteten wir, daß dieses Verfahren des Musterver-



Originalgraphik



Unsere Bearbeitung

### 5.7 Falsche Synchronismen?

Das obere Bild demonstriert den Versuch zur Absolutdatierung zweier schwimmender Baumringsequenzen aus Auvernier am Neuenburger See (Schweiz) durch »wigggle-matching« gegen die Bristlecone-Pine-Baumringchronologie (durchgezogene Linie) [Suess/Strahm 1970, 94]. Die gestrichelte Linie – »drawn by hand« – soll den unterstellten Verlauf der europäischen Meßwerte synchron zu der amerikanischen Kalibrierkurve demonstrieren, wobei H.E. Suess und C. Strahm eine systematische Altersdifferenz konzedieren müssen.

Dieser in einer Zeitschrift für Altertumsgeschichte (Antiquity) veröffentlichte Datierungsversuch ist sehr skeptisch aufgenommen worden. J. Collis argwöhnte, daß die der verwendeten Methode zugrundeliegende Annahme weltweit gleicher C14-Fluktuationen falsch sein müsse und klagte eine von der Bristlecone-Pine-Chronologie unabhängige Baumringchronologie ein, um diesen fundamentalen Verdacht aus der Welt zu schaffen [MacKie et al. 1971, 201]. Unser Eindruck war, daß einigen Historikern ob dieses ziemlich dreisten Vorgehens gewissermaßen die Hutschnur geplatzt war und sie hier – auch angesichts eingestandener Unzulänglichkeiten – einen der wenigen günstigen Moment sahen, eine klare Zurückweisung der C14-Methode formulieren zu können.

Wir stellten an dieser Stelle eine radikale Hypothese auf, deren Stoßrichtung im unteren Bild zu erkennen ist. Wir hatten bei einer ersten Lektüre dieses Artikels bereits am Rande notiert, daß die »Meßpunkte vorzugsweise (bzw. nahezu ausschließlich) am aufsteigenden Ast« plaziert waren. Ohne die Details der Sequenz zu kennen, stellten wir fest, daß die drei Meßwerthaufen wesentlich sauberer jeweils separat durch Geraden mit einer überhöhten (hier für alle drei gleich angesetzten) Steigung zu approximieren waren. In der Approximation von Suess und Strahm fallen drei Werte völlig aus der Kurve heraus, was deren Vorgehensweise ohnehin sehr problematisch macht. Dieser Ansatz bedeutete, daß die dendrochronologische Synchronisierung nicht korrekt war, und daß zugleich eine prinzipielle C14-Überproduktion von ca. 75% geherrscht hätte.

Der Datierungsversuch für die Proben aus Auvernier konnte als Fallbeispiel für »Wiggeln durch Auseinanderreißen« (Bilder 5.4, 5.5 und 2.16) interpretiert werden. Er machte deutlich, wie dringend die Historiker im allgemeinen und die Dendrochronologen im speziellen auf Hilfe bei der Absolutdatierung angewiesen waren. Auch wenn das Vorgehen in diesem Fall auf heftige Kritik stieß, so gab es während der nächsten zehn Jahre eine Kontinuität in der Ausschlichtung solcher »Synchronismen« für den Aufbau der europäischen Eichenchronologien, die ohne »tentative« Absolutdaten aus Amerika bis heute noch keinen Erfolg hätten vermelden können.

gleichs in diesem ausgesprochen indifferenten Fall nur als Nachspiel oder Nebenschauplatz einer zuvor an weit geeigneteren Objekten entwickelten Methodik zu interpretieren war. Doch an welchem Objekt sollte sich diese bereits »bewiesen« haben? Gab es dafür entsprechende Veröffentlichungen? Zwei Dinge notierten wir an dieser Stelle:

- 1) Wenn diese Methode des C14-Mustervergleichs als Ersatz für dendrochronologische Methoden bei der Errichtung einer Masterchronologie herangezogen worden war und die C14-Aktivität sich auch nur annähernd so erratisch benähme, wie wir vermuten mußten, dann wäre eine solche Baumringchronologie im nachhinein keinen Pfifferling wert.
- 2) Wir verstanden nicht, wieso die europäischen Baumringchronologien, deren entscheidender Ausbau lange Zeit eingestandenermaßen stagniert hatte, später dann auf einmal doch komplett und ohne Lücken dastehen sollten, wie es von Becker in dem erwähnten Artikel angegeben wurde. Waren sie etwa auch mit Hilfe dieser Mustervergleichsstrategie und womöglich in Abhängigkeit zur amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie anstatt nach der »reinen Lehre« der Dendrochronologie auf die Welt gekommen?

## 5.9 Kaum zu glauben: Alles ist über C14-Mustervergleich vodatiert

Mit der zweiten Fragestellung hatten wir unserem damaligen Verständnis nach die Situation eines klassischen »Experimentum crucis« erreicht. Die »offizielle« Geschichte sprach immer von einer C14-Kalibrierung an methodisch unabhängig gewonnenen Baumringchronologien. Wenn sich jetzt herausstellen sollte, daß die Dendrochronologie ihrerseits auf die C14-Methode angewiesen gewesen ist, um ihre Sequenzen ausreichend sicher vodatieren zu können, dann hatte die Dendrochronologie in unseren Augen ihren Status als unabhängige Wissenschaft verloren.

Wenn Dendrochronologen glaubten, daß C14-Muster global vergleichbar waren, dann benutzten sie dieses Hilfsmittel natürlich auch – zumal in der prekären Situation schleppenden Fortschritts im Ausbau der Chronologien –, womit die Baumringchronologien allerdings »radiokarbonverseucht« waren (Beispiel in Bild **5.7**). Jeder Hinweis, daß die C14-Muster imaginär waren, unterminierte dann nicht nur die Grundlagen der C14-Methode, sondern zielte zugleich direkt auf die Brauchbarkeit der Baumringchronologien, für deren Synchronlagen es keine Fehlertoleranz geben kann, sondern grundsätzlich nur ein »richtig« oder »falsch«.

Es sei angemerkt, daß wir anfänglich nur auf Hinweise der theoretischen Brauchbarkeit der C14-Muster für die Synchronisierung schwimmender Baumringsequenzen stießen, ehe wir das erste »Geständnis« eines Dendrochronologen, sich bei der Einordnung auf C14-Mustervergleich zu stützen, schwarz auf weiß zu Gesicht bekamen. Am Ende war klar, daß alle europäischen Eichenchronologien auf diese Weise C14-»verseucht« sind. Wir nahmen zur Kenntnis, daß die Vorplazierungen über C14 später teilweise auf wenige Jahre genau von der dendrochronologischen Nachbehandlung bestätigt wurden. Im Zusammenhang mit der generellen Fragwürdigkeit der Datierbarkeit durch C14 erscheint uns das aber als Indiz für die Indifferenz der Dendrochronologie, die mehrmals Fehler zugeben mußte, nachdem die kritische Stelle zuvor aber als »überzeugend« akzeptiert worden war.

### 5.10 »fact-matching« in Sachen »wigggle-matching«

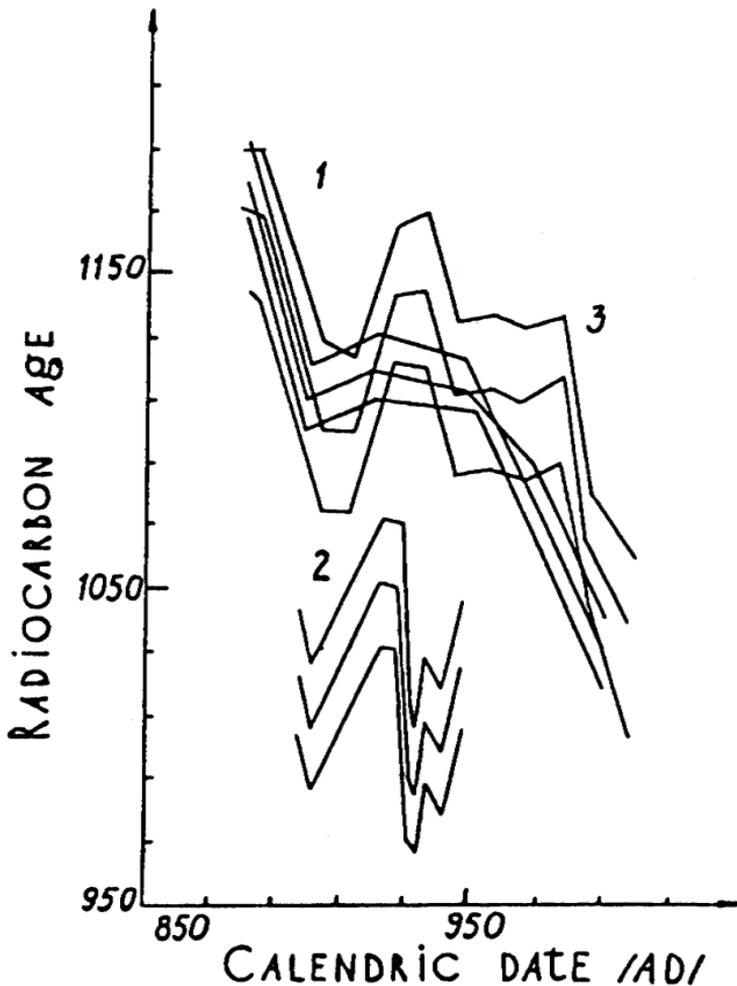
In dem Moment, wo wir merkten, daß alle europäischen Eichenchronologien wegen eines intensiven transatlantischen Datenverkehrs »radiokarbonverseucht« waren, versuchten wir, die Abfolge in dem Vorgang des internationalen »wigggle-matching« mittels »fact-matching« besser zu verstehen. Dazu mußten die wesentlichen Stationen der Konstruktion der Baumringchronologien in Kalifornien, Irland und Süd- sowie Westdeutschland auf einem Zeitstrahl angeordnet werden, um zu prüfen, welche Ereignisse auf welchem Kontinent welchen Ereignissen an den jeweils anderen Orten vorausgegangen war. So entstand gewissermaßen eine Chronologie wissenschaftlicher »wigggle«. In diesem Zusammenhang erfuhren wir einmal mehr, wie elementar wichtig eine exakte, unter Umständen sogar monategenaue Chronologie ist, wenn es um die richtige Identifizierung von Ursache und Wirkung geht.

Uns fiel sofort auf, daß jahrelanges »wigggle-matching« stattfand, ohne daß auch nur ein außenstehender Wissenschaftler in der Lage gewesen wäre, die Bristlecone-Pine-Chronologie, die dem Ganzen zugrundelag, prüfen zu können. Ebenso sprang ins Auge, wie lang der Zeitraum währte, in dem das Wohl und Wehe aller Kalibrierungen von eben dieser einen einzigen Chronologie abhing: von 1960 – dem Datum, an dem die Nicht-Konstanz der C14-Startaktivität in der Vergangenheit anerkannt und das Fundamentalprinzip fallengelassen wurde – bis mindestens 1984. Ganze zehn Jahre – von 1960 bis 1969 – mußte auf die endgültige Fertigstellung dieser Chronologie gewartet werden, und in dieser Zeit des Abwartens konnten sich die Zweifel der Historiker gehörig anstauen. Nur aus dieser prekären Situation heraus ist die hastige und

### 5.8 Was ist mit dem Simultanitätsprinzip?

Das Bild gibt Auszüge aus Kalibrierkurven für das Ende des ersten nachchristlichen Jahrtausends wieder: 1) aus Daten von Stuiver und Becker [1986]; 2) aus Daten von Popov et al. [1993]; 3) aus Daten von Stuiver und Pearson [1986].

Popov et al. sahen mögliche Erklärungen für die Abweichung von im Mittel 100 Jahren in unterschiedlichen Klimata oder in unterschiedlichen Handhabungen der Berücksichtigung der Isotopenfraktionierung. Es ist zu bemerken, daß der Altersunterschied äquivalent zu einem Prozent der Meßwerte ist. Aber wenn Deutsche und Iren gleiche Werte haben, warum dann nicht auch die Russen (siehe auch Zaitseva/Popov [1994])?



ohne Nachfragen vollzogene Akzeptanz der Bristlecone-Pine-Chronologie zu verstehen.

### 5.11 C14-Ideologie und Chaos-Theorie

Eine weitere Frage entwickelte sich aus der Analyse des erratischen Verhaltens der C14-Konzentration: Wenn aus dem Aktivitätsverhalten der letzten 500 Jahre eine Tendenz kaum abzulesen war – die C14-Produktion konnte zeitweise ebensogut Null sein wie auch ein Mehrfaches dessen betragen, was für gewöhnlich als »gültiger« stationärer Wert angesehen wird –, wie konnte dann die Kalibrierkurve aus den Tiefen einer Vergangenheit vor 12.000 Jahren auf eine Weise in die Gegenwart münden, daß die summarische Diskrepanz zwischen Produktion und Zerfall des C14 in der Größenordnung von lediglich 10% blieb? Oder umgekehrt: Wie konnte man es wagen, die augenblicklichen Verhältnisse nur mit marginalen Änderungen quasi 12.000 Jahre in die Vergangenheit fortzuschreiben, wo doch die umgebenden Jahrhunderte – die mit den sichersten Absolutdaten – so breite Aktivitätsstreuungen aufwiesen (siehe auch Bild **5.8**)?

Die Organisation der Natur, soweit sie mathematisch beschrieben werden kann, ist von nicht-linearen Zusammenhängen geprägt: Kleine Ursachen können große Wirkungen haben. Im Rahmen moderner Systemtheorie wäre die Ausgangssituation eher dazu geeignet, nach entsprechenden Sprüngen in der Systemorganisation zu suchen, d.h. nach den Zeitpunkten, an denen sich die Randbedingungen für die Naturabläufe und damit auch für die Dynamik der C14-Konzentration der Atmosphäre neu einstellen. Unter solchen Vorgaben würden ganz andere Korrelationen gesucht und sicher auch andere Ergebnisse gefunden werden, als es die fast unbegrenzte zeitliche Fortschreibung eines nahezu unveränderlichen Zustandes erbringen kann.

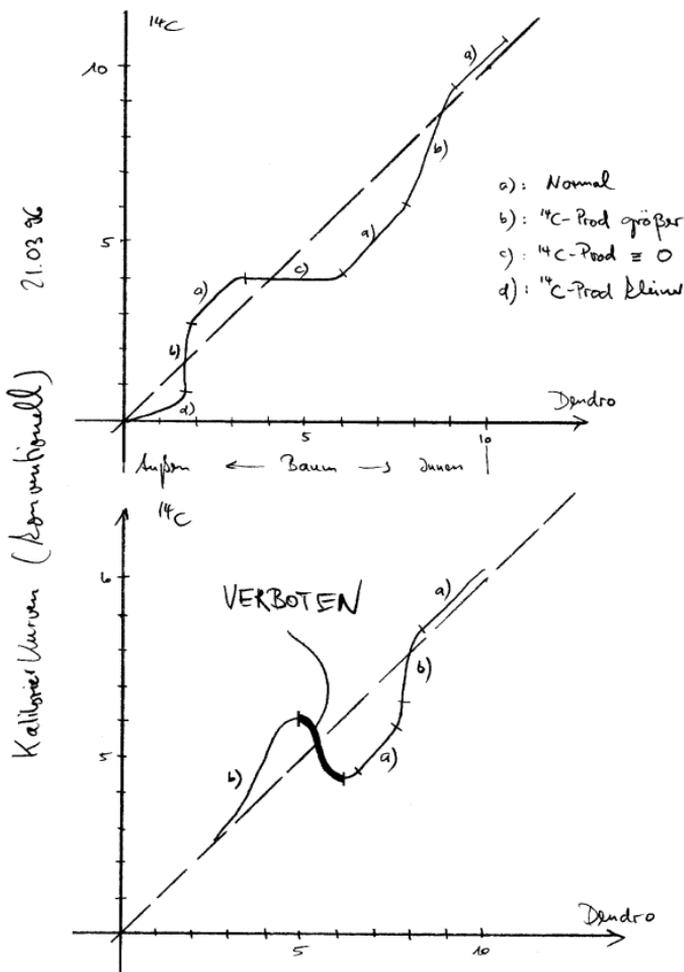
Die in den bekannten Kalibrierkurven implizit gegebene Extrapolation von wenigen Jahren Forschung auf zehntausend Jahre Menschheitsgeschichte erschien uns wirklich bedenklich. War dieses suggestive Design unbewußtes Vorbild bei der Konstruktion der ersten Kalibrierkurve gewesen, an der sich die anderen Kalibrierkurven ausgerichtet hatten? Wir konnten diese Frage sehr schnell bejahen, wie gleich zu sehen sein wird.

### 5.12 »Wiggle kann es gar nicht geben!«

Im Laufe der systematischen Untersuchung des Themas »zufällige Schwankungen der C14-Aktivität« stellten wir der Vollständigkeit halber und keines-

## 5.9 Wie entstehen »wiggles«? (II)

Das hier in einer unserer ersten Skizzen als »VERBOTEN« bezeichnete Teilstück der Kalibrierkurve kann nur dadurch entstehen, daß die  $C^{14}$  Konzentration in der Atmosphäre schneller abfällt, als es der radioaktive Zerfall bei Nullproduktion von  $C^{14}$  zuläßt. Nullproduktion bedeutet für die Kalibrierkurve einen waagerechten Verlauf (hier Kurvenabschnitt c). Als wir die Größenordnung der Diffusionsraten, die indirekt aus den Kalibrierkurven zu folgern war, berechnet hatten und auf ein Vielfaches der radioaktiven Zerfallsrate kamen, gab es anfänglich nur das Urteil: »Wiggle kann es gar nicht geben!« Später wurde uns klar, daß eine solche Diffusion etwa an der Systemgrenze Atmosphäre/Ozean stattfinden kann – allerdings mit Sicherheit nicht global gleichförmig.



wegs aufgrund eines konkreten Verdachts die Frage, welcher Zusammenhang zwischen dem wellenförmigen Verlauf der Kalibrierkurven (dem radiochronologischen »Fingerabdruck«) und den als Ursache dafür allseits zitierten »kurzfristigen Schwankungen der C14-Produktion« grundsätzlich bestehen muß. Wie stark schwankte diese Produktion nun eigentlich, wo sie im Langzeittrend doch so gut wie konstant bleiben sollte?

Daß die C14-Aktivität kurzfristig – typisch um 100 C14-Jahre innerhalb von 100 Jahren, aber teils noch wesentlich kurzfristiger – schwankte, das war ja nun ausgiebig vorgemessen worden. Aber was bedeutete das für die C14-Produktionsrate, d.h. wie mußte sich die Produktionsrate verändern, damit diese für die Synchronisierung so bedeutenden und für die Dendrochronologie mittlerweile unverzichtbaren »wiggle« – wie die Musterschwankungen genannt wurden – entstehen konnten?

Diese Frage erwies sich nun als der entscheidende Augenöffner, denn eines wurde uns klar: »Wiggle« entstanden nicht durch Schwanken der C14-Produktionsrate allein, und mochte diese noch so wild sein, dafür bedurfte es zusätzlich mindestens auch einer phasenverschobenen quantitativen Ausgasung etc. von normalem Kohlenstoff C12 in die Atmosphäre. Über die ganze Bandbreite der möglichen Ursachen, die über die eben beschriebenen Zusammenhänge hinausgehen, bekamen wir erst im Laufe der folgenden Zeit Klarheit. Zusammenfassend konnte zu diesem Zeitpunkt festgestellt werden, daß die Produktionsraten von C14 und die Diffusionsraten von C12 gleichermaßen um einige 100% gegenüber dem – fiktiven – Normalwert schwanken müssen, um die Gestalt der Kalibrierkurve, wie sie heutzutage bekannt ist, hervorbringen zu können.

Weil uns das Impfen mit C12 zur Senkung der C14-Konzentration anfänglich unrealistisch erschien, schlossen wir zunächst rigoros auf die Nichtexistenz der »wiggle« (entsprechende Skizze Bild **5.9**) und kamen so natürlich ganz automatisch zu einem vernichtenden Urteil über alle Baumringsequenzen, die über »wiggle-matching« datiert worden waren. Diese Einschätzung spiegelte sich auch noch in unserem C14-Artikel in ZEITENSPRÜNGE von 1996.

Das Ausmaß der Exzeßproduktionen und -diffusionen mußte im Lichte der konventionellen C14-Theorie als absurd bezeichnet werden, denn unter solchen Umständen wäre die Annahme einer Quasistationarität völlig unrealistisch. Doch allem Anschein nach war dieser Zusammenhang niemals von irgendeinem der Beteiligten – weder von C14-Wissenschaftlern noch von Dendrochronologen – publizistisch bearbeitet worden. Alle Autoren zu diesem Thema hatten in »wiggle« lediglich einen Abdruck der Schwankung der C14-Produktionsrate gesehen und nicht erkannt, wie brisant das Beharren auf ihrer

Realexistenz für die fundamentalen Annahmen der C14-Methode eigentlich ist, weil die Betrachtung einer Diffusion entsprechenden Ausmaßes notwendig geworden war, die auch beim besten Willen nicht mehr als global gleichförmig auftretend vorauszusetzen gewesen wäre.

Die noch am einfachsten zu erklärenden Teilstücke der fraglichen C14-Muster, die die gesamte bekannte Kalibrierkurve überdecken, sind die mit einem steileren Anstieg als die Winkelhalbierende, die für stationäre Verhältnisse steht. Steilere Teilstücke folgen theoretisch direkt aus einer Erhöhung der Produktion von C14. Das »Alter ego« innerhalb jedes »wigggle«, der Teilbereich mit umgedrehtem Vorzeichen der Steigung, kann dagegen nur durch Impfung des Atmosphärensystems mit C12 entstehen, weil selbst eine auf Null gesetzte Produktion keine Umkehrung des Vorzeichens schafft. Das wäre aber mit Temperaturschwankungen verbunden, die gewöhnlich nur im Zusammenhang mit Eiszeitepochen gesehen werden.

Jedenfalls bedingte es den permanenten Austausch (kompensiert durch eine erheblich höhere Produktion als bisher angenommen) zwischen C14-reichem atmosphärischem CO<sub>2</sub> und C14-armem ozeanischem CO<sub>2</sub>. Alle paar hundert Jahre eine dicke Eiszeit? Das erschien uns absurd. Für diesen Stand der Diskussion blieb in unseren Augen nur eine realistische Lösungsmöglichkeit übrig, und die ging auf Kosten der Glaubwürdigkeit sowohl der C14-Wissenschaftler als auch der Dendrochronologen:

- 1) Die Streuung der Meßwerte – teils aus tatsächlichen Meßfehlern, teils aus der globalen Streuung der C14-Aktivität an sich gleichaltriger Proben – war so groß, daß ein retrograder Verlauf der durch die Meßwerte zu legenden Kalibrierkurve innerhalb des breiten »Meßwertkorridors« möglich wurde. (Vortäuschung global gleichförmiger Schwankung, Negierung erheblicher Meßwertschwankungen)
- 2) Die Baumringchronologien waren so erstellt worden, daß die C14-Werte in der Nähe der Winkelhalbierenden blieben, obwohl der tatsächliche Trend einen steileren Anstieg ausweisen muß, wie es die entsprechenden Teilstücke der »wigggle« anzeigten (Bild **5.5**).

Während Möglichkeit 1) durch eine systematische Zusammenfassung und Bewertung aller Fehlerquellen untersucht wurde (siehe das Kapitel 8), führte Möglichkeit 2) unmittelbar zu der Aufgabe, in der Literatur nach möglichst langen Ringsequenzen (alt gewordener) Bäume zu suchen, die an sich einen steileren Trend aufweisen.

### 5.13 Der »Skandal von Uppsala«

Es ist kaum Zufall zu nennen, daß wir sofort ein Beispiel für einen solchen Baum fanden, einen fast tausendjährigen Kauri-Baum aus Neuseeland, dessen Befund H.S. Jansen ursprünglich 1962 und dann erneut 1969 veröffentlicht hatte (immerhin anlässlich des legendären Nobel-Symposiums in Uppsala), ohne daß auch nur ein Wissenschaftler die Sprengkraft seines Befundes ernst genommen hätte.

Eine Kalibrierkurve auf der Basis dieser Ergebnisse würde beispielsweise das Alter einer konventionell auf 1200 BC C14-datierten Probe rund 1000 Jahre jünger ansetzen. Befunde mit demselben Trend ergaben sich auch für einen japanischen Baum (Yaku Sugi). Später wurde uns klar, daß »en passant« gemachte Bemerkungen über eine mehr oder weniger starke Neigung mancher Baumarten zur Ausbildung von Fehlringen mit C14-Daten zu tun hatten, die nur unter dieser Annahme einigermaßen mit der Stationaritätsannahme zu vereinbaren waren.

Natürlich waren wir nicht zufrieden, lediglich zwei Beispiele gefunden zu haben. Uns erschien es symptomatisch, daß wir die entsprechenden Veröffentlichungen zwar teilweise von Anfang an archiviert, deren Aussage jedoch gar nicht richtig verstanden oder nicht einmal zur Kenntnis genommen hatten. Erst als wir unsere Fragen klar formuliert hatten, fielen uns die Antworten unmittelbar ins Auge. Das erklärt uns auch zum Teil den »terra incognita«-Status der C14-Muster. Es gab ein Motiv, diese Muster nicht in Frage zu stellen und deshalb auch nicht nach quantitativen Verhältnissen zu fragen.

### 5.14 Die letzte Bastion

Bis hierher war unser Verdacht, daß C14-Muster dem Cross-dating von Baumringchronologien zwar dienlich, doch letztlich ohne reale Grundlage sind, nur durch Untersuchungen über die mangelnde Vergleichbarkeit von Labordaten genährt worden. Diese verböten es nach Ansicht der entsprechenden Kritiker, in »wobble« etwas anderes als ein Rauschen in den Meßapparaturen zu sehen. Doch mit unseren Schlußfolgerungen über die Irrealität dieser Muster und dem sich daraus zwingend ableitenden Hinweis auf die – sagen wir: unbewußte – Manipulation der zugrundeliegenden Baumringchronologien bekam das »wobble-matching« der europäischen Eichenchronologien mit der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie eine noch größere Brisanz.

Tatsächlich konnte nun sehr schnell sowohl für die irische als auch für die kontinentale Eichenchronologie festgestellt werden, daß Lücken, die mit den

gängigen dendrochronologischen Methoden nicht zu schließen waren, am Ende durch einen Vergleich der C14-Schwankungen mit denen in der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie überbrückt worden sind. Nicht mehr überraschen konnte uns in diesem Zusammenhang, daß für die mittlerweile erstellten »Hochpräzisionskalibrierkurven« die Hölzer der ursprünglich so fundamental wichtigen Bristlecone Pines nicht mehr verwendet wurden. Die Dendrochronologie als Hauptpfeiler der C14-Methode hatte damit die Seile zu ihrer »methodischen Jugendsünde« gekappt. An diesem Punkt angelangt, gab es unserer Auffassung nach nur noch eine Bastion, die den Zusammenbruch des ganzen Gebäudes verhinderte: die kalifornische Bristlecone-Pine-Chronologie. Solange diese als nach der reinen dendrochronologischen Lehre errichtet anzusehen war, mußte die daraus abgeleitete Kalibrierkurve – im Rahmen des systematischen Fehlers natürlich – als gültig erachtet werden, wie fragwürdig auch immer die Methodik des »wigggle-matching« sein mochte. Wenn eine europäische Kalibrierkurve anders als eine kalifornische aussehen muß, dann ist jede dendrochronologische Konstruktion, die diese fälschlicherweise nachzuzahlen versucht, korrupt zu nennen.

Wir machten die Erfahrung, daß die Bristlecone-Pine-Chronologie als »Heilige Kuh« behandelt wurde, was im Hinblick auf das Überleben der C14-Methode nun nicht weiter überraschend war. Tatsächlich gab es keine einzige »konventionelle« Veröffentlichung, die die Stationen des Vorgehens bei ihrer Erstellung abfragte und die die faktisch nur in Rudimenten veröffentlichten Daten zur Signifikanz der Synchronismen bewertet hätte. Selbst ein Kritiker der Dendrochronologie wie B. Newgrosh mag keine Hand an die amerikanischen Baumringchronologien anlegen, vielmehr seien diese »ohne Zweifel sicher« [1991/92, 64]. Die methodische Sicherheit käme hier auch aus der Verwendung von Spezies, deren Vertreter Tausende von Jahren alt werden. Es sei erwähnt, daß ihr geistiger Vater Ferguson selber eine Bestätigung seiner Chronologie durch eine weitere Bristlecone-Pine-Chronologie von 1973 bestritt, die in der wissenschaftlichen Welt aber als »das« (und letztlich auch als einziges) Signum ihrer Zuverlässigkeit gehandelt wurde.

Wer die Hindernisse und die Stagnation bei der Erstellung der europäischen Eichenchronologien nachvollzogen hat, kann sich über die Rasanz bei der Erstellung der Bristlecone-Pine-Baumringchronologie nur wundern. Angesichts der trotz aller Recherchen nebulös bleibenden Faktenlage beschloßen wir, es mit einer Arbeitshypothese zu versuchen, mit der wir die wissenschaftliche Öffentlichkeit konfrontieren wollten: der These nämlich, daß das Verfahren der Synchronisierung durch Mustervergleich – das »wigggle-matching« – für die Erstellung der Bristlecone-Pine-Chronologie erfunden wor-

den ist und ihr damit überhaupt erst zur Entstehung verholfen wurde und daß deshalb die Synchronisierung der schwimmenden schweizerischen neolithischen Baumringsequenzen – die für gewöhnlich als Geburtsstunde des »wigggle-matching« gilt – nur ein Nachspiel dieser Übung darstellte.

Würde uns auf der Basis neuer und uns bis dahin unbekannter bzw. unzugänglicher Information widersprochen, dann hätten wir das zur Kenntnis zu nehmen und gegebenenfalls Konsequenzen für unsere Argumentation zu ziehen. Sollten dagegen die Dendrochronologen abwinken und versichern, daß diese Auseinandersetzung unnötig sei, da die Vorgehensweise von Ferguson schon immer als suspekt gegolten habe, dann hätten wir ein weiteres Mal gelernt, warum Heilige Kühe gepflegt werden und warum man so gerne auf sie hereinfällt. Mittlerweile liegen uns aber so viele Indizien wider die Stichhaltigkeit der Bristlecone-Pine-Chronologie vor, daß wir an dieser Stelle keinen gewichtigen Einwand mehr erwarten (vergleiche die Liste der Argumente in Kapitel 2.3).

Wenn unsere These richtig ist, dann ist die heute akzeptierte Konstruktion der europäischen Eichenchronologie hinfällig. Bis heute kennen wir keinen Wissenschaftler, der sich für die Bristlecone-Pine-Chronologie in die Bresche werfen mag und uns Argumente nennen kann, wieso sie tatsächlich ohne schwerwiegende Fehler sein soll. So wird auch verständlich, wieso diese Chronologie, die auf einer Spezies beruht, die dendrochronologisch betrachtet viel schlechter zu handhaben ist als zum Beispiel die mitteleuropäische Eiche, so schnell fertig werden konnte.

Da zu dieser Zeit die Unveränderlichkeit der Randbedingungen für die Evolution der Erde wie ein Dogma behandelt wurde, leitete sich damit ein stationäres Verhältnis von Produktion und Zerfall von C14 und damit die Urform der Kalibrierkurve als Winkelhalbierende ohne weiteres ab. Daß die Kalibrierkurve für die ferne Vergangenheit wie ein umgekehrter schiefer Turm von Pisa in die Horizontale abbiegen will, ist möglicherweise dem Konstruktionskalkül geschuldet und spiegelte damit keine tatsächliche Tendenz der C14-Aktivität in der Vergangenheit wieder.

Es stützte unsere These über die methodische Fragwürdigkeit der Bristlecone-Pine-Chronologie ganz erheblich, daß etwa P. Dunwiddie, ein Kollege Ferguson's am Tree-Ring Labor in Tucson, 1979 einen Artikel über die Möglichkeiten und die Schwierigkeiten bei der Erstellung neuseeländischer Baumringchronologien veröffentlichte, ohne die noch zu Fergusons Zeiten üblichen »C14-Riten« zu vollziehen. Weder kommt die Bristlecone-Pine-Chronologie zum »wigggle-matchen« noch sonst irgendein C14-Datum bei der Erstellung bzw. Überprüfung der von Dunwiddie erstellten Tentativchronologien

zur Anwendung. Das schien angesichts der Diskrepanzen zwischen neuseeländischer und kalifornischer Kalibrierung auch nicht weiter verwunderlich. Während der Bristlecone-Pine-Chronologie öffentlich und weltweit so lange noch die Stange gehalten wurde, bis die europäischen Eichenchronologien im Hafan waren, schienen sich die Insider bereits von ihr abgewendet zu haben.

### 5.15 Die »Ozeanischen Transportbänder«

Kurz vor der Chronologie-Jahrestagung in Hamburg (Mai 1996) erhielten wir eine Werbebroschüre für *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* mit dem Abdruck eines Artikels über die »ozeanischen Transportbänder«, wie die globalen Strömungsmuster in den Weltmeeren genannt werden. Da auch in der Oktober-Ausgabe der Zeitschrift *WECHSELWIRKUNG* ein Artikel zu demselben Thema veröffentlicht wurde, gingen wir davon aus, daß dem Vorgang gerade aus meteorologischer Sicht eine aktuelle Bedeutung zugemessen wird. Tatsächlich entpuppte sich dieses Thema im Zusammenhang mit C14-Datierungen für das Spätglazial als wissenschaftlicher »Renner«.

Wichtig für unser Thema ist der C14-Gradient, der zwischen der Atmosphäre und dem Oberflächen- bzw. Tiefenwasser herrscht. Je länger der letzte Austausch mit der Atmosphäre her ist, desto ärmer ist die betreffende Schicht an C14. Kommt eine solche an C14 verarmte Schicht an die Oberfläche, dann sorgt der bidirektionale Austausch von Kohlendioxid zwischen Ozeanoberfläche und Atmosphäre, daß die Atmosphäre im Endeffekt an C14 verarmt, während der Ozean sich an der Oberfläche entsprechend mit C14 anreichert. Dieser Vorgang erschien uns als der bis dahin einzig aussichtsreiche Vorgang, wie die Atmosphäre ihren C14-Gehalt so stark absenken kann, daß dieser sogar unter den zuvor gestorbenen Organismen fällt, um auf diese Weise dem C14-Wissenschaftler den retrograden Verlauf der Kalibrierkurve zu bescheeren.

Die Tatsache, daß Anreicherung und Verarmung zeitlich lokal um ein Mehrfaches stärker als der radioaktive Zerfall ausfallen, ist uns der stärkste Hinweis, daß der übergeordnete zeitliche Trend der atmosphärischen C14-Konzentration auf keinen Fall in einer Extrapolation des gegenwärtigen Zustandes gesucht werden darf. So türmen sich natürlich die Probleme für die Dendrochronologie, die entweder anfänglich ihr Material an diesem angeblichen Verhalten ausgerichtet hat und später dann mit der nicht minder kritischen Annahme, daß an allen Orten der Erde dieselben C14-Schwankungen stattfinden sollten, die betreffenden Muster einfach synchronisiert hat. Falls es sich erhärtet, daß die ozeanischen Transportbänder massiv den C14-Haus-

halt der Atmosphäre beeinflussen, dann können völlig neue Fragen hinsichtlich der Datierung von Klimaumschwüngen und den damit verbundenen kulturellen Umbrüchen gestellt werden.

So betonen T.F. Stocker und D.G. Wright die sensible Abhängigkeit der C14-Uhr von einer Änderung des Isotopeninhalts der Ozeane, indem sie feststellen, daß es einer Änderung im C14-Inventar der Ozeane von lediglich wenigen Promille bedarf, um die Geschwindigkeit der C14-Uhr um 100% zu ändern (siehe dazu Kapitel 2.6, 9.6 und Bild **9.11**). Angesichts solcher Relationen muß C14-Wissenschaftlern und Dendrochronologen, die eine Kalibrierung verwalten, welche eine Konstanz der Kohlenstoffisotopenverhältnissen im ppm-Bereich (ppm = parts per million) voraussetzt, eigentlich Angst und Bange werden.

### 5.16 Korrespondenz

Wie abgehoben das Verständnis maßgeblicher Dendrochronologen hinsichtlich der Tragfähigkeit der C14-Methode ist, wurde uns auch durch einen Brief deutlich, der uns aus Irland erreichte. Dem Autor, Dendrochronologe von Beruruf und Passion, war seit längerem aufgrund eines übersandten Artikels der Zusammenhang zwischen unserer Kritik der C14-Methode und der sogenannten »Mittelalterthese« bekannt. Anlässlich eines Besuches in Deutschland hatte er erfahren, daß an dieser Front immer noch keine Ruhe eingekehrt war, sondern daß im Gegenteil ein Buch zu dem Thema »C14-Kritik« erscheinen soll und daß ein starkes publizistisches Interesse an der Mittelalterthese herrscht.

Es wurde in dem erwähnten Brief folgender Einwand gegen die These von dem künstlich verlängerten Mittelalter formuliert, der hier insoweit von Interesse ist, als ein Mißverständnis über die Beziehung der unterschiedlichen Chronologien – Historische Chronologie, Radiochronologie, Dendrochronologie – deutlich wird: Unter Zugrundelegung besagter Mittelalterthese würden diejenigen Ringsequenzen fehlen, die auf die fragliche historische Zeit (900-600 AD) datiert werden müssen bzw. datiert wurden. Somit entstünde eine Lücke in der Abfolge der radiometrischen Daten, bzw. ein Sprung in der Kalibrierkurve (vergleiche dazu Bild **5.10**), was dem radiometrischen und dendrochronologischen Befund nicht entspreche – weswegen die These eben auch unsinnig sei.

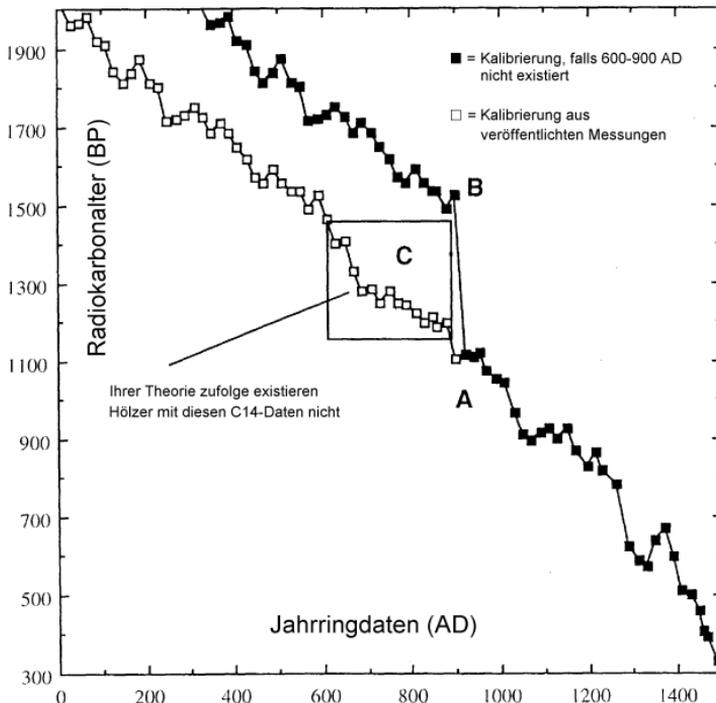
Tatsächlich unsinnig wäre es, gemessene C14-Alter (im Rahmen der ausgewiesenen Genauigkeit) zu leugnen: Es ist absolut realistisch, für jedes theoretisch mögliche C14-Alter auch einen Baumring zu finden, der dieses C14-

## 5.10 Lücken und Scheinlücken

Das Diagramm wurde uns von einem irischen Dendrochronologen mit der Frage vorgelegt: »Woher sollen die Hölzer mit den Jahrringen entsprechend 600-900 AD kommen, wenn C14-Daten zwischen 1100-1400 BP gar nicht existieren?«

Es liegt ein Mißverständnis vor, wenn unterstellt wird, daß eine Kürzung der historischen Chronologie auch eine Baumringchronologie entsprechend verkürzen müßte. Eine Änderung der historischen Chronologie wirft nur die Frage auf, ob dadurch Widersprüche zu anderen, unabhängig davon laufenden Chronologien entstehen. Die Dendrochronologie, die sich vor und nach dem fraglichen Zeitraum an der historischen Chronologie orientiert hat, muß sich natürlich die Frage nach einer Verdopplung gefallen lassen. Unter strenger Gültigkeit des Simultanitätsprinzips wäre durch diese Verdopplung ein gewaltiger »C14-wiggle« in der entsprechenden Kalibrierkurve entstanden, der nunmehr »geheilt« werden könnte. Da aber auch die C14-Daten gleichaltriger Hölzer streuen, muß eine dendrochronologische Verdopplung nicht notwendig einen solchen radiometrischen Niederschlag gefunden haben. Das Herausschneiden von 300 Jahren aus der Baumringchronologie ist Unsinn und signalisiert lediglich die völlige Abhängigkeit der Dendrochronologie von der historischen Chronologie.

Frage: Woher kommen die Hölzer in dem Kasten?



Alter durch die in ihm meßbare Restaktivität repräsentiert. Auf diesem Wege wird man auf Dauer immer eine Art lückenloser C14-Chronologie (was auch immer sie bedeuten möge) erstellen können, indem Baumringsequenzen nach dem von ihnen repräsentierten C14-Aktivitätsintervall geordnet werden (und zwar ohne sonstigen, insbesondere ohne dendrochronologischen Bezug). Ihre Abfolge zueinander wird dagegen in einer Baumringchronologie, die ausschließlich nach dendrochronologischen Gesichtspunkten erstellt wurde, mit der radiometrisch begründeten Abfolge nicht unbedingt übereinstimmen. Und die dendrochronologisch als signifikant erkannte Abfolge muß mit der richtigen historischen Chronologie auch nicht übereinstimmen. Jede Chronologie muß grundsätzlich als eine Welt für sich betrachtet werden.

Da diese Chronologien (hypothetisch) nach je eigenen Maßstäben erstellt wurden, berührt es einen Radiochronologen prinzipiell überhaupt nicht, wenn der Dendrochronologe eine Umstellung – gleich welcher Art – in seiner zuvor gefundenen Abfolge der Baumringsequenzen vornimmt. Genauso tangiert es den Dendrochronologen nur peripher (hier sitzt der Spruch einmal richtig), wenn der Historiker 300 Jahre aus seinem Kalender nimmt. Haben sich die drei Chronologen allerdings irgendwann einmal auf ein interdisziplinäres Synchronismus-Konzept geeinigt, dann kann keiner mehr etwas ändern, ohne den anderen direkt zu treffen. Wenn mit einer Korrektur der zuvor gemeinsam gefundene chronologische Konsens in Frage gestellt wird, dann ist zugleich die methodische Zuverlässigkeit aller anderen Wissenschaften berührt und eine Kritik erlaubt und auch wünschenswert. Wenn hingegen de facto ein Supremat der sich zur Korrektur entscheidenden Disziplin vorliegt, dann müssen die anderen Disziplinen wohl oder übel folgen.

Faktisch hat die Historische Chronologie für die nachchristliche Ära das Supremat gegenüber Dendrochronologie und C14 ausgeübt. Dendrochronologische Synchronismen blieben – in jedem Baumringlabor der Welt – ohne Chance, wenn sie mit »historischen Datierungen« im Konflikt standen. Für die grobe chronologische Plazierung historisch undatierbarer Sequenzen hat dagegen C14 ein Supremat gegenüber der Dendrochronologie ausgeübt, dem diese sich in Ermangelung anderer Unterstützung gerne unterwarf. Und für die Erstellung von absoluten C14-Chronologien führt die Dendrochronologie ein sowieso unumstrittenes Supremat gegenüber C14.

So gesehen muß die Dendrochronologie für den Fall, daß die historische Chronologie geändert wird, mit offenen Karten spielen und die Korrektur mitmachen, denn sie hat bereits zuvor mitgemacht und bestimmte Eckdaten übernommen, ohne immanente Kriterien ausreizen zu wollen oder zu können. Nicht die Geschichte wurde auf dem Rücken der Dendrochronologie errich-

tet, sondern umgekehrt und zwar – soweit die Geschichtsschreibung reichte und soweit es praktisch möglich war – aufs Jahr genau angepaßt. Wer die historische Chronologie mit der Dendrochronologie verteidigen will, verkennt völlig die tatsächlichen Abhängigkeiten. Die absolute C14-Chronologie ist selber sowieso komplett von der Dendrochronologie abhängig und wäre zum schweigenden Mitmachen verurteilt. Hat die Dendrochronologie nicht ohnehin der C14-Chronologie unzählige chronologische Verdoppelungen in Gestalt von »wiggle« beschert?

Wenn die Irische Eichenchronologie ohne externe Gewichtung durch historische oder radiometrische Hilfsdatierungen entstanden wäre (was nicht der Fall ist) und ein hölzernes Artefakt derart an ihr synchronisiert werden kann, daß ein entsprechendes Datum aus der historisch gewonnenen Chronologie repliziert wird, dann wäre das eine wechselseitige Stütze, die das Vertrauen in beide Chronologien untermauern könnte! Je mehr derartige »Replikationen« vorliegen, desto geringer wird die Wahrscheinlichkeit, irgendwann noch auf einen echten Asynchronismus zu stoßen.

Wenn aber Gewichtungen vorhanden waren (wie geschehen) oder von mehreren hölzernen Artefakten, die aus demselben archäologischen Zusammenhang stammen, etliche nicht synchronisiert werden können (was immer wieder der Fall ist), dann ist der Wert eines gefundenen Synchronismus entsprechend geringer und die Wahrscheinlichkeit, auf einen Asynchronismus zu stoßen, entsprechend hoch. Wer solche Asynchronismen für degoutant bzw. unmöglich hält, hat den Einfluß des Supremats der Historischen Chronologie für die letzten Jahrtausende auf alle anderen Chronologien nicht verstanden.

Unser Korrespondent versuchte, durch horizontale Verschiebung der vor 600 AD plazierten Ringe der Großen Baumringsequenz um besagte 300 Jahre eine vermeintliche Lücke zu heilen bzw. die Unsinnigkeit von der Annahme einer »Lücke« zu zeigen. Wenn jedoch zuvor dort keine Synchronismen vorhanden waren – und die hätten den dendrochronologischen Regeln zufolge geprüft werden müssen –, dann werden sie auch jetzt nicht zu finden sein. War also vorher alles in Ordnung gewesen, dann kann diese Baumringchronologie unverändert jede Revolution in der historischen Chronologie überstehen.

Wenn dagegen auch vor der Lücke Synchronismen zur Historie hergestellt worden waren, indem markante Daten – im Vertrauen auf die Stimmigkeit der historischen Chronologie gewissermaßen »evidenzmethodisch« – in die Formierung der Baumringchronologie geflossen sind, dann stürzen gegebenenfalls beide bzw. müssen beide Chronologien an einer bestimmten Stelle neu zusammengefügt werden. Wenn dadurch nun die C14-Chronologie einen

Bruch bekommen würde, dann stellen wir die Frage, ob nicht unter den bis dato unverwendeten Baumproben solche sind, die sich nunmehr sowohl radiometrisch als auch dendrochronologisch signifikant einpassen würden?

### 5.17 Der momentane Stand (1997)

Ursprünglich waren wir unzufrieden, für die Ungültigkeit der Bristlecone-Pine-Chronologie, aus der sich alle anderen Chronologien abgeleitet haben, lediglich einen Indizienbeweis führen zu können, indem wir den Widerspruch zwischen der erstaunlichen Schnelligkeit ihrer Komplettierung einerseits und den mangelhaften methodischen Voraussetzungen andererseits herausstellten. Aber angesichts der Summe der Merkwürdigkeiten, die wir auch im Kapitel 2.3 zusammengefaßt haben, änderte sich unsere Einschätzung nachhaltig.

Mit dem Kapitel 2 wollten wir zeigen, daß allein die Ausleuchtung der Chronologie der Ereignisse um die Entwicklung der Kalibrierung für C14 zeigt, daß es vor allem Vorurteile und weniger die Fakten waren, die die Entwicklung der Methode bestimmt haben. Das Pikante daran war natürlich, eine Hilfswissenschaft der Chronologie mit chronologischen Betrachtungen ad absurdum führen zu können. Diese chronologischen Betrachtungen zeigen, daß mit der Bristlecone-Pine-»Chronologie« bereits mehrere Jahre vor Veröffentlichung ihrer dendrochronologischen Daten kalibriert wurde und demnach die dendrochronologische »Synchronisierung« nur in einer Nacharbeit bzw. Nachbesserung bestanden haben konnte.

Die C14-Methode hat sich die ihr genehme Kalibrierung letztlich selber erstellt. Jede andere Form der Kalibrierung als die eines Spiegels stationärer Verhältnisse hätte verschärfte Fragen nach den Ursachen für das Ungleichgewicht aufgeworfen und über kurz oder lang das Simultanitätsprinzip abgeschafft. Damit wäre das »Projekt Kalibrierung« gestorben gewesen, denn für mehr als eine global gültige Kalibrierung hätten die Anstrengungen kaum gereicht. Und ohne das Simultanitätsprinzip hätte diese weder entstehen (wegen der Möglichkeit, mit C14 tentative Synchronisierungen zwischen dendrochronologisch nicht ausreichend signifikanten Hölzern herzustellen) noch angewendet werden können.

Wir erwarten bei der Untersuchung der Warvenchronologien und der arktischen Eiskernbohrungen ähnliche Probleme wie bei dieser Erstchronologie. Wenn sie ohne Rückgriff auf die Kalibrierkurve der Bristlecone-Pine-Chronologie zu denselben (oder ausreichend ähnlichen) Ergebnissen hinsichtlich der C14-Aktivität in der Vergangenheit kommen, dann ist das schlecht für unsere Argumentation. Wenn hier jedoch ohne kritische Fragen (und möglicher-

weise auf den ersten Blick gar nicht erkennbar) die vorhandenen Kalibrierkurven benutzt werden, um die mit Sicherheit ebenfalls schwimmenden Teilchronologien zu verknüpfen, dann haben Querverweise und -abstützungen etwa zwischen Dendro- und Warvenchronologie keinerlei Wert. Mit Interesse haben wir gelesen, daß z.B. eine Diskrepanz von mehr als 1.000 Jahren zwischen der dendrochronologischen und einer warvenchronologischen C14-Kalibrierung für die Zeit vor 2.400 Jahren festgestellt wurde (siehe dazu Kapitel 2.7). Wir sind äußerst neugierig, was für Zeit am Ende für eine methodisch einwandfrei rekonstruierte Chronologie des Postglazial – wenn das für die Einzelmethoden überhaupt möglich ist – übrig bleiben wird.

Unsere fast zweijährige intensive Beschäftigung mit der C14-Methode und der Dendrochronologie erscheint uns im Nachhinein auch als ein Akt permanenter Desillusionierung, was wissenschaftliche Selbstverständlichkeiten angeht. Wir fassen an dieser Stelle die wichtigsten Erkenntnisse zusammen, die uns jedesmal mit der Frage konfrontierten, welche Gewißheiten die Wissenschaftler dennoch bei ihren »Wahrheiten« bleiben ließen:

- Undatierbarkeit der jüngeren Vergangenheit mit C14.
- Libby's leichtfertige »Beweise« für Simultanitäts- und Fundamentalprinzip.
- Teilweise horrende Datierungsabweichungen auch bei Proben aus exquisit erschlossenen archäologischen Fundstellen.
- Fahrlässige Auslegung der Spielregeln für den statistischen Umgang mit streuenden Meßwerten.
- Verdrängung der markant abweichenden Kalibrierung mit dem neuseeländischen Kauri-Baum.
- Quantitatives Ausmaß der Diffusion, um die »wiggles« zu erklären.
- Negierung der Bedeutung der Ozeane als nachhaltige Störgröße für die atmosphärische C14-Konzentration; C14-Uhr reagiert hochsensibel auf kleinste Änderungen in der Isotopenzusammensetzung in den Ozeanen.
- Verwendung der Bristlecone-Pine-Chronologie als Kalibriermaßstab, bevor die dendrochronologischen Ergebnisse der Synchronisierung fertiggestellt worden waren.
- Kompletter »wiggles-match« der wesentlichen Europäischen Eichenchronologien gegen die Bristlecone-Pine-Chronologie.
- Ausmaß an »Fehlringen« einer Baumart wird auch aus dem C14-Gradienten abgeleitet.
- Laborfehler sind teilweise so hoch, daß auch ein mit der C14-Methode sympathisierender Archäologe »Auszeit« verlangen muß.

- Summe aller Korrekturfehler ist erschreckend hoch; noch erschreckender ist, daß diese für gewöhnlich nicht konsequent berücksichtigt werden.
- Die wenigsten C14-Daten werden so veröffentlicht, daß sie systematisch zu chronologischen Betrachtungen herangezogen werden können. Die C14-Chronologie der Weltgeschichte blieb ungeschrieben.

Die Welt der Wissenschaft ist extrem arbeitsteilig. Man verläßt sich auf Ergebnisse zahlreicher anderer Bereiche, ohne diese überprüfen zu können oder überprüfen zu wollen. Damit helfen vor allem die gutwillig geglaubten »Gewißheiten« der jeweils anderen, Fragwürdigkeiten innerhalb des eigenen Arbeitsbereiches auszusitzen, statt ihnen konsequent nachzugehen. Im Fall »C14 und Dendrochronologie« wurden wechselseitig die wesentlichen Gewißheiten im Zirkelschlußverfahren geboten. Im Ergebnis müssen beide Methoden gleichzeitig Konkurs anmelden.

### 5.18 Nachtrag zur Neuauflage (2000)

Unsere Vermutung, daß die Erstellung postglazialer Warvenchronologien ebenfalls mit grundlegenden methodischen Probleme verbunden gewesen sein könnte, hat sich bestätigt. Die berühmte spätglaziale Warvenchronologie G. De Geers aus dem frühen 20. Jahrhundert erfuhr im Laufe der Zeit zunehmend Kritik. Weitgehend unbekannt geblieben ist dagegen, daß derjenige Teil aus ihr, der die nachfolgende »Warmzeit« abdecken sollte, von Anfang an »schwimmend« war. Durchaus skandalös erschien uns auch, daß die empirischen Daten des warmzeitlichen Abschnitts über Jahrzehnte gar nicht zur Verfügung standen und erst 1985, also nachdem die europäischen Eichenchronologien feststanden, erneut ausgewertet, überarbeitet und publiziert worden sind. Für alle sonstigen holozänen Schichtfolgen kann festgestellt werden, daß ihre jährweise, geschweige denn jahrgenaue Entstehung in keinem Fall in befriedigendem Maße nachgewiesen werden konnte. Ohne die seit langem eingeschliffene »Gewißheit«, es mit einem Holozän von rund zehntausend Jahren Länge zu tun zu haben, würden viele, wenn nicht gar alle Ansätze zur Chronologiefindung bereits im Ansatz steckenbleiben (zusammenfassend Blöss/Niemitz [1998a-c]).

Wie aussichtslos ein Versuch zur Synchronisierung von Holzringdickenmustern bleiben muss, wenn Vordatierungen nicht zur Verfügung stehen, haben jüngst irische Dendrochronologen erneut demonstriert. Für einen bronzezeitlichen Pfahlkreis, der im Jahr 1998 bei Holme-next-the-Sea (Norfolk) entdeckt worden war, musste die Entscheidung, welche der drei möglichen Syn-

chronlagen in Beziehung zur Masterchronologie die richtige sei, mit Hilfe von C14-Datierungen gefällt werden [Groves et al. 1999, 479]. Da umgekehrt dieselbe Zwangslage natürlich auch für die wechselseitige Synchronisierung aller Bestandteile der etablierten europäischen Eichenchronologien gilt, wird ein weiteres Mal ihre zirkelschlußartige Erstellung deutlich:

- Ausreichende Sicherheit bei der Auswahl der richtigen dendrochronologischen Synchronlage gibt es nur über C14-Vordatierungen.
- Brauchbare C14-Vordatierungen gibt es nur auf der Basis eines Modells für den zeitlichen Verlauf des Verhältnisses von C14 zu C12 in der irdischen Atmosphäre.
- Ein ausreichend ergiebiges Modell für den zeitlichen Verlauf des Verhältnisses von C14 zu C12 in der irdischen Atmosphäre gibt es nur über die Annahme seines quasi-konstanten Verlaufs.
- Im Ergebnis werden C14-Daten an einem Maßstab kalibriert, dessen Konstruktion auf C14-Daten beruht, für die unhaltbare Annahmen über ihre chronologische Bedeutung getroffen worden sind.

In Anbetracht der enormen Abhängigkeit, den der zeitliche Verlauf des Verhältnisses von C14 zu C12 in der irdischen Atmosphäre von der Dynamik in den großen Kohlenstoffreservoirien der Erde, insbesondere den Ozeanen, aufweist, muß das ursprüngliche Konstanzmodell und mit ihm zugleich die Qualität aller Baumringchronologien, die auf entsprechenden C14-Vordatierungen beruhen, als falsch bezeichnet werden. So gibt es Indizien, daß die C14-Uhr zu schnell läuft und demnach 10.000 C14-Jahre für erheblich weniger Kalenderjahre gut sind.

G. Heinsohns und H. Illigs Forschungen zur Chronologie der Früh- und Vorgeschichte hatten auch ein kritisches Licht auf die Substanz des sogenannten Mesolithikums geworfen. Damit wird der Zeitraum zwischen dem Ende der jüngsten Eiszeit und dem Neolithikum bezeichnet. Das Neolithikum liegt stratigraphisch unter den Funden der Bronzezeit und besitzt damit eine unmittelbare chronologische Anbindung an die geschichtliche Zeit. Die Fundarmut des Mesolithikums – das nach herkömmlicher Chronologie immerhin für die Hälfte der Warmzeit gut sein müsste – wäre nicht mehr verwunderlich, wenn das Datum für das Ende der Eiszeit entsprechend näher an das Neolithikum heranrücken würde. Die Dauer des gesamten Holozäns verkürzte sich dann um mindestens 4.000 Jahre.

Die Geologie hat seit je grundlegende methodische Probleme, quartäre und tertiäre Funde im Sinne eines 60 Millionen Jahre währenden Zeitalters der Säugetiere zu interpretieren. Die Annahme eines derartigen Zeitraumes

erwuchs aus der Vorstellung, den Gang der Entwicklung der neuzeitlichen Flora und Fauna nur im Rahmen eines derartig langen Zeitraumes erklären zu können. Der Neokatastrophismus der modernen Geologie und die dynamischen Evolutionsmodelle der modernen Biologie haben dieser Annahme schon längst den Boden entzogen, ohne aber das ursprüngliche chronologische Modell ebenfalls in Frage zu stellen. In einem Folgeband hat deshalb einer von uns [Blöss 2000] die hier begonnene Kritik quartärer Datierungsmethoden auf das Tertiär erweitert. Auch für das »Zeitalter neuen Lebens«, welches die Perioden Tertiär und Quartär umfasst, kann festgestellt werden, daß sein Chronologiegerüst mit veralteten und teils völlig überholten Annahmen konstruiert wurde. Damit ist sein Zusammenbruch zu erwarten. Da alle Szenarien der Entstehung des Menschengeschlechtes in der Vorstellung Millionen von Jahren während der Entwicklung steinzeitlicher Kulturen wurzeln, stünde auch eine grundlegende Revision unserer Vorstellungen über die Vergangenheit und Entwicklung unserer Gattung ins Haus.

## 6. Die Entdeckung und Entwicklung der C14-Methode

### 6.1 Die C14-Methode – Findelkind der Medizintechnik

Ohne die bis dahin beispiellose Konzentration von Mensch, Technik und Geld im »Manhattan Project« zur Entwicklung der Atombombe (Dezember 1941 bis zum Ende des 2. Weltkrieges) hätte es 1949 mit Sicherheit keine »Age Determinations by Radiocarbon Content« (Altersbestimmung anhand des Gehaltes an Radiokarbon) gegeben. Wesentlich war, daß es in den U.S.A. nach dem Ende des Krieges im August 1945 einen landesweit auf Hochtouren arbeitenden hochtechnisierten Laborbetrieb gab und daß nunmehr eine große Zahl forschender Naturwissenschaftler neue, vorzugsweise zivil ausgerichtete Forschungsgebiete suchten.

Es mußten natürlich zusätzliche Umstände eintreten, um jene wissenschaftliche Entdeckung zu ermöglichen, die die Chronologie der Menschheitsgeschichte so nachhaltig beeinflussen sollte. Eine der Mütter an der Wiege der Radiokarbon- oder C14-Methode war zweifellos die Medizin bzw. die Medizintechnik. Nicht zum erstenmal war diese Humanwissenschaft zur entscheidenden Förderin der Naturwissenschaft geworden. Auch die Technik der Röntgenstrahlung diente ursprünglich medizinischen Zwecken, entwickelte sich dann aber zu einem der wichtigsten Untersuchungsinstrumente der Atom- und Kernphysik, ja ließ diese im Grunde überhaupt erst entstehen. In der Frühphase der Kernphysik war die Medizin weltweit einer der größten Sponsoren für die Teilchenphysik.

So wurden etliche der vielen Fäden unserer Geschichte in den dreißiger Jahren am neugegründeten Strahlungslabor in Berkeley unter der Federführung von E.O. Lawrence geknüpft. In dieser Zeit konzentrierte sich die Arbeit des Labors fast ausschließlich auf die Erzeugung von Isotopen für die medizinische und biologische Forschung. Lawrence war der Ansicht, daß auf diese Weise der Betrieb und vor allem die Weiterentwicklung des neuartigen Zyklotrons finanziell am ehesten sichergestellt werden konnte. Mit diesem Zyklotron stand eine Teilchen- bzw. Energiequelle zur Verfügung, die weitaus effektiver zur Umwandlung natürlich vorkommender Atome eingesetzt werden konnte, als herkömmlicherweise unter Verwendung mehr oder weniger stark konzentrierter Quellen mit natürlicher Radioaktivität.

In Berkeley wurde das C14-Isotop 1939 – also erst 10 Jahre vor der Etablierung der C14-Methode – endgültig nachgewiesen und damit für die medizinische Technik erschlossen. Es kommt tatsächlich so selten in der Natur vor und müßte so aufwendig angereichert werden, daß die Medizin auf seine

künstliche Produktion angewiesen ist. Die ökonomisch ausgerichtete Isotopentechnologie hat sich also niemals bemüht, das in der Natur vorkommende C14 als radioaktiven Markierungsstoff bzw. »Tracer«<sup>13</sup> zu gewinnen, da dieses in viel zu geringer Konzentration vorliegt, und hat auch niemals Meßtechniken entwickeln müssen, um es in dieser Konzentration quantitativ nachzuweisen. Dennoch ist das langlebige C14 das wichtigste Einzelwerkzeug, das die Tracer-Technologie jemals bereitgestellt hat, denn Kohlenstoff nimmt in der Chemie der biologischen Systeme die zentrale Stellung ein [Kamen 1963, 584]. Erst nach der kommerziellen Entwicklung der Kernreaktoren zur Stromerzeugung wurde die Bereitstellung dieses Tracers für nahezu jeden Bereich der biologischen Forschung möglich gemacht [Kamen 1963, 590].

Die grundsätzlichen Probleme jener Altersbestimmungsmethode, die auf der quantitativen Bestimmung des C14-Gehaltes einer organischen Probe beruht, spiegeln sich kristallklar in den Lösungsstrategien der Medizintechnik wieder, die bei der Verwendung von radioaktiven Isotopen zur Analyse des Stoffwechsels eines Organismus in Ansatz gebracht werden. Wir werden deshalb in dem folgenden Kapitel vor allem schauen, wie die Medizintechnik all die Schwierigkeiten vermeidet (und auch vermeiden kann!), die andererseits die Grundlagen der C14-Methode ausmachen.

## 6.2 Die Ökonomie der Radiomedizin und die Sachzwänge der C14-Methode

Die ökonomische Verwendung von Radioisotopen in der Medizin wirft Licht auf drei wichtige Aspekte der C14-Methode, die gewöhnlich gar nicht weiter auffallen, die aber in diesem Zusammenhang anzeigen, wie ungünstig die Randbedingungen für die C14-Methode eigentlich sind:

- 1) Die Genauigkeit der Absolutdatierung steht für die jüngere Vergangenheit in einem ungünstigen Verhältnis zur Länge der Halbwertszeit von C14.
- 2) Die Genauigkeit der Absolutdatierung ist doppelt kritisch wegen ihrer Abhängigkeit von zwei Aktivitätsbestimmungen.
- 3) Eine Absolutdatierung kann nur durch eine Rekonstruktion der irdischen »Kontaminationsgeschichte« des C14 begründet werden und ist damit auf externe Hilfe angewiesen.

---

<sup>13</sup> Verabreichte »Tracer« werden im Stoffwechsel eines Körpers wie normale Substanzen verarbeitet, machen den Vorgang des Stoffwechsels zugleich aufgrund bestimmter Eigenschaften – meistens wegen ihrer Radioaktivität – sichtbar bzw. meßbar. Bevorzugte Tracer sind deshalb radioaktive Isotope mit möglichst kurzer Halbwertszeit.

Bereich	Radionuklid	T 1/2 phys
bis 1 Std	<sup>15</sup> O	2 min
	<sup>30</sup> P	2,6 min
	<sup>13</sup> N	10 min
	<sup>11</sup> C	20 min
bis 24 Std	<sup>68</sup> Ga	1,1 h
	<sup>113m</sup> In	1,7 h
	<sup>18</sup> F	1,8 h
	<sup>132</sup> J	2,3 h
	<sup>87m</sup> Sr	2,8 h
	<sup>61</sup> Cu	3 h
	<sup>115m</sup> In	4,5 h
	<sup>99m</sup> Tc	6 h
	<sup>52</sup> Fe	8 h
	<sup>42</sup> K	12,5 h
	<sup>64</sup> Cu	12,8 h
	<sup>123</sup> J	13,3 h
	<sup>72</sup> As	26 h
	bis 7 Tage	<sup>197</sup> Hg
<sup>198</sup> Au		2,7 d
<sup>99</sup> Mo		2,8 d
<sup>201</sup> Tl		3 d
<sup>133</sup> Xe		5,3 d
bis 1 Monat	<sup>131</sup> I	8,1 d
	<sup>131</sup> Cs	9,6 d
	<sup>32</sup> P	14,2 d
	<sup>74</sup> As	18 d
	<sup>86</sup> Rb	18,7 d
	<sup>51</sup> Cr	28 d
über 1 Monat	<sup>169</sup> Yb	32 d
	<sup>59</sup> Fe	45 d
	<sup>203</sup> Hg	46,9 d
	<sup>125</sup> J	60 d
	<sup>85</sup> Sr	65 d
	<sup>58</sup> Co	71 d
	<sup>35</sup> S	87 d
	<sup>75</sup> Se	120 d
	<sup>45</sup> Ca	165 d
<sup>57</sup> Co	267 d	
über 1 Jahr	<sup>22</sup> Na	2,58 a
	<sup>3</sup> H	12,26 a
	<sup>14</sup> C	5570 a

### 6.1 Wichtige Radionuklide in der Medizin

Von den mehr als 1.000 Radionukliden haben nur wenig mehr als 3 Dutzend Bedeutung für die Medizin erlangt.

Für diagnostische Zwecke (in vivo) sollte die Gammastrahlenergie im Bereich 0,1 - 0,5 MeV liegen. Für in-vitro-Messungen finden auch Betastrahler Verwendung, die allerdings eine so beachtliche Selbstabsorption verursachen können, daß sie nicht von außen meßbar sind.

Aus diesem Grund operiert die C14-Methode mit einer Beimengung von »Szintillatoren« zu dem aufbereiteten Kohlenstoff der Probe, die die Betastrahlen der C14-Atome absorbieren und dafür Licht in einer Wellenlänge aussenden, das eine größere Reichweite und deshalb bessere Ausbeute bei der Zerfallsregistrierung ermöglicht.

Die Wahl eines Radionuklids wird beeinflußt von dessen Strahlenemission und Halbwertszeit, die zusammen wesentlich die Strahlenbelastung bestimmen.

Daß die Rekonstruktion der Kontaminationsgeschichte in die Irre gegangen ist, haben wir in Kapitel 2.3 gezeigt. Das lag daran, daß sich die Dendrochronologie als besagte externe Hilfe ihrerseits auf C14 abgestützt und dabei fundamentale methodische Schwächen der C14-Methode außer acht gelassen hat.

Die medizinische Radiologie ist bemüht, optimale Randbedingungen für die Genauigkeit ihrer Untersuchungsergebnisse unter Berücksichtigung der Gesundheit des Patienten einzustellen. Dazu stehen diverse Tracer-Isotope zur Verfügung, die aufgrund bestimmter Eigenschaften (Ungiftigkeit, kurze Halbwertszeit, Strahlungsart) jeweils mehr oder weniger günstig erscheinen können (Bild **6.1**). Im Gegensatz dazu hat die Natur alles, aber auch wirklich alles getan, um den Archäometern das Leben im Umgang mit dem Isotop C14 schwer zu machen. Die im Folgenden eingehender diskutierten Punkte a) bis e) fassen zusammen, wie unterschiedlich die Voraussetzungen sind (vergleiche auch die Tabelle **6.3**):

- a) Die Radiologie erstellt eine oder auch mehrere Momentaufnahmen einer örtlich deutlich unterscheidbaren Verteilung radioaktiver Isotope in einem Organismus. Die C14-Methode setzt dagegen die örtliche Gleichverteilung des C14-Isotops in allen für die Archäologie relevanten Kohlenstoffdepots voraus. Allfällige zeitliche Schwankungen der C14-Konzentration sollen in allen Kohlenstoffdepots stets gleichförmig auftreten.
- b) Die Kontamination eines zu untersuchenden Organismus soll zum Zeitpunkt der Untersuchung hinsichtlich der Strahlungsart des zu verwendenden Tracers Null sein. Dies wird grundsätzlich dadurch unterstützt, daß die Halbwertszeit der zum Einsatz kommenden Tracers möglichst klein ist oder daß diese nach der Verabreichung möglichst schnell wieder ausgeschwemmt werden. Die Kontamination der irdischen Kohlenstoffreservoirs mit C14 soll in der Vergangenheit von Null verschieden und auf dem ganzen Globus jederzeit gleich gewesen sein. Dies wird darauf zurückgeführt, daß angesichts der langen Halbwertszeit des C14 von knapp 6.000 Jahren grundsätzlich Zeit genug ist, gewisse Gradienten in der C14-Konzentration am Ende doch ausgleichen zu können. (Anmerkung: Die nachfolgend unter c) diskutierte Reaktion (»Sprungantwort«) auf eine punktuelle Verunreinigung bezieht sich auf einen Zeitraum von wenigen Jahren. Die lange Halbwertszeit des C14 kann mithin nur mittel- und langfristige sich aneinander angleichende Werte erklären, nicht aber den vom Simultanitätsprinzip verlangten augenblicklichen, aufs Promille genauen atmosphärischen Ausgleich über den ganzen Globus hinweg.)

## 6.2 Kohlenstoff – einige Zahlenverhältnisse

### 1. Irdischer Kohlenstoff

Nr.	Reservoir	Menge	Einheit	Verhältnis <sup>*)</sup>
1.1	Erde	$6.0 \cdot 10^{24}$	kg	1
1.2	Erdatmosphäre gesamt	$5.3 \cdot 10^{18}$		$0.9 \cdot 10^{-6}$
1.3	Gesamtkohlenstoff der Erde	$42 \cdot 10^{15}$		$7 \cdot 10^{-9}$
1.4	Kohlendioxid in Erdatmosphäre	$2.7 \cdot 10^{15}$		$0.5 \cdot 10^{-9}$
1.5	Kohlenstoff in Erdatmosphäre	$0.7 \cdot 10^{15}$		$0.1 \cdot 10^{-9}$
1.6	globales C14-Vorkommen	$62 \cdot 10^3$		$10 \cdot 10^{-21}$

### 2. Produktion und Zerfall von C14

Nr.	Veränderung	Menge	Einheit	Verhältnis <sup>*)</sup>
2.1	jährlicher Zerfall an C14	7.5	kg/y	$1.3 \cdot 10^{-24}/y$
2.2	jährliche Produktion an C14	?		?

### 3. Natürliche und künstliche C14-Aktivität ( $\beta$ -Strahlung)

Nr.	Reservoir	Menge	Einheit	Verhältnis <sup>**)</sup>
3.1	organische Proben aus hist. Zeit	1-20	counts per min $\cdot$ g <sub>Carbon</sub>	0.7 - 1.4
3.2	NBS-Standard	13.6		1
3.3	Grenzwert für menschliches Fett	$0.3 \cdot 10^6$		$22 \cdot 10^3$
3.4	Grenzwert für kommunales Abwasser	$0.2 \cdot 10^9$		$15 \cdot 10^6$

<sup>\*)</sup> bezogen auf die Erdmasse

<sup>\*\*)</sup> bezogen auf den NBS-Standard

- c) Die Reaktion («Sprungantwort») eines isotopenfreien Organismus auf eine schlagartige punktuelle Kontamination besteht in einer vom Zustand des Organismus abhängigen räumlich differenzierten Ausbreitung des Isotops im Organismus. Dabei spielt insbesondere der Stoffwechsel zwischen einzelnen Organen eine große Rolle. Die Sprungantwort des irdischen Kohlenstoffvorkommens auf eine schlagartige punktuelle Kontamination soll

in einer kurzfristigen Gleichverteilung der kontaminierten Menge in alle betreffenden Reservoirs, zumindestens aber der Atmosphäre bestehen.

- d) Die Kontamination »Null« des radiologisch zu untersuchenden Organismus beinhaltet automatisch eine Aussage über eine räumlich homogen vorliegende Verteilung, in diesem Fall mit dem Wert Null. Die für das Funktionieren der Methode notwendige Kontamination der Atmosphäre mit C14 impliziert dagegen grundsätzlich die Möglichkeit einer räumlich inhomogenen Verteilung des C14. Für die Annahme der räumlich homogenen Verteilung als Spezialfall gibt es keine Begründung, zumal bestimmte zentrale »Organe« der Erde (wie die Ozeane) lokal je unterschiedlichen Dynamiken hinsichtlich der Konzentration, Konvektion und Diffusion des Kohlendioxid als wesentlichem Träger des C14 bzw. des C12 unterliegen.
- e) Die Meßwerte der Radiologie werden bezogen auf den Wert Null, der zuvor in dem Organismus geherrscht haben muß, und bezogen auf die Initialdosis interpretiert, wobei diese beiden Niveaus grundsätzlich hochgenau festliegen bzw. bestimmt werden können. Alle Messungen können nacheinander vorgenommen werden und ergeben somit eine eindeutige chronologische Konstruktion. Ein Meßwert der C14-Methode kann nur im Zusammenhang mit einem Wert, der in gleicher Höhe zu einem bestimmten zurückliegenden Zeitpunkt vorlag, interpretiert werden (»Kalibrierung«). Alle Meßwerte werden grundsätzlich zur selben Zeit aufgenommen und müssen darauf hin im Rahmen einer chronologischen Rekonstruktion interpretiert werden. Die C14-Methode ist auf chronologische Hilfe angewiesen.

Indem wir die allgemeine Radiologie und die C14-Methode zu den oben genannten drei Bereichen – Halbwertszeit, Meßbarkeit, zurückliegende »Kontamination« – noch einmal genauer in Vergleich setzen, bekommen wir einen weiteren Einblick in die Komplexität der C14-Methode und in ihre immanenten, durch nichts aus der Welt zu schaffenden Probleme (eine kurze Diskussion anderer radiometrischer Datierungsmethoden ist im einführenden Kapitel 1.10 zu finden).

### 6.2.1 Das Kreuz mit der langen Halbwertszeit

Der Zeitraum, auf den sich mögliche Datierungen einer isotope behafteten Probe im Rahmen der Radiochronologie erstrecken können, hängt direkt von der Größe der Halbwertszeit des fraglichen Radioisotops ab. Doch mit der

### 6.3 Ungleiche Geschwister Radiologie & C14-Methode

Stichwort	Dem radiologisch zu behandelnden Patienten wird	Das betrachtete System »Erde«
<i>Kontamination</i>	in der Regel im unkontaminierten Zustand	war zu allen Zeiten in unbekannter Weise mit C14 kontaminiert, wobei dieses C14
<i>Konzentration</i>	eine möglichst große Menge des fraglichen Isotops mit	überall nur in allergeringsten Spuren vorkommt und
<i>Halbwertszeit</i>	möglichst kurzer Halbwertszeit und	eine lange Halbwertszeit hat (siehe dazu Bild <b>6.1</b> ),
<i>lokale Kontamination</i>	in exakt gemessener Menge eingeeimpft, um	um von der fraglichen organischen Probe in Abhängigkeit von seinem Aufbau einerseits (Stichwort Isotopenfraktionierung) und der lokal herrschenden atmosphärischen und aquatischen Kontamination andererseits (Stichwort Reservoir-effekte) in an sich unbekannter Höhe inkorporiert zu werden,
<i>Zeitverlauf</i>	möglichst schnell – binnen weniger Stunden oder auch Tage – quantitativen Aufschluß über den Weg und die Effektivität der Verarbeitung des entsprechenden Elementes durch den Organismus zu erhalten,	und daraufhin eine mehr oder weniger lange Zeit (Jahrhunderte bis Jahrtausende) unter unbekanntem Umständen zu lagern,
<i>Verfälschung</i>	ohne daß Gefahr einer unbekanntem weiteren Kontamination besteht.	so daß nicht exakt rekonstruiert werden kann, wie stark Kontamination oder Dekontamination während dieser Lagerzeit gewesen sind.
<i>Strahlungsart</i>	Dabei bedient man sich möglichst Gamma-Strahlern, da deren meßtechnische Erfassung am unkompliziertesten und vor allem sichersten vonstatten geht.	Zu allem Überfluß ist C14 auch noch ein reiner Beta-Strahler, was einen ganzen Rattenschwanz an meßtechnischen Problemen nach sich zieht.

Halbwertszeit steigt bei gleichbleibendem Meßaufwand der absolute Fehler der Datierung<sup>14</sup>. Der Fehler in der Aktivitätsmessung muß mit entsprechender Erhöhung des Meßaufwandes heruntergeschraubt werden, um den Fehler des Absolutdatums zu begrenzen.

Das Problem, daß daraus für die C14-Methode erwächst, kann sehr gut an der Auswirkung der Isotopenfraktionierung aufgezeigt werden. Die Radiologie macht sich für ihre Untersuchungen zunutze, daß der Stoffwechsel radioaktive wie nichtradioaktive Isotope eines chemischen Elementes im wesentlichen gleich behandelt, obwohl in der Regel das leichtere von ihnen mehr oder weniger stark bevorzugt wird (Isotopieeffekt). Solange der Unterschied in den Anreicherungskoeffizienten nur ein paar Prozent beträgt, bleibt das radiologische Untersuchungsergebnis auch ohne genauere Kenntnis der unterschiedlichen Aufnahme der Isotope durch den fraglichen Teil des Organismus ohne Einschränkungen interpretierbar.

Die Isotope unterscheiden sich in ihrer Masse um einige wenige Neutronen (-3 bis +4). Je schwerer also das fragliche Element grundsätzlich ist, insbesondere wenn es in ein größeres Molekül eingebaut ist [vgl. Born/Starke 1985, 19], desto ununterscheidbarer werden die Isotope schlußendlich für den Organismus, der die Isotope nur aufgrund ihrer unterschiedlichen Masse auseinanderhalten kann. Beispielsweise beträgt der Unterschied der Massen bei Jod J131 bzw. J127 ca. 3%, so daß der entsprechende Fehler bei der Umrechnung der gemessenen Radioaktivität in die Stoffwechselrate deutlich unterhalb der für eine normale Untersuchung ausreichenden Meßgenauigkeit bleibt.

Die C14-Methode muß sich hingegen mit einem relativ leichten chemischen Element abgeben, denn der Kohlenstoff kommt bereits an sechster Stelle des nach wachsender Masse geordneten Periodensystems, das 83 stabile chemische Elemente aufweist. C14 hat gegenüber C12 eine um rund 17% höhere Masse, was in den einzelnen Organismen, die Kohlenstoff verarbeiten, zu Unterschieden in der C14-Konzentration von bis zu 10% führt (vergleiche dazu Bild 8.3). Das würde einem Radiologen wohl immer noch kein größeres Kopfzerbrechen bereiten, der C14-Wissenschaftler hingegen ist bereits zur Anwendung von Korrekturmaßnahmen gezwungen. Diesen 10% an möglichem Unterschied entspricht bei einer Halbwertszeit von 5730 Jahren eine absolute Datierungsungenauigkeit von immerhin rund 800 Jahren. Betrüge die Halbwertszeit hingegen nur 10% des tatsächlichen Wertes, dann schrumpfte auch die absolute Datierungsungenauigkeit aus dem Effekt der

<sup>14</sup> Der Formel in der Textbox 7.7 zufolge ist die zeitliche Unsicherheit bzw. der absolute Datierungsfehler proportional zum relativen Meßfehler sowie proportional zur Halbwertszeit.

Isotopenfraktionierung auf 90 Jahre herunter, was unter Umständen akzeptabel sein könnte.

Die lange Halbwertszeit des C14 ist an sich zu begrüßen, weil damit nicht nur der für Datierungen in Frage kommende Zeitraum wächst, sondern auch Mischungseffekte in den großen Kohlenstoffreservoirs unterstützt werden. Aus jedem Prozent Meßungenauigkeit oder sonstigem Fehler, der auf die C14-Konzentration zu beziehen ist, resultiert eine Datierungsunsicherheit von knapp hundert Jahren (siehe Textbox **7.7**). Als grundsätzlich tragbarer Fehler gilt normalerweise eine Abweichung, die eine Zehnerpotenz unter dem tatsächlichen Effekt bleibt. Die Marge liegt also bei 10%. Diese 10% wirken im Hinblick auf die C14-Methode aber nicht auf die eigentlich interessierende Altersdifferenz, sondern grundsätzlich auf die erheblich längere Halbwertszeit bzw. die »mittlere Lebenszeit« von ca. 8.300 Jahren des Radiokarbons C14 (nach der sog. mittleren Lebenszeit ist die Aktivität einer Probe auf  $1/e = 0.368$  abgesunken).

Das ist für den sogenannten geschichtlichen bzw. frühgeschichtlichen Bereich der Historie, der nur einen Bruchteil der 8.300 Jahre ausmacht, ein großes Handicap. Deswegen muß in diesem Fall auch grundsätzlich promillegenau gemessen werden. Das darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß sonstige Korrekturen und Unsicherheiten ihrerseits im Prozentbereich liegen (da zu allgemein Kapitel 8) und dadurch das Ergebnis ohnehin entwerten.

### 6.2.2 »Doppel-Fehler« für die C14-Methode

Um einen lebenden Körper möglichst wenig mit zusätzlicher Radioaktivität zu belasten, werden in der Radiologie vornehmlich kurzlebige Radioisotope verwendet, d.h. Isotope mit entsprechend kurzer Halbwertszeit (vergleiche Bild **6.1**). Die Isotope sollen schließlich nach Abschluß der Untersuchung so bald als möglich zerfallen sein, zumal wenn diese nicht gleich wieder ausgeschieden werden. Je schneller zudem die inkorporierten Isotope zerfallen, desto größer kann die verabreichte Dosis sein [Schaub 1990, 32], und desto leichter und sicherer ist dann auch der quantitative Nachweis ihres kurzfristigen Verbleibes. Ein weiterer Effekt besteht darin, daß Patienten, die sich zuvor bereits einmal einer gleichen Untersuchung unterzogen haben, in der Regel unkontaminiert zu einer Folgeuntersuchung kommen. Es ist in der Regel gar nicht vorgesehen, daß der Radiologe am Patienten eine Nullmessung für das Isotop seiner Wahl durchführt, um auf diese Weise sicherzustellen, daß die im nachhinein gemessene Radioaktivität ausschließlich von den jetzt verabreichten Radioisotopen hervorgerufen wird.

Das Radiokarbon C14 hat dagegen eine so lange Halbwertszeit, daß eine einmal aufgenommene Menge während der ganzen Verweilzeit im Körper quasi ohne Einbuße mit der Initialdosis weiterstrahlt. Andererseits ist die Strahlung von C14, wenn es in natürlicher Beimischungshöhe vorliegt, so gering, daß sie von der sogenannten Hintergrundstrahlung um ein Vielfaches übertroffen wird und grundsätzlich nur mit technischen »Tricks« nachgewiesen werden kann. Im Hinblick auf die Umrechnung der gemessenen Aktivität in ein Datum ist die für sich schon betrübliche Tatsache, daß die Dosis aus C14 äußerst gering und nur mit großem Aufwand aus der natürlichen Hintergrundstrahlung herausgefiltert werden kann, nur die eine Seite der Medaille. Die zweite, die Kehrseite der Medaille, wird allzugerne übersehen, denn zusätzlich zu der an sich schon diffizilen Messung der momentanen Aktivität muß noch eine zweite, ebenfalls fehlerbehaftete Aussage über die Aktivität zum Zeitpunkt des Todes gemacht werden.

Das errechnete Alter der Probe, daran sei an dieser Stelle erinnert, leitet sich nicht aus einem einzigen Aktivitätswert ab, sondern aus dem Unterschied zwischen

- 1) der Aktivität, mit der die Probe ihren Stoffwechsel beendet hat, und
- 2) der Aktivität gleicher Höhe, die an einer entsprechend alten Probe gemessen und nach deren bekanntem Alter dann auf ihre gemeinsame Startaktivität zurückgerechnet wird (von dem Mehrdeutigkeitsproblem wollen wir an dieser Stelle absehen).

Beide Werte müssen als Restaktivität gemessen worden sein und sind entsprechend fehlerbehaftet. Nur wenn die Startaktivität seit je tatsächlich exakt gleich gewesen wäre, dann könnte ein ähnlich präziser Wert für die heute herrschende C14-Aktivität wie für eine radiologische Initialdosis erzielt werden.

Ein von der C14-Methode erzieltetes Ergebnis in Form eines Absolutdatums leitet sich grundsätzlich aus der Differenz zweier fehlerbehafteter Absolutwerte ab und nicht – wie bei der Radiologie – a priori aus einem einzigen Absolutwert, denn die medizinisch verabreichte Initialdosis ist grundsätzlich wesentlich genauer fixiert als die nachgeschaltete Messung am Körper des Patienten. Und während eine Unsicherheit im Prozentbereich an der Aussagefähigkeit einer Diagnose wenig rütteln wird und selbst lediglich qualitative Aussagen von Wert sein können, ist wegen der langen Halbwertszeit von C14 ein Fehler bei der Messung der C14-Aktivität im Prozentbereich grundsätzlich unakzeptabel (siehe Kapitel 6.2.1). Sowohl die Kenntnis der verbliebenen Aktivität des C14 als auch die Kenntnis seiner Startaktivität muß im Pro-

millebereich liegen, wenn die Unsicherheit – ohne Diskussion anderer Fehlerquellen – in der Größenordnung unterhalb eines Jahrhunderts liegen soll.

Ein Radiologe wird in der Regel das Tracern bei einem Patienten, der mit dem zu verwendenden Isotop kontaminiert ist, ablehnen, weil er eine Differenz von zwei mit ununterdrückbaren Fehlern behafteten Messungen nur wesentlich schlechter interpretieren könnte, als eine einzige fehlerbehaftete Messung. Gerade wenn die Differenz klein ist, bzw. sogar in die Größenordnung der Meßfehler selber kommt, wird das Ergebnis aus der Differenzmessung nicht-signifikant<sup>15</sup>.

Das erklärt andererseits auch, wieso C14-Datierungen der jüngeren Vergangenheit eigentlich wertlos sind. Da der Fehler für eine Einzelmessung mit  $\pm 300$ - $600$  Jahren (vgl. Tabelle **8.14**) anzusetzen ist und der zur Kalibrierung dienende Meßwert wegen des unzutreffenden Simultanitätsprinzips, aber auch wegen des zu erwartenden Metafehlers kaum geringer anzusetzen ist, kann im Grunde für einen zurückliegenden Zeitraum von rund 500-1.000 Jahren überhaupt keine Signifikanz erwartet werden. Diese bleibt für den anschließenden Zeitraum »weniger Vielfacher« von 500-1.000 Jahren immer noch völlig unbefriedigend. Das sollte man bei der Hinzuziehung der C14-Methode bei Chronologieproblemen insbesondere der Ära »nach Christi Geburt« in Rechnung ziehen. Die C14-Methode kann diesem Dilemma grundsätzlich nicht ausweichen, denn sie gründet ihre Altersangaben nun einmal auf die Differenz zwei fehlerbehafteter Messungen.

Um den C14-Hindernislauf auf den Höhepunkt zu treiben, darf der Hinweis nicht fehlen, daß die (ohnehin gerne übersehene) Unsicherheit über die Höhe des Wertes der Startaktivität nicht nur aus der reinen Messung stammt, sondern auch aus dem Umstand, daß das zugeordnete Datum rekonstruiert werden muß. Auch diese Rekonstruktion ist naturgemäß mit einem Fehler behaftet. Wir gehen sogar davon aus, daß dieser Fehler aufgrund unzutreffender spekulativer Annahmen über die Historie der atmosphärischen Zusammensetzung unkontrolliert hoch ist.

---

<sup>15</sup> Diese Situation lag 1949 vor, als Libby Messungen von C14-Aktivitäten zu interpretieren hatte, deren Höhe in der Größenordnung der Hintergrundstrahlung lag. Da Libby und seine Mitarbeiter den Einfluß der Hintergrundstrahlung keineswegs im Griff hatten, eröffnete sich ihnen andererseits ein erheblicher Spielraum bei der Interpretation der ermessenen Absolutalter.

### 6.2.3 Die Kontaminationsgeschichte für C14 muß bekannt sein

Die Medizintechnik kann für eine begrenzte Zeit nach der Impfung eines Patienten mit Radioisotopen örtlich den Verlauf der Strahlung nachweisen und diese dann grundsätzlich unabhängig von der radiologischen Vorgeschichte des Patienten interpretieren. Wenn ein Radiologe Radioaktivität mißt, dann hat er damit – von der Hintergrundstrahlung abgesehen – den Effekt, auf den es ankommt. Würden dagegen zu medizinischen Zwecken Radioisotope mit langer Halbwertszeit in entsprechenden Mengen erzeugt und in Verkehr gebracht werden, so würden auf Dauer die Patienten bereits kontaminiert zur Untersuchung antreten und müßten erstmal eine fehlerbehaftete Nullmessung über sich ergehen lassen. Das ist ein Umstand, den die Radiologie aus vielerlei Gründen meidet.

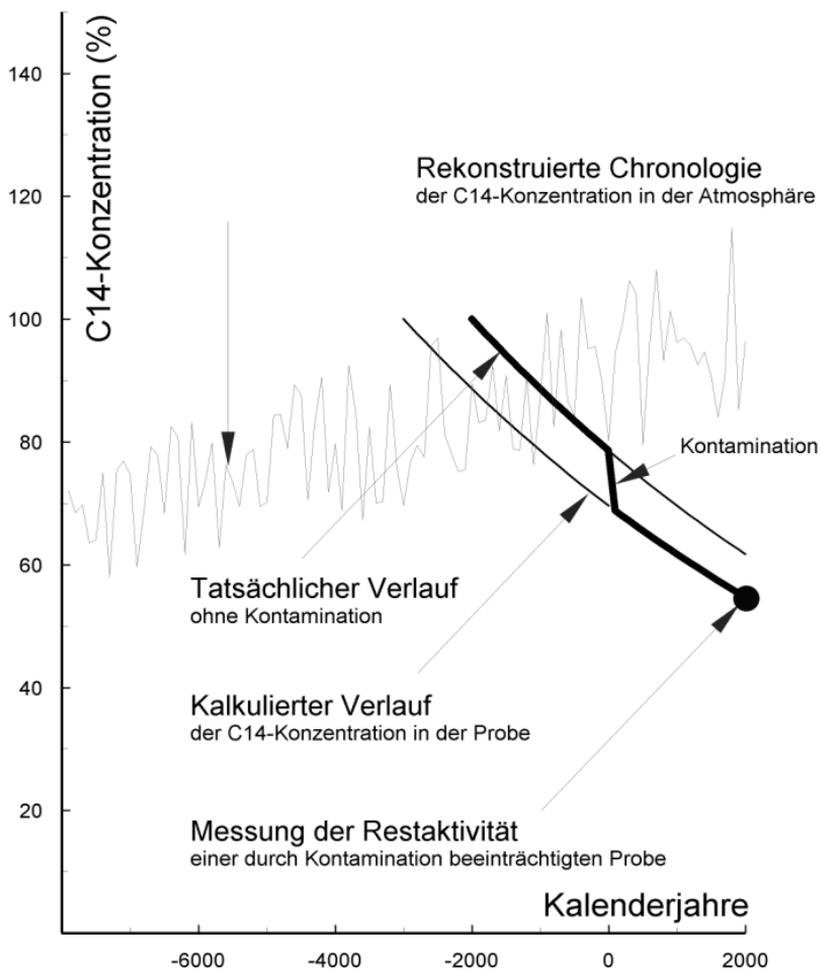
Die C14-Methode ist hingegen darauf angewiesen, daß die untersuchten Objekte kontaminiert waren und daß die Kontaminationsgeschichte der irdischen Atmosphäre soweit bekannt ist, daß aus der verbliebenen Kontamination der Probe auf den Zeitpunkt der Entkopplung zwischen beiden Kontaminationsgeschichten, die durch das Stoffwechselende der Probe ausgelöst wurde, zurückgeschlossen werden kann. Die Kontaminationsgeschichte der Probe kann im Idealfall errechnet werden, die der Atmosphäre muß rekonstruiert werden.

Angesichts eines Patienten, der möglicherweise doch mit dem fraglichen Radioisotop kontaminiert ist, würde ein Radiologe nicht lange theoretisieren, sondern vermutlich eine Nullmessung machen. Damit erhielte er schnellen und sicheren Aufschluß über die verbliebenen Auswirkungen einer zurückliegenden Kontamination und könnte entscheiden, ob eine weitere Untersuchung zu diesem Zeitpunkt angezeigt ist oder nicht. Auf keinen Fall würde er aus dem (unter Umständen exakt bekannten) Zeitpunkt der letzten radiologischen Untersuchung auf die verbliebene Radioaktivität schließen, denn das würde ja ein Untersuchungsergebnis vorwegnehmen. Schließlich soll mit den Tracern die in Frage stehende Effektivität einer bestimmten Stoffwechselbahn erst noch eruiert werden. Ein hoher Anteil an radioaktivem Jod in einem bestimmten Organ kann mithin sowohl eine kurz zurückliegende Kontamination in Verbindung mit relativ uneffektiver Assimilation, als auch eine länger zurückliegende Kontamination in Verbindung mit relativ effektiver Assimilation bedeuten. Der Witz besteht ja darin, daß

- a) das zu Untersuchungszwecken verabreichte Jod eine von dem natürlichen Isotopenmischungsverhältnis abweichende Zusammensetzung hat und

## 6.4 Nur die fiktive Vergangenheit der Probe ist kalkulierbar

An einer archäologischen Probe wird die »Restkontamination« mit C14 gemessen. Diese kann während ihrer Lagerzeit erheblich durch Austausch mit angrenzenden Kohlenstoffreservoirs verändert worden sein. Unter der Annahme, daß dies nicht geschehen sei, bzw. daß etwaige Einflüsse »korrigiert« werden konnten, ist nunmehr ihre radiometrische Vergangenheit exakt rückrechenbar. Die radiometrische Vergangenheit der Atmosphäre ist dagegen nur anhand lauter C14-vermessener Proben bekannten Alters rekonstruierbar. Das Alter der Probe kann dann aus Übereinstimmungen von kalkulierter und rekonstruierter Vergangenheit ermittelt werden. Es basiert somit auf sehr vielen Unwägbarkeiten und erstaunlich wenigen Gewißheiten.



- b) der Organismus das angebotene Jod auf zunächst unbekannte Weise in je unterschiedlichen Mengen aufnimmt.

Deshalb gilt auch umgekehrt: Aus dem Maß der aktuellen Radioaktivität könnte nur bedingt auf den Zeitpunkt der erfolgten Kontamination geschlossen werden, da der Vorgang der Verarbeitung der Tracer grundsätzlich ungeklärt ist. Solange nur mit kurzlebigen Radioisotopen operiert wird, spielt diese Unsicherheit aber keine Rolle, da innerhalb weniger Tage »neu aufgesetzt« werden kann. Aus guten Gründen macht die Radiologie einen Bogen um die Rekonstruktion zeitlicher Abläufe, sondern begnügt sich bei der Untersuchung ausschließlich um die Abbildung von Momentanzuständen.

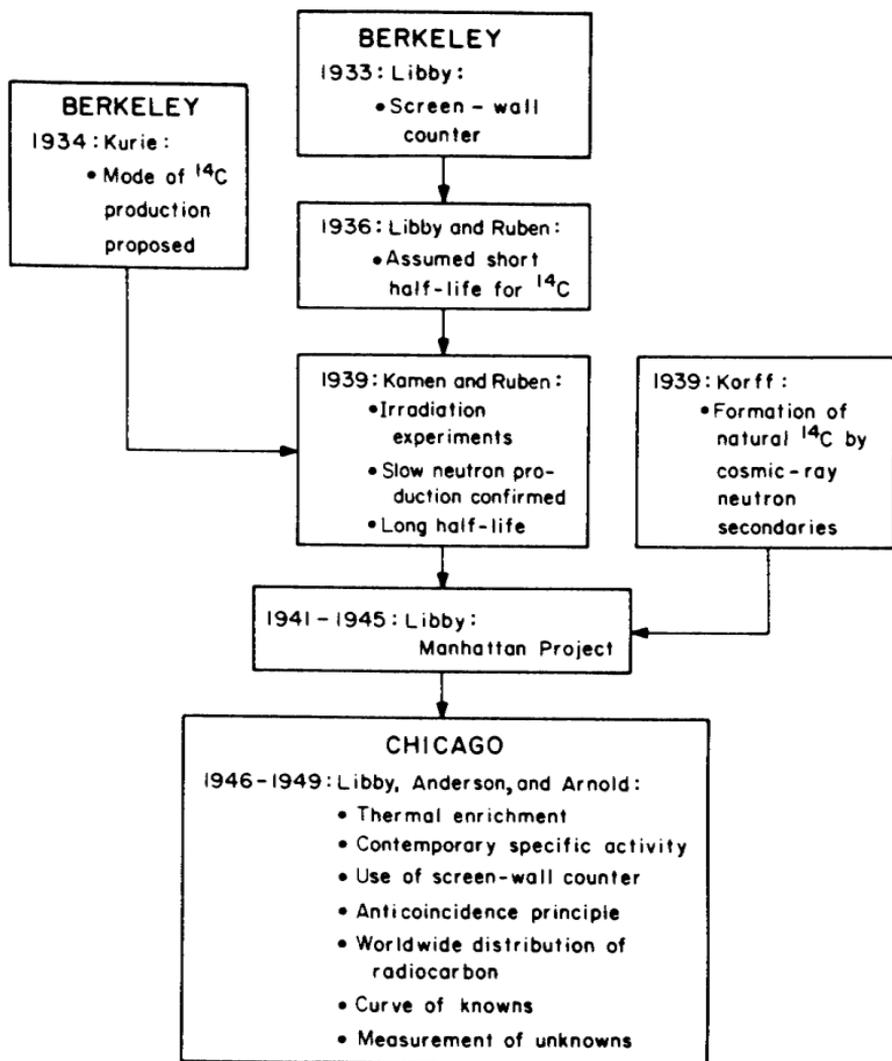
Die C14-Methode ist dagegen zwar in der Lage, den zeitlichen Verlauf der Höhe der Kontamination in der fraglichen Probe exakt rekonstruieren zu können – sofern keine zusätzliche Kontamination bzw. Dekontamination während der entsprechenden Lagerzeit aufgetreten ist. Der Anspruch jedoch, denselben Verlauf auch für die Atmosphäre vorhersagen zu können, mußte scheitern, da die Atmosphäre einen Stoffwechsel aufweist, der zu unvorhersagbaren zeitlichen Änderungen der Kontamination führt (Bild 6.4). Mithin muß der Verlauf der atmosphärischen Kontamination komplett rekonstruiert werden. Wir haben gezeigt, daß die Erarbeitung dieser Chronologie auf unzutreffenden Vorhersagen über das Verhalten der Natur gegründet wurde und deswegen zu falschen Ergebnissen geführt hat.

Die Radiologie würde es ablehnen, die Kontaminationsgeschichte des Patienten mit ins Kalkül zu ziehen, weil diese von dem Stoffwechselverhalten des Patienten abhängt, derentwegen die radiologische Untersuchung ja gerade veranstaltet wird. Die Übernahme von Kontaminationen wird vermieden, da sie den Fehler bis zur Nicht-Signifikanz des Ergebnisses erhöhen können. Die C14-Methode kennt – im Rahmen gewisser Fehler – zwar das Stoffwechselverhalten der Proben, insoweit es sich auf die Isotopenfraktionierung zu Lebzeiten einerseits und den exponentiellen Verlauf der Aktivitätsabnahme während der Lagerzeit bis zur Probengewinnung andererseits bezieht. Kontaminationen während dieser Lagerzeit können dagegen allenfalls abgeschätzt werden.

Um zu einem Datum zu kommen, muß zusätzlich die komplette Kontaminationsgeschichte der Atmosphäre als Referenz für die gemessene Restaktivität der Probe vorliegen. Da die atmosphärische Kontamination mit C14 örtlich verschiedenen Einflüssen unterliegt (Diffusion an Systemgrenze Ozean/Atmosphäre), kann im übrigen auch nur von einer örtlichen Referenz ausgegangen werden.

## 6.5 Frühe Phasen der Entwicklung der C14-Methode

Dieses Bild zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Ereignisse und der mit ihnen verbundenen Wissenschaftler, die Einfluß auf die Entwicklung der C14-Methode gehabt haben [nach Taylor 1987, 148].



Auf den Punkt gebracht kann man sagen, daß die C14-Methode an dem gescheitert ist, von dem sich die Radiologie ihrerseits aus guten Gründen fern hält: an der zeitlichen Rekonstruktion einer Kontamination, über deren Vorkenntnis man sich offensichtlich Täuschungen hingegeben hatte. Man ging von Quasikonstanz aus, ohne sich Rechenschaft über die Zulässigkeit einer solchen Aussage zu machen, denn die Atmosphäre war und ist Teil eines dynamischen, wandelbaren Ökosystems und von daher alles andere als stationär.

### 6.3 An der Wiege der C14-Methode

Wir hatten am Anfang dieses Kapitels die Rolle der Medizin bzw. der Medizintechnik für die Kernphysik im allgemeinen und für die C14-Methode im Besonderen hervorgehoben. Die Bedeutung von Kohlenstoff für den Stoffwechsel nahezu jeder Lebensform führte zu einer eingehenden Beschäftigung mit den Isotopen des Kohlenstoffs. Einer der außergewöhnlichsten Begleitumstände in der Entwicklungsgeschichte der C14-Methode habe darin bestanden, so J.G. Ogden, daß man C14 im Labor herzustellen begann, ohne von seiner Existenz in der Natur zu wissen [Ogden 1977, 167].

1934 wurde das erste Mal die Möglichkeit erwogen, daß radioaktiver Kohlenstoff mit zwei zusätzlichen Neutronen entstehen könnte. (Für eine Zusammenstellung wichtiger Ereignisse im Rahmen der atomphysikalischen Vorarbeiten für die C14-Methode vergleiche das Bild **6.5**) F.N.D. Curie war der erste, der mit Stickstoff N14 als möglicher Ausgangssubstanz für die Umwandlung in C14 experimentierte. Bei dem Beschuß von Stickstoff mit schnellen Neutronen waren gelegentlich Kollisionsprodukte in der Nebelkammer zu beobachten gewesen – lange dünne Spuren –, die am ehesten als Protonen gedeutet werden konnten. Danach wäre ein Elektron im Kern verblieben und hätte sich mit einem Proton zu einem Neutron vereinigt bzw. hätte ein Neutron den Platz eines Protons eingenommen.

Dieser Gedanke war ungewöhnlich, da bis dahin als Produkte im Zusammenhang mit Kernreaktionen nur  $\alpha$ -Teilchen (zweifach positiv geladene Heliumkerne) geläufig waren. Die Vermutung von Curie wurde wenig später von W. Chadwick und M. Goldhaber bestätigt, die zeigten, daß das beim Beschuß von Stickstoff N14 mit langsamen Neutronen ausgestoßene Partikel kein  $\alpha$ -Teilchen sein konnte (was eine Änderung der Anzahl der Teilchen im Kern bedeutet hätte) und daß demzufolge bei dieser Umwandlung von Stickstoff N14 das Kohlenstoffisotop C14 (mit genauso vielen Teilchen im Kern wie Stickstoff) als wahrscheinlichster Kandidat für das Folgeprodukt anzusehen war. Noch 1936 schlug der Versuch von C. Ruben fehl, C14 durch den Be-

schuß von Stickstoffnitrat mit Hilfe des gerade fertiggestellten 27-Inch-Zyklotrons nachzuweisen [Taylor 1987, 149]. Ein anderes Experiment von McMullen mit Ammoniumnitrat wurde abgebrochen, nachdem ein Unfall den Probenbehälter zerstört hatte [Kamen 1963, 586]. Jede weitere Arbeit über radioaktiven Kohlenstoff ruhte danach bis 1939.

Man ging von einer sehr kurzen Halbwertszeit des radioaktiven Isotops C14 aus – einige Stunden bis Tage – und vermutete, daß vor allem die Kollision von C13 (etwa 1% Anteil am Gesamtkohlenstoff) mit Deuteronen (Kern des »schweren« Wasserstoffs, bestehend aus je einem Proton und einem Neutron) eine C14-Ausbeute erbringen würde. Wenn es überhaupt einen natürlichen Prozeß der Erzeugung von C14 geben sollte, dann müßte die Halbwertszeit ohnehin sehr kurz sein. Eine Anreicherung schien jedenfalls nicht stattzufinden, da das C14 in der Natur einfach nicht nachzuweisen war. Die Medizin suchte ohnehin vor allem nach Isotopen mit relativ kurzen Halbwertszeiten, und künstlich hergestellte Isotope waren eher für kurze als für lange Halbwertszeiten bekannt [Kamen 1963, 586]. Das gilt auch für die ausschließlich künstlich produzierten Isotope C10, C11 und C15. Das führte in den Anfängen der Erprobung des kurzlebigen C11 – das Isotop hat eine Halbwertszeit von lediglich 20 Minuten – zu teils sehr obskuren Überlegungen, wie der Tracer im dichten Autoverkehr schnell genug von der Produktionsstätte zum Einsatzort gelangen könnte. Die Überlegungen reichten vom Einsatz einer Polizeieskorte bis zur Verwendung von Brieftauben [Kamen 1964, 588].

1939 wurde, ausgelöst durch eine Debatte über die praktische Bedeutung radioaktiver Isotope in der biomedizinischen Forschung, erneut gezielt nach radioaktiven Isotopen für die biologisch bedeutsamen Elemente – also Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff – gefahndet. M. Kamen und C. Ruben wurden auf den radioaktiven Kohlenstoff angesetzt. Sie setzten eine Graphitprobe einer Deuteronenstrahlung aus und wiesen mit Hilfe eines von W.F. Libby bereits 1933 entwickelten »Screen-Wall«-Zählers in der zu  $\text{CaCO}_3$  umgewandelten Kohlenstoffprobe neuerzeugten radioaktiven Kohlenstoff C14 nach.

Nur um sicherzugehen, daß dagegen der Neutronenbeschuß von Stickstoff keinen quantitativen Beitrag zur Erzeugung von C14 erbringen könne, wurde ein entsprechendes Ausschließungsexperiment mit einer gesättigten Ammoniumnitrat-Lösung gemacht. Zur Überraschung aller Beteiligten brachte bereits eine kleine Menge des bestrahlten Stickstoffs den Zähler an den Anschlag. Binnen kurzem – nämlich bis Februar 1940 – konnten die beiden Forscher zeigen, daß die Bestrahlung von Stickstoff mit thermischen (d.h. langsamen) Neutronen bei weitem die größte Ausbeute an radioaktivem Kohlenstoff C14

erbringt und zusätzlich auch, daß die Halbwertszeit des Isotops deutlich größer als 1.000 Jahre – im Bereich zwischen 1.000 und 100.000 Jahren liegend – sein muß [Kamen 1985, 122-146].

Wenige Monate zuvor hatte S.A. Korff den zweiten wesentlichen Beitrag geliefert, um die chronometrische Gretchenfrage aufwerfen zu können: »Kann das Alter von organischen Überresten durch Vermessung ihres C14-Gehaltes bestimmt werden?« Denn Korff war angetreten, das Vorkommen von Neutronen in der kosmischen Strahlung, die die Erde trifft, nachzuweisen. Dazu entwickelte er ein Spezialzählrohr und griff sogar auf Vorarbeiten von Libby zurück, der mit Boron-Trifluorid als Zählgas experimentiert hatte.

Korff schickte sein speziell für Neutronen entwickeltes Zählrohr mit einem Ballon in die höheren Atmosphärenschichten, und fand einen Anstieg der Neutronendichte bis hin zu einer Höhe von 16 Kilometern und eine rapide Abnahme oberhalb dieser Höhe. Wenn also Neutronen mit der kosmischen Strahlung eintrafen, dann mußten sie in den oberen Atmosphärenschichten sukzessive immer weiter abgebremst werden, bis diese von seinem Zählrohr, das selektiv auf Partikel bestimmter Energie ansprach, detektiert werden konnten. Er notierte, daß dieser Abbremsungsprozeß auch dazu führen müsse, daß in bestimmten Schichten Stickstoffatome nun von Neutronen zu C14 umgewandelt würden [Korff/Danforth 1939].

Während die Zyklotrontechnik die Möglichkeit der künstlichen Erzeugung von Isotopen versprach, ergab sich hier in der Literatur der erste Hinweis auf natürlich vorkommendes C14. Libby hatte im Nachhinein immer betont, daß die Lektüre dieses Artikels einer der entscheidenden Auslöser für die Entwicklung der Datierungsmethode mit Hilfe des C14 gewesen sei: »Mit der Lektüre von Korff's Veröffentlichung wußte ich es: Das war die C14-Methode« (Libby in einem Interview 1979; nach Taylor [1987, 151]).

Nun sollte der Kriegseintritt der USA und die Entscheidung für die Entwicklung und den Bau der Atombombe die amerikanischen Chemo- und Atomphysiker für die nächsten 5 Jahre von allen praktischen Arbeiten in dieser Richtung abziehen und nur noch Raum für Spekulationen und intellektuelle Gärungsprozesse lassen. Die Basis der C14-Methode war einfach genug, wie Libby in einer Reminiszenz 1970 nonchalant betont hatte: Es mußte aufgrund der Einwirkung der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre eine gewisse C14-Ausbeute pro Quadratcentimeter Erdoberfläche geben. Da dies, so Libby, seit Zehntausenden von Jahren gleichbleibend vor sich gegangen sei, müsse auch umgekehrt ein gleich starker Zerfall von C14 pro Quadratcentimeter Erdoberfläche stattfinden.

Libby nannte die Zahl von zwei neu entstandenen C14-Atomen pro Sekunde und Quadratzentimeter, die seinerzeit offenbar aus den bekannten Randbedingungen mit Hilfe kernphysikalischer Modelle berechnet worden war. Da andererseits das Vorkommen des Kohlenstoffs im Mittel mit 8 Gramm je Quadratzentimeter Erdoberfläche abgeschätzt werden konnte, war zu erwarten, daß in 8 Gramm reinen Kohlenstoffs je Sekunde 2 Zerfallsereignisse registriert werden sollten. »Von dieser Konzentration an Radiokarbon konnten wir also ausgehen und es war nunmehr unsere Aufgabe, sie nachzuweisen« [Libby 1970a, 2]. Erst wenn dieser Nachweis gelungen war, konnte begonnen werden, über die Interpretation noch geringerer Konzentrationen in historischen organischen Proben nachzudenken.

Mehrere Dinge waren zu tun, wenn diese »verrückte, jenseits jeder Glaubwürdigkeit angesiedelte Idee« [Taylor 1987, 152] überhaupt weiterverfolgt werden sollte. Das Wichtigste war zweifellos, die tatsächliche Radioaktivität von Kohlenstoff in Lebewesen zu messen, oder nach dem damals äußerst unvollkommenen Stand der Technik treffender: tatsächlich messen zu können. Wenn das erstmal möglich war, dann bestand die vordringlichste Untersuchung im Vergleich der Radioaktivität möglichst vieler unterschiedlicher moderner organischer Proben. Zu berücksichtigen waren Unterschiede in der geographischen Herkunft, aber auch Unterschiede im Stoffwechsel. Erst wenn sich die Kohlenstoffradioaktivitäten moderner, gleichaltriger Proben aus unterschiedlichen Gegenden der Erde als gleich erwiesen, dann konnte auch die Radioaktivität historischer Proben sinnvoll interpretiert werden.

Die übereinstimmende Kohlenstoffradioaktivität bei modernen Proben würde beweisen, daß sich das in den oberen Atmosphärenschichten produzierte C14 zumindest heutzutage gleichförmig über die Erde in alle Kohlenstoffreservoirs verteilt. Als nächsten Schritt mußte dann gezeigt werden, daß archäologische Proben generell diejenige Restaktivität aufweisen, die sich aus der radioaktiv bedingten Abnahme moderner Kohlenstoffradioaktivität in der Zeit ergeben würde, die ihnen von der Altertumswissenschaft als Absolutalter zugemessen wurde. Erst dann konnte von einer örtlich und zeitlich homogenen Kohlenstoffradioaktivität gesprochen werden und aus der Messung der Kohlenstoffradioaktivität einer beliebigen Probe ihr Absolutalter bestimmt werden.

Bevor man sich überhaupt Proben aus den Magazin- und Ausstellungsräumen der Altertumswissenschaft widmen konnte, mußte natürlich die Halbwertszeit des C14 genau genug bekannt sein. Erst dann konnte ein »C14-Alter« errechnet und mit dem bekannten historischen Alter verglichen werden. Libby hatte 1946 in einem Artikel in der *Physical Review* betont, daß

erst eine Halbwertszeit länger als 1.000 Jahre für eine ausreichend homogene Durchmischung der irdischen Kohlenstoffreservoirs – in den Tiefen des Ozeans wie in der untersten Schicht des für das Biotop bedeutsamen Humus – sorgen könnte. Waren die Probleme »Bestimmung der Halbwertszeit« und »Bestimmung der Streuung der modernen C14-Konzentration« erst einmal gelöst, dann konnte man sich endlich Artefakten zuwenden, für die bereits ein exaktes Absolutdatum vorlag. Und die alles entscheidende Frage lautete dann: entsprach das aus der Radioaktivität des Kohlenstoffs der alten Probe unter der Annahme allzeit konstanter C14-Konzentration errechnete Alter dem bekannten historischen Alter?

#### 6.4 Chicagoer Lehrjahre

Seit 1946 war bekannt, daß die Halbwertszeit des radioaktiven Kohlenstoffisotops C14 bei etwa 5.000 Jahren liegen muß. Auf der Basis dieses Wertes ergibt sich für jedes Prozent an Meßfehler ein Datierungsfehler von rund 80 Jahren (vergleiche Textbox **7.7**). Daß Libby ob solcher Zahlenverhältnisse und angesichts der allgemein völlig unzureichenden Meßtechnik nicht den Mut verlor, ist vorderhand kaum nachzuvollziehen.

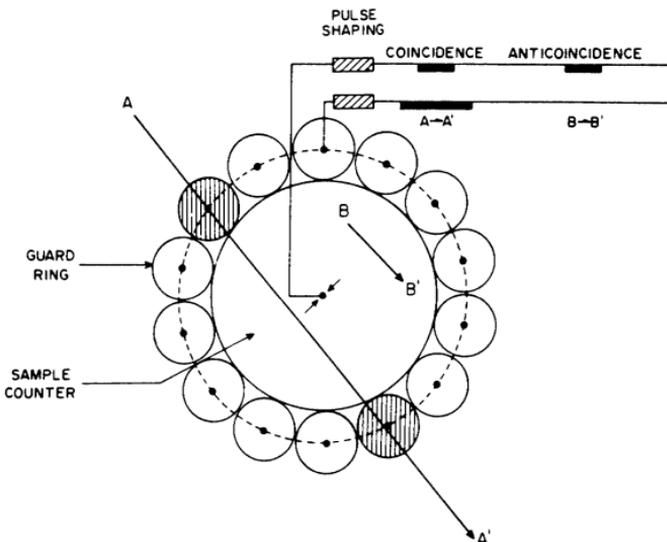
1965 machte Libby eine Bemerkung zu den Motiven, sich dieser Sisyphusarbeit dennoch hinzugeben und den Trick herauszuarbeiten, wie eine Stecknadel im Heuhaufen stets mit Sicherheit gefunden werden könne. Die C14-Methode, so Libby, wäre einer Sehnsucht entsprungen, der Realität zu entfliehen, was mit den Mühen der Wissenschaftler um die Entstehung der Atombombe zu tun gehabt hätte. »Es ging um das Verlangen, etwas Nutzloses, etwas Unpraktisches zu entdecken, etwas, das wohl interessant, letztlich aber unbedeutend sein sollte«. Bei allem Stolz angesichts der erreichten Ergebnisse solle man sich daran erinnern, daß sie tatsächlich ohne Gedanken an ihre Praktikabilität oder ihre Nützlichkeit entwickelt worden sei [Libby 1965, 745].

Es gab keinerlei Instrumente, die für den Nachweis der extrem niedrigen Aktivitätsrate von natürlich inkorporiertem modernem Kohlenstoff – rund 15 Zerfälle pro Gramm Kohlenstoff in einer Minute – konzipiert worden waren. Zählrohre mit der dafür angemessenen Oberfläche von rund 3.000 cm<sup>2</sup> zur Aufnahme eines entsprechend aufbereiteten Kohlenstoff-Films wären nur mit einer Hintergrundstrahlung von über 4.000 Zählereignissen pro Minute zu betreiben gewesen, wobei gleichzeitig nur etwas mehr als 40 Zerfallsereignisse aus dem Kohlenstoff-Film selber zu erwarten gewesen wären. Das war ein absurdes Verhältnis, ohne die geringste Chance zu lassen, die Radioaktivität des

## 6.6 Das Prinzip der »Anti-Koinzidenz«

Libby fand eine genial einfache und zugleich äußerst wirksame Lösung, die Auswirkung der kosmischen und terrestrischen Hintergrundstrahlung zu unterdrücken. Auf die innere Oberfläche des großen Zylinder ist ein dünner Film aus möglichst reinem Kohlenstoff aufgebracht, der aus der zu untersuchenden Probe extrahiert worden ist. Die von einem radioaktiv zerfallenden C14-Atom ausgesandte Betastrahlung (ein Elektron) wird innerhalb des Zylinders detektiert (B - B'), während die Wirkung anderer Partikel, die durch das große Zählrohr treten, auch von den ringförmig um den großen Zylinder angeordneten kleinen Zählrohren registriert (A - A') und folglich unterdrückt werden können (vergleiche auch Bild 6.7).

Verunreinigungen des Gases im großen Zählrohr oder des Kohlenstoff-Films durch Kontamination im Labor (bzw. bereits während seiner Lagerzeit) bleiben von dieser Maßnahme allerdings unberührt und müssen sorgfältig vermieden bzw. – so weit es überhaupt geht – rückgängig gemacht werden. C14 ist nur in Spuren dem C12 (~99%) bzw. C13 (~1%) beigemengt – sein Anteil am Gesamtkohlenstoff beträgt lediglich  $1.5 \cdot 10^{-10} \%$  – und produziert eine Zerfallsrate, die gegenüber Isotopen mit einer Halbwertszeit, die in Tagen (und nicht in Jahrtausenden) gemessen wird, zusätzlich um den Faktor 1 Million niedriger ausfällt (Textbox 6.2). Die Unterdrückung der Hintergrundstrahlung gelang anfänglich nur bis zur Größenordnung des zu messenden Signals selber. Die Summe der Fehlerquellen war so groß, daß Libby und seine Mitarbeiter das für die Eleganz der Methode so wichtige Fundamentalprinzip – zeitlich und global gleichförmige C14-Konzentration – aus den erzielten Meßergebnisse herausfiltern zu können glaubten.



Kohlenstoffs auch nur qualitativ nachzuweisen [Libby 1970a, 4]. Wir erwähnen in diesem Zusammenhang eine Faustregel der Radiologie, wonach für vertrauenswürdige Messungen am Patienten die Hintergrundstrahlung sich unterhalb von 10% des Niveaus der eigentlich interessierenden Strahlung bewegen muß [zum Winkel 1975, 56].

Der erste Schritt zum wenigstens qualitativen Nachweis der Radioaktivität modernen organischen Kohlenstoffs war für Libby und seinen Kollegen Anderson schon schwer genug. Und zum wiederholten Male sollte die Medizintechnik Geburtshilfe leisten. Libby hatte einen alten Freund aus Kriegstagen während des »Manhattan Projects«, den Arzt A.V. Grosse, der in der Nähe von Philadelphia in einem Isotopen-Labor für die Krebsforschung arbeitete. Dort wurde mit dem Isotop C13 als Tracer gearbeitet. Für die Gewinnung dieses Isotops verfügte man über eine höchst kostspielige Anreicherungsanlage.

Libby schaffte es, diese Verbindung für sein Projekt zu nutzen, um seine Idee, daß auf der Anreicherungsstrecke nicht nur dieses C13, sondern in gleicher Weise auch das eventuell vorhandene C14 mit angereichert werden könnte, zu überprüfen. Anfang 1947 kam die Untersuchung in Gange. Die Anreicherungsanlage war für Methan  $\text{CH}_4$  ausgelegt und so besorgte Dr. Grosse höchstpersönlich das entsprechende Gas aus der städtischen Kläranlage, in der Annahme, daß hier die größtmögliche Konzentration von C14 anzutreffen sei. Im Gegensatz dazu müßte Methan aus Erdgas frei von C14 sein, da die Zwischenlagerzeit seit seiner Entstehung bis heute als ein Vielfaches der Halbwertszeit angenommen werden konnte. Dieses Gas erhielt man von der Sun Oil Company, dessen Präsident ein Freund von Dr. Grosse war.

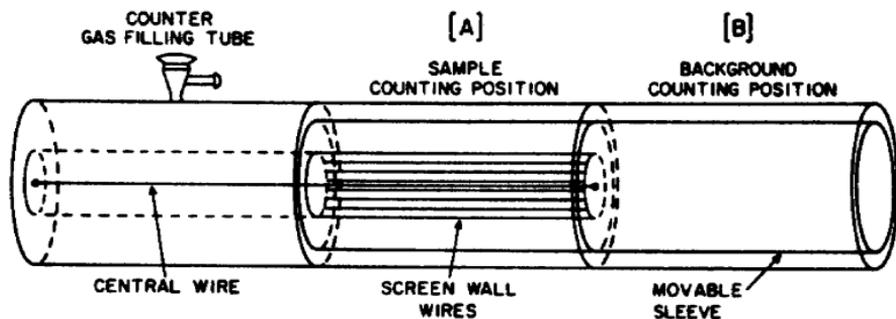
Die Dinge nahmen ihren Lauf: »Dr. Grosse unternahm die stufenweise Anreicherung des Methan aus der Abwasserkläranlage, was durch die Anreicherung des C13 kontrolliert werden konnte, während Dr. Anderson und ich das behandelte Methan nach jedem Anreicherungsdurchgang mit unserem Proportionalzähler untersuchten, wobei wir das Ganze hinter der dicksten Abschirmung vornahmen, die wir darstellen konnten, um die Einwirkung diverser radioaktiver Quellen innerhalb des Labors, sowie die der kosmischen Strahlung, die die Erdoberfläche in Chicago erreichte, möglichst gering zu halten. Eigenartigerweise funktionierte die Geschichte und wir entdeckten tatsächlich die Auswirkung der erwarteten C14-Anreicherung als kleine Erhöhung der Zählrate gegenüber der Zählrate, die sich aus der Vermessung des unangereicherten Kläranlagen-Methans sowie des Methans, das aus dem Petroleum gewonnen worden war, ergeben hatte« [Libby 1970a, 3].

### 6.7 Libbys »Screen-Wall« Zähler

Das Bild zeigt eine schematische Darstellung des anfänglich von Libby und seinen Mitarbeitern eingesetzten Zählerarrangements. Diese Anordnung ermöglichte das abwechselnde Zählen der von der Probe stammenden Signale und der Hintergrundstrahlung, indem das Rohr mit dem Kohlenstoff-Film in den Zählbereich hinein (in das mittlere Drittel) bzw. aus ihm herausgeschoben werden konnte (in das rechte Drittel). Die Überwachung der Hintergrundstrahlung war so wichtig, weil sie anfänglich auch durch noch so subtile Hilfsmittel nicht deutlich unter das Niveau der zu messenden Strahlung zu drücken war.

Der Wirkungsgrad des auf festem Kohlenstoff basierenden Zählers betrug nur ~5%. Gaszähler mit höheren Drücken und größeren Volumina sollten bald möglich werden und den von Libby eingesetzten Typ ablösen, zumal so der Einfluß des Fallouts aus den kommenden Atombombenversuchen während der Präparierung besser vermieden werden konnte. Der von Libby benötigte feste reine Kohlenstoff wurde durch Reduktion des zu  $\text{CO}_2$  verbrannten Probenkohlenstoffs gewonnen und zu einer Paste verarbeitet, die dann auf die Innenseite des beweglichen Zylinders aufgebracht wurde.

Screen Wall Counter



Insbesondere fand man einen zum Grad der Anreicherung proportionalen Anstieg der Radioaktivität des rezenten Gases, während eine Anreicherung des »fossilen« Erdgases zu keinem signifikanten Anstieg der Radioaktivität führte [Taylor 1987, 153]. So lag ein substantieller qualitativer Nachweis vor, daß in lebenden Organismen, nicht aber in Überresten alter Organismen, Spuren radioaktiven Kohlenstoffs vorhanden sind. Nun verblieb die Hürde der quantitativen Bestimmung dieses Unterschiedes sowie – als letztes Ziel – die möglicher Differenzierungen zwischen »modern« und »alt«.

Für Libby war klar, daß auf Dauer eine Zusammenarbeit mit Dr. Grosse oder auch einer anderen Institution für Isotopenanreicherung nicht in Frage kam; das Verfahren war einfach viel zu teuer. Das Ganze hatte, wie Libby lakonisch anmerkte, einen Geldbetrag verschlungen, mit dem man mehrere archäologische Museen für einen Monat hätte betreiben können [Libby 1970a, 4]. Anstatt also die Konzentration des radioaktiven Kohlenstoffs auf so kostspielige Weise zu vervielfachen, mußte – auf Biegen und Brechen – die Empfindlichkeit des Zählerensembles gegenüber der natürlichen Hintergrundstrahlung entscheidend abgesenkt werden. Anderenfalls war das Projekt verloren.

Während die sorgfältige Ausstattung des Labors mit nicht-kontaminiertem Material und die Verwendung aufwendiger Schirme für das Zählerensemble die Hintergrundstrahlung zur allgemeinen Verzweiflung nur auf 600 Zerfälle pro Minute herunterbrachte – man dachte schließlich sogar an eine Verlagerung des Labors in ein Bergwerk –, gelang der entscheidende Durchbruch endlich mit einer »Anti-Koinzidenz«-Überwachung des zentralen Zählrohrs (vergleiche Bilder **6.6** und **6.7**): Weil der größte Teil der eintreffenden kosmischen Strahlung lediglich die Atmosphäre ionisiert und Materie bis zu einer gewissen Dicke durchdringen kann, können grundsätzlich alle das C14-Zählrohr durchfliegenden, an sich unerwünschten aber nicht abweisbaren Teilchen durch ein Arrangement konzentrisch angeordneter Zusatzzählrohre detektiert werden.

Das geschieht folgendermaßen: Jedes Partikel, das das Hauptzählrohr durchstreift und somit einen »falschen Zerfall« anzeigt, muß zusätzlich durch genau zwei äußere Hilfszählrohre treten. Diese Dreifachzähler können dann aus der Bilanz wieder herausgenommen werden bzw. die Auswerteelektronik des zentralen Zählrohrs zum Zeitpunkt des eintretenden Ereignisses entscheidend blockieren. Die  $\beta$ -Teilchen aus dem radioaktiven Zerfall des Kohlenstoffs treten hingegen theoretisch höchstens durch 2 Zählrohre, sind in Praxis aber viel zu schwach, um das Hauptzählrohr überhaupt zu verlassen.

Mit diesem neuen Arrangement blieb ein Residuum der Hintergrundstrahlung, das als beherrschbar angesehen wurde. Während man ohne diesen

»Trick« immerhin bei einer Hintergrundstrahlung von 150 Zerfällen pro Minute (counts per minute bzw. cpm) angelangt war [Arnold 1992, 6], sprach Libby 1970 von 13 cpm, die damals dank der neuen Auswertetechnik verblieben gewesen seien [Libby 1970a, 5]. In einem anderen Aufsatz berichtete er [1967, 10-11] dagegen von einer Hintergrundstrahlung unter optimierter Abschirmung von 100 cpm, die durch das Anti-Koinzidenz-Arrangement auf 5-6 cpm gesenkt werden konnte. In einer Veröffentlichung in SCIENCE [Libby et al. 1949, 227] bezifferte Libby diesen Sprung mit 140 cpm, nämlich von 150 auf 10 cpm, während in einer anderen Veröffentlichung aus demselben Jahr [Arnold/Libby 1949b, 678] die verbliebene Hintergrundstrahlung mit 7.5 cpm angegeben wurde. Für 1951 wurden dann 4 cpm an verbliebener Hintergrundstrahlung vermeldet [Anderson et al. 1951].

Wir kommen nicht umhin, diese unterschiedlichen Angaben als Hinweis zu nehmen, wie vertrackt das Problem »Hintergrundstrahlung« seinerzeit trotz aller Bemühung blieb, und wie oft die Methode verändert und verfeinert wurde, um überhaupt zu einigermaßen passablen Ergebnissen zu kommen. Das Bereinigen des Meßwertes von der Hintergrundstrahlung ist von entscheidender Bedeutung, solange diese in der Größenordnung des erwarteten Signals selber ist. Die uneinheitlich angegebene Hintergrundstrahlung birgt mithin die Gefahr von ganz erheblichen Datierungsdifferenzen. Das sollte nicht vergessen werden, wenn im Folgenden auf die Stichhaltigkeit von Libbys Beweis des sogenannten »Fundamentalprinzips« eingegangen wird, nach dem die C14-Konzentration in der altertumswissenschaftlich bedeutsamen Vergangenheit stets konstant gewesen sei.

Allein wenn man bedenkt, daß der Wirkungsgrad des Libby-Zählrohrs nur bei 5% lag [Taylor 1987, 157], dann verursacht eine um einen Prozent abweichende Neubestimmung des Wertes der Hintergrundstrahlung (was eine äußerst schmeichelhafte Annahme darstellt) eine Datierungsverschiebung von über 1.600 Jahren. Es gab also von Anfang an genügend Anlaß, den auf dem seinerzeitigen Stand der Technik getroffenen Aussagen Libbys über die angebliche Gültigkeit von Fundamental- und Simultanitätsprinzip mit großer Vorsicht gegenüberzutreten. Wie jeder weiß, huldigt man den Ergebnissen aber bis heute nahezu kritiklos.

Während des ganzen Jahres 1948 wurden nach und nach Teilprobleme bewältigt: die Unterbindung der Verunreinigung des Zählgases mit radioaktivem Radon, die Entwicklung einer Methode zur wiederholten Messung der Hintergrundstrahlung während der (prinzipiell mehrtägig durchgeführten) Aktivitätsmessung, die penible Aufbereitung einer Kohlenstoffpaste aus der

fraglichen Probe zur Aufbringung in ein während der Messung beweglich gehaltenes Rohr.

Das alles diente zur Vorbereitung der dann unter Hochdruck (und vermutlich auch Hochspannung) vollzogenen Aktivitätsmessung an zahlreichen Holzproben lebender bzw. gerade gefällter Bäume aus unterschiedlichsten Gegenden der Erde. Die Streuung in der C14-Aktivität bei den so zusammengetragenen Holzproben war die Unsicherheit, die durch technische Optimierung etc. nicht kompensierbar war, und demzufolge für die »natürliche« Unsicherheit der C14-Altersbestimmung stehen würde. Der Ausgang dieses »Experimentum crucis« würde über das Schicksal des von Libby und seinen Kollegen so mühsam in Gang gesetzten und vorangebrachten Projektes entscheiden, das mittlerweile von einigen Archäologen aufmerksam mitverfolgt wurde.

### 6.5 Das »Experimentum crucis«

Die entscheidenden Untersuchungen wurden von E.C. Anderson im Rahmen seiner Doktorarbeit durchgeführt und die Ergebnisse 1949 in *SCIENCE* unter dem Titel »Age Determination by Radiocarbon Content: World-Wide Assay of Natural Radiocarbon (Altersbestimmung aus dem Gehalt an Radiokarbon: Weltweite Untersuchung des natürlich vorkommenden Radiokarbons)« veröffentlicht. Die drei Jahre später in Libbys Monographie »Radiocarbon Dating« [1952] abgedruckte Tabelle wies rund 20% höhere Werte für die gefundenen Radioaktivitätswerte auf, was mit einer Rekalibrierung des Zählerarrangements erklärt wurde [Libby 1952, 16]. Welcher Befund hatte sich bei der Untersuchung der Kohlenstoffradioaktivität weltweit gesammelter Holzproben ergeben? Ließ dieser die Annahme der Gleichverteilung zu, oder mußte von geographischen Schwankungen ausgegangen werden, die die Interpretation historischer Proben natürlich ungleich schwieriger gestalten würde?

Der 1949 präsentierte Befund stellte eine weltweit homogene Verteilung des radioaktiven Kohlenstoffs »innerhalb des Meßfehlers« fest und gab die mittlere Kohlenstoffradioaktivität mit  $12.5 \pm 0.2$  cpm an<sup>16</sup>. Eine Überarbeitung des Befundes ergab 1952 einen Wert von  $15.3 \pm 0.1$  cpm. Diese Werte waren pure Augenwischerei, da ein Standardtest der Statistik auch damals ergeben hätte, daß die Proben mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit keine gleich große Radioaktivität besitzen (vergleiche Bilder **7.6** und **7.9**).

<sup>16</sup> cpm (counts per minute) sind hier auf einen Gramm reinen Kohlenstoff bezogen (richtig also: counts per minute and gram<sub>Carbon</sub>).

Libby und seine Mitarbeiter hatten mit ihrer Untersuchung das Gegenteil von dem bewiesen, was sie dem wissenschaftlichen Publikum als Ergebnis präsentierten. Tatsächlich lag eine statistisch signifikante Ungleichheit der Radioaktivitätswerte vor, während sie die Gleichheit der Werte im Rahmen des Meßfehlers propagierten. Während sich die gefundenen Meßwerte nahezu gleichförmig über einen Bereich verteilen, der umgerechnet einem Zeitraum von knapp 1.000 Jahren entspricht, repräsentiert die als Endergebnis angegebene Gaußverteilung eine Kompression auf ungefähr  $\pm 50$  Jahre Schwankungsbreite und suggerierte damit eine Solidität der Annahme von der Gleichverteilung des C14 in modernen Organismen, die statistisch gesehen mitnichten gegeben ist.

Hätten sich Libby und seine Mitarbeiter seinerzeit auf die Grundregeln der Statistik besonnen, hätten sie ihren Versuch zur Etablierung der These von der Gleichverteilung, abgeleitet aus der »weltweiten Untersuchung des Radiokarbons«, als gescheitert bezeichnen müssen. Die gemessene Konzentration schwankte so stark, daß von einer C14-Methode – jedenfalls zu dem damaligen Zeitpunkt – keine nutzbaren Beiträge quantitativer Art hätten erwartet werden dürfen. Das Buch, in dem die Geschichte der beharrlich voranschreitenden Streiter für eine leuchtende Fackel im Dunkel der absoluten Chronologie bis hierhin geschrieben worden war, hätte an dieser Stelle zuge schlagen werden müssen.

Ein weiterer Pferdefuß zeichnete sich deutlich aus den Meßergebnissen ab. In den beiden Tabellen von 1949 und 1952 werden Messungen an Muschelschalen aufgeführt, deren Aktivität ganz offensichtlich systematisch höher liegt als die der Hölzer. Der entsprechende Altersunterschied liegt umgerechnet immerhin zwischen 600 und 1.000 Jahren. Die Delikatesse dieses Ergebnisses besteht in der Tatsache, daß die Muscheln und nicht etwa die archäologisch viel bedeutsameren Hölzer als Spiegel der globalen C14-Konzentration gelten müssen. Das bedeutet schlicht, daß lebende Organismen auf je spezifische Weise das ihnen in den großen Kohlenstoffreservoirs gegenüberstehende »natürliche« Isotopenverhältnis während des Stoffwechselprozesses zugunsten des natürlichen Kohlenstoffisotops C12 verschieben. Diskussionen mit unabsehbaren Folgen hätten darüber entfacht werden müssen, welche Organismen wie stark diesen Fraktionierungsprozeß vollziehen, und ob dieser bei den relevanten Spezies auch über die Jahrtausende konstant geblieben sei.

Zwei fundamentale methodische Probleme waren also aufgetaucht, von denen jedes mit Datierungsunsicherheiten von rund 1.000 C14-Jahren verbunden waren. Libbys globale Streuung der Meßwerte um rund 1.000 C14-

Jahre hat ihr modernes Äquivalent in der Binsenweisheit des »one date is no date« (vergleiche Kapitel 7.6), wonach die C14-Alter von archäologisch für gleichalt befundenen Proben um Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende divergieren können. Die von Art zu Art unterschiedlich starke Assimilation des C14-Isotops wird als Isotopenfraktionierung beschrieben und für korrigierbar gehalten, ohne daß jemals eine Änderung dieses Effektes mit der Zeit ernsthaft diskutiert worden wäre.

Vielleicht wurde das alles so wenig kritisch betrachtet, weil Libby und seine Mitarbeiter in einem weiteren Artikel nunmehr archäologische Evidenz für die Stimmigkeit des Verfahrens präsentierten, die nun allen Erwartungen gerecht werden konnte. Wir werden diesen Artikel im nächsten Kapitel genauer untersuchen und können vorwegnehmen, daß die Größenordnung der Schwankungen von rund 1.000 Jahren in den Messungen auch für die dort vorgestellten Proben wiedergefunden werden kann.

Viele naturwissenschaftliche Effekte sind trotz anfänglicher krasser Mißerfolge am Ende doch noch gefunden worden, weil transzendente Argumente oder Empfindungen (»Symmetrie«, »Einfachheit«, »Ästhetik«) Forschern ausreichend Gewißheit gaben, um die Durststrecke zeitweiser Falsifizierung ihrer Hypothesen durchzustehen. Eine solche Einstellung wäre im Falle der C14-Methode im nachhinein gerechtfertigt gewesen (und sogar ein wenig zu bewundern), wenn die anfangs gegebenen Schwierigkeiten mit der Zeit beseitigt worden wären.

Doch das Gegenteil ist hier der Fall. Diese Schwierigkeiten ziehen sich durch die nächsten Jahrzehnte durch und zwingen die Forscher zu fundamentalen Methodenanpassungen und -brüchen, nur um die tendenziell ausufernden systematischen Schwierigkeiten im Rahmen zu halten. Für uns ist deshalb ein Argument wie: »Das war nur am Anfang so, später konnten die meisten Probleme doch gelöst werden« nicht stichhaltig. Libby war von Beginn an mit genau denselben Schwierigkeiten konfrontiert, die auch heute die Debatte der Fehler bestimmen. Es gibt eine Interdependenz zwischen anfänglicher Blindheit und der mit der Zeit entwickelten verfeinerten Methodik, die den Blick auf die fundamentalen Schwächen gekonnt verdecken half.

Weil am Beginn die große Schwäche des Ansatzes systematisch ignoriert bzw. »schön« gerechnet wurde, waren alle danach ausgearbeiteten Methoden mit derselben Augenwischerei verbunden. Die eigentlichen Probleme – insbesondere die Ungültigkeit des Simultanitätsprinzips – wurden zu keiner Zeit zur Kenntnis genommen und deshalb auch nicht bearbeitet. Jetzt kommen wir aber zu der Behandlung archäologischen Materials bekannten Alters durch

Libby, der damit eine zweite Phase der Überprüfung seines methodischen Ansatzes eröffnete.

## 6.6 Die »Curve of Knowns« 1949

Libby war im Oktober 1945 einem Ruf an das »Department of Chemistry and Institute for Nuclear Studies« der University of Chicago gefolgt und hatte dort mit 36 Jahren als jüngster ordentlicher Professor einen Lehrstuhl in Chemie übernommen. Er tat das auch, um weiter mit H.C. Urey zusammenarbeiten zu können. Nur Urey sollte in den kommenden Jahren von der verrückten Idee Libbys Kenntnis haben, »den Beweis anzutreten, daß eine Datierung mit C14 die Geschichte der Zivilisation enthüllen könnte« [Taylor 1987, 152]. Libby übte komplette Zurückhaltung, wenn es um die C14-Datierung ging: »Er war der Meinung, daß die öffentliche Diskussion einer solch verrückten Idee ihn als Phantasten abstempeln und ihn weder Mittel noch Studenten zur Unterstützung seiner Forschungen finden lassen würde« [Libby 1980, 1018f.]. Doch bereits zeitgleich zu dem ersten ernsthaften Experiment (der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Aktivitätsmessung an modernem und an fossilem Methan) brachte die Post Libby bereits eine erste Herausforderung ins Haus, ein Paket mit altägyptischen Artefakten, geschickt von Kurator der Ägyptischen Abteilung des Metropolitan Museums von New York.

J.R. Arnold, einer der Mitarbeiter Libbys, berichtete, wie es dazu gekommen war: »In gewisser Weise hatte mich auch meine Herkunft und Erziehung auf die C14-Methode vorbereitet. Mein Vater war Anwalt von Beruf und zugleich ein ernsthaft tätiger Amateur-Archäologe, der auch als amerikanischer Sekretär der englischen Gesellschaft für Ägyptische Ausgrabungen (Egypt Exploration Society) tätig gewesen war. Das trug dazu bei, daß ich die Bedeutung von Datierungen sehr schnell begriff und an dieser Stelle setzte auch mein Beitrag im Anfangsstadium der ganzen Geschichte an. Ich besuchte Weihnachten 1946 mein Elternhaus und steckte meinen Vater offenbar erfolgreich mit meiner Aufregung an. Als ich im Januar 1947 dann nach Chicago zurückgekehrt war, hatte Libby bereits ein Paket von einem Freund meines Vaters, Ambrose Lansing, erhalten, mit zehn Proben aus verschiedenen Epochen der ägyptischen Geschichte, alle historisch wohldatiert. Lansing bot dies als Möglichkeit an, die neue Methode zu überprüfen – allerdings ein wenig zu früh. Ich war peinlich berührt, als mir Libby dieses Paket und den dazugehörigen Brief zeigte und entschuldigte mich für meine Voreiligkeit. Ich erklärte mich sogleich bereit, Lansing über den wahren Stand der Dinge aufzuklären und das Paket zurückzuschicken. Bezeichnenderweise erwiderte Libby nichts

darauf. Er nahm Paket und Brief wieder an sich und plazierte sie in dem Regal über seinem Schreibtisch. Plötzlich wurde mir klar, daß er es tatsächlich ernst meinte. Dieser Moment bedeutete für mich die Geburt des Datierungsprojektes« [Arnold 1992, 4f.].

Ende 1947, Arnold war bereits nach Harvard zu anderen Forschungsarbeiten abgereist, erklärte sich endlich der Viking Fond für Anthropologische Forschung bereit, die weiteren Entwicklungsarbeiten an der Methode mitzufinanzieren. Mit diesem Geld konnte Arnold zurückgeholt werden. Während Arnold sich auf die weitere Verfeinerung der Probenaufarbeitung konzentrierte, widmete Anderson sich der Frage, ob der radioaktive Kohlenstoff tatsächlich weltweit homogen verbreitet war (siehe vorangegangenes Kapitel). Im Laufe des Jahres 1948 war es dann soweit: Die ersten Proben bekannten Alters konnten untersucht werden.

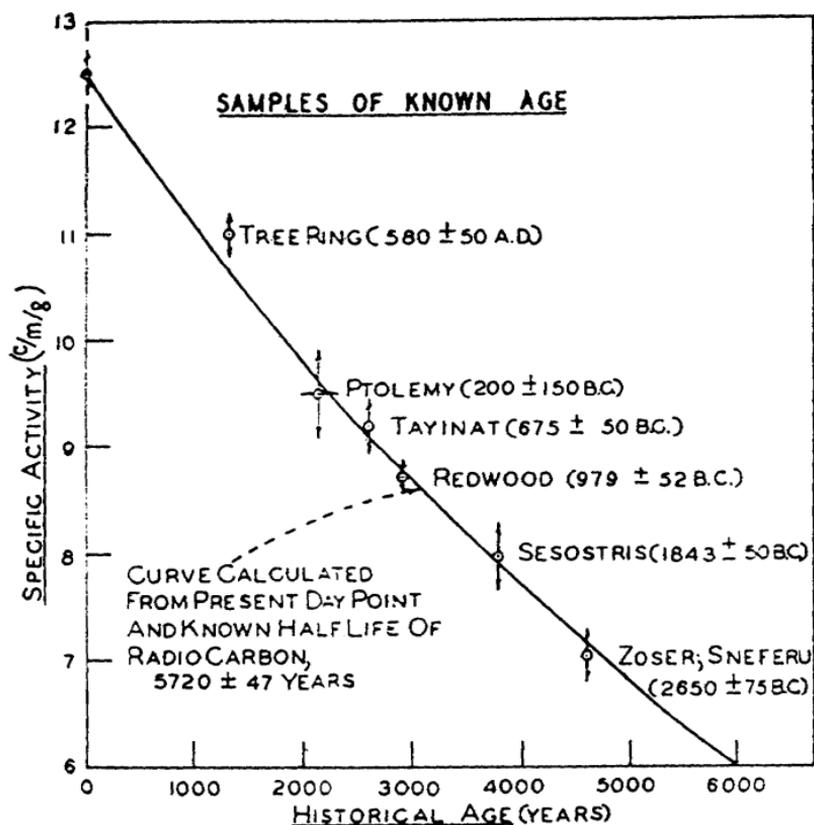
Im Januar 1948 hielt Libby den ersten öffentlichen Vortrag über die Datierungsmethode vor ausgewählten Wissenschaftlern, größtenteils Anthropologen und Archäologen. Die Veranstaltung war vom Viking Fond ausgerichtet worden. Das Hauptmotiv für die Durchführung dieser Veranstaltung war Libbys Bedarf an Proben bekannten Alters. Libby mußte allerdings die Erfahrung machen, daß sich die angesprochenen Altertumswissenschaftler vornehme Zurückhaltung auferlegten, vielleicht, weil sie zu hören bekamen, daß große Mengen an kohlenstoffhaltiger Substanz benötigt wurden und daß die Proben im Zuge der notwendigen Aufbereitung vollkommen zerstört werden müssten; kein angenehmer Gedanke, wenn es um kunsthandwerkliche Artefakte oder andere unwiederbringliche Gegenstände geht: »Diese Museums-Kettenhunde rückten doch nichts heraus, um es von einer Horde von Physiko-Chemikern einfach verbrennen zu lassen, nein wirklich nicht« (Interview mit Libby 1979; nach Taylor [1987, 155]). Die meisten Zuhörer schienen sich nicht im Klaren darüber zu sein, »ob dies nun ein ernstzunehmender Vorschlag war oder aber die Schnapsidee eines versponnenen Physikers, der über die Anstrengungen seiner Arbeit verrückt geworden ist« [Marlowe 1980, 1011].

Ein weiterer Augenöffner wurde für ihn bereit gehalten: »Es war ein Schock für Dr. Anderson und mich, von unseren historisch beschlagenen Betreuern erfahren zu müssen, daß die geschriebene Geschichte nur 5.000 Jahre zurückreichte. Ursprünglich waren wir davon ausgegangen, daß wir für die ganzen in Frage kommenden 30.000 Jahre historisch datierte Proben erhalten könnten, deren C14-Daten nur noch aufgetragen zu werden brauchten, damit unser Job erledigt war. ... Wir mußten unvermittelt zur Kenntnis nehmen, daß solche Daten d.h. solche alten Datierungen gar nicht exakt bekannt waren; tatsächlich waren erst ab der ersten Dynastie Ägyptens zuverlässige Daten be-

## 6.8 Die »Curve of Knowns«

Das Bild zeigt Libbys in SCIENCE veröffentlichte »Curve of Knowns« aus dem Jahr 1949. In späteren Versionen kamen zahlreiche C14-Alter für Proben bekannten Alters hinzu. An dem Fehlen von Proben aus dem »Neuen Reich«, das soviel Holzfunde hinterlassen hat, änderte sich allerdings nichts.

Nie wieder wurden aus so vielen Proben unterschiedlicher Herkunft und Qualität und unter so (anerkanntermaßen) schlechten Bedingungen für die Messungen so konsistente Ergebnisse erzielt. Die durchweg ausgezeichnete Übereinstimmung der gemessenen C14-Alter mit den zugeordneten Absolutaltern als furiose Bestätigung der Fundamentalannahme steht im diametralen Gegensatz zu dem normalerweise hohen Anteil von »Fehldatierungen«. Libby und seine Mitarbeiter waren ganz offensichtlich der Versuchung erlegen, aus ihrem Konvolut an Messungen diejenigen zu verwenden, deren C14-Alter – zufällig – in Übereinstimmung mit den von Historikern vorgegebenen Absolutaltern lagen. Der Glaube an die Gleichförmigkeit der Natur erlaubte es, von einer angemessenen Auswahl statt von einem Betrug zu sprechen.



kannt« [Libby 1961b, 102]. Libby wollte mit seiner neuen Methode Licht in ein chronologisches Dunkel der Geschichte tragen, dessen Ausmaß ihm in keiner Weise bewußt war. Im Grunde hätte er bereits damals erkennen können, daß er ein Meßverfahren entwarf, das nach seinem eigenen Wissensstand allenfalls marginalen Nutzen stiften konnte.

Mit dieser neuen Situation konfrontiert wuchs nun der Lieferung von Lansing eine unvermutet große Bedeutung zu, denn offenbar konnte nur die altägyptische Geschichte historisch gesicherte Daten liefern, um nunmehr die Methode in dem für jahrgenau richtig gehaltenen geschichtlichen Zusammenhang zu verifizieren. Nachdem das Team die Methode der Probenaufbereitung und der Zerfallsmessung bis zu einem Grad perfektioniert hatte, daß nunmehr von gesicherten Effekten gesprochen werden konnte, wurde die Kiste von Lansing Mitte des Jahres 1948 endlich wieder geöffnet und ein Stück Holz im Zusammenhang mit der Stufenpyramide von Djoser bei Sakkara für die Messung vorbereitet und verarbeitet.

Da Anderson mit unverminderter Intensität seine Dissertation betrieb, kam nun Arnold die erregende, oder wie er selber sagte: »erschreckende« Verantwortung für diesen Job zu. »An einem heißen Samstagnachmittag jenes Sommers hatte ich endlich genügend Zählereignisse unseres nach wie vor temperamentvollen Systems zusammen, um ein vorläufiges Ergebnis berechnen zu können. Ich werde niemals den Eindruck vergessen, den die Tatsache auf mich machte, daß sich eine Zählrate ergab, die in etwa zwischen dem Ergebnis für Ernie's (Anderson) moderne Holzproben und der Nullrate lag. Für einige Stunden voller Frohlocken war ich die einzige Person auf der Welt, die wußte, daß die C14-Methode funktionierte. Es sind das die Momente, für die zu leben es sich lohnt« [Arnold 1992, 6].

Sowohl Andersons Untersuchung des C14-Gehaltes moderner Organismen als auch diese ersten Messungen an alten Proben – im Zusammenhang mit den Gräbern Snofrus und Djosers – wurden im März 1949 in SCIENCE veröffentlicht. Die erwarteten und die gemessenen Aktivitäten (Zerfälle pro Minute und Gramm Kohlenstoff) bezüglich der historischen Proben wurden einander in durchaus vertrauenserweckender Übereinstimmung gegenübergestellt:  $7.15 \pm 0.15$  als erwartetem Wert gegenüber  $7.04 \pm 0.2$  als gemessenem Wert.

Die Autoren schlossen ihren Artikel mit einer Ankündigung: »Angesichts dieser Ergebnisse fühlen wir uns ermutigt, weitere Tests auch an jüngeren Proben bekannter Alters durchzuführen. Diese Arbeiten wurden bereits begonnen« [Libby et al. 1949, 228]. Wir merken an, daß in dem SCIENCE-Artikel lediglich die Proben mit der Nummer 1 und der Nummer 12 behandelt wurden.

Die Ergebnisse aus den Messungen an den Proben 2-11 sowie diejenigen mit noch höheren Nummern wurden dagegen nicht veröffentlicht.

Neun Monate später, im Dezember desselben Jahres, wurden die angekündigten Ergebnisse in einem weiteren Artikel ebenfalls in SCIENCE [Arnold/Libby 1949, 678] veröffentlicht. Dieser war betitelt mit »Age Determinations by Radiocarbon Content: Checks with Samples of Known Age (Alterbestimmung aus dem Gehalt an Radiokarbon: Überprüfungen anhand von Proben bekannten Alters)« und enthielt das erstmalig die berühmte »Curve of Knowns« (vergleiche Bild 6.8), in der die gemessene Aktivität von Hölzern aus insgesamt sieben archäologischen Komplexen in Verbindung mit der theoretischen Aktivitätskurve aufgezeichnet worden war.

Die gute Übereinstimmung zwischen den Aktivitätswerten, die für die Proben bekannten Alters gefunden worden waren, mit derjenigen Kurve, auf der alle Meßwerte liegen würden, wenn die C14-Konzentration in der Atmosphäre seit je genauso wie heute ausgefallen wäre, sollte die Stimmigkeit des sogenannten Fundamentalprinzips bestätigen. Dieses verlangt die örtliche und zeitliche Homogenität der C14-Konzentration in der Atmosphäre und war damit die entscheidende Voraussetzung, um aus einem Aktivitätswert direkt und ohne Umwege (wie er etwa durch eine »Kalibrierung« gegeben wäre) das wahrscheinliche Absolutalter der Probe auszurechnen. Wir werfen im nächsten Kapitel einen genaueren Blick auf die dort präsentierten Objekte und vergleichen die Ergebnisse auch mit denen, die gut 1 Jahr später in der ersten in SCIENCE routinemäßig veröffentlichten Datensammlung von 1951 [Arnold und Libby 1951, 120] angegeben wurden.

## 6.7 Die »Curve of Knowns« debugged

Die im Folgenden angegebenen Aktivitätswerte bezeichnen stets Zerfallereignisse pro Minute und Gramm Kohlenstoff (hier als »cpm« ohne Bezug auf die Masseneinheit abgekürzt). Der angeführte resultierende Fehler einer mittleren Aktivität, berechnet aus einer Anzahl  $N$  verschiedener Werte, ergibt sich jeweils aus der Division des mittleren Fehlers durch die Wurzel der Anzahl der Meßwerte  $\sqrt{N}$ . Beispiel: Der resultierende Fehler aus 4 Werten für die jüngste Probe »Tree Ring« ergibt so  $\pm 0.33/\sqrt{4} = \pm 0.15$ .

Diese Vorgehensweise ist nur dann gerechtfertigt, wenn tatsächlich stets Teile ein und derselben Probe gemessen wurden und die Verteilung der Meßwerte sonstige systematische Abweichungen bei den Messungen bzw. den Proben ausschließt, die sich als Abweichung der Verteilung von der Normalverteilung darstellen würden. Differieren beispielsweise die Resultate zweier

Messungen um das Doppelte des Standardfehlers, so besteht nur noch eine Chance von rund 15%, daß die Proben tatsächlich die gleiche Aktivität haben (vergleiche Bild 3.2 und die entsprechende Fußnote zu Beginn des Kapitels 7.6). Entsprechende statistische Tests für eine größere Anzahl von Meßwerten sollten eine Chance auf Gleichzeitigkeit von mehr als 50% ergeben. Das ist für die von Libby betrachteten Proben grundsätzlich nicht der Fall, was auf unbeherrschte systematische Fehler bzw. Schwankungen in den Meßverfahren und -apparaturen oder auf die Verwendung unterschiedlicher Proben hinweist.

Natürlich können für die Phase, in der die Methode noch in den Kinderschuhen steckte, keine genaueren Ergebnisse als heutzutage erwartet werden. Mithin kann davon ausgegangen werden, daß Libby und seine Mitarbeiter bei ihren verschiedenen Meßdurchläufen nicht minder große »Metafehler« gemacht haben, als die modernen Labors mit jeweils fixierten Prozessen. Das führt dann zwangsläufig zu nicht-normalverteilten Meßwertensembles auch für ein und dieselbe Probe, zugleich auch zu einem Hang, im Datennebel den wahren Wert dennoch erkennen zu können. Wir fassen die Ergebnisse Libbys von 1949 wie folgt zusammen:

- 1) Das historisch jüngste Objekt bestand aus dem Segment einer Douglas-Fichte aus dem Red Rock Valley mit knapp hundert Jahresringen. Diese waren auf die Zeit zwischen 530 AD und 623 AD datiert, entsprechend einem zu erwartenden mittleren C14-Alter von  $1.372 \pm 50$  Jahren. Das gemessene C14-Alter wurde mit  $1.100 \pm 150$  Jahren angegeben, d.h. die beiden Werte »überlappen« mit ihren Streuungen so wenig, daß der C14-Gehalt sehr wahrscheinlich nicht das vorausgesetzte historische Alter widerspiegelt. Die Analyse der Einzelmessungen ergibt folgendes Bild: Die 5 Meßwerte für die Aktivität streuten zwischen 10.15 und 11.52, entsprechend einem maximalen Altersunterschied von ca. 1.000 Jahren. Libby schrieb von einer »Ausgrabung«, nicht »Fällung« des Baumes bzw. eines Teiles von ihm, so daß daraus zu schließen ist, daß sein Alter in irgendeiner Weise dendrochronologisch bestimmt worden sein mußte. Eine schriftliche Quelle dafür wurde nicht angegeben. Ein Hinweis auf die Messung an anderen Exemplaren aus dieser Baumringchronologie wird nicht gegeben.
- 2) Auch die beiden nächsten Proben wurden ohne schriftliche Quellenangaben präsentiert. Sie sollten aus der Ptolemäischen (332-330 BC) bzw. der Syrisch-Hethitischen Periode (725-625 BC) stammen. Gemessenes und erwartetes Alter wiesen akzeptable bis gute Übereinstimmung auf. Bei bei-

den Proben bezog sich Libby jeweils auf namentlich genannte wissenschaftliche Gewährspersonen.

- 3) Für die vierte Probe wurde ein Literaturhinweis gegeben, eine im Tree-Ring Bulletin von A.E. Douglass veröffentlichte Beschreibung eines monumentalen Baumstumpfes (der sog. »Centennial Stump«) mit Fällungsjahr 1874, dem diese Probe entnommen worden war [Douglass 1946, 5ff.]. Es finden sich in der besagten Veröffentlichung keine Hinweise auf die Qualität der entnommenen Probe(n) für die Datierung, deren Behandlung oder auf die Methode der Baumringzählung. Gemessenes ( $3.005 \pm 165$ ) und erwartetes Alter ( $2.928 \pm 50$ ) stimmten gut überein. Da der »Centennial Stump« aus einem Stück bestand und das Fällungsjahr genau bekannt war, muß sich die Unsicherheit von  $\pm 165$  Jahre im wesentlichen auf die Menge hypothetischer Fehl- oder Doppelringe beziehen.
- 4) Die fünfte Probe wurde als ein Stück Holz von dem sogenannten Begräbnisboot des ägyptischen Pharaos Sesostris III. angegeben, das seinerzeit im Naturkundemuseum in Chicago gezeigt worden war. Auch hier ist die Übereinstimmung von gemessenem ( $3700 \pm 400$ ) und erwartetem Alter ( $3792 \pm 50$ ) überzeugend, allerdings liegen die beiden herangezogenen Meßwerte selber um 500 Jahre auseinander.
- 5) Die sechste Probe stammt aus dem Grab Snofrus aus Meydum und ...
- 6) ... die siebte Probe aus dem Begräbnisareal des Pharaos Djoser. Libby behandelt beide als quasi-gleichzeitig, was durch den Stand der Geschichtsforschung gerechtfertigt erschien. Während die tatsächliche Streubreite der Meßwerte beinahe 2.000 Jahre umfaßte, differierten gemitteltes und erwartetes Alter lediglich um 150 Jahre.

In der ersten in SCIENCE veröffentlichten »offiziellen« Datensammlung von 1951 sind einige Revisionen und auch zusätzliches Datenmaterial angegeben. Allerdings werden jetzt keine Aktivitäten mehr angegeben, sondern nur noch umgerechnete C14-Jahre. Während die angegebene laufende Nummer der aufgezählten gemessenen Daten bei über 500 angekommen war, sind hier weniger als 50 veröffentlicht worden. Der Grund für diese niedrige Ausbeute ist vor allem dem großen Anteil zurückgewiesener Datierungen zu suchen.

- 1) Zu der Douglas-Fichte wurden keine neuen Informationen gegeben.
- 2) Zu den Proben aus der Ptolemäischen und der Syrisch-Hethitischen Periode sind ebenfalls keine neuen Informationen vorhanden.
- 3) Für die vierte Probe »Redwood« wird nunmehr die Anzahl der Ringe bis zum Kern mit 2.905 angegeben (ohne Kommentar der Methode zur Rekonstruktion von Doppelringen oder einem anderen Fällungsjahr). Es ist

eine neue Messung hinzugekommen (2.404 gegenüber bisher 2.817 bzw. 3.045 C14-Jahren), die das bis dato doch recht homogene Ergebnis grundsätzlich in Frage stellt. Die tatsächliche Streuung der gemessenen C14-Alter liegt jetzt bei mehr als 600 Jahren, der resultierende Fehler für den Mittelwert wird dagegen mit  $\pm 130$  C14-Jahren angegeben.

- 4) Die fünfte Probe (ein Stück Holz aus dem Begräbnisboot des ägyptischen Pharaos Sesostris III.) unterzogen T. Säve-Söderbergh und I.U. Olsson zwanzig Jahre später einer neuen Bewertung hinsichtlich ihrer archäologischen Bedeutung. Tatsächlich wurden fünf Boote außerhalb der Grenze der Begräbnispyramide gefunden, ein Platz, »der nun sicherlich nicht das ist, was (für derartige Kultgegenstände) zu erwarten gewesen wäre«. Weitere Boote stammten aus noch weiter entfernten Fundplätzen, obendrein sei nicht (mehr) zu klären gewesen, von welchem Boot die Probe eigentlich genommen worden sei. Alle Boote machten im Hinblick auf das fragile historische Ereignis einen unangemessen primitiven Eindruck. Tatsächlich gibt es weder schriftliche Überlieferungen noch sonstige Hinweise, die diese Schiffe in Beziehung zu dem Begräbnis von Sesostris III setzen. Die Autoren mahnen Vorsicht bei der Verwendung der entsprechenden C14-Daten an. Das Datum wurde bei Libby [Anderson/Libby 1951] von 3.700 auf 3.621 leicht revidiert, während der Fehler von ursprünglich  $\pm 400$  [1949] auf  $\pm 180$  C14-Jahre reduziert wird.
- 5) Die Situation hinsichtlich des Fundortes für die sechste Probe aus dem Grab Snofrus aus Meydum sahen T. Säve-Söderbergh und I.U. Olsson ebenfalls als kritisch an. Es sei lediglich eine neue Messung an einer vergesellschafteten Probe gemacht worden, wobei die ursprüngliche Messung der Probe C-12 durch das Chicagoer Labor aus meßtechnischen Gründen von einer historischen Bewertung nunmehr ausgeschlossen wird [1970, 46; ebenso bei Ehrich 1992, 5]. Die einzig verbleibende Messung sei an Zedernholz vorgenommen worden, das aber sehr gut älter sein könne als die Konstruktion, in der es verwendet wurde. Das C14-Alter gibt Libby 1951 mit  $4.802 \pm 210$  an. Dem unterlegt ist eine tatsächliche Streuung der Werte in einem Bereich von knapp 1.400 C14-Jahren.
- 6) Auch die siebte Probe aus dem Begräbnisareal des Pharaos Djoser rückte in der darauffolgenden Zeit in einen unsichereren Kontext. Während Libby 1949 noch ein C14-Alter der Probe von rund 4.750 Jahren gemessen (und eine Gleichzeitigkeit mit der sechsten Probe unterstellt) hatte – und damit den Sollwert recht gut getroffen hatte –, schrumpfte dieses Alter nunmehr durch Hinzunahme dreier weiterer Messungen an derselben Probe auf 3.979 Jahre (Mittelwert) zusammen. Dieser Wert hätte Libby bei

dem Versuch, das Fundamentalprinzip zu verifizieren, erhebliches Kopferbrechen gemacht. Eine zweite Probe aus demselben Komplex ergab später zwar ein nähnliches C14-Alter von ca. 4.100 Jahren, wurde allerdings um 500 Jahre nach Djosers Regierungszeit eingeordnet.

Aus späteren Versionen der »Curve of Knowns« [Libby 1952, und folgende Auflagen] wissen wir, wie sicher sich Libby in der Gültigkeit des Fundamentalprinzips war, denn die präsentierten Meßwerte liegen bei ihm ohne irgendeine Tendenz der Abweichung auf der theoretischen Aktivitätskurve. Angesichts der großen Streuung der einbezogenen Meßwerte untereinander, sowie der zweifellos großen Anzahl unveröffentlicher Daten (die die Anzahl der veröffentlichten um ein Vielfaches übersteigt), erkennen wir eine Tendenz zur Sortierung und Berechnung, die kaum von Gesundbeten zu unterscheiden ist. Unserer Ansicht nach führte eine unvollkommene und vermutlich auch immer wieder vertrauensunwürdige Meßtechnik zu der Filterung einer Teilmenge an Meßwerten, die Libbys Vorurteil über die atmosphärische Kohlenstoffradioaktivität zu bestätigen vermochten: daß die C14-Konzentration in altertums-geschichtlich bedeutsamer Zeit grundsätzlich jeweils global genau den Wert aufwies, den Libby und seine Mitarbeiter 1949 gemessen hatten.

Nach dem Stand des Wissens, der bereits wenige Jahre danach Gültigkeit besitzen sollte, waren Libbys Ergebnisse längst überholt, ja, hätten als geschönt verdächtigt werden müssen. Weder konnte die moderne C14-Konzentration in der Atmosphäre als Maßstab für die Vergangenheit herangezogen werden, noch stimmten erwartetes Alter und gemessenes C14-Alter insbesondere für die altägyptische Geschichte auf befriedigende Weise überein. Doch niemand mochte den Verdacht aussprechen, daß Libby und seine Mitarbeiter ihre Meßwerttabellen nicht nach Lage der Dinge, sondern nach ihrer vorgefaßten Meinung über die Stationarität irdischer Randbedingungen interpretiert haben mußten.

Eine Chance war verpaßt, die Brauchbarkeit dieser im Fokus des wissenschaftlichen Interesses stehenden Datierungsmethode realistisch einzuschätzen. 50 Jahre kontinuierlicher Praxis der C14-Methode demonstrieren zugleich den ungebrochenen Willen, der Geschichte Ordnung nach einfachen und eleganten Prinzipien zu bringen.

## 7. Statistik muß sein – Lüge oder Unwahrheit?

### 7.1 Fehler helfen beim Überleben

Nicht auszudenken wäre es, wenn sich C14-Daten ohne die allseits bekannte statistische Unsicherheit bestimmen ließen. Dann lieferte ein C14-Labor Alterswerte ab, ohne daß noch ein »früher« oder ein »später« diskutiert werden müßte, so wie es tatsächlich ja immer wieder geschieht.

Das C14-Labor wäre damit in derselben Lage wie beispielsweise ein Büro für Grundstücksvermessungen. Hier gibt es keine Debatten über die Meßbarkeit des Meters im Allgemeinen oder über die Qualität geodätischer Messungen im Besonderen. Mit der Messung von C14-Daten verhält es sich dagegen völlig anders. Diese werden regulär immer mit einem Fehler angegeben, der dem Anwender signalisieren soll, daß der tatsächliche Wert innerhalb des angegebenen Intervalls nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu finden sein wird. Die Ungewißheit über den wahren Wert ist in der Praxis unter Berücksichtigung aller gegebenen Unsicherheiten immer wieder so groß, daß Interpretationen unterschiedlichster Art folgen können.

Der mögliche Wert muß in seiner Bedeutung diskutiert werden, und es steht bis zu einem gewissen Grad im Belieben des Betrachters, welche Schlüsse er präsentieren möchte. Wenn allerdings C14-Daten fehlerfrei meßbar wären, dann würden die immanenten Widersprüche sofort zu Tage treten, woraufhin sich die wissenschaftliche Welt schon längst von dieser Altersbestimmungsmethode getrennt hätte. Zu häufig kommt es auch im statistischen Sinne zu unwahrscheinlich weit auseinanderliegenden Altersangaben für Proben, die dem sonstigen Wissen nach gleichaltrig sind.

Wenn zwei Geometer die gegenüberliegenden Kantenlängen eines bekanntermaßen rechtwinklig angelegten Grundstücks vermessen haben und zu Ergebnissen kommen, die unter Berücksichtigung des möglichen Fehlers nicht übereinstimmen, dann werden beide – oder auch ein Dritter – erneut und solange ins Feld geschickt, bis konsistente Daten vorliegen. Das kann so weit gehen, daß die Meßgeräte überprüft oder die Kompetenz der Ausführenden in Frage gestellt wird.

C14-Daten haftet dagegen von vorneherein ein Geruch prinzipieller Unsicherheit an. Bei ihrer Interpretation gibt man sich deshalb offensichtlich erheblich toleranter. So werden Proben als zeitgleich ausgewiesen, deren C14-Daten dafür bei regulärer Interpretation nur noch eine Wahrscheinlichkeit von wenigen Prozent ergeben (Bild **3.2**). Es scheint das Motto zu gelten, daß lediglich das Unmögliche nicht für wahr genommen wird. So wird zwar gerne

daran erinnert, daß C14-Daten Wahrscheinlichkeiten und nicht Gewißheiten repräsentieren [Schiffer 1987, 308], doch das muß schließlich nicht heißen, daß Unwahrscheinlichkeiten akzeptiert werden müssen, die an das Unmögliche grenzen. Der Usus, C14-Daten nur dann zu verwerfen, wenn sie nahezu hundertprozentig sicher korrupt sind, ist als Abusus anzusprechen, als Mißbrauch des in der statistischen Methode vorhandenen Interpretationsspielraums.

Der Fehler oder besser die Unsicherheit, die sich in der Messung radioaktiver Zerfallsereignisse natürlicherweise offenbart (Bild **7.4**), breitet einen Schleier der Nachsichtigkeit aus, so daß inkonsistente C14-Daten von Proben, für die unabhängig davon ein expliziter zeitlicher Bezug im archäologischen Kontext erarbeitet werden konnte, Historikern dennoch angedient werden können. Das dabei zur Anwendung kommende statistische »Verfahren« wird in diesem Kapitel näher beleuchtet.

Der technische Fortschritt hat die Schwierigkeiten, die in den Anfangsgründen der Methode schier unüberwindlich schienen, schon längst gegen die sonstigen Unsicherheiten der Methode relativiert. Man wußte anfangs um die Probleme bei der Extrahierung des Kohlenstoffs und natürlich auch hinsichtlich der präzisen Messung des Signals, das gegenüber der Hintergrundstrahlung verschwindend klein ausfiel. Mit deren zunehmender Beherrschung traten aber andere Fehlerquellen in den Vordergrund. Hier ist beispielsweise die Probenlagerung und -aufbereitung zu nennen. Der summarisch abzuleitende Fehler kann in der Regel nicht sicher korrigiert werden. Während aber der Zufallscharakter des radioaktiven Zerfalls durch eine Verlängerung der Meßzeit grundsätzlich kompensierbar ist, versagen alle anderen Anstrengungen angesichts disparater Meßergebnisse für Proben bekannten Alters.

## 7.2 Vom »C14-Alter« zum »historischen Alter« einer Probe

Ein »historisches Alter« wird in Kalenderjahren angegeben. Der Nullpunkt der Zählung sowie die Zählrichtung ergeben sich aus zugesetzten Kürzeln wie BP, BC oder AD. So setzt der Zusatz BP (= »before present«) für C14-Daten als Nullpunkt das Jahr 1950 und legt als Zählrichtung die Vergangenheit fest. Der Zusatz BC (= »before christ«) bezeichnet dieselbe Zählrichtung bei einem von heute (zur Zeit des Drucks der 1. Auflage) um 1997 Jahre in die Vergangenheit verschobenen Nullpunkt. Der Zusatz AD (= »anno domini«) hat wiederum denselben Nullpunkt wie BC, legt die Zählrichtung aber in die Zukunft. Mit derartigen Angaben ist also die Zeitdifferenz zu heute in dem üblichen Maß von Kalenderjahren und gegebenenfalls Tagen etc. gegeben.

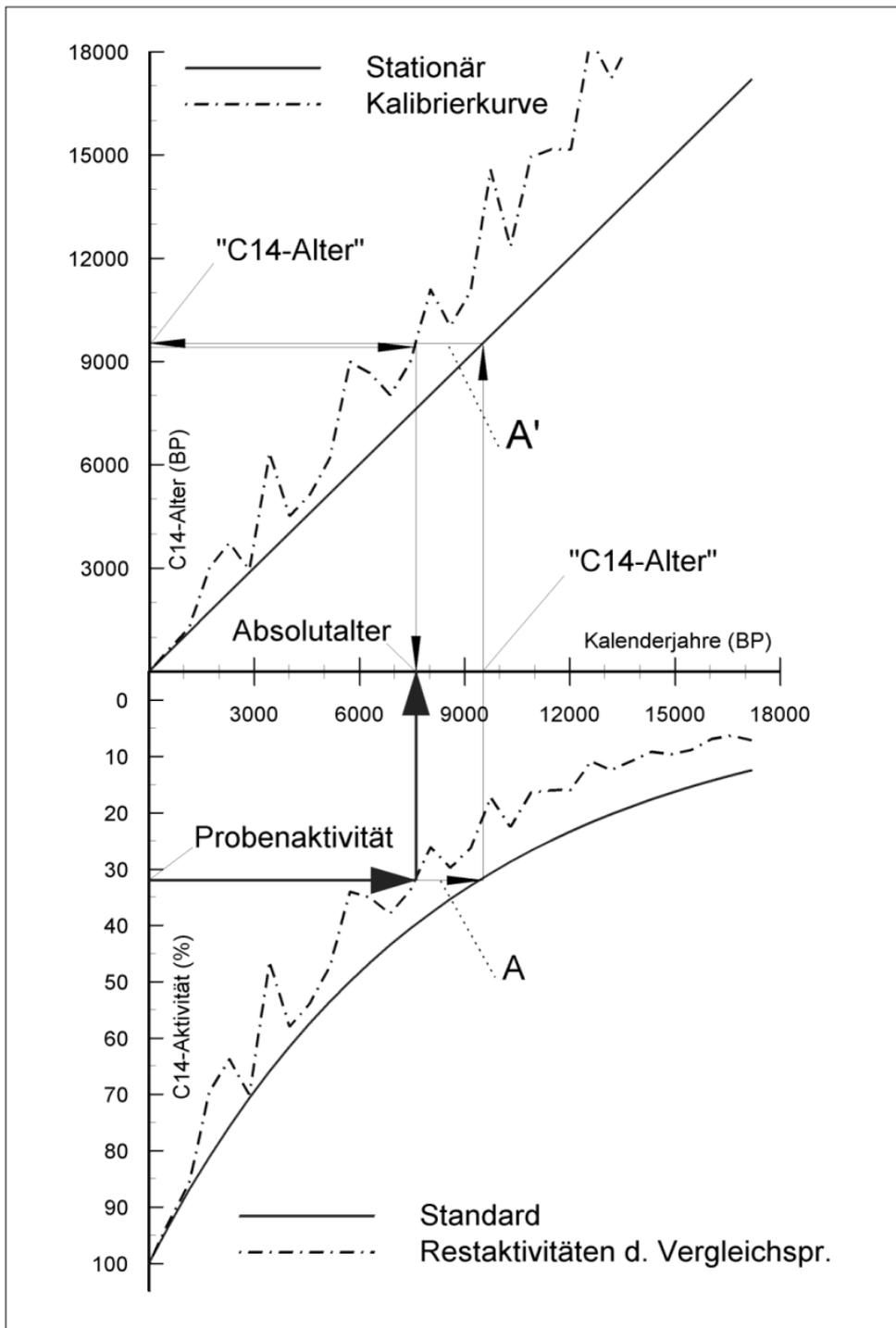
Das »C14-Alter« einer Probe repräsentiert hingegen lediglich die Zeitspanne, die verstreichen müßte, bis die C14-Aktivität einer allgemein zugänglichen Standardprobe<sup>17</sup> auf die aktuell gemessene C14-Aktivität der untersuchten Probe abgefallen wäre. Das »C14-Alter« stimmte dann und nur dann mit dem »historischen Alter« überein, wenn die radioaktive Zerfallskurve der fraglichen Probe exakt mit dieser Standardaktivität gestartet wäre und zudem keinerlei Kohlenstoffaustausch während der Zeit der Lagerung stattgefunden hätte.

Grundsätzlich kann die radioaktive Zerfallskurve der fraglichen Probe aber in jedem Punkt der rückrechenbaren Vergangenheit gestartet sein. Zudem ist immer mit einer »Kontamination« zu rechnen. Deswegen klaffen »C14-Alter« und »historisches Alter« auch mehr oder weniger stark auseinander. Doch nach landläufiger Meinung soll besagte Standardaktivität dem eigentlichen zeitlichen Start- oder Ankerpunkt schon sehr nahe kommen, weil die Abweichung der atmosphärischen C14-Konzentration von diesem Wert seit je klein gewesen sei. Somit hätten alle heute zugänglichen kohlenstoffhaltigen Proben ihre »C14-Uhr« bei Beendigung ihres Stoffwechsels mit ungefähr diesem Wert gestartet.

Weil die C14-Konzentration der Atmosphäre »geschwankt« hat, muß das gemessene C14-Alter noch um den Betrag korrigiert werden, der der seinerzeit herrschenden Abweichung dieser Konzentration entsprach. Wegen der langen Halbwertszeit von C14 ergibt 1 Prozent Abweichung in der ursprünglichen C14-Konzentration nämlich bereits 83 Jahre Abweichung des C14-Alters zum eigentlichen historischen Alter (siehe Textbox **7.7**). Der Schritt vom C14-Alter zum historischen Alter geschieht durch eine entsprechende »Kalibrierung«. Dabei werden Übereinstimmungen zwischen der rezenten C14-Radioaktivität bzw. -Restaktivität der Probe einerseits und entsprechenden Werten aus einer Kurve von C14-Restaktivitäten historisch absolutdatierter Proben andererseits festgestellt (vgl. Kapitel 9.3, Bilder **7.1** und **9.1**). Für ein sicheres historisches Datum für die radioaktiv vermessene Probe müssen notwendigerweise

- 1) die beiden Proben, die als zeitgleich in Frage kommen sollen, den Stoffwechsel tatsächlich mit derselben Aktivität beendet haben, und
- 2) eine lückenlose Chronologie der atmosphärischen Radioaktivität in Gestalt absolutdatierter und hinsichtlich ihrer C14-Restaktivität vermessener

<sup>17</sup> Dieser Standard besteht aus einer präparierten Oxalsäure, die vom U.S.-amerikanischen NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (NBS) ausgegeben wird [Cavallo 1980].



### 7.1 Der Unterschied zwischen definitionsgemäßer Kalibrierung und sogenannter Altersbestimmung

Das allgemein angewendete Verfahren zur Kalibrierung von C14-Daten beruht auf einigen Umwegen, die jedoch dazu dienen, das ursprüngliche Vorurteil, mit der gemessenen C14-Aktivität einer Probe annähernd auch ihr Alter zu kennen. Wir vergleichen korrekte Kalibrierung mit üblicher »Altersbestimmung«:

- *Definitionsgemäße Kalibrierung.* Hierfür wird lediglich die Probenaktivität (hier im Beispiel ca. 32%) mit einer ausreichend dicht gemessenen und absolut datierten Reihe von Restaktivitäten abgeglichen und daraus ohne Umwege das Absolutalter von ca. 7.000 Jahren  $\approx$  bestimmt (die beiden dicken Pfeile). Die C14-Methode kann definitionsgemäß nur zeitliche Synchronisierungen herbeiführen.
- *Sogenannte Altersbestimmung.* Dabei muß zuerst eine Standard-Startaktivität (hier im Beispiel ist es 100%) vereinbart werden, um das sogenannte C14-Alter der Probe (ca. 9500 Jahre  $\approx$ ) errechnen zu können. Dieser Vorgang wird mißverständlich »Altersbestimmung« genannt, denn C14-Alter und Absolutalter weichen tatsächlich erratisch voneinander ab. Zusätzlich muß nun für alle gemessenen Werte der Restaktivitätenreihe der zeitliche Unterschied A zu der Aktivität gleichen Wertes aus der Standardkurve bestimmt werden. Diese jeweiligen Unterschiede (oder »Korrekturen«) A werden im oberen Graphen als Abweichung A' von der Winkelhalbierenden zur Bildung der Kalibrierkurve eingesetzt. So bekommt man am Ende über mehrere Umwege aus dem Schnittpunkt zwischen dem C14-Alter, das aus der Probenaktivität errechnet wurde, und der errechneten Kalibrierkurve dasselbe Absolutalter wie beim direkten Vergleich von Probenaktivität und der Kurve der Restaktivitäten.

Der zusätzliche und zugleich irreführende Aufwand bei der konventionellen Vorgehensweise erklärt sich aus dem Mißverständnis, mit der Standardaktivität den im wesentlichen gleichbleibenden C14-Aktivitätswert für die Atmosphäre zu spiegeln. Nur in diesem Fall wäre mit dem C14-Alter annähernd auch das Absolutalter bestimmt. Zusätzlich irreführend für die Fehlerdiskussion ist die quasi-lineare Gestaltung des Zusammenhangs zwischen C14-Alter und Absolutalter, während aus dem Verlauf der Kurve der Restaktivitäten unmittelbar deutlich wird, daß für Bereiche niedriger Restaktivitäten bei gleichbleibender Dynamik wegen des flacheren Verlaufs höhere Abgleichfehler resultieren müssen.

Nr.	Vorgänge bei der Kalibrierung	konv.	direkt
1	Messung Probenaktivität		✓
2	Messung der Restaktivitäten absolut datierter Proben		✓
3	Vereinbarung einer Standardaktivität	✓	entfällt
4	Umrechnung Probenaktivität in C14-Alter	✓	
5	Umrechnung der Restaktivitäten in Kalibrierreihe	✓	
6	Graphische Auswertung		✓

Proben vorliegen, die es erlaubt, alle in Frage kommenden Zeiträume zu prüfen.

Wir haben die Ungültigkeit der auch als »Simultanitätsprinzip« beschriebenen Voraussetzung (1) schon im 2. Kapitel angeschnitten und werden sie im 9. Kapitel noch einmal ausführlich analysieren und begründen. Aufgrund global uneinheitlicher Diffusionseffekte besitzt eine Chronologie<sup>18</sup> der atmosphärischen C14-Radioaktivität nur lokalen und nicht etwa globalen Charakter. So ist es beispielsweise nicht erlaubt, eine amerikanische Probe mit einer europäischen Chronologie zu kalibrieren.

Es sei betont, daß die Voraussetzung (2) – Verfügbarkeit einer lückenlosen Chronologie der atmosphärischen C14-Radioaktivität – nur unter Zugrundelegung der Voraussetzung (1) geschaffen werden konnte (Stichwort »wigggle-matching«, zum Verfahren vergleiche auch Bild 2.5). Mithin ist eine Kalibrierung und damit die Gewinnung eines historischen Alters aus einem C14-Datum solange unpraktikabel, wie keine lokale, zusammenhängende C14-Chronologie der Atmosphäre zum Vergleich vorliegt. Das eigentlich Paradoxe der C14-Methode, die als lichte Fackel wider das Dunkel der historischen Chronologie eingeführt worden war, besteht also darin, daß ihre Anwendbarkeit von der Existenz lauter lückenloser historischer Absolutchronologien abhängt (vergleiche Kapitel 3.1). Diese liegen zwar in Form mehrerer Baumringchronologien vor, die jeweils bis zu 12.000 Kalenderjahre umfassen, doch sind diese dadurch desavouiert, daß an ihrer Wiege die mit unzutreffenden Annahmen operierende C14-Methode gewacht und all ihre Entwicklungsschritte gelenkt und gestützt hat.

### 7.3 Die Bandbreite der Fehler und Korrekturen

Während wir uns auf die Chronologie der atmosphärischen C14-Radioaktivität, die unserer Einschätzung nach grundsätzlich falsch rekonstruiert worden ist, im Kapitel 9 konzentrieren werden, widmen wir uns in diesem Kapitel der Messung der zu datierenden Probe selber. Eine Analyse der Fehlerquellen, die über die reine Messung hinausgehen und zugleich in keinem Zusammenhang mit der Kalibrierung stehen, findet sich in Kapitel 8. Um die gemessene

---

<sup>18</sup> Tatsächlich beinhaltete bereits das sogenannte »Fundamentalprinzip« Libbys eine solche Chronologie. Seine Annahme, daß die C14-Konzentration der Atmosphäre seit je und zugleich überall auf der Erde konstant gewesen sei, bedeutete nichts anderes als die lückenlose Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Verlaufs dieser C14-Konzentration und war damit eine klare chronologische Aussage.

Restaktivität der Probe am Ende in ihr historisches Alter übersetzen zu können, werden unkorrigierbare zufällige Fehler und – in gewissen Grenzen korrigierbare – systematische Fehler in Rechnung gestellt. Diese können wie folgt unterschieden werden:

- 1) zufällige Fehler der Radioaktivitätsmessung
- 2) meßspezifische Korrekturen
- 3) probenspezifische Korrekturen
- 4) Restfehler

Im Rahmen der Theorie von der Quasi-Konstanz der atmosphärischen C14-Aktivität wird die anschließende

- 5) Kalibrierung

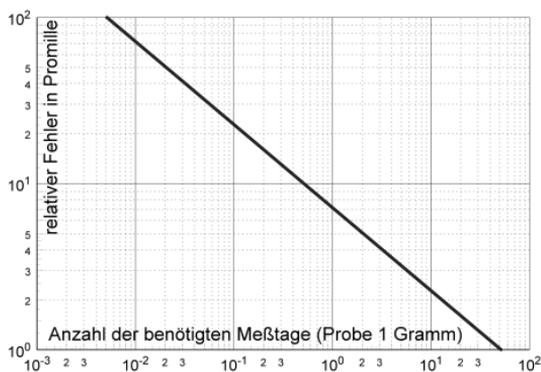
ebenfalls gerne als »Korrektur« bezeichnet. Insbesondere soll diese unabhängig von dem Fundort durchgeführt werden können. Die C14-Kalibrierung ist jedoch keine Korrektur im Sinne der Kompensation kleinerer Abweichungen infolge global einheitlich variierender physikalischer Randbedingungen. Sie muß auf einer lokalen Rekonstruktion der C14-Konzentration der Atmosphäre beruhen, die eine einmalige Geschichte repräsentiert und nicht aus anderen Geschichten extrapoliert werden kann.

Die Berücksichtigung der zufälligen Fehler bei der Messung (1) und von systematischen meßspezifischen Korrekturen (2) werden in der Regel routinemäßig von dem involvierten Meßlabor gemacht. Die probenspezifischen systematischen Korrekturen (3) müssen hingegen von dem verantwortlichen Archäologen veranlaßt und bewertet werden. Mit einem Restfehler (4) ist schon aufgrund der erfahrungsgemäß teils erheblichen Abweichungen der Untersuchungen identischer bzw. ausdrücklich gleichaltriger Proben zu rechnen. Alle vorgenommenen Korrekturen können Größenordnungen über dem Meßfehler liegen und tragen, da sie naturgemäß selber fehlerbehaftet sind, zusätzlich zu dem Fehler bei, der auch nach allen Korrekturen verbleiben wird. Die obige Liste unterschiedlicher Fehlerquellen wird für gewöhnlich folgendermaßen detailliert:

- 1.1 Angabe der Meßunsicherheit, die wegen des zufälligen Charakters der Radioaktivität gegeben ist, und deren Höhe mit der Dauer der Messung abnimmt (vergleiche Bild **7.2**).
- 2.1 Bewertung unveränderlicher Quellen für systematische Meßfehler aus Hintergrundstrahlung, laborinternen Verunreinigungen bei der Probenaufbereitung etc..

## 7.2 Aufwand und Präzision

Aufgrund des zufälligen Charakters des radioaktiven Zerfalls muß zur Erreichung einer einprozentigen Genauigkeit der Messung von Zerfallsereignissen bei Verwendung eines Gramms reinen und jetztzeitigen Kohlenstoffs ein halber Tag gemessen (= gezählt) werden. Der zufällige absolute Fehler  $F$  einer Messung von radioaktiven Zerfallsereignissen hängt nur von der Anzahl  $N$  der registrierten Ereignisse ab und ergibt sich als relativer Fehler  $f$  im Verhältnis zu dieser Anzahl mit  $1/\sqrt{N}$ . Für einen Fehler unter 1% müssen also mehr als 10.000 Zerfallsereignisse registriert werden. Die Grafik wurde unter der Annahme einer Zerfallsrate von 13.5 Zerfällen je Minute und Gramm reinem Kohlenstoff erstellt. Das entspricht einer jungen Probe. Bei nur halber Aktivität muß natürlich die doppelte Meßzeit veranschlagt werden, um auf dieselbe Meßgenauigkeit zu kommen.



Bei entsprechend langen Messungen wären Diskussionen über problematische C14-Daten ein für allemal beendet – wenn nicht zusätzliche Fehlerquellen vorhanden wären, die wesentlich höhere Unsicherheiten als die aus dem radioaktiven Zerfall bei zu kurzer Meßzeit ins Spiel bringen. Der technische Standard hat den Fehler aus der Messung selber schon längst beherrschbar gemacht. Das wird nur zu gerne übersehen, um eine Art Entschuldigung für den Restfehler aufrechterhalten zu können. Seit der Entwicklung der Beschleunigermassenspektrometrie (»Accelerator Mass Spectrometry«, Abk.: AMS), die in ausgewählten Labors durchgeführt werden kann, wird allerdings die Zuverlässigkeit der Zählung der Zerfallsereignisse (»Low Level Counting«, Abk.: LLC) angezweifelt. Der Grund wird in fehlenden Kontrollmessungen aufgrund der Begrenztheit des Materials gesehen. Bei der AMS genügen Proben im Milligrammbereich, während die konventionelle Aktivitätsmessung 1.000 mal mehr Material (also im Grammbereich) benötigt. Die Tabelle gibt einen Vergleich der beiden Meßmethoden [nach Wölfli 1992, 31].

Eigenschaften	LLC	AMS
Kohlenstoffbedarf	> 0.5 Gramm	> 0.5 Milligramm
Meßzeit	mehrere Tage	< 30 Minuten
Präzision	2 - 5 ‰	2 - 5 ‰
Zuverlässigkeit	???	hoch
Altersbereich	< 40.000 Jahre	< 50.000 Jahre

- 2.2 Ermittlung und Kompensation einer Verschiebung der C14-Konzentration in der Probe gegenüber der C14-Konzentration, die seinerzeit in der Atmosphäre geherrscht hat, durch den Vorgang der Isotopenfraktionierung im lebenden Organismus<sup>19</sup> (Ermittlung durch zusätzliche Messungen bestimmter anderer Isotopenverhältnisse).
- 3.1 Beurteilung des Einflusses der Vorbehandlung während und nach der Probengewinnung (»pretreatment«).
- 3.2 Abschätzung des möglichen Grades der Kontaminierung (»contamination«), d.h. dem tatsächlichen Grad der Isolation des fraglichen Kohlenstoffträgers vom Kohlenstoffaustausch – jenseits des Metabolismus zu Lebzeiten – während der gesamten Lagerzeit.
- 3.3 Abschätzung der Auswirkung von Tiefseewasser, von altem und »hartem« Wasser, von geographischer Nähe zu vulkanischer Aktivität, der geographischen Breite im allgemeinen (Nord/Südgefälle) (»reservoir effects«) auf den Stoffwechsel lebender Proben.
- 4.1 Angabe und Versuch einer Quantifizierung sonstiger diffuser Fehlerquellen, die naturgemäß nicht korrigiert werden können.

Der vom Labor angegebene Wert enthält in der Regel alle Korrekturen bis auf die unter 3. genannten. Es wird dabei nicht selten beklagt, daß das Prozedere von den Laboren nicht eindeutig gehandhabt bzw. beschrieben wird. Für den Laborprozeß gibt es zusätzliche Metafehler, solche also, die auch eine gewissenhafte Fehlerbetrachtung seitens des Labors nicht zu berücksichtigen vermag und die erst durch Vergleich mit den Messungen an identischen bzw. sicher gleichaltrigen Proben durch andere Labors zu Tage kommen. Wir verweisen zu diesem Thema auf das Kapitel 8.6.

Der veröffentlichende Wissenschaftler diskutiert in Kenntnis der archäologischen Situation für gewöhnlich die probenspezifischen Korrekturen und nimmt auch die Kalibrierung vor. Je dringlicher die Art des Kohlenstoffträgers einerseits und die des Fundortes andererseits eine Korrektur verlangen, desto stärker wird das erwartete Alter in diese Diskussion einfließen. Daß die Labors im allgemeinen nicht vorab kalibrieren, ist verständlich, weil es hierfür keine allgemein akzeptierte bzw. vorgeschriebene Vorgehensweise gibt. Alle aufgeführten Korrekturverfahren haben also das Ziel, das so bereinigte C14-Alter mittels einer Konkordanz zwischen C14- und Kalenderjahren in ein historisches Alter übersetzen zu können. Die genannten Korrekturverfah-

<sup>19</sup> Mit »Isotopenfraktionierung« wird die von Art zu Art unterschiedliche Bevorzugung der leichteren Isotope gegenüber den schwereren Isotopen eines bestimmten Elementes bezeichnet.

ren revidieren nicht etwa einige nebensächliche Effekte vor der endgültigen Transformation in ein historisches Alter, sondern häufen in der Regel etliche Jahrhunderte zusätzlicher Datierungsunsicherheit an und werfen dadurch nicht selten schon immanent die Frage nach der Substanz der C14-Methode auf.

Die Umrechnung eines wie auch immer gewonnenen C14-Alters in ein historisches Alter steht gerade wegen der immer wieder bedrohlich kumulierenden Korrekturprobleme im Fokus unserer Kritik. Wir wollen in diesem Kapitel zeigen, daß eine Betrachtung des Fehlers, der aus dem zufälligen Charakter des radioaktiven Zerfalls rührt, nicht ausreicht, um oftmals divergierende Datierungen an Proben aus demselben archäologischen Zusammenhang hinreichend zu erklären. Die Daten sind erratischen Charakters, mit teils unerklärlichen Schwankungsbreiten von Jahrhunderten. Sie werfen ein düsteres Licht auf die jahrzehntgenau daherkommenden Kalibrierkurven. Wie soll eine Kalibrierung global einen derart genauen Maßstab abliefern, wenn schon lokal auch durch feinsinnigste Korrekturmaßnahmen nicht in den Griff zu kommende Makroschwankungen vorkommen?

#### 7.4 Was bedeutet der $\pm$ -Fehler bei den Altersangaben?

Vom Labor veröffentlichte C14-Alter werden mit einem  $\pm$ -Fehler angegeben, z.B. 4.000  $\pm$  40 Jahre BP (siehe auch Bild 3.3). Das Alter von 4.000 Jahren BP wird einer Konvention zufolge nicht vom jeweils aktuellen Jahr aus gerechnet, sondern vom Jahr 1950 AD aus. Die Abweichung von  $\pm$  40 Jahren bezieht sich dabei grundsätzlich nur auf die Unsicherheit aus dem wesentlichen Meßprozeß, d.h. der Zählung von (radioaktiven) C14-Zerfällen bzw. der direkten Zählung von C14-Atomen im Massenspektrometer. Solange keine Umrechnung des C14-Alters in ein Absolutalter erfolgt, braucht der Fehler aus der Bestimmung der Halbwertszeit nicht miteinzufließen (dieser wird mit  $\pm$  40 Jahren angegeben [Taylor 1987, 9]). Mögliche laborbedingte Abweichungen, die zum Zählfehler hinzukommen, werden in der Regel als systematische Fehler klassifiziert und durch eine Korrektur der Altersangabe berücksichtigt. Der angenommene Fehler der Korrektur selber spiegelt sich in einer Aufrundung oder sonstwie moderaten Erhöhung des zufälligen Fehlers wieder.

Es ist üblich, den zufälligen Fehler des C14-Alters so anzugeben, daß von einer knapp 70%igen Wahrscheinlichkeit ausgegangen werden kann, daß das »wahre« C14-Alter, das wegen des zufälligen Charakters des radioaktiven Zerfalls mit einer zeitlich begrenzten Messung nicht enttarnt werden kann, in dem angegebenen Intervall liegt (vergleiche Bild 7.4). Dabei spielt es eine

entscheidende Rolle, ob dieser Wert aus der Messung einer einzigen Probe stammt, oder ob er aus der Auswertung von mehreren Werten vergesellschafteter und u.U. als gleichzeitig angesetzter Proben gewonnen wurde. Die statistische Behandlung der Ergebnisse aus solchen Mehrfachmessungen führt in der Praxis zu einer bedeutenden Verringerung des angegebenen Fehlers und kann deshalb über den erheblich höheren Fehler einer Einzelmessung hinwegtäuschen. Und das, obwohl die C14-Daten zwischen den Proben wiederum so stark voneinander abweichen können, daß im mathematischen Sinne für die tatsächliche Gleichzeitigkeit jeweils nur noch eine geringe Wahrscheinlichkeit verbleibt.

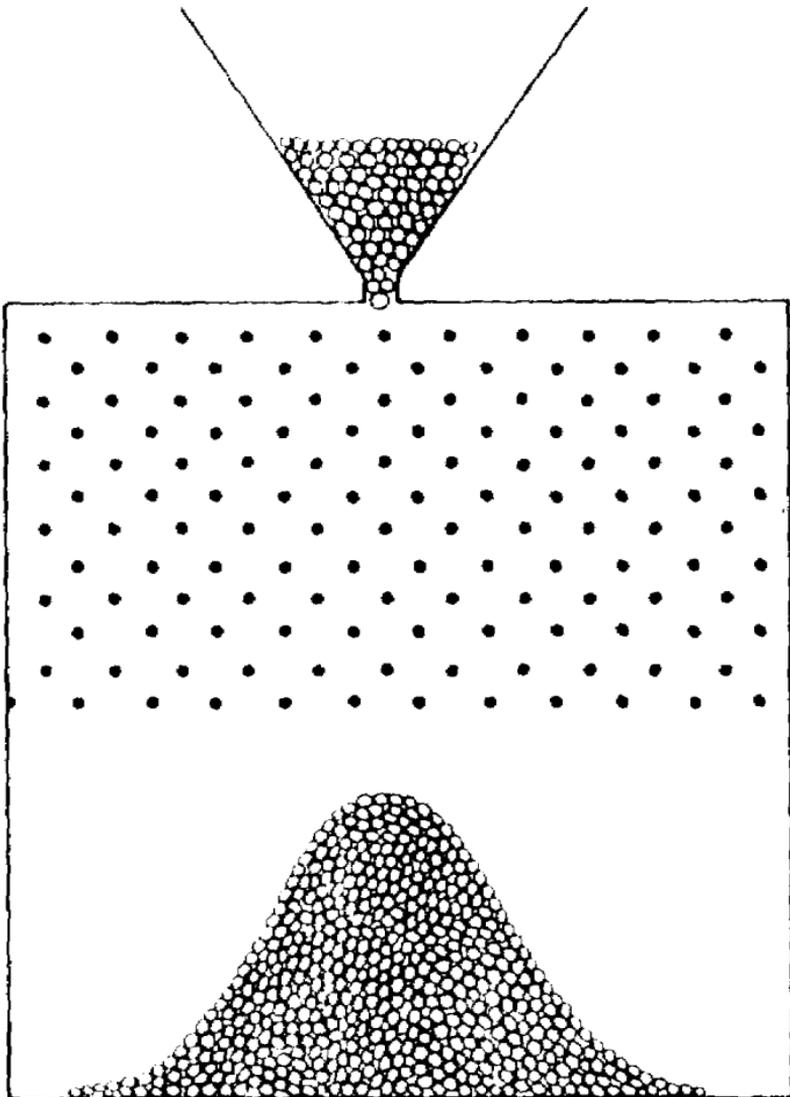
Alle Quellen für eine systematische Differenz zwischen diesem C14-Alter, das einen mehr oder weniger sicher ermittelten Laborwert darstellt, und dem historischen Alter müssen unabhängig von dieser Betrachtung zusätzlich berücksichtigt werden und können ein Mehrfaches dieser zufälligen Abweichung betragen (vgl. insgesamt Kapitel 8). Die vor jeder systematischen Korrektur getroffene Aussage über ein C14-Alter (Zeitangabe  $\pm$  Abweichung) darf – auch nach einer vorzeitig hier durchgeführten Kalibrierung – nicht dazu verleiten, das historische Alter in dem resultierenden Zeitintervall zu vermuten. Mit der Abweichung wird ausschließlich dem stochastischen Charakter des radioaktiven Zerfalls und den diesbezüglich beschränkten Meßmitteln sowie einigen laborinternen Unsicherheiten Rechnung getragen. Wenn von Hochpräzisionsmessungen die Rede ist, dann bezieht sich »Präzision« ausschließlich auf die Handhabe der laborinternen Vorgänge und nicht auf die bessere Handhabe sonstiger die Probe direkt betreffenden Einflüsse. Im Folgenden gehen wir detaillierter auf die Interpretation von »Abweichungen« bzw. »Meßfehlern« ein.

## 7.5 Wie genau kann eine Radioaktivitätsmessung überhaupt sein?

Auch im Idealfall – nämlich ohne weitere systematische Fehler – ist eine zeitlich begrenzte Messung mit einem »Fehler« in dem angegebenen Wert für die gemessene Radioaktivität (Summe der registrierten Zerfallsereignisse geteilt durch die entsprechende Meßzeit) verbunden. Anderenfalls müßte die aufgewendete Zeit für die Messung der Zerfallsereignisse unendlich lang angesetzt werden, damit die so errechnete Zerfallsrate auch den »wahren« Wert wiedergibt (wobei natürlich mit jedem Zerfallsereignis die Aktivität selber bereits sinkt). Da der radioaktive Zerfall des einzelnen Kohlenstoffatoms C14 zufällig vonstatten geht, werden in begrenzten Beobachtungszeiträumen bei Mehr-

### 7.3 Nagelbrett zur Veranschaulichung einer Normalverteilung

Unter der Annahme, daß die Anzahl der zufällig wirksamen Fehlerfaktoren sehr groß ist (»Nägel«), sind deren Auswirkungen (»gleichwahrscheinliche Abweichungen nach rechts bzw. links«) bei vielen Wiederholungsmessungen normalverteilt [Bortz 1993, 77]. Eine Normalverteilung ergibt sich also immer dann, wenn die Ereignisse vielen Einflüssen ohne erkennbare Systematik ausgesetzt sind.



fachmessungen) grundsätzlich unterschiedlich viele Zerfallereignisse auftreten.

Die Zerfallsrate des C14 ist tatsächlich so gering, daß erst nach etlichen Tagen bis Wochen permanenter Messung (je nach Höhe der C14-Aktivität der Probe) diese Unsicherheit aus dem Zufallscharakter des radioaktiven Zerfalls in den Promillebereich heruntergedrückt werden kann (vgl. die Zahlen sowie die Abgrenzung zur AMS-Messung in Bild **7.2**). Zur Erinnerung: Jedes Fehlerprozent macht rund 83 C14-Jahre Datierungsunsicherheit aus (hierzu Textbox **7.7**). Im Kapitel 6.2 wird auf die diesbezüglich extrem unterschiedlichen Bedingungen zwischen kommerzieller Radiomedizin und der C14-Datierungsmethode eingegangen.

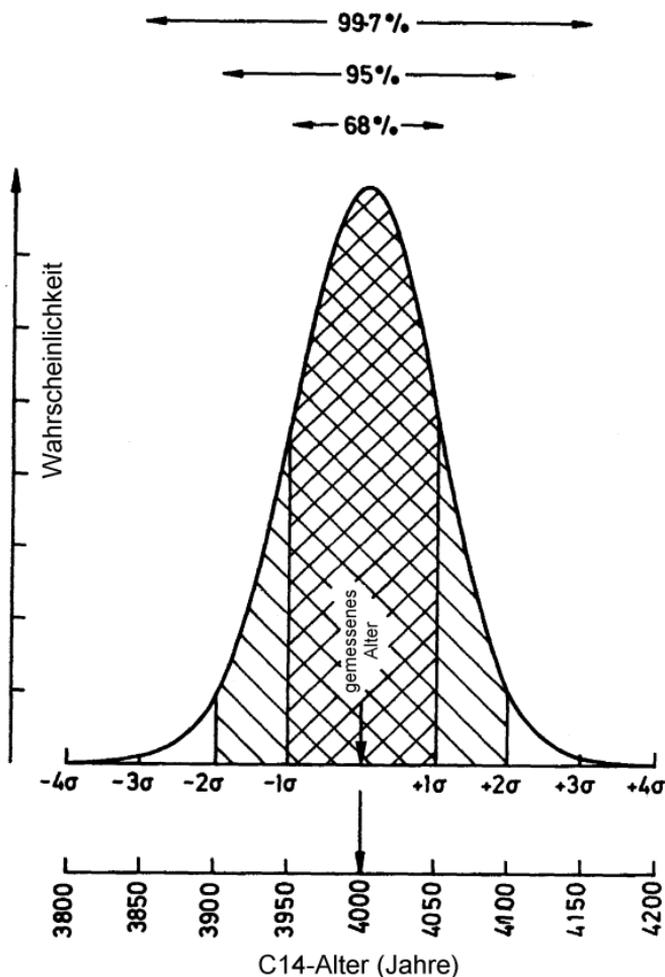
Teilt man also eine Kohlenstoffprobe in mehrere gleiche Teile auf und vermißt diese gleichzeitig durch entsprechend viele Apparaturen (oder nacheinander in derselben Apparatur), dann kommen am Ende der Messungen naturgemäß unterschiedliche Meßwerte für die Zerfallsrate heraus. Und je kürzer der Zeitraum für die Messung war, desto größer wird auch die Streuung zwischen den Werten sein. Nichtsdestotrotz sollten sich die so erhaltenen Meßwerte stets auf charakteristische Weise um einen Mittelwert verteilen (siehe Bild **7.8**). Diese Verteilung wird Normalverteilung genannt. Erst aus einer größeren Zahl von Messungen kristallisiert sich also der wahre Wert heraus, der aus einer einzigen dieser (gleich langen) Messungen nur entsprechend ungenau angegeben werden kann (dazu auch Bild **7.3**).

Um aber umgekehrt Daten aus mehreren C14-Messungen zum Zwecke der Erhöhung der Genauigkeit zu einem Mittelwert »schnüren« zu dürfen, müssen diese selbstverständlich dieselbe C14-Konzentration aufweisen bzw. alle, je länger die Meßzeit veranschlagt wird, immer ähnlichere Aktivitätswerte produzieren. Meßwerte aus präzisen Einzelmessungen, die in Relation zu den angegebenen Fehlern zu weit (wir kommen noch auf die Bedeutung von »zu weit« zu sprechen) auseinander liegen, dürfen nicht als gleichzeitig und damit zur Kalkulation eines »Metamittelwertes« herangezogen werden. Damit ist eine der meistgenutzten und zugleich fragwürdigsten Vorgehensweisen der C14-Wissenschaft skizziert, um zu schein-signifikanten Datierungen zu gelangen.

Die Theorie des radioaktiven Zerfalls, die elementar auf der Unabhängigkeit des einzelnen Zerfallereignisses fußt, sagt eine Normalverteilung mehrfach durchgeführter zeitlich begrenzter Messungen an identischen Proben voraus. Bei einer solchen Normalverteilung liegen 68% aller Meßwerte innerhalb der sogenannten Standardabweichung (engl.: standard deviation), die als mittlere Abweichung vom statistischen Mittel als dem wahren Wert definiert

## 7.4 Die Interpretation der Standardabweichung

Es wird nach der Berücksichtigung aller Korrekturen die Wahrscheinlichkeit quantifiziert, daß das wahre Alter der Probe in Maßen der Standardabweichung  $\sigma$  von dem gemessenen Alter abweicht. Das Maß für die Wahrscheinlichkeit, das wahre Alter in einem bestimmten Intervall zu finden, ist durch den entsprechenden Flächenausschnitt im Verhältnis zur Gesamtfläche gegeben. Die Wahrscheinlichkeiten, daß der wahre Wert sich im Intervall  $\pm 1\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$  bzw.  $\pm 3\sigma$  um den gemessenen Wert herum befindet, ist oben im Bild angegeben. Die Jahresskalierung entspricht dem angegebenen Alter von  $4000 \pm 50$  Jahren. Die angegebene Wahrscheinlichkeitsverteilung entspricht der Gauss'schen bzw. Normalverteilung [nach Aitken 1990, 80].



und entsprechend ausgerechnet wird (vergleiche Bild **7.4**). Es liegen bereits 95% aller gemessenen Mittelwerte innerhalb der zweifachen Standardabweichung und 99.7% innerhalb der dreifachen Standardabweichung. Für das Folgende ist wichtig:

- a) Die gemessenen Werte der Radioaktivität von identischen bzw. – im Sinne der Theorie der C14-Methode – zeitgleichen Proben weisen eine Normalverteilung um einen mittleren Wert auf, der als wahrer Wert für die Radioaktivität angenommen werden darf.
- b) Umgekehrt gilt genauso: Radioaktivitäten, die sich nicht um einen – fiktiven – Wert normalverteilen, stammen nicht bzw. teilweise nicht von identischen/zeitgleichen Proben (bzw. die von ihnen erhaltenen Werte sind im Einzelnen systematisch verfälscht). Für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit, inwieweit die Proben tatsächlich identisch sind, können entsprechende Tests gemacht werden.
- c) Die  $\pm$ -Abweichung für eine Einzelmessung wird so interpretiert, daß der erst aus einer Vielfachmessung sich herauskristallisierende mittlere bzw. wahre Wert mit 68% Wahrscheinlichkeit in diesem Bereich liegen wird.
- d) Werden qualitativ vergleichbare Einzelmessungen an Proben zusammengetragen, die für zeitgleich gehalten werden, so müssen diese grundsätzlich normalverteilt sein. Je schwächer diese Normalverteilung ausfällt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß die Proben tatsächlich zeitgleich sind.

Mehrere Radioaktivitätsmessungen zeitgleicher Proben ergeben immer ein genaueres Ergebnis als nur eine einzige. So ist es allemal erstrebenswert, nach Möglichkeiten zu suchen, mehrere Messungen auch unterschiedlicher Proben zusammenzufassen, so daß der Fehler des ermittelten Datums deutlich gesenkt werden kann. Doch die Voraussetzung der Gleichaltrigkeit im radiometrischen Sinne muß unbedingt gegeben sein, sonst ist es Augenwischerei. Daß der Tatbestand der Augenwischerei erfüllt ist, werden wir im Folgenden zeigen.

### 7.6 »One date is no date«

Die oft zitierte Formel »one date is no date« (sinngemäß: »eine einzelne Datierung ist gar keine Datierung«) sei, so M.J. Aitken, sowohl wegen weit zurückliegender als auch wegen bestimmter aktueller Einflüsse auf die Proben – Kontaminierung, eingeschlossene Materialien, mißverständene Merkmale, Fehler im Labor etc. – evident [Aitken 1990, 95]. Aitken schreibt deshalb: »Eine

zweite Bestimmung für dieselbe archäologisch bestimmte Schicht erhöht die Nützlichkeit eines einzelnen Datums um ein Vielfaches: Solange sich die  $1\sigma$ -Spannen (jeweils 68% Wahrscheinlichkeit für Beinhaltendes wahren Wertes) noch überlappen [d.h. der Abstand der Werte maximal  $2\sigma$  beträgt], ist die Vertrauenswürdigkeit beider Daten enorm gesteigert, wenn hingegen auch die  $2\sigma$ -Spannen nicht überlappen, dann kann in keines von ihnen Vertrauen gesetzt werden.«

Aitken stellt damit fest, daß die C14-Daten zweier historisch gleichaltriger Proben ohne Einbuße der Glaubwürdigkeit so stark voneinander abweichen dürfen, daß für ihre radiometrische Gleichzeitigkeit nur noch eine Wahrscheinlichkeit von 15% übrig bleibt<sup>20</sup>. Und erst wenn diese Wahrscheinlichkeit auf einige wenige Prozent abgesunken ist, könne den Proben gar kein Vertrauen mehr entgegengebracht werden (vergleiche dazu Bild 3.2). Damit werden äußerst fragwürdige Regeln benannt, wie mit offenbar »normalen« Abweichungen umgegangen werden soll, die über das Maß ohnehin zu erwartender Streuungen einzelner Aktivitätsmessungen deutlich hinausgehen.

Diese Toleranz wäre nur legitim, wenn das Gros aller derart betrachteten Paare mit ausreichend ähnlichen radiometrischen Daten verbunden wäre. Nur dann ließe sich ein Vertrauen in die Methode so weit begründen, um auch für die seltenen Fälle divergierender radiometrischer Daten historische Gleichzeitigkeit annehmen zu dürfen. (Tatsächlich sagt ja die Statistik auch voraus, daß immer ein paar Ausreißer vorhanden sein sollten.) Aitken stellt seine Regeln jedoch nicht für die Ausnahme, sondern für den Normalfall auf.

Erneut ist ein Zirkelschluß festzustellen: Schon immer war ein einzelnes Datum wertlos, weil nämlich ein weiteres Datum in der Regel (und nicht in der Ausnahme) zu einem quantitativ anderen Ergebnis führte. Dabei geht es wohlgerne um Datierungsdifferenzen jenseits zufälliger Schwankungen zwischen einzelnen Aktivitätsmessungen. Mithin war niemals die Voraussetzung gegeben, zwei divergente Daten als vertrauenswürdig im Rahmen der Gesetzmäßigkeit großer Zahlen zu akzeptieren. Das »one date is no date« entzieht der C14-Methode endgültig ihre entscheidende Basis, nämlich das Si-

<sup>20</sup> In der Radiomedizin gilt derselbe ( $2\sigma$ -)Abstand der Mittelwerte, der für Aitken immer noch Vertrauen in Gleichzeitigkeit begründet, als Grenzwert, um von signifikanten Unterschieden zu sprechen [zum Winkel 1975, 55]. Gingen die Mediziner sicherheitsphilosophisch wie die C14-Wissenschaftler vor, so würden sie Aktivitätswerte bereits als unterschiedlich interpretieren, die noch zu 95% [bzw. 85%] Wahrscheinlichkeit für Gleichheit ausweisen. C14-Wissenschaftler signalisieren nach den Spielregeln wissenschaftlicher Statistik, daß beim Umgang mit ihren Daten jegliche Gefährdung für Mensch und Material ausgeschlossen sein müsse, weil ein hohes Maß an falschen Schlüssen zu tolerieren sei. Wissenschaftler, die sich auf C14-Daten stützen wollen, haben da sicherlich etwas höhere Ansprüche.

multanitätsprinzip, nach dem für gleichaltrige Proben auch das gleiche C14-Alter nachweisbar sein muß. Wer nach 50 Jahren Praxis nicht zu Korrekturverfahren vorgezogen ist, die die vorhandenen Divergenzen sicher bereinigen können, der hat endgültig kein Motiv mehr, an der Glaubwürdigkeit divergenter Daten festzuhalten.

Aitken beschrieb eingangs die Goldenen Regeln für die Beurteilung der historischen Gleichzeitigkeit zweier Proben trotz radiochronologischer Divergenz. Ähnliche »Regeln« existieren auch für die Auswertung einer größeren Anzahl historisch an sich gleichaltriger Proben. In einem solchen Ensemble sollten trotz Gleichzeitigkeit tatsächlich immer auch Paare mit divergierenden Meßwerten zu finden sein. Deshalb führt die Betrachtung einzelner Paare hier nicht weiter, sondern es muß die Ähnlichkeit der tatsächlichen Verteilung der Meßwerte zu der Normalverteilung überprüft werden.

Bei der Auswertung von C14-Daten für ein Ensemble, das mehr als zwei Proben umfaßt, wird die »Gleichzeitigkeit« nun folgendermaßen geprüft: Die Annahme der Gleichzeitigkeit soll dann legitimiert sein, wenn rund  $b$  (entsprechend den 68% der  $1\sigma$ -Spanne) der Meßwerte, die das Probenensemble repräsentieren, den Mittelwert, der aus allen in Frage kommenden Meßwerten errechnet wurde, mit ihrer jeweiligen  $1\sigma$ -Spanne erfassen, wobei die 68% bei einem kleinen Ensemble (vergleiche Bild **7.5**) natürlich recht hemdsärmelig zu handhaben sind. Diese Forderung ist zwar notwendig, aber keineswegs hinreichend, um von einer Normalverteilung ausgehen zu können, das heißt, diese Bedingung wird auch von Verteilungen erfüllt, die hochwahrscheinlich nicht von radiometrisch gleichaltrigen Proben erzeugt wurden. Aitken [1990, 97] bringt hierzu auch zwei instruktive Beispiele:

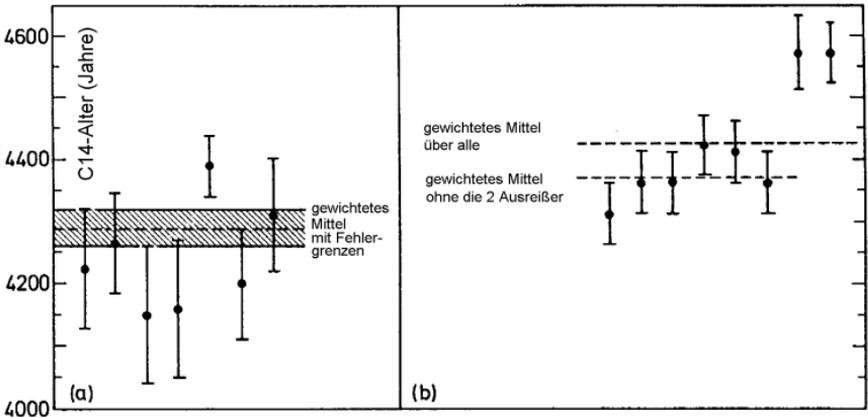
- a) Hier erfassen 4 von 7 Meßwerten, also nur 57% statt 68%, den aus allen 7 Meßwerten gebildeten Mittelwert mit ihrer  $1\sigma$ -Spanne, was mit der oben wiedergegebenen Definition von »Gleichzeitigkeit« zwar nicht gut verträglich ist, von Aitken jedoch als »coeval« (dt. gleichaldrig) akzeptiert wird,
- b) Hier erreichen eingangs nur 2 der 8 Werte mit ihrer  $1\sigma$ -Spanne den aus allen 8 Meßwerten gebildeten Mittelwert. Unter Weglassen der 2 größten Ausreißer erfassen nunmehr 4 aus 6 Werten (also 67%) mit ihrer  $1\sigma$ -Spanne den aus den verbliebenen 6 Meßwerten ermittelten Mittelwert.

Wir merken dazu kritisch an: Ein F-Test erbringt für beide von Aitken benannten Fälle eine Wahrscheinlichkeit deutlich kleiner als 50% dafür, daß die Ensembles aus gleichaltrigen Proben bestehen könnten. Aitken muß also, um mit diesen Ensembles weiterarbeiten zu können, eigentlich so argumentieren,

## 7.5 Umgang mit Ensembles aus divergenten C14-Daten

M.J. Aitken schreibt zu diesen zwei Beispielen für den Umgang mit divergenten C14-Datierungen aus einem definierten archäologischen Kontext: »Das Schwanken der individuellen C14-Daten in (a) ist mit der Annahme 'coeval' konsistent, wobei das gewichtete Mittel bei  $4.290 \pm 30$  Jahren liegt. Die Proben aus Beispiel (b) können nicht als zusammengehörige Gruppe akzeptiert werden und eine Verwendung des gewichteten Mittels aus allen 8 ist nicht gerechtfertigt. Nach Ausschluß der beiden Ausreißer bilden die verbliebenen 6 Werte hingegen eine akzeptable Gruppe mit einem gewichteten Mittelwert  $4.370 \pm 20$  Jahren.«

Die Frage der Konsistenz wird im Text ausführlich diskutiert. Es sei an dieser Stelle zusätzlich angemerkt, daß im Fall (a) das »älteste« Datum in einer Einzelbetrachtung auch nach den herkömmlichen, sehr großzügig mit Abweichungen umgehenden Regeln mit 4 der 6 anderen Werte nicht als gleichzeitig angesehen werden dürfte. Bei so wenigen verwendeten Werten kann das nicht negiert werden.



daß in der Mehrzahl vergleichbarer anderer Fälle aber doch eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit für Gleichzeitigkeit resultiert und er es in diesem Fall folglich mit einem statistischen Ausreißer zu tun hat. Tatsächlich ist aber die Situation sehr häufig genauso fragwürdig und sogar noch fragwürdiger wie in den hier diskutierten beiden Fällen. Die prekäre Situation lag tatsächlich von Beginn an vor, als Libby 1949 vergeblich versuchte, das Simultaneitätsprinzip anhand eines extrem »ungleichzeitigen« Ensembles [Libby et al. 1949] zu verifizieren (Bild **7.6**).

Wenn nun in Aitken's Beispiel (a) die Einzelmessungen nur etwas besser gewesen wären, dann hätte auch nach Aitkens toleranter Auslegung besagter Regel eine Gleichzeitigkeit für alle 7 Meßwerte nicht mehr beansprucht werden können. Oder umgekehrt: Ein Heraufsetzen des Fehlers für die Einzelmessungen in Beispiel (b) würde doch alle 8 Meßwerte zur Heranziehung der Mittelwertbildung zulassen.

Mit den Fehlerdiskussionen ist das offenbar so eine Sache, denn in gewissen Grenzen kann jeder Fehler herbei- oder auch wegdiskutiert werden. Meßwertensembles ermöglichen eine opportune C14-Datierung, da sie mit einer »Doppelfinte« ihr Ziel erreicht:

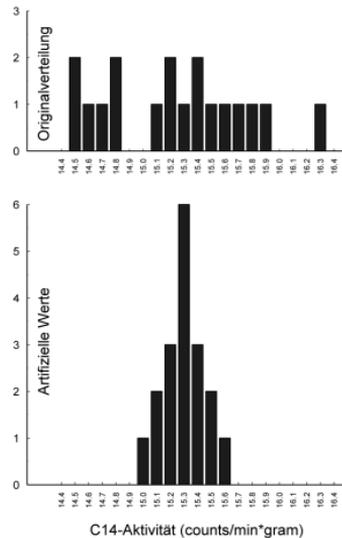
- a) Die Zulassung auch noch kleinster Wahrscheinlichkeiten für die Koinzidenz (entsprechend dem Ergebnis eines F-Tests zum Beispiel), und/oder
- b) die Herbeiführung größerer Fehler für die Einzelmessung

gaukelt ein Ensemble vorgeblich gleichaltriger Proben vor, die nunmehr gemeinsam einen erkünstelt sicheren Mittelwert repräsentieren. Aitken mahnt denn auch seine Leser: »Die Herausnahme der beiden Ausreißer [in Beispiel (b)] ist gleichbedeutend mit der Unterstellung, daß entweder keine Gleichzeitigkeit vorliegt, oder daß gerade bei diesen beiden bestimmte Meßfehler (etwa durch Kontamination) unterlaufen sind. Das Herausnehmen von Ausreißern ist natürlich eine heikle Angelegenheit, die geeignet ist, Anschuldigungen zu provozieren, daß Daten manipuliert wurden, um vorgefasste Meinungen zu stützen. Deswegen ist es auch so wichtig, sich auf ordentliche Statistik zu stützen« [1990, 97]. Diese Mahnung entbehrt nicht einer gewissen Ironie, denn die vorher ausgebreiteten »Goldenen Regeln« der C14-Statistik sind selber nicht das, was die Bezeichnung »soundly based statistics« verdienen würde.

Doch der statistische Parcours ist noch nicht am Ende, denn die Hürde »Sicherung des Mittelwertes« ist noch zu nehmen. Habe man sich auf dieser Basis für einen Satz »gleichzeitiger« Meßwerte entschieden, dürfe für deren Mittelwert denn auch eine bessere Repräsentanz des »wahren« Wertes angenom-

## 7.6 Libbys »Verifizierung« des Simultanitätsprinzips

Das Bild zeigt das gemessene (oben) und das angegebene (unten) Histogramm mit den von Libby bis 1949 durchgeführten Aktivitätsmessungen an 18 zeitgenössischen Hölzern. Diese Meßreihe sollte für lange Zeit die einzige Bestätigung sein, daß gleichaltrige Proben zugleich dieselbe C14-Konzentration aufweisen würden. Dieses sogenannte Simultanitätsprinzip trat gegenüber dem Fundamen-



talprinzip, nach dem die C14-Konzentration nicht nur örtlich, sondern auch zeitlich konstant gewesen sei, anfänglich völlig in den Hintergrund. Erst als das Fundamentalprinzip durch Meßergebnisse von Suess und de Vries in Frage gestellt war, besann man sich wieder auf das Simultanprinzip, da es als unverzichtbar für die Kalibrierung angesehen werden mußte. Das obere Histogramm führt die tatsächlich gemessenen Werte auf. Das untere Histogramm gibt dagegen die eigentlich zu erwartenden Werte wieder, wenn der Mittelwert von  $15,3 \pm 0,1$  (c/min · g<sub>c</sub>) aus Libby [1952, 14] zugrundegelegt wird. Die tatsächlich gemessenen Werte geben keinerlei Anlaß – weder vom bloßen Aussehen her, noch nach einem F-Test –, eine Normalverteilung der Meßwerte zugrunde zu legen. Im Gegenteil, die Wahrscheinlichkeit, daß die Meßwerte von radiometrisch gleichaltrigen Proben stammen, beträgt nur noch wenige Prozent.

Libby ging mit unerschütterlichem Vertrauen davon aus, daß die Randbedingungen für die Erde im allgemeinen und für die C14-Produktion im besonderen seit langer Zeit schon konstant gewesen und daß deswegen grundsätzlich normalverteilte C14-Alter an rezenten Proben zu messen seien. Seine Messungen gaben das zwar in keiner Weise wieder, doch sein Glaube war so stark, daß er meinte, nicht nur eine 97-prozentige (wie es de facto ein F-Test zeigt) sondern eine 100-prozentige Widerlegung dieser Annahme verlangen können zu dürfen, ehe er sich zu ihrer Aufgabe gezwungen gesehen hätte. Als knapp 10 Jahre später durch immer mehr Messungen deutlich wurde, daß sich die C14-Konzentration in der Atmosphäre im Laufe der Zeit geändert haben mußte, hätte man erneut die verlangte Gleichverteilung in Frage stellen müssen, denn diese zeitlichen Schwankungen waren natürlicherweise vor allem aus veränderlicher C14-Diffusion und nicht ausschließlich aus schwankender C14-Produktion abzuleiten. Da diese Diffusion aber lokal uneinheitlich auftreten muß, war das Simultanitätsprinzip automatisch in Frage gestellt gewesen. Doch nichts geschah. So kann man sehen, daß das Vertrauen in die C14-Methode zu keiner Zeit von ihr selbst aufgebaut worden ist, sondern daß sie es sich weitgehend aufgrund des blinden Vertrauens in das aktualistische Naturprinzip erschlichen hat.

men werden als durch jeden der  $n$  Einzelwerte. Das drückt sich durch die Reduzierung des Fehlers des Mittelwertes gegenüber dem mittleren Fehler aus den Einzelwerten durch den Faktor  $1/\sqrt{n}$  aus. Damit sackt z.B. der mittlere Fehler von rund 100 Jahren im Beispiel (a) sogleich auf schlanke 40 Jahre ( $\sim 100/\sqrt{7}$ ).

Hier liegt natürlich ein weiterer gewaltiger Pferdefuß verborgen. Bei besagtem Beispiel (a) wird der gewichtete Mittelwert mit 4.290 Jahren und der Fehler »straightforward« mit rund  $\pm 40$  Jahren angegeben. Begegnet der unbefangene Leser einer solchen Wertangabe in der Literatur, wird er eingedenk der Normal-Verteilung für Meßwerte von Zufallsereignissen wie dem radioaktiven Zerfall jetzt davon ausgehen, daß rund 5 von 7 Meßwerten in dem Intervall von  $\pm 40$  Jahren um den Wert 4.290 zu finden sind. Das Diagramm von Aitken klärt uns aber auf, das gerade 2 der 7 Meßwerte in diesem Bereich zu finden sind und die fehlende Normalverteilung signalisiert, daß auch bei längeren Meßzeiten keine Verringerung des Meßwertintervalls zu erwarten ist. Tatsächlich ist also die statistische Situation »gesund« gerechnet worden, denn die Meßwerte repräsentieren keineswegs ein Ensemble regulär nach der Normalverteilung um einen wahren Wert streuender Messungen, sondern sie sind auf eine bestimmte Weise »schmutzig«.

Die Angabe eines Mittelwertes und eines Fehlers sagt aus, wo ein einziger Meßwert dann wahrscheinlich liegen wird, in der Regel mit 68% Wahrscheinlichkeit innerhalb des angegebenen Fehlerbereiches um den Mittelwert herum. Die C14-Chronologen führen eine unzulässige Abschwächung der statistischen Voraussetzung für Gleichzeitigkeit ein, wenn sie zugestehen, daß bis zu 2/3 aller Werte aus den Einzelmessungen um ihre jeweilige  $1\sigma$ -Spanne – und die kann groß sein – von dem Mittelwert entfernt liegen dürfen. Die Einzelwerte erhalten »Ausgang«, obwohl ihr Bewegungsspielraum als Vertreter zufälliger Zerfallsereignisse eindeutig durch die Normalverteilung um den Mittelwert festgelegt bzw. eingeschränkt ist.

### 7.7 »Wie komme ich zu dem Mittelwert, den ich haben will?«

Wir möchten an dieser Stelle das »Kochrezept« für die Gesundrechnung von erratisch (jedenfalls nicht »normal«) streuenden Gruppen von Meßwerten hin zu einem gewünschten Mittelwert angeben:

- Bilde ein Ensemble aus Messungen zu dem fraglichen Ereignis, die einen zeitlichen Bereich symmetrisch um den gewünschten Zeitpunkt herum aufzuspannen vermögen.

## 7.7 Meßunsicherheit und Datierungsgenauigkeit

Für das Verständnis der immer wieder auftauchenden Faustregel, daß aus 1% Meßfehler eine Ungenauigkeit von 83 Jahren in der C14-Datierung folgt, muß das Gesetz des radioaktiven Zerfalls **IX.1** analysiert werden.

Diesem Gesetz zufolge nimmt die Aktivität  $A(t)$  einer isolierten Probe exponentiell mit der Zeit ab. Insbesondere besteht zwischen zwei Aktivitäten  $A(t)$  und  $A(t')$ , die zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten  $t$  und  $t'$  an derselben Probe gemessen worden sind, folgender mathematischer Zusammenhang:

$$A(t) = A(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')}$$

Umgekehrt gilt für den fraglichen zeitlichen Unterschied:

$$t - t' = -1/\lambda \cdot \ln[A(t)/A(t')]$$

Der in der Formel zusätzlich auftauchende Term  $\lambda$  steht in Zusammenhang mit der Halbwertszeit  $T_{1/2}$ , nach deren Ablauf die Aktivität der Probe jeweils auf die Hälfte abgesunken ist. Aus der Halbwertszeit für C14 von  $5.730 \pm 40$  Jahren, nach der  $A(t)$  nur noch die Hälfte von  $A(t')$  beträgt, ergibt sich für  $\lambda$  ein Wert von ungefähr  $1/8.300$ :

$$t - t' = T_{1/2} = 5.730 \text{ y} = -1/\lambda \cdot \ln(0.5)$$

$$\lambda = -\ln(0.5)/5.730 \sim 1/8.300$$

Die Messung der Aktivität  $A$  irgendeiner Probe wird immer einen Fehler  $dA$  enthalten, so daß der relative Fehler  $|dA/A|$  sich ergibt als

$$|dA/A| = d|\ln A| = d|\ln(A' \cdot e^{-\lambda t})|$$

$$|dA/A| = \lambda \cdot dt$$

So folgt für die absolute Datierungsunsicherheit  $dt$  in Jahren (y):

$$dt = |dA/A| \cdot 8.300 \text{ y}$$

Jedes % an relativem Fehler  $|dA/A|$  bei der Messung der Radioaktivität ergibt demnach 83 Jahre Unsicherheit in der absoluten Datierung. Mit dieser Faustformel lassen sich auch umgekehrt kurzfristige Schwankungen der C14-Konzentration in dazu äquivalente C14-Jahre umrechnen. Insbesondere für die Interpretation der Kalibrierkurven können lokale Abweichungen der Kurve von der Winkelhalbierenden in C14-Jahren ausgedrückt werden und diese wiederum als prozentuale Änderung der C14-Konzentration während der entsprechenden Kalenderjahre.

- Sorge dafür, daß mindestens 50% dieser Messungen (das scheint die untere Akzeptanzschwelle für die eigentlich erforderlichen 68% zu sein) so große Fehler aufweisen, daß die entsprechend ausladenden  $1\sigma$ -Spannen den (angepeilten) Mittelwert einschließen.
- Vergewissere Dich, daß die Anzahl der einbezogenen Messungen so groß ist (z.B. 9), daß trotz zu groß geratener Einzelfehler (z.B.  $\pm 300$  Jahre im Mittel) der entschlackte Fehler (hier  $300/\sqrt{9} = 100$ ) akzeptabel bleibt.
- Bilde die Fehler so aus, daß der angepeilte Mittelwert auch im gewichteten Mittel erhalten bleibt.
- Veröffentliche nur den Mittelwert und den dazugehörigen entschlackten Fehler.

## 7.8 Ein Würfelspiel erhellt die chronologische Unverfahrenheit

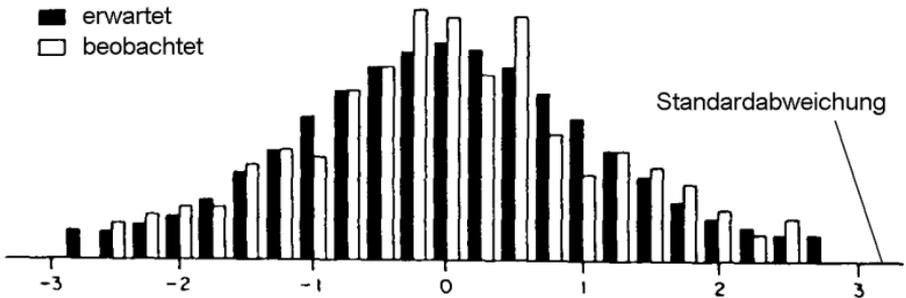
Mit dem folgenden Beispiel eines Würfelspiels wollen wir die eben aufgeworfene Problematik von einer etwas alltäglicheren Seite beleuchten. Eine Entsprechung zu der Messung von radioaktiven Zerfallsereignissen ergibt sich mit der Addition der geworfenen Augen aus 100 Würfeln. Die erwartete Summe daraus liegt bei 350, denn das statistische Mittel für einen Wurf liegt bei 3.5 (nämlich »Summe der möglichen Einzelergebnisse« geteilt durch »Anzahl der Ereignisse«, also  $\{1+2+3+4+5+6\}/6=3.5$ ). Natürlich bekommt der Experimentator bei einem Durchgang nicht genau 350, sondern vielleicht 332 oder auch 361. Wenn er das oft genug macht (und der Würfel als »idealer« Würfel anzusprechen ist), wird er eine Verteilungskurve für die Summe aus den einzelnen Durchläufen bekommen, die »normalverteilt« ist.

Das nämliche Spiel kann natürlich auch mit einem Würfel gemacht werden, der nicht wie üblich die Zahlen von 1 bis 6 aufweist, sondern davon verschiedene, so daß unter Beibehaltung der Spielregeln (100 Würfe mit laufender Summenbildung) im statistischen Mittel eine andere Endzahl gebildet werden muß. Wenn die Zahlen auf den 6 Seiten unbekannt sind – und damit natürlich auch der Erwartungswert für 100 Würfe –, dann kann ein Spieldurchgang allein noch keinen endgültigen Aufschluß über deren wahren Wert (die Summe der Augen aller 6 Seiten) geben. Doch dieser Fehler wird umso kleiner, je öfter bereits mit dem von seiner Zahlenbelegung her unbekanntem Würfel getrudelt wurde.

Nach dem ersten Wurf ist natürlich noch fast alles offen, denn der macht nur über eine von 6 Seiten eine Aussage. Aber je öfter der Würfel gefallen ist, desto wahrscheinlicher ist ein relativ gleichmäßiges Fallen aller 6 Würfelseiten und desto genauer läßt sich der »wahre« Wert (die Gesamtpunktzahl aus

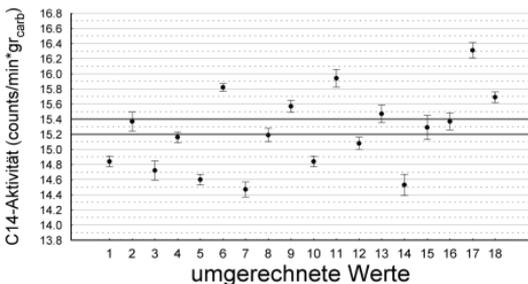
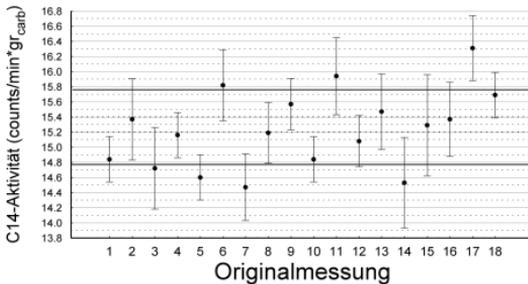
## 7.8 Reguläre Normalverteilung

Die Graphik verdeutlicht die geringe Abweichung, die die Verteilung von C14-Daten von der theoretisch zu erwartenden Normalverteilung aufweisen kann wenn, diese in großer Zahl in einem Labor an derselben Probe gemessen werden.



## 7.9 Original und Aussage

Die obere Grafik zeigt die Aktivitätswerte der 18 Hölzer, die von Libby zum Nachweis der global gleichförmigen C14-Verteilung ausgewertet worden waren. Es ist zusätzlich der mittlere Fehler der Einzelmessungen von  $\pm 0.43$  eingezeichnet.



Unter der Annahme tatsächlich gleicher Aktivität errechnet Libby eine mittlere Aktivität von  $15.3 \pm 0.1$ . In dem Bild **7.6** wurde gezeigt, daß die Annahme einer Normalverteilung für diese 18 Werte ungerechtfertigt ist. In der unteren Grafik wird jetzt eine Verteilung angegeben, die resultieren würde, wenn sich die Werte bei längerer Messung nicht tendenziell alle in Richtung 15.3 »einstellen« würden, sondern – was entsprechend der nichtvorhandenen Normalverteilung zu erwarten wäre – mehr oder weniger bei dem ursprünglichen Wert verharren würden.

allen 6 Seiten) auch vorhersagen. Genauso verhält es sich auch mit dem radioaktiven Zerfall. Je länger die Meßzeit wird, desto geringer wird die Ungewißheit über die tatsächliche Anzahl der in der Probe befindlichen C14-Atome.

Solange darauf geachtet wird, daß alle Spieldurchgänge mit ein und demselben Würfel gemacht werden, muß sich auf Dauer eine Normalverteilung der erzielten Summen einstellen. Je größer die Anzahl der zur Summenbildung führenden Würfe eines Spiels vereinbart wird, desto steiler wird diese Verteilung, oder, umgekehrt, je geringer selbige Anzahl ist, desto flacher wird diese Verteilung sein. Dabei spielt es grundsätzlich überhaupt keine Rolle, welche Unsicherheit man dem Ergebnis eines einzelnen Spiels – aus welchen Gründen auch immer – zugemessen hatte. Die aufgetragenen Summenwerte werden in jedem Fall zu der Normalverteilung führen.

Wird das Spiel hingegen abwechselnd mit zwei unterschiedlichen Würfeln durchgeführt, die jeweils unterschiedliche Summen der Augen aus ihren 6 Seiten aufweisen, dann wird es keine einzelne, sondern zwei überlagerte Normalverteilungen geben, die sich bei ausreichend langer Durchführung des Spiels deutlich voneinander unterscheiden lassen. Es wären 2 Extrema in der erstellten Graphik zu erkennen (sog. bimodale Verteilung), womit die Anwesenheit zweier unterschiedlicher Würfel gewissermaßen enttarnt wäre.

Wird das Spiel allerdings mit lauter unterschiedlichen Würfeln nur jeweils einmal durchgeführt, dann wäre gar keine Normalverteilung der Einzelsummen mehr zu dechiffrieren, obwohl diese als Einzelspiele jeweils eine Normalverteilung mit je eigenem Mittelwert aufweisen würden. In der Graphik erzeugten die aufgetragenen Summen alles mögliche, nur keine Normalverteilung um einen nunmehr fiktiven Mittelwert. Gerade so verhält es sich aber mit den genuin nicht gleichzeitigen C14-Altern. Während die Fehler aus dem Zufallscharakter des radioaktiven Zerfalls durch entsprechend lange Messungen klein gemacht werden könnten, müssen die entsprechenden Mittelwerte ohne Tendenz zu einer ordentlichen Normalverteilung bleiben.

Radiometrisch ungleichaltrige C14-Proben entsprechen den eben beschriebenen Würfeln mit unterschiedlichen Augenzahlen bzw. -summen. Sie können auch bei längsten Meßserien keine Normalverteilung erzeugen, weil sie naturgemäß zu je eigenen, u.U. sehr divergenten Werten führen müssen. Man kann allerdings Kosmetik betreiben, indem die Wurfserien (= Messungen) nur so lang gemacht werden, daß die Unsicherheit über den »wahren« Wert noch so groß ist, daß diese in der Größenordnung der Streuung der mit den unterschiedlichen Würfeln (= Proben) erzeugten Summen bleiben. Langzeitwürfelpartien (= Präzisionsmessungen) erzeugten nur mit ideal geformten



und unveränderlich bleibenden Würfeln (= Teile einer einzigen Probe) konsistente Ergebnisse.

In diesem Zusammenhang soll Libbys Interpretation der Radioaktivität weltweit zusammengetragener »jetztzeitiger« Kohlenstoffproben erneut kurz ausgeleuchtet werden (Bild **7.6**). Deren Gleichwertigkeit inbezug auf die rezente C14-Aktivität war als die entscheidende Voraussetzung für die praktische Anwendbarkeit der C14-Methode nachzuweisen [Libby et al. 1949]. Die Aktivität einer einzelnen Probe – z.B. einer Ulme aus der Umgebung von Chicago – gibt er [Libby 1952, 14] mit  $14.72 \pm 0.54$  Zerfallsereignissen pro Minute und Gramm Kohlenstoff [ $\text{cpm}/\text{g}_{\text{carb}}$ ] an.

Wenn er also den zur Auswertung gelangenden Teil der Ulme in 18 gleiche Teile zerlegt und von jedem einzelnen Teil dessen C14-Radioaktivität mißt, dann müssen ca. 12 der ermittelten 18 Meßwerte im Intervall zwischen 14.18 und 15.26  $\text{cpm}/\text{g}_{\text{carb}}$  liegen. Bei längerer Meßzeit wird der resultierende Fehler entsprechend kleiner. Er setzte voraus, daß eine unendlich lange Meßzeit bei allen Proben denselben Wert ergeben würde und errechnet ihn aus den gegebenen Meßwerten innerhalb einer begrenzten Meßzeit zu  $15.3 \pm 0.1$ . In dem Bild **7.9** wird deutlich, welche Verschiebung des Präzisionsmeßwertes gegenüber dem tatsächlichen erreichten Meßwerte er jeweils voraussetzte, um dieses Ergebnis zu rechtfertigen.

## 7.9 Gängige Praxis

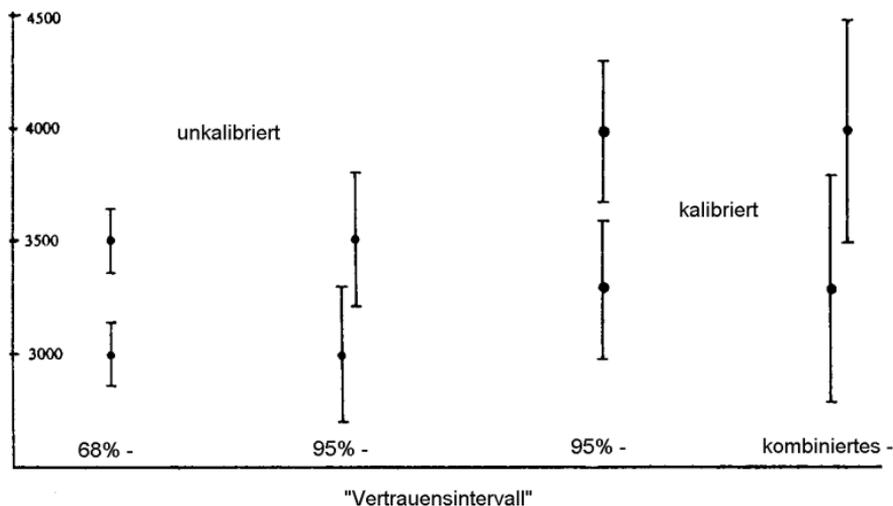
Wir möchten am Ende dieses statistisch orientierten Kapitels unsere Kritik am routinemäßigen Umgang mit C14-Meßwerten am Beispiel der Behandlung der C14-Daten des sogenannten »Cadbury Massaker« zusammenfassend verdeutlichen [vgl. Campbell et al. 1979, 31-38]. Hier lagen Überreste aus einem Feuer – Holzkohle und diverse Proben verbrannten Getreides – vor, die bei Ausgrabungen am Südwesttor des Schlosses von Cadbury entdeckt worden waren. Das Feuer wurde auf eine römische Vergeltungsaktion anlässlich der Boudiccan-Revolution zurückgeführt. Das Ereignis sollte zwischen 45 und 61 AD stattgefunden haben. Die Attraktivität der Untersuchung bestand in der Sicherheit, Proben aus einem ganz begrenzten Zeitraum untersuchen zu können.

Es wurden sieben Proben gesammelt, wovon drei groß genug waren, um von zwei Laboratorien – Glasgow University (GU) und Scottish Universities Research and Reactor Centre (SRR) – unabhängig voneinander vermessen werden zu können. Die Zusammenstellung der Meßwerte ist in Bild **7.10** zu finden. Die Autoren betonen, daß die Holzkohlenprobe SC/K 659(iv) von schlechter Qualität und somit die entsprechende Messung GU 648 ungeeignet

### 7.11 Gleichaltrig – ja oder nein?

In dem Artikel »Radiocarbon: Ages in Error« demonstriert R.E. Lee [1981, 24] die Beliebigkeit der Auslegungsregeln für die Beurteilung der Gleichzeitigkeit zweier C14-Daten. Abhängig davon, welches »Vertrauensintervall« jeweils zugrundegelegt wird, findet er im Rahmen des üblichen Kalibrierverfahrens ein Meßwertpaar abwechselnd als nicht-gleichaltrig und dann wieder als gleichaltrig vor. Der Interpretationsspielraum beschert jedem das Ergebnis, das er für seine historische Beweisführung benötigen würde.

Wie in Bild 3.2 gezeigt wird, können in dem hier von Lee diskutierten Fall des Vergleichs zweier Proben auch im besten Fall nur wenige Prozent Wahrscheinlichkeit für deren Gleichaltrigkeit angesetzt werden. Das Ansetzen einmal des  $1\sigma$ -, das anderemal des  $2\sigma$ -Intervalls (»68%« bzw. »95%-Vertrauensintervall«) ist – egal ob für die unkalibrierten (linkes Paar) oder die kalibrierten Daten (rechtes Paar) – reine Willkür. Die Beschreibung des  $2\sigma$ -Intervalls als »95%-Vertrauensintervall« ist nachgerade irreführend, weil hier lediglich mehr als 95% Vertrauen darin gesetzt werden darf, sich bei dem Verwerfen der Gleichzeitigkeitshypothese nicht zu irren.



gewesen und deswegen in ihr abschließendes Urteil auch nicht eingeflossen sei. Sie fassen die Meßergebnisse wie folgt zusammen: »Die C14-Messungen an den kurzlebigen Proben weisen eine Streuung von mehr als 300 Jahren auf bei einem arithmetischen Mittel für das Alter von 1802 Jahren (AD 148), was erheblich jünger als erwartet ist«. Merkwürdig sei, daß die Proben, die weniger genau dem Ereignis zuzuordnen waren, dem erwarteten Datum näher kamen als die kurzlebigen Proben, deren Zuordnung zu dem Ereignis als am sichersten angesehen werden könnten. Die Diskrepanz wachse noch, wenn die Daten nach den vorliegenden Tabellen (Suess, MASCA) kalibriert würden. Der Schluß auf einen systematischen Fehler bei der Anwendung der Daten aus der Bristlecone-Pine-Chronologie liege nahe. Die Autoren sehen aber auch die Gefahr der Kontamination mit modernem Kohlenstoff. Abschließend stellen sie fest, daß die C14-Methode für eine genauere Datierung ungeeignet sei, und höchstens zur Abschätzung des Alters mit einer Unsicherheit von mehreren Jahrhunderten zu gebrauchen sei [34].

Soweit die direkt mit der Probennahme und Auswertung befaßten Autoren. R.E. Taylor hatte dieses Beispiel in seiner Monographie über die C14-Methode [1987] ebenfalls aufgegriffen, um die Problematik der Rechnung mit künstlich »aufgeweiteten« Fehlerangaben zu demonstrieren (vgl. auch Kapitel 7.7). Er stellte den konventionellen Meßdaten die kalibrierten gegenüber, letztere aber auf Basis der  $2\sigma$ -Fehlerbreite. Acht von zehn der kalibrierten Daten mit  $2\sigma$ -Fehlerbreite überlappen jetzt das vermutete Alter der Proben. (Das gilt übrigens ebenso für die unkalibrierten Daten, falls hier genauso die  $2\sigma$ -Fehlerbreite angesetzt würde; im Bild **7.11** wird auf die hier gepflegte Beliebigkeit Bezug genommen). Und wenn die beiden Ausreißer (GU-648 und SRR-692, mit offensichtlichem Druckfehler bei zweiter Erwähnung von SR-648) »kombiniert« würden, dann »überlappt das über die Kalibrierung errechnete Altersintervall mit dem auf historischer Basis vermuteten Alter« [op.cit. 140].

Der eigentliche Kunstgriff – vor dem Taylor aber warnen möchte, das sei hier ausdrücklich erwähnt – kommt aber noch: »Wenn im Sinne der Statistik angenommen werden darf, daß jeder C14-Wert eine unabhängige Beobachtung desselben Ereignisses darstellt, dann resultiert ein mittlerer Wert von  $1890 \pm 10$  C14-Jahren für das Cadbury Massaker.« Es muß nicht betont werden, daß Taylor auf tatsächlich identische C14-Aktivitäten für alle Proben abzielt, etwas, was die Autoren des oben zitierten Artikels eingangs auch angenommen hatten, doch angesichts der großen Divergenzen zurecht nicht in Ansatz bringen mochten. Wir haben diesen Wert mit seinen virtuellen »Fehlergrenzen« in das Bild **7.10** gestrichelt eingezeichnet. Er überlappt nunmehr

das Sollalter und ist kaum unsicherer als die historisch gewonnene Bandbreite für das Alter. Taylor bezieht sich bei dem skizzierten Manöver auf die Veröffentlichung von A. Long und B. Rippeteau [1974, 207], die die hier schon öfters zitierte Formel

$$\Sigma {}^{14}\text{Ci} / n \pm \sigma / \sqrt{n} \text{ mit } \sigma = \sigma_i \text{ für alle } i$$

auf den Fall der Messung identischer Proben beschränkt sehen wollen, womit natürlich auch das identische Alter impliziert wird. Wir dürfen davon ausgehen, daß das im Zweifelsfall als Interpretationssache gehandhabt wird: Dieselben Meßdaten, die für Campbell et al. ein Anlaß zu grundsätzlicher Kritik an der C14-Methode gewesen sind, können also weniger von Zweifeln geplagten Wissenschaftlern als Ausgangspunkt für eine Demonstration ihrer bewunderungswürdigen Leistungsfähigkeit dienen. Wir denken, daß dieses Beispiel die Stoßrichtung unserer Kritik unmittelbar veranschaulicht. Ist es zu provokativ, wenn wir behaupten, daß diese statistischen Unsicherheiten, wenn es sie nicht geben würde, erfunden werden müßten, um ein je genehmes Fehlerintervall zu erzeugen, das bei steter Verkleinerung zugleich zu dem »richtigen« Mittelwert führt?

## 7.10 Schlußbemerkung

Es gibt eine interessante Bemerkung von J.G. Ogden III. über die Akzeptanz der in seinem C14-Labor erzielten Datierungen bei den jeweiligen Auftraggebern – Archäologen, Geologen etc.. Diese liege für den betrachteten Bereich unter 50%. Damit befindet er sich in Übereinstimmung auch mit anderen Fachleuten (vergleiche Kapitel 2.1). Für diesen erschreckenden Split in »gut« und »schlecht« lieferte dieses Kapitel ein summarisches, wenn auch sicherlich nicht jede Einzelfallprüfung überstehendes Argument: Für gut befunden werden diejenigen Ergebnisse, mit denen sich auf illegal-statistischem Wege ein akzeptables Endergebnis hinrechnen läßt. Herausfallen müssen umgekehrt diejenigen, die dieses jeweilige Spiel nicht aufgehen lassen.

An sich soll die Zusammenschau von C14-Daten organischer Proben, die ihren Stoffwechsel zeitgleich beendet haben, zu einer deutlich sichereren Kenntnis des fraglichen Zeitpunktes führen – solange die Einzelmessungen normalverteilt vorliegen. Mit der Betrachtung von normalverteilten Ensembles kann also die prinzipielle Unsicherheit von Einzeldaten verringert werden. Wenn dagegen die entsprechenden C14-Daten nicht normalverteilt sind, dann spricht das für weitere Quellen systematischer bzw. zufälliger Fehler,

die mit der in der Natur der Sache liegenden Unsicherheit einer zeitlich begrenzten Messung der Radioaktivität nichts mehr zu tun haben.

Auch bei statistischer Unsicherheit einer Einzelmessung kann entschieden werden, ob die zeitlich zusammengehörenden Proben »sauber« waren bzw. ob es gelungen ist, systematischen »Dreck« auf korrekte Weise zu entfernen. Erfahrungsgemäß liegt aber der größte Teil der untersuchten Ensembles nicht normalverteilt vor. Dabei wird dann die Tatsache, daß eine statistische Streuung der Einzelmessungen wegen der Zufälligkeit des radioaktiven Zerfalls immer vorliegt, als Alibi herangezogen, um die an sich erratisch streuenden Werte auf der Basis unwissenschaftlicher Regeln in einen künstlichen zeitlichen Zusammenhang zu stellen und darüberhinaus unzutreffende Sicherheiten über das so gewonnene, an sich aber bedeutungslose Datum vorzuspiegeln.

Eine Normalverteilung der C14-Daten für zeitlich als vergesellschaftet zu betrachtender Proben ist in aller Regel nicht gegeben. Daraus muß gefolgert werden, daß die systematischen Korrekturen unzureichend sind und/oder daß jeweils weitere zufällige Fehler eingeflossen sind. Mithin begründet dieses Kapitel über Statistik auch die kritische Betrachtung der Korrekturversuche durch »Kalibrierung« in Kapitel 9. Statistische Scheinsignifikanz verdeckt die Tatsache, daß das für die Kalibrierung unverzichtbare Simultanitätsprinzip nicht gegeben ist. Bevor der Komplex »Kalibrierung« zur Sprache kommt, soll im Kapitel 8 die ohnehin zu erwartende generell hohe Ungenauigkeit eines C14-Datums beschrieben werden.

## 8. Verwässerung statt Verbesserung – noch mehr Fehler!

### 8.1 Die »Feinheit« der Methode

In den Anfängen der C14-Methode war die Welt noch in Ordnung. Nur der Zählfehler bei der Messung der C14-Aktivität galt als ernstzunehmende Quelle für eine mögliche Datierungsunsicherheit. Die Senkung dieses Zählfehlers wurde als technische Herausforderung und nicht als ernsthaftes Hindernis betrachtet. Eine zeitliche und räumliche Invarianz der C14-Konzentration in der Atmosphäre war dagegen selbstverständlich. Bei der Probennahme und -aufbereitung witterte man ebenfalls kein Ungemach. Kurz: Eine technisch optimierte Messung der C14-Aktivität sollte als Äquivalent zum exakten Absolutalter der Probe angesehen werden können. Es hat sich im Laufe der Zeit herausgestellt, daß die Dinge nicht so einfach zu haben sind. Die Konsequenzen für die Tragfähigkeit der Methode wurde der wissenschaftlichen Öffentlichkeit allerdings nicht in ihrer ganzen Tragweite offenbart.

Heute ist Meßgenauigkeit nur noch eine Kostenfrage, nämlich wieviel Meßzeit und damit -aufwand man für die fragliche Probe zu zahlen bereit ist (vergleiche Bild **7.2**). Darüberhinaus stellte sich aber die Notwendigkeit heraus, zahlreiche Korrekturen an dem so erzielten Ergebnis vorzunehmen: eine Korrektur wegen des Effektes der Isotopenfraktionierung, eine Korrektur wegen des Kontaktes mit hartem Wasser, eine Korrektur zur Kalibrierung, und etliche andere mehr. Die Methoden wurden immer feiner. Damit einhergehend wuchsen aber auch die zu berücksichtigenden Fehlerquellen.

Die Methoden wurden vor allem deswegen immer weiter verfeinert, weil die C14-Wissenschaftler im Dauerclinch mit Altertumswissenschaftlern stehen, die natürlich vorher schon über andere ausgefeilte Datierungsmethoden verfügten und ein Datum deutlich jenseits der bereits errichteten Datierungssysteme nicht ohne weiteres hinzunehmen bereit sind. Die Feinheit der Methode ist also im Kreuzfeuer der Kritik entworfen worden. Wer weiß, was für eine merkwürdige C14-Chronologie ohne »Kontrolle« durch die Altertumswissenschaft entstanden wäre.

Wie groß der Einfluß dieser Kontrolle ist, kann aus dem für den Außenstehenden unerwartet hohen Fehler am Ende der Auswertungsprozedur abgelesen werden, denn jede als notwendig erachtete Korrektur der Messung der C14-Aktivität birgt naturgemäß selber eine Fehlerquelle. Während einerseits Korrekturen den Meßwert dem »wahren Wert« näher bringen sollen (und das resultierende Alter gleichermaßen herauf- und herunterschrauben können), addieren sich andererseits die Fehler aus den Korrekturen gleichmäßig auf. Je

feiner die Analyse am Ende ist, desto mehr einzelne Unsicherheiten haben die Betrachtungen in der Summe angehäuft. Mit anderen Worten: Das Bestreben nach mehr Präzision<sup>21</sup> geht auf Kosten der Genauigkeit.

Wenn die C14-Methode auf die Feinheit ihrer Methoden verweist, dann muß man wissen, daß diese »Feinheiten« Nachbesserungen darstellen, die erfahrungsgemäß mehr oder weniger vage ausfallen und damit einen entsprechend großen »Zuschlag« für den am Ende offenzulegenden Gesamtfehler erzeugen.

Wie schwer ein Datum durch Korrekturen in den Griff zu bekommen ist, macht der in der C14-Wissenschaft oft verwendete Allgemeinplatz von der »Anomalie« deutlich. Anomalien können nur auf der Basis bewährter Normen festgestellt werden. Die »Normen« der C14-Methode sind niemals durch empirische Gegebenheiten begründet worden, sondern lediglich durch die Eleganz und die scheinbare Evidenz einiger Annahmen über das Verhalten der Natur. Die erzielten Ergebnisse werden also an einem durch Wunschenken erzeugten Standard und nicht an der Realität gemessen. So kann es nicht Wunder nehmen, daß diese sich allzuoft als Anomalie bezeichnen lassen müssen. Bei der Quantifizierung von Anomalien oder »sonstigen Abweichungen« ist man in der Regel auch nicht kleinlich. Hier geht es schnell in den Bereich mehrerer Jahrtausende. Dennoch wird der generell zu erwartende Datierungsfehler grundsätzlich als moderat angenommen.

Dezente Mahnungen im Zusammenhang mit der Interpretation von Altersangaben geben Aufschluß über die prekäre Situation bei der Handhabung des angegebenen Fehlers. So weist R.E. Taylor darauf hin, daß die Angabe des Gesamtfehlers in der Größenordnung von 100 Jahren in nichthistorischen archäologischen Zusammenhängen bereits eine »sehr präzise Schätzung« bedeute. Für viele archäologische, paläoanthropologische oder allgemein geologische Fundsituationen, insbesondere für das Pleistozän<sup>22</sup>, könnten signifikante Schlüsse aber auch aus wesentlich größeren zeitlichen Intervallen gezogen werden [Taylor 1987, 106]. Verantwortungsbewußte Archäometer fühlen sich bei C14-Daten, deren Unsicherheit nicht in etlichen Jahrhunderten angegeben wird, offensichtlich nicht mehr wohl in ihrer Haut [ISG 1982]. Damit ist an die-

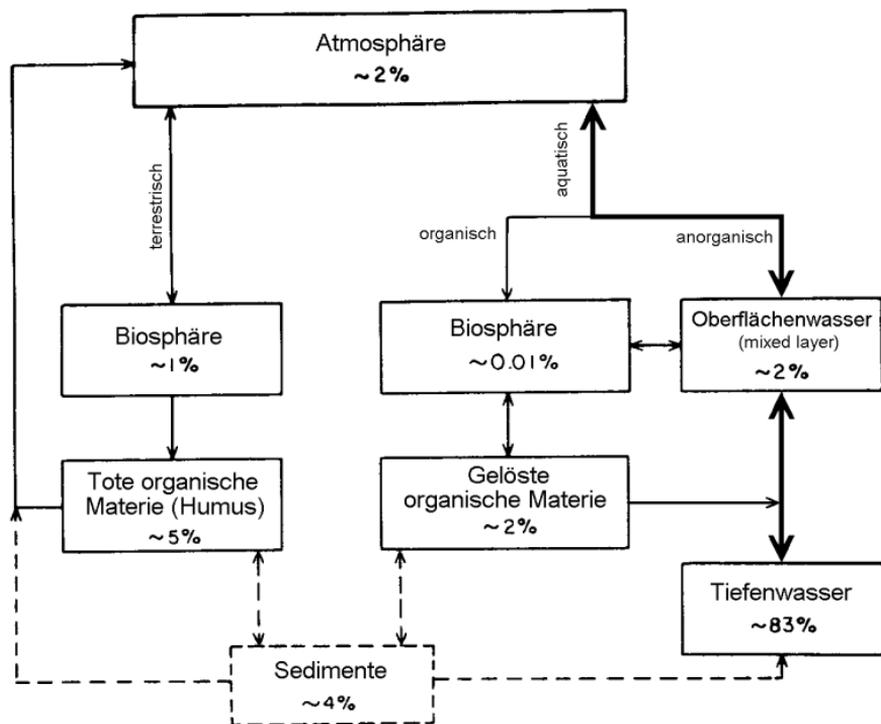
---

<sup>21</sup> »Präzision« wird in diesem Zusammenhang als Maß für die Abweichung vom »wahren« Wert verstanden. Der Begriff »Genauigkeit« bezieht sich dann auf die Sicherheit, die mit dieser Aussage verbunden ist. Wenn die Korrekturmaßnahmen unterbleiben würden, dann resultierten hochgenaue, jedoch äußerst unpräzise Angaben.

<sup>22</sup> Name für die eiszeitliche Epoche, die dem gegenwärtigen, nacheiszeitlichen Holozän vorausging.

## 8.1 Globale Kohlenstoffreservoir

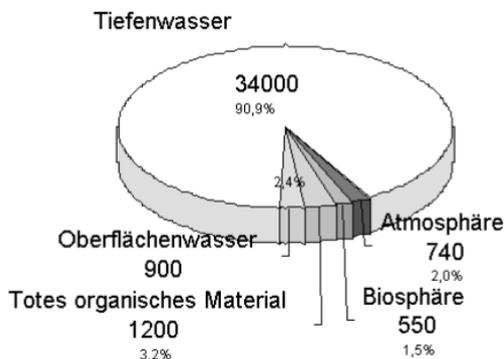
In dem schematischen Diagramm auf dieser Seite [nach Taylor 1987, 8] sind die geschätzten Kohlenstoffvorkommen in den relevanten irdischen Kohlenstoffreservoirs dargestellt (ebenso in dem Kreisdiagramm rechts, nach Bowman [1990, 13]; teilweise abweichende Zahlen sind auf uneinheitliche Annahmen zurückzuführen). Zusätzlich sind die möglichen Diffusionsströme zwischen den Reservoirs eingezeichnet. Dabei kommt dem Austausch zwischen der Atmosphäre und dem Ober- bzw. Tiefenwasser der Ozeane besondere Bedeutung zu (dicke Pfeile). Die Dynamik, die an diesen Reservoirübergängen zu erwarten ist, steht in Konflikt zu dem Stationaritätsgedanken, der von einer jahrtausendwährenden Konstanz der C14-Konzentration in der Atmosphäre ausgeht. Der mit rund 83% überwiegender Anteil des Kohlenstoffs ist in den Meeren (vorwiegend als Kohlendioxid und Kalziumkarbonat) gebunden. Die als gewaltige Transportbänder wirkenden Meeresströmungen (vergleiche dazu Bild 9.10) regieren zusammen mit der Produktion von C14 in der Stratosphäre das C14-Alter des Oberflächenwassers.



Diese Schicht zwischen der Atmosphäre und dem Tiefenwasser der Ozeane ist eine Art Puffer und bestimmt letztlich die C14-Konzentration der Atmosphäre wesentlich mit. Ist das Oberflächenwasser arm an C14, so 'veraltet' die Atmosphäre radiometrisch, ist es hingegen gesättigt und die Produktion von C14 steigt darüberhinaus, so 'verjüngt' die Atmosphäre hinsichtlich ihres C14-Alters. Damit ist lediglich das beschrieben, was in den Kalibrierkurven als Schwankungen mit einer Periode von bis zu etlichen Jahrzehnten ohnehin zu erkennen ist.

Die Annahme, daß ausgerechnet jene C14-Konzentration, die in den Jahren der Entwicklung der C14-Methode herrschte, auf die vergangenen 12.000 Jahre übertragbar sein müsse, wurde in völliger Verkennung des dynamischen Zustandes des ozeanisch/atmosphärischen Systems getroffen. Nur so konnte man glauben, in dem Augenblickswert der C14-Aktivität einen Ausdruck stationärer Verhältnisse erkennen zu dürfen. Das völlig uneinheitliche Bild der C14-Alter aus den letzten 500 Jahren (vergleiche Bild 5.3) wurde – teilweise sicherlich zu recht – auf den Effekt der industriellen Revolution geschoben. Völlig divergente Abbilder der atmosphärischen C14-Konzentration von unterschiedlichen Regionen der Welt für die vergangenen 1.000 Jahre lösten keinen Alarm aus, sondern wurden auf Fehl- oder Doppelringe in den betreffenden Baumringchronologien geschoben (Kapitel 2.3 ff.).

## Kohlenstoffreservoir [10<sup>12</sup> kg]



Die C14-Wissenschaft sollte durch die Tatsache beunruhigt sein, daß für alle Zeiträume, die historisch sicher datiert sind, exzessive C14-Schwankungen in Raum und Zeit dokumentiert sind, die Rekonstruktion der atmosphärischen C14-Konzentration andererseits fundamental auf die räumliche Homogenität abhebt. Wer die Bedeutung der Diffusion von C14 erkennt, dem muß der Langzeitrend der bekannten Kalibrierkurven mehr als fragwürdig erscheinen.

ser Stelle das Ergebnis dieses Kapitels – C14-Daten müssen als unpräzise angesehen werden – bereits vorweg genommen worden.

Bezeichnend ist auch das Unbehagen Taylors, wenn genauere Datierungen in nichthistorischen Zusammenhängen gefragt sind. Anomalien können nämlich oftmals nur mit dem Zusatzwissen aus sonstigen historischen Datierungen erkannt werden. Entweder sind sie dann korrigierbar (und damit liegt keine unabhängige C14-Datierung mehr vor) oder das Datum muß aussortiert werden. Tatsächlich bauen nur ganz wenige historische Schulen ihre Absolutchronologien auf C14-Daten auf. Zu groß sind immer wieder die Diskrepanzen zu anders begründeten Absolutchronologien.

Ein immenses Grab erratischer Datierungsversuche verbirgt sich hinter der hohen Anzahl tatsächlich zurückgewiesener Daten. J.G. Ogden III., der es als Direktor des C14-Labors der Dalhousie University in Kanada wohl wissen muß, warnte vor dem Schock, den die Tatsache bereiten könnte, daß weniger als die Hälfte der das nordöstliche Nordamerika betreffenden C14-Daten von denen, die die Datierung beauftragt hatten, angenommen werden [Ogden 1977, 173]. Andere Autoren beziffern die allgemeine Abweisungsrate ähnlich hoch: 33% [Lewis 1985, 217] bis 50% [Hassan 1989, 57]. In dem Zusammenhang bemerkte R.E. Lee, daß weniger diese Zurückweisungsrate verwunderlich sei, als vielmehr die Tatsache, daß die verbleibenden Daten dennoch akzeptiert würden<sup>23</sup> [1981, 9]. Wir merken an dieser Stelle im Hinblick auf das vorangegangene Kapitel 7 an, daß das vor allem diejenigen Datierungen sein werden, die sich über einen besonders effektiven statistischen Fehlervertuschungsparcour treiben ließen.

Die Bezeichnung »Unregelmäßigkeit« oder »Anomalie« trifft auch auf die Tatsache zu, daß in der Regel mehrere eigentlich als kontemporär anzusehende Meßwerte weitaus stärker streuen, als die nachgeschaltete Fehlerangabe für deren Mittelwert anzeigt. Wir haben im vorherigen Kapitel gezeigt, wie aus einem Ensemble stark streuender Werte ein künstlicher Mittelwert mit einem abgemagerten Fehler gemacht werden kann. Das funktioniert allerdings nur unter Zuhilfenahme von statistischen Methoden, die ausdrücklich zeitgleichen Proben vorbehalten sind und nicht dazu benützt werden dürfen, Zeitgleichheit vorzutäuschen.

<sup>23</sup> Die Mittelalterforschung sieht sich für die Zeit vor 1000 AD einem nicht geringeren Problem gegenüber. Es werden immer mehr Urkunden gerade des frühen Mittelalters als Fälschungen erkannt, ohne daß eine Angabe möglich ist, ob der 'Pegel' bei 20 oder 40% oder noch höher liegt.

Es sind übergeordnet vier Phasen der Existenz der Probe zu unterscheiden, in denen die im Labor zu messende C14-Konzentration aus den unterschiedlichsten Gründen variiert bzw. eingestellt wird:

- 1) Die Lebenszeit der Probe,
- 2) ihre Lagerzeit (zwischen einigen 100 bis zu mehreren 10.000 Jahre),
- 3) die Phase der Enthüllung, der Aufbereitung und des Transports zum Labor sowie
- 4) die Verarbeitung im Labor einschließlich des reinen Zählfehlers.

Viele Proben kommen danach als »Cocktail« für spätere Kontrollmessungen auf gewisse Zeit in ein Lager. Diskutiert wird in diesem Kapitel zusätzlich eine

- 5) Metafehlerquelle,

die erst durch Vergleich von Messungen anderer Labors an derselben Probe aufgedeckt werden können. Allein die Menge der in den verschiedenen Phasen jeweils zu bilanzierenden Korrekturansätze, von denen jeder naturgemäß mit einem mehr oder weniger großen Fehlerbeitrag aufwartet, führt in der Summe zu einer erheblichen Aufweitung des grundsätzlich unkompensierbaren zufälligen Fehlers aus der Messung des radioaktiven Zerfalls. Wir werden am Ende dieses Kapitels die Quantifizierung der Summe dieser Fehler diskutieren (vergleiche dazu Tabelle **8.14** am Ende des Kapitels).

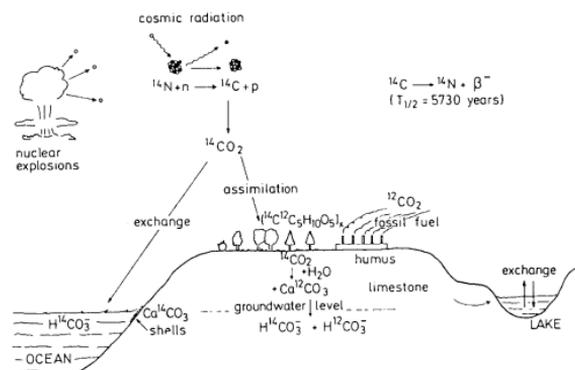
Es ist zu vermuten, daß Libby und seine Kollegen das Projekt »Absolutdatierung mit C14« fallen gelassen hätten, wenn ihnen ein Einblick in die sich später auftürmenden Schwierigkeiten möglich gewesen wäre. Doch die Erkenntnis darüber erwuchs nicht schlagartig, und so blieb die Aufweitung des summarischen zufälligen Fehlers unbemerkt, weil die C14-Methode ohnehin einen (über eine Ausweitung der Meßzeit allerdings beherrschbaren) zufälligen Fehler ausweisen muß (vergleiche dazu Kapitel 7.1). Wir werden in diesem Kapitel die eben aufgeführten 5 Phasen beleuchten, in denen sich die C14-Konzentration abweichend von der »Norm« einstellen kann. Die eigentliche Messung der C14-Aktivität haben wir im vorhergehenden Kapitel 7 analysiert und haben dort schon die allgemein übliche statistische Schönrechnung inkompatibler Daten kritisiert. Hier zeigen wir jetzt, wodurch der Zwang zu den mathematischen Taschenspielertricks eigentlich entsteht.

Zur besseren Übersicht werden in den folgenden 5 Teilkapiteln zusätzliche Unterteilungen vorgenommen, in denen die jeweiligen Effekte größtenteils nach den herkömmlichen Unterscheidungskriterien aufgeführt und diskutiert werden. Außerdem wird jeweils eine kurze Zusammenfassung gegeben.

## 8.2 Produktion, Zerfall und Diffusion von C14

Die natürliche Produktion von C14 findet in der oberen Atmosphäre statt, schwerpunktmäßig über den Polen, und ist damit ein räumlich begrenzter Vorgang. Der radioaktive Zerfall des C14 vollzieht sich dagegen in allen Kohlenstoffreservoirs der Erde und betrifft jährlich jeweils den 1/8.300sten Teil der örtlich vorhandenen Menge. Alle anderen Vorgänge beschreiben Wanderungsbewegungen des C14, ohne daß sich dadurch seine absolute Menge auf der Erde verändert.

Die Messung des Absolutvorkommens an C14 ist unmöglich. Zu seiner Bestimmung ist man deshalb auf Hilfsannahmen angewiesen. Diese betreffen die Extrapolation lokaler C14-Aktivitätsmessungen auf alle relevanten Kohlenstoffreservoirs einerseits und deren Größe andererseits (vgl. die Tabelle in Bild 8.1). Ebenso wenig ist die jährliche Absolutproduktion an C14 meßbar und deshalb auch nur auf Umwegen zu ermitteln. Die in der Literatur genannten Zahlen zwischen 5 und 10 Kilogramm produziertem C14 pro Jahr gründen auf der Annahme, daß sich Produktion und Zerfall von C14 im Gleichgewicht befinden. Die Gesamtmenge an zerfallenem C14 wird deshalb aus einer als einigermaßen homogen vorliegenden spezifischen Aktivität und einer Schätzung über den irdischen Gesamtkohlenstoffvorrat abgeleitet.



Die kurzfristigen Schwankungen der C14-Werte in Baumringfolgen führen die Stationaritätsannahme ad absurdum. Die Produktion muß erheblich höher liegen als aus ihr für gewöhnlich abgeleitet wird. Der atmosphärischen C14-Produktion sind Diffusionseffekte überlagert, die für eine dynamische Absenkung der C14-Konzentration in der Atmosphäre sorgen. Dieser Effekt ist global

uneinheitlich und schwankt lokal in seiner Stärke und sorgt für entsprechende Konzentrationsschwankungen. Niemand kann heutzutage ad hoc sagen, welcher übergeordneten Tendenz die C14-Konzentration in der Atmosphäre in vergangenen Jahrtausenden folgte. Daß diese sich im Mittel lediglich um 1% je Jahrtausend ändert – wie in den allgemein verwendeten Kalibrierkurven ausgewiesen –, ist die Unwahrscheinlichste aller Denkmöglichkeiten. Es sei daran erinnert, daß sich aber der zentrale Leitgedanke für die Konstruktion der Kalibrierkurven ursprünglich auf das Modell der Stationarität abstützte, das seinerzeit als unumstößlich galt. Im Kapitel 2 ist die Geschichte der Kalibrierung nachgezeichnet und dieser Zirkelschluß offengelegt.

## 8.2 Jede Probe hat schließlich auch einmal gelebt ...

Wir fragen zuerst nach lokalen Abweichungen der C14-Konzentration von einem angeblich global homogenen Wert, der sich in einem dynamischen Zusammenspiel von Produktion, Diffusion und Zerfall überall auf gleiche Weise herausbilden soll. Diese Abweichungen machen sich beispielsweise durch eine Inversion des C14-Alters bemerkbar. Dabei erscheinen Proben aus tieferliegenden Schichten radiometrisch wieder jünger bzw. sind die direkt darüberliegenden Proben viel »zu alt« geraten. Abweichungen machen sich auch bemerkbar durch übermäßige Streuungen des C14-Alters bei stratigraphisch vergesellschafteten Proben. Die Frage ist, ob diese Abweichungen jeweils eine Systematik erkennen lassen und somit eventuell korrigierbar sind, oder ob sie als unerklärliche und deshalb unkorrigierbare Anomalien hingenommen werden müssen.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich die absolute Menge an C14 in allen irdischen Kohlenstoffreservoirien zwar nur aus Produktion und Zerfall des C14 bestimmt, daß aber die für die spätere Altersbestimmung entscheidende lokale C14-Konzentration vor allem von der lokalen Zu- bzw. Abfuhr von C12 bzw. C14 abhängig ist (vergleiche dazu insgesamt das Kapitel 9). Zusätzlich zu Schwankungen aufgrund der Diffusion von C12 bzw. C14 kommen systematische Abweichungen infolge isotopenselektiven Stoffwechsels hinzu.

Normalerweise wird die Restaktivität der fraglichen Probe mit der Aufzeichnung einer absolutdatierten und möglichst dicht belegten Restaktivitätensreihe abgeglichen, um so auf das Absolutdatum der Probe zu kommen (zur Kalibrierung allgemein vergleiche die Bilder **7.1** und **9.1** sowie Kapitel 9.1 ff.). Je stärker die Streuung als gleichaltrig zu betrachtender Proben ausfällt, desto größer ist auch der zu betrachtende Fehler. Berücksichtigt werden normalerweise die folgenden beiden Effekte:

- a) ein von Spezies zu Spezies unterschiedliches Inkorporationsverhalten gegenüber C14 (»Isotopenfraktionierung«) und
- b) vereinzelte und lokal auftretende, mehr oder weniger systematische Abweichungen von dem als global durchmischtes gedachten Kohlenstoffdepot – dies aufgrund mangelnder Durchmischung mit diesem globalen Depot bzw. wegen der Zumischung störender Depots (konventioneller »Reservoirereffekt«).

Wir rechnen hier zusätzlich die sich auch in »wiggles« konventioneller Kalibrierkurven äußernden kurzfristigen Schwankungen der C14-Konzentration –

im Gegensatz zur konventionellen Vorgehensweise – mit hinzu, welche sich äußern als:

- c) generell an allen Orten der Erde auftretende, in ihrer Systematik bislang unverstandene Schwankungen gegenüber einem global sich ständig neu mischenden Kohlenstoffdepot (siehe Bild b) in **1.6**).

Die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Punkt c werden wir vor allem im Kapitel 9 begründen. Wir wollen hier die Argumente nur insoweit aufzählen, als sie den üblichen Begriff »Reservoir effekt« direkt betreffen. Unter Reservoir versteht man ein abgegrenztes Volumen, dessen materieller Inhalt nur unter geregelten Umständen in die Umgebung übergeht, bzw. zusätzlich etwas von der Umgebung aufnimmt. Die C14-Wissenschaft verwendet gerade diesen Begriff, um den irregulären Charakter von »Verunreinigungen« lebender Organismen mit »abgestandenem« Kohlenstoff herauszustellen. Im Endeffekt wird aber lediglich der Vorgang der Diffusion von C12 über Systemgrenzen hinweg bezeichnet. Der »Reservoir effekt« muß also als ein »anomaler Diffusionseffekt« verstanden werden.

Es ist evident, daß Schwankungen der Rest- bzw. damit auch der ursprünglichen Startaktivität, wie sie in den Kalibrierkurven ausgewiesen sind, nur durch Diffusionseffekte erklärt werden können, die zur Veränderung der C14-Konzentration der Atmosphäre um den Faktor 2 bis 20 (und mehr) stärker als der radioaktive Zerfall beitragen. Nichts spricht dafür, daß dies global gleichförmig stattfindet, obwohl diese Schwankungen in den Kalibrierkurven definitiv nur auftauchen dürfen, wenn sie globalen Charakters sind.

Ein Blick auf die in Bild **8.1** dargestellte Bilanz der globalen Verteilung des Kohlenstoffs unterstreicht die Problematik des Ansatzes gleichmäßiger Mischung von radioaktivem Kohlenstoff C14 und normalem Kohlenstoff C12 (Bild **8.2** für eine schematische Darstellung des C14-Zyklus). Sedimente und sogenanntes Tiefenwasser als Reservoir grundsätzlich C14-verarmten Kohlenstoffs machen fast 90% des globalen Kohlenstoffvorrats aus, und das mit der Atmosphäre – wo das C14 entsteht – im Austausch stehende Oberflächenwasser der Ozeane schlägt – wie die Atmosphäre selbst auch – nur mit 2% Anteil zu Buche! An diesen Systemübergängen muß mit lokal unterschiedlichen Schwankungen größeren Ausmaßes gerechnet werden.

Im Rahmen dieses Kapitels müssen alle »anomalen Diffusionseffekte« diskutiert werden und dazu gehören dann auch die »wiggle« der konventionellen Kalibrierkurven. Damit ist ein Konflikt auf den Punkt gebracht, denn es ist ausschließlich der als global homogen angenommene Charakter der »wiggle«, der die Erstellung der Kalibrierkurven ermöglicht (und das Überle-

ben der C14-Methode gesichert) hat. Niemals würden diese in einer konventionellen Fehlerdiskussion auftauchen dürfen, obwohl sie über Jahrzehnte von zahlreichen Wissenschaftlern als unglaublich angeprangert und ihre Berücksichtigung bei der Fehlerangabe eingeklagt worden ist.

Wir werden deshalb den »Reservoireffekt« unterscheiden in örtlich rekonstruierbare, evtl. sogar korrigierbare Diffusionsvorgänge und in global auftretende, im einzelnen ohne Vergleich zu anderen absolutdatierten Proben aus derselben Region nicht-korrigierbare Diffusionsvorgänge. Uns ist klar, daß sich an diesem Vorgehen unsere Interpretation von der konventionellen Interpretation als unvereinbar scheidet. Der von uns betrachtete Punkt 8.2.3 »unrekonstruierbare Diffusionen« kommt in der konventionellen Betrachtung nicht vor.

### 8.2.1 Isotopenfraktionierung

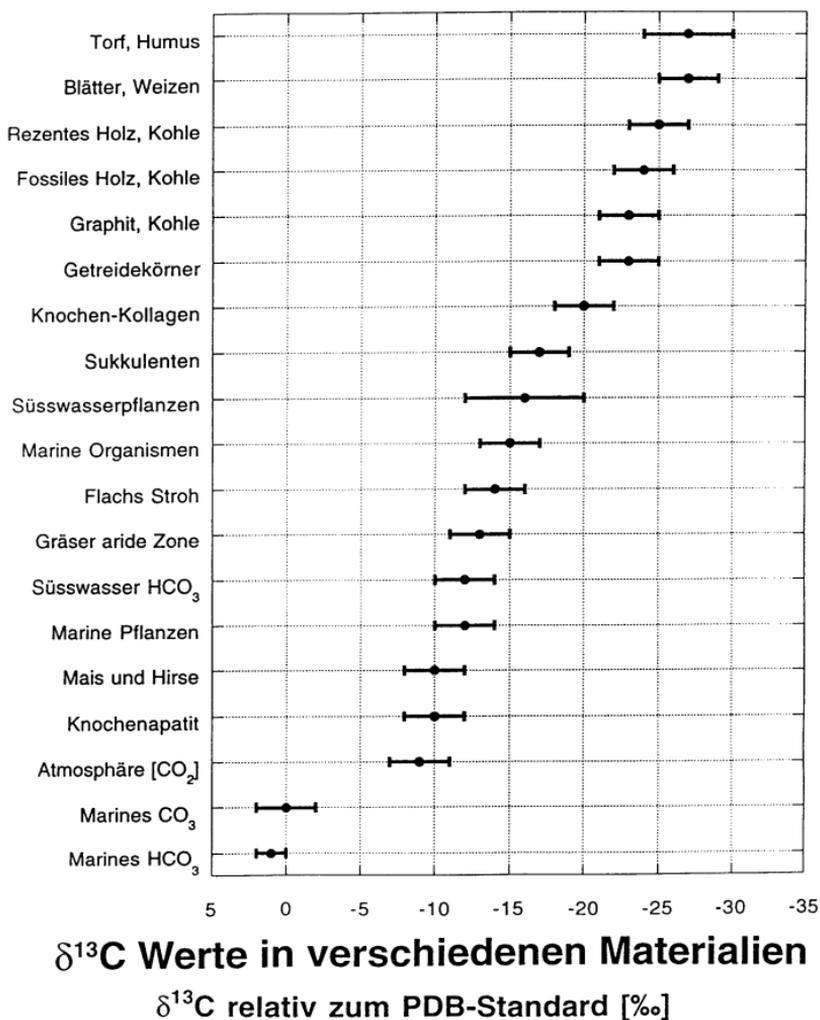
Systeme, die Kohlenstoff mit der Umgebung austauschen (gleichviel, ob biologische Organismen wie Bäume oder anorganische Gebilde wie Muschelgehäuse oder Stalagmiten bzw. Stalaktiten), tun sich unterschiedlich schwer bei der Assimilation der schwereren Kohlenstoffisotope C13 und C14. Die einen – vorwiegend die anorganischen Systeme – nehmen die Isotope in just dem Verhältnis auf, in dem sie auch in den »toten« Reservoir – Wasser und Luft vor allem – vorliegen, andere – und das sind die kohlenstoffverarbeitenden Organismen – bevorzugen in unterschiedlichem Maße die jeweils leichtere Variante, d.h. C12 gegenüber C13 und C13 wiederum gegenüber C14. Letztere spiegeln dann im Moment des Absterbens ein systematisch überhöhtes C14-Alter vor. Der absolute Unterschied macht immerhin bis zu 800 Jahre zwischen anorganischen Muschelgehäusen und organischem Fett an sich gleichen Alters aus (vergleiche Bild **8.3**).

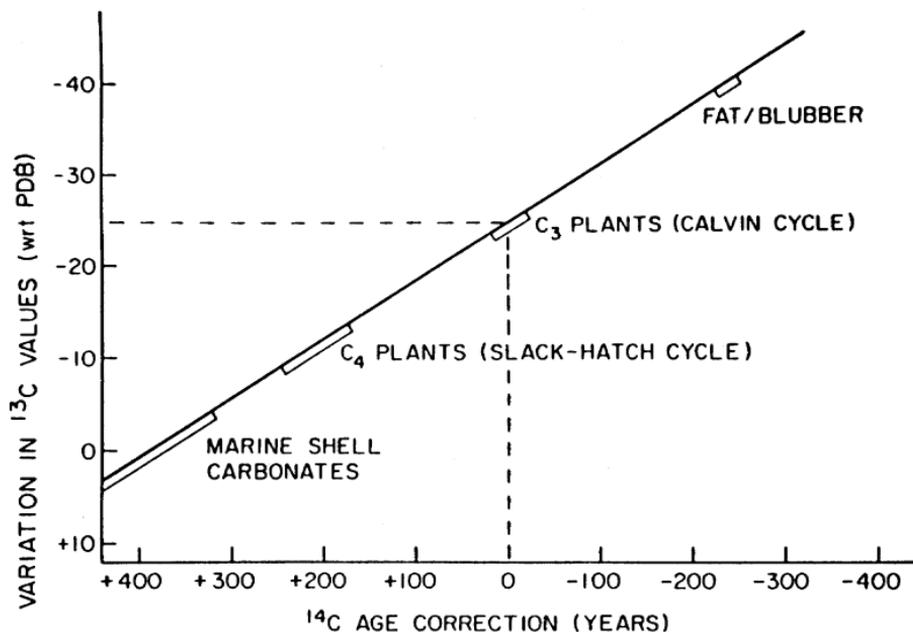
Die Tatsache, daß das Verhältnis der Kohlenstoffisotope untereinander, das ja der Altersbestimmung zugrundeliegt, auch von der Art und Weise abhängt, wie Organismen Kohlenstoff assimilieren, ist als Verletzung einer Fundamentalannahme der C14-Methode zu interpretieren. Diese besagt, daß das Verhältnis von C14 zu C12 in einem Organismus ausschließlich durch radioaktiven Zerfall verändert wird [Taylor 1987, 40].

Die damit notwendig gewordene Korrektur erfolgt über die meßtechnische Bestimmung der C13-Konzentration und »aufgrund theoretischer Überlegungen und bestimmter Analogien aus experimentellen Daten für andere Isotopenpaare« [Taylor 1987, 121]. Demzufolge reichere sich das C14 bei anomalem Stoffwechsel doppelt so stark an bzw. dünne sich doppelt so stark aus wie das

### 8.3 Die Auswirkung der Isotopenfraktionierung

Diese Seite gibt Aufschluß über die Unsicherheit, die bei der Korrektur des durch Isotopenfraktionierung »verfälschten« C14-Alters hinzunehmen ist. Die mittlere Schwankung der zu erwartenden Abweichung der C13-Konzentration von dem PDB-Standard beträgt im Mittel ca. 5 ‰. Das ergibt nach der Theorie die doppelte, also rund einprozentige Unsicherheit bei der Umrechnung der C13-Abweichung auf die C14-Abweichung. Mithin muß dem summarischen Fehler allein wegen der Tatsache der Isotopenfraktionierung mindestens  $\pm 40$  Jahre zugeschlagen werden.





Dem Bild auf dieser Seite [nach Taylor 1987, 122] kann entnommen werden, daß die Bandbreite der  $\text{C}14$ -Alter kontemporärer Proben bis zu 800 Jahre betragen kann. Dabei ist der PDB-Standard zwar an der Isotopenmischung orientiert, die an der Oberfläche der Ozeane herrscht, setzt aber die Nullkorrektur für jahringbildende Bäume fest, die nach dem sogenannten Calvin-Zyklus (s.u.) stoffwechseln und bereits zu 25 ‰ von der ozeanischen  $\text{C}13$ -Konzentration abweichen. M. Calvin erhielt 1961 – also ein Jahr nach W.F. Libby – den Nobelpreis für Chemie und zwar für die Beschreibung der Umwandlung von Kohlendioxid und Wasser in Sauerstoff und Kohlenwasserstoffe via Photosynthese. Er benutzte dazu insbesondere das  $\text{C}14$  als radioaktiven Tracer! (Zum Tracerverfahren vergleiche Kapitel 6.2)

Die Umrechnung der Verschiebung der  $\text{C}13$ -Konzentration in die der  $\text{C}14$ -Konzentration beruht auf einem Analogieschluß: Wenn das gegenüber dem  $\text{C}12$ -Atom um rund 8.3 ‰ schwerere  $\text{C}13$ -Atom von dem Organismus um »x« Promille seltener (oder häufiger) eingebaut wird, dann sei damit zu rechnen, daß das um rund 16.7 ‰ schwerere  $\text{C}14$ -Atom um »2 mal x« Promille seltener (oder häufiger) eingebaut wird. Es ist ungeklärt, ob sich das Fraktionierungsverhalten eines organischen Typus mit der Zeit verändert hat oder etwa von den Umweltbedingungen abhängig ist, was aber als wahrscheinlich angenommen werden kann. Der Teufel steckt im Detail und der Details gibt es viele.

## 8.4 Unsystematische Effekte im Zusammenhang mit der Isotopenfraktionierung

Die Tabelle führt die Werte aus der Umrechnung des sogenannten »unnormierten« in das konventionelle C14-Alter auf, indem der Effekt der Isotopenfraktionierung auf der Basis der gemessenen C13-Konzentrationsverschiebung berücksichtigt wird [Tabelle Taylor 1987, 130]. Die Abweichung des C13/C12-Verhältnisses, das an der Probe gemessen wurde, gegenüber dem Normalwert wird als Maß für eine proportionale, zugleich doppelt so hohe Verschiebung der C14-Konzentration genommen.

Die Tabelle weist im übrigen den Fehler, der durch diese Prozedur entsteht, nicht aus (vgl. die Diskussion des Fehlerbeitrages im Falle der Isotopenfraktionierung in Bild 8.3). Das ist durchaus symptomatisch für die Handhabung sogenannter Korrekturen, die stets einen Beitrag zum Gesamtfehler leisten und diesen in der Summe am Ende in buchstäblich ungeahnte Höhen treiben können.

Hier wird die eine Korrektur – die der Isotopenfraktionierung – benutzt, um die Höhe einer anderen nötigen Korrektur – die des Reservoireffektes – zu bestimmen. Letztlich wird aber nur der unsystematische Trend des Reservoireffektes bei Muscheln bestätigt, der oftmals dazu führt, Muscheln als Datierungsobjekt generell abzulehnen. Die Daten lassen es grundsätzlich offen, ob sich das Fraktionierungsverhalten der Organismen oder der Einfluß C14-armen Wassers geändert hat.

Labor- Nummer	Material	Unnorma- liertes $^{14}\text{C}$ Alter [Jahre BP]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰ wrt PDB]	Konven- tionelles $^{14}\text{C}$ Alter [Jahre BP]	Scheinbarer Reservoir- effekt [Jahre]
UCR-957	Holzkohle	2610 ± 150	- 23.6	2630 ± 150	./.
UCR-958	Muschel	2560 ± 150	- 3.5	2900 ± 150	- 270
UCR-960	Holzkohle	3060 ± 160	- 25.3	3060 ± 160	./.
UCR-961	Muschel	3110 ± 150	- 2.9	3460 ± 150	- 400
UCR-1552	Holzkohle	3340 ± 115	- 24.9	3340 ± 115	./.
UCR-1553	Muschel	2790 ± 130	- 1.0	3170 ± 130	+ 170
UCR-711B	Holzkohle	1320 ± 100	- 23.7	1340 ± 100	./.
UCR-711A	Muschel	1730 ± 120	+ 0.6	2140 ± 120	- 800

C13. So wird also der ursprünglich gemessene C14-Gehalt mit entsprechenden Auswirkungen auf das C14-Alter korrigiert. Dabei ist das mit 1% Anteil am Kohlenstoff vorkommende C13 quantitativ erheblich leichter zu bestimmen als das nur in Spuren vorkommende C14.

Schon Libby hatte diesen Effekt in seinem 1952 in erster Auflage erschienenen Buch »Radiocarbon Dating« diskutiert, wobei er im wesentlichen feststellte, daß C14 in anorganischem Kohlenstoff (etwa Muscheln) etwa 6 Prozent häufiger vorkommt als in organischem Kohlenstoff (etwa Holz) gleichen Alters [Libby 1952, 8]. Nicht auszudenken wäre es gewesen, wenn Libby für den Aufbau seiner »Curve of Knowns« (siehe dazu die Kapitel 6.4-6) anorganisch assimilierten Kohlenstoff herangezogen hätte, denn dann hätte er (heutige) Äpfel – organisch assimilierten Kohlenstoff als Basis für die Ermittlung der heutigen Startaktivität – und (altertümliche) Birnen – anorganisch assimilierter Kohlenstoff mit einer bis zu 800 Jahre Abweichung repräsentierenden Startaktivität – verglichen (und entsprechende Diskrepanzen wegerklären müssen).

Auf der anderen Seite traute er sich allerdings schon zu, derart weit auseinanderliegende C14-Aktivitäten als gleichzeitig anzunehmen. Für eine Sequoia gigantea faßte er für seine erste in SCIENCE veröffentlichte Datenliste drei derart weit auseinanderliegende C14-Alter – nämlich 3.045, 2.817 und 2.404 – zu einem Durchschnittswert von  $2.710 \pm 150$  C14-Jahren zusammen. Bei derselben Gelegenheit entschied er sich auch dafür, die Daten für ein (oder auch mehrere) dem Pharao Snofru zugeordnete Hölzer mit Daten zwischen  $4.186 \pm 500$  und  $5.548 \pm 500$  C14-Jahre als gleichzeitig zu behandeln.

Der klassische Baum gilt – im Widerspruch zu den tatsächlichen Verhältnissen – hinsichtlich des Fraktionierungsverhaltens als das »Normal«, und damit erscheinen Muscheln als 400 Jahre »zu jung«. Doch eigentlich sind es die Organismen, die aufgrund der »Antipathie« gegenüber den beiden schwereren Kohlenstoffisotopen bis zu 800 Jahre zu alt erscheinen, weil sie eben nicht die in den großen Kohlenstoffreservoirs herrschenden Isotopenverhältnisse widerspiegeln. Zu allen Voraussetzungen der C14-Methode kommt also noch die hinzu, daß die Fraktionierungsrate bezogen auf die Kohlenstoffisotope C13 und C14 in den organischen Kohlenstoffdepots – also in den Lebewesen – über die fraglichen Zeiträume konstant geblieben sein muß. Das ist eine Hypothese von deutlich anderem Charakter als die der Konstanz der Halbwertszeit, die auf atomarer und damit anorganischer Ebene greift und bislang jeder Kritik standgehalten hat (vergleiche aber R.D. Long [1973, 131]).

Die Konstanz der Fraktionierungsrate in den untersuchten Lebewesen aus verschiedenen Epochen ist a priori nicht selbstverständlich. In Bild **8.4** wird

eine Zusammenstellung der C14-Daten von Muscheln und Holzkohle gegeben, von denen jeweils angenommen wurde, daß sie zur selben Zeit gelebt haben (stratigraphische Vergesellschaftung). Nach Korrektur des Fraktionierungseffektes blieben immer noch Datierungsdifferenzen übrig, die um einen Betrag von bis zu 1.000 Jahren auseinander lagen. Es ist müßig, entscheiden zu wollen, ob das auf das Konto unterschiedlichen Einflusses von C14-armem Wasser geht (Reservoireffekt, vgl. nächsten Abschnitt 8.2.2) oder ob die Fraktionierung selber unterschiedlich ausfällt und demzufolge die Korrektur der C14-Fraktionierung über den bloßen Abgleich via Messung von C13 nur fehlerhaft erstellt werden kann.

Zu ähnlich erratischen Ergebnissen kamen Untersuchungen der Anomalien in den C14-Bestimmungen der Schneckengehäuse von lebenden Landschnecken aus halbtrockenen (»semi-ariden«) Biotopen. Selbst nach Berücksichtigung der Fraktionierung blieben Datierungsdifferenzen von rund 1.000 Jahren bestehen, die zusätzlich mit Einzelfehlern von bis zu über 1.000 Jahren behaftet waren [Goodfriend 1987].

Durch die Isotopenfraktionierung haben also insbesondere Bäume eine um 400 C14-Jahre reduzierte Startaktivität, d.h. der jüngste Ring eines gerade gefällten Baumes erscheint radiometrisch gegenüber dem Wasser einer gut durchmischten Meeresoberfläche (mit allen Einschränkungen) um rund 400 Jahre älter<sup>24</sup>. Ein zeitlich und vor allem klimatisch invariantes Fraktionierungsverhalten der Bäume ist eine entscheidende Voraussetzung für die Erstellbarkeit einer global gültigen Kalibrierkurve (vgl. den Hinweis auf die Temperaturabhängigkeit der Fraktionierung z.B. bei H.Y. Göksu et al. [1991, 23]).

Die Prozedur der Fraktionierungskorrektur findet eine recht schwammige Formulierung bei Taylor [1987, 40]: »Es gibt einen Konsens, wie unter Berücksichtigung bestimmter Standards und Regeln die unterschiedlichen  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in eine gebräuchliche Skala umgerechnet werden sollen«, oder auch bei Aitken [1990, 94]: »Die Korrektur hat zur Voraussetzung, daß der Fraktionierungseffekt von C14 doppelt so hoch ist wie der von C13«. Sie geht letztlich auf die Arbeiten von H. Craig [1953; 1954] zurück und scheint in den darauffolgenden Jahrzehnten wenig theoretische Aufmerksamkeit erfahren zu haben.

---

<sup>24</sup> Im Zusammenhang mit der Korrektur der Isotopenfraktionierung wird – genauso wie zeitweise im Hinblick auf die sogenannte Kalibrierung [Klein et al. 1982] – von sogenannten »Konsens-Daten« gesprochen [Burleigh et al. 1984]. Daraus entnehmen wir, daß sich die Wissenschaftler momentan unüberwindbarer Widersprüche in den Methoden bewußt sind, diese aber zugunsten dringend benötigter Ergebnisse nicht weiter thematisieren wollen.

Die Abschätzung des Fehlers aus einer nicht richtig korrigierten Fraktionierung ist schwierig. Aus der natürlichen Schwankungsbreite des Fraktionierungsverhaltens eines organischen Typus ergibt sich allein ein Fehler von rund  $\pm 40$  Jahren. Ein Fehler im theoretischen Modell für die Korrektur betraf die Altersbestimmung etwa von Holz solange nicht, wie auch die Kalibrierkurve auf Holz beruht – immer vorausgesetzt, daß das Fraktionierungsverhalten von Holz sich über die Zeit bzw. in Abhängigkeit von zeitveränderlichen Parametern wie der Temperatur usw. nicht verändert hat. Eine signifikante Fehlerquelle besteht gegebenenfalls in der Nichtzurückverfolgbarkeit der Laborprozedur, d.h. ob die Fraktionierung überhaupt berücksichtigt wurde oder nicht [dazu auch Taylor 1987, 128].

### 8.2.2 Reservoir Effekte I (örtlich rekonstruierbare und in Grenzen korrigierbare Diffusionsvorgänge)

Der Begriff »Reservoir effekt« bezeichnet für gewöhnlich die Auswirkung punktueller Zumischung von Kohlenstoff mit einem abweichenden C14-Gehalt in den Stoffwechsel von Organismen, die einer C14-Datierung unterzogen werden könnten. Als Depots mit »unzeitgemäßer« Kohlenstoffisotopenmischung sind u.a. bekannt:

- Vulkane
- Gewässer, die »altes« Karbonat gelöst haben
- Tiefseewasser
- die gesamte südliche Hemisphäre

Es sollte beachtet werden, daß sämtliche hier aufgezählten Depots eine Reduzierung der C14-Konzentration in Organismen bewirken, die mit diesem im Austausch stehen. Ein Depot mit überhöhtem C14-Gehalt ist unbekannt. (Bemerkung: Im Rahmen unserer Untersuchung können wir zurückliegende Phasen deutlich höherer C14-Konzentration nicht ausschließen, durch die es zu einer »Verjüngung« von Organismen kommen könnte.)

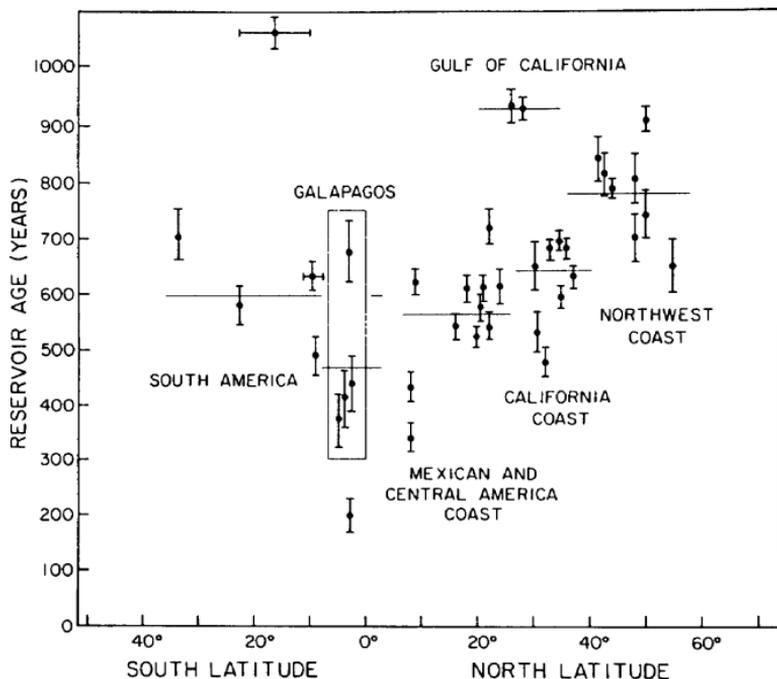
Das Ausmaß der Altersverfälschung ist unterschiedlich. Am geringsten und am homogensten fällt noch der Altersunterschied zwischen der südlichen und der nördlichen Halbkugel aus, er soll ca. 30 Jahre betragen, um die die südliche Halbkugel radiometrisch »älter« erscheine. Die zugehörige Unsicherheit ist nur schwer abzuschätzen.

Den ersten Hinweis auf den Einfluß undurchmischter, deswegen »alter« Depots bekam man durch die Datierung lebender Proben aus einem See, der ein Bett aus altem Kalziumkarbonat aufwies. Die Fehldatierung umfaßte in

### 8.5 C14-Alter von Muscheln im Küstenbereich

Der Einfluß C14-armen Wassers auf heutige Muscheln aus unterschiedlichen Küstenregionen ist nicht konstant. Er hängt von dem Zumischen des ozeanischen Tiefenwassers einerseits und von Süßwasserzuflüssen aus dem Binnenland andererseits ab. Da weder bei der Zumischung ozeanischen Tiefenwassers noch bei den ins Meer mündenden Flüssen mit stationären Verhältnissen gerechnet werden kann, ist die hier gegebene Momentaufnahme nicht in die Vergangenheit übertragbar. Das erklärt zum Teil auch die Unbeliebtheit von Muscheln zur C14-Datierung, da der Einfluß schlechterdings nicht systematisiert werden kann. Wasser mischt langsamer als die Atmosphäre. So können hier, an der unmittelbaren Schnittstelle zur Atmosphäre, Unterschiede in der C14-Konzentration von 10% und mehr über längere Zeit aufrechterhalten werden. Der Einfluß auf die Atmosphäre selber spiegelt sich in den »wiggles« wieder.

Der naturgemäß lokale Charakter ergibt sich aus der Kopplung an lokale Änderungen der Konzentration des C14 entsprechender ozeanischer Regionen. Dieser Zusammenhang wurde im Zuge des weltweiten Abgleichs von C14-Werten, die zur Erstellung der heute gebräuchlichen Kalibrierkurven als notwendig erachtet worden waren, völlig negiert und hat zur Vorgabe falscher Synchronismen in den einzelnen Baumringfolgen geführt. In Ermangelung anderer Datierungshilfen wurden die Vorgaben durch C14 schließlich nach jahrelanger Arbeit »verifiziert«.



diesem Fall bis zu 1.600 Jahre [Deevey et al. 1954]. Das mögliche Ausmaß der Streuung des C14-Alters von definitiv gleichaltrigen Organismen – hier Muscheln –, die mit einem »unzeitgemäßen« Kohlenstoffreservoir in Wechselwirkung stehen, ist aus dem Bild **8.5** zu ersehen (die globale Tendenz ist in Bild **8.6** zu ersehen). Die Tendenz zur Alterserhöhung rührt von dem Einfluß alten Tiefenwassers her, das durch entsprechende Winde hochgerollt wird. Auch der Zufluß harten Wassers kann das Alter von lebenden Muscheln um bis zu 1.000 Jahre verfälschen.

Altes Kohlendioxid CO<sub>2</sub> in vulkanischen Ausgasungen führt zu großen Überalterungseffekten. Eine Untersuchung mehrerer Orte auf Hawaii beziferte diesen mit 15 – 20.000 Jahren [Chatters et al. 1969]. Entsprechende Untersuchungen in der deutschen Eifel, auf der griechischen Insel Santorin und in der Nähe des Monte Amiata in Italien ergaben Altersverschiebungen von 1.400 bis 4.000 Jahren. Der Einfluß vulkanischer Aktivität auf den weltweiten C14-Gehalt der Atmosphäre wird dagegen als gering eingeschätzt [Taylor 1987, 132].

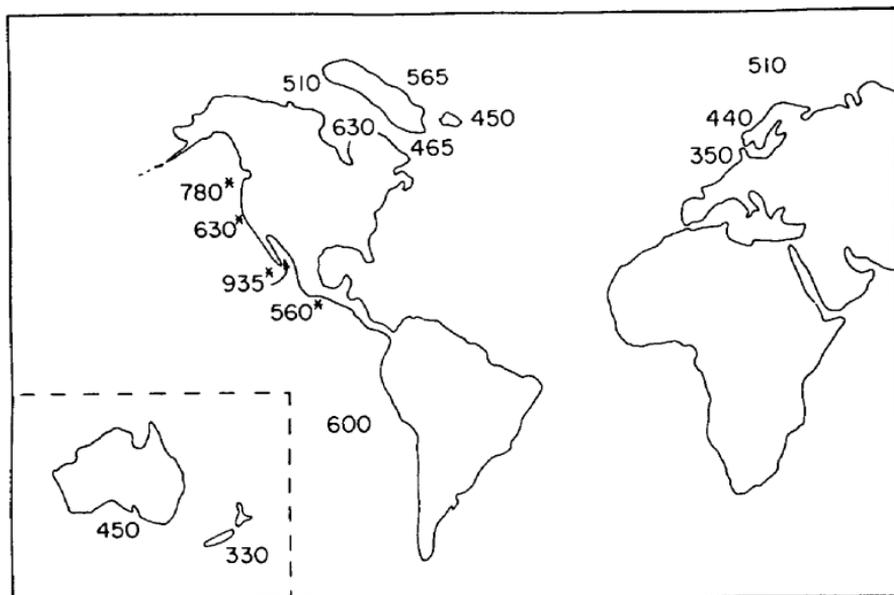
Dennoch kann dieser in Gegenden, die für starke vulkanische Aktivität in der Vergangenheit bekannt sind – Island z.B. – für die Absenkung der Konzentration des modernen C14 um mehrere Prozent verantwortlich sein [Olsson 1979b; 1983], was nach der schon so oft bemühten Faustformel – 1% entspricht rund 83 Jahre (vergleiche Textbox **7.7**) – zu mehreren Jahrhunderten Datierungsunsicherheit führen kann. (Im Zusammenhang mit der Diskussion möglicher Ursachen für retrograde C14-Daten müßte von einer Oszillation dieses Ausstoßes ausgegangen werden, um eine überhöhte C14-Produktion periodisch zu kompensieren und damit die charakteristischen »wiggles« zu erzeugen.)

### 8.2.3 Reservoireffekte II (örtliche und ohne Vergleich mit einer am selben Ort gewonnenen Kalibrierung nicht rekonstruierbare und deswegen unkorrigierbare Diffusionsvorgänge)

Die Überschrift dieses Teils beinhaltet zugleich eine Abgrenzung gegenüber dem konventionellen Verständnis von »Reservoireffekten« im Zusammenhang mit der C14-Methode. Diese betrachtet allenfalls global gleichförmige und damit eben normale Diffusionsvorgänge und erkennt deren Spiegelbild als »wiggles« in den Kalibrierkurven (vergleiche Bild **2.5**). Daß Diffusion in jedem Fall im Spiel sein muß, wird durch die ausgewiesene Größenordnung der C14-Schwankungen impliziert.

### 8.6 Reservoir-Alter von Muscheln (global)

Bei der Altersbestimmung von Muscheln müssen in Abhängigkeit vom Fundort besondere Korrekturen vorgenommen werden. Dadurch soll der »Reservoir-Effekt« durch Zumischung von C14-armen Wassers kompensiert werden. Die hier implizit gegebene Genauigkeit von 5 Jahren ist angesichts der tatsächlichen Streuung (vergleiche Bild 8.5) reine Augenwischerei. Die nötigen Korrekturen können aufgrund unterschiedlicher aquatischer Bedingungen bereits in begrenzten Bereichen stark schwanken. Es macht überhaupt keinen Sinn, mit einem Mittelwert für größere Regionen zu operieren (z.B. einem Wert für den südlichen Pazifik). Solch ein Verfahren würde nur wieder zu den ohnehin bekannten starken Streuungen der C14-Alter kontemporärer Proben führen.



Es wirken u.a. Exzeßproduktionen, die ein Vielfaches dessen erzeugen, was durch den radioaktiven Zerfall allein wieder »weggeschafft« werden kann. Für den Nachweis einer (angeblichen) Quasistationarität der C14-Konzentration in der Atmosphäre muß die entsprechend hohe und zugleich homogene Abwanderung von C14 aus der Atmosphäre angenommen werden. Da die Ozeane im allgemeinen Fall Layer mit unterschiedlichem C14-Gehalt an die Oberfläche bringen, ist ein global gleichförmiger Charakter der Diffusion, die der Exzeßproduktion »entgegenwirken« muß, auf keinen Fall gegeben.

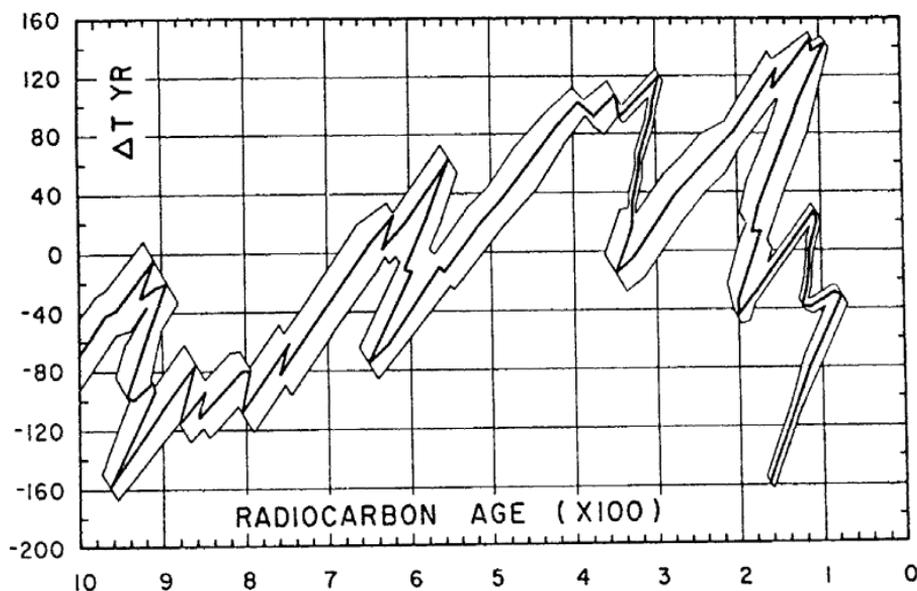
Die »wiggles« können in einem ersten (groben) Ansatz mit einer periodischen Modulation der lokalen Kalibrierung von  $\pm 100$  bis 200 Jahren bei einer Periode von rund 200 Jahren charakterisiert werden (vergleiche zur Größenordnung Bild 8.7). Daraus ergäbe sich ein nicht-systematisierbarer Fehler von  $\pm 100$  C14-Jahren im Minimum. Das Simultanitätsprinzip der konventionellen C14-Methode hat diesen generellen Fehler auch nur in die Mehrdeutigkeit eines gefundenen C14-Alters ummünzen können, die es dem Anwender überläßt, mit historischem Zusatzwissen das »richtige« und angeblich »sichere« Datum auszuwählen.

#### 8.2.4 Zusammenfassung

Mit den Stichworten »Isotopenfraktionierung« und »Reservoireffekte« (im Sinne rekonstruierbarer Diffusionsvorgänge) werden gewöhnlich Korrekturen, aber nicht eigentlich Fehler verbunden. Diese sogenannten Korrekturen machen einen Umfang von Jahrhunderten und in speziellen Fällen auch von Jahrtausenden aus. Wir haben gesehen, daß auch nach einer möglichen systematischen Korrektur der C14-Daten zufällig zu nennende Schwankungen übrig blieben. Allein das ist schon ein gewichtiger Hinweis, daß etwa die Kenntnis vom Diffusionsverhalten der drei wichtigsten Kohlenstoffisotope speziell im Rahmen des Stoffwechsels unvollkommen geblieben ist. Hinter den komplexen »Isotopenfraktionierung« und »Reservoireffekte« verbergen sich unbeherrschte Einflüsse, die letztlich zu einem Fehler in der Datierung führen müssen, der auch quantifiziert werden will. So gesehen sind wir mit dem zusätzlich aufgeführten dritten Komplex nichtrekonstruierbarer Diffusionsvorgänge in jedem Fall auf der richtigen Spur.

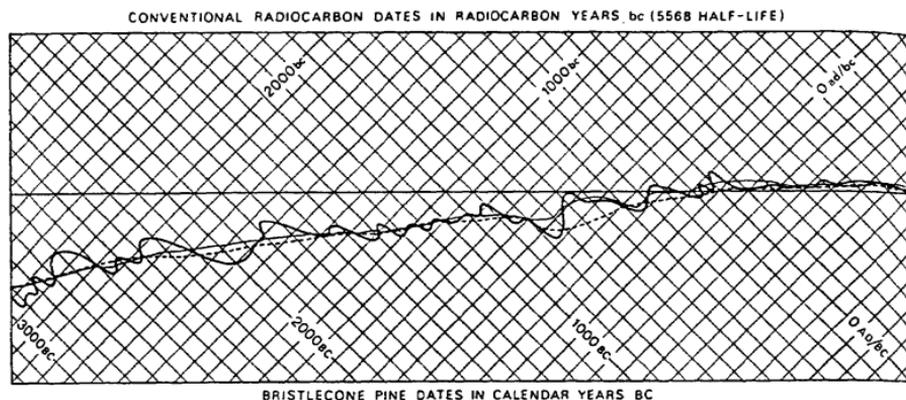
### 8.3 Die Probe erlagert sich eine zusätzliche Geschichte

Wir haben jetzt zu diskutieren, wieweit nach den sowohl systematischen wie auch zufälligen Abweichungen des zu Lebzeiten inkorporierten C14-Gehaltes



### 8.7 Bemessung der Reservoireffekte (II)

Das obere Bild [Stuiver 1982] soll die ungefähre Größenordnung der C14-Variationen wiedergegeben, wie sie in den Kalibrierkurven dokumentiert sind. Diese können grob mit 100-200 Jahren bei einer Periode von 200 Jahren veranschlagt werden. Das untere Bild ist einer Publikation von R.M. Clark [1975, 256] entnommen, der zeigte, daß aufgrund der starken Streuung der Meßwerte überhaupt keine »wiggles« angesetzt werden dürfen und vielmehr mit einer stetigen Ausgleichskurve gearbeitet werden müsse.



gegenüber einer als absolutes Maß betrachteten (gleichwohl fiktiven) Kalibrierquelle nun auch die bloße Lagerung nach dem Absterben zu einer derartigen Verschiebung der späteren C14-Datierung führen kann. Erneut werden wir die Frage stellen müssen, was an etwaigen Verschiebungen »korrigierbar« bleibt und was als weiterer Fehler hingenommen werden muß.

### 8.3.1 Kontamination

Der gebildete Laie kennt »Kontamination« als die mit Abstand effektivste Ursache für einen Datierungsfehler. Die Probe ist mit Stoffen behaftet bzw. durchdrungen, die einen deutlich anderen C14-Gehalt als die interessierende Probe ursprünglich selber aufweisen. Kontamination grenzt sich gegen den Reservoireffekt dadurch ab, daß eine Beimischung von Fremdstoffen grundsätzlich als reversibel angenommen und folglich durch physikalisches Abtrennen von sichtbaren Substanzen sowie durch Waschen bzw. Auswaschen mit diversen Säuren, Basen und anderen Lösungsmitteln teils organischer, teils anorganischer Natur bekämpft wird. Da heutzutage jede Probe routinemäßig einer entsprechenden Prozedur unterworfen wird, ist automatisch auch jedesmal ein Fehler aus der Korrektur mitinbegriffen, der natürlich zum Gesamtfehler beiträgt.

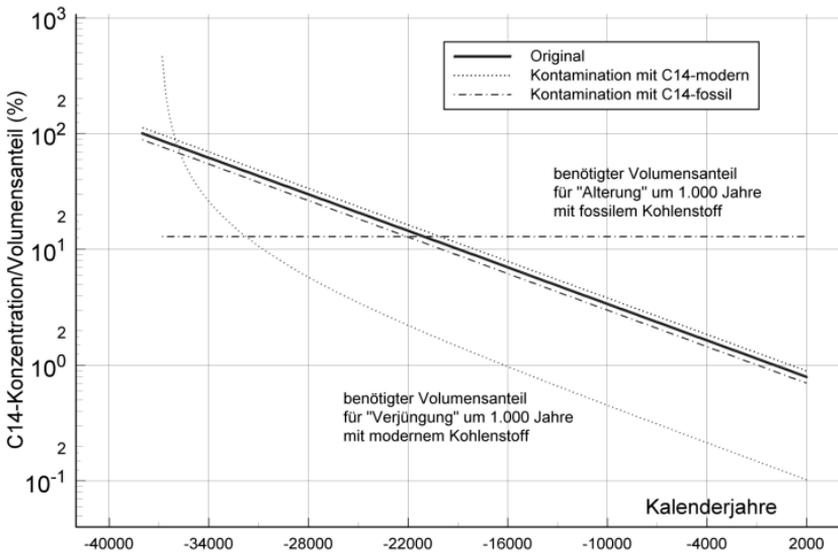
Kontamination wird ebenfalls als »anomaler Vorgang« betrachtet. Dabei begründet der Umstand, daß alle Proben chemisch gewaschen werden, tatsächlich das Gegenteil als Norm: Normalerweise ist nämlich jede Probe in mehr oder weniger hohem Umfang kontaminiert. Auch hier hat das Wunschdenken der Begründer der Methode zur Begriffsverwirrung geführt. Die Bedeutung einer möglichen Kontamination hängt jedoch sehr stark von dem tatsächlichen C14-Gehalt der Probe ab und davon, ob die Kontamination mit »fossilem« oder mit »modernem« Kohlenstoff geschieht. Für die Kontamination mit fossilem Kohlenstoff (definitiv ohne C14) gilt eine Faustformel ähnlich der, die die Auswirkung eines Zählfehlers in Jahre ummünzt: Jedes anteilige Prozent fossilen Kohlenstoffes macht die Probe – unabhängig von ihrem tatsächlichen C14-Gehalt – um 83 Jahre älter.

Der umgekehrte Effekt, die Verjüngung durch Kontamination mit modernem (bzw. rezentem) Kohlenstoff, verläuft dagegen nichtlinear. Während sich bei Proben mit hohem C14-Gehalt ein geringer Effekt ergibt, nimmt dieser »Verjüngungseffekt« mit abnehmendem C14-Gehalt der Probe überproportional zu. Bei einem C14-Gehalt, der einem C14-Alter von 5.730 Jahren (das ist gerade die Halbwertszeit von C14) entspricht, sind Verjüngungs- und Alterungseffekt jeweils gerade gleich groß, darüberhinaus steigt der Verjüngungs-

## 8.8 Die Auswirkung einer Kontamination

Man muß zwischen einer Kontamination mit »fossilem« und mit »modernem« Kohlenstoff unterscheiden. Fossiler Kohlenstoff – ohne C14-Anteil – »altert« eine Probe und tritt in Verbindung mit vulkanischen Gasen, mit Kohlenwasserstoffen wie Erdöl etc. und mit karbonathaltigem Tiefenwasser auf. Moderner Kohlenstoff »verjüngt« eine Probe und liegt in allen Reservoiren vor, die mit der Atmosphäre im Austausch stehen. Je länger das Stoffwechselnde der Probe bereits zurückliegt und je geringer demnach der C14-Anteil des Kohlenstoffs ist, desto stärker wirkt sich eine Beimischung modernen Kohlenstoffs aus. Die Auswirkung fossilen Kohlenstoffs ist dagegen unabhängig von der Lagerzeit der Probe.

Das Bild zeigt die radioaktive Zerfallskurve einer 40.000 C14-Jahre alten Probe zusammen mit zwei weiteren Zerfallskurven, die die Probe einmal 1.000 Jahre älter und einmal 1.000 Jahre jünger erscheinen lassen und hier jeweils auf Kontamination zurückzuführen sein sollen. Während zu jeder Zeit rund 12% Volumensanteil fossilen Kohlenstoffs ausreichen, um die tausendjährige Alterung zu bewirken, nimmt die für die Verjüngung benötigte Menge modernen Kohlenstoffs mit der Lagerzeit dramatisch ab.



effekt rasant an (vergleiche Bild **8.8**). R.E. Taylor [1987, 120] gibt ein Beispiel [Delibrias et al. 1974, 20], in dem die Differenz zwischen gemessenem C14-Alter (5.000 Jahre) und erwartetem C14-Alter (3.600 Jahre) einer Probe ausschließlich auf Kontamination zurückgeführt worden war. Eine entsprechend alte Probe müßte allerdings mit mehr als 20% fossilem Kohlenstoff kontaminiert worden sein, um so auf ein fiktives Alter von 5.000 Jahren gebracht zu werden. Ein effektiver Weg, eine mögliche Kontamination nachzuweisen, besteht im Ausmessen mehrerer Bereiche der fraglichen Probe, sofern die Größe und die Art der Probe dies erlaubt. In diesem Sinne sind z.B. Knochen besonders »kontaminiert«.

Die Probenvorbehandlung werde, so R.E. Taylor, von der Mehrheit der C14-Labore für gewöhnlich sehr effektiv durchgeführt, doch es sei oftmals unmöglich, alle nichtzugehörigen organischen Bestandteile von bzw. aus der Probe zu entfernen. Die trotz Vorbehandlung verbliebene Kontamination reiche jedoch gerade bei Proben aus dem Postglazial in den allermeisten Fällen nicht aus, das Probenalter deutlich stärker als die statistische Varianz aus der eigentlichen Messung entsprechend zu verändern [Taylor 1987, 120]. Als vorsichtiger Archäometer sollte man demzufolge zur Berücksichtigung einer verbliebenen Kontamination den Fehler aus der reinen Aktivitätsmessung wenigstens verdoppeln, denn, wie M.A. Geyh [1991, 137] es formuliert: »Wenn ... eine Probe einmal kontaminiert war, muß immer damit gerechnet werden, daß gewisse Fehler auftreten«.

Offenbar verbleiben grundsätzlich Kontaminationen im Prozentbereich, die nicht ausgewaschen werden können. Es dürfte in der Regel ausgeschlossen sein, die tatsächliche Höhe und den Zeitpunkt der ursprünglichen Kontamination sowie das Maß der erreichten Dekontamination exakt anzugeben. Die von Taylor angegebene Faustformel, den Zählfehler zur Berücksichtigung verbliebener Kontaminationen zu verdoppeln, ist eine eher hilflose Geste, denn während der Zählfehler mit der Verlängerung der Meßzeit automatisch sinkt, bleibt der Fehler aus der Kontamination davon unberührt.

Die Summe aller verbliebenen Unsicherheiten gerät so hoch, daß es mißverständlich wird, einzelne Beiträge von ungefähr her zu quantifizieren und als Korrektur auszugeben. Nicht-Wissen über die zahlreichen Einflußgrößen macht das erzielte C14-Datum wertlos. Das Ignorieren dieses Umstandes ermöglicht es willigen Chronologen, mit selektiven Konzessionen an den einen oder anderen Fehler das Datum in die Richtung zu trimmen, in die man es haben will.

### 8.3.2 Wanderung des C14 entsprechend einem C14-Gradienten in der Probe

Das Phänomen der Wanderung von C14 aufgrund eines Konzentrationsungleichgewichtes sollte für die meisten organischen Proben keine Bedeutung haben. Anders sieht es allerdings bei Holz aus, das Jahrringe ausbildet, welche später als unter Umständen jahrhundertelange Abfolge jährlicher »Fingerabdrücke« der C14-Aktivität des atmosphärischen Kohlendioxids untersucht werden sollen.

Aus dem zu untersuchenden Holz muß auf chemischem Wege die Zellulose freigewaschen und nur diese untersucht werden, da das organische Zwischenmaterial – Harze und andere Kohlenwasserstoffe – regulär durch das Zelloskelett diffundiert und demnach einen ganz anderen und unsystematischeren Aktivitätsgradienten über den Radius aufweist. C14-Untersuchungen von Hölzern werden wegen des komplexen Sachverhaltes und der Vielzahl möglicher Fehler bei der Behandlung und Messung von Spezialisten durchgeführt.

Damit Holz überhaupt als Kalibriermaßstab in Frage kommt, müssen zwei Bedingungen notwendig erfüllt sein:

- Jeder Jahrring darf ausschließlich während des begrenzten Zeitraumes von einem Jahr atmosphärisches Kohlendioxid via Photosynthese in den später extrahierbaren Bereich – nämlich die Zellulose – einarbeiten, und
- dieser Bereich darf weder zu weiteren Lebzeiten des Baumes noch während dessen anschließender Lagerzeit kohlenstoffhaltige Materie u.a. mit den umgebenden Ringen austauschen.

In Anbetracht der fundamentalen Bedeutung dieser Voraussetzungen für die Verwendbarkeit von Holz als Kalibriermaßstab muß der erstaunlich widersprüchliche Stand der Diskussion über mögliche Wanderungsbewegungen des später zu datierenden Materials doch verwundern (vergleiche auch Abschnitt 8.6). R. Berger veröffentlichte 1970 eine Studie, wonach die Wanderungsbewegung von C14 zum Erliegen komme, sowie sich die betreffenden Jahrringe zu Kernholz umgewandelt hätten [Berger 1970c; 1973]. B. Becker wies allerdings darauf hin, daß bei der sogenannten Verkernung des Holzes nachträglich aus den noch lebenden Zuwachsschichten organische Verbindungen in das bereits tote Stamminnere eingelagert werden könne [1970, 22]. Entsprechend stellten A. Long et al. fest, daß Kohlenstoff über 100 Jahrringe hinweg vom Splintholz- in den Kernholzbereich diffundieren könne [Long et al. 1979]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam I.U. Olsson mit der Feststellung, daß aus

Kernwaffenversuchen stammendes Exzeß-C14 auch in chemischen Auszügen des Hartholzbereiches<sup>25</sup> jüngerer Bäume zu finden seien [Olsson 1980].

Den kritischen Beobachter muß beunruhigen, daß die Präparierung von Holz als Ausgangsmaterial der Baumringchronologien, ohne die die C14-Methode schon vor Jahrzehnten am Ende gewesen wäre, erneut ein Fall ausschließlich für Spezialisten sein soll. Ebenfalls nur einigen Spezialisten war es zusätzlich vorbehalten gewesen, diejenigen Bäume für unbrauchbar zu erklären, deren meßbarer C14-Gradient längs ihrer Jahrringe für eine keineswegs gleichbleibende, sondern vielmehr systematisch wachsende C14-Konzentration in der Atmosphäre sprach. Anstatt die Bäume mit flacheren, für Stationarität der C14-Konzentration stehenden Gradienten kritisch auf Diffusion zu überprüfen, wurde jenen Baumarten eine mehr oder weniger hohe Neigung zur Ausbildung von Fehlringen unterstellt (vergleiche Bild **2.4**). Damit war das Credo des Aktualismus ein weiteres Mal gerettet worden.

### 8.3.3 In-situ Produktion von C14

Die Aufführung dieses Abschnittes ist der Historie geschuldet, denn Indizien für eine C14-Produktion innerhalb lagernder »Proben« sind schwach. Erste systematische Kreuz-Datierungen zwischen schwimmenden Baumringsequenzen aus Europa und der Bristlecone-Pine-Chronologie aus Amerika erbrachten unter anderem systematische Differenzen in den C14-Altern (siehe das Bild **5.7**). Die C14-Muster mochten zwar ähnlich sein, doch die derart quer über den Atlantik via »wigggle-matching« synchronisierten Ringe waren radiometrisch gesehen unterschiedlich alt. H.E. Suess [Suess/Strahm 1970, 95] bezifferte diesen Unterschied für Hölzer aus neolithischen Siedlungen bei Auvornier (Schweiz) mit 50 Jahren und stellte die Möglichkeit zur Debatte, daß die relativ hoch stehenden Bristlecone Pines einem höheren Strom an kosmischen Neutronen ausgesetzt seien, der ständig zur Produktion von C14 innerhalb der Bäume führe. Angesichts des bekannten Trends in der Kalibrierkurve, bei dem die in der Chronologie nachgeordneten Ringe immer stärker zu jung gemessen werden (d.h. »zu viel« C14 enthalten), schien das ein Gedanke zu sein, der einer näheren Untersuchung wert war. Es wurden Versuche unternommen, den ins Auge gefaßten Vorgang zu simulieren, indem Holz einem starken Neutronenfluß ausgesetzt wurde. Aber man konnte keine Erhöhung des C14-Gehaltes nachweisen [Libby/Lukens 1973].

<sup>25</sup> Der Splintholzbereich umfaßt im Mittel bei jungen bis alten Bäumen 10 bis 20 Jahrringe und ist gegenüber dem Hart- bzw. Kernholzbereich noch nicht in sich verfestigt.

Wir möchten darauf hinweisen, daß grundsätzlich niemand zwischen Diffusion und Produktion innerhalb eines Volumens unterscheiden kann, solange er nicht die Konzentrationsänderungen in der Umgebung oder aber den Teilchenstrom über die Volumenoberfläche mitbilanziert. Die Tatsache, daß das Thema »In-situ-Produktion« immer wieder aufgegriffen wird, mag als Hinweis auf den Erklärungsbedarf von Konzentrationsschwankungen dienen. Abschließend sei noch bemerkt, daß In-situ-Produktion sich als kumulativer Prozeß auf die Isotopenverteilung auswirke und deshalb auch bei kleinsten Produktionsraten über entsprechend lange Zeit zu einer kumulativen Wirkung kommen könne. Ohne Bewertung der bereits durchgeführten Untersuchungen stellen wir fest, daß rein theoretisch die steiler abfallenden Bereiche der »wiggles« auch durch In-situ-Produktion statt durch Diffusion aus globaler »Überproduktion« entstehen können. Für den entsprechenden Vorgang der In-situ-Vernichtung (Kernumwandlung) von C14 als Erklärung der retrograden C14-Daten haben wir allerdings zu keiner Zeit Hinweise gefunden.

#### 8.3.4 Zusammenfassung

Die hier betrachtete Phase der Lagerzeit, in der sich der C14-Gehalt einer Probe einstellt, ist von allen hier betrachteten 5 Phasen theoretisch am besten zu definieren: Während dieser Phase soll die einzige Änderung ihrer C14-Konzentration durch den radioaktiven Zerfall verursacht werden. Umgekehrt gilt auch, daß dies die einzige Phase ist, in der der radioaktive Zerfall überhaupt eine grundsätzliche Rolle spielt. Alle anderen Phasen sind entweder so kurz, daß dieser nicht berücksichtigt zu werden braucht, oder er ist – wie zu Lebzeiten – nur ein Effekt neben anderen.

Selbst im »Normalfall« ist von einem Fehler aus einer verbleibenden unkorrigierbaren Kontamination mit Kohlenstoff anderer Isotopenzusammensetzung auszugehen, der mindestens in der Größenordnung eines durchschnittlichen Zählfehlers selber anzusetzen ist. Je kürzer dabei eine mögliche Kontamination mit rezemem, also jetzt-zeitlichem Kohlenstoff zurückliegt, desto drastischer wirken sich die Altersverfälschungen aus.

#### 8.4 Die Probe wird ausgewählt, aufbereitet und verschickt

Die schlußendliche Genauigkeit einer C14-Datierung wird davon abhängig gemacht, wie zuverlässig die geophysikalischen Angaben für die fragliche Probe sind und wie genau demnach die systematischen Korrekturen an dem gemessenen C14-Alter vorgenommen werden können. Deshalb verdient die

Auswahl einer Probe besondere Beachtung. Dabei sehen sich Archäologen oftmals gar nicht in der Lage, genügend Material von einer Fundstelle zusammenzustellen [Ottaway 1986, 732].

Als kritisch gelten vor allem die Komplexe »Fraktionierung zu Lebzeiten«, »Reservoireffekte« sowie »Kontamination« während der Lagerung, die eine teils systematische, teils aber auch unkorrigierbare »Verunreinigung« des Isotopengemisches bewirken. Es gibt einige Grundregeln für die Auswahl der Probenart, insbesondere für die Vermeidung von Proben aus bestimmten Fundsituationen und für die Art ihrer Kennzeichnung und Präparierung vor Ort und für die Zeit der Verschickung. Ihre Befolgung soll wesentlich dazu beitragen, anomale Untersuchungsergebnisse zu vermeiden.

#### 8.4.1 Probenauswahl

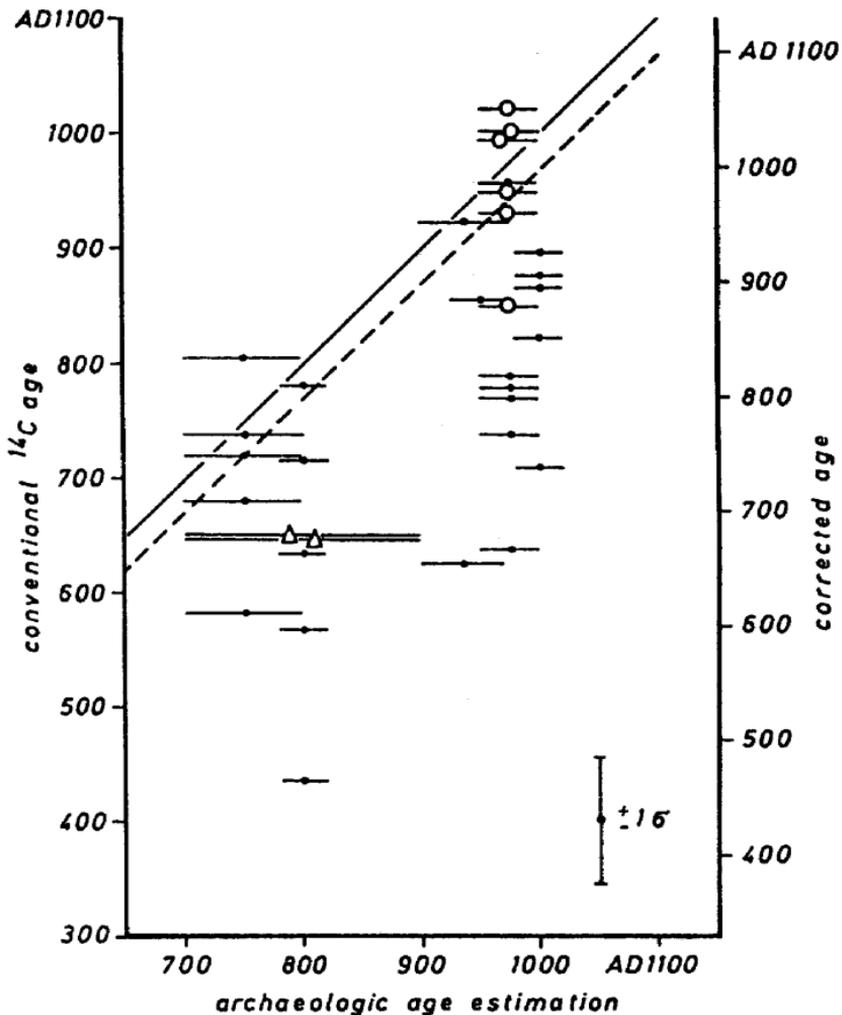
Der Ausgräber muß wissen, welches Material als geeignet für die Prozedur der C14-Datierung angesehen wird und welches nicht. Nach wie vor gelten Holz sowie Holzkohle als die aussichtsreichsten Kandidaten für eine zuverlässige Altersbestimmung. Aber auch hier sind Einschränkungen zu machen. Gerade die Messung von Holzkohle kann überalterte Ergebnisse bringen, wenn diese aus Bestandteilen in mm-Größe zusammengesetzt war. Altersunterschiede bis zu 1.000 Jahren haben sich aus Messungen mit unterschiedlich großen Holzkohlepartikeln ergeben [Blong/Gillespie 1978].

Noch dramatischer werden diese Fehldatierungen, wenn die entsprechend kleinen Partikel aus feuchten Schichten entnommen werden, dann können sie über 20.000 Jahre betragen [Evin et al. 1983, 77]. Natürlich muß stets auch die Frage gestellt werden, ob die fraglichen Proben tatsächlich alle aus derselben Zeit stammen können und ob dieser Zeitpunkt mit der Gebrauchszeit ausreichend genau übereinstimmt.

Genau das kann gerade bei dem so wichtigen Holz ein Problem sein. Dessen Fälldatum ist in der Regel unbekannt und kann weit nach dem Zeitraum liegen, der der Herausbildung der von der Holzprobe repräsentierten Jahrringe entspricht. Wesentliche Eigenschaft des Holzes von Bäumen ist es, in einem jährlichen Rhythmus akkumulativ zu wachsen (anders als etwa bei Palmen, die nicht in Ringen wachsen). Auf diese Weise repräsentieren hölzerne Artefakte viele Jahrzehnte und weisen zusätzlich einen Versatz ihrer C14-Akkumulationszeit gegenüber dem Zeitpunkt ihres Einsatzes auf, der bei langlebigen oder mehrfach eingesetzten Hölzern etliche Jahrhunderte betragen kann. Die Unsicherheit aus diesem Drift (der »presample-growth-error« [Ralph

### 8.9 C14-Daten im Zusammenhang mit einem gut erschlossenen Fundort (I)

C14-Datierungen von Holzkohle ( $\Delta$  und  $\bullet$ ) und Getreide ( $\circ$ ) eines Fundortes in der Nähe von Oldenburg (Niedersachsen) werden mit den archäologischen Zeitansätzen verglichen [Willkomm 1980, 289]. Der erwartete theoretische Zusammenhang ist durch die beiden Geraden (konventionelles bzw. kalibriertes Alter) gegeben, der durchschnittliche C14-Fehler durch den Balken rechts unten. Das Problem der allgemeinen Streuung der C14-Daten konnte in diesem Fall nicht durch ein mögliches Mißverständnis in der Identifizierung des Stratums erklärt werden.



1971]) ist in der Regel nur abzuschätzen und macht Hölzer zu eher problematischen Kandidaten für genaue Datierungen bzw. ihre Interpretation.

Diese Art von Unsicherheit tritt bei der Zuordnung kurzlebiger Proben natürlich nicht auf. Der Nachteil ist hier allerdings, daß kurzlebige Proben viel stärker mit saisonalen Schwankungen behaftet sind als ein Holz, das von der Art seiner Akkumulation her zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen beiträgt. Zu der Unsicherheit bei der Datierung kurzlebiger Proben unterschiedlichster Herkunft trägt auch bei, daß der Prozeß der Isotopenfraktionierung aufgrund der Vielfältigkeit der Probenarten naturgemäß nicht gut untersucht sein kann und folglich mit höherer Unsicherheit behaftet ist als der für die »Standardproben«.

Die Problematik von Muscheln als Datierungsobjekt wurde schon an anderer Stelle erörtert (Kapitel 8.2.1 und 8.2.2). Der größte Teil ihres Kohlenstoffes ist als anorganische Substanz gebunden, die die Isotopenverhältnisse des Meereswassers widerspiegeln, in dem die Muschel gelebt hat. Im Vergleich zu gleichaltrigen und mit ihr vergesellschafteten Organismen, deren Stoffwechsel Isotopenfraktionierung miteinbezieht, resultieren Altersunterschiede von bis zu 800 Jahren [Johnson 1955, 150; Kulp et al. 1952, 409]. Dabei sind es die Bereiche mit organisch gebundenem Kohlenstoff, die dann als »zu alt« zu bezeichnen sind, da sie im Gegensatz zu den Muschelgehäusen tendenziell weniger C14 inkorporieren, als ihnen von der Umgebung angeboten wird.

Natürlich wird diese Tendenz umgekehrt, wenn die Muscheln in einem Reservoir angesiedelt waren, das durch »altes« Tiefseewasser kontaminiert wurde. Ursprünglich galt die Faustregel, daß sich Reservoireffekt und (gegenüber den als Norm geltenden Bäumen) »fehlende« Isotopenfraktionierung kompensieren, doch das konnte bei genauerer Analyse nicht aufrechterhalten werden.

Auch der Kontakt mit Kalkstein kann zu erheblichen Datierungsunsicherheiten führen. Muscheln aus einem kalksteinhaltigen Stratum, das auf ein Alter von 2.000 Jahren geschätzt werden konnte, wurden zwischen ca. 5.000 und 14.000 Jahren datiert [Deevey et al. 1959, 156]. Wenn während der Lagerzeit die Oberfläche der Muschel angelöst wird und infolge erneuter Verfestigung andere kohlenstoffhaltige Verbindungen eingelagert werden (»Rekristallisation«), dann resultieren in der Regel ebenfalls starke Datierungsverschiebungen, die kaum zu systematisieren sind [Grant-Taylor 1972; Vita-Finzi 1980, 766f.; Goslar/Pazdur 1985; nach Taylor 1987, 50].

Ähnliche Probleme wie mit Muscheln gibt es für die anorganischen Anteile tierischer und menschlicher Knochen. Es zeigte sich schon sehr früh, daß oftmals völlig anomale Isotopenverhältnisse vorlagen, die auf den Austausch

mit dem Grundwasser an der Fundstelle zurückgeführt wurden [Taylor 1987, 54f.]. Abweichungen von über 10.000 C14-Jahren sind keine Seltenheit [Irving/Harrington 1973; Nelson et al. 1986]. Die zufälligen Abweichungen zwischen den einzelnen organischen Bestandteilen scheinen zwar geringer auszufallen, doch können diese immer noch etliche Jahrhunderte und in einigen Fällen sogar mehrere Jahrtausende betragen [Taylor 1987, 61].

Jeder Objekttypus erfährt grundsätzlich seine eigene, sich im Laufe der Zeit herausbildende und verfestigende Korrekturprozedur im Hinblick auf die Fundstätte, die Art der Lagerung und die Probenentnahme. R.E. Taylor spricht im Zusammenhang mit der Untersuchung von anderen Probenarten – also keine Hölzer, Muscheln oder Knochen – auch nur noch von »C14-Schätzungen«. Im Zusammenhang mit Humus sowie Tuffgestein und anderen mineralischen Ablagerungen wie z.B. Chilesalpeter spricht er von »extrem schwankender« Radioaktivität und stellt die Nützlichkeit für archäologische Untersuchungen grundsätzlich in Frage [Taylor 1987, 62]. Ähnliches gilt auch z.B. für organische Überreste in oder an Keramiken. Insbesondere die Datierung von Überresten in Mörsern hat zu Diskrepanzen zwischen 2.000 und 4.000 Jahren geführt [Stuiver/Smith 1965; Baxter/Walton 1970].

#### 8.4.2 Identifizierung des Stratums, aus dem die Probe stammt

Nach R.E. Taylor's Ansicht [1987, 108] rührt die Mehrzahl der wirklich ernsthaften Datierungsanomalien (»seriously anomalous  $^{14}\text{C}$  values«) aus Mißverständnissen oder Irrtümern bei der Identifizierung und Beschreibung der Probenumgebung bzw. -herkunft (dazu auch die Bilder **8.9** und **8.10**). Datiert werde, so die berechtigte Warnung, die Probe und nicht die Schicht, mit der sie in Verbindung stand bzw. womöglich irrtümlich in Verbindung gebracht wurde. Wir befassen uns hier allerdings nur mit den Anomalien der Datierung selber, weil wir die Unsicherheit des normalen Falls beziffern wollen. Nicht nachzuvollziehen ist dabei die Bedeutung bzw. das Ausmaß »ernstlich anomaler« Werte gegenüber »normal anomalen Werten«, die dann offenbar ohne weiteren Kommentar hingenommen werden.

In bestimmten Fällen wird die Inversion des C14-Alters mit zunehmender Tiefe festgestellt, ohne aber die Integrität der Grabung in Frage stellen zu können [etwa Ashmore/Hill 1983; Heske 1994, 95]. Die Verwunderung über dieses Phänomen könnte angesichts der Tatsache, daß Dendrochronologen und C14-Wissenschaftler dieses Verhalten innerhalb der Kalibrierkurven für durchaus normal und charakteristisch halten, zur Ruhe kommen.

So stünde eigentlich auch für die Archäologen ein probates Mittel zur Verfügung, ihre C14-datierten Schichten zeitlich präzise an den Kalibrierkurven zu orientieren – wenn nicht aufgrund häufiger Diskrepanzen zwischen den relativen C14-Datierungen einerseits und archäologischen Datierungen andererseits die C14-Daten ohnehin mit spitzen Fingern angefaßt werden müßten. Zu häufig haben Archäologen Anlaß, die Integrität von C14-Daten in Frage zu stellen, als daß sie »normal anomale C14 Werte« vorbehaltlos als Anlaß zur Kritik eigener Vorgehensweise nehmen müßten.

#### 8.4.3 Probenaufbereitung

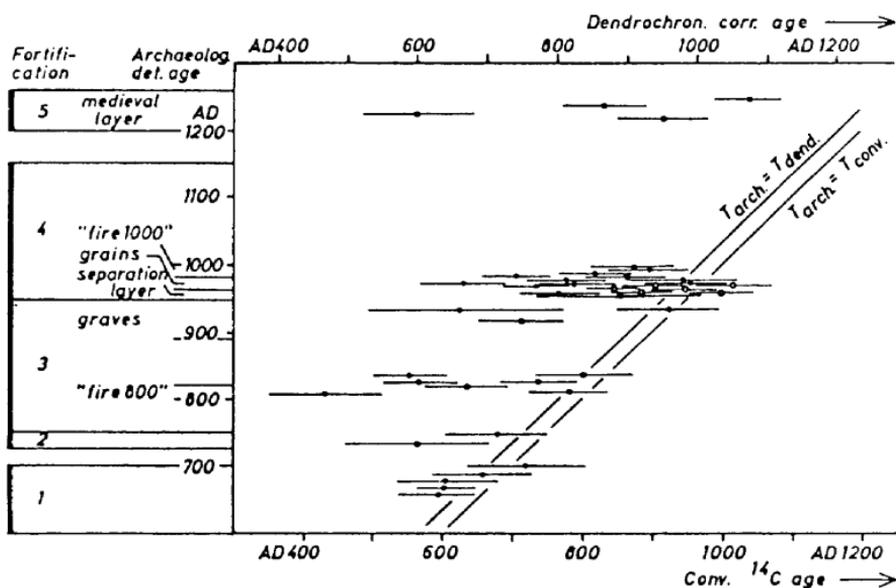
Eine zu datierende Probe muß von allen anhaftenden Dingen (insbesondere natürlich solchen, die Kohlenstoff enthalten) befreit werden, die im Verdacht stehen, nicht dasselbe historische Alter aufzuweisen. Da nur der Ausgräber die »Probe von Interesse« spezifizieren kann, muß er für diesen Trennungsprozeß sorgen. Es ist üblich, die Probe zuerst visuell genauestens zu untersuchen und Anhaftungen wie Wurzelreste oder Mikroorganismen zu entfernen. Danach wird die Probe konserviert oder in einem weitergehenden Schritt umfassend »gewaschen«, d.h. die Probe durch Säuren, Basen oder sonstige Lösungsmittel von aufgenommenen Verunreinigungen befreit.

Zum Beispiel werden Hölzer bzw. Holzderivate wie Holzkohle durch Säure (HCL) und Lauge (NaOH) von Huminsäure, Chitin, Pilzen, Bitumen und sonstigen zu alten bzw. zu jungen organischen wie anorganischen Kohlenstoffen gereinigt. Getrennte Messungen von extrahierter Huminsäure und dem fraglichen Holz aus dem Pleistozän erbrachten Datierungsdifferenzen von weit mehr als 10.000 Jahren [Olson/Broecker 1961].

Es ist eine Anmerkung wert, daß die für die Kalibrierung der C14-Daten unverzichtbaren Hölzer – insbesondere, wenn sie nicht gefällt sondern ausgegraben werden – von »hartem« (also karbonathaltigem) Wasser geradezu getränkt sind. Die »Entmischung« von Holz und Karbonat ist eine Wissenschaft für sich. Dies muß sich grundsätzlich durch einen entsprechend hoch angesetzten Korrekturfehler bemerkbar machen. In dem Zusammenhang sollte erwähnt werden, daß natürlich alle organischen Lösungsmittel die Gefahr einer zusätzlichen indirekten Kontaminierung in sich bergen, die zu Fehldatierungen von mehreren 10.000 Jahren führen können [Venkatesan et al. 1982].

## 8.10 C14-Daten im Zusammenhang mit einem gut erschlossenen Fundort (II)

Die große Bandbreite von C14-Daten, die einem einzelnen Stratum zugeordnet werden, ist immer wieder erklärungsbedürftig. So spricht H. Willkomm von »anthropogenen Bioturbulenzen« innerhalb der Schichten eines mittelalterlichen Dorfes bei Starigard. Es wären also Menschen gewesen, die jeweils »ältere« und »jüngere« Holzkohle und Getreide zusammengewürfelt hätten [Willkomm 1983, 646]. Dieser Ansatz ist insofern irreführend, als damit suggeriert wird, daß jedes C14-Datum für sich ein »gutes« Datum sei. Der allgemein akzeptierte Leitsatz »one date is no date« ist ausschließlich aufgrund der hier demonstrierten Umstände aufgestellt worden. Die Verhältnisse sind grundsätzlich so zu akzeptieren, wie sie hier dargelegt sind: Die einem archäologischen Datum zugehörigen C14-Daten streuen um Jahrhunderte.



#### 8.4.4 Zusammenfassung

In Anbetracht zwangsläufiger Akkumulation unkorrigierbarer Fehler gilt für die Probenauswahl die Devise, sich auf die Proben zu konzentrieren, die bei der C14-Aufnahme zu Lebzeiten und der Isolierung während der Lagerzeit die geringsten systematischen Abweichungen erwarten lassen. So nimmt es nicht wunder, daß vorzugsweise Holz und Holzkohle untersucht werden, für die es über Jahrzehnte hinweg verfeinerte Standardverfahren der Aufbereitung gibt. Das mag für Vergleiche von Daten für Hölzer untereinander akzeptabel sein, darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß der Vergleich über die Typengrenze hinaus umso unsicherer wird, je ausgefeilter die jeweiligen Aufbereitungsprozeduren sind. Die »Feinheit der Methode« spiegelt sich gerade wegen der aufgewendeten Akribie in einer unbeherrschten Drift der letztlich resultierenden C14-Alter an sich gleichaltriger Proben unterschiedlichen Typs. Das ist bei der schlußendlichen Fehlerbetrachtung in jedem Fall zu berücksichtigen.

#### 8.5 Die Probe kommt ins Labor

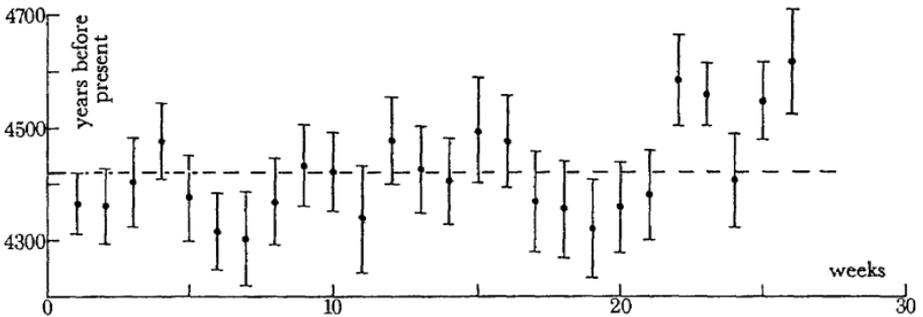
Unter »Laborfehler« werden auch solche Unsicherheiten summiert, die gar keine Fehler im eigentlichen Sinne sind. Dazu gehören unvermeidliche zufällige Streuungen (Streuung der Aktivität der Probe und entsprechende Streuung des Einflusses der Hintergrundstrahlung) sowie Korrekturansätze, die am besten von dem Labor vorgenommen werden, weil nur hier das dafür benötigte Equipment vorhanden ist (so etwa die Korrektur der Isotopenfraktionierung durch Messung anderer Isotopenverhältnisse als C14/C12). Nur die vom Labor durchgeführte Probenaufbereitung und -behandlung einschließlich des Meßvorganges kann unter Subsumtion alles menschlichen und technischen Ungemaches bei der Gesamtprozedur als »echte Fehlerquelle« bezeichnet werden.

Die Berücksichtigung der »Laborfehler« umfaßt also in der Regel diejenigen Fehler, die in Verbindung mit folgenden Vorgängen bzw. Sachverhalten stehen (zur Quantifizierung vergleiche die Tabelle **8.14** am Ende des Kapitels):

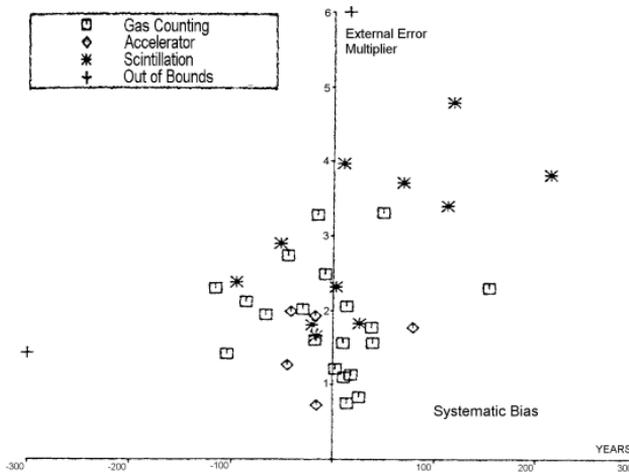
- 1) Schwankungsbreite für den Aktivitätswert aufgrund der begrenzten Meßzeit
- 2) Bestimmung der Halbwertszeit des C14

### 8.11 Langzeitmessungen eines Labors ...

Aufgeführt werden im oberen Bild die C14-Daten aus 6 Monaten kontinuierlicher Messungen an einer Probe [Barker 1970, 42]. In den Daten ist teilweise ein systematischer Trend zu erkennen, der der reinen Normalverteilung widerspricht. Dennoch könnte die Qualität der Messung als gut bezeichnet werden. Der systematische Trend unterstreicht allerdings den Einfluß unerkannter Randbedingungen, der ebenfalls aus dem weltweiten Vergleich ähnlicher Messungen zwischen den C14-Labors geschlossen werden mußte (vergleiche Kapitel 8.6).



### ... und unterschiedlicher Labore



Das Bild zur Linken zeigt Datierungsabweichungen unterschiedlicher Labors im Zusammenhang mit dem jeweiligen EEM (external error multiplier), der idealerweise höchstens den Wert eins annehmen sollte und somit ein Maß für die Unterschätzung des jeweils angegebenen Fehlers ist [Scott et al. 1990].

- 3) Korrekturansatz zur Kompensation der Hintergrundstrahlung (dem ebenfalls wieder ein zufälliger Anteil eignet ...)
- 4) Korrekturansatz zur Berücksichtigung laborintern angesetzter Probenaufbereitungsmethoden
- 5) Korrekturansatz für die Isotopenfraktionierung

Die Fehlerbeiträge 3. bis 5. rühren aus der fehlerbehafteten systematischen Korrektur der gemessenen Restaktivität, während die Fehlerbeiträge 1. und 2. aus Vorgängen genuin zufälligen Charakters stammen. Z.B. kann der Korrekturansatz aus 5. für einen Knochen eine systematische Korrektur des C14-Alters um -150 Jahre einerseits und eine Erhöhung des Fehlers um  $\pm 40$  Jahre andererseits bedeuten.

J.G. Ogden III, der seinerzeitige Direktor des C14-Labors der Dalhousie University (Halifax, Canada), bemerkte kritisch, daß die meisten Labors den Fehler von  $\pm 40$  C14-Jahren aus der Bestimmung der Halbwertszeit des C14 gar nicht aufführen [Ogden 1977, 173]. Einer Fehlerangabe von  $5030 \pm 30$  – etwa aus der »Radiocarbon Data List« in Ehrich [1992, 3] – wäre demnach irreführend. Es sei angemerkt, daß der Fehler aus der Bestimmung der Halbwertszeit nur solange Bedeutung hat, wie dem C14-Alter selber eine chronologische Bedeutung zugemessen wird. Eine Kalibrierung kompensierte diesen Fehler sofort, sofern für die Umrechnung der absolutdatierten Maßstabsproben dieselbe Halbwertszeit zugrundegelegt wurde.

Angesichts der ohnehin schon langen Liste von Fehlern und Korrekturen (vgl. dazu Tabelle **8.14** am Ende des Kapitels) mag man auf die Idee kommen, daß es auf die Berücksichtigung des Fehlers aus der Bestimmung der C14-Halbwertszeit<sup>26</sup> auch nicht mehr ankomme. Wenn andererseits jeder Korrekturansatz und jeder unkorrigierbare Fehler »nur«  $\pm 40$  Jahre (die meisten liegen nämlich weit höher) zum Gesamtfehler beitragen würde, dann liegen wir ohne eingehendere Betrachtung des Einzelfalls schon bei rund  $\pm 400$  Jahren Fehler, ohne schon einen Finger beim Messen krumm gemacht zu haben – und zugleich ohne jede Chance, durch eine noch so akribische Messung diesen Fehler wettmachen zu können. Auch ein Korrekturansatz von »Null« ist grundsätzlich immer mit einem Fehler behaftet, der zur Summe der Fehler beiträgt. Das Problem besteht in der großen Menge nötiger und zugleich feh-

---

<sup>26</sup> Definitionsgemäß (siehe unser Vorwort) ist die C14-Methode zur Altersbestimmung gar nicht auf die Kenntnis der Halbwertszeit angewiesen, da das Alter nicht berechnet, sondern nur aus der Synchronisierung der Probenaktivität mit entsprechenden Werten einer ausreichend dicht belegten Reihe absolutdatierter Vergleichsproben ermittelt werden kann. Einzige Voraussetzung dafür ist die Konstanz der Halbwertszeit.

lerbehafteter Korrekturansätze, und eine Lösung keineswegs in der Feststellung, daß eine einzelne Korrektur jeweils gering anzusetzen ist.

## 8.6 Und dann ist da noch ein richtiger Laborfehler ...

Zusätzlich gibt es auch Fehler, die erst durch Vergleich von Messungen mehrerer Labors an einer Probe bzw. an quasi-identischen Proben entdeckt werden, die also durch die routinemäßige Fehlerbetrachtung eines Labors regelmäßig hindurchrutschen und sogar hindurchrutschen müssen. Um diese Art von Fehler soll es in diesem Kapitel 8.6 gehen.

Die Debatte über unentdeckte Laborfehler wurde immer wieder geführt, und vielleicht kann diese deshalb nicht zur Ruhe kommen, weil die Labors ihre Hochpräzisionsmessungen an Objekten ausüben, die auch bei nachgewiesener Gleichaltrigkeit erratische Schwankungen untereinander aufweisen müssen. Auf diese Weise können bei Kreuzdatierungen natürlich keine gleichen Werte entstehen. Wenn keine systematischen Laborfehler vorliegen würden, dann müßte Isotopendiffusion quantitativen Ausmaßes zugrundeliegen, die von Probe zu Probe bzw. sogar von Probenteil zu Probenteil unterschiedlich ausfällt und so bewirkt, daß auch durch noch so präzise Messungen keine Übereinstimmung zwischen den Labors erzielbar wird. Dann müßten diejenigen (wenigen) Meßdurchläufe, die zu geringen Abweichungen zwischen den beteiligten Labors geführt haben, durch das Teilen »guter« d.h. tatsächlich homogener Proben zustande gekommen sein.

Eine Möglichkeit zur Selbstkontrolle eines Labors besteht in der Mehrfachmessung von ein und derselben Probe. Dadurch wird allerdings ein konstanter systematischer Fehler nicht entdeckt. Ist die Fehlerbetrachtung korrekt, dann müssen als notwendige Bedingung auf Dauer rund  $2/3$  der Meßwerte mit ihrem  $1\sigma$ -Fehlerbalken den kumulativ errechneten Mittelwert umschließen, und zwar genau genommen mit einer Normalverteilung, was in der Regel nicht mit in Betracht gezogen wird. H. Barker veröffentlichte 1970 eine Kurve, in der die wöchentlich im C14-Labor des British Museum neu ermittelte Aktivität einer bestimmten Probe über 6 Monate aufgetragen ist. Das  $2/3$ -Kriterium ist hier auf jeden Fall gut erfüllt (vergleiche Bild **8.11**). Es sollte klar sein, daß dieses  $2/3$ -Kriterium nur eine notwendige, nicht aber eine hinreichende Bedingung für die Normalverteilung darstellt.

Komplexer wird es, wenn Messungen derselben Proben von verschiedenen Labors zueinander in Bezug gesetzt werden. R. Stuckenrath verglich die Messung identischer Baumringsequenzen durch drei Laboratorien (La Jolla, Pennsylvania und Arizona) und kam zu dem Schluß, daß der Grad der Über-

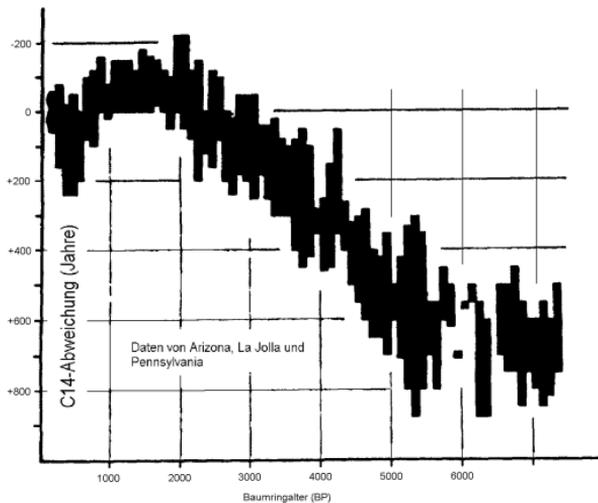
einstimmung für die jüngere Vergangenheit nicht völlig indiskutabel, bei höherem Alter aber kaum mehr zu vertreten sei. Zusätzlich rief er in Erinnerung, daß damit lediglich die Messungen dreier amerikanischer Laboratorien erfaßt seien und daß gegebenenfalls mit noch höheren Abweichungen zu rechnen sei, wenn all die anderen gleichermaßen renommierten Labors mitberücksichtigt würden [1977, 187]. (»Yale, British Museum, Groningen, Kopenhagen, Heidelberg, Neuseeland, Uppsala, UCLA [Los Angeles], das Smithsonian, und all die anderen Labors, denen einige Erfahrung auf dem Gebiet nachgesagt werden kann.«) Sein Vergleich findet sich in Bild 8.12. Stuckenrath hatte gerade die 3 Laboratorien ausgewählt, denen R.M. Clark in mehreren eingehenden Untersuchungen [Clark 1975; 1979; 1980] ebenfalls erhebliche Abweichungen untereinander bescheinigen mußte. Clark zog es jedoch vor, diese nicht direkt zu kritisieren bzw. anzugreifen, sondern dafür lieber die restlichen Labors als »sorgfältiger arbeitend« herauszustellen [Clark 1979, 53].

Die Tatsache, daß es seinerzeit ausschließlich die drei genannten weniger »sorgfältig arbeitenden« Laboratorien (La Jolla, Pennsylvania und Arizona) waren, die die Baumringe älter als dreitausend Jahre vermessen hatten [Clark 1979, 52], gibt weiteren Aufschluß über die Umstände, unter denen »wiggles« zur Synchronisierung schwimmender Baumringsequenzen verwendet wurden. Diese »wiggles« waren grundsätzlich erwünscht, weil in ihnen ein elegantes Hilfsmittel zur Kreuzdatierung schwimmender Baumringsequenzen gesehen wurde. Ihre Realität mußte mit Blick auf die Qualität der Messungen jedoch grundsätzlich in Frage gestellt werden. Es besteht also der Verdacht, daß insbesondere in die Bristlecone-Pine-Chronologie irrealer »wiggles« hineingemessen und daß auf diese Weise Dendrochronologen weltweit auf falsche Fährten gesetzt worden sind: Die amerikanischen Dendrochronologen nahmen gleiche C14-Werte unterschiedlicher Baumringsequenzen der Bristlecone Pine als Ausgangspunkte für die Suche nach Synchronismen in ihren Wuchswertfolgen – und stellten diese nötigenfalls unter Implementierung einer größeren Zahl von »Fehlringen« her. Die europäischen Dendrochronologen taten ein übriges, indem sie durch den Vergleich der C14-Muster ihrer schwimmenden Baumringsequenzen mit denen in der Bristlecone-Pine-Chronologie zu tentativen Absolutdaten kamen, die nun nach und nach durch geeignete Neufunde auf wenige Jahre genau »zugemauert« wurden.

Die C14-Gemeinde stellte diese Probleme nach außen gerne in einem eher freundlichen Licht dar. Schließlich ging es um die Akzeptanz bei der Altertumswissenschaft. So fand E. Neustupný in der Zeitschrift *ANTIQUITY* im Rückblick auf das vom 11. bis zum 15. August 1969 in Uppsala abgehaltene 12. Nobel Symposium »Radiocarbon Variations and Absolute Chronology

## 8.12 Meßwertstreuungen

Das Bild zeigt die Abweichungen der von drei Labors gemessenen C14-Alter untereinander sowie – vom Trend her – auch die dendrochronologisch ausgewiesenen Abweichungen gegenüber dem historischen Alter. Das Bild **8.11** gibt darüberhinaus Aufschluß über systematische Abweichungen einzelner Labors, die sich an der »International Collaborative Study« [Scott et al. 1990] beteiligt hatten. R. Stuckenrath warnte seinerzeit vor der Umrechnung von C14-Altern in Kalenderjahre, da die Unsicherheit der Werte viel zu groß sei und ihre Verwendung mithin nur mit der Alchemie des 13. Jahrhunderts verglichen werden könnte [1977, 188]. Die Warnung vor der Verwendung der Bristlecone-Pine-Chronologie als Kalibriermaßstab fokussiert lediglich auf die Oberfläche des Problems.



Obwohl die Streuung der Meßwerte unannehmbar hoch ausfällt, kann der ausgewiesene Trend (C14-Alter um ca. 10% zu jung) in der Zusammenschau aller Werte schließlich immer noch überzeugen. Das Kartenhaus der Kalibrierung muß in dem Moment in sich zusammenfallen, wo deutlich wird, daß dieser ausgewiesene Trend aus einer Baumringsequenz abgeleitet wurde, die nicht nach der reinen Lehre der Dendrochronologie,

sondern im Sinne der aktualistischen Idee konstanter Randbedingungen – mäßige Abweichungen des C14-Alters vom wahren Alter sind erlaubt – erstellt worden ist. Die unannehmbar hohe Streuung der Werte kann sich auch eingestellt haben, weil tatsächlich ungleichzeitige Sequenzen oder Teile dieser Sequenzen zwangsläufig unterschiedliche Trends in den C14-Werten aufweisen müssen.

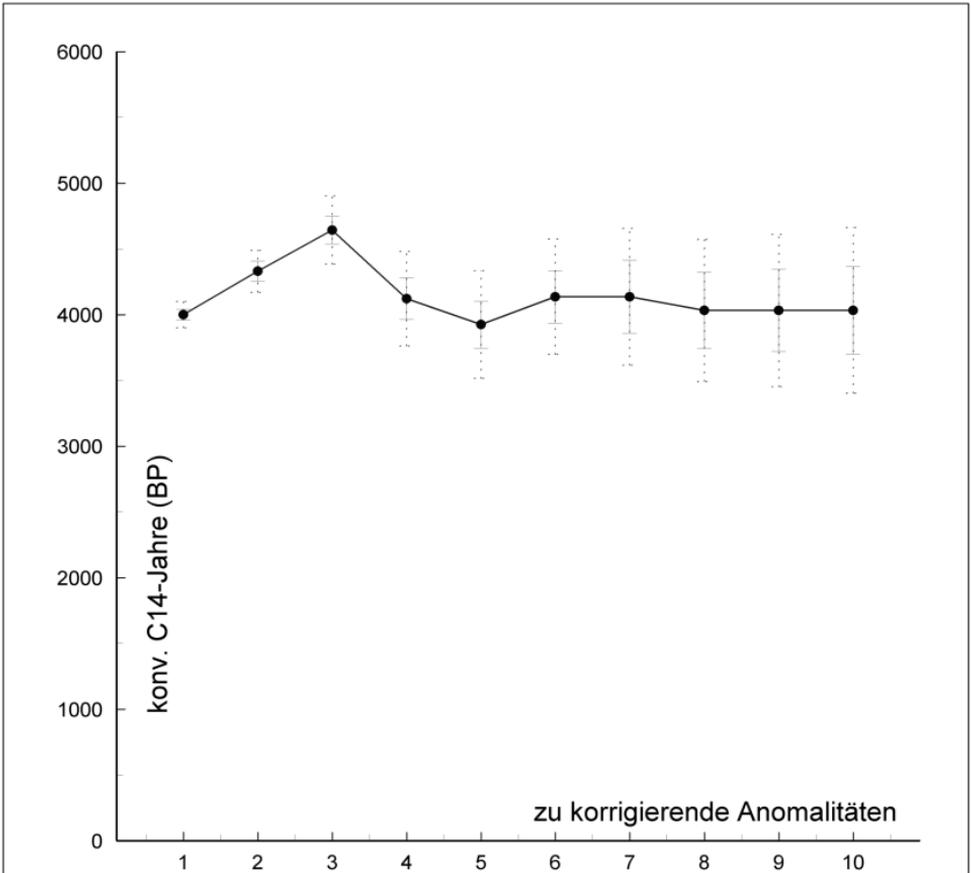
Für die Europäischen Eichenchronologien sieht die Situation nicht besser aus, weil ein Großteil der tentativen Absolutdaten für ihre schwimmenden Teilchronologien aus dem Vergleich mit ebendieser Bristlecone-Pine-Chronologie gewonnen worden sind. Dadurch galten auch die Absolutlängen der Lücken als bekannt und damit war vorentschieden, wieviel Baumringe an dieser Stelle noch anzubringen waren. Die schlechte Qualität der Messungen an Baumringen einerseits, aber auch die ungeklärte Situation über naturbedingte Streuungen in an sich gleichaltrigen Baumringen andererseits hat zu Freiheitsgraden geführt, die für die Erstellung der ersten Kalibrierkurve nach einem aktualistischen Vorurteil ausgenutzt worden sind.

(Radiokarbonschwankungen und Absolutchronologie)« ausgesprochen moderate Worte für die ausgewiesenen Diskrepanzen: »Während der allgemeine Trend bei allen drei Laboratorien übereinstimmt, kommt es bei Details zu Abweichungen. Es ist für den Archäologen sicherlich angenehm zu wissen, daß die Differenzen 200 Jahre nicht übersteigen und daß die Daten der verschiedenen Labors in vielen Fällen im Rahmen des statistischen Fehlers übereinstimmen« [Neustupný 1970b, 41].

Wenigstens die Dendrochronologen hätte diese Nachricht bedrücken müssen, da Differenzen von bis zu 200 Jahren automatisch an die Substanz der lebensnotwendigen »wobble« gehen. Und Übereinstimmungen »im Rahmen des statistischen Fehlers« sind fast immer beunruhigend gering, da der von den C14-Wissenschaftlern angelegte Maßstab viel zu nachsichtig ist. Wir haben im Kapitel 7 gezeigt, wie normalerweise erst eine Gewißheit nahe 100% dafür, daß die Proben nicht kontemporär sind, endlich Zweifel an ihrer Gleichzeitigkeit aufwirft. Wenn Archäologen und Historiker von der unglaublichen Nachsichtigkeit wüßten, mit der diffuses und erratisches Datenmaterial intern behandelt wird, hätten sie schon längst den Stab über ihrer einst hoffnungsvollsten Datierungshilfswissenschaft gebrochen.

In den für die eigenen Reihen bestimmten Veröffentlichungen wurde das Thema »Meßungenauigkeit« dagegen sehr deutlich – und ohne irgendwelche Rücksichtnahmen auf die Befindlichkeit der Archäologen – zur Sprache gebracht: »Eines konnte aus dem Datenmaterial, das auf dem Symposium vorgelegt worden war, eindeutig abgelesen werden: Man war mit erheblichen Meßfehlern aller drei Laboratorien, die die Bristlecone Pines vermessen hatten, konfrontiert, da sich die Übereinstimmung replikativer Messungen als generell schlecht herausstellte« [Pilcher 1983, 10]. (Wir wissen nicht, ob die sog. Replikate aus einem Holz erstellt worden waren, oder aus als gleichaltrig geltenden Hölzern.) Diese 1983 anlässlich einer Tagung in Edinburgh getroffene Feststellung gibt auch Auskunft über das lange Zeit gültige Motiv der irischen Dendrochronologen, ihre Eichenchronologie möglichst autonom aufzubauen. Man wollte der wissenschaftlichen Welt eine zweite Baumringchronologie neben der Bristlecone-Pine-Chronologie anbieten, über deren Tragfähigkeit sich die Wissenschaftler der Welt letztlich nicht einig werden konnten. Erst als die Arbeit endgültig zu stagnieren drohte, sah man sich genötigt, den eigenen schwimmenden Baumringchronologien über einen C14-Mustervergleich mit der einst so heftig kritisierten amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie dann doch tentative Absolutdaten zu verschaffen.

R. Pardi und L. Marcus [1977] untersuchten 630 Einzelmessungen von C14-Analysen identischer oder als gleichaltrig geltender, sog. replikativer Pro-



Nr.	Anomalität
1	Anomale Diffusionen (Reservoireffekte II)
2	Isotopenfraktionierung
3	Reservoireffekte I
4	Kontamination
5	Probenauswahl und -aufbereitung im Feld
6	Probenaufbereitung im Labor
7	Aktivitätsmessung
8	Hintergrundstrahlung
9	Halbwertszeit
10	Metafehler

### 8.13 Steigerung der Präzision unter gleichzeitiger Minderung der Genauigkeit

Berücksichtigt werden in diesem Beispiel alle in Tabelle 8.14 aufgeführten Korrekturen als Zufallswerte zwischen 0 und 100%. Zugleich wird jeweils der anteilig (ausgezogener Balken) bzw. der maximal zu erwartende Fehler (gestrichelter Balken) angegeben.

Das Beispiel hat schematischen Charakter. Es soll vor allem die Diskrepanz zwischen dem üblicherweise aufgeführten Fehler eines C14-Datums (in der Regel unter  $\pm 100$  Jahren) mit dem sich tatsächlich systematisch ergebenden Fehler ( $\pm 300$ - $600$  Jahren) herausstellen. Diese prinzipielle Diskrepanz beruht auf zwei Gründen:

- *Vernachlässigung von Fehlerquellen:* Es ist unüblich, Korrekturfehler über die Korrektur hinaus zu berücksichtigen und dann zu summieren. Vielmehr wird der übertragene Sinn einer Korrektur, nämlich der einer »Verbesserung«, herangezogen, dem die Vergrößerung des Fehlers gewissermaßen entgegensteht. Hinzu kommt, daß die Berücksichtigung von Korrekturfehlern die Beherrschung der Korrektur voraussetzt, was für viele der hier aufgezählten Arten gar nicht zutrifft. So gesehen ist der Ansatz für den jeweiligen Fehler von 10% der betreffenden Korrektur viel zu niedrig.
- *Angabe eines Ensembledatums:* Wenn die C14-Daten eines Ensembles von insgesamt N für gleichaltrig befundener Proben gemittelt wird, verringert sich der entsprechende Fehler des Mittelwertes um den Faktor  $1/\sqrt{N}$ . Erfahrungsgemäß ist die statistische Wahrscheinlichkeit, daß die Proben radiometrisch tatsächlich gleichaltrig sind, stets sehr niedrig, häufig sogar nahe Null (vergleiche Kapitel 3 und 7). Das bedeutet, daß die Korrekturen nicht beherrscht werden bzw. daß die Korrekturfehler nicht ausreichend in Ansatz gebracht wurden und der endliche mittlere Fehler viel zu niedrig angegeben wird.

Wir haben den Eindruck, daß auf die systematische Bilanz der Korrekturfehler auch deswegen verzichtet wird, weil es die Datierungsmethode damit als zu unständig, zu komplex und eben auch zu unsicher herausstellen würde. Das Spektrum an Fehlerquellen verführt am Ende eher dazu, die darin liegenden Freiheitsgrade zur tendenziösen Interpretation in Richtung Präzision zu nutzen, statt eine seriöse Summation der summarischen Unsicherheit zu betreiben und damit die Datierungsmethode einer permanenten Kritik auszusetzen. Eine realistische Sicht der Leistungsfähigkeit der C14-Methode würde ihr womöglich neue und angemessenere Aufgabenfelder zuweisen können, wo es etwa mehr um synchronistische Klammern statt um Absolutdatierung auf Biegen und Brechen gehen könnte (vergleiche die Zusammenfassung in Kapitel 1). Die erhebliche Bandbreite der Unsicherheit in dem wahren Alter kann auch als Interpretationsspielraum genutzt werden, um vorgegebene Zeitstellungen zu reproduzieren. Aus der eigentlich angezeigten Aussage – aufgrund der hohen Fehlerbandbreite des C14-Datums könne das erwartete Datum nicht ausgeschlossen werden – wird dann eine Bestätigung des Datums unter Angabe eines entsprechend niedrigen Fehlers.

ben und kamen zu dem Schluß, daß die angegebenen Fehlergrenzen die Genauigkeit der Messungen nicht richtig wiedergeben. Störfälle im Labor sowie so die Unterschätzung von Zählfehlern führten zur Angabe signifikant zu kleiner Fehler. R.M. Clark widmete 1975 replikaten Messungen ebenfalls eine eingehende Analyse und kam zu derselben Einschätzung: »Die tatsächlichen Abweichungen zwischen Daten replikativer Messungen ... waren signifikant größer, als die angegebenen Standardabweichungen vermuten ließen« [Clark 1975, 52]. Clark betonte, daß die Abweichungen unter den Labors zufällig waren, also keinen Trend aufwiesen wie etwa, daß Labor A immer um 100 Jahre jünger mißt als Labor B. Auf diese Arbeit und andere Beiträge von Clark kommen wir im Kapitel 9 zurück, wenn es um die Interpretation schneller Schwankungen der C14-Aktivität zum Zwecke eines Mustervergleiches zur Anpassung schwimmender Baumringchronologien geht.

J. Klein et al. faßten 1982 den seinerzeit herrschenden mißlichen Stand der Labortechnik anlässlich der Veröffentlichung einer »Konsens«-Kalibrierkurve zusammen: »Zahlreiche Kalibrierungen sind während der vergangenen 13 Jahre [seit dem 12. Nobel-Symposium 1969 in Uppsala] veröffentlicht worden. ... Obwohl von allen [Labors] vergleichbare Langzeittrends in der atmosphärischen Konzentration des Radiokarbon angegeben werden, kommt es doch zu einer signifikant unterschiedlichen Behandlung der kurzfristigen Schwankungen. Die Vielzahl unterschiedlicher Kalibrierungen und die jeweils einander widersprechenden Resultate, die entstehen, wenn der einen oder der anderen Kalibrierung der Vorzug gegeben wird, hat zu Mißtrauen bei einem Teil der Archäologen gegenüber der Kalibrierung im besonderen, aber auch der Radiokarbonmethode im allgemeinen geführt« [Klein et al. 1982, 103 f.]. Die von Klein et al. veröffentlichte Kalibrierkurve war von einem in Tucson (Arizona) abgehaltenen Workshop (»On the Calibration of the Radiocarbon Dating Time Scale«) initiiert worden. Eine genaue Untersuchung auf systematische Abweichungen zwischen den Datierungen von bis zu sieben unterschiedlichen Laboratorien, die zu dieser Konsens-Kalibrierkurve beigetragen hatten, erbrachte nach wie vor erhebliche Differenzen [ebd., 104]. Das angesprochene Mißtrauen der Archäologen beruhigte sich trotz aller Anstrengungen nicht. So fragte die Archäologin B.S. Ottaway noch 1986, warum die Labors – trotz unübersehbarer Hinweise auf die Notwendigkeit systematischer Qualitätskontrollen – keine sichtbaren Anstrengungen in diese Richtung unternähmen?

Eines der Laboratorien, das über Diskrepanzen zu den Konsens-Daten zu klagen hatte, war ausgerechnet das C14-Labor des British Museum. Alle zwischen 1980 und 1984 bearbeiteten 470 Proben waren um durchschnittlich 200

bis 300 Jahre zu jung datiert worden. Da in den wenigsten Fällen eine Neudatierung möglich war, behalf man sich mit der Angabe von Korrekturvorschlägen. Wie unsystematisch sich der »Fehler« ausgewirkt hatte, zeigte sich an einer Spanne von lediglich 10 bis immerhin 530 Differenzjahren in den Umdatierungsvorschlägen. Angesichts solcher Unsicherheiten drängt sich die Frage auf, wie denn dann ein systematischer Fehler – der sich nur aufgrund eines Trends und nicht einer zufälligen Schwankung offenbart – überhaupt gefunden werden kann? Beim British Museum sprach man im Zusammenhang mit diesem peinlichen Vorfall von einer heilsamen Lektion, die zu einer längst überfälligen Erneuerung des Zählsystems und zur Etablierung von Selbstprüfungsroutinen geführt habe [Bowman et al. 1990, 63].

Stuiver und Pearson veröffentlichten 1992 eine Tabelle mit sorgfältig veranstalteten Kontrollmessungen zwischen sieben verschiedenen Laboratorien [1992, 22]. Die mittlere Abweichung zwischen den Datierungen der untersuchten Objekte betrug 19 bis 47 Jahre, wobei klar sein muß, daß hier ein Paket an Hochpräzisionsmessungen verglichen wurde, das erst nach etlichen Anläufen geschnürt werden konnte. 1985 hatte man auf der 12. Internationalen Radiokarbon-Konferenz in Trondheim (Norwegen) die erste umfassende Untersuchung systematischer Abweichungen zwischen den Meßergebnissen einzelner Labors beschlossen, deren erste Ergebnisse 1989 präsentiert wurden [Scott et al. 1989]. Es mußten in fünf Meßdurchläufen an identischen Proben Abweichungen der Labors untereinander von teils mehr als 500 und teils mehr als 1.000 Jahren berichtet werden [Pazdur et al. 1990, 289]. Weniger als die Hälfte aller am Test beteiligten Labors erfüllte einfachste Kriterien, nach denen die Widerspruchsfreiheit der vorgelegten Daten beurteilt werden konnte [Aitchison et al. 1990, 278].

Das waren derart alarmierende Abweichungen, daß Imageschädigungen zur Kenntnis genommen werden mußten: »Es wird noch einige Jahre dauern, bis die C14-Gemeinde ihr angeschlagenes Image wieder aufpoliert hat. Wichtig ist hier, daß wir einen Prozeß der Selbstheilung in Gang gesetzt haben« [Long 1990, iii]. Bereits im Kapitel 2 haben wir nach einem Selbstheilungsprozeß auch für die über C14 erstellten und als Kalibriermaßstab für gültig erachteten Baumringchronologien gefragt.

Es ist ausgesprochen schwierig, die normalerweise offenbar unberücksichtigt bleibenden eigentlichen Laborfehler zu quantifizieren, doch es dürfte angesichts der offenbaren Abweichungen nicht übertrieben sein, mit einem unerkannten Fehler von durchschnittlich mindestens  $\pm 50$  Jahren zu rechnen. Die untersuchten Fehler liegen zum Teil noch erheblich höher.

## Summation aller Fehler aus Korrekturen - ohne »Kalibrierung«

Nr.	Anomalitäten bzw. zufällige Fehler	max. Korrektur <sup>1)</sup>		max. Korr.Fehler ± C14-Jahre	Beispiel (Zufallsgenerator f <sub>i</sub> )	
		± C14-Jahre			f <sub>i</sub> · Korrektur	f <sub>i</sub> · Fehler
1	Anomale Diffusionen (Reservoireffekte II)	-		100	-	41
2	Isotopenfraktionierung	600		60	330	33
3	Reservoireffekte I	1.000		100	313	31
4	Kontamination	1.000		100	-521	52
5	Probenauswahl und -aufbereitung im Feld	500		50	-198	20
6	Probenaufbereitung im Labor	300		30	212	21
7	Aktivitätsmessung	-		80	-	78
8	Hintergrundstrahlung	200		20	-104	10
9	Halbwertszeit <sup>2)</sup>	-		40	-	25
10	Metafehler	-		50	-	21
	Summe maximaler Korrekturfehler (Normalfall)			630	32	332

<sup>1)</sup> normal mögliche Größenordnung<sup>2)</sup> ohne Berücksichtigung bei Kalibrierung

### 8.14 Die Summe aller Korrekturfehler

In dieser Tabelle werden alle im Kapitel 8 besprochenen Korrekturen, bei denen naturgemäß jeweils wieder Korrekturfehler auftreten müssen, sowie die von vorneherein zufällig auftretenden Fehler aufgeführt. Die Quantifizierung sowohl der Korrekturen als auch der genuin zufälligen Fehler ist bis zu einem gewissen Grade willkürlich. Deswegen sind wir moderat bei der Vergabe der einzelnen Maximalwerte vorgegangen. Auch der Ansatz von 10% Fehler für jede Korrektur ist eher konservativ. Der sich infolge zahlreicher Korrekturen aufsummierende Fehler betrifft lediglich die Kenntnis der vorliegenden C14-Konzentration. Je größer dieser Fehler ist, desto unsicherer wird am Ende auch die Altersbestimmung anhand eines Abgleichs dieser Konzentration bzw. Restaktivität mit einer Folge von Restaktivitäten absolutdatierter Proben.

Die Tabelle beziffert den im Normalfall zu erwartenden maximalen Fehler mit  $\pm 630$  Jahren. Daraus kann für den mittleren Fehler abgeleitet werden, daß dieser im Normalfall – selbst bei präzisester Radioaktivitätsmessung – bei über  $\pm 300$  Jahren liegen wird (vergleiche dazu das Beispiel im Bild **8.13**). Darunterliegende Fehlerangaben bedürfen einer stichhaltigen Begründung, warum die Fehler aus den Korrekturen in der Summe so niedrig ausfallen konnten. Es ist fast überflüssig zu betonen, daß der Streit um die 300-Jahreslücke für das Mittelalter nicht mit C14 entschieden werden kann. Bei der Beschleunigermassenspektrometrie (AMS) liegen hinsichtlich der Punkte 7, 8 und 10 (Hintergrundstrahlung, Aktivitätsmessung und Metafehler) sicherlich günstigere Umstände vor, die bei bestimmten Meßreihen zu widerspruchsfreieren Ergebnissen führen werden (vergleiche den Text zu Bild **7.2**). Das berührt aber nicht die Schlußfolgerungen bezüglich der Bedingungen während der Lebens- und Lagerzeit.

Die paradox klingende, jedoch logische Folgerung ist, daß mit der systematischen Berücksichtigung aller Korrekturfehler die Wahrscheinlichkeit möglicher Gleichzeitigkeit solcher Proben wieder wächst, die ohne diese Akribie bei der Fehlerbehandlung aus statistischen Gründen als ungleichzeitig zu behandeln wären. Mit anderen Worten: Die Zuerkennung höherer Ungenauigkeit kann bestimmte, zuvor als fehlerhaft oder korrupt bezeichnete Datensätze rehabilitieren. Ob das nach dem Geschmack der C14-Wissenschaftler ist, möchten wir allerdings bezweifeln, denn am Ende käme auf jeden Fall ein Aktivitätswert bzw. ein Datum mit deutlich höherer Ungenauigkeit heraus. Grundsätzlich verdoppelte sich dieser Fehler noch einmal, wenn für die Vergleichswerte absolutdatierter Proben (Kalibrierung) ähnliche systematische Probleme zu berücksichtigen sind (vergleiche dazu das folgende Kapitel 9).

Die hier gewonnenen Erkenntnisse können und müssen sogar auf andere radiometrische Datierungsmethoden übertragen werden, bei denen vergleichbare Probleme vorliegen. Wichtigster Kandidat ist die für die Datierung des Känozoikums bedeutsame Kalium-Argonmethode, weil dort ein ähnlicher Korrekturbedarf besteht. Wegen der hohen Halbwertszeit des Kalium würde man bei Datierungsunsicherheiten eines Mehrfachen von 20 Millionen Jahren landen (vgl. Blöss [2000, 139ff.]) – und das ist die Größenordnung der Gesamtlänge des Känozoikums von ca. 60 Millionen Jahren.

## 8.7 Zusammenfassung

Das ganze Kapitel 8 handelte von systematischen Korrekturen einerseits und von unkompensierbaren Fehlern jenseits des mit dem radioaktiven Zerfall verbundenen Meßfehlers andererseits. Begründete Korrekturen am ursprünglichen Meßergebnis steigern dessen Präzision, mit diesen Korrekturen einhergehende Fehler steigern hingegen seine Ungenauigkeit (vergleiche die erste Fußnote dieses Kapitels). Jede Korrektur beruht auf einer mehr oder weniger stimmigen Annahme und weist von daher auch einen Fehler auf, der am Ende mitbilanziert werden muß. Es ist »Stand der Technik«, daß auch die Berücksichtigung aller denkbaren Korrekturmöglichkeiten teilweise erhebliche Schwankungen zwischen Proben übrig läßt, obwohl diese nach Abschluß aller Prozeduren identische bzw. statistisch signifikant identische C14-Alter aufweisen müßten.

Wir sind mit der Abschätzung des Gesamtfehlers aus allen Korrekturen auf eine Größenordnung von  $\pm 600$  Jahren gestoßen (Tabelle 8.14). Dieselbe Größenordnung ergab sich bereits, das sei beiläufig erwähnt, bei der statistischen Analyse der Daten, auf die Libby die ersten Untersuchungen der noch neuen C14-Methode gestützt hatte. 600 C14-Jahre als summarischer Fehler ist nicht einmal außergewöhnlich viel, wenn berücksichtigt wird, daß hier zehn völlig unterschiedliche Fehlerquellen eingeflossen sind. Im Mittel sind das  $\pm 60$  Jahre verbleibende Unsicherheit je Fehlerquelle, was jeweils weniger als 1% Restunsicherheit bezogen auf die gemessene Aktivität ausmachte. Die Trennschärfe der C14-Methode muß für chronologische Differenzierungen, die in der Größenordnung weniger Jahrhunderte liegen sollen, als ungenügend bezeichnet werden.

Im vorangegangenen Kapitel 7 wurden Ursache und Interpretationsspielraum der Meßfehler aus der statistischen Schwankung des radioaktiven Zerfalls näher beleuchtet. Die C14-Methode ist angesichts von Daten, die in aller Regel mit Fehlern aufwartet, die noch weit über dieses Maß hinausgehen, unverhoffte Nutznießerin dieser prinzipiellen Unsicherheit geworden: Fehler aus den Korrekturen werden nicht sauber vom eigentlichen sog. Meßfehler getrennt und dienen damit als eine Art Feigenblatt.

Im folgenden Kapitel 9 dreht sich alles um die Kalibrierung. Die Diskussion dieser »Korrektur« wurde aus mehreren Gründen abgetrennt. Der wesentliche Grund lautet: Kalibrierung ist im strengen Sinne keine Korrektur, sondern eine Umrechnung bzw. ein Abgleich. Die Unterstellung, daß der Unterschied zwischen dem ermessenen bzw. errechneten C14-Alter und dem historischen Alter nur Prozentpunkte ausmache und man deswegen eben von ei-

ner Korrektur im Sinne der Verbesserung eines ohnehin schon »guten« Wertes sprechen darf, ist ungerechtfertigt. In diesem Sinne können etliche hier besprochenen »Korrekturen« ebenfalls kaum als Verbesserungen gelten, sondern sind mindestens als Berichtigungen anzusprechen. Daß die Summe aller Berichtigungen nur noch zu einer Verwässerung der Datierung führt, kommt in dem Titel dieses Kapitels 8 prägnant zum Ausdruck. Weiterhin ist die Kalibrierung (bei konstanter meßtechnischer Bemühung) mit dem Problem exponentiell wachsenden Fehlers bei Abnahme der Restaktivität konfrontiert, was angesichts des hier aufgeworfenen grundsätzlich höheren Fehlers der zu kalibrierenden Messung selber sehr schnell zu inakzeptablen Absolutdatierungen führt.

## 9. Der radiometrische Tunnel – Kalibrieren? So nicht!

### 9.1 »Kalibrierkurven«: Mißverständnisse durch Umwege

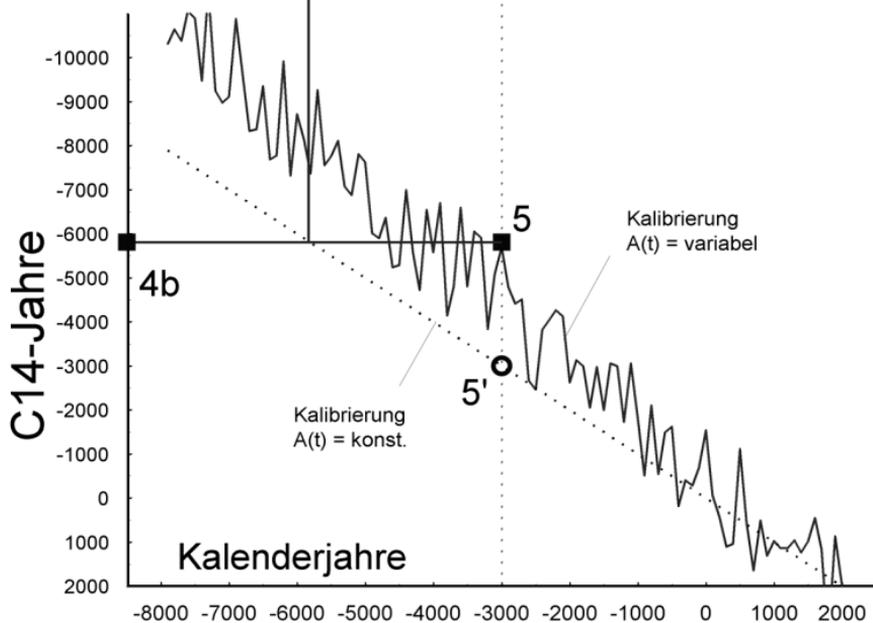
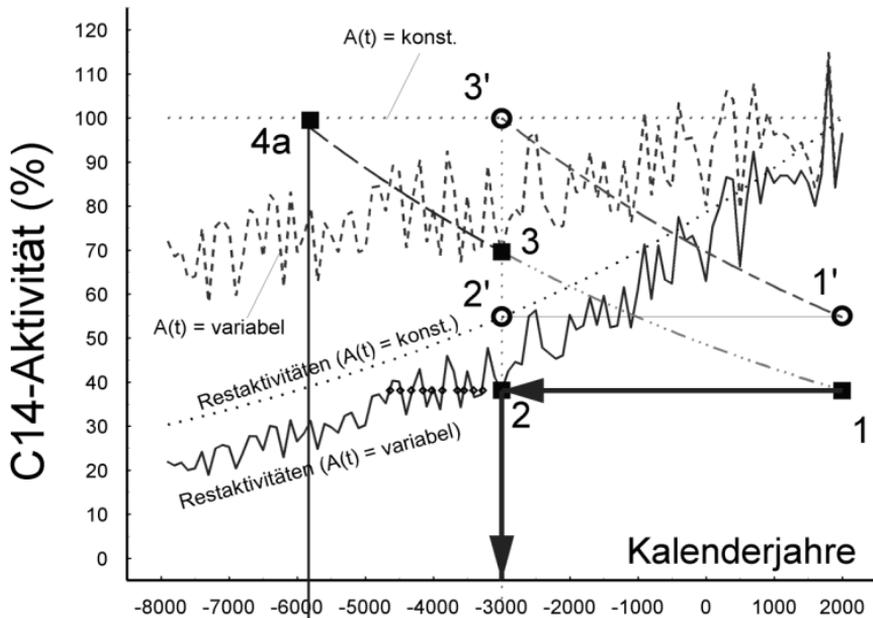
Der Nimbus der C14-Methode beruht auf der Illusion, daß sich die Altersangabe für eine organische Probe direkt aus ihrer im Labor gemessenen Radioaktivität ableiten läßt. Doch die C14-Methode kann solche Zeitangaben nicht aus einem Wert gewinnen, sie benötigt dazu derer zwei:

- 1) Restaktivität: Der erste Wert  $A(t)$  ergibt sich aus der Messung der aktuellen C14-Konzentration<sup>27</sup>.
- 2) Startaktivität: Der zweite Wert  $A(t')$  ergibt sich aus der Kenntnis der ursprünglichen C14-Konzentration, des Anteils von C14 am Gesamtkohlenstoff also, der im Moment des Stoffwechselendes bzw. des Todes des betrachteten Organismus vorlag. Die sogenannte Startaktivität gilt zugleich als Abbild der seinerzeit herrschenden Radioaktivität des atmosphärischen C14.

Nur unter Kenntnis beider Werte erlaubt die Formel **IX.1** (in Kapitel 9.5) auch die Berechnung der Zeit, die zwischen heute ( $t$ ) und dem Todeszeitpunkt ( $t'$ ) des Organismus verstrichen ist. Da die Startaktivität aber grundsätzlich unbekannt ist, kann die C14-Methode die Bestimmung des Alters einer organischen Probe nicht durch Berechnungen erwirken, sondern nur durch den Vergleich ihres C14-Datums mit denen bereits absolutdatierter anderer Proben. Sie muß fragen, welche Proben bekannten Alters dieselbe C14-Aktivität aufweisen wie die zu datierende Probe. Altersbestimmung ist also keine Frage der Umrechnung gemessener C14-Aktivitäten, sondern die einer Synchronisierung anhand von Übereinstimmungen in der C14-Aktivität verschiedener Proben, von denen eine bereits ein Datum besitzen muß.

Ohne Kenntnis der C14-Aktivität der Probe zum Zeitpunkt ihres Todes reicht die Information über die aktuelle Restaktivität der organischen Probe nur dazu aus, den zeitlichen Verlauf der Radioaktivität in der Probe zu rekonstruieren: Man weiß, welche Radioaktivität jeweils zu welchem Zeitpunkt in der »Vergangenheit« in der Probe geherrscht, nicht aber, wann ihr Stoffwechsel tatsächlich aufgehört hat. Die gewünschte Angabe über den Todeszeitpunkt bzw. den Zeitpunkt des Stoffwechselendes ergibt sich erst aus der Übereinstimmung dieses zurückgerechneten Verlaufs innerhalb des betrachte-

<sup>27</sup> Es sei an dieser Stelle erneut betont, daß der Begriff »C14-Konzentration« von uns im Sinne des Anteils des C14-Isotops am Gesamtkohlenstoff, also des C14/C12-Verhältnisses gebraucht wird (vgl. auch die Bemerkung im Kapitel 1.1 auf Seite 19).



Beschreibung für Bild 9.1 auf den folgenden beiden Seiten

## 9.1 Vom C14-Meßwert ...

Am Ende jeder Prozedur im C14-Labor steht die alles entscheidende Frage: Wie wird ein C14-Meßwert in ein Absolutdatum umgewandelt? Die Grundlage dieses Vorganges bildet eine ausreichende Anzahl gemessener Restaktivitäten  $A(t)$  von Proben, deren Absolutdatum jeweils bekannt sein muß. In dem oberen Bild werden diese für zwei verschiedene Fälle abgebildet:

- a) zeitlich konstante C14-Konzentration in der Atmosphäre ( $A(t) = \text{konstant}$ ), d.h. die gemessenen Restaktivitäten sinken exponentiell mit dem Alter.
- b) zeitlich variable C14-Konzentration in der Atmosphäre ( $A(t) = \text{variabel}$ ), d.h. die gemessenen Restaktivitäten sinken tendenziell mit dem Alter und weisen zusätzliche Schwankungen auf

Der zeitliche Verlauf der C14-Konzentration in der Atmosphäre ergibt sich unmittelbar aus einer Umrechnung (unabhängig von C14) datierter C14-Restaktivitäten in die ursprünglichen Startaktivitäten. Für die Datierung einer archäologischen Probe ist diese Umrechnung dagegen unnötig, denn das geschieht durch unmittelbaren Vergleich der Restaktivitäten.

Auf keinen Fall ist in der Realität mit einer zeitlich konstanten C14-Konzentration in der Atmosphäre zu rechnen, weshalb der Fall (a) keine praktische Bedeutung hat. Für die Standardsituation einer zeitlich variablen C14-Konzentration (b) wurde hier für die Restaktivitäten der Trend eines kontinuierlichen Anstiegs der atmosphärischen C14-Konzentration um 50% in rund 10.000 Jahren als Beispiel konstruiert. Dieser zeitliche Verlauf hat unter anderem zur Folge, daß die zugehörige Kalibrierkurve (unteres Bild) steiler abfällt als die Winkelhalbierende, die für (irreale) stationäre Verhältnisse steht. Einem C14-Alter von 8.000 Jahren entspricht dann ein wahres Alter von rund 5.000 Jahren. Die Konstruktion aller gebräuchlichen Kalibrierkurven für C14 beruht letztlich auf der Annahme einer quasistationären C14-Konzentration in der Atmosphäre.

Die erste dendrochronologische Kalibrierkurve – die Bristlecone-Pine-Chronologie – wurde nicht dendrochronologisch erstellt, sondern durch stückweise Überlagerung der gemessenen C14-Muster, wobei die Restaktivitätssequenzen immer in der Nähe der idealen Exponentialkurve, die für zeitlich konstante C14-Konzentration in der Atmosphäre steht (Kapitel 2.3, auch Bild 9.2), liegen mußten. Ohne eine derartige »Vordatierung« wäre die Verdichtung und Verifizierung der dendrochronologischen Synchronlagen unmöglich gewesen. Alle späteren Kalibrierkurven entstanden dadurch, daß die zeitliche Lage ihrer noch separat stehenden C14-Muster mit denen in der zuvor konstruierten »Urkurve« synchronisiert wurden.

Im Folgenden wird für zwei verschiedene Fälle jeweils der Weg direkter Kalibrierung und der Weg indirekter Altersbestimmung über die Umrechnung des sog. »C14-Alters« beschrieben. Für die direkte Kalibrierung müssen nur die Restaktivität der fraglichen Probe und mit den Restaktivitäten der bereits absolutdatierten Vergleichsproben miteinander verglichen werden. Die Umrechnung des errechneten C14-Alters ist dagegen sehr kompliziert – und mißverständlich.

## ... zum Absolutdatum

Folgende zwei Fälle werden unterschieden:

- *Normalfall* (hier wird C14-Überproduktion unterstellt): Das Alter einer organischen Probe soll nunmehr durch die Messung seiner C14-Aktivität ermittelt werden. Dazu wird der Schnittpunkt (2) zwischen seiner gemessenen Restaktivität (1) und einer Folge von Restaktivitäten absolutdatierter Proben bestimmt. Gibt es nur einen Schnittpunkt, so liegt das Alter fest (Vergleichbarkeit der Restaktivitäten vorausgesetzt). Liegen mehrere Schnittpunkte vor, so muß zwischen entsprechend vielen möglichen Altern auf anderem Wege unterschieden werden. Damit ist der Vorgang der Kalibrierung an sich abgeschlossen. (In dem vorliegenden schematischen Beispiel muß zwischen 11 möglichen Absolutaltern aus einem Intervall von rund 1.500 Jahren unterschieden werden. Die mittleren Schwankungen liegen bei rund  $\pm 10\%$  vom Absolutwert.)

Für alle weiteren, bei Kalibrierungen üblichen wenn auch überflüssigen Schritte wurde der »jüngste« Schnittpunkt (2) ausgewählt. Die seinerzeit (»-3000«) herrschende C14-Konzentration in der Atmosphäre (3) kann durch Formel **IX.1** errechnet werden. Sie liegt in diesem Fall rund 30% unter der heute gemessenen atmosphärischen C14-Konzentration. Wird hingegen der Schnittpunkt (4a) der rückgerechneten Aktivitätskurve der Probe mit der Geraden gesucht, die für zeitlich konstante C14-Konzentration steht, so resultiert das um 3.000 Jahre höheres (hypothetisches) »C14-Alter«. Das zum Schnittpunkt (4a) gehörende Alter ist dann das C14-Alter der Probe. Eben weil die atmosphärischen Verhältnisse für C14 sich zeitlich ändern, entspricht das C14-Alter nicht dem Absolutalter und weicht von diesem gegebenenfalls stark ab.

Das C14-Alter taucht als Punkt (4b) in der unteren Graphik wieder auf. Zusammen mit dem bereits ermittelten Absolutalter wird der Schnittpunkt (5) als Element einer Kalibrierkurve, wie sie üblicherweise verwendet wird, erzeugt.

- *Grenzfall* (C14-Konzentration ist zeitlich konstant): Für diesen Fall degenerieren die komplexen Zusammenhänge zwischen Restaktivität, C14-Alter und Absolutalter zu einer einfachen mathematischen Beziehung: Da in diesem Fall die Startaktivität der Probe (3') feststeht (dieselbe Aktivität wie eine rezente Probe), kann das Absolutalter der Probe aus der gemessenen Restaktivität und dieser Startaktivität durch die Formel **IX.1** ohne weitere Umwege errechnet werden. Natürlich ergäbe sich dasselbe Alter (2'), wenn man sich die (völlig überflüssige) Mühe machte, eine Restaktivitätenreihe absolutdatierter Proben zu erstellen. Deren Verteilung würde im übrigen einer Exponentialkurve gleichen. Die Erstellung einer Kalibrierkurve wäre in diesem Falle völlig sinnlos, weil jedes C14-Alter mit dem Absolutalter identisch und eine Umrechnung folglich überflüssig wäre.

den Organismus einerseits und dem in der Atmosphäre andererseits. Zwei zeitliche Verläufe müssen also bekannt sein, um eine Zeitangabe oder Datierung aus dem Abgleich zwischen ihnen möglich zu machen:

- der zeitliche Verlauf der C14-Konzentration, der aus der gemessenen Restaktivität der Probe auf der Basis des Gesetzes für den radioaktiven Zerfall zurückgerechnet werden kann, und
- der zeitliche Verlauf der C14-Konzentration, wie er für die Atmosphäre z.B. mit Hilfe von Jahringchronologien rekonstruiert werden kann.

Der zeitliche Verlauf der C14-Aktivität der Atmosphäre kann nur aus einer entsprechend großen Anzahl von Proben bekannten Alters durch Messung von deren Restaktivität erschlossen werden. Anstatt diese Restaktivitäten über die jeweils bekannten Absolutalter in deren äquivalente Startaktivitäten umzurechnen, um zu schauen, an welchen Zeitpunkten die rückgerechnete Zerfallskurve der Probe mit diesen übereinstimmt, genügte es am Ende völlig, die Restaktivität der Probe unbekanntes Alters mit den Restaktivitäten der datierten Vergleichsproben abzustimmen (Bild **7.1** und **9.1**).

Die C14-Wissenschaftler machen es sich dagegen erheblich schwerer: Sie rechnen zuerst auf der Basis einer definierten Standardaktivität die Restaktivität der Probe in ein fiktives C14-Alter um. Deshalb müssen sie auch die Restaktivitäten der benötigten Folge absolutdatierter Proben in gleicher Weise in eine Folge fiktiver C14-Alter konvertieren, um wiederum aus Synchronitäten im C14-Alter zu der gewünschten Aussage über das Absolutalter zu kommen. Warum wird dieser mit erheblichem und zugleich doch überflüssigem Mehraufwand verbundene Umweg genommen?

Das umständliche Umrechnen von Restaktivitäten in C14-Alter wurzelt in der ursprünglich gehegten Meinung, daß die C14-Konzentration in der Atmosphäre zeitlich konstant gewesen sein muß. Deshalb identifizierte man die aktuell gemessene C14-Konzentration der Atmosphäre mit der ursprünglichen Startaktivität jeder untersuchten archäologischen Probe und konnte so mit Hilfe der Formel **IX.1** ohne Umwege und verlockend elegant die dazwischenliegende Zeit ausrechnen. Ganz schnell bürgerte sich der Brauch ein, nicht die gemessene Restaktivität in den Vordergrund zu stellen, sondern die daraus errechnete Altersangabe.

Als 1960 endgültig erkannt wurde, daß sich die C14-Konzentration in der Atmosphäre mit der Zeit ändert, konnte die aktuelle atmosphärische C14-Konzentration nicht mehr als Startaktivität für die zu untersuchenden Proben genommen werden. Man hätte von der Umrechnung der Restaktivität in ein C14-Alter eigentlich wieder Abstand nehmen müssen. Stattdessen hätte man

das wahre Alter aus der Korrelation der Restaktivität der Probe mit einer entsprechend dicht belegten Reihe von Restaktivitäten bereits absolutdatierter anderer Proben bestimmen müssen und damit die C14-Methode neu definieren müssen: Altersbestimmung durch Vergleich mehrerer Meßwerte, nicht mehr durch Umrechnung eines Meßwertes. Dennoch wurde die Gewohnheit beibehalten, auf der Basis der aktuellen atmosphärischen C14-Aktivität eine vorläufige Altersangabe für die Probe anzugeben, um die Illusion aufrechtzuerhalten, daß die C14-Methode aus sich heraus Altersbestimmungen vornehmen kann. Folglich bezogen sich Kalibriertafeln auch nicht auf die gemessenen Restaktivitäten bereits absolutdatierter Proben, sondern ebenso auf ihre fiktiven C14-Alter.

Kein Wissenschaftler hat jemals öffentlich die Konsequenzen aus der Überlegung dargelegt, ob sich die C14-Konzentration der Atmosphäre in geschichtlichen Zeiträumen nicht mehr als nur ein paar Promille geändert haben könnte. Vielmehr wurde immer davon ausgegangen, daß entsprechend dieser geringen Verschiebung das errechnete C14-Alter vom wahren Alter der Probe nur wenig abweichen würde. Folgerichtig sprach man auch bloß von einer Korrektur<sup>28</sup> dieser Altersangabe. Nur so konnte es auch passieren, daß die erste Kalibriertafel für C14-Alter mit Hilfe der Annahme stets kleiner Schwankungen zustande kam und auch die modernsten Nachfolger diese noch widerspiegeln (vergleiche dazu insgesamt Kapitel 2).

Nachdem im achten Kapitel bereits von verschiedensten »Korrekturen« einschließlich der sich anhäufenden Korrekturfehler die Rede war, soll in diesem Kapitel die komplexeste und zugleich am häufigsten mißverständene »Korrektur«, die Kalibrierung, analysiert werden. Ein wesentliches Mißverständnis haben wir bereits angesprochen: Ein aussagefähiges C14-Alter ist nicht berechenbar, sondern kann lediglich (und das auch nur unter bestimmten Voraussetzungen) aus einer Korrelation des Probenmeßwertes mit einer entsprechenden Meßwertreihe bestimmt werden, die hinsichtlich des Absolutalters kalibriert ist.

Ein weiteres Mißverständnis liegt mit der sogenannten Stationaritätsannahme vor: In allen globalen Kohlenstoffreservoirs habe sich bereits vor langer Zeit (größenordnungsmäßig spätestens vor 50.000 Jahren) die C14-Konzentration infolge quasi-konstanter C14-Produktion so eingestellt, daß der radioaktiv bedingte Verlust an C14 ständig durch die C14-Produktion in

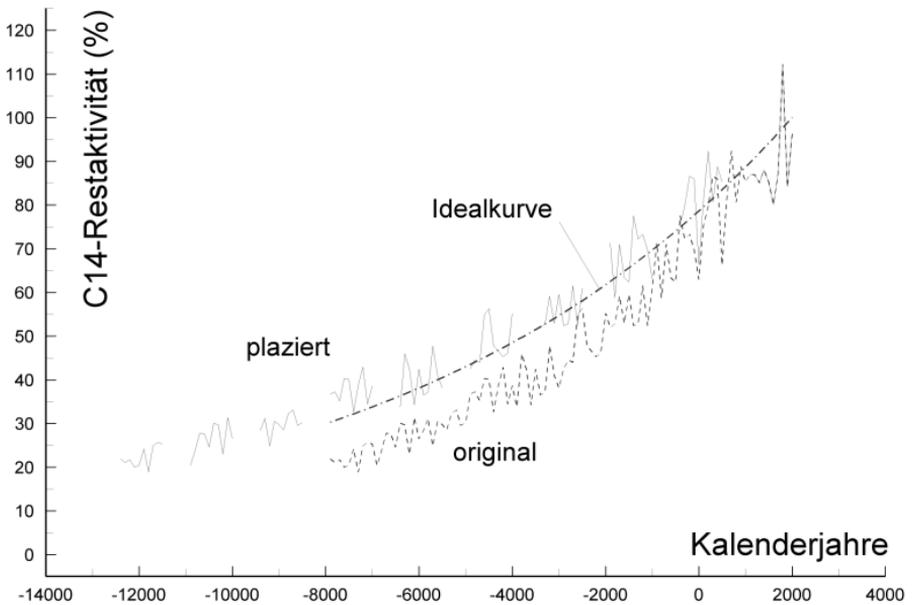
---

<sup>28</sup> Der Begriff der »Korrektur« ist ursprünglich ein Fachwort der Druckersprache und bezeichnet eine Verbesserung oder Berichtigung innerhalb der Folge der Lettern im Druckstock. Damit verbunden ist das Wissen, was anstelle des vereinzelt Fehlers oder Ausrutschers tatsächlich zu stehen hat.

## 9.2 Die Tücken der C14-Vordatierung

Dendrochronologen sind auf C14-Datierungen angewiesen. Für die erste längere Baumringchronologie – der Bristlecone-Pine-Chronologie – wurden C14-Sequenzen, die zugleich mit den Ringsequenzen vorlagen, bedingungslos an der Idealkurve, die für konstante C14-Konzentration in der Atmosphäre steht, ausgerichtet bzw. vordatiert und durch Einfügen von 5-10% geeigneter Fehlringe hinsichtlich der Baumringwuchswerte angepaßt.

Das Bild zeigt schematisch, wie Sequenzen auf diese Weise auseinanderreißen und die so entstandenen Lücken letztlich durch Verdoppelungen entsprechend langer Sequenzen geschlossen werden müssen (vergleiche Bild [2.16](#)).



der Atmosphäre ausgeglichen werde. Insbesondere wären über historische Zeiträume nur geringfügige Veränderungen der C14-Konzentration aufgetreten. Mithin sei die spezifische Aktivität in den globalen Kohlenstoffreservoirien auch annähernd gleich und spiegele damit indirekt die Produktionsrate für C14.

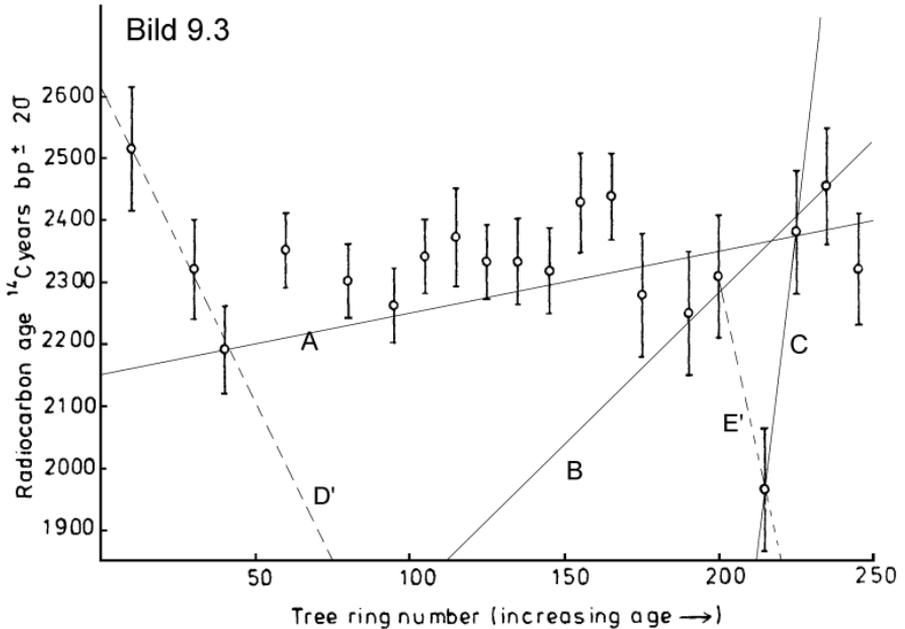
Tatsächlich bleiben nur wenige Prozent des produzierten C14 in der Atmosphäre. Der überwiegende Rest wandert infolge eines entsprechenden Konzentrationsungleichgewichtes in die ozeanischen Großreservoirie ab (zur Aufteilung des C14 auf die einzelnen Reservoirie siehe Bild 8.1). Die aktuelle spezifische Aktivität der Organismen, die an der Erdoberfläche leben, wird also von der Absorptionsrate der ozeanischen Oberflächen mindestens so stark regiert wie von der C14-Produktion: Je mehr die Ozeane von dem produzierten C14 aufnehmen können, desto geringer ist die C14-Konzentration in der Atmosphäre und umgekehrt. Die Mikrostruktur der Kalibriertafeln kann auch nur mit schwankendem Absorptionsverhalten der Ozeane erklärt werden, nicht aber – wie es üblich ist – mit schwankenden Produktionsraten. Diese Effekte spielen sich zudem völlig entkoppelt von dem radioaktiven Zerfall ab.

Wird dieses Mißverständnis erst einmal erkannt, dann bleibt für die Annahme langfristige annähernd gleichbleibender C14-Konzentration ad hoc keinerlei Berechtigung mehr. Auch unter diesem Gesichtspunkt müssen die im Gebrauch befindlichen Kalibriertafeln ausgemustert werden, denn ihre Genese wurzelt in dem aktualistischen Selbstverständnis, nach dem wesentliche Randbedingungen seit ausreichender Zeit konstant gewesen seien (Indizien dagegen auch in Bild 9.17).

Es sollte deutlich geworden sein, daß der Todeszeitpunkt bzw. der Zeitpunkt des Stoffwechselendes eines Organismus, der als archäologische Probe vorliegt, grundsätzlich nicht errechnet werden kann. Für die Bestimmung dieses Zeitpunktes müssen zeitliche Momente ausgewertet werden, in denen Atmosphäre und betrachteter Organismus dieselbe C14-Konzentration gehabt haben. Dabei ist die lange Halbwertszeit von C14 zwar grundsätzlich günstig für die Beschreibung eines Postglazials von rund 12.000 Jahren Länge, erweist sich jedoch im Zusammenhang mit größeren Schwankungen der C14-Konzentration als ungünstig oder sogar unpraktikabel. Die Korrelation eines Probenmeßwertes mit der Kalibrierkurve führt dann zu Mehrdeutigkeiten, d.h. für die Probe kommen unter Umständen zwei oder sogar mehr Absolutdaten in Frage.

### 9.3 C14-Präzisionsmessungen an Baumringen (I)

Da die Debatte um die Realität der »wiggles« in der Kalibrierkurve der Bristlecone-Pine-Chronologie nicht zum Erliegen kam, entschlossen sich schottische Wissenschaftler Ende der siebziger Jahre zu einem Test an einem irischen Eichenholz, das mehr als 250 Jahresringe umfaßte [Campbell et al. 1978]. Sie wollten überprüfen, ob die gemessenen C14-Alter für die aufeinanderfolgenden Jahrringe des Eichenholzes das umstrittene Ausmaß der Schwankung der C14-Konzentration in der Atmosphäre bestätigen konnten.



Die Autoren kamen zu dem Schluß, daß die erhaltene Abfolge der Meßwerte nur auf systematische atmosphärische Schwankungen der C14-Konzentration zurückgeführt werden könne, und nicht etwa auf experimentelle oder sonstige zufällige Fehler. Sie merken an, daß über die betrachtete Periode von 250 Jahren ein genereller Abfall der C14-Konzentration stattgefunden haben müsse (spiegelt sich im Trend wachsender C14-Alter bei jünger werdenden Baumringen). Die hohe Qualität der ausgeführten Messungen spreche für die Realität kurzfristiger Schwankungen der C14-Konzentration in der Atmosphäre. Die Autoren der Studie sprechen sich zwar für die Realität starker Schwankungen der C14-Konzentration in der Atmosphäre aus, äußern sich jedoch nicht über mögliche Ursachen dieser Schwankungen und geben demzufolge auch keine Hinweise quantitativer Natur. Das wollen wir an dieser Stelle nachholen. Es wird sich zeigen, daß die von Campbell et al. aufgedeckten quantitativen Verhältnisse wichtige Hinweise enthalten, daß die Grundannahmen der C14-Methode – insbesondere das Simultanitätsprinzip – nicht in der nötigen Strenge gelten können.

Während Gerade A stationäre C14-Verhältnisse repräsentiert – die Daten ändern sich auf beiden Achsen im Verhältnis 1:1, hier jeweils 250 Jahre –, steht Gerade B für erheblich erhöhte Produktion von C14 über einen Zeitraum von hier 50 Jahren. Die Gerade C zeigt einen noch wesentlich höheren Trend. Die Überproduktion bezüglich B sorgt binnen 113 Jahren für eine Aktivitätssteigerung, die 434 C14-Jahre an zusätzlichem Altersunterschied ausmacht. Das ist gleichbedeutend mit einer Aktivitätssteigerung von 5.2 % in besagten 113 Jahren (vgl. Textbox 7.7 für die Faustformel: 1% Aktivitätsänderung = 83 C14-Jahre).

Konventionell – bei einer hypothetischen Jahresproduktion von 7.5 kg und einem dynamisch stabilen C14-Inventar von ca. 62.500 kg – bedeutete das im Fall B eine Erhöhung des C14-Inventars um 3.255 kg in 113 Jahren bzw. von rund 28.8 kg/y. Mithin läge für diesen Zeitraum eine rund 4-fache Überproduktion vor. Für die Gerade C errechnet sich sogar eine 40-fach höhere Überproduktion. Dieses Beispiel zeigt, wie stark kurzfristige Schwankungen sein können und wie unrealistisch zugleich die Annahme ist, daß dieses »wilde« Schwanken über die Jahrtausende kaum 10% »Nettoschwankung« übrig gelassen habe (Daten aus Campbell et al. [1978, 35], zur Berechnungsmethode siehe Bild 9.4). Auch die Geraden D' und E', die allerdings für eine Zunahme des C14-Alters in den jünger werdenden Baumringen stehen, können Aufschluß über die Größenordnung der Produktion entgegenwirkenden Prozesse geben, die sich um eine Größenordnung stärker als der radioaktive Zerfall auswirken. Für D' gilt, daß die Abnahme des C14-Gehaltes 11-mal stärker ausfallen muß, als durch den radioaktiven Zerfall gegeben ist. Und für E' muß diese Abnahme des C14-Gehaltes sogar 24-mal stärker ausfallen, als es der radioaktive Zerfall allein vermag.

Die einzig sinnvolle Erklärung für diese Schwankungen muß zusätzlich zu erheblichen Produktionsschwankungen drastische Diffusionsphänomene zugrundelegen, die kurzfristig und lokal zu starken Erhöhungen bzw. zu starken Absenkungen der C14-Konzentration in der Atmosphäre führen können. Es ist unmöglich, daß sich diese global gleichförmig auswirken. Das Simultanitätsprinzip als Basis für jede relative C14-Chronologie und für die Kalibrierung ist ungültig.

## 9.2 Die Kehrseite der langen Halbwertszeit

Die radiometrische Zukunft einer organischen Probe ist vom Moment ihres Todes an festgelegt – sofern sie komplett gegen Kohlenstoffaustausch abgeschottet ist. Umgekehrt kann ihre radiometrische Vergangenheit zum Zeitpunkt der Ausgrabung bzw. nach der Messung des aktuellen Wertes ihrer Restaktivität vollständig kalkuliert werden – sogar beliebig weit über den tatsächlich ja unbekanntem Todeszeitpunkt hinaus. Im Gegensatz dazu unterliegt der sich zeitlich parallel entwickelnde C14-Anteil der Atmosphäre Einflüssen, deren Gesetzmäßigkeit weitgehend unbekannt ist. Da die Kenntnis dieser Geschichte für die Konvertierung einer C14-Aktivität in ein Absolutalter aber unerlässlich ist, wurde sie schon sehr früh aus dendrochronologisch datierten Proben rekonstruiert, die Jahr für Jahr die jeweils herrschenden atmosphärischen Verhältnisse konserviert haben sollen.

Zur Rekonstruktion dieser jahrgenauen Aufzeichnungen wurde wiederum in umfassender Weise auf C14-Daten zurückgegriffen. Dieser Vorgehensweise lag ein bestimmtes Vorurteil zugrunde: Die C14-Konzentration ändert sich im wesentlichen nur in abgestorbenen Organismen, und zwar durch den radioaktiven Zerfall, ansonsten herrscht überall und seit langer Zeit schon ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Produktion und Zerfall. Jahrzehntelange Feinarbeit an der jahrgenauen Rekonstruktion des atmosphärischen C14-Gehaltes vermochte für die letzten 12.000 Jahre lediglich eine zehnpromtente Absenkung der C14-Konzentration in der Atmosphäre zu enthüllen.

Diese einheitlich in allen veröffentlichten Kalibrierkurven dokumentierte Änderung liegt ziemlich genau eine Größenordnung unterhalb der gesetzmäßigen Änderungsrate durch den radioaktiven Zerfall innerhalb des abgestorbenen Organismus (nämlich 50% in knapp 6.000 Jahren). Damit wäre dann die entscheidende Voraussetzung für die Verwendung der atmosphärischen C14-Geschichte zur Konvertierung von C14-Daten in Absolutalter gegeben: Die Änderung der C14-Konzentration in abgestorbenen Organismen durch den radioaktiven Zerfall muß deutlich stärker ausfallen als die parallel dazu verlaufende Konzentrationsänderung innerhalb der Atmosphäre. Nur so führt der spätere zeitliche Vergleich der beiden Konzentrationsverläufe zu ausreichender Eingrenzung des Zeitpunktes, an dem der Organismus gestorben ist.

Für die Verwendbarkeit von C14-Daten zur zeitlichen Vorsortierung schwimmender Baumringsequenzen gilt im übrigen dasselbe. Wären die Verhältnisse umgekehrt, nämlich atmosphärische Konzentrationsänderungen stärker als die, die durch den radioaktiven Zerfall gegeben sind, so wären Mehrdeutigkeiten programmiert und die C14-Methode als chronologische Hilfs-

wissenschaft insbesondere für die Dendrochronologie unbrauchbar. Einen ersten Eindruck, wie stark sich tatsächlich die C14-Konzentration in der Atmosphäre ändert und wie unsinnig es ist, dies allein auf Produktionsschwankungen zurückzuführen, vermitteln die Bilder **9.3-4**.

Wie sieht nun die Realität aus? Die vorliegenden Meßergebnisse offenbaren unmißverständlich, daß nicht die Konzentrationsabschwächung innerhalb der abgestorbenen Organismen der Haupteffekt ist, sondern Konzentrationsänderungen in der Atmosphäre. Ungeachtet dieser Schlußfolgerung, die sich unmißverständlich aus allen vorliegenden Messungen ergibt, wurde der langfristige Trend für die Atmosphäre unter der Prämisse der Quasikonstanz rekonstruiert und spiegelt diese auch entsprechend wieder.

Hätte man dagegen die vorgefundenen kurzfristigen Konzentrationschwankungen auch nur ein einziges Mal auf die hierfür tatsächlich benötigten Schwankungen der C14-Produktion zurückgeführt, wäre die Idee von jener Quasikonstanz sofort aus der Welt gewesen, denn die Produktion muß periodisch immer wieder um Größenordnungen (etliche 100%) anwachsen und ebensooft negativ werden (tatsächlich ein Diffusionseffekt, s.u.). Ein Schelm, wer von dieser Dynamik erwartet, daß sie über Tausende von Jahren ausgerechnet den dieser Tage gemessenen Aktivitätswert einfriert.

Der ausgewiesene langfristige Trend der bekannten Kalibrierkurven ist artifiziell – Folge des ursprünglich für selbstverständlich erachteten Prinzips konstanter Randbedingungen für die Naturgeschichte. So arbeitet man heutzutage mit Kalibrierkurven, die über ihre gesamte Länge mehrdeutige Zuordnungen zwischen gemessenen C14-Altern und korrelierten Absolutaltern aufweisen, ohne aber der naheliegenden Vermutung Rechnung zu tragen, daß die zugrundeliegende Dynamik dann auch langfristig eine erhebliche Abweichung von stationären Verhältnissen erwarten lassen muß.

Im Kapitel 2.3 wurde die »Chronik einer Kumpanei« rekonstruiert, die die systematische Negierung von Meßwerten offenlegt, die ein erhebliches Ungleichgewicht des atmosphärischen C14 belegen. Die Geschichte des atmosphärischen C14 ist offenbar fehlerhaft rekonstruiert worden und die zurückliegenden Absolutdatierungen mit Hilfe der C14-Methode müssen deshalb grundsätzlich falsch sein.

### 9.3 Der radiometrische Tunnel

Während seiner ganzen Lebensspanne stellt jeder Organismus, dessen Stoffwechsel direkt oder auch indirekt die Atmosphäre miteinbezieht, ein mehr oder weniger getreues Abbild der aktuellen atmosphärischen C14-Konzentra-

## 9.4 C14-Präzisionsmessungen an Baumringen (II)

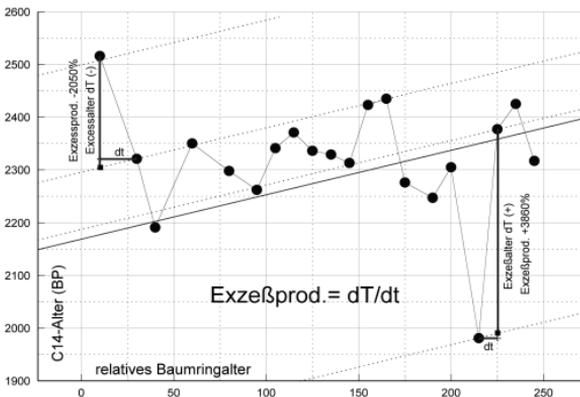
Die aufgetragenen Meßwerte entsprechen denen aus Bild 9.3. Hier wird die Steigung der Verbindungslinien zwischen den einzelnen Meßwerten in eine »Exzeß-« bzw. »Überproduktion« umgerechnet. Wenn die Verbindungslinie zwischen zwei Meßwerten die Steigung 1 hat, d.h. wenn der Unterschied im C14-Alter gleich dem Unterschied des Absolutalters ist, dann haben beide Proben bei derselben C14-Aktivität ihren Stoffwechsel beendet (alle in dem Bild verlaufenden Geraden sind zueinander parallel und haben die Steigung 1). Liegen die Meßwerte hingegen nicht auf derselben Geraden mit der Steigung 1, so hatten sie auch nicht dieselbe Startaktivität. Es geht also darum, den Unterschied in der Startaktivität zu bestimmen, um daraus im Hinblick auf die Zeit, die zwischen den Meßwerten liegt, die für diese Änderung der Startaktivität benötigte Erhöhung oder Erniedrigung der angeblich stationären Produktionsrate von ca. 7.5 kg C14 pro Jahr zu berechnen:

- Die vertikale Parallelverschiebung zwischen den beiden Geraden mit der Steigung 1 bedeutet das Exzeßalter  $dT$  (Beispiel: 415 C14-Jahre)
- Dieses Exzeßalter  $dT$  wird in den Unterschied der Startaktivität umgerechnet (Beispiel:  $415/8300 = 5\%$ ) und die Absolutaltersdifferenz  $dt$  bestimmt (Beispiel: 15 Kalenderjahre)
- Dem Unterschied in der Startaktivität entspricht eine bestimmte Differenz im C14-Absolutvorkommen (Beispiel: 5% von 62.500 kg gleich 3125 kg)
- Dieser Unterschied im C14-Absolutvorkommen muß in der Zeit  $dt$  erzeugt werden, d.h. mit einer während der fraglichen Zeit gleichbleibenden Änderungsrate des Vorkommens (Beispiel:  $3125\text{kg}/15\text{y} = 208\text{ kg/y}$ )

- Diese mittlere Änderung kann in Bezug zu der stationären Produktionsrate von 7.5 kg/y gesetzt und als Exzeßproduktion definiert werden (Beispiel:  $208/7.5 = 2800\%$ )

- Die Formel für diese Exzeßproduktion lautet zusammengefaßt:  $dT/dt$

Wenn die Exzeßproduktion deutlich geringer als die stationäre Produktionsrate bleiben soll, dann darf die Abweichung der Steigung der Kalibrierkurve von der Winkelhalbierenden nur wenige Grad betragen. Quasi-Stationarität verlangt die Abbildung der Winkelhalbierenden mit geringfügigen, überlagerten Schwingungen. Tatsächlich trägt nicht nur eine Exzeßproduktion, sondern eine Vielfalt von Ursachen zu der realen Gestalt der Kalibrierkurve bei.



Wenn die Exzeßproduktion deutlich geringer als die stationäre Produktionsrate bleiben soll, dann darf die Abweichung der Steigung der Kalibrierkurve von der Winkelhalbierenden nur wenige Grad betragen. Quasi-Stationarität verlangt die Abbildung der Winkelhalbierenden mit geringfügigen, überlagerten Schwingungen. Tatsächlich trägt nicht nur eine Exzeßproduktion, sondern eine Vielfalt von Ursachen zu der realen Gestalt der Kalibrierkurve bei.

tion dar. Innerhalb der nicht-recyclebaren Bereiche eines Organismus kommt es nach dem Stoffwechselnde zu einem monotonen Prozeß, wonach die C14-Konzentration im wesentlichen nur noch durch radioaktiven Zerfall geändert d.h. gemindert wird.

Die restlichen Bereiche des Organismus werden hingegen von der Umgebung »recycelt« und nehmen damit erneut direkten Anteil an der durch diverse Mechanismen hervorgerufenen Zu- oder Abnahme der C14-Konzentration. Im Rahmen der C14-Methode muß also

- 1) der Verlauf der atmosphärischen C14-Konzentration während der historisch relevanten Vergangenheit und
- 2) der Verlauf der C14-Konzentration innerhalb des von jeglichem Austausch isolierten Bereiches eines zuvor gestorbenen Organismus

bekannt sein. Der untersuchte Rest eines Organismus repräsentiert unter Umständen nicht nur die einstige C14-Konzentration der Atmosphäre, sondern auch die Geschichte einer nicht vollkommenen Isolation während der Lagerung und möglicher Verfälschungen während der anschließenden Prozedur der Probengewinnung, -aufbereitung und -vermessung. Erst mit Hilfe unterschiedlicher routinemäßig angebrachter Korrekturen wird die Basis gelegt für die Rekonstruktion des Wertes der C14-Konzentration der Atmosphäre, der zu Lebzeiten des Organismus herrschte (siehe dazu das ganze Kapitel 8).

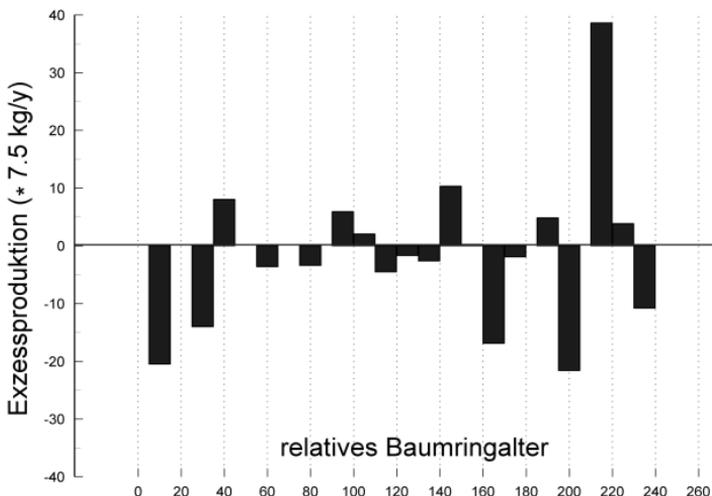
Damit gleicht der Verlauf der C14-Konzentration in dem Bereich des Organismus, der nach dem Stoffwechselnde isoliert wird, einem radiometrischen Tunnel, der sich von dem der Atmosphäre abspaltet und dessen Mündung später in Form einer Messung bestimmt wird (vergleiche Bild **9.6**)<sup>29</sup>. Der Ausgräber fragt sich natürlich, an welchem Punkt der Vergangenheit diese Abspaltung stattgefunden hat. Aber nur wenn ihm die komplette Historie des C14-Inventars der Erdatmosphäre bekannt ist (und zwar für den Ort, an dem seine Probe gelebt hatte) und er zugleich alle Abweichungen von dem exponentiellen Verlauf durch Kontamination etc. korrigieren kann, hat er einen Schlüssel zur Absolutdatierung in der Hand.

<sup>29</sup> Der radiometrische Tunnel steht für die rechnerische Rekonstruktion der C14-Konzentration innerhalb der Probe auf der Grundlage eines einzigen Meßwertes. Um aber das Datum des Stoffwechselendes berechnen zu können, muß man wissen, wo der Beginn dieses Tunnels ist. Dieser erschließt sich nur aus gegenwärtig vermessenen Proben bekannten Alters aus möglichst unterschiedlichen Zeiten. Dadurch wird es möglich, ohne Berechnung der Vergangenheit und nur durch einen Vergleich von Meßwerten zu dem gewünschten Datum zu kommen (vergleiche dazu die Bilder **7.1** und **9.1**). Das Bild vom »radiometrischen Tunnel« ist hilfreich, um das Mehrdeutigkeitsproblem des Abspaltungszeitpunktes einerseits und die »Verbiegungen« durch Kontamination etc. andererseits herauszustellen.

## 9.5 Exzeßproduktion und -diffusion

Das Bild schlüsselt quantitative Ursachen für die in Bild 9.3 dargelegten Konzentrationsverhältnisse bzw. -änderungen für C14 in der Atmosphäre auf. Es wird dabei vorausgesetzt, daß die Diffusion des C14 von der Atmosphäre in die Ozeane grundsätzlich derart vom Konzentrationsgradienten abhängt, daß sich jede Konzentrationsänderung in der Atmosphäre entsprechend in den Konzentrationsverhältnissen für die Ozeane abbildet. Anderenfalls liegt die Exzeß- bzw. Überschußproduktion entsprechend niedriger. Die Abhängigkeit der Diffusionsrate von dem Konzentrationsgradienten ist wichtig, weil die Atmosphäre, in der das C14 produziert wird, weniger als 2% des globalen C14-Vorrats enthält, die Ozeane hingegen den Löwenanteil von über 90%.

Selbst wenn die hier zu verzeichnenden extrem hohen Exzeßproduktionswerte teilweise auf unzureichende Diffusion des C14 in die Ozeane zurückzuführen sind, bleibt der Widerspruch zwischen der ausgewiesenen lokalen Tendenz in der Kalibrierkurve und der Stationaritätsannahme evident. Letztere verlangt nämlich, daß sich die positiven und negativen Exzeßproduktionen im Mittel aufheben, d.h. daß sich die positiven und negativen Beiträge kurzfristig stets zu Null addieren müssen. Dann wäre zu erwarten, daß die Exzeßproduktion im Rahmen einiger Prozent bleiben würde, jedenfalls nicht hunderte bzw. tausende Prozent betragen könnte. Sollte die Diffusion des C14 (bzw. des C14-angereicherten CO<sub>2</sub>) von der Atmosphäre in die Ozeane tatsächlich derart eingeschränkt sein, daß Konzentrationsänderungen in der Atmosphäre sich nicht automatisch in den Ozeanen abbilden würden, so wäre man auf jeden Fall mit dem Problem konfrontiert, daß die Ozeane ungesättigte Reservoirs darstellen, deren Strömungscharakteristiken die C14-Konzentration der Atmosphäre offensichtlich temporär nachhaltig absenken können und schon von daher die Stationaritätsannahme in Frage stellen müssen



Um das Absolutalter der fraglichen Probe bestimmen zu können, muß die Historie der atmosphärischen C14-Konzentration Jahr für Jahr mit der kalkulierten Historie der fraglichen Probe verglichen werden. Wenn es nur einen Zeitpunkt gibt, an dem beider Konzentrationen gleich sind, dann ist eine eindeutige Datierung möglich. Allgemein betrachtet kann es natürlich mehrere verschiedene Zeitpunkte geben, an denen die Konzentrationen jeweils gleich gewesen sind. Im Falle dieser Mehrdeutigkeit müssen zusätzliche Kriterien zur Auswahl eines der Daten herangezogen werden.

Der C14-Wissenschaftler ist also einem Doppelproblem ausgesetzt. Zum einen muß er im Besitz der kompletten Historie des C14-Inventars der Erdatmosphäre sein. Zum anderen kann ihm der zeitliche Verlauf der Konzentration einen Streich spielen, indem er durch den Abgleich dieser Historie mit der entsprechenden Historie seiner zu datierenden Probe zeitlich deutlich auseinanderliegende Schnittpunkte erhält. Was nützt ihm die exakte Berechenbarkeit der Probenhistorie, wenn deren radiometrischer Tunnel an mehreren unterschiedlichen Punkten in die Vergangenheit hineinragt?

Obwohl nach einhelliger Meinung der C14-Wissenschaftler das Gefälle dieses Tunnels stark genug ist, um sich rasch von der nicht völlig konstanten C14-Konzentration der Atmosphäre zu trennen, müssen sie dennoch für den Zeitraum von einigen Jahrhunderten um das tatsächlichen Stoffwechselende herum ein Mehrdeutigkeitsproblem feststellen. Wie mit ihm umgegangen wird und welche Gefahren darin liegen können, soll im folgenden Abschnitt auseinandergesetzt werden.

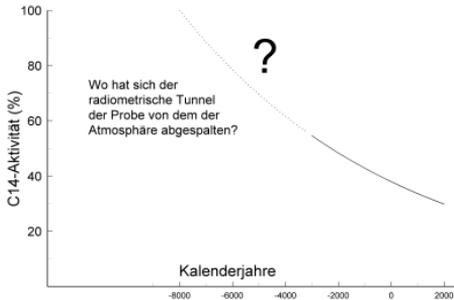
## 9.4 Das Mehrdeutigkeitsproblem

Die C14-Wissenschaft kennt dieses Mehrdeutigkeitsproblem in der Bestimmung des Stoffwechselendes nur in Gestalt sogenannter »wiggles«. Darunter versteht man kurzperiodische, gleichwohl starke Schwankungen des C14-Gehaltes in jahrgenauen Baumringfolgen. Diese spiegeln einen so starken zeitlichen Abfall der C14-Konzentration in der Atmosphäre wieder, daß ein erneuter Anstieg nach typisch 100-200 Jahren einen gewissen Bereich zurückliegender »C14-Alter« dupliziert (vergleiche Bild **2.7**).

Wenn diese Schwankungen ausreichend groß sind und dicht genug aufeinander folgen, dann kann dieser Effekt sogar mehrfach hintereinander auftreten. Auf diese Weise steht für manche C14-Alter ein Strauß alternativer Todesdaten zur Verfügung, die einen Zeitraum von etlichen Jahrhunderten aufspannen können. Auch nach offizieller Lesart ist keine eindeutige Korrelation zwischen der C14-Geschichte der Atmosphäre und der rückgerechneten

## 9.6 Das Problem der Mehrdeutigkeit

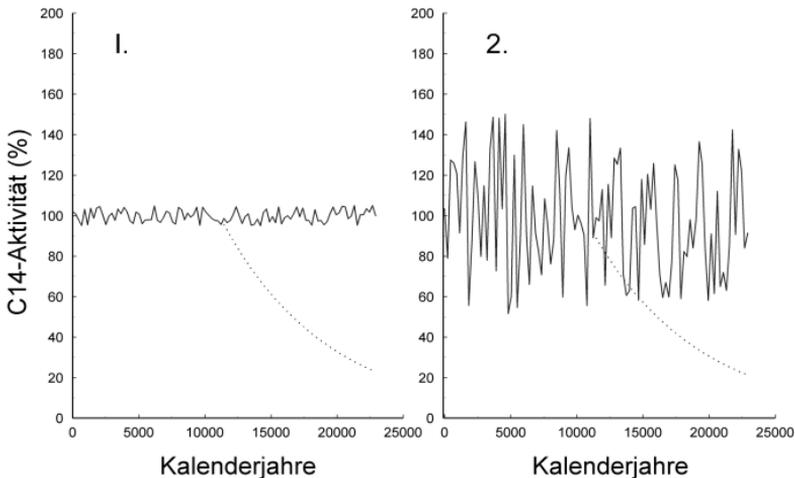
In beiden Diagrammen wird ein bestimmter zeitlicher Verlauf der C14-Konzentration in der Atmosphäre wiedergegeben. Im Diagramm 1 (links) ist die mittlere Schwankung der Konzentration unter 5 %, im Diagramm 2 (rechts) beträgt diese im Mittel  $\pm 25\%$ , was von der Stärke her den in Bild **9.3** aufgeführten Schwankungen entspricht.



Die Schwankungsbreite im Diagramm 1 ist niedrig genug, um – Kenntnis der Chronologie der C14-Konzentration vorausgesetzt – den Zeitpunkt des Stoffwechselendes (hier zum Zeitpunkt »11.460«) der untersuchten Probe grundsätzlich identifizierbar zu machen. Im Diagramm 2 hingegen ist die Schwankungsbreite so hoch, daß eine Retrokalkulation sinnlos ist, weil über einen langen Zeitraum der Lagerung (und sogar noch weit davor!) vielzu-

viele mögliche Zeitpunkte des Stoffwechselendes existieren. Die Methode kann unter diesen Umständen nicht verwendet werden.

Das im Diagramm 2 gegebene Mehrdeutigkeitsproblem kann nicht akut werden, solange man sich auf Meßergebnisse bezüglich solcher Baumarten konzentriert, die sich eng an die Ausgleichskurve anpassen lassen, die für stationäre Verhältnisse steht. Das gilt gleichermaßen für die Interpretation von »Fehlringen«, die sich nicht unbedingt auf forstbotanische Indizien stützt, sondern auf die Stärke der Abweichung gefundener C14-Konzentrationsverläufe von besagter Idealkurve (dazu auch Kapitel 2.7).



C14-Geschichte der Probe möglich, weil in der Vergangenheit zu unterschiedlichen Zeitpunkten immer wieder C14-Aktivitäten herrschten, die sich heute jeweils in derselben Restaktivität widerspiegeln.

Während diese Uneindeutigkeit ein echtes Handicap für die Praktikabilität der C14-Methode darstellt, werden die damit verbundenen charakteristisch gewundenen C14-Muster benutzt, um Synchronismen zwischen Baumringfolgen zu finden, für die nach herkömmlichen dendrochronologischen Maßstäben keine ausreichenden Vergleichskriterien existieren. Das hat seinen Grund immer wieder in mangelnder Korrelation der jeweiligen Mikroklimata, die zu unähnlichen Wuchsbreiten der Jahresringe gleichzeitig wachsender Bäume aus entsprechend weit auseinanderliegenden Regionen führen müssen.

Seit dem Bekanntwerden dieser Muster etwa um 1960 galt folgerichtig die Identität einzelner C14-Aktivitäten in unterschiedlichen Proben nicht mehr als Ausweis gleichen absoluten Alters. Hingegen wird die Übereinstimmung gleicher C14-Muster in unterschiedlichen Proben als Beweis für eine zeitgleiche Entstehung verwendet (= Simultanitätsprinzip). Die entscheidende Frage lautet nun: Wieviele Jahre muß ein solches Muster mindestens umfassen, damit eine tatsächliche Ungleichzeitigkeit ausgeschlossen ist, denn diese Muster könnten ja nun ebenfalls unterschiedlichen Zeiten entstammen? Die Literatur gibt auf diese Frage keine Antwort, ja, stellt diese Frage nicht einmal.

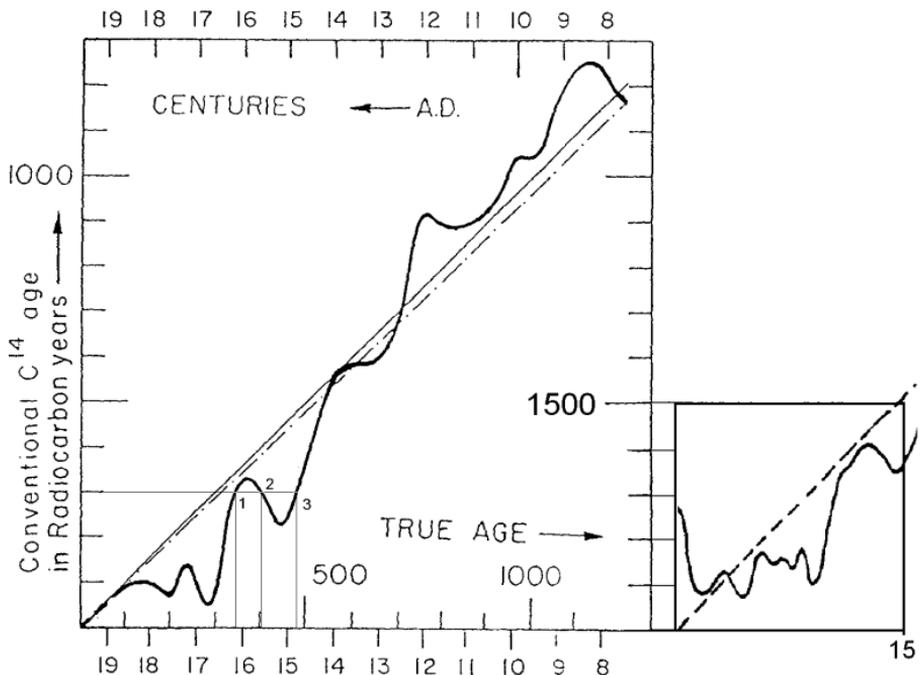
Niemand hatte bis etwa 1960 ernsthaft daran gezweifelt, daß sich der C14-Gehalt der Erdatmosphäre zumindest für die vor- und frühgeschichtliche Zeit des Postglazial auf einem vollkommen gleichmäßigen Niveau befunden haben muß. Dank dieser gerne geglaubten »Selbstverständlichkeit« konnte ein Mehrdeutigkeitsproblem also gar nicht erst auftauchen. Selbst als dann klar wurde, daß der C14-Gehalt der Atmosphäre schwankt (Bild **9.12-13**), war man ausnahmslos davon überzeugt, daß sich der übergeordnete Trend nach wie vor in diesem konstanten Niveau widerspiegelt, so daß lediglich mit kurzfristigen Verzerrungen eines langfristig jedenfalls gleichbleibenden Wertes zu rechnen wäre (vergleiche Bild **9.7**). Erst mit der ersten lückenlosen, rund 7.000 Jahre umfassenden Baumringchronologie von C.W. Ferguson wurde eine zusätzliche Tendenz offenbart, die einen Abfall der C14-Produktion und damit auch der C14-Aktivität in der Atmosphäre um rund 10% über diesen Jahrtausendelangen Zeitraum aufwies.

Damit war der übergeordnete Trend der Kurve aber immer noch so gleichförmig, daß einzelne C14-Werte nach wie vor wenigstens für eine relative Chronologie verwendet werden konnten. Niemand wäre auf die Idee gekommen, die chronologische Abfolge zweier Proben, die beispielsweise um 500 oder, radikaler noch, um 1.000 C14-Jahre auseinanderliegen, umzukeh-

## 9.7 Frühe Kalibriervisionen (II)

Das Bild links [aus Suess 1970b, 161] zeigt den Stand der Kalibrierung von 1970 für das jüngste Jahrtausend. Bereits zu diesem Zeitpunkt war deutlich, daß gerade die jüngsten und zweifelsfrei (nämlich historisch) vordatierten Proben ein fatales Schwankungsverhalten aufwiesen, das zudem auf Produktionsdichten (mit  $\pm$  Vorzeichen) für C14 hinwies, die bereits damals als groß gegen die Veränderungen aus dem radioaktiven Zerfall anzusprechen gewesen wären.

Wie sehr H.E. Suess der Idee verfallen war, daß allzeit konstante Verhältnisse – nämlich die von heute – herrschen müßten, wird auch durch die gewaltsame Anbindung der Kalibrierkurve an die Winkelhalbierende bzw. an den Koordinatenursprung deutlich (vgl. dagegen das kleine Bild rechts [Grey et al. 1970, 171]). So werden momentane Gegebenheiten kompromißlos in die Vergangenheit fortgeschrieben. Nimmt man dagegen gerade die für die jüngste Vergangenheit aufgefundenen Konzentrationsschwankungen ernst (siehe Bild 5.3), so ist eine Fortschreibung des übergeordneten Trends in die Vergangenheit – theoretisch gesehen – aus einer einzigen aktuellen Momentaufnahme unververtretbar. Wir müssen davon ausgehen, daß wesentliche C14-Vordatierungen für die Dendrochronologie von dieser fixen Idee infiziert gewesen sind. Die unzutreffende Interpretation dieser C14-Daten hat in den entscheidenden Phasen der Erstellung dieser Chronologien, die später selber wieder für die Kalibrierung verwendet wurden, zu grundlegend falschen Synchronismen geführt.



ren und so wurde auch die zeitliche Synchronität ähnlicher Muster, die jeweils erheblich kürzere Zeiträume überdecken, niemals in Frage gestellt.

Bislang ist noch nicht die Überlegung angestellt worden, ob sich die Konzentration von C14 in der Atmosphäre nachhaltig und dauerhaft stärker ändern kann, als größenordnungsmäßig durch die Halbwertszeit von C14 vorgegeben wird. Das darf als fahrlässige Behandlung der vorliegenden Tatsachen bewertet werden: Einerseits vollzieht sich infolge der langen Halbwertszeit von C14 die Abnahme der C14-Konzentration innerhalb isolierter Proben nur »schleichend«. Andererseits ist die sensible Abhängigkeit der Atmosphärenzusammensetzung und damit auch die des Verlaufs der C14-Konzentration vom Großklima in den »wiggles« dokumentiert. Es gibt also allen Grund, eine entsprechende Dynamik nicht nur des kurzfristigen sondern auch des mittel- und langfristigen Verlaufs der atmosphärischen C14-Konzentration zu erwarten.

Innerhalb des Zeitraumes, in dem die Änderungsrate der C14-Konzentration in der Atmosphäre einmal positiv und darauf hin wieder negativ ist – und zwar negativer als durch den radioaktiven Zerfall allein –, kommt es zwangsläufig zu einer Verdoppelung heutzutage gemessener C14-Restaktivitäten. Eine Verdoppelung könnte es nicht geben, wenn jene Änderungsrate Null wäre, d.h. wenn sich die C14-Produktion auf der einen Seite und radioaktiver Zerfall sowie die Abwanderung in die umgebenden Reservoirs auf der anderen Seite dauerhaft die Waage halten würden.

Da aber die drei genannten Ursachen für eine Änderung der C14-Konzentration in der Atmosphäre – Produktion, Zerfall, Diffusion – voneinander unabhängig bzw. voneinander entkoppelt ablaufen, ist eine gegenseitige Kompensation nicht zu erwarten. Dabei fällt bekanntermaßen die Konzentrationsänderung durch radioaktiven Zerfall so extrem niedrig aus, daß auch an sich gering erscheinende Effekte hinsichtlich der Produktion und der Diffusion zu einer signifikanten Änderung der C14-Konzentration in der Atmosphäre führen werden.

Die chronologische Vorsortierung C14-datierter Proben im Sinne einer relativen Chronologie führt zwangsläufig in die Irre, wenn ein ausreichend monotonen Verhalten der C14-Aktivität in der Atmosphäre tatsächlich gar nicht gegeben ist. Demnach ist eine relative Chronologie überhaupt nur für solche Proben sinnvoll zu erstellen, deren einzeln vorliegende C14-Alter deutlich weiter auseinanderliegen, als durch die Periode nachgewiesener »wiggles« für diesen Zeitraum gegeben ist. Die einzige zusammenhängende Geschichte über die C14-Vergangenheit der Atmosphäre liegt mit verschiedenen Baumringchronologien vor. Die Tatsache, daß ihre Konstruktion fundamental auf

dem mittel- und langfristig monotonen Verhalten der C14-Aktivität basiert, birgt Explosivstoff für alle daran vor- bzw. hilfskalibrierten C14-Chronologien, solange die Möglichkeit größerer Schwankungen nicht ausgeschlossen werden konnte (Bilder **9.3-5** und **9.13**).

## 9.5 Die Formeln – im einfachsten Fall

Wir haben beschrieben, daß für eine C14-Datierung die Restaktivität der untersuchten Probe mit den Restaktivitäten einer Folge absolutdatierter Proben abgeglichen werden muß, um so den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem die Probe ihre atmosphärische Kopplung via Stoffwechsel beendete und einen unabhängigen, divergenten Konzentrationsverlauf infolge des radioaktiven Zerfalls startete.

Dieser Vergleichsmaßstab, bestehend aus einer Folge absolutdatierter Proben, soll zugleich die Geschichte der atmosphärischen C14-Konzentration repräsentieren, denn jede dieser Proben offenbart mit der gemessenen Restaktivität unter bestimmten Voraussetzungen die Information über die zum Zeitpunkt ihres Stoffwechselendes herrschende C14-Konzentration in der Atmosphäre: Restaktivität und Startaktivität sind solange zueinander äquivalent, wie zwischen den beiden Zeitpunkten – dem des Stoffwechselendes und dem der Messung – die aktuelle Aktivität jeweils nur durch den radioaktiven Zerfall verändert wurde. Daß diese Äquivalenz eine Illusion ist, spiegelt sich auch darin wieder, daß die zur Messung kommenden Proben z.B. stets chemisch gewaschen werden müssen, um etwaige Kontaminationen insbesondere während der Lagerzeit rückgängig machen zu können.

Die Formel für die zeitliche Änderung der Menge oder Dichte  $A(t)$  eines radioaktiven Vorkommens, das definitiv keinen Teilchenaustausch mit seiner Umgebung vollzieht, lautet:

$$A(t) = A(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \quad \text{IX.1}$$

Damit kann diese bei Kenntnis der Menge  $A$  zu irgendeinem Zeitpunkt  $t'$  zu jedem beliebigen anderen Zeitpunkt  $t$  errechnet werden. Diese Formel ist aus dem Ansatz, daß die Menge an zerfallenden Elementen proportional zu der vorhandenen Gesamtmenge ist, durch eine Integration entstanden. Der entsprechende Ansatz lautet:

$$dA \sim -A(t) \quad \text{IX.2}$$

oder gleichbedeutend:

$$dA/dt = -\lambda \cdot A(t) \quad \text{IX.3}$$

Die Formel  $A(t) = A(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')}$  resultiert aus der direkt beobachteten Formel  $dA \sim -A(t)$ , und erlaubt unter Kenntnis der seinerzeit vorliegenden Menge  $A(t')$  einerseits und der momentan vorliegenden Menge  $A(t)$  andererseits die Umrechnung auf die verstrichene Zeit  $(t - t')$ :

$$t - t' = -1/\lambda \cdot \ln[A(t)/A(t')] \quad \text{IX.4}$$

Die wesentliche Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Formel besteht darin, daß das Vorkommen in seiner Zusammensetzung ausschließlich durch den radioaktiven Zerfall geändert wird. Solange das gegeben ist, liegen Vergangenheit und Zukunft der Probe (jedenfalls in radiometrischer Hinsicht) fest und können unter Kenntnis zweier entsprechender Meßwerte vollständig erschlossen, d.h. errechnet werden.

Für die Beschreibung der tatsächlichen Umstände – für eine einzelne abgestorbene Probe oder für die Atmosphäre als Ganzes – kann diese einfache Formel nicht greifen. Dann muß eine komplette Bilanzgleichung erstellt werden, die alle über den radioaktiven Zerfall hinausgehenden Einflußmöglichkeiten zu berücksichtigen hat.

## 9.6 Der allgemeine Fall

Die eben diskutierte Formel bildet den Spezialfall einer Bilanzgleichung, die alle Ursachen für die zeitliche Änderung einer mengenmäßig bilanzierbaren Meßgröße innerhalb eines bestimmten Volumens berücksichtigt. Diese Bilanzgleichung (vergleiche Anhang 9.11) müssen wir automatisch ansetzen, sowie wir nicht mehr ausschließlich den Bereich einer organischen Probe betrachten, der tatsächlich von jedem weiteren Stoffwechsel isoliert ist. Selbstverständlich gilt das auch, wenn etwa die Erdatmosphäre als Ganzes zu betrachten ist. Sie ist nicht isoliert, sondern steht im Austausch mit der Biosphäre und den Ozeanen.

Es werden vier verschiedene Vorgänge unterschieden, die die Zusammensetzung eines Systems hinsichtlich der zu bilanzierenden Größe beeinflussen können:

## 9.8 Ursachen für lokale Änderungen der C14-Konzentration

Aufzählung möglicher Ursachen zeitlicher Änderungen  $dA/dt$  der Konzentration A von C14 in verschiedenen Systemen führen: Proben, Ozeane, Atmosphäre

$\pm$	$dA/dt$ ...	Probe	Ozeane	Atmosphäre
+	durch <u>Zufluß</u> aus ...	... direkter Umgebung (Kontamination)	... Atmosphäre, Biosphäre, Sedimenten, Lava etc.	... Ozeanen, Biosphäre, Vulkanen
-	durch <u>Abfluß</u> in ...	... die direkte Umgebung (De-kontamination)	... Atmosphäre, Biosphäre, Sedimenten, Lava etc.	... Ozeane, Biosphäre
+	durch <u>Produktion</u> ...	... »in situ«	-	... aus N14
-	durch <u>Vernichtung</u> infolge ...	... radioaktiven Zerfalls (proportional zur lokalen Konzentration)		

Der hellgrau unterlegte Bereich in der Spalte »Probe« soll signalisieren, daß hier im Normalfall kein Beitrag zur Änderung von A(t) erwartet wird

Nr.	Einfluß auf die Konzentration durch	Bemerkung
1.	Zuflüsse	jeweils über die Volumensbegrenzungen hinweg
2.	Abflüsse	
3.	Produktion	jeweils innerhalb der Volumensbegrenzungen
4.	Vernichtung	

Es sei angemerkt, daß im Zusammenhang mit einer isolierten Probe nur der Punkt 4 »Vernichtung« von Bedeutung ist, obwohl zeitweise auch Punkt 3, nämlich eine »in situ«-Produktion von C14, diskutiert, aber letztlich verworfen worden ist (vergleiche Kapitel 8.3.3). Tatsächlich ist aber immer mit Zu- und Abflüssen von Kohlenstoff anderer Zusammensetzung zu rechnen, die die im vorangegangenen Abschnitt diskutierte Äquivalenz von Restaktivität und Startaktivität in Frage stellt.

Die Tabelle **9.8** identifiziert für verschiedene Systeme die möglichen Beiträge zur internen Änderung der C14-Konzentration  $A(t)$ . Die Grautönung der auf die isolierte Probe bezogenen ersten drei Bereiche signalisiert, daß hier im Normalfall kein Beitrag zur Änderung von  $A(t)$  erwartet wird und daß folglich nur die Vernichtung durch radioaktiven Zerfall zu berücksichtigen ist. Die oben näher erläuterte Formel **IX.3**

$$dA/dt = -\lambda \cdot A(t)$$

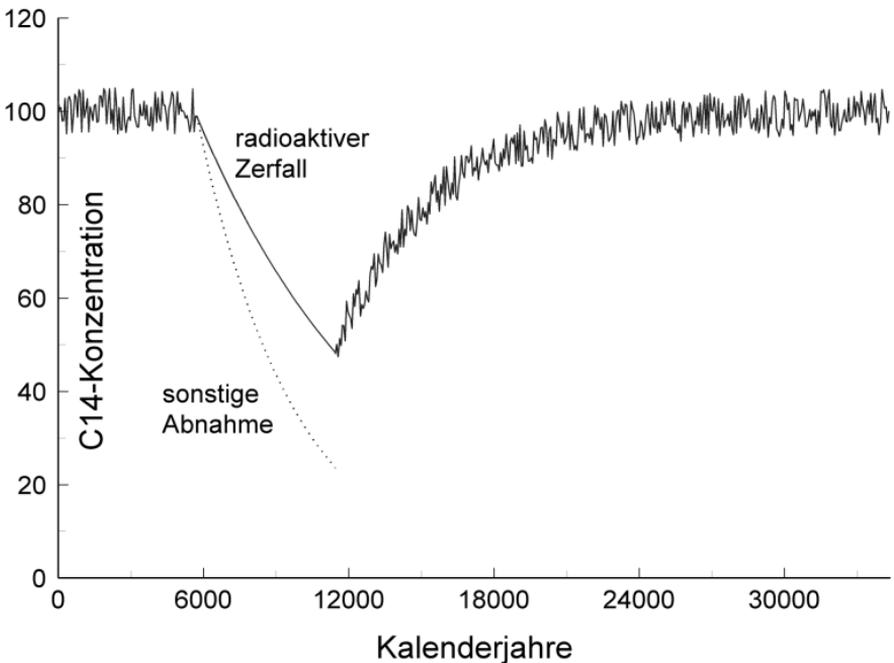
ist tatsächlich nur als ein Spezialfall der allgemeinen Form einer Bilanzgleichung, die alle 4 Terme berücksichtigt, zu verstehen. Bei den Systemen »Ozean« bzw. »Atmosphäre« ist die Wechselbeziehung der Zu- und Abflüsse zu erkennen. Wenn diese in der vor- und frühgeschichtlichen Zeit nicht konstant waren, dann gibt es keine realistische Aussicht, daß trotz größerer Änderungen über die letzten 12.000 Jahre dennoch ein Quasi-Gleichgewicht mit dem radioaktiven Zerfall eingehalten wurde. Das wesentliche Merkmal der beiden Vorgänge 1 und 2 besteht darin, daß Zu- bzw. Abflüsse (für das betrachtete Volumen gerechnet) immer Ab- bzw. Zuflüsse auf die Umgebung bezogen bedeuten, mit anderen Worten: die derart bilanzierten Mengen bleiben »in der Welt«, sie ändern tatsächlich nur ihren Ort (und nicht etwa eine Eigenschaft), indem sie unverändert über die betrachteten Systemgrenzen wandern. Deshalb spricht man auch von Flußtermen.

Die beiden Vorgänge 3 und 4 – Produktion und Vernichtung – beschreiben dagegen Vorgänge, durch die die Menge des betrachteten Elements »in

## 9.9 C14-Verarmung der Atmosphäre

Das Bild zeigt den Verlauf der C14-Konzentration, wenn zum Zeitpunkt »5730« die Produktion an C14 und auch alle sonstigen zur C14-Konzentrationsänderung in der Atmosphäre beitragenden Effekte bis auf den radioaktiven Zerfall komplett ausgeschaltet werden. Die Konzentration des C14 nimmt nunmehr exponentiell in allen Bereichen ab, die der Graphik zufolge von »0« bis »5730« in einem dynamischen Gleichgewicht von Produktion und Zerfall standen. In der Zeit von »5730« bis »11460« weist die Atmosphäre also dieselbe C14-Konzentration auf, wie alle in diesem Zeitraum gestorbenen Organismen.

Die obere der beiden abfallenden Kurven spiegelt die Abnahme der Konzentration ausschließlich aus dem radioaktiven Zerfall wider und gilt in diesem Fall sowohl für die Atmosphäre als auch für jeden in dieser Zeit gestorbenen Organismus. In einer zugeordneten Kalibrierkurve würde die Kurve jetzt waagrecht verlaufen. Die untere Kurve weist hingegen auf einen zusätzlichen Effekt hin, der zu einer verstärkten Verarmung der Atmosphäre an C14 führt. In einer zugeordneten Kalibrierkurve wechselte die Steigung nunmehr das Vorzeichen. Alle in dieser Zeit später abgestorbenen Organismen weisen eine niedrigere Startaktivität als die jeweils zuvor gestorbenen Organismen auf und zeigen somit eine höhere C14-Alter als diese.



der Welt« effektiv zu- oder abnimmt. Es geht also um Anteile der betrachteten Menge, die innerhalb des Volumens auftauchen und nicht zugleich anderen Systemen entzogen werden, oder die aus dem Volumen verschwinden, ohne in irgendeinem anderen System der Welt wieder aufzutauchen. In gewisser Weise kann man sagen, daß sich innerhalb des Volumens eine Eigenschaft ändert.

Wie sind diese vier Terme zu interpretieren, wenn wir als Volumen die Erdatmosphäre und als mengenmäßig zu bilanzierende Meßgröße die Anzahl der C14-Atome betrachten? Eine Produktion von C14 geschieht innerhalb der Atmosphäre, indem sich N14-Atome durch Einwirkung kosmischer Strahlung in C14-Atome verwandeln. Die umgehende Oxidation in radioaktives Kohlendioxid (was natürlich einer »Vernichtung« von C14 im bilanztechnischen Sinne entspricht) wollen wir nur insoweit betrachten, als C14 nunmehr sehr effektiv über die Systemgrenzen – nämlich via Diffusion in die Ozeane und via Stoffwechsel auch in alle Organismen – wandern kann, wodurch die Flußterme überhaupt erst zustande kommen können.

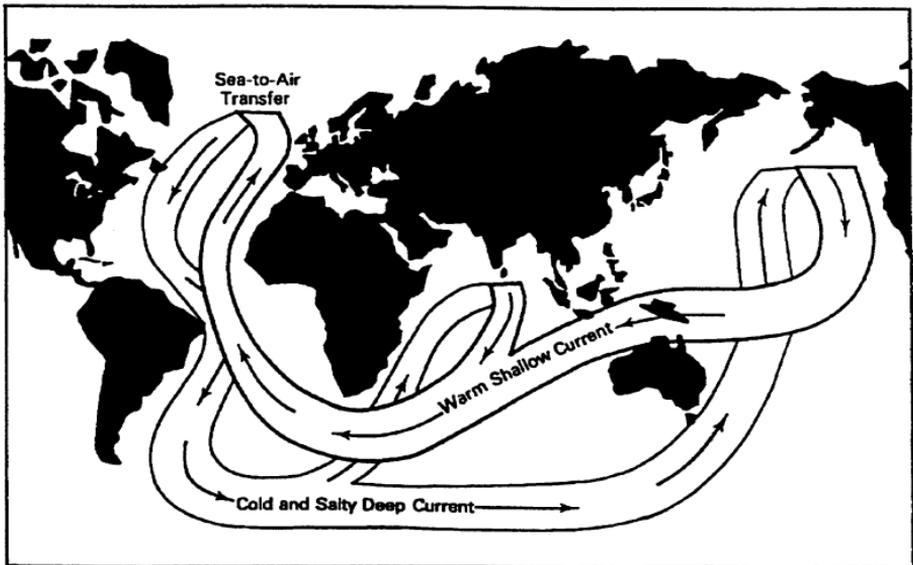
Während an der Systemgrenze zwischen Atmosphäre und Ozean die Diffusionsrate für C14 in beide Richtungen grundsätzlich gleichwahrscheinlich ist, bedingt die Art des jeweiligen organischen Stoffwechsels eine gewisse Bindung des vom Organismus aufgenommenen C14. Es hat eine mehr oder weniger hohe mittlere Aufenthaltsdauer innerhalb des Organismus, die sich für bestimmte Bereiche (Knochen, Holzbereiche) nach dem Stoffwechselende noch einmal schlagartig erhöhen kann. Dieser Effekt ist natürlich die Grundlage für die C14-Datierung. Eine Vernichtung von C14 geschieht in allen Fällen ausschließlich durch den radioaktiven Zerfall.

Unter welchen Bedingungen kann nun der Zustand der Atmosphäre hinsichtlich der Konzentration von C14 stationär werden, wobei wir Ausgleichsvorgänge aus Konzentrationsschwankungen von C14 innerhalb der Atmosphäre außer acht lassen wollen? Da die vier Terme, die zur zeitlichen Änderung der Konzentration von C14 beitragen, bis auf den Vernichtungsterm (denn der ist stets proportional zur Menge der aktuellen Konzentration), voneinander unabhängig sind, muß jeder einzelne entweder null sein oder sich mit einem anderen gesetzmäßig (also nicht zufällig) aufheben. Wir müssen aber grundsätzlich davon ausgehen, daß sowohl die Flußterme (insbesondere für den Übergang »Atmosphäre  $\Leftrightarrow$  Ozean«) als auch die Produktionsrate selber auf voneinander unabhängigen und zudem zeitlich variablen Ursachen beruhen und daß es grundsätzlich kein Gleichgewicht gibt, das auf der gleichzeitigen, über Tausende von Jahren währenden Konstanz der Ursachen für die ursächlich entkoppelten Terme beruht.

## 9.10 Ozeanische Makroströmungen – »Conveyor Belt«

»Wie ein Förderband verteilt ein großräumiges Strömungssystem kaltes, salzreiches Tiefenwasser, das vor Grönland absinkt, über die Weltmeere (...). Zum Ausgleich strömt warmes Oberflächenwasser im Atlantik nordwärts. Die von ihm transportierte Wärme hat große Auswirkungen auf das Klima in den angrenzenden Regionen (...)« [Broecker 1996; Graphik aus Broecker 1992].

Da Pazifik und Nordatlantik völlig unterschiedliche Strömungsverhältnisse aufweisen [vgl. Maier-Reimer 1996, 25], ist davon auszugehen, daß auch die Wechselwirkung mit der Atmosphäre hinsichtlich des C14-Gehaltes sehr unterschiedlich ausfällt. Angesichts der Stärke der Produktions- bzw. Flußschwankungen, die für die Erzeugung der empirisch bekannten »wiggles« aufgebracht werden müssen, sind global gesehen C14-Schwankungsmuster völlig unterschiedlicher Art zu erwarten. Ein Vergleich dieser Muster ist dann nicht mehr möglich. Das transatlantische »wiggles-matching« für die Europäischen Eichenchronologien hat in die Irre geführt.



Diese Annahme wird beispielsweise durch das großräumige Strömungsverhalten innerhalb der Ozeane nahegelegt, das zeitlichen Änderungen unterliegt und damit – durchaus örtlich begrenzt – einmal jüngerer, das andere Mal wiederum älteres Wasser an die Oberfläche bringen kann und damit immer wieder Ungleichgewichte gegenüber der aktuellen Atmosphärenzusammensetzung hinsichtlich C14 hervorruft. Die damit verbundenen Ausgleichsprozesse schreiben eine Geschichte der atmosphärischen C14-Konzentration, die die ausgewiesene mittel- und langfristige Stationarität in den bekannten Kalibrierkurven konterkariert.

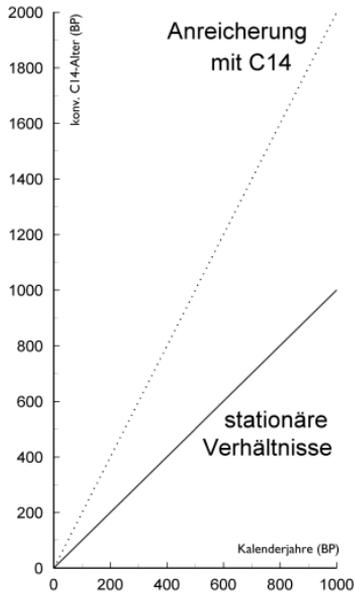
Ist das an die Oberfläche kommende Wasser arm an C14 (weil der letzte atmosphärische Austausch relativ lange zurückliegt und der einstmalige Bestand durch radioaktiven Zerfall im Laufe der Zeit entsprechend dezimiert wurde), so verarmt die Atmosphäre mehr oder weniger schnell an C14 – jedenfalls schneller als durch radioaktiven Zerfall allein –, indem mehr C14 in den Ozean diffundiert als umgekehrt. Ist das an die Oberfläche kommende Wasser hingegen stark mit C14 angereichert, so tritt der umgekehrte Effekt auf. Das Bild **9.10** veranschaulicht das globale Strömungsbild in den Ozeanen. Es ist unmittelbar klar, daß die atmosphärische Zusammensetzung auf diese Weise sehr stark an Änderungen globaler Strömungsmuster gekoppelt ist – und daß der »Fahrplan« für diese Änderungen in den Strömungsmustern auch nicht in herkömmlicher Weise über C14 datiert werden darf (vergleiche Peng [1989]).

Unterschiedliche Modelle für den Zustand der Ozeanströmungen sind auch im Hinblick auf die Änderung der C14-Konzentration der Atmosphäre gerechnet worden [Meier-Reimer/Mikolajewicz 1989; Stocker et al. 1992; Wright/Stocker 1993; Lehman et al. 1993]. T.F. Stocker und D.G. Wright betonen die sensible Abhängigkeit der C14-Uhr von einer Änderung des Isotopeninhalts der Ozeane: »Um die Geschwindigkeit der Radiokarbonuhr um 100% zu ändern, bedarf es einer Änderung im C14-Inventar der Ozeane lediglich um wenige zehntel Promille« [1996, 776]. In Bild **9.11** wird der quantitative Zusammenhang noch einmal aufgeschlüsselt. Die beiden Autoren betonen allerdings, daß trotz drastischer Änderungen im Zirkulationsverhalten nur »sehr maßvolle« Änderungen im Isotopengehalt der Ozeane errechnet würden. Wir stellen allerdings fest, daß die Modelle stets erst über einen Zeitraum in der Größenordnung von 12.000 Jahren in einen stationären Zustand relaxiert werden müssen, um überhaupt zu interpretationsfähigen Ergebnissen zu kommen.

Die gegenseitige Zügelung der Zu- und Abflüsse in einer Weise, daß am Ende ein annähernd stationäres Gleichgewicht durch den nur als i-Tüpfelchen zu bezeichnenden radioaktiven Zerfall zustande kommt, ist nicht zu erwarten.

## 9.11 Zeitdilatationen

Die obere Kalibriergerade, die unter permanenter Anreicherung von C14 entsteht und entsprechend steiler als die für stationäre Verhältnisse stehende Gerade ist, hätte zwar dramatische Auswirkungen auf etwaige C14-Datierungen – C14-Alter müßten nunmehr halbiert werden, um das richtige Absolutdatum wiederzugeben –, käme jedoch unter ausgesprochen moderaten Vorgängen in der Natur zustande. Innerhalb der betrachteten 1.000 Kalenderjahre hätte es eine Anreicherung der Atmosphäre mit C14 um lediglich 12% geben müssen. Stocker und Wright zufolge [1996, 776] genügte eine entsprechende Änderung um 2% (i.W.: zwei Promille) innerhalb des ozeanischen Inventars, um diesen Effekt der Beschleunigung der C14-Uhr um 100% hervorzurufen. Die angebliche Genauigkeit der C14-Uhr um ganze 10% über 12.000 Kalenderjahre ist bezogen auf das ozeanische Inventar ohnehin nicht zu verifizieren, da ein Nachweis im ppm-Bereich (millionstel) meßtechnisch und chronologisch außer Diskussion steht.



Für das unterstellte Ungleichgewicht, das zu besagter Anreicherung im C14-Inventar der Atmosphäre in der Größenordnung von 1% pro Jahrhundert führt, können unterschiedliche Gründe verantwortlich sein. Die Ursache kann zum Beispiel in einer schlagartigen »C14-Untersättigung« der Atmosphäre bei ansonsten gleichbleibender C14-Produktion liegen und durch folgende Vorgänge verursacht worden sein:

- 1) Verringerung des C14-Gehaltes der Ozeane durch Einspeisung »fossilen Wassers« kosmischen Ursprungs [Blöss 1991, 76 & 89],
- 2) Hochschwemmen fossilen Tiefenwassers durch Impakt eines großen Himmelskörpers in einen der Ozeane [Blöss 2000],
- 3) Erhöhung der Löslichkeit der Ozeane bezüglich Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  durch Temperaturänderung.

Die Punkte 1) und 2) (oben) bilden den Rahmen für ein »Sintflutereignis«. Eine andere mögliche Ursache für die permanente Anreicherung im C14-Inventar der Atmosphäre liegt in einer Erhöhung der C14-Produktion, die auf externe oder interne Veränderungen zurückgeführt werden kann.

- 1) Eine Steigerung der C14-Produktion kann zum Beispiel durch Abschwächung des irdischen Magnetfeldes oder durch Erhöhung der Stickstoffdichte in der fraglichen Atmosphärenregion ausgelöst werden.
- 2) Sie kann auch durch Verstärkung der kosmischen Strahlung zum Beispiel infolge von Änderungen in der Sonnenaktivität ausgelöst werden.

Vielmehr muß mit einem mittel- und langfristigen zeitlichen Verhalten der C14-Konzentration in der Atmosphäre gerechnet werden, das sich im Vergleich zur Änderungsrate allein durch den radioaktiven Zerfall als nachgerade erratisch herausstellen könnte.

### 9.7 Libbys Grundannahmen

Libbys Bilanz für C14 berücksichtigte im Zusammenhang mit der Datierungsfrage nur zwei Posten: Die Produktion von C14 in der oberen Atmosphäre und sein allgegenwärtiger Zerfall in all den Kohlenstoffdepots der Erde, die in irgendeiner Weise mit der Atmosphäre im Austausch stehen bzw. einmal gestanden haben – insbesondere natürlich sein Zerfall in lebendigen wie toten Organismen. Seine Bilanzgleichung kannte demnach nur Terme aus Produktion und Vernichtung innerhalb des gesamten Systems, nicht aber die aus Zu- und Abflüssen über die einzelnen Systemgrenzen. Sein Argument für diese Vereinfachung lautete: »Egal, welchen Teil eines Kohlenstoffdepots ich betrachte, stets ist der Nettofluß in dieses Teilsystem hinein gerade so groß wie die Zerfallsmenge innerhalb des Systems, weil die Durchmischung immer und überall gegeben ist.«

Diese Durchmischung sollte insbesondere für die Atmosphäre gültig sein, in der das C14 in rund 15 km Höhe und schwerpunktmäßig in den Polarregionen produziert wird. Die Atmosphäre bildet allerdings mit rund 1.6 % nur den kleinsten Teil des gesamten Kohlenstoffreservoirs der Erde. Den Löwenanteil daran halten die Ozeane. Da alle Reservoirs – von tieferen Ozeanschichten abgesehen – nachweislich eine ähnliche Aktivität von C14 aufweisen, kann man

- 1) von der relativen Konzentration des C14 von rund  $1.5 \cdot 10^{-10}$  %, sowie
- 2) von dem auf  $42 \cdot 10^{15}$  kg geschätzten Gesamtkohlenstoffvorrat

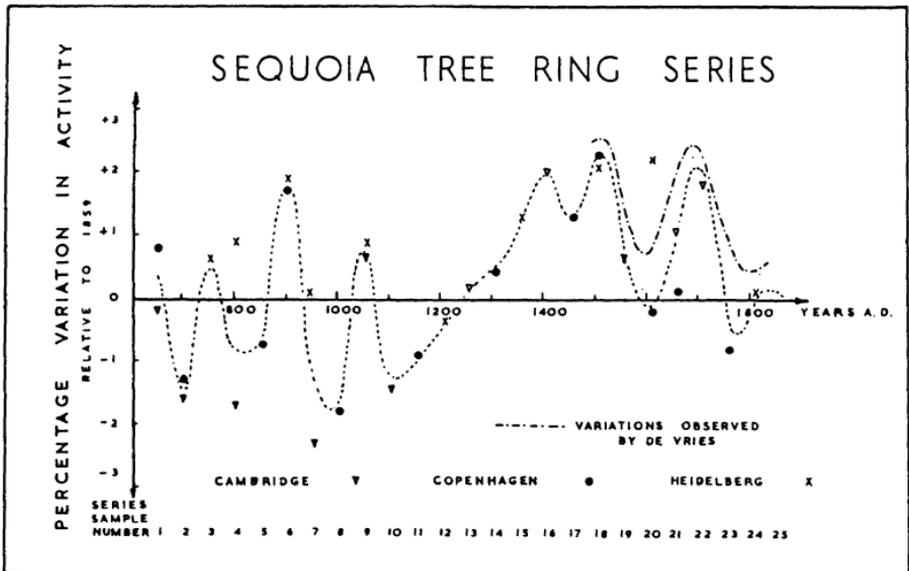
auf weltweit vorhandene rund 62 Tonnen C14 schließen. Von diesen 62 Tonnen zerfiel demnach jährlich der 1/8266ste Teil radioaktiv, also ca. 7.5 kg. Im Rahmen von Libbys Modell muß dann die jährliche Produktionsrate in der oberen Atmosphäre (im Mittel) ebenfalls 7.5 kg betragen, damit in jedes Teilreservoir gerade soviel C14 einfließen kann, wie auch zerfällt. Es sei betont, daß diese Produktionsrate seit 50 Jahren in der Literatur geführt wird, ohne daß sie jemals genau bestimmt werden konnte<sup>30</sup>.

---

<sup>30</sup> Diese Produktionsrate ist der »gesunde Spinat« der C14-Wissenschaft ...

## 9.12 Wider das Fundamentalprinzip und ...

Diese Graphik [Willis et al. 1960] über C14-Aktivitätsschwankungen in der Atmosphäre brachte 1960 Unruhe in die bis dahin noch selbstsichere C14-Gemeinde. Diese war zuvor anlässlich ähnlicher von de Vries veröffentlichter Informationen [de Vries 1958] noch gelassen geblieben. Es dauerte bis 1970, ehe maßgebende Wissenschaftler die Bristlecone-Pine-Chronologie als gültigen zeitlichen Maßstab für die C14-Konzentration der Atmosphäre bestätigten, wodurch wieder Ruhe und Zuversicht einkehrte.



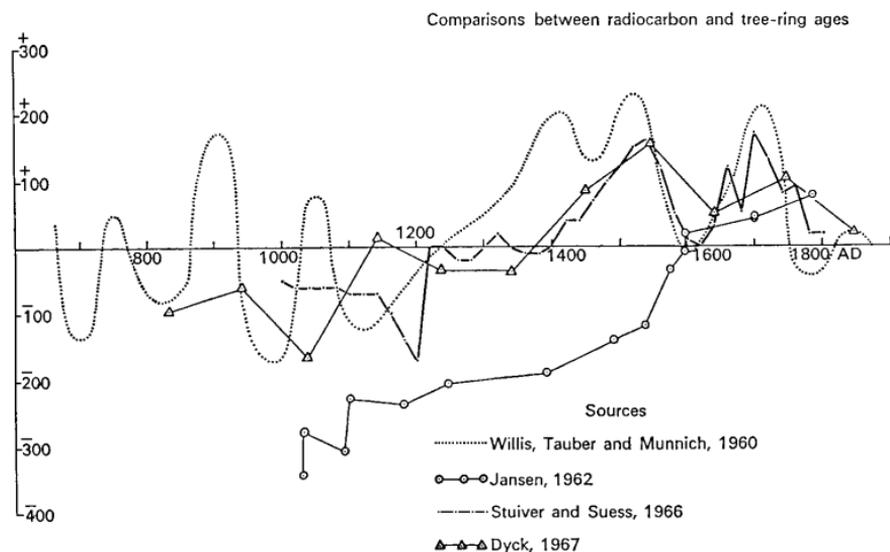
## 9.13 ... das Simultanitätsprinzip

Es mußte erst ein Historiker kommen, um der C14-Gemeinde »die Leichen in ihrem Keller« zu zeigen. In dem Jahr, in dem der Weltöffentlichkeit endlich ein universell gültiger Kalibriermaßstab für die C14-Methode präsentiert wurde, diskutierte W. Shawcross in der Historikerzeitschrift *WORLD ARCHAEOLOGY* eine ganz andere Baumringchronologie, die an sich Schlimmstes für die Praktikabilität der C14-Methode ahnen ließ [Shawcross 1969]. Diese Baumringchronologie stammte aus Neuseeland und hatte den Vorteil, sich auf einen einzigen sehr alt gewordenen Kauri-Baum zu beziehen. Die ausgezählten und C14-vermessenen Baumringe aus Neuseeland erzeugten über ca. 1.000 Jahre einen viel steileren Anstieg der Kalibrierkurve, als von der Bristlecone-Pine-Chronologie selbst ausgewiesen wurde (vergleiche Bilder [2.8](#) / BCP und [2.4](#) / Kauri) ....

... Nur mit noch einmal 50% Fehlringen wäre diese neuseeländische Kurve mit der aus Amerika zur Deckung zu bringen gewesen [Jansen 1970, 272]. Doch Botaniker wiesen im Gegenteil darauf hin, daß der Kauri-Baum zur Ausbildung von Doppelringen und nicht von Fehlringen neige, wodurch die Diskrepanz tendenziell sogar noch verschärft wurde [Shawcross 1969, 192]. Jansen hatte – vermutlich im Bewußtsein der Brisanz seiner Resultate – die Qualität seines Labors mit Baumproben verifiziert, die zuvor von drei verschiedenen europäischen Labors vermessen worden waren.

Tatsächlich hatten die Meßwerte aus Neuseeland bereits seit 1962 vorgelegen und waren dem Fachpublikum anlässlich des 12. Nobel Symposiums im schwedischen Uppsala nur erneut in unveränderter Form vorgehalten worden. Eigentlich wäre C.W. Ferguson, der ungefähr 1963 in die entscheidende Phase seines Projektes zur Erstellung einer kompletten Baumringchronologie getreten war, gezwungen gewesen, sich für seine kalifornischen Borstenkiefern die Tendenz dieser Kurve anstatt die der Stationarität zum Vorbild zu nehmen.

Schließlich war man sich darüber einig, daß die C14-Werte – wenn sie schon nicht konstant waren – auf der ganzen Welt einheitlich schwanken sollten. Genau genommen macht der Begriff der Schwankung im Zusammenhang mit der Neuseeländischen Kalibrierung überhaupt keinen Sinn, denn hier gab es einen klaren Trend ohne Neigung zur Rückkehr in einen sogenannten stationären Zustand. Im Hinblick auf die vielfältig dokumentierten Exzeßproduktionen, die für die Erklärung der »wiggles« herangezogen werden müssen, wäre der stationäre Trend der Bristlecone-Pine-Kalibrierkurve reiner Zufall, der nichtstationäre Trend der Kauri-Kalibrierung hingegen ein grundsätzlich auch zu erwartender Nichtgleichgewichtszustand.



Die Produktionsrate von rund 7.5 kg/y ist äquivalent zu der Annahme eines »an jedem Ort auf der Erde identischen lokalen Gleichgewichtes zwischen Produktion und Zerfall«. Von diesen 7.5 kg verbliebe natürlich nur ein geringer Teil in der Atmosphäre – nämlich ca. 0.12 kg –, der überwiegende Rest verschwände dann jeweils in den Ozeanen und in der Biosphäre.

Bei separater Betrachtung der Atmosphäre taucht also auch unter Libbys restriktivem Modell ein »Flußterm« auf: Über 98% des in der oberen Atmosphäre produzierten C14 wandert schließlich über die Systemgrenzen in die Ozeane bzw. in die Biosphäre ab. Der Fluß in die Ozeane erfolgt nicht auf Stoffwechselbasis, sondern hängt auf lineare Weise (wegen der äußerst niedrigen Konzentrationen) von den Konzentrationsgradienten ab, d.h. jede Erhöhung der C14-Konzentration in der Atmosphäre wird zu einer entsprechenden Erhöhung der Diffusion von C14 aus der Atmosphäre in die Ozeane führen – und umgekehrt. Aufgrund dieser linearen Kopplung bildet sich die Schwankung der Produktionsrate gleichermaßen in der Atmosphäre wie auch im Oberflächenwasser der Ozeane ab.

Libbys Ur-Modell für die C14-Methode ging von einer konstanten Produktion des C14 aus, und nur darauf führte er auch die relativ homogenen Verhältnisse in allen ihm seinerzeit meßtechnisch zugänglichen Reservoiren der Erde zurück: Unter gleichbleibenden Produktionsverhältnissen müßte am Ende alles homogen durchmischt sein. Doch diese Annahme von der konstanten Produktion schien unhaltbar, als Messungen an langen Baumringsequenzen Abweichungen von der dann zu erwartenden Kurve aufzeigten (vergleiche Bild **9.12**). Es ist bezeichnend, daß eine Modulation des Diffusionsverhaltens von C14 in die Ozeane, die schließlich dasselbe Phänomen hervorrufen würde, nicht diskutiert worden war. Daß aber ohne Diffusion die nachgewiesene Art der Schwankungen (in Form der Mehrdeutigkeit der heute gemessenen Restaktivitäten bzw. C14-Alter) gar nicht erklärt werden konnte, wurde einfach übersehen.

Die C14-Gemeinde schwächte Libbys Fundamentalannahme in Richtung auf ein Simultanitätsprinzip ab. Danach würden als Reaktion auf Produktionsschwankungen in allen (archäologisch interessanten) Kohlenstoffdepots die C14-Aktivitäten an allen Orten der Erde stets synchron schwanken. Speziell müßten also alle gleichzeitig wachsenden jahringbildenden Bäume auf der ganzen Welt allfällige Schwankungen des C14-Gehaltes der Atmosphäre gleichermaßen dokumentieren (dagegen allerdings Bild **9.13**). Hätte man hier die Modulation des Diffusionsverhaltens von C14 als Ursache für die ausgewiesenen Schwankungen erwogen und untersucht, wäre niemals ein Simultani-

tätsprinzip erdacht worden, weil ein global gleichförmiges Diffusionsverhalten natürlich nicht zu erwarten ist.

Daß dieses auch nicht unterstellt werden darf, zeigen immer wieder die erratisch auseinanderliegenden C14-Daten archäologisch als gleichaltrig zu betrachtender Proben (vergleiche zur grundsätzlichen Schwäche des Simultaniätsprinzips zusammenfassend das Bild **4.6**). Solange also die Fachliteratur zur Interpretation der »wiggle« ausschließlich von Schwankungen der Produktionsrate für C14 infolge etwa der Veränderung des Erdmagnetfeldes oder der Sonneneinstrahlung spricht, kann trotz aller Probleme mit dem Simultaniätsprinzip kein unmittelbarer Zweifel an ihm aufkommen. Das Simultaniätsprinzip konnte nur erdacht werden, weil die Erde noch nicht als zusammenhängendes Ökosystem gedacht wurde.

## 9.8 Der grundlegende Mangel von Libbys Modell

Mit dem Befund lokal schwankender C14-Konzentrationen auf dem Schreibtisch und der Idee im Kopf, daß diese global gleichförmig stattfinden, hätte insbesondere erklärt werden müssen, wie lebende Organismen weltweit auf gleiche Weise ein C14-Alter entwickeln können, das höher als das C14-Alter zuvor gestorbener Organismen lag, denn genau das stand in den gemessenen C14-Schwankungen bzw. »wiggle« geschrieben. Dieser Effekt kommt nur zustande, wenn der C14-Gehalt der Atmosphäre stärker sinkt als der C14-Gehalt in gerade gestorbenen Organismen durch den radioaktiven Zerfall (vgl. dazu die schematische Darstellung in Bild **9.9**).

Da für die Annahme eines negativen Produktionsterms keinerlei Anlaß besteht und selektive Diffusion von C14 in die Ozeane (also einer Diffusion, der die entsprechenden C12-Verbindungen nicht unterliegen) auszuschließen ist, kann der fragliche Effekt nur durch Einspeisung von C12 in die Atmosphäre auftreten. Damit kommt ein Flußterm ins Spiel, der tatsächlich weder zeitlich noch örtlich als konstant angenommen darf und dessen Vernachlässigung die Suche nach einem (angeblichen) Gleichgewichtszustand in die Irre leiten muß.

Weder Libbys noch irgend ein anderes Modell kann auf ein selektives Verschwinden des C14 vom Ort seiner Produktion in der oberen Atmosphäre direkt in den Ozean oder in irgend ein anderes Reservoir bauen. Solange sich das entstandene C14 relativ rasch mit Sauerstoff zu Kohlendioxid verbindet, mischt es sich zwangsläufig mit dem »normalen« Kohlendioxid, das ein C12-Atom enthält. Das bedeutet unmittelbar, das jedes Mehr an C14 – etwa durch eine gestiegene Produktion – sich global in einer erhöhten Aktivität der

gleichzeitig lebenden Organismen widerspiegeln muß. Das Stichwort an dieser Stelle lautet »irreversible Vermischung«: Die Mischung des produzierten C14 mit C12 – in Gestalt des Kohlendioxid – ist unwiederbringlich und deshalb kann C14 unter keinen Umständen separat über die Systemgrenzen in die Ozeane verschwinden. Es gibt an dieser Stelle mit Sicherheit auch keine entsprechenden Isotopieeffekte. Während die Produktion (durch kosmische Bestrahlung des Luftstickstoff N14) und Vernichtung (durch radioaktiven Zerfall) unabhängig von C12 (aber durchaus abhängig von der Stickstoffkonzentration N14) abläuft, sind also die Zu- und Abflüsse stets zusammen, d.h. in Mischung mit C12 zu betrachten.

Libbys Modell ohne Flußterme kennt demnach kein Sinken des atmosphärischen C14-Gehaltes unter das Niveau, das in irgendeinem zuvor gestorbenen Organismus – in dem die sprichwörtliche C14-Uhr tickt – herrscht. Die Produktion kann beliebig abfallen (oder sogar auf Null gehen), dennoch muß innerhalb des Libbyschen Modell ein Organismus immer ein niedrigeres (oder höchstens gleiches) C14-Alter haben wie jeder andere vor ihm gestorbene Organismus. Solange keine zusätzlichen Flußterme berücksichtigt werden, hebt jede noch so geringe Produktion an C14 die aktuelle Aktivität des atmosphärischen Reservoirs über die bereits am Sinken befindliche Aktivität der vom Stoffwechsel ausgeschlossenen Reservoirs.

Der einzige Weg, wie ein Organismus ein höheres C14-Alter aufweisen kann als ein tatsächlich vor ihm gestorbener Organismus, besteht in der zwischenzeitlichen Anreicherung der Atmosphäre mit Kohlendioxid, das entsprechend verarmt an C14 ist. Nur so kann das dendrochronologisch aufgedeckte kurzfristige Schwanken der C14-Konzentration in der Atmosphäre erklärt werden, das insbesondere einen periodisch wiederkehrenden retrograden (gegenläufigen) Verlauf des C14-Alters aufweist. Deshalb muß das Libbysche Modell von Produktion und Zerfall des C14 durch Zu- und Abflüsse von atmosphärischen Bestandteilen mit unterschiedlichem C14-Gehalt erweitert werden.

Es ist bezeichnend, daß diese Zusammenhänge niemals in Verbindung mit den Grundlagen der C14-Methode gesehen werden. Insbesondere die europäischen Dendrochronologen müßten diese Zusammenhänge aber brennend interessieren, da sie ihre Eichenchronologien nach den C14-Mustern der amerikanischen Bristlecone-Pine-Chronologie synchronisiert haben und dabei natürlich elementar auf die Gültigkeit des Simultanitätsprinzips angewiesen waren. Sind diese sich überhaupt der Brisanz bewußt, die für die Grundlagen der C14-Methode in den von ihnen selbst offengelegten C14-Mustern liegt? Aus dem tatsächlichen Ausmaß der Schwankungen des atmosphärischen C14 muß

geschlossen werden, daß die jeweilige atmosphärische Konzentration von C14 nicht von dem Zusammenspiel von C14-Produktion und C14-Zerfall bestimmt wird, sondern hauptsächlich von dem Zusammenwirken von C14-Produktion und ozeanischer C12-Eingasung (für das Ausmaß der Produktionsschwankungen vergleiche beispielsweise Bilder **9.3-5** und ebenfalls **9.14**). Unser vorweggenommenes Fazit lautet: Der C14-Zerfall bildet gegenüber der C12-Eingasung tatsächlich nur eine eher geringe Korrektur (1% Zerfall des C14-Bestandes innerhalb von 83 Jahren) an dem von anderen Ursachen regulierten C14-Anteil in der Atmosphäre.

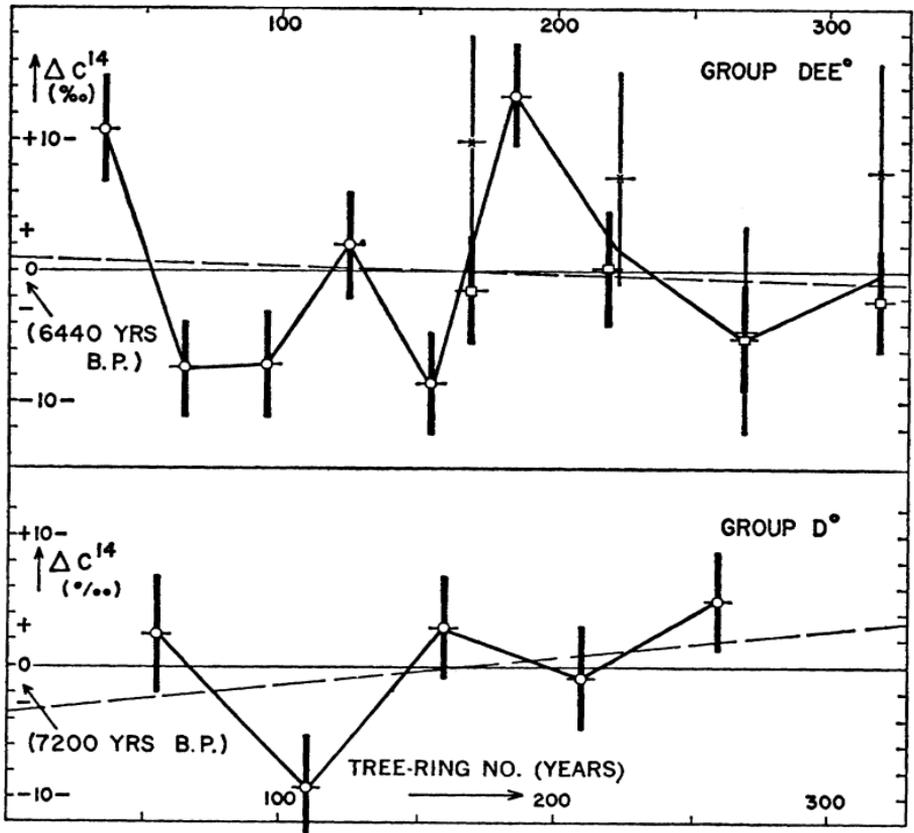
Eine dendrochronologisch rekonstruierte Kalibrierkurve repräsentiert die C14-Historie der Atmosphäre. Die veröffentlichten Kurven weisen nun über ihre Länge von mehr als 12.000 Jahren einen Verlauf aus, der ein annäherndes Gleichgewicht von Produktion und Zerfall widerspiegelt, obwohl dieses Zusammenspiel gar nicht ausschlaggebend sein kann. Auf jeweils kurze Zeitabschnitte fokussiert ergibt sich denn auch ein völlig anderes Bild: Phasen hoher Produktionsrate (Faktor 2 bis 20 über »normal«) werden von Phasen starker Eingasung fossilen Kohlendioxids überlagert, in denen das C14-Alter einen retrograden Verlauf nimmt. Dabei kann für die Zunahme der C14-Konzentration in der Atmosphäre statt einer Erhöhung der Produktionsrate teilweise auch eine Abschwächung der Diffusion des C14 von der Atmosphäre in die Ozeane verantwortlich sein.

Es wäre nun purer Zufall, wenn die übergeordnete Tendenz aus dem Zusammenspiel dieser Mechanismen mit der ungleich »zarteren« Dynamik von Produktion und Zerfall übereinstimmen würde. Wir müssen deshalb vermuten, daß die dendrochronologische Konstruktion der Kalibrierkurven von dem Libbyschen Modell infiziert ist und tatsächlich zu ganz anderen Ergebnissen führen müßte.

## 9.9 Der Widerspruch zwischen globaler und lokaler Struktur der Kalibrierkurven

Zwischen der lokalen Struktur der Kalibrierkurven auf der einen Seite und ihrer globalen Struktur auf der anderen Seite besteht eine Diskrepanz:

- Die lokale Struktur der ausgewiesenen dendrochronologisch gewonnenen Kalibrierkurven ist als Ausdruck ursächlich entkoppelter, stark veränderlicher C14-Produktion und C12-Diffusion sowie des gegebenen, allerdings vergleichsweise schwachen und deshalb unbedeutenden radioaktiven Zerfalls zu interpretieren.

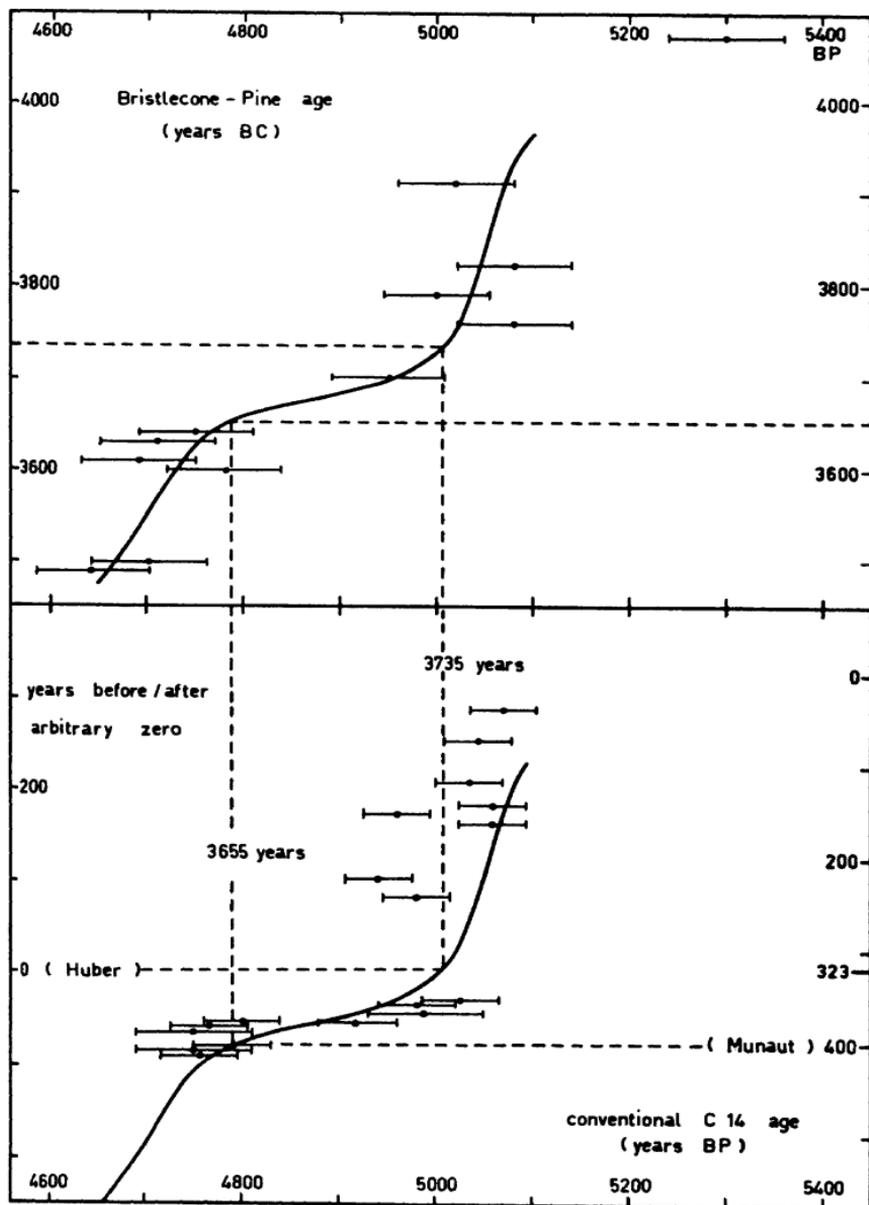


### 9.14 Exzeßproduktionen

Wir geben an dieser Stelle zwei weitere Beispiele für drastische Änderungen der C14-Konzentration in der Atmosphäre. Vorausgesetzt, daß der Konzentrationsanstieg jeweils direkt von einer Produktionssteigerung abhängt, signalisiert die Graphik auf dieser Seite [Vogel et al. 1969, 1144] einen ebenfalls drastischen Anstieg der Produktion um das 6-fache (von Jahrring 150 auf Jahrring 180 im oberen Plot), bezogen auf das (fiktive) stationäre Niveau von 7.5 kg C14 pro Jahr.

Für die Graphik auf der rechten Seite [Mook et al. 1972, F34] ist ein Anstieg um mindestens das 12-fache dieses Niveaus zu verzeichnen. Die Autoren dieser Studie weisen zwar ausdrücklich auf die aus der Graphik zu ersehenden Zahlen hin – »Anstieg der C14-Aktivität um rund 2.5% in  $15 \pm 6$  Jahren« [Mook et al. 1972, F27], stoßen aber nicht zur quantitativen Betrachtung der Konsequenzen für die Ursachen dieses Phänomens vor. Ähnliches berichtet mit 3% Änderung in rund 10 Jahren auch W. Dyck [1965, 440].

Ein weiteres Beispiel ist in den Bildern **9.3-5** zu finden, wo auch die rechnerische Umsetzung erläutert wird. Dort wird der Zusammenhang zwischen dem von der Stationarität abweichenden Kurvenverlauf einerseits und der Exzeßproduktion für C14 andererseits erklärt.



- Ihre übergeordnete Struktur erscheint dagegen als Ergebnis eines seit 12.000 Jahren währenden annähernden Gleichgewichtes zwischen C14-Produktion und C12-Diffusion einerseits und radioaktivem Zerfall von C14 andererseits.

Die Kalibrierkurven setzen damit voraus, daß jede die stationären Verhältnisse übersteigende Produktion von C14 durch eine entsprechende C12-Diffusion derart kompensiert wurde, daß ein verbleibender marginaler Überhang des atmosphärischen C14 nun durch den radioaktiven Zerfall beseitigt werden konnte. Der Widerspruch besteht darin, daß sich der derart hergestellte Zusammenhang aus keinem vernünftigen Naturprinzip ableiten läßt.

Es gibt grundsätzlich nur zwei Erklärungsansätze für die von den Kalibrierkurven ausgewiesene Konstellation: Entweder wird das Kräftepaar von Produktion und Diffusion durch einen bislang unbekanntem Mechanismus so geregelt, daß die Produktion ständig weitgehend von der Diffusion kompensiert wird (und nur der verbliebene kleine Rest dem radioaktiven Zerfall zur Neutralisierung überlassen bleibt). Oder aber die Konstruktion der Kalibrierkurve ist grundsätzlich falsch.

Für den ersten Erklärungsansatz ist eine vernünftige Verankerung in bekannten dynamischen Modellen nicht zu bekommen und braucht von daher nicht weiter verfolgt zu werden. Der zweite Erklärungsansatz impliziert, daß die Idealkurve (die »Winkelhalbierende«), die dem Libbyschen Modell des Quasigleichgewichtes zwischen Produktion und Zerfall entspricht, als Vorbild für die Konstruktion der Baumringsequenzen hergehalten haben muß, obwohl tatsächlich eine ganz andere Kurve hätte folgen müssen. Mithin hat die Dendrochronologie in einer entscheidenden Phase das methodische Handwerkszeug vollständig von der C14-Wissenschaft bezogen und konnte (oder wollte auch) einen in dieser Folge gemachten eklatanten Fehler mit eigenen Mitteln nicht entdecken bzw. nicht wieder rückgängig machen.

Diese Vermutung findet sich für alle Europäischen Eichenchronologien von Bedeutung bestätigt. Grundsätzlich wurde das konstruktive Regime für die Vordatierung einzelner Baumringsequenzen an die C14-Methode abgegeben. Dabei bediente man sich des Libbyschen C14-Modells, in dem lokale Ungleichgewichte nicht vorkommen und somit für überregional gefundene Baumringsequenzen eine relative Chronologie – die Abfolge von früher und später – erstellt werden durfte. Die Hilfestellung durch C14 erfolgte dabei auf drei Ebenen. Sie diente

- der Zuordnung einzelner Baumringsequenzen untereinander, ohne bereits an einem Absolutdatum interessiert zu sein,

- der »tentativen Absolutdatierung« zusammengefaßter »schwimmender« Master gegenüber kompletten Mastern von beliebigen Orten der Erde durch radiometrischen Mustervergleich (»wigggle-matching«), um Lücken zu lokalisieren und zu quantifizieren,
- dem Auffinden von Material, um besagte Lücken zu schließen.

Zu einem das Postglazial umfassenden Kalender kommt die Dendrochronologie durch jahrgenaue Synchronisierung unterschiedlich alter, jedoch mit zeitlicher Überlappung gewachsener Bäume. Dieser Kalender enthält Jahr für Jahr den mittleren charakteristischen Wuchswert für den entstandenen Baumring. Dabei ist der Dendrochronologe unbedingt auf die klimatische Zusammengehörigkeit der Wuchsorte der betrachteten Baumringsequenzen angewiesen. Nur so ist die ähnliche Ausbildung der einzelnen Ringdicken als Reaktion auf ein einheitliches Mikroklima und damit die wichtigste Voraussetzung für ihre Synchronisierbarkeit gewährleistet.

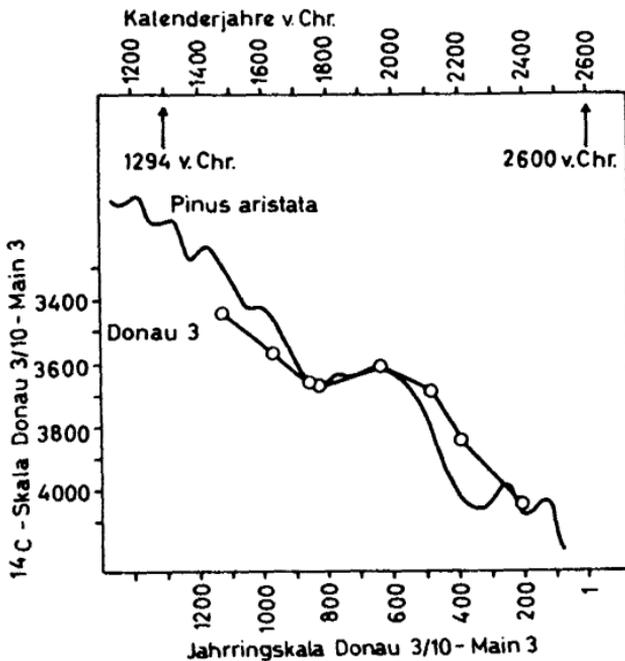
De facto waren die mit dem Projekt »Postglaziale Baumringchronologie« befaßten europäischen Dendrochronologen ganz schnell mit einem Stadium konfrontiert, in dem sie dann für lange Zeit lediglich über »schwimmende« Baumringsequenzen aus unterschiedlichen Wuchs- und damit unterschiedlichen Klimagebieten verfügten, die sie nicht ohne weiteres zu einer übergeordneten durchgehenden Sequenz zusammenfügen konnten. Daß mit dieser Situation ein permanenter Zwang zum Methodenwechsel verbunden war, mochten die Dendrochronologen nicht gern zugeben und sprachen offiziell lieber von »Fundproblemen«, die auf Dauer gelöst werden könnten. In der Regel entstanden also nur lokale Synchronismen und man hoffte, daß nach Beibringung weiteren Materials wenigstens Brücken zwischen den regional unterschiedlichen Sequenzen geschlagen werden konnten.

Auch ohne das Lückenproblem gab es grundsätzlich zu wenig sichere immanente Anhaltspunkte, nach denen beurteilt werden konnte, welche schwimmende Sequenz die ältere und welche die jüngere war oder wie groß überhaupt der Altersunterschied jeweils sein mochte. Man war damit immer wieder auf externe Hilfe angewiesen, um die Lage der schwimmenden Sequenzen zueinander soweit eingrenzen zu können, daß die ganz normale »Maschinerie« der Dendrochronologie auf die zu prüfenden Synchronismen angesetzt werden konnte. Das »Dilemma des Dendrochronologen« [Baillie 1990, 18] war dabei allgegenwärtig, weil immer wieder entschieden werden mußte, ob ein gefundenes Holz zu einem der bereits aufgebauten Master paßte, oder ob es etwa als das erste Fundstück für eine der (noch) vorhandenen Lücken zu betrachten war. Je sicherer man sich allerdings durch eine mit externen Mitteln

### 9.15 Tentative Absolutdatierung schwimmender Baumringsequenz

Vergleich des C14-Trends innerhalb der Chronologie »Donau 3/10 - Main 3« [zusammenfassend Becker/Frenzel 1977] mit Daten der Bristlecone-Pine-Chronologie, die von H.E. Suess [1970a] u.a. auf dem 12. Nobel-Symposium von 1969 in Uppsala vorgestellt worden war.

Vergleiche hierzu auch Bild 2.13, das die radikale Platzierung schwimmender Sequenzen aus der Süddeutschen Eichenchronologie mit Hilfe des »wigggle-matching« dokumentiert, dazu vorausgegangene Versuche von Ferguson et al. 1966 in Bild 2.5 und von Suess 1970 in Bild 5.7. Noch 1977 galt dieses Verfahren bei den Irischen Kollegen allerdings als widerlegt und damit verpönt (siehe nächstes Bild 9.16). Doch kurz darauf wurde von ihnen dieser Widerstand aufgegeben. Wir vermuten, weil die Konstruktion der Irischen Eichenchronologie seit langem stagniert hatte und nur so noch ein Fortkommen zu erreichen war.



gewonnene Vordatierung sein durfte, desto geringer fiel das Risiko aus, das Dilemma falsch aufzulösen. Die Verwendung von C14-Datierungen ist nur auf den Respekt vor diesem Dilemma zurückzuführen. Übersehen wurde dabei aber, daß die entscheidende Voraussetzung für die Vertrauenswürdigkeit eines C14-Datums bzw. eines C14-Musters, die Gültigkeit des Simultaneitätsprinzips, nicht gegeben war.

Es wurden in Europa nicht nur die schwimmenden Eichenchronologien auf der Basis der Zuordnung einzelner C14-Daten errichtet, sondern diese außerdem über einen Vergleich der ihnen innewohnenden C14-Muster mit solchen aus einer kalifornischen Baumringchronologie vordatiert und durch zusätzlich gefundenes dendrochronologisches Material dann fast jahrgenau an den absoluten Master angeschlossen (vergleiche hierzu Bild **2.13**). Damit wurde nun auch in Europa (vergleiche Bild **9.15**) bis 1984 der übergeordnete Trend einer »libbysierten« Kalibrierkurve reproduziert, die in den Jahren von 1963 bis 1966 in Amerika erstellt worden war und seitdem als »Bristlecone-Pine-Chronologie« bekannt geworden ist. (Zum anfänglichen Verhältnis der irischen Dendrochronologen zum »wobble-matching« vergleiche Bild **9.16**)

Mit Blick auf unsere Kritik am Libbyschen Modell kann hier festgestellt werden: Es wurden die C14-Daten von Bäumen aus einem atlantisch/baltisch kontrollierten Wuchsgebiet einerseits mit solchen aus einem pazifisch kontrollierten Wuchsgebiet andererseits verglichen. Wenn die aktuelle C14-Aktivität vor allem durch Produktion und Ausgasung bestimmt wird, dann ist ein solcher bedingungsloser Vergleich unstatthaft, da die den Wuchsgebieten benachbarten Meeresströmungen, die die Ausgasung letztlich bestimmen, grundsätzlich unterschiedlicher Natur sind.

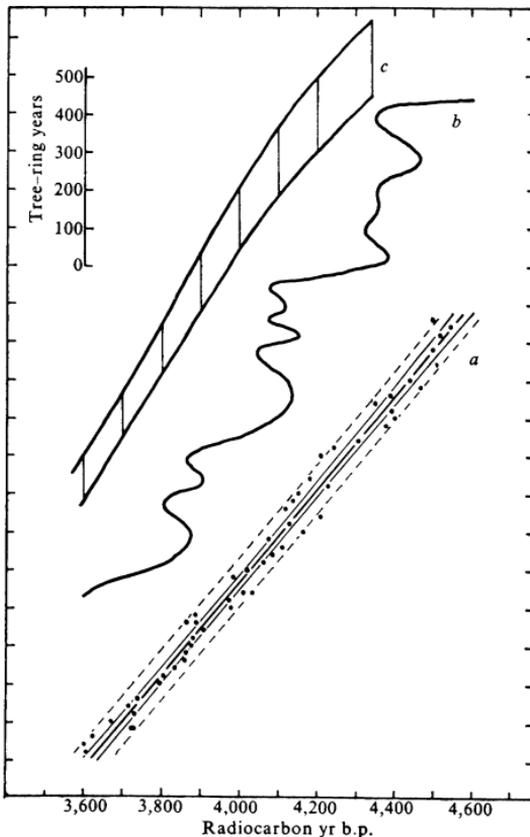
Und weil diese fragwürdigen Vordatierungen später mit dendrochronologischen Mitteln fast jahrgenau »verifiziert« wurden, müssen wir davon ausgehen, daß die Konstrukteure in Europa der Suggestivität des Prototypen aus Amerika erlegen sind und systematische Fehler eingebaut haben. Es besteht mithin der dringende Verdacht, daß die heute gebräuchlichen Kalibrierkurven aus Europa einen systematischen Fehler beinhalten, der insbesondere den übergeordneten Trend betrifft und damit für archäologische Proben falsche Altersangaben vorschlägt.

Bereits in den Kapiteln 2.3-5 wurde von uns die »Mutter« aller Kalibrierungen, die Bristlecone-Pine-Chronologie von C.W. Ferguson, kritisch gewürdigt. In dem Zusammenhang haben wir darauf hingewiesen, daß bereits 1962 unmißverständliche Hinweise darauf vorlagen, daß die Annahme einer global simultanen Änderung der C14-Aktivität der Atmosphäre falsch sein mußte. Solange man allerdings ausschließlich auf die Schwankung der

### 9.16 Irischer Ausfallschritt

1977 veröffentlichten die Konstrukteure der Irischen Eichenchronologie einen Artikel in *NATURE*, der sich eindeutig gegen das »wigggle-matching« wandte, das u.a. von B. Becker (vergleiche Bilder **9.15** und **2.13**) zur Formierung seiner Süd-deutschen Eichenchronologie benutzt wurde.

In dem Diagramm wird ein Ausschnitt aus der glatten irischen Kalibrierkurve (a) mit der von Suess (b) verglichen. ( $1\sigma/2\sigma$  sind ungestrichelt/gestrichelt). Kurve (c) rekrutiert sich aus einer Kalibrierung an historisch absolutdatierten ägyptischen Artefakten. Wenige Jahre später wurde dieser Widerstand aufgrund unüberwindbarer Schwierigkeiten bei dem autonomen Aufbau der Chronologie aufgegeben. Die bis dahin vorhandenen Teilstücke der Irischen Eichenchronologie wurden mit den C14-Schwankungen in der Bristlecone-Pine-Chronologie abgeglichen und über die so gewonnenen »tentativen« Absolutdaten endgültig miteinander verzahnt: »In der Praxis wurden die Details der Belfaster Kalibrierung gegen die bereits existierende amerikanische Bristlecone Pine Kalibrierung per Wiggle-matching abgeglichen« [Baillie 1983, 16].



C14-Produktion fixiert war, um die in den Baumringsequenzen gemessenen C14-Schwankungen qualitativ zu erklären, konnten diese Hinweise mit dem Argument schnellen Ausgleichs etwaiger Ungleichgewichte in der Atmosphäre vom Tisch gewischt werden.

So schreiben Ferguson et al. 1966 kurz und lapidar: »Lokale C14-Schwankungen können keine Bedeutung haben, weil sich die irdische Atmosphäre innerhalb von 2 Jahren durchmischt« [Ferguson et al. 1966, 1173]. Auf der anderen Seite wurden die gemessenen C14-Aktivitäten völlig unbekümmert in kurzzeitig scharf geschwungene, wenngleich langfristig stationäre Verhältnisse wiedergebende Kurven übertragen, ohne sich die dramatischen Konsequenzen hinsichtlich der damit eigentlich charakterisierten Diffusionsvorgänge bewußt zu machen.

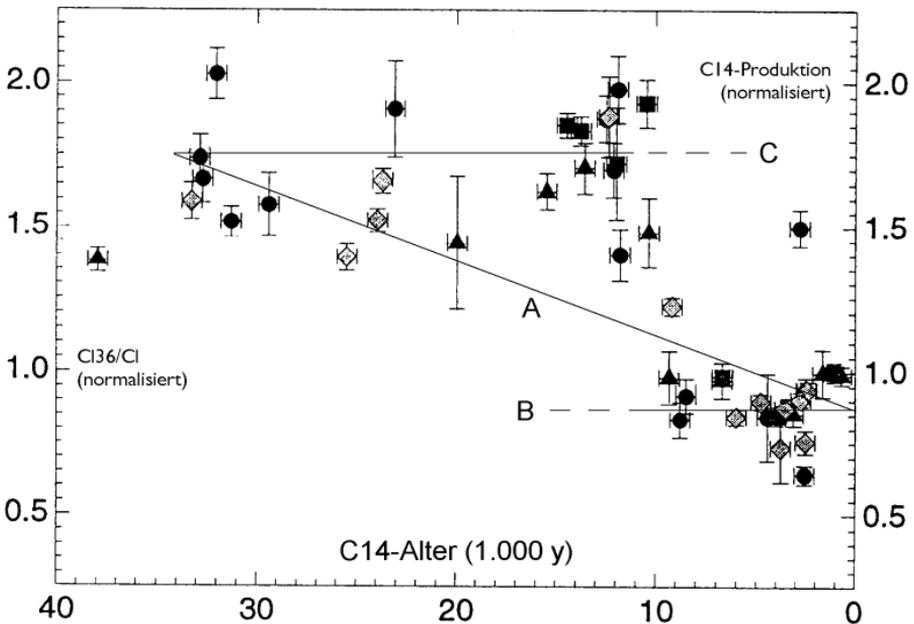
## 9.10 Die Konsequenzen

Die C14-Konzentration in der Atmosphäre wird von der Produktion und der Diffusion bestimmt. Es gibt keinerlei substantielle Hinweise, daß die daraus sich ergebende Dynamik einen Gleichgewichtszustand aufrechterhalten haben könnte. Starke Konzentrationsänderungen innerhalb von Jahrhunderten (Zu- und Abnahme) machen in der Regel ein Mehrfaches der Änderung durch den radioaktiven Zerfall aus, der mithin ein unbedeutendes Regulativ darstellt. Der Verweis auf die Kalibrierkurven, die schließlich ein annäherndes Gleichgewicht ausweisen würden, ist ohne Bedeutung, weil deren Konstruktion fundamental auf der Annahme eben dieser Stationarität beruht.

In diesem Zusammenhang weisen wir auch auf die in Bild **9.17** aufgeführten Indizien hin für eine deutliche Minderung der C14-Produktion vor rund 12.000 C14-Jahren. M.A. Plummer et al. [1997] weisen anhand von Messungen der Cl36-Konzentration in fossilem Rattenurin nach, daß den jüngsten 12.000 C14-Jahren ein erheblicher Zeitraum vorausging, in dem die C14-Produktion etwa doppelt so hoch gewesen ist. Das Postglazial wäre demnach mit einem erheblich stärkeren Ungleichgewicht zwischen Produktion und Zerfall gestartet, als aus den Baumringchronologien abzulesen ist. Es gibt viele einander widersprechende Befunde zur Chronologie der Vorgeschichte. Wir fragen uns, wann das erstmal ein Wissenschaftler, dessen Arbeitsgebiet normalerweise von Chronologiefragen unberührt bleibt, aufgrund seiner Forschungsergebnisse gegen das verwobene chronologische Geflecht aus Baumringen, Eiskernen und Warven in vollem Bewußtsein der Konsequenzen für unser Geschichtsbild opponiert

### 9.17 Wie hoch war die C14-Produktionsrate in der Vergangenheit wirklich?

M.A. Plummer et al. präsentierten in SCIENCE [1997] ein Archiv kosmogener Isotope ganz besonderer Art, nämlich fossilen Rattenurin. Ihre Aufmerksamkeit galt dabei insbesondere den beiden Isotopen Chlor  $Cl^{36}$  und Kohlenstoff  $C^{14}$ . Eine  $C^{14}$ -Chronologie des Konzentrationsverlaufs für das  $Cl^{36}$ -Isotop an der Erdoberfläche ermöglichte ihnen direkte Rückschlüsse auf die Produktionsrate von  $C^{14}$ . Aus den Daten läßt sich ableiten, daß es für die Zeit vor ~12.000  $C^{14}$ -Jahren zu Fehldatierungen kommen muß:  $C^{14}$ -datierte Proben werden mit wachsendem  $C^{14}$ -Alter zunehmend auf ein zu hohes Absolutalter kalibriert. Implizit ist damit die ganze Konstruktion der Kalibrierkurven in Frage gestellt.  $Cl^{36}$  wird ebenso wie  $C^{14}$  durch Einwirkung kosmischer Strahlung erzeugt. Im Gegensatz zu  $C^{14}$  unterliegt es aber keinem radioaktiven Zerfall. ...



... Deshalb kann aus der gemessenen  $C136$ -Konzentration (unter der Annahme, daß sich  $C136$  im Gegensatz zu  $C14$  nicht anreichert) auf die Produktionsrate – die gleichermaßen für  $C14$  und  $C136$  gelten soll – geschlossen werden. Deshalb sind die beiden senkrechten Achsen – Anteil des  $C136$ -Isotops (links) und Produktionsrate für das  $C14$ -Isotop (rechts) – linear gekoppelt. Die Höhe der Produktion von bestimmten Isotopen infolge der Einwirkung kosmischer Strahlung kann für die jüngsten 12.000 Jahre aus den Baumringchronologien und für einen gewissen Zeitraum davor z.B. aus warvenchronologischen Studien abgeleitet werden. Während Plummer et al. diese mit einer leicht gekrümmten Kurve inklusive überlagerter Schwankungen wiedergeben, setzen wir der Übersichtlichkeit wegen eine Gerade (A) ein. Dabei bleiben die massierten Meßdaten bei rund 12.000  $C14$ -Jahren gleichermaßen außer Reichweite der jeweiligen Approximationskurven. Die Autoren stellen nun fest, daß ihre Meßwerte so interpretiert werden müssen, daß vor rund 12.000  $C14$ -Jahren die Produktionsrate um ca. 50% höher gewesen sein muß als die, die sich aus den Kalibrierkurven ergibt. Wir fügen an, daß die unmittelbare Konsequenz für eine Kalibrierung in diesem Zeitraum in zu hohen Absolutdaten besteht. Die hier angestellten Überlegungen müssen darüber hinaus zur Zurückweisung dieser Kalibrierkurven führen.

Wenn die  $C14$ -Produktionsrate über rund 20.000  $C14$ -Jahre um den Faktor 2 (entsprechend Horizontale C) höher als die jüngsten 10.000  $C14$ -Jahre gewesen ist (entsprechend Horizontale B), dann sind drei Dinge unmittelbar abzuleiten:

- Selbst bei konstanter Produktion von  $C14$  während des Zeitraums vom Ende der Eiszeit bis auf heute (B) kann wegen der Vergangenheit (C) auf keinen Fall von stationären Verhältnissen ausgegangen werden.
- Es wäre purer Zufall und deshalb eine unzulässige Hypothese, die Produktionsrate für  $C14$  zum Ende der Eiszeit ausgerechnet auf den Wert springen zu lassen, der zur permanenten Kompensation der aus der Atmosphäre in die Ozeane diffundierenden  $C14$ -Menge führen würde.
- Die absolute Höhe der Produktionsrate für die einzelnen kosmogenerischen Isotope ist völlig im Dunkeln. Sie kann unter diesen Umständen insbesondere für  $C14$  auf keinen Fall mehr aus der Zerfallsmenge erschlossen werden. Deshalb ist ohne weiteres Wissen völlig offen, ob die 10.000  $C14$ -Jahre für das Post-Glazial nun 5.000 oder 20.000 Kalenderjahre ausmachen.

Bisher haben alle Indizien – insbesondere aus den  $C14$ -Gradienten in verschiedenen Hölzern, die für die Erstellung der Kalibrierkurven allerdings keine Verwendung fanden – darauf verwiesen, daß die  $C14$ -Produktion bereits in unserer unmittelbaren Vergangenheit höher als der (fiktive) stationäre Wert lag. Mithin müßten die Meßwerte von Plummer et al. als eine Änderung der Produktionsrate interpretiert werden, die lediglich zur Abschwächung der Ursache für das Ungleichgewicht geführt hat, in der sich die  $C14$ -Konzentration der Atmosphäre befindet. Die Baumringchronologien als Chronik der  $C14$ -Konzentration der Atmosphäre wären aufgrund ihres auch visuell offenkundigen Bezuges zur Stationaritätsannahme aufs Schärfste attackiert!

Die kalifornische Bristlecone-Pine-Chronologie repräsentierte keine Kalibrierkurve, sondern ein Vorurteil über die Randbedingungen in der Natur (dazu die Bilder **2.8** und **9.7**). Dieses hat sich auch auf die wesentlichen europäischen Eichenchronologien übertragen, soweit diese nicht ohnehin durch fälschliche Unterstellung der Gültigkeit des Simultanitätsprinzips bereits im Ansatz in eine falsche Richtung getrieben worden sind. Eine solche Kalibrierung stellt mithin keine Korrektur oder »Verbesserung« dar, sondern die Vorspiegelung völlig verzerrter chronologischer Maßstäbe. Kalibrierte Daten sind unbrauchbar, soweit sie sich auf Kurven beziehen, die mit Hilfe von C14-Daten erstellt worden sind. Unkalibrierte Daten sind nur lokal und vermutlich nur bei ausreichend hohem Abstand der zu vergleichenden C14-Daten in eine relative Chronologie zu bringen. Der langfristige C14-Trend der Atmosphäre ist noch nicht einmal in Ansätzen entschlüsselt worden.

Im Hinblick auf die drei Kapitel des abschließenden Teils des Buches kann man zusammenfassend sagen, daß

- die statistische Behandlung mehrerer C14-Daten von Proben aus demselben archäologischen Zusammenhang in der Regel zur Vorspiegelung nicht vorhandener Präzision führt (Kapitel 7),
- die korrekte Berücksichtigung aller an einer Probe vorzunehmenden meß-, labor- und auswertungstechnischen Maßnahmen einen summarischen Fehler anhäufen läßt, der bereits das (unkalibrierte) C14-Datum in die Indifferenz treibt (Kapitel 8), und
- die nachweisbare Dynamik von Produktion und Diffusion atmosphärischen C14 keinerlei Anlaß gibt, von langfristig stationären Verhältnissen hinsichtlich C14 auszugehen. Deshalb sind die fundamental auf der Annahme quasistationärer Verhältnisse beruhenden Kalibrierkurven falsch.

## 9.11 Anhang: Bilanzgleichung

Die Formel **IX.2** bringt die Proportionalität zwischen einer vorhandenen Menge einer radioaktiven Substanz und der pro Zeiteinheit zerfallenden Menge zum Ausdruck:

$$dA \sim -A(t) \quad \text{IX.2}$$

Die entsprechende Differentialgleichung in der Zeit

$$dA/dt = -\lambda \cdot A(t) \quad \text{IX.3}$$

ist als Spezialfall einer allgemein angelegten Bilanzgleichung anzusehen, in der nicht nur die Vernichtung, sondern auch die Produktion und die Diffusion berücksichtigt wird:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \gamma \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \pi \quad \text{IX.5}$$

Der Geschwindigkeitsterm steht für die Zu- bzw. Abnahme der zu bilanzierenden Menge  $y$  des Stoffes durch Unterschiede in der Menge, die während eines betrachteten Zeitintervalls über die Volumensbegrenzung sowohl zuströmen als auch abströmen. Der Term  $\pi$  steht für die Zu- bzw. Abnahme des bilanzierten Stoffes durch Produktion und Vernichtung innerhalb der Volumensbegrenzung.

Nur für die archäologische Probe und nur unter idealen Bedingungen (keine Kontamination etc.) gilt der Spezialfall **IX.3**. Ansonsten muß für jedes Kohlenstoffreservoir der Erde die allgemeine Form der Bilanzgleichung, wie sie mit **IX.5** gegeben ist, zur Anwendung gebracht werden. Wenn man berücksichtigt, daß die Auswirkung von Produktion und Diffusion viel stärker ist als die des radioaktiven Zerfalls, dann ist die Stationaritätsannahme, die die Diffusion unberücksichtigt läßt und die Produktionsmenge mit der Zerfallsmenge identifiziert und die zugleich der Konstruktion aller jemals entstandenen Kalibrierkurven zugrundeliegt, als irreführend zu bezeichnen.

## Literatur

### A

- Adovasio, J.M., J. Donahue und R. Stuckenrath (1990): »The meadowcraft rockshelter radiocarbon chronology 1975-1990«; in: AMERICAN ANTIQUITY 55 348-54
- Aitchison, T.C., E.M. Scott, D.D. Harkness, M.S. Baxter und G.T. Cook (1990): »Report on stage 3 of the international collaborative program«; in: RADIOCARBON 32 271-78
- Aitken, M.J. (1970): »Dating by archaeomagnetic and thermoluminescent methods«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A269 77-88
- (1974): »Radiocarbon dating«; in: PHYSICS AND ARCHAEOLOGY, Oxford (Clarendon Press)
  - (1990): »Science-based dating in archaeology«; London und New York (Longman)
- Aitken, M.J., A.L. Allsop, G.C. Bussell und M. Winter (1989): »Geomagnetic intensity variations during the last 4000 years«; PHYSICS OF THE EARTH AND PLANETARY INTERIORS 56 49-58
- Ambrose, W., und P. Duerden (1982, eds.): »Archaeometry: An Australasian perspective«; Canberra (Department of Prehistory, Research School of Pacific Studies, Australasian National University)
- Ament, H. (1980): *Besprechung des Buches von Hollstein (1980)*; in: BE-RICHT DER RÖMISCH-GERMANISCHEN KOMMISSION 61 285-86
- Anderson, E.C., W.F. Libby, S. Weinhouse, A.F. Reich, A.D. Kirshenbaum und A.D. Grosse (1947): »Natural radiocarbon from Cosmic Radiation«; in: PHYSICAL REVIEW 72 931-36
- Anderson, E.C., J.R. Arnold und W.F. Libby (1951): »Measurement of low level radiocarbon«; in: REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 22 225-30
- Anderson, E.C., und W.F. Libby (1951): »Worldwide distribution of natural radiocarbon«; in: PHYSICAL REVIEW 81 64-69
- Antevs, E. (1957): »Geological tests on the varve and radiocarbon chronologies«; in: JOURNAL OF GEOLOGY 65 129-48
- Arnold, J.R. (1992): »The Early Years With Libby at Chicago: A Retrospective (with comments by R.L. Schuch)«; in: Taylor et al. (1992, eds.) 3-10
- Arnold, J.R., und W.F. Libby (1949): »Age determinations by radiocarbon content: checks with samples of known age«; in: SCIENCE 110 678-80
- (1951): »Radiocarbon dates«; in: SCIENCE 113 111-20
- Ashmore, P.J., und P.H. Hill (1983): »Broxmouth and high-precision dating«; in: Ottaway (1983, ed.) 83-99
- Åström, P. (1987, ed.): »High, Middle or Low? Acts of an International Colloquium on Absolute Chronology (gehalten an der Universität von Gothenburg 20.-22. August 1987)«; Teil 1 und 2, Gothenburg (Paul Åström Förlag)
- (1989, ed.): »High, Middle or Low? Acts of an International Colloquium on Absolute Chronology (gehalten an der Universität von Gothenburg 20.-22. August 1987)«; Teil 3, Gothenburg (Paul Åström Förlag)
- Atkinson, R.J.C. (1975): »British prehistory and the radiocarbon revolution«; in: ANTIQUITY 49 173-77
- Aurenche, O., J. Evin und F. Hours (1987, eds.): »Chronologies in the Ancient Near East: Relative Chronologies and Absolute Chronology, 16.000-4.000 BP«; in: Proceedings of the CNRS International Symposium BAR (Int. series) 379

## B

- Baatz, D. (1977): »Bemerkungen zur Jahrringchronologie der römischen Zeit«; in: GERMANIA 55 173-79
- (1983): *Besprechung des Buches von E. Hollstein (1980)*; in: BONNER JAHRBÜCHER 183 718-20
- Bäsemann, H. (1992): »Die Klimaconnection«; in: BILD DER WISSENSCHAFT, Heft 2
- Baillie, M.G.L. (1977): »Recent dendrochronological results from modern and historic Irish oak timbers«; in: Frenzel (1977, ed.) 9-15
- (1982): »Tree-ring dating and archaeology«; London (Croom-Helm)
  - (1983): »Belfast dendrochronology: The current situation«; in: Ottawa (1983, ed.) 15-24
  - (1989/90): »Difficulties associated with any Radical Revision of Egyptian Chronology: A Reply to B. Newgrosh«; in: JOURNAL OF THE ANCIENT CHRONOLOGY FORUM 3 29-36
  - (1990): »On the need for further isotropic measurements from tree rings«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A330 441-44
  - (1990/91): »Dendrochronology and Thera: The Scientific Case (1990 ISIS Fellowship Lecture)«; in: JOURNAL OF THE ANCIENT CHRONOLOGY FORUM 4 15-28
  - (1991): »Marking in marker dates: Towards an archaeology with historical precision«; in: WORLD ARCHAEOLOGY 23 2 231-43
  - (1995): »A slice through time. Dendrochronology and precision dating«; London (B.T. Batsford Ltd)
- Baillie, M.G.L., und J.R. Pilcher (1973): »A simple cross-dating program for tree-ring research«; in: TREE-RING BULLETIN 33 7-14
- Baillie, M.G.L., J.R. Pilcher und G.W. Pearson (1983): »Dendrochronology at Belfast as a background to high precision calibration«; in: RADIOCARBON 25 171-78
- Bannister, B., und W.J. Robinson (1975): »Tree-ring dating in archaeology«; in: WORLD ARCHAEOLOGY 7 210-25
- Barbetti, M.F. (1980): Geomagnetic strength over the last 50.000 years and changes in the atmospheric <sup>14</sup>C concentration: Emerging trends«; in: RADIOCARBON 22 191-99
- Bard, E., und W.S. Broecker (1992): The Last Deglaciation: Absolute and Radiocarbon Chronologies«; Heidelberg et al. (Springer Verlag), NATO ASI Studies I-2
- Barker, H. (1958): »Radio Carbon Dating: Its Scope and Limitations«; in: ANTIQUITY 32 253-63
- (1970): »Critical assessment of radiocarbon dating«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON A269 37-45
- Barnard, N. (1982): »Radiocarbon dating and other laboratory derived data: the historian's viewpoint«; in: Ambrose/Duerden (1980, eds.) 357-360
- Barton, C.E., R.T. Merrill und M. Barbetti (1979): »Intensity of the Earth's magnetic field over the last 10.000 years«; in: PHYSICS OF THE EARTH AND PLANETARY INTERIORS 20 96-111
- Baxter, M.S. (1983): »An international tree-ring replicate study«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 123-31
- Baxter, M.S., und A. Walton (1970): »Radiocarbon dating of mortars«; in: NATURE 225 937-38
- (1971): »Fluctuations of atmospheric carbon-14 concentrations during the past century«; in: PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A321 105

- Beck, C.W. (1987a): »Archaeometric Clearinghouse XXIII«; in: JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY 14 373-74
- (1987b): »Archaeometric Clearinghouse XXIV«; in: JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY 14 487-90
- Becker, B. (1970): »Die Jahrringanalytische Datierung und die C<sup>14</sup>-Methode«; in: MITTEILUNGEN DER BUNDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR FORST- UND HOLZWIRTSCHAFT 77 20-28
- (1979): »Holocene tree-ring series from southern central Europe for archaeological dating, radiocarbon calibration, and stable isotope analysis«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 554-65
- (1980): »Tree-ring dating and radiocarbon calibration in south-central Europe«; in: RADIOCARBON 22 219-226
- (1983a): »The long-term radiocarbon trend of the absolute German oak tree-ring chronology, 2800 to 800 B.C.«; in: RADIOCARBON 25 197-203
- (1983b): »Prehistoric dendrochronology for archaeological dating: Hohenheim oak series present to 1800 BC«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 503-10
- (1992): »The history of dendrochronology and radiocarbon calibration«; in: Taylor et al. (1992, eds.) 34-49
- (1993): »An 11.000-year German oak and pine dendrochronology for radiocarbon calibration«; in: RADIOCARBON 35 201-13
- Becker, B., Billamboz, A., H. Egger, P. Grassmann, A. Orcel, C. Orcel und U. Ruoff (1985): »Dendrochronologie in der Ur- und Frühgeschichte«; in: ANTIQUA 11 1-68
- Becker, B. und B. Frenzel (1977): »Paläoökologische Befunde zur Geschichte postglazialer Flußauen im südlichen Mitteleuropa«; in: Frenzel (1977, ed.) 43-61
- Becker, B., B. Kromer und P. Trimborn (1991): »A stable-isotope tree-ring timescale of the Late Glacial/Holocene boundary«; in: NATURE 353 647-649
- Becker, B. und B. Schmidt (1982): »Verlängerung der mitteleuropäischen Eichenjahrringchronologie in das zweite vorchristliche Jahrtausend (bis 1462 v.Chr.)«; in: ARCHÄOLOGISCHES KORRESPONDENZBLATT 12 101-106
- Becker, B. und H.E. Suess (1977): »Der Radiocarbongehalt von Jahrringproben aus postglazialen Eichenstämmen Mitteleuropas«; in: Frenzel (1977, ed.) 43-61
- Becker, B., und G. Wetzel (1990): »Erste Dendrodaten zur Frühgeschichte der Lausitz und des angrenzenden Elbegebietes«; in: VERÖFFENTLICHUNGEN DES MUSEUMS FÜR UR- UND FRÜHGESCHICHTE POTSDAM 24 243-55
- Beer, J., V. Giertz, M. Holl, T. Reisen und C. Strahm (1979): »The contribution of the Swiss lake-dwellings to the calibration of radiocarbon dates«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 566-90
- Beer, J., U. Siegenthaler, G. Bonani, R.C. Finkel, H. Oeschger, M. Suter und W. Wölfli (1988): »Information on past solar activity and geomagnetism from <sup>10</sup>Be in the Camp Century ice core«; in: NATURE 331 675-79
- Benecke, N. (1987): »Zur Bedeutung und Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Archäozoologie«; in: ETHNOGRAPHISCH-ARCHÄOLOGISCHE ZEITSCHRIFT 28 97-125
- Bennett, C.L. (1979): »Radiocarbon dating with accelerators«; in: AMERICAN SCIENTIST 67 450-57
- Berger, R. (1970a, ed.): »Scientific methods in medieval archaeology«; Berkeley (University of California Press)
- (1970b): »The potential and limitations of radiocarbon dating in the Middle Ages: The radiochronologist's view«; in: Berger (1970a, ed.) 89-139

- (1970c): »Ancient Egyptian radiocarbon chronology«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A269 23-36
  - (1973): »Tree-ring calibration of radiocarbon dates«; in: Rafter/Grant-Taylor (1973, eds.) A97-103
  - (1983): »Willard Frank Libby«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 13-16
  - (1985): »Suess' »wiggles and deviations« proven by historical and archaeological means«; in: METEORITICS 20 395-401
  - (1990): »Relevance of medieval, Egyptian and American dates to the study of climatic and radiocarbon variability«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A330 517-27
- Berger, R., and H.E. Suess (1979, eds.): »Radiocarbon Dating«, Proceedings of the Ninth International Conference, Los Angeles and La Jolla; Berkeley (University of California Press)
- Biasi, G.P., and R.H. Weldon (1994): »Quantitative refinement of calibrated <sup>14</sup>C distributions«; in: QUATERNARY RESEARCH 41 1-18
- Billamboz, A. (1986): »Zeitmesser Holz«; in: ARCHÄOLOGIE IN DEUTSCHLAND 1 26-31
- Binford, L.R. (1983): »In Pursuit of the Past. Decoding the Archaeological Record«; London (Thames & Hutchinson)
- Birkeland, P.W., and E.E. Larson (1978): »Putnam's Geology«; New York (Oxford University Press)
- Birks, H.J.B., and A.D. Gordon (1985): »Numerical methods in Quaternary pollen analysis«; London (Academic Press)
- Björnfot, L. (1990): »A computer based dataacquisition system for C-14 measurements«; in: UPPSALA UNIVERSITY DEPARTMENT OF PHYSICS REPORT 1221
- Blöss, C. (1988): »Jenseits von Darwin. Globale Katastrophen und die Entwicklung des Lebens«; Frankfurt am Main (Eichborn Verlag)
- (1991): »Planeten, Götter, Katastrophen. Das neue Bild vom kosmischen Chaos«; Frankfurt am Main (Eichborn Verlag)
  - (2000): »Ceno-Crash. Neue Überlegungen zum Ursprung und zum Alter des Menschengeschlechtes«; Berlin (Verlag Informationen für Technik und Wissenschaft)
- Blöss, C., und H.-U. Niemitz (1996): »Der Selbstbetrug von C14-Methode und Dendrochronologie«; in: ZEITENSPRÜNGE 8 (3) 361-89
- (1997): »The Self-Deception of the C14-Method and Dendrochronology«; Gräffeling (Sonderdruck Mantis Verlag)
  - (1997): »Wissenschaftliche Altersbestimmung auf dem Holzweg. Über C14-Methode und Dendrochronologie«; in: GEGENWART 34 3-5
  - (1998a): »Die schwedische Warvenchronologie. Kritik der Altersbestimmungsmethoden für das Quartär I«; in: ZEITENSPRÜNGE 10 (Heft 2) 320-344
  - (1998b): »'Postglaziale' Warvenchronologien. Kritik der Altersbestimmungsmethoden für das Quartär II«; in: ZEITENSPRÜNGE 10 (Heft 3) 388-409
  - (1998c): »'Postglaziale' Gletschervorstöße. Kritik der Altersbestimmungsmethoden für das Quartär III«; in: ZEITENSPRÜNGE 10 (Heft 4) 568-585
- Blong, R.J., and R. Gillespie (1978): »Fluvially transported charcoal gives erroneous ages for recent deposits«; in: NATURE 271 739-41
- Boeckl, R. (1972): »Terrestrial Age of Nineteen Stony Meteorites derived

- from their Radiocarbon Content«; in: NATURE 236 25-26
- Born, H.-J., und K. Starke (1985): »Grundlagen der Radiochemie«; in: Kriegel (1985, ed.)
- Bortz, J. (<sup>4</sup>1993): »Statistik für Sozialwissenschaftler«; Berlin, Heidelberg (Springer Verlag)
- Bowman, S. (1990): »Interpreting the Past. Radiocarbon Dating«; London (British Museum Publications Ltd.)
- (1994): »Using radiocarbon: An update«; in: ANTIQUITY 68 838-43
- Bowman, S.G.E., J.C. Ambers und M.N. Leese (1990): »Re-evaluation of British Museum radiocarbon dates issued between 1980 and 1984«; in: RADIOCARBON 32 59-79
- Bradley, R. (1991): »Ritual, time and history«; in: WORLD ARCHAEOLOGY 23 209f.
- Brauer, A., I. Hajdas, J.W.F. Negendank, B. Rein, H. Vos, B. Zolitschka (1994): »Warvenchronologie«; in: GEOWISSENSCHAFTEN 12 (Heft 10-11) 325-32
- Broecker, W.S. (1992): »Radiokarbon-AMS-Messungen: Ein Schlüssel zum Verständnis des glazialen Ozeans«; in: Suter (1992, ed.) 18-20
- (1994): »Massive iceberg discharges as triggers for global climate change«; in: NATURE 372 421-24
- (1996): »Plötzliche Klimawechsel«; in: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (Januar) 86-93
- Broecker, W.S., M. Andree, W. Wölfli, H. Oeschger, G. Bonani, J. Kennett und D. Peteet (1988): »The chronology of the last deglaciation: Implications to the cause of the Younger Dryas event«; in: PALEOCEANOGRAPHY 3 1-19
- Broecker, W.S. und G.H. Denton (1989): »The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles«; in: GEOCHIMICA ET COSMOSCHIMICA ACTA 53 2465-2501
- Broecker, W.S., und J.L. Kulp (1956): »The radiocarbon method of age determination«; in: AMERICAN ANTIQUITY 22 1-11
- Broecker, W.S., D. Peteet und D. Rind (1985): »Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation?«; in: NATURE 315 21-25
- Brothwell, D., und E. Higgs (<sup>2</sup>1969): »Science in archaeology, a survey of progress and research«; Stockholm (Almqvist & Wiksell)
- Brown, D.M., A.A.R. Munro, M.G.L. Baillie und J.R. Pilcher (1986): »Dendrochronology – the absolute Irish standard«; in: RADIOCARBON 28 279-283
- Brownlee, K.A. (1965): »Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering«; New York (Wiley and Sons)
- Bruins, H.J., und W.G. Mook (1989): »The need for a calibrated radiocarbon chronology of Near Eastern archaeology«; in: RADIOCARBON 31 1019-29
- Bruns, M., K.O. Münnich und B. Becker (1980): »Natural radiocarbon variations from AD 200 to 800«; ; in: RADIOCARBON 22 273-77
- Bucha, V. (1970a): »Influence of the earth's magnetic field on radiocarbon dating«; in: Olsson (1970, ed.) 501-11
- (1970b): »Evidence for changes in the Earth's magnetic field intensity«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A269 47-56
- Burgstrahler, A.W., und E.W. MacKie (1973): »Ages in Chaos in the Light of C14 Archaeometry«; in: PENSÉE IV (spring/summer) 33-37

- Burleigh, R. (1980, ed.): »Progress in scientific dating methods«; OCCASIONAL PAPERS OF THE BRITISH MUSEUM 21
- (1981): »W.F. Libby and the development of radiocarbon dating«; in: AMERICAN ANTIQUITY 55 96-98
- Burleigh, R., K. Leese und M. Tite (1986): »An intercomparison of some AMS and small gas counter laboratories«; in: RADIOCARBON 28 (2A) 571-77
- Burleigh, R., K. Matthews und M.N. Leese (1984): »Consensus <sup>13</sup>C values«; in: RADIOCARBON 26 46-53
- Butzer, K.W. (1988): »A 'marginality' model to explain major spatial and temporal gaps in the Old and New World Pleistocene settlement records«; in: GEOARCHAEOLOGY 3 193-203
- ## C
- Cain, W.F., und H.E. Suess (1976): »Carbon 14 in Tree Rings«; in: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 81 3688-94
- Callaway, J., und J. Weinstein (1977): »Radiocarbon Dating of Palestine in the EB Age«; in: BULLETIN OF THE AMERICAN SCHOOLS OF ORIENTAL RESEARCH 225 1-16
- Campbell, J.A., M.S. Baxter und L. Alcock (1979): »Radiocarbon dates for the Cadbury massacre«; in: ANTIQUITY 53 31-38
- Campbell, J.A., M.S. Baxter und D.D. Harkness (1978): »Radiocarbon measurements on a floating tree-ring chronology from north-east Scotland«; in: ARCHAEOMETRY 20 33-38
- Campbell, R.C. (1974): »Statistics for biologists«; Cambridge (Cambridge University Press)
- Carter, G.F. (1978): »Archaeological Chemistry II«; in: ADVANCES IN CHEMISTRY SERIES 171, Washington D.C. (American Chemical Society)
- Cavallo, L.M., und W.B. Mann (1980): »New National Bureau of Standards contemporary carbon-14 standards«; in: RADIOCARBON 22 962-63
- Chatters, R.M., J.W. Crosby III. und L.G. Engstrand (1969): »Fumarole gaseous emanations: Their influence on carbon-14 dates«; CIRCULAR 32 (College of Engineering at Washington State University)
- Chatters, R.M., und E.A. Olson (1965, eds.): »Proceedings of the sixth international conference on radiocarbon and tritium dating«; Springfield, Virginia (Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information)
- Clark, R.M. (1975): »A calibration curve for radiocarbon dates«; in: ANTIQUITY 44 251-266
- (1978): »Bristlecone pine and ancient Egypt: a re-appraisal«; in: ARCHAEOMETRY 20 5-17
- (1979): »Calibration, Cross-validation and Carbon 14. I«; in: JOURN. ROY. STATIST. SOC. A142 (1) 47-62
- (1980): »Calibration, Cross-validation and Carbon 14. II«; in: JOURN. ROY. STATIST. SOC. A143 (2) 177-194
- Clark, R.M., und C. Renfrew (1972): »A statistical approach to the calibration of floating tree-ring chronologies using radiocarbon dates«; in: ARCHAEOMETRY 14 5-19
- (1973): »Tree-ring calibration of radiocarbon dates and the chronology of ancient Egypt«; in: NATURE 243 266-70
- Clark, R.M., und A. Sowray (1973): »Further statistical methods for the calibration of floating tree-ring chronologies«; in: ARCHAEOMETRY 15 255-56
- Cook, G.T., D.D. Harkness, B.F. Miller und E.M. Scott (1995, eds.): »Procee-

- dings of the 15th International  $^{14}\text{C}$  Conference«; in: *RADIOCARBON* 37 (2)
- Craig, H. (1953): »The geochemistry of the stable carbon isotops«; in: *GEOCHIMICA ET COSMOSCHIMICA ACTA* 3 53-92
- (1954): »Carbon 13 in plants and the relationships between carbon 13 and carbon 14 variations in nature«; in: *JOURNAL OF GEOLOGY* 62 115-49
- Creel, D., und A. Long (1986): »Radiocarbon dating of corn«; in: *AMERICAN ANTIQUITY* 51 826-837
- Crowe, C. (1958): »Carbon-14 Activity during the past 5.000 Years«; in: *NATURE* 182 470-71
- Currie, L.A. (1982, ed.): »Nuclear and chemical dating techniques interpreting the environmental record«; Washington D.C. (American Chemical Society)
- ## D
- Damon, P.E. (1987): »The history of the calibration of radiocarbon dates by dendrochronology«; in: Aurenche et al. (1987, eds.) 61-104
- (1995): »Note concerning 'Intercomparison of High-Precision  $^{14}\text{C}$  Measurements at the University of Arizona and the Queen's University of Belfast Radiocarbon Laboratories' by Kalin et al. (1993) and the Regional Effect«; in: *RADIOCARBON* 37 (3) 955-59
- Damon, P.E., C.W. Ferguson, A. Long und E.I. Wallick (1974): »Dendrochronologic calibration of the radiocarbon time scale«; in: *AMERICAN ANTIQUITY* 29 2 350-66
- Damon, P.E., J.C. Lerman und A. Long (1978): »Temporal fluctuations of atmospheric  $^{14}\text{C}$ : causal factors and implications«; in: *ANNUAL REVIEW OF EARTH AND PLANETARY SCIENCES* 6 457-494
- Damon, P.E., und T.W. Linick (1986): »Geomagnetic-heliomagnetic modulation of atmospheric radiocarbon production«; in: *RADIOCARBON* 28 266-78
- Damon, P.E., A. Long und D.C. Grey (1965): »Fluctuation of Atmospheric  $\text{C}^{14}$  During The Last Six Millennia«; in: Chatters/Olson (1965, eds.) 415-28
- Damon, P.E., A. Long und E.I. Wallick (1972): »Dendrochronologic calibration of the carbon-14 time scale«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) A29-A43
- Damon, P.E., R. Sternberg und C.J. Radnell (1983): »Modeling of atmospheric radiocarbon variations for the past three centuries«; in: *RADIOCARBON* 25 249-58
- Daniel, G. (1982): »Geschichte der Archäologie«; Bergisch-Gladbach (Gustav Lübbe Verlag)
- Darms, K. (1994): »Elektronische Datenverarbeitung in der Archäometrie«; in: Herrman (1994, ed.) 169-92
- Darwin, C. (1981): »Die Entstehung der Arten«; Stuttgart (Philipp Reclam jun.)
- Dayton, J. (1978): »Minerals, Metals, Glazing & Man, or: Who was Sesostris I?«; London (Harrap)
- Deevey, E.S. jr. (1984): »Zero BP plus 34: 34 years of *Radiocarbon*«; in: *RADIOCARBON* 26 1-6
- Deevey, E.S. jr., L.J. Granleshi und V. Hoffren (1959): »Yale natural radiocarbon measurements IV«; in: *RADIOCARBON* 1 144-72
- Deevey, E.S. jr., M.A. Gross, G.W. Hutchinson und H.L. Kraybill (1954): »The natural  $\text{C}^{14}$  contents of materials from hard-water lakes«; in: *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (U.S.A.)* 40 285-88
- Dehling, H., und J. van der Pflicht (1993): »Statistical problems in cali-

- brating radiocarbon dates«; in: RADIO-CARBON 35 239-44
- Delibrias, G., M.T. Guillier und J. Labeyrie (1974): »Gif natural radiocarbon measurements VIII«; in: RADIO-CARBON 16 15-94
- Delorme, A. (1973): »Über die Reichweite von Jahrringchronologien unter besonderer Berücksichtigung mitteleuropäischer Eichenchronologien«; in: PRÄHISTORISCHE ZEITSCHRIFT 48 133-43
- (1977): »Möglichkeiten der Überbrückung regionaler Teilchronologien zu einer überregionalen Postglazialchronologie der Eiche für Mitteleuropa«; in: Frenzel (1977, ed.) 62-67
- (1978): »Fortschritte beim Aufbau der Göttinger Eichenjahrringchronologie des Postglazials«; in: NEUE AUSGRABUNGEN UND FORSCHUNGEN IN NIEDERSACHSEN (NAFN) 12 243-46
- Dergachev, V. und V. Christyakov (1995): »Cosmogenic Radiocarbon and Cyclical Natural Processes«; in: Cook et al. (1995, eds.) 417-24
- Dincauze, D.F. (1984): »An Archaeo-Logical Evaluation of the Case for Pre-Clovis Occupations«; in: Wendorf/Close (1984, eds.) 275-323
- Doran, J.E., und F.R. Hudson (1975): »Mathematics and Computers in Archaeology«; Edinburgh
- Douglass, A.E. (1947): »Sequoia Survey - III: Miscellaneous notes«; in: TREE-RING BULLETIN 13 1 5-8
- Druffel, E.R.M. und S. Griffin (1993): »Large variations of surface ocean radiocarbon: Evidence of circulation changes in the southwestern Pacific«; in: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 98 20.249-59
- Dunwiddie, P.W. (1978): »Recent dendrochronological sampling in New Zealand: a preliminary note«; in: NEW ZEALAND JOURNAL OF BOTANY 16 409-10
- (1979): »Dendrochronological studies of indigenous New Zealand trees«; in: NEW ZEALAND JOURNAL OF BOTANY 17 251-66
- Dyck, W. (1965): »Secular variations in the  $^{14}\text{C}$  concentration of Douglas fir tree rings«; in Chatters/Olson (1965, eds.) 440-451
- Dye, T. (1994): »Apparent Ages of Marine Shells: Implications for Archaeological Dating in Hawai'i«; in: RADIO-CARBON 36 (1) 51-57
- Eckstein, D. (1972): »Tree-ring research in Europe«; in: TREE RING BULLETIN 32 1-18
- (1984): »Die dendrochronologische Methode«; in: Jankuhn (1984, ed.) 39-43
- Eckstein, D., M.G.L. Baillie und H. Egger (1984): »Dendrochronological Dating (Handbook for archaeologists Vol. 2)«; European Science Foundation (ed.)
- Eckstein, D., und J. Bauch (1969): »Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit«; in: FORSTWISSENSCHAFTLICHES CENTRALBLATT 88 230-259
- Eckstein, D., und S. Wrobel (1983): »Dendrochronologie in Europa«; in: DENDROCHRONOLOGICA 1 9-20
- Edwards, I.E.S. (1970): »Absolute dating from Egyptian records and comparison with carbon-14 dating«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON A269 11-18
- Ehrich, R.W. (<sup>3</sup>1992, ed.): »Chronologies in Old World archaeology«; Chicago und London (The University of Chicago Press)
- Engelkemeir, A.G., W.H. Hamill, M.G. Inghram und W.F. Libby (1949): »The half-life of radiocarbon ( $\text{C}^{14}$ )«; in: PHYSICAL REVIEW 75 1825-33

- Engelsman, F.M.R., E. Taayke und W.G. Mook (1986): »Groningen <sup>14</sup>C Data Base«; in: *RADIOCARBON* 28 (2A)788-96
- Epstein, S., und R.V. Krishnamurthy (1990): »Environmental information in the isotopic record in trees«; in: *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON* A330 427-40
- Evin, J., J. Marechal und G. Marien (1983): »Lyon natural radiocarbon measurements IX«; in: *RADIOCARBON* 25 59-128
- Evin, J., J. Marechal, C. Pachiaudi und J.J. Puissegur (1980): »Conditions involved in dating terrestrial shells«; in: *RADIOCARBON* 22 545-55
- Ewer, D.W. (1971): »Thoughts on radiocarbon dating«; in: *ANTIQUITY* 45 201-02
- F**
- Fagan, B.M. (1972): »In the Beginning. An Introduction to Archaeology«; Boston
- Farmer, J.G., und M.S. Baxter (1972): »Short-term trends in natural radiocarbon«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) A59-A71
- Farnsworth, P., J.E. Brady, M.J. DeNiro und R.S. MacNeish (1985): »A re-evaluation of the isotopic and archaeological reconstructions of diet in the Tehuacan Valley«; in: *AMERICAN ANTIQUITY* 50 102-16
- Feine, U., und K. zum Winkel (1980): »Nurklearmedizin – Szintigraphische Diagnostik«; Stuttgart (Georg Thieme Verlag)
- Ferguson, C.W. (1965): »Longevity of Bristlecone Pine, *Pinus aristata*«; Vortrag gehalten auf dem AAAS Treffen, Berkeley (Kalifornien) am 30. Dezember 1965
- (1968): »Bristlecone pine: Science and esthetics«; in: *SCIENCE* 159 839-46
- (1969): »A 7104-year annual tree-ring chronology for bristlecone pine, *Pinus aristata*, from the White Mountains, California«; in: *TREE-RING-BULLETIN* 29 (3-4) 3-29
- (1970a): »Dendrochronology of bristlecone pine, *Pinus aristata*: establishment of a 7484-year chronology in the White Mountains of eastern-central California, U.S.A.«; in: Olsson (1970, ed.) 237-247
- (1970b): »Concepts and techniques of dendrochronology«; in: Berger (1970a, ed.) 183-200
- (1972): Dendrochronology of Bristlecone Pine Prior to 4000 B.C.«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) I 17-26
- (1979): »Dendrochronology of Bristlecone Pine, *Pinus longaeva*«; in: *ENVIRONMENT INTERNATIONAL* 2 209-214
- Ferguson, C.W., M. Gimbutas und H.E. Suess (1976): »Historical dates for Neolithic sites of southeast Europe«; in: *SCIENCE* 191 1170-72
- Ferguson, C.W., und D.A. Graybill (1983): »Dendrochronology of Bristlecone pine: A progress report«; in: *RADIOCARBON* 25 287-88
- Ferguson, C.W., B. Huber und H.E. Suess (1966): »Determination of the Age of Swiss Lake Dwellings as an Example of Dendrochronologically-Calibrated Radiocarbon Dating«; in: *ZEITSCHRIFT FÜR NATURFORSCHUNG* 21a (7) 1173-1177
- Filip, J. (1969): »Enzyklopädisches Handbuch zu Ur- und Frühgeschichte Europas«; 2 Bände, Stuttgart, Berlin, Köln und Mainz (W. Kohlhammer Verlag)
- Fleming, S. (1976): »Dating in Archaeology. A Guide to Scientific Techniques«; London
- Fletcher, J. (1978, ed.): »Dendrochronology in Europe«; in: *BAR (Int. series)* 51

- Frenzel, B. (1977, ed.): »Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Europa. Verhandlungen des Symposiums über die Dendrochronologie des Postglazials, Grundlagen und Ergebnisse, 13. - 16. Juni 1974«; Wiesbaden (Franz Steiner Verlag GmbH)
- Freundlich, J.C. (1973): »Pollenanalyse, Jahrringanalyse und C14-Datierungen in ihrem Zusammenwirken für die urgeschichtliche Chronologie IV. Die Altersbestimmungen nach der Radio-kohlenstoffmethode«; in: ARCHÄOLOGISCHES KORRESPONDENZBLATT 5 159-62
- (1977): »<sup>14</sup>C-Datierung und Dendrochronologie«; in: Frenzel (1977, ed.) 99-114
- Freundlich, J.C., und B. Schmidt (1983): »Calibrated <sup>14</sup>C dates in Central Europe – Same as elsewhere?«; in: RADIO-CARBON 25 279-86
- Fritts, H.C. (1966): »Growth-rings of trees: their correlation with climate«; in: SCIENCE 154 973-79
- (1969): »Bristlecone pine in the White Mountains of California: growth and ring-width characteristics«; in: PAPERS OF THE LABORATORY OF TREE-RING RESEARCH (The University of Arizona Press, Tucson) 4
  - (1977): »Some quantitative methods for calibrating ring widths with variables of climate«; in: Frenzel (1977, ed.) 147-150
- ## G
- Gaines, S.W. (1981, ed.): »Data Bank Applications in Archaeology«; Tucson (University of Arizona Press)
- De Geer, E.H. (1959): »Das wahre Null-Warw der Zeitskala von G. De Geer«; in: EISZEIT UND GEGENWART 10 113-17
- De Geer, G. (1909): »Dal's Ed. Some stationary Ice-borders of the last Glaciation«; in: GEOL. FÖREN. I STOCKHOLM FÖRHANDL. 31 (7)
- (1910): »Quaternary Sea-bottoms in Western Sweden«; in: GEOL. FÖREN. I STOCKHOLM FÖRHANDL. 32 (5)
  - (1912): »Kontinentale Niveauveränderungen im Norden Europas (Congrès Géologique International, Compte Rendu de la XI:e Session, Stockholm 1910)«; Stockholm (P.A. Norstedt & Söner)
- Geyh, M.A. (1971a): Die Anwendung der <sup>14</sup>C-Methode«; in: CLAUSTHALER TEKTONISCHE HEFTE 11, Clausthal-Zellerfeld (Verlag Ellen Pilger)
- (1971b): »Middle and young Holocene sea-level changes as global contemporary events«; in: GEOLOGISKA FÖRENINGENS I STOCKHOLM FÖRHANDLINGAR 93 679-92
  - (1980): »Holocene sea-level history: Case study of the statistical evaluation of <sup>14</sup>C dates«; in: RADIOCARBON 22 (3) 695-704
  - (1983): »Physikalische und Chemische Datierungsmethoden in der Quartär-Forschung«; Clausthal-Zellerfeld
  - (1991): »Die <sup>14</sup>C-Methode – Altersbestimmung mit Problemen«; in: BERICHT ZUR DENKMALPFLEGE IN NIEDERSACHSEN 4 135-38
- Geyh, M.A., G. Roeschmann, T.A. Wijnstra und A.A. Middeldorp (1983): »The unreliability of <sup>14</sup>C dates obtained from buried sandy podzols«; in: RADIOCARBON 25 409-16
- Gillespie, R. (1984): »Radiocarbon User's Handbook«; Oxford University Committee for Archaeology, Vertrieb durch Oxbow Books, 10 St Cross Road, Oxford (UK)
- Gillespie, R., und H.A. Polach (1979): »The suitability of marine shells for radiocarbon dating of Australian pre-history«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 404-21

- Gilluly, J., A.C. Waters und A.O. Woodford (1975): »Principles of Geology«; San Francisco (W.H. Freeman and Company)
- Glock, W.S. (1937): »Principles and methods of tree ring analysis«; in: PUBLICATIONS OF THE CARNEGIE INSTITUTE (Washington) No. 486
- Glock, W.S., und S. Agerter (1963): »Anormale Muster bei Jahresringen«; in: ENDEAVOUR (DEUTSCH) XXII 9-13
- Göksu, H.Y., M. Oberhofer und D. Reggulla (1991, eds.): »Scientific Dating Methods«; Dordrecht, Boston und London (Kluwer Academic Publisher)
- Goel, P.S., und T.P. Kohman (1962): »Cosmogenic Carbon-14 in Meteorites and Terrestrial Ages of 'Finds' and Craters«; in: SCIENCE 136 875-76
- Görsdorf, J. (1992): »Interpretationen der <sup>14</sup>C-Datierungen im Berliner Labor an Materialien eines Hauses von Feudvar bei Mořbrin in der Vojvodina«; in: GERMANIA 70 279-91
- Goodfriend, G.A. (1987): »Radiocarbon age anomalies in shell carbonate of land snails from semi-arid areas«; in: RADIOCARBON 29 159-67
- Goslar, T., M. Arnold, E. Bard, T. Kuc, M.F. Pazdur, M. Ralska-Jasiewiczowa, K. Rozanski, N. Tisnerat, A. Walanus, B. Wicik und K. Wieckowski (1995): »High concentration of atmospheric <sup>14</sup>C during the Younger Dryas cold episode«; in: NATURE 377 414-17
- Goslar, T., M. Arnold und M.F. Pazdur (1995): »The Younger Dryas Cold Event – Was it synchronous over the North Atlantic Region?«; in: RADIOCARBON 37 63-70
- Gove, H.E. (1990): »Dating the Turin Shroud: An Assessment«; in: RADIOCARBON 32 87-92
- Gowlett, J.A.J., R.E. Hedges und I.A. Law (1989): »Radiocarbon accelerator (AMS) dating of Lindow Man«; in: ANTIQUITY 63 71-79
- Grant-Taylor, T.L. (1972): »Conditions for the use of calcium carbonate as a dating material«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) 592-95
- Graybill, D.A. (1979): »Revised computer programs for tree-ring research«; in: TREE-RING BULLETIN 39
- Grey, D.C., und P.E. Damon (1970): »Sunspots and radiocarbon dating in the Middle Ages«; in: Berger (1970a, ed.) 167-82
- Gribbin, J. (1979): Making a date with radiocarbon«; in: NEW SCIENTIST (17. Mai 1979)
- Gross, H. (1958): »Die bisherigen Ergebnisse von C<sup>14</sup>-Messungen und paläontologischen Untersuchungen für die Gliederung und Chronologie des Jungpleistozäns in Mitteleuropa und den Nachbargebieten«; in: EISZEIT UND GEGENWART 9 155-87
- Groves, C, G McCormac, M. Baillie, D. Brown, M. Brennand und A. Bayliss (1999): »Precise dating of the Norfolk timber circle«; in: NATURE 402 (6761) 479
- Guidon, N., und B. Arnaud (1991): »The chronology of the New World: two faces of one reality«; in: WORLD ARCHAEOLOGY 23 167-78
- Gulliksen, S. (1983): »Radiocarbon Database: A Pilot Project«; in: RADIOCARBON 25 661-66
- Guyan, W.U. (1977): »Archäologie und Dendrochronologie der jungsteinzeitlichen Moordorfer Thayngen-Weier«; in: Frenzel (1977, ed.) 126-42
- ## H
- Haas, H. et al. (1987): »Radiocarbon Chronology and the Historical Calendar in Egypt« in Aurenche et al. (1987) 585-606

- Hackens, T., A.V. Munaut und C. Till (1988, eds.): »Wood and Archaeology«; PACT 22
- Hajdas, I. (1993): »Extension of the radiocarbon calibration curve by AMS dating of laminated sediments of Lake Soppensee and Lake Holzmaar«; Zürich (Dissertation an der ETH Zürich, Nr. 10157)
- Hajdas, I., S.D. Ivy-Ochs und G. Bonani (1995): »Problems in the Extension of the Radiocarbon Calibration Curve (10-13 kyr BP)«; in: RADIOCARBON 37 75-79
- Hanover, W. (1980): »Control of Tree Growth«; in: BIOSCIENCE 30 (11)
- Harkness, D.D. (1983): »High-precision C14 calibration: a reconnaissance of the advantages and potential dangers«; in: Ottaway (1983, ed.) 25-36
- Harkness, D.D., und R. Burleigh (1974): »Possible carbon-14 enrichment in high altitude wood«; in: ARCHAEOOMETRY 16 121-27
- Harkness, D.D., G.T. Cook, B.F. Miller, E.M. Scott und M.S. Baxter (1989): »Design and preparation of samples for the International Collaborative Study«; in: RADIOCARBON 31 407-13
- Harkness, D.D., und B.F. Miller (1980): »Possibility of climatically induced variations in the  $^{14}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$  enrichment patterns as recorded by a 300-year-old Norwegian Pine«; in: RADIOCARBON 22 291-98
- Harris, D.R. (1987): »The impact on archaeology of radiocarbon dating by accelerator mass spectrometry«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A323 23-43
- Hassan, A.A., und D.J. Ortner (1977): »Inclusions in bone material as a source of error in radiocarbon dating«; in: ARCHAEOOMETRY 19 131-35
- Hassan, A.A., J.D. Termine und C.V. Haynes (1977): »Mineralogical studies on bone apatite and their implications for radiocarbon dating«; in: RADIOCARBON 19 364-84
- Hassan, F.A. (1989): »The Restoration of Time: Radiocarbon dating 1965-85/6«; in: THE REVIEW OF ARCHAEOLOGY 10 54-58
- Hassan, F.A. und S.W. Robinson (1987): »High precision radiocarbon chronometry of ancient Egypt, and comparisons with Nubia, Palestine and Mesopotamia«; in: ANTIQUITY 61 119-35
- Hedges, R.E.M. (1983): »The accelerator technique for C14 measurement: Its implications for radiocarbon dating«; in: Ottaway (1983, ed.) 42-50
- Hedges, R.E.M., und J.A.J. Gowlett (1986): »Radiocarbon dating by accelerator mass spectrometry«; in: SCIENTIFIC AMERICAN 254 100-107
- Heiler, S., und P. Michels (1994): »Deskriptive und Explorative Datenanalyse«; München und Wien (R. Oldenbourg Verlag)
- Heinsohn, G. (1988): »Die Sumerer gab es nicht«; Frankfurt am Main (Eichborn Verlag)
- (1991): »Wie alt ist das Menschengeschlecht? Stratigraphische Grundlegung der Paläoanthropologie und der Vorzeit«; Graefelfing ( $^3$ 2000) (Mantis Verlag)
- Heinsohn, G., und H. Illig (1990): »Wann lebten die Pharaonen? Archäologische und technologische Grundlagen für eine Neuschreibung der Geschichte Ägyptens und der übrigen Welt«; Frankfurt am Main (Eichborn Verlag)
- (1997): »Wann lebten die Pharaonen? Archäologische und technologische Grundlagen für eine Neuschreibung der Geschichte Ägyptens und der übrigen Welt«; Graefelfing ( $^3$ 1999) (Mantis Verlag)
- Helck, W. (1987): »Was kann die Ägyptologie wirklich zum Problem der ab-

- soluten Chronologie in der Bronzezeit beitragen?«; in: Åström (1987, ed.) Teil 1, 18-26
- Helck, W., E. Otto und W. Westendorf (1975-1986): »Lexikon der Ägyptologie (6 Bände)«; Wiesbaden
- Henry, D.O. (1992): The Impact of Radiocarbon Dating on Near Eastern Prehistory«; in: Taylor et al. (1992, eds.) 324-34
- Herrmann, B. (1994, ed.): »Archäometrie. Naturwissenschaftliche Analyse von Sachüberresten«; Berlin u.a. (Springer-Verlag)
- Hertelendi, E. (1990): »Sources of random errors in the Debrecen radiocarbon laboratory«; in: RADIOCARBON 32 283-87
- Heske, I. (1994): »Feudvar: Befunde, Stratigraphien und Meßserien. C<sup>14</sup> ist das (Un-)Maß aller Dinge«; in: VORZEIT-FRÜHZEIT-GEGENWART 6 82-98
- Hesshaimer, V., M. Heimann und I. Levin (1994): »Radiocarbon evidence for a smaller oceanic carbon dioxide sink than previously believed«; in: NATURE 370 201-203
- Hester, J.J. (1987): »The Significance of Accelerator Dating in Archaeological Method and Theory«; in: JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY 14 445-51
- Hewson, A.D., und R. Burleigh (1980): »Radiocarbon variations in consecutive single rings of a 4000-year-old pine from the British Isles«; in: RADIOCARBON 22 278-85
- Heydenreich, L.H. (1968): »Dendrochronologische Untersuchungen an Objekten Mittelalterlicher Kunst«; in: KUNSTCHRONIK 21 141-98
- Hodder, I. (1991, ed.): »Archaeological theory in Europe«; London & New York
- Hohl, R. (1985, ed.): »Die Entwicklungsgeschichte der Erde«; Hanau (Verlag Werner Dausien) 285-88
- Holliday, V.T., und E. Johnson (1986): »Re-evaluation of the first radiocarbon age for the Folsom culture«; in: AMERICAN ANTIQUITY 51 332-38
- Hollstein, E. (o.J.) »Die statistische Prüfung einer dendrochronologischen Hypothese«; (aus dem Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität zu Köln, hektographiertes Manuskript)
- (1970): »Dendrochronologische Untersuchungen an Hölzern des frühen Mittelalters«; in: ACTA PRAEHIISTORIA ET ARCHAEOLOGICA I 147-156
  - (1977): »Eichenchronologie Westdeutschlands und der Schweiz aus römischer und vorrömischer Zeit«; in: Frenzel (1977, ed.) 16-24
  - (1980): »Mitteleuropäische Eichenchronologie. Trierer dendrochronologische Forschungen zur Archäologie und Kunstgeschichte«; Mainz (Verlag Philipp von Zabern)
- Hoops, J. (1981): »Reallexikon der Germanischen Altertumskunde«; Berlin, New York (Verlag Walter de Gruyter & Co.)
- Horn, W. (1970): »The potential and limitations of radiocarbon dating in the Middle Ages: The art historian's view«; in: Berger (1970a, ed.) 23-87
- Hrouda, B. (1978, ed.): »Methoden der Archäologie, eine Einführung in ihre naturwissenschaftlichen Techniken«; München (C.H. Beck)
- Huber, B. (1943): »Über die Sicherheit jahringchronologischer Datierung«; in: HOLZ 6 263-68
- (1960): »Dendrochronologie«; in: GEOLOGISCHE RUNDSCHAU 49 120-31
  - (1966): »Jahringchronologische Untersuchungen«; als Bericht über das Jahr 1966 an die DFG vom 21. November 1966 (Bad Godesberg)
  - (1968): *Diskussion zum Vortrag »Jahring und Radiocarbonatierung«*; in: KUNSTCHRONIK 21 (6) 148-154

- (1970): »Dendrochronology of central Europe«; in: Olsson (1970, ed.)
- Huggett, R. (1990): »Catastrophism. Systems of Earth History«; London, New York, Melbourne und Auckland (Edward Arnold)

## I

- Illig, H. (1988) »Die veraltete Vorzeit. Eine neue Chronologie der Prähistorie«; Frankfurt am Main (Eichborn Verlag)
- (1991): »Dendrochronologische Zirkelschlüsse«; in: VORZEIT-FRÜHZEIT-GEGENWART III (3-4) 125-129
- (1992): »Chronologie und Katastrophismus. Vom ersten Menschen bis zum drohenden Asteroidenschlag«; Gräfelting (Mantis Verlag) 71-74
- (1994): »Hat Karl der Große je gelebt? Bauten, Funde und Schriften im Widerstreit«; Graefelfing (Mantis Verlag)
- (1996): »Das erfundene Mittelalter. Die größte Zeitfälschung aller Zeiten«; Düsseldorf (Econ Verlag)
- (1999): »Wer hat an der Uhr gedreht? Wie 300 Jahre Geschichte erfunden wurden«; München (Econ & List Taschenbuch Verlag)

International Atomic Energy Agency [IAEA] (1967): »Radioactive dating and methods of low level counting«; Wien

- International Study Group [ISG] (1982): »An interlaboratory comparison of radiocarbon measurements in tree rings«; in: NATURE 298 619-23
- (1983): »An international tree-ring replicate study«; in: Waterbolk/Mook (1983, eds.) 123-33

Irving, W.N., und C.R. Harrington (1973): »Upper Pleistocene radiocarbon-dated artifacts from the Northern Yukon«; in: SCIENCE 179 335-40

Isaacson, I.M. (1973): »Carbon 14 Dates and Velikovskys Revision of Ancient

History«; in: PENSÉE IV (spring/summer) 26-32

## J

Jaguttis-Emden, M. (1977): »Zur Präzision archäologischer Datierungen«; Tübingen (Verlag Archaeologica Venetia, Institut für Urgeschichte der Universität Tübingen)

- (1988): »Bemerkungen zu Kalibration und Interpretation archäologischer <sup>14</sup>C-Standarddatierungen«; in: ACTA PRAEHISTORICA 20 183-88

Jankuhn, H. (1984, ed.): »Archäologische und naturwissenschaftliche Untersuchungen an ländlichen und frühstädtischen Siedlungen im deutschen Küstengebiet vom 5. Jahrhundert v.Chr. bis zum 11. Jahrhundert n.Chr.«, Bd. 2: Handelsplätze des frühen und hohen Mittelalters; Weinheim (DFG, Acta Humaniora)

Jansen, H.S. (1962): »Comparison between ring-dates and <sup>14</sup>C-dates in a New Zealand Kauri tree«; in: NEW ZEALAND JOURNAL OF SCIENCE 5 74-84

- (1970): »Secular variations of radiocarbon in New Zealand and Australian trees«; in: Olsson (1970, ed.) 262-274

Jansen, H.S., und P. Wardle (1971): »Comparison between ring age and <sup>14</sup>C-dates in Rimu-trees from Westland and Auckland«; in: NEW ZEALAND JOURNAL OF BOTANY 9 215-16

Jelinek, A.J. (1962): »An Index of Radiocarbon Dates Associated with Cultural Materials«; in: CURRENT ANTHROPOLOGY 3 451-77

Johnson, F. (1955): »Reflections upon the significance of radiocarbon dates«; in: Libby (<sup>2</sup>1955)

- (1959): »A Bibliography of Radiocarbon dating«; in: AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE RADIOCARBON SUPPLEMENT 1 199-214

- (1965): »The impact of radiocarbon dating upon archaeology«; in: Chatters/Olson (1965, eds.) 762-84
- Johnson, F., F. Rainey, D. Collier und R.F. Flint (1951): »Radiocarbon dating: a summary«; in: AMERICAN ANTIQUITY 17 (1, Teil 2) 59-63
- Jones, P.D., K.R. Briffa und F.H. Schweingruber (1995): »Tree-ring evidence of the widespread effects of explosive volcanic eruptions«; in: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 22 1333-36
- de Jong, A.F.M., und W.G. Mook (1980): »Medium-term atmospheric <sup>14</sup>C variations«; in: RADIOCARBON 22 267-72
- de Jong, A.F.M., W.G. Mook und B. Becker (1979): »Confirmations of Suess wiggles: 3200-3700 B.C.«; in: NATURE 280 48-49
- ## K
- Kalin, R.M., F.G. McCormac, P.E. Damon, C.J. Eastoe und A. Long (1995): »Intercomparison of high precision <sup>14</sup>C measurements at the University of Arizona and the Queen's University of Belfast Radiocarbon Laboratories«; in: RADIOCARBON 37 (1) 33-38
- Kamen, M.D. (1963): »Early History of Carbon-14«; in: SCIENCE 140 584-90
- (1985): »Radiant science, dark politics, a memoir of the nuclear age«; Berkeley (University of California Press)
- Keeling, C.D. (1979): »The Suess effect: <sup>13</sup>Carbon-<sup>14</sup>Carbon interrelations«; in: ENVIRONMENT INTERNATIONAL 2 229-300
- Keith, M.L., und G.B. Anderson (1963): »Radiocarbon Dating: Fictitious Results with Mollusk Shells«; in: SCIENCE 141 634-37
- Kelley, J.H., und M.P. Hanan (1988): »Archaeology and the methodology of science«; Albuquerque (University of New Mexico Press)
- Kemp, B. (1980): »Egyptian radiocarbon dating: A reply to James Mellaart«; in: ANTIQUITY 54 25-28
- Key, R.M. (1996): »WOCE Pacific Ocean Radiocarbon Program«; in: RADIOCARBON 38 (3) 415-23
- Kigoshi, K. (1965): »Secular variation of atmospheric radiocarbon concentration and its dependence on geomagnetism«; in: Chatters/Olson (1965, eds.) 429-38
- Kitchen, K.A. (1987): »The basics of Egyptian chronology in relation to the Bronze Age«; in: Åström (1987, ed.) Teil 1, 37-55
- (1991): »The chronology of ancient Egypt«; in: WORLD ARCHAEOLOGY 23 201-208
- Klein, J., J.C. Lerman, P.E. Damon und T.W. Linick (1980): »Radiocarbon concentration in the atmosphere: 8000 year record of variation in tree-rings«; in: RADIOCARBON 22 950-61
- Klein, J., J.C. Lerman, P.E. Damon und E.K. Ralph (1982): »Calibration of radiocarbon dates: tables based on the consensus data of the workshop on calibrating the radiocarbon time scale«; in: RADIOCARBON 24 103-50
- Klein, P., und D. Eckstein (1988): »Die Dendrochronologie und ihre Anwendung«; in: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFTEN (Januar) 56-68
- Korff, S.A. (1940): »On the contribution to the ionization at sea-level produced by the neutrons in the cosmic radiation«; in: TERRESTRIAL MAGNETISM AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY 45 133-34
- Korff, S.A., und W.E. Danforth (1939): »Neutron measurements with boron-trifluoride counters«; in: PHYSICAL REVIEW 55 980
- Kra, R. (1985): »Standardizing procedures for collecting, submitting, recording, and reporting radiocarbon

- samples«; in: NORTH AMERICAN ARCHAEOLOGIST 6 245-55
- (1986a): »Reports on the  $^{14}\text{C}$  Data Base Workshop«; in: RADIOCARBON 28 (2A) 800-802
  - (1986b): Standardizing procedures for collecting, submitting, recording and reporting radiocarbon samples«; in: RADIOCARBON 28 765-75
  - (1988): »Updating the past: The establishment of the international radiocarbon database«; in: AMERICAN ANTIQUITY 53 118-25
- Kriegel, H. (1985, ed.): »Grundlagen der Nuklearmedizin«; Stuttgart and New York (Gustav Fischer Verlag)
- Kromer, B., J. Ambers, M.G.L. Baillie, P.E. Damon, V. Hesshaimer, J. Hofmann, O. Jöris, I. Levin, S.W. Manning, F.G. McCormac, J. van der Pflicht, M. Spurk, M. Stuiver und B. Weninger (1996): »Report: Summary of the Workshop 'Aspects of High-Precision Radiocarbon Calibration' «; in: RADIOCARBON 38 607-10
- Kromer, B., und B. Becker (1993): »German oak and pine  $^{14}\text{C}$  calibration, 7200 B.C. to 9400 B.C.«; in: RADIOCARBON 35 125-35
- Kruse, H.H., T. Linick, H.E. Suess und B. Becker (1980): »Computer-matched radiocarbon dates of floating tree-ring series«; in: RADIOCARBON 22 260-66
- Kühn, H. (1976): »Geschichte der Vorgeschichtsforschung«; Berlin, New York (Verlag Walter de Gruyter & Co.)
- Kulp, J.L., L.E. Tyron, W.R. Eckelman und W.A. Snell (1952): »Lamont natural radiocarbon measurements II«; in: SCIENCE 116 409-14
- Kuniholm, P.I. (1990): »Archaeological Evidence and Non-Evidence for Climatic Change«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A330 645-55
- Kuniholm, P.I., B. Kromer, S.W. Manning und M. Newton (1996): »Anatolian tree rings and the absolute chronology of the eastern Mediterranean, 2220-718 BC«; in: NATURE 381 780-83
- Kuniholm, P.I., und C.L. Striker (1983): »Dendrochronological Investigations in the Aegan and Neighboring Regions 1977-1982«; in: JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY 10 411-20
- (1985): »Dendrochronological Investigations in the St. Sophia in Istanbul: A Preliminary Report«; in: ANNUAL OF AYASOFYA MUSEUM 10 41-45
  - (1987): »Dendrochronological Investigations in the Aegan and Neighboring Regions 1983-1986«; in: JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY 14 385-98
- Kurie, F.N.D. (1934): »A new mode of disintegration induced by neutrons«; in: PHYSICAL REVIEW 45 904-905
- ## L
- Laj, C., A. Mazaud und J.-C. Duplessey (1996): »Geomagnetic intensity and  $^{14}\text{C}$  abundance in the atmosphere and oceans during the past 50 kyr«; in: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 23 2.045-48
- LaMarche, V.C., und H.C. Fritts (1973): »Tree-rings and sunspot numbers«; in: TREE-RING BULLETIN 32
- LaMarche, V.C., und T.P. Harlan (1973): »Accuracy of Tree Ring Dating of Bristlecone Pine for calibration of the Radiocarbon Time Scale«; in: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 28 (36) 8849-8857
- Lambert, G., und C. Lavier (1991): »A new historical master chronology for dendrochronology of the oak in the east of France. Questions about the dating in a large geographical area«; in: DENDROCHRONOLOGICA 9 165-79

- Lavell, C. (1995): »A database of radiocarbon dates for archaeology«; in: INDEXER 19 173-76
- Laxton, R.R., C.D. Litton und H.J. Zainodin (1988): »An Objective Method for Forming a Master Ring-Width Sequence«; in: Hackens et al. (1988, eds.) 25-35
- Leavitt, S.W., und A. Long (1982): »Evidence for  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  fractionation between tree leaves and wood«; in: NATURE 298 742-43
- Lee, R.E. (1981): »Radiocarbon: Ages in Error«; in: ANTHROPOLOGICAL JOURNAL OF CANADA 19 9-29
- Leese, M.N. (1988): »Methods for finding calendar date bands from multiple-valued radiocarbon calibration curves«; in: Ruggles/Rahtz (1988, eds.) 147-51
- Lehman, S.J., und L.D. Keigwin (1992): »Sudden changes in North Atlantic circulation during the last deglaciation«; in: NATURE 356 757-62
- Lehman, S.J., D.G. Wright und T.F. Stocker (1993): »Transport of freshwater into the deep ocean by the conveyor«; in: Peltier (1993, ed.) 187-209
- Lerman, J.C., W.G. Mook und J.C. Vogel (1970): »C-14 in tree-rings from different localities«; in: Olsson (1970, ed.) 275-301
- Leuschner, H.-H. (1994): »Jahrringanalysen«; in: Herrmann (1994, ed.) 121-35
- Leute, U. (1987): »Achaemetry«; Weinheim (Verlag Chemie)
- Lewis, R.B. (1985): »Radiocarbon dating and Lower Mississippi Valley Archaeology«; in: NORTH AMERICAN ARCHAEOLOGIST 6 213-225
- Libby, L.M. (1981): »Willard Frank Libby 1908-1980«; in: »Radiocarbon and Tritium, Willard F. Libby collected papers«, Santa Monica (Geo Science Analytical) 1
- Libby, L.M., und W.F. Libby (1972): »Volcanism and radiocarbon dates«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, compilers) A73-A75
- Libby, L.M., und H.R. Lukens (1973): »Production of radiocarbon in tree rings by lightning bolts«; in: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 78 5902-3
- Libby, W.F. (1952, <sup>2</sup>1955): »Radiocarbon dating«; Chicago (University of Chicago Press)
- (1961a): »Radiocarbon dating«; in: SCIENCE 133 621-29
  - (1961b): »Radiocarbon dating (Nobelpreisrede vom 12. Dezember 1960)«; in: LEX PRIS NOBEL EN 1960, Stockholm (Nobel Foundation) 95-102
  - (1963): »Accuracy of Radiocarbon Dates«; in: SCIENCE 140 178-80
  - (1965): »Natural radiocarbon and tritium in retrospect and prospect«; in: Chatters/Olson (1965, eds.) 745-51
  - (1967): »History of radiocarbon dating«; in: International Atomic Energy Agency (1967) 3-25
  - (1970a): »Radiocarbon dating«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A269 1-10
  - (1970b): »Ruminations in radiocarbon dating«; in: Olsson (1970, ed.) 629-40
  - (1973): »Radiocarbon dating, memories and hopes«; in: Rafter/Grant (1973, eds.) xxvii-xliii
  - (1979): »Radiocarbon dating in the future«; in: ENVIRONMENT INTERNATIONAL 2 205-7
  - (1980): »Archaeology and radiocarbon dating«; in: RADIOCARBON 22 1017-20
  - (1982): »Nuclear dating: An historical perspective«; in: Currie (1982, ed.) 1-4
- Libby, W.F., E.C. Anderson und J.R. Arnold (1949): »Age Determination by Radiocarbon Content: World-Wide

- Assay of Natural Radiocarbon«; in: SCIENCE 109 227-228
- Lingenfelter, R.E. (1963): »Production of Carbon 14 by cosmic-ray neutrons«; in: REVIEW OF GEOPHYSICS 1 35-55
- Linick, T.W., H.E. Suess und B. Becker (1985): »La Jolla measurements of radiocarbon in South German oak tree-ring chronologies«; in: RADIOCARBON 27 20-32
- Lipp, J., und P. Trimborn (1995): »Stabile Isotope in Jahrringen von Bäumen«; in: NATURWISSENSCHAFTLICHE RUNDSCHAU 48 46-50
- Litherland, A.E. (1984): »Accelerator mass spectrometry«; in: NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH 233 B5 100-108
- Long, A. (1990): »From the editor: Summary of the international workshop on intercomparison of  $^{14}\text{C}$  laboratories«; in: RADIOCARBON 32 iii
- (1991): »From the editor: 40 and still going strong«; in: RADIOCARBON 33 iii
- Long, A., L.D. Arnold, P.E. Damon, C.W. Ferguson, J.C. Lerman und A.T. Wilson (1979): »Radial Translocation of Carbon in Bristlecone Pine«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 532-537
- Long, A., R.B. Hendershott und P.S. Martin (1983): »Radiocarbon dating of fossil egg-shell«; in: RADIOCARBON 25 533-39
- Long, A. und R. Kra (1989, eds.): »Proceedings of the 13th International Radiocarbon Conference«; in: RADIOCARBON 31 3
- Long, A., und B. Rippeteau (1974): »Testing contemporaneity and averaging radiocarbon dates«; in: AMERICAN ANTIQUITY 39 205-15
- Long, R.D. (1973): »An Evaluation of Tree-Ring Calibration and Carbon 14 Dating«; in: PRÄHISTORISCHE ZEITSCHRIFT 48 125-132
- (1976): »Ancient Egyptian Chronology, Radiocarbon Dating, and Calibration«; in: ZEITSCHRIFT FÜR ÄGYPTISCHE SPRACHE UND ALTERTUMSKUNDE 103 30-48
- Lynch, T.F. (1990): »Glacial-age man in South America? A critical review«; in: AMERICAN ANTIQUITY 55 12-36
- ## M
- Macintosh, N.W.G. (1972): »Radiocarbon dating as a pointer in time to the arrival and history of man in Australia and Islands to the Northwest«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) xlv-lvi
- MacKie, E.W. (1978): »Radiocarbon Dating and Egyptian Chronology«; in: SOCIETY OF INTERDISCIPLINARY STUDIES REVIEW (SIS) VI (Proceedings of the »Ages in Chaos?« Conference in Glasgow, April 1978) 56-65
- MacKie, E.W., J. Collis, D.W. Ewer, A. Smith, H.E. Suess und C. Renfrew (1971): »Thoughts on radiocarbon dating«; in: ANTIQUITY 45 197-204
- Mahaney, W.C. (1984): »Quaternary dating methods«; Amsterdam (Elsevier)
- Maier-Reimer, E. (1996): »Der Ozean im Klimasystem«; in: WECHSELWIRKUNG (Okt.-Nov.) 22-25
- Maier-Reimer, E., und U. Mikolajewicz (1989): »Experiments with an OGCM on the cause of the Younger Dryas«; in: TECHNICAL REPORT 39 1-13 (Max-Planck-Institut für Meteorologie, 20146 Hamburg)
- Mangerud, J., und S. Gulliksen (1975): »Apparent radiocarbon ages of marine shells from Norway, Spitsbergen, and Arctic Canada«; in: QUATERNARY RESEARCH 5 263-73
- Mann, J.C., und D.K. Messman (1976): »Dating archaeological material«; in: CURRENT ANTHROPOLOGICAL 17 484-85

- Mann, W.B. (1983): »An international reference material for radiocarbon dating«; in: *RADIOCARBON* 25 519-27
- Marlowe, G. (1980): »W.F. Libby and the archaeologists, 1946-1948«; in: *RADIOCARBON* 22 1005-14
- Matson, F.R. (1955): »Charcoal concentration from early sites for radiocarbon dating«; in: *AMERICAN ANTIQUITY* 21 162-69
- McCormac, F.G., M.G.L. Baillie, J.R. Pilcher und R.M. Kalin (1995): »Location-dependent Differences in the  $^{14}\text{C}$  content of Wood«; in: *RADIOCARBON* 37 (2) 395-407
- McKerrell, H. (1975): »Correction procedures for C-14 dates«; in: Watkins (1975, ed.) 47-100
- McPhail, S.M. (1982): »Reliable radiocarbon dates from bones: The Sydney University experiment«; in: Ambrose/Duerden (1982, eds.) 336-342
- McPhail, S.M., M. Barbetti, R. Francey, T. Bird und J. Dolezal (1983): » $^{14}\text{C}$  variations from Tasmanian trees – preliminary results«; in: *RADIOCARBON* 25 797-802
- Mellaart, J. (1979): »Egyptian and Near-Eastern chronology: A dilemma?«; in: *ANTIQUITY* 53 6-18
- Meltzer, D.J. (1989): »Why don't we know when the first people came to North America?«; in: *AMERICAN ANTIQUITY* 54 471-490
- Michael, H.N. (1984): »Extending the calibration of radiocarbon dates: The search for ancient wood«; in: *MASCA JOURNAL* 3 1 17-19
- Michael, H.N., und E.K. Ralph (1971, eds.): »Dating Techniques for the Archaeologist«; Cambridge (Mass.) und London (MIT Press)
- (1972): »Discussion of radiocarbon dates obtained from precisely dated Sequoia and Bristlecone pine samples«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) A11-A27
- Michels, J.W. (1973): »Dating methods in archaeology«; New York und London (Seminar Press)
- Mignon, M.R. (1993): »Dictionary of concepts in archaeology«; Westport, CT (Greenwood Press)
- Mikolajewicz, U. (1996): »Meltwater induced collapse of the 'conveyor belt' thermohaline circulation and its influence on the distribution of  $\delta^{14}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in the oceans«; Max-Planck-Institut für Meteorologie, 20146 Hamburg
- Mikolajewicz, U., und E. Maier-Reimer (1994): »Mixed boundary conditions in ocean general circulation models and their influence on the stability of the model's conveyor belt«; in: *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* 99 22.633-44
- Milošević, V. (1958): »Zur Anwendbarkeit der C14-Datierung in der Vorgesellschaftsforschung«; in: *GERMANIA* 36
- (1965): »Die Tontafeln von T|rt|ria (Siebenbürgen) und die absolute Chronologie des mitteleuropäischen Neolithikums«; in: *GERMANIA* 43 261-68
- (1970): »Die absolute Chronologie der Jungsteinzeit in Südosteuropa und die Ergebnisse der Radiocarbon-(C 14-) Methode; in: *JAHRBUCH DES RÖMISCH-GERMANISCHEN ZENTRALMUSEUMS MAINZ* 14 (1967) 9-28
- Moffett, J.C., und R.E. Webb (1983): »Database management system, radiocarbon and archaeology«; in: *RADIOCARBON* 25 667-68
- Molina-Cruz, A. (1977): »The relations of the southern trade winds to upwelling processes during the last 75.000 years«; in: *QUATERNARY RESEARCH* 8 324-38
- Mommsen, H. (1986): »Archäometrie«; Stuttgart (B.G. Teubner)
- Mook, W.G., A.F.M. de Jong und H. Geertsema (1979): »Archaeological im-

- plications of natural carbon-14 variations«; in: *PALEOHISTORIA* 21 9-18
- Mook, W.G., A.V. Munaut und H.T. Waterbolk (1972): »Determination of the Age and Duration of Stratified Prehistoric Bog Settlements«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) F27-F40
- Mook, W.G., und H.T. Waterbolk (1983, eds.): »Proceedings of the Groningen Conference on  $^{14}\text{C}$  and Archaeology«; PACT Publication 8
- (1977): »Dendrochronological calibration of the radiocarbon timescale: The present situation and the perspectives in Europe«; in: Frenzel (1977, ed.) 68-79
  - (1985): »Handbook for Archaeologists No. 3: Radiocarbon Dating«; European Science Foundation (Strasbourg)
- Morner, N.A. (1977): »The Gotenburg magnetic excursion«; in: *QUATERNARY RESEARCH* 7 413-27
- Mowles, T. (1973): »Radiocarbon Dating and Velikovskian Catastrophism«; in: *PENSÉE IV* (spring/summer) 19-25
- Müller-Karpe, H. (1966): »Handbuch der Vorgeschichte, Band 1: Altsteinzeit«; München (C.H. Beck Verlagsbuchhandlung)
- (1968): »Handbuch der Vorgeschichte, Band 2: Jungsteinzeit«; München (C.H. Beck Verlagsbuchhandlung)
  - (1974): »Handbuch der Vorgeschichte, Band 3, Teilband 1 (Text): Kupferzeit«; München (C.H. Beck Verlagsbuchhandlung)
  - (1980): »Handbuch der Vorgeschichte, Band 4: Bronzezeit«; München (C.H. Beck Verlagsbuchhandlung)
- Münnich, K.O. (1957): »Heidelberg natural radiocarbon measurements I«; in: *SCIENCE* 126 194-99
- Munro, M.A.R. (1984): »An improved algorithm for cross-dating tree-ring series«; in: *TREE-RING BULLETIN* 44 17-27
- ## N
- Nelson, D.E., R.E. Morlan, J.S. Vogel, J.R. Southon und C.R. Harrington (1986): »New radiocarbon dates on artifacts from the northern Yukon Territory: Holocene not upper Pleistocene in age«; in: *SCIENCE* 232 749-51
- Neustupný, E. (1970a): »The accuracy of radiocarbon dating«; in: Olsson (1970, ed.) 23-34
- (1970b): »A New Epoch in Radiocarbon Dating«; in: *ANTIQUITY* 44 38-45
- Newgrosh, B. (1988): »Scientific Dating Methods and Absolute Chronology«; in: *JOURNAL OF THE ANCIENT CHRONOLOGY FORUM* 2 60-68
- (1990): »Still at the Crossroads: A response to Mike Baillie«; in: *JOURNAL OF THE ANCIENT CHRONOLOGY FORUM* 3 37-41
- Niemitz, H.-U. (1995): »Die 'magic dates' und 'secret procedures' der Dendrochronologie«; in: *ZEITEN-SPRÜNGE* 7 (3) 291-314
- Nydal, R. (1983): »Optimal numbers of samples and accuracy in dating problems«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 107-22
- ## O
- Oeschger, H., und J. Beer (1990): »The past 5000 years history of solar modulation of cosmic radiation from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$  studies«; in: *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON* A330 471-80
- Oeschger, H., U. Siegenthaler, U. Schotterer und A. Gugelmann (1975): »A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature«; in: *TELLUS* 27 168-92
- Ogden, J.G., III (1977): »The use and abuse of radiocarbon dating«; in: *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES* 288 167-173

- Olson, E.A., and W.S. Broecker (1961): »Lamont natural radiocarbon measurements VII«; in: *RADIOCARBON* 3 141-75
- Olsson, I.U. (1970, ed): »Radiocarbon Variations and Absolute Chronology«; Stockholm (Almqvist & Wiksell)
- (1979a): »The importance of the pre-treatment of wood and charcoal samples«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 135-46
  - (1979b): »The radiocarbon contents of various reservoirs«; in Berger/Suess (1979, eds.) 613-18
  - (1980): »<sup>14</sup>C in extractives from wood«; in: *RADIOCARBON* 22 515-24
  - (1983): »Radiocarbon dating in the arctic region«; in: *RADIOCARBON* 25 393-94
- Orcel, A. (1985): »Arbeitsgruppe für Dendrochronologie. Der Stand der Dendrochronologien 1985«; in: *DENDROCHRONOLOGICA* 3 114-16
- Orton, C. (1980): »Mathematics in archaeology«; London (Collins)
- Otlet, R.L. (1979): »An assessment of laboratory errors in liquid scintillation methods of <sup>14</sup>C dating«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 256-67
- Otlet, R.L., and A.J. Walker (1983): »The computer writing of radiocarbon reports and further developments in the storage and retrieval of archaeological data«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 91-105
- Otlet, R.L., A.J. Walker, A.D. Hewson and R. Burleigh (1980): »<sup>14</sup>C inter-laboratory comparisons in the UK: Experiment design, preparation and preliminary results«; in: *RADIOCARBON* 22 936-46
- Ottaway, B.S. (1983a, ed.): »Archaeology, dendrochronology and the radiocarbon calibration curve«; University of Edinburgh, Department of Archaeology (Occasional Paper No. 9)
- (1983b): »Introduction«; in: Ottaway (1983a, ed.) 1-4
  - (1986): »Is radiocarbon dating obsolescent for archaeologists?«; in: *RADIOCARBON* 28 (2A) 732-38
- Ottaway, B.S., and J.H. Ottaway (1972): »The Suess Calibration Curve and Archaeological Dating«; in: *NATURE* 239 512-513
- Ottaway, J.H. (1983): »A biologist's thoughts on radiocarbon dating«; in: Ottaway (1983, ed.) 64-73
- ## P
- Pardi, R., and L. Marcus (1977): »Non-counting errors in <sup>14</sup>C dating«; in: *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES* 288 174-80
- Pavlish, L.A., and E.B. Banning (1980): »Revolutionary developments in carbon-14 dating«; in: *AMERICAN ANTIQUITY* 45 290-97
- Pazdur, M.F., R. Awsiuik, T. Goslar und A. Pazdur (1990): »Systematic biases in results of the International Collaborative Study and their probable sources«; in: *RADIOCARBON* 32 289-94
- Pearson, G.W. (1980): »High precision radiocarbon dating by liquid scintillation counting applied to radiocarbon time-scale calibration«; in: *RADIOCARBON* 22 337-45
- (1986): »Precise calendrical dating of known growth-period samples using a 'curve-fitting' technique«; in: *RADIOCARBON* 28 292-99
  - (1987): »How to cope with calibration«; in: *ANTIQUITY* 61 98-103
- Pearson, G.W., and M.G.L. Baillie (1983): »High-precision <sup>14</sup>C measurement of Irish oaks to show the natural atmospheric <sup>14</sup>C variations of the AD time period«; in: *RADIOCARBON* 25 187-96
- Pearson, G.W., B. Becker und F. Qua (1993): »High precision <sup>14</sup>C measurement of German and Irish oaks to

- show the natural  $^{14}\text{C}$  variations from 7890 to 5000 BC«; in: *RADIOCARBON* 35 93-104
- Pearson, G.W., und J.R. Pilcher (1978): »Absolute radiocarbon dating by low-altitude European tree-ring calibration – reply to H.E. Suess«; in: *NATURE* 272 650
- Pearson, G.W., J.R. Pilcher und M.G.L. Baillie (1983): »High-precision  $^{14}\text{C}$  measurements of Irish oaks to show the natural  $^{14}\text{C}$  variations from 200 BC to 4000 BC«; in: *RADIOCARBON* 25 179-86
- Pearson, G.W., J.R. Pilcher, M.G.L. Baillie, D.M. Corbett und F. Qua (1986): »High-precision  $^{14}\text{C}$  measurements of Irish oaks to show the natural  $^{14}\text{C}$  variations from AD 1840-5210 BC«; in: *RADIOCARBON* 30 911-34
- Pearson, G.W., J.R. Pilcher, M.G.L. Baillie und J. Hillam (1977): »Absolute radiocarbon dating using a low altitude European tree-ring calibration«; in: *NATURE* 270 (3 November) 25-28
- Pearson, G.W. und M. Stuiver (1986): »High-precision calibration of the radiocarbon time scale, 500-2500 BC«; in: *RADIOCARBON* 28 839-62
- (1993): »High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 500-2500 BC«; in: *RADIOCARBON* 35 1 25-33
- Pecker, J.-C. und S.K. Runcorn (1990, eds.): »The Earth's climate and variability of the sun over recent millenia: geophysical, astronomical and archaeological aspects«; in: *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON* A330 395-687
- Peltier, W.R. (1993, ed.): »Ice in the Climate System«; in: *NATO ASI SER. I* 12
- Peiser, B. (1993): »Das Dunkle Zeitalter Olympias. Kritische Untersuchungen der historischen, archäologischen und naturgeschichtlichen Probleme der griechischen Achsenzeit am Beispiel der antiken Olympischen Spiele«; Frankfurt am Main et al. (Verlag Peter Lang)
- Peng, T.-H. (1989): »Changes in the ocean ventilation rates over the last 7000 years based on the  $^{14}\text{C}$  variations in the atmosphere and oceans«; in: *RADIOCARBON* 31 481-92
- van der Plicht, J. (1989): »Calibration of radiocarbon ages by computer«; in: *RADIOCARBON* 31 805-16
- van der Plicht, J., und F.G. McCormac (1995): »A Note on Calibration Curves«; *RADIOCARBON* 37 (3) 963-63
- van der Plicht, J., und W.G. Mook (1987): »Automatic radiocarbon calibration: Illustrative examples«; in: *RADIOCARBON* 31 173-82
- Pilcher, J.R. (1980): »Radiocarbon calibration: Recent progress«; in: Burleigh (1980, ed.) 45-51
- (1983): »Radiocarbon calibration and dendrochronology – An introduction«; in: Ottaway (1983, ed.) 5-14
- Pilcher, J.R., und M.G.L. Baillie (1978): »Implications of a European radiocarbon calibration«; in: *ANTIQUITY* 52 217-22
- Pilcher, J.R., M.G.L. Baillie, B. Schmidt und B. Becker (1984): »A 7.272-year tree-ring chronology for western Europe«; in: *NATURE* 312 150-52
- Plummer, M.A., F.M. Philips, J. Fabryka-Martin, H.J. Turin, P.E. Wiggand und P. Sharma (1997): »Chlorine-36 in Fossil Rat Urine: An Archive of Cosmogenic Nuclide Deposition During the Past 40,000 Years«; in: *SCIENCE* 277 538-41
- Polach, D. (1980): »The first 20 years of radiocarbon dating: An annotated bibliography, 1948-68«; in: *RADIOCARBON* 22 997-1004

Polach, H. (1989): »<sup>14</sup>Care«; in: RADIO-CARBON 31 422-30

Popov, S.G., Y.S. Svezhentsev und G.I. Zaitseva (1993): »Radiocarbon chronology of early medieval archaeological sites in northwestern Russia«; in: RADIOCARBON 35 487-93

## Q

Quitta, H. (1967): »The C14 chronology of the central and SE European neolithic«; in: ANTIQUITY 41 263-70

▫ (1975): »Die C<sup>14</sup>-Methode«; in: Schlette (1975, ed.) 98-106

## R

Raaen, V.F., G.A. Ropp und H.P. Raaen (1968): »Carbon-14«; New York (McGraw-Hill)

Radnell, C.J. (1980): »The isotopic fractionation of <sup>14</sup>C and <sup>13</sup>C relative to <sup>12</sup>C«; in: Slater/Tate (1980, eds.) 360-92

Radnell, C.J., M.J. Aitken und R.L. Otlet: »In-situ production of <sup>14</sup>C in wood«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 643-657

Rafter, T.A. (1965): »Problems in the establishment of a carbon-14 and tritium laboratory«; in: Chatters/Olson (1965, eds.) 752-61

Rafter, T.A. und T. Grant-Taylor (1972, eds.): »Proceedings of the Eighth International Radiocarbon Dating Conference«, 2 Volumes; Wellington (Royal Society of New Zealand)

Rahmstorf, S. (1994): »Rapid climate transitions in a coupled ocean-atmosphere model«; in: NATURE 372 82-85

Ralph, E.K. (1971): »Carbon-14 dating«; in: Michael/Ralph (1971, eds.) 1-48

Ralph, E.K., und J. Klein (1979): »Composite Computer Plots of <sup>14</sup>C dates for Tree-Ring-dated Bristlecone Pines and Sequoias«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 545-53

Ralph, E.K., und H.N. Michael (1974): »Twenty-five years of radiocarbon dating«; in: AMERICAN SCIENTIST 62 553-60

Ralph, E.K., H.N. Michael und M.C. Han (1973): »Radiocarbon dates and reality«; in: MASCA NEWSLETTER 9 1-20

Read, D.W. (1979): »The effective use of radiocarbon dates in the seriation of archaeological sites«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 89-94

Reichstein, H. (1989): »Zur Frage der Quantifizierung archäozoologischer Daten: ein lösbares Problem?«; in: ARCHÄOLOGISCHE INFORMATIONEN 12 144-60

Renfrew, A.C. (1990): »Climate and Holocene culture change: some practical problems«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A330 657-663

Renfrew, C. (1970): »New configuration in old world archaeology«; in: WORLD ARCHAEOLOGY 2

▫ (1971): »Carbon 14 and the prehistory of Europe«; in: SCIENTIFIC AMERICAN 225

▫ (1974): »British history: a new outline«; London (Duckworth)

▫ (1979): »Before civilization: the radiocarbon revolution and prehistoric Europe«; Oxford (Penguin Pocket Books)

Riemer, T. (1994): »Über die Varianz von Jahringbreiten. Statistische Methoden für die Auswertung der jährlichen Dickenzuwächse von Bäumen unter sich ändernden Lebensbedingungen«; Göttingen (Dissertation am Forschungszentrum Waldökosysteme)

Riggs, A.C. (1984): »Major carbon-14 deficiency in modern snail shells from the southern Nevadasprings«; in: SCIENCE 224 58-61

- Rinne, H. (1995): »Taschenbuch der Statistik«; Frankfurt am Main (Verlag Harri Deutsch)
- Roberts, jr., F.H.H. (1952): »The Carbon-14 Method of Age Determination«; in: ANNUAL REPORT OF THE BOARD OF REGENTS OF THE SMITHSONIAN INSTITUTION (für 1951)
- Robinson, S.W., und G. Thompson (1981): Radiocarbon corrections for marine shell dates with application to southern Pacific northwest coast prehistory«; SYESIS 14 45-57
- Roeder, M. (1992): »<sup>14</sup>C-Daten und archäologischer Befund am Beispiel eines Hauses in Feudvar bei Mořorin in der Vojvodina«; in: GERMANIA 70 259-77
- Rohl, D. (1996): »Pharaonen und Propheten: Das Alte Testament auf dem Prüfstand«; München (Droemersch Verlaganstalt Th. Knaur Nachf.)
- Rubin, M., R.C. Likins und D.G. Berry (1963): »On the validity of radiocarbon dates from snail shells«; in: JOURNAL OF GEOLOGY 71 84-89
- Ruggles, C.L.N. und S.P.Q. Rahtz (1988): »Computer and Quantitative Methods in Archaeology 1987«; BAR (Int. series) 393
- Russ, J., M. Hyman, H.J. Shafer und M.W. Rowe (1991): »<sup>14</sup>C dating of ancient rock art. A new application of plasmachemistry«; in: PLASMA CHEMISTRY AND PLASMA PROCESSING 11 515-27
- S**
- Sachs, A. (1970): »Absolute dating from Mesopotamian records«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A269 19-22
- Säve-Söderbergh, T., und I.U. Olsson (1970): »C14-dating and Egyptian chronology«; in: Olsson (1970, ed.) 35-56
- Satterthwaite, L., und E.K. Ralph (1960): »New radiocarbon dates and the Mayan correlation problem«; in: AMERICAN ANTIQUITY 26 165-84
- Schaub, T. (1990): »Nuklearmedizin«; Stuttgart und New York (Georg Thieme Verlag)
- Schiffer, M.B. (1986): »Radiocarbon Dates and the 'Old Wood' Problem: The Case of the Hohokam Chronology«; in: JOURNAL OF ARCHAEOLOGICAL SCIENCE 13 13-30
- (1987): »Formation Processes of the Archaeological Record«; Albuquerque (University of New Mexico Press)
- Schlette, F. (1975, ed.): »Wege zur Datierung und Chronologie der Urgeschichte«; Berlin
- Schmidt, B. (1973): »Pollenanalyse, Jahrringanalyse und C14-Datierungen in ihrem Zusammenwirken für die urgeschichtliche Chronologie II. Dendrochronologische Untersuchungen an Eichen aus der Kölner Bucht und dem Werre-Weser-Gebiet«; in: ARCHÄOLOGISCHES KORRESPONDENZBLATT 5 155-58
- Schmidt, B., und R. Aniol (1978): »Die Arbeitsweise der Dendrochronologie und ihre Verbesserung durch Berücksichtigung von Weiserjahren«; in: KÖLNER JAHRBUCH FÜR VOR- UND FRÜHGESCHICHTE 16 142-52
- Schmidt, B., und J. Freundlich (1984): »Zur absoluten Datierung bronzezeitlicher Eichenholzfunde«; in: ARCHÄOLOGISCHES KORRESPONDENZBLATT 14 233-37
- Schmidt, B., und W. Gruhle (1988): »Klima, Radiokohlenstoffgehalt und Dendrochronologie«; in: NATURWISSENSCHAFTLICHE RUNDSCHAU 41 177-82
- Schröter, W., K.-H. Lautenschläger und H. Bribrack (1994): »Taschenbuch der Chemie«; Frankfurt am Main (Verlag Harri Deutsch)

- Schwabedissen, H. (1973): »Pollenanalyse, Jahrringanalyse und C14-Datierungen in ihrem Zusammenwirken für die urgeschichtliche Chronologie I. Voraussetzungen, Fragestellung und Ziele der archäologisch-naturwissenschaftlichen Untersuchungen«; in: ARCHÄOLOGISCHES KORRESPONDENZBLATT 5 139-42
- (1977): »Archäologische Chronologie des 2. vorchristlichen Jahrtausends und Jahrring-Korrektur der <sup>14</sup>C-Daten«; in: Frenzel (1977, ed.) 119-25
- (1978): »Konventionelle oder kalibrierte C<sup>14</sup>-Daten?«; in: ARCHAEOLOGISCHE INFORMATIONEN 4 11-117
- (1983): »Ur- und Frühgeschichte und Dendrochronologie«; in: ARCHÄOLOGISCHES KORRESPONDENZBLATT 13 275-286
- Schweingruber, F.H. (1983): »Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie«; Bern und Stuttgart (Verlag Paul Haupt)
- (1988): »Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology«; Dordrecht (D. Reidel Publishing, Kluwer Academic Pub. Distribution)
- (1990): »Anatomie europäischer Hölzer«; Bern und Stuttgart (Verlag Paul Haupt)
- Scott, E.M., T.C. Aitchison, D.D. Harkness, G.T. Cook und M.S. Baxter (1990): »An overview of all three stages of the International Radiocarbon Intercomparison«; in: RADIOCARBON 32 309-19
- Scott, E.M., M.S. Baxter und T.C. Aitchison (1983): »<sup>14</sup>C dating reproducibility: Evidence from a combined experimental and statistical program«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 133-45
- (1983): »A comparison view of calibration«; in: Ottaway (1983, ed.) 37-41
- (1984): »A comparison of the treatment of errors in radiocarbon dating calibration methods«; in: JOURNAL OF ARCHAEOLOGICAL SCIENCES 11 455-66
- Scott, E.M., M.S. Baxter, T.C. Aitchison, D.D. Harkness und G.T. Cook (1986): »Announcement of a new collaborative study for intercalibration of <sup>14</sup>C dating laboratories«; in: RADIOCARBON 28 167-69
- Scott, E.M., M.S. Baxter, D.D. Harkness, T.C. Aitchison und G.T. Cook (1989): »An interim progress report on Stages 1 and 2 of the International Collaborative Program«; in: RADIOCARBON 31 414-21
- (1990): »An overview of some interlaboratory studies«; in: RADIOCARBON 32 259-65
- Shaw, I.M. (1985): »Egyptian Chronology and the Irish Oak Calibration«; in: JOURNAL OF NEAR EASTERN STUDIES 44 295-304
- Shawcross, W. (1969): »Archaeology with a short, isolated time-scale: New Zealand«; WORLD ARCHAEOLOGY 1 184-199
- Shott, M.J. (1992): »Radiocarbon dating as a probabilistic technique: The Childers site and Late Woodland occupation in the Ohio Valley«; in: AMERICAN ANTIQUITY 57 202-30
- Siegenthaler, U., M. Heimann und H. Oeschger (1980): »<sup>14</sup>C variations caused by changes in the global carbon cycle«; in: RADIOCARBON 22 177-91
- Sixtl, F. (1993): »Der Mythos des Mittelwertes«; München und Wien (R. Oldenbourg Verlag)
- Slater, E.A., und J.O. Tate (1980): »Proceedings of the 16th international symposium on archaeometry and archaeological prospection«; Edinburgh

- (National Museum of Antiquities of Scotland)
- Smith, A.G., M.G.L. Baillie, J. Hillam, J.R. Pilcher und G.W. Pearson (1972): »Dendrochronological work in progress in Belfast: the prospects for an Irish post-glacial tree-ring sequence«; in Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) A92-A96
- Smith, A.G., J.R. Pilcher und G.W. Pearson (1971): »New radiocarbon dates from Ireland«; in: ANTIQUITY 45 97-102
- Smith, H.S. (1964): »Egypt and C14 dating«; in: ANTIQUITY 38 32-37
- Sonett, C.P., und S.A. Finney (1990): »The spectrum of radiocarbon«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A330 413-26
- Sonett, C.P., und H.E. Suess (1984): »Correlation of bristlecone pine ring widths with atmospheric <sup>14</sup>C variations: a climate-Sun relation«; in: NATURE 307 141-43
- Sorensen, H.C. (1973): »The Ages of Bristlecone Pine«; in: PENSÉE IV (spring/summer) 15-18
- Spaulding, A.C. (1958): »The significance of differences between radiocarbon dates«; in: AMERICAN ANTIQUITY 38 32-7
- Stafford, T.W., und R.A. Tyson (1989): »Accelerator radiocarbon dates on charcoal, shell, and human bone from the Del Mar site, California«; in: AMERICAN ANTIQUITY 54 389-95
- Stahle, D.W., E.R. Cook und J.W.C. White (1985): »Tree-ring dating of Baldcypress and the potential for millennia-long chronologies in the southeast«; in: AMERICAN ANTIQUITY 50 796-802
- Stocker, T.F., und D.G. Wright (1996): »Rapid changes in ocean circulation and atmospheric radiocarbon«; in: PALEOCEANOGRAPHY 11 773-95
- Stocker, T.F., D.G. Wright und L.A. Mysak (1992): »A zonally averaged, coupled ocean-atmosphere model for paleoclimate studies«; in: JOURNAL OF CLIMATOLOGY 5 773-97
- Stokes, M.A., und T.L. Smiley (1968): »An introduction to tree-ring dating« Chicago (University of Chicago Press)
- Stokes, W.L. (1973): »Essentials of Earth History«; Englewood Cliffs, NJ (Prentice-Hall Inc.)
- Street, M., M. Baales und B. Weninger (1994): »Absolute Chronologie des späten Paläolithikums und des Frühmesolithikums im nördlichen Rheinland«; in: ARCHÄOLOGISCHES KORRESPONDENZBLATT 24 1-28
- Stuckenrath, R. (1965): »Carbon-14 and the unwary archaeologist«; in: Chatters/Olson (1965, eds.) 304-318
- (1977): »Radiocarbon: Some notes from Merlin's diary«; in: ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES 288 181-188
- Stuiver, M. (1970): »Long-term C14 variations«; in: Olsson (1970, ed.) 197-213
- (1982): »A high-precision calibration of the AD radiocarbon time scale«; in: RADIOCARBON 24 1-26
- (1983): »Calibration of the radiocarbon time scale«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 498-501
- (1993): »A note on single-year calibration of the radiocarbon time scale AD 1510-1954«; in: RADIOCARBON 35 1 67-72
- Stuiver, M., und B. Becker (1986): »High-precision decadal calibration of the radiocarbon time-scale AD 1840-5210 BC«; in: RADIOCARBON 28 (2B) 863-910
- (1993): »High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-6000 BC«; in: RADIOCARBON 35 1 35-65

- Stuiver, M., and T.F. Braziunas (1993): »Modelling atmospheric  $^{14}\text{C}$  ages of marine samples to 10.000 BC«; in: *RADIOCARBON* 35 137-89
- Stuiver, M., R.L. Burk und P.D. Quay (1984): » $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios in tree rings and the transfer of biospheric carbon to the atmosphere«; in: *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* 89 11.731-48
- Stuiver, M. und R. Kra (1980a): »Proceedings of the Tenth International Radiocarbon Conference – Bern«; in: *RADIOCARBON* 22 133-562
- (1980b): »Proceedings of the Tenth International Radiocarbon Conference – Heidelberg«; in: *RADIOCARBON* 22 565-1016
  - (1983): »Proceedings of the Eleventh International Radiocarbon Conference – Seattle«; in: *RADIOCARBON* 25 171-795
  - (1986): »Proceedings of the Twelfth International Radiocarbon Conference – Trondheim«; in: *RADIOCARBON* 28 177-804
- Stuiver, M., B. Kromer, B. Becker und C.W. Ferguson (1986): » $^{14}\text{C}$  age calibration back to 13.300 yr BP and the  $^{14}\text{C}$  age matching of the German oak and US bristlecone pine chronologies«; in: *RADIOCARBON* 28 (2B) 969-79
- Stuiver, M., und G.W. Pearson (1986): »High-precision calibration of the radiocarbon time scale AD 1950-500 BC«; in: *RADIOCARBON* 28 (2B) 805-838
- (1992): »Calibration of the radiocarbon time scale, 2500-5000 BC«; in: Taylor et al. (1992, eds.) 19-33
  - (1993): »High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500 BC and 2500-6000 BC«; in: *RADIOCARBON* 35 1 1-23
- Stuiver, M., und H.A. Polach (1977): »Discussion: reporting of  $^{14}\text{C}$  data«; in: *RADIOCARBON* 19 355-63
- Stuiver, M., und P.D. Quay (1980): »Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun«; in: *SCIENCE* 207 11-19
- (1981): »Atmospheric  $^{14}\text{C}$  changes resulting from fossil fuel  $\text{CO}_2$  release and cosmic ray flux variability«; *EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS* 53 349-62
- Stuiver, M., und P.J. Reimer (1986): »A Computer Program for Radiocarbon Age Calibration«; in: *RADIOCARBON* 28 1022-30
- Stuiver, M., und C.S. Smith (1965): »Radiocarbon dating of ancient mortar and plaster«; in: Chatters/Olson (1965, eds.) 338-43
- Stuiver, M., und H.E. Suess (1966): »On the relationship between radiocarbon dates and true sample ages«; in: *RADIOCARBON* 8 534-40
- Suess, H.E. (1955): »Radiocarbon concentration in modern wood«; in: *SCIENCE* 122 415-17
- (1965): »Secular variations of the cosmic-ray produced carbon 14 in the atmosphere und their interpretations«; in: *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH* 70 (23) 5.937-5.952
  - (1967): »Zur Chronologie des alten Ägypten«; in: *ZEITSCHRIFT FÜR PHYSIK* 202 1-7
  - (1969): »Die Eichung der Radiokarbonuhr«; in: *BILD DER WISSENSCHAFT* 6 121-27
  - (1970a): »Bristlecone-pine calibration of the radiocarbon time 5200 B.C. to present«; in: Olsson (1970, ed.) 303-12
  - (1970b): »Climate and radiocarbon during the Middle Ages«; in: Berger (1970a, ed.) 159-66
  - (1978a): »La Jolla measurements of radiocarbon in tree-ring dated wood«; in: *RADIOCARBON* 20 1-18
  - (1978b): »Absolute radiocarbon dating by low-altitude European tree-

- ring calibration – comment on Pearson et al. 1977«; in: NATURE 272 649-50
- (1979): »A calibration table for conventional radiocarbon dates«; in: Berger/Suess (1979, eds.) 777-84
  - (1980a): »The radiocarbon record in tree rings of the last 8000 years«; in: RADIOCARBON 22 200-209
  - (1980b): »Radiocarbon Geophysics«; in: ENDEAVOUR 4 113-117
  - (1986): »Secular variations of cosmogenic  $^{14}\text{C}$  on earth: their discovery and interpretation«; in: RADIOCARBON 28 259-65
  - (1992): »The Early Radiocarbon Years: Personal Reflections«; in: Taylor et al. (1992, eds.) 11-16
- Suess, H.E., und B. Becker (1977): »Der Radiokarbongehalt von Jahrringproben aus postglazialen Eichenstämmen Mitteleuropas«; in: Frenzel (1977, ed.) 156-70
- Suess, H.E., und T.W. Linick (1990): »The  $^{14}\text{C}$  record in bristlecone pine of the past 8000 years based on the dendrochronology of the late C.W. Ferguson«; in: PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY LONDON A330 403-412
- Suess, H.E., und C. Strahm (1970): »The Neolithic of Auvernier, Switzerland«; in: ANTIQUITY 44 91-99
- Suess, H.E., und H. Wänke (1962): »Radiocarbon content and terrestrial age of twelve stony meteorites and one iron meteorite«; in: GEOCHIMICA ET COSMOSCHIMICA ACTA 26 475-80
- Suter, M. (1992, ed.): »10 Jahre Beschleunigermassenspektrometrie in der Schweiz«; Zürich (PSI-Proceedings 92-04 der ETH Höngrgerberg, CH-8093 Zürich)
- Tattersall, I. E. Delson und J. van Couvering (1988): »Encyclopedia of human evolution and prehistory«; New York & London (Garland Publishing)
- Tauber, H. (1958): »Difficulties in the application of C14-results in archaeology«; in: ARCHAEOLOGIA AUSTRIACA 24 59-69
- (1970): The Scandinavian varve chronology and C14 dating«; in: Olsson (1970, ed.) 173-96
  - (1983): »Possible depletion in  $^{14}\text{C}$  in trees growing in calcareous soils«; in: RADIOCARBON 25 417-420
- Taylor, R.E. (1978): »Radiocarbon dating: An archaeological perspective«; in: Carter (1978, ed.) 33-69
- (1981, ed.): »Radiocarbon dating in archaeology: Needs and priorities in the 1980s«; a report of a conference held at the National Science Foundation, Washington D.C. June 10-12
  - (1983): »Non-concordance of radiocarbon and amino-acid racemization deduced age estimates on human bone«; in: RADIOCARBON 25 647-54
  - (1985): »The beginnings of radiocarbon dating in *American Antiquity*: a historical perspective«; in: AMERICAN ANTIQUITY 50 309-25
  - (1987): »Radiocarbon dating: an archaeological perspective«; Orlando et al. (Academic Press)
- Taylor, R.E., R. Berger und B. Dimsdale (1968): »Electronic dataprocessing for radiocarbon dates«; AMERICAN ANTIQUITY 33 180-84
- Taylor, R.E., A. Long und R.S. Kra (1992, eds.): »Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective«; New York, Berlin, Heidelberg etc. (Springer-Verlag)
- Taylor, R.E., und C.W. Meighan (1978, eds.): »Chronologies in New World Archaeology«; New York (Academic Press)
- Terasmae, J. (1984): »Radiocarbon dating: Some problems and potential de-

## T

- velopments«; in: Mahaney (1984, ed.) 1-16
- Thomas, D.H. (1978): »The awful truth about statistics in archaeology«; in: *AMERICAN ANTIQUITY* 43 231-44
- Thompson, R. (1983): »<sup>14</sup>C dating and magnetostratigraphy«; in: *RADIOCARBON* 25 299-238
- Törnquist, E.T., und M.F.B. Bierkens (1994): »How smooth should curves be for calibrating radiocarbon ages?«; in: *RADIOCARBON* 36 (1) 11-26
- Topping, J. (1962): »Errors of observation and their treatment«; London (Chapman & Hall)
- Tushingham, A.M., und W.R. Peltier (1993): »Implications of the radiocarbon timescale for ice-sheet chronology and sea-level change«; in: *QUATERNARY RESEARCH* 39 125-29
- ## V
- Velikovskiy, I. (1973a): »Astronomy and Chronology«; in: *PENSÉE IV* (spring/summer) 38-49
- (1973a): »The Pitfalls of Radiocarbon dating«; in: *PENSÉE IV* (spring/summer) 12-14 & 50
  - (1978a): »Welten im Zusammenstoß«; Frankfurt am Main (Umschau Verlag)
  - (1978b): »Die Seevölker (Anhang: Die Klippen der Radiokarbonmethode)«; Frankfurt am Main (Umschau Verlag) 261-69
  - (1979): »Ramses II. und seine Zeit«; Frankfurt am Main (Umschau Verlag)
  - (1980): »Erde im Aufruhr«; Frankfurt am Main (Umschau Verlag)
- Venkatesan, M.I., T.W. Linick, H.E. Suess und G. Buccellati (1982): »Asphalt in carbon-14 dated archaeological samples from Terqa, Syria«; in: *NATURE* 295 517-19
- Vincent, C.H. (1988): »Treatment of discrepancies in radiocarbon dating«; in: *RADIOCARBON* 30 157-160
- Vita-Finzi, C. (1980): »<sup>14</sup>C dating of recent crustal movements in the Persian Gulf and Iranina Makran«; in: *RADIOCARBON* 22 763-73
- Vogel, J.C., W.A. Casparie und A.V. Munaut (1969): »Carbon-14 trends in subfossil pine stubs«; in: *SCIENCE* 166 1.143-1.145
- de Vries, H. (1958): »Variations in concentration of radiocarbon with time and location on earth«; in: *PROCEEDINGS NEDELANDSCHE AKADEMIE VAN WETENSCHAPPEN Serie B* 61
- ## W
- Ward, G.K. und S.R. Wilson (1978): »Procedures for comparing and combining radiocarbon age determinations: a critique«; in: *ARCHAEOLOGY* 20 1 19-31
- Warren, P.M. (1987): »Absolute dating of the Aegean Late Bronze Age«; in: *ARCHAEOLOGY* 29 205-11
- Wasson, J.T. (1974): »Meteorites. Classification and Properties«; Berlin, Heidelberg und New York (Springer-Verlag)
- Waterbolk, H.T. (1977): »Methods of absolute dating in European prehistory: Problems and perspectives«; in: Frenzel (1977, ed.) 80-90
- (1983a): »Thirty years of radiocarbon dating: the retrospective view of a Groningen archaeologist«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 17-27
  - (1983b): »The integration of radiocarbon dating in archaeology«; in: *RADIOCARBON* 25 639-44
  - (1983c): »Ten guidelines for the archaeological interpretation of radiocarbon dates«; in: Mook/Waterbolk (1983, eds.) 57-70
- Waterbolk, H.T., und W.G. Mook (1990, eds.): »Proceedings of the Second International Symposium, Archaeology and <sup>14</sup>C«; PACT Publication 29

- Watkins, T. (1975, ed.): »Radiocarbon: Calibration and prehistory«; Edinburgh (Edinburgh University Press)
- (1983): »The archaeological application of high-precision radiocarbon dating«; in: Ottaway (1983, ed.) 74-82
- Weinstein, J. (1980): »Palestinian radiocarbon dating: a reply to Mellaart«; in: ANTIQUITY 54 21-24
- Weisberg, L.H.G., und T.W. Linick (1983): »The question of diffuse secondary growth of palm trees«; in: RADIOCARBON 25 803-9
- Wendland, W.M., und D.L. Donley (1971): »The radiocarbon-calendar age relationship«; in: EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS 11 135-39
- Wendorf, F., und A. Close (1984, eds.): »Advances in World Archaeology, Bd. 3«; New York (Academic Press)
- Whitehouse, R.D. (1983): »The Macmillan dictionary of archaeology«; London and Basingstoke (The Macmillan Press Ltd)
- Wigley, T.M.L., P.D. Jones und K.R. Riffa (1987): »Cross-dating Methods in Dendrochronology«; in: JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY 14 51-64
- Wigley, T.M.L., und A.B. Muller (1981): »Fractionation correction in radiocarbon dating«; in: RADIOCARBON 23 173-90
- Wilcock, J.D., R.L. Otlet, A.J. Walker, S.A. Charlesworth und J. Drodge (1986): »Establishment of a Working Data Base for the International Exchange of  $^{14}\text{C}$  Data Using Universal Transfer Formats«; in: RADIOCARBON 28 (2A) 781-87
- Willis, E.H. (1969): »Radiocarbon dating«; in: Brothwell/Higgs (1969, eds.) 46-57
- Willis, E.H., H. Tauber und K.O. Münich (1960): »Variations in the atmospheric radiocarbon concentration over the past 1300 years«; in: AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE RADIOCARBON SUPPLEMENT 2 1-4
- Willkomm, H. (1976): »Altersbestimmungen im Quartär, Datierungen mit Radiokohlenstoff und anderen kernphysikalischen Methoden«; München (Verlag Karl Thiemeig, Thiemeig-Taschenbücher)
- (1980): »Comparison of  $^{14}\text{C}$  dates and other age estimations between 2000 BC and AD 1000«; in: RADIOCARBON 22 286-90
- (1983): »The reliability of archaeological interpretation of  $^{14}\text{C}$  dates«; in: RADIOCARBON 25 645-46
- (1988): »Kalibrierung von Radiokohlenstoff-Daten«; in: ACTA PRAEHISTORICA 20 173-81
- Wilson, S.R. und G.K. Ward (1981): »Evaluation and clustering of age determinations: procedures and paradigms«; in: ARCHAOMETRY 23 19-39
- zum Winkel, K. (1975): »Nuklearmedizin«; Berlin, Heidelberg und New York (Springer-Verlag)
- Wölfli, W. (1992): »Möglichkeiten und Grenzen der AMS in der Archäologie«; in: Suter (1992, ed.) 30-44
- Wölfli, W., H.A. Polach und H.H. Anderson (1984, eds.): »Accelerator Mass Spectrometry, Proceedings of the Third International Symposium of Accelerator Mass Spectrometry«; in: NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH 233 (B5) 1-448
- Wright, D.G., und T.F. Stocker (1992): »Sensitivities of a zonally averaged global ocean circulation model«; in: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 97 12.707-30

## Y

- Yamaguchi, D.K. (1986): »Interpretation of Cross Correlation Between Tree-Ring Series«; in: TREE RING BULLETIN 46 47-54

- Yang, A.I.C., und A.W. Fairhall (1972):  
 »Variations of natural radiocarbon during the last 11 millennia and geophysical mechanisms for producing them«; in: Rafter/Grant-Taylor (1972, eds.) A44-A57
- Young, J.A., und A.W. Fairhall (1968):  
 »Radiocarbon from nuclear weapon tests«; in: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 73 1185

## Z

- Zaitseva, G.I. und S.G. Popov (1994):  
 »Radiocarbon Dating Sites of Northwest Russia and Latvia«; in: RADIOCARBON 36 377-89
- Zartman, R.E., J.C. Cole und R.F. Marvin (1976): »User's Guide to the Radiometric Age Data Bank (RADB)«; in: USGS OPEN FILE REPORT 76-674
- Zbinden, H., M. Andree, H. Oeschger, B. Ammann, A. Lotter, G. Bonani, und W. Wölfli (1989): »Atmospheric radiocarbon at the end of the last glacial: An estimate based on AMS radiocarbon dates on terrestrial macrofossils from lake sediments«; in: RADIOCARBON 31 795-804
- Zeller, Manfred (1996): »Die Nordwestslawen im Frühmittelalter«; in: ZEITENSPRÜNGE 8 (4) 499-524
- Zeuner, F.E. (1946): »Dating the past«; London (Methuen)
- Zhimin, A. (1991): »Radiocarbon dating and the prehistoric archaeology of China«; WORLD ARCHAEOLOGY 23 2 193-200
- Zittel, K.A. (1899): »Geschichte der Geologie und Paläontologie«; München und Leipzig (R. Oldenbourg)
- Zucchi, A., K. Tarble und J.E. Vaz (1984): »The Ceramic Sequence and New TL and C-14 Dates for the Agüerito Site of the Middle Orinoco, Venezuela«; in: JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY 11 155-80

## Personen- und Sachregister

### A

- Absolutvorkommen von C14, 278  
 Afrika, 114  
 Ägypten, 167, 233  
 Ägyptologie, 52, 114  
 Aitken, M.J., 53, 256, 257, 258  
 Aktualismus, 12, 87, 140, 163, 165, 180, 297  
*als notwendige Voraussetzung für die Legitimation des Fundamentalprinzips, 153*  
 Alexander der Große, 9, 224  
 Allerød, 104  
 Altägypten, 51, 110  
*C14-Chronologie, 25*  
 Anderson, E.C., 229  
 Anomalie, 273, 276  
 Anti-Koinzidenz-Prinzip, 227  
 Apollo-Missionen, 165  
 Archäologie, 51, 144  
*Verantwortung im Zusammenhang mit der C14-Datierung, 55*  
 Arnold, J.R., 232, 233  
 Ashmore, P.J., 81  
 Atombombe, 221, 226  
 Autokorrelation, 129  
 Auvernier (Fundort), 67, 183, 297

### B

- Baillie, M.G.L., 195, 196  
 Barker, H., 308  
 Becker, B., 74, 75, 80, 91, 137, 186, 296, 362  
 Berger, R., 296  
 Berkeley, 204  
 Beschleunigermassenspektrometrie (AMS), 19, 47, 317  
 Bilanzgleichung, 341, 366  
 Bowman, S., 45, 101  
 Bristlecone-Pine-Chronologie, 14, 18, 41, 59, 60, 65, 67, 69, 73, 76, 80, 81, 96, 101, 112, 122, 125, 127, 131, 136, 153, 162, 184, 269, 297, 309, 350, 354

- als »Heilige Kuh« der Vor- und Frühgeschichte, 192*  
*als Mutter aller Kalibrierungen, 75, 123, 361*  
*als Repräsentantin eines Vorurteils über die Randbedingungen in der Natur, 366*  
*Randbedingungen bei der Entstehung der, 60, 181*  
*Unglaublichkeit der ~ als Kalibrierquelle, 73*  
*verzweifelter Wunsch nach einer von der ~ unabhängigen Baumringchronologie, 66, 183*  
*voreilige Verwendung als Kalibriermaßstab, 63*  
 British Museum, 308, 314, 315  
 Bronzezeit, 73, 85, 111, 112, 202  
 Burgstrahler, A.W., 167

### C

#### C14

- Anteil an den vorkommenden C-Isotopen, 45*  
*Beitrag zur natürlichen Strahlenbelastung, 46*  
*in-situ Produktion, 297*  
*mögliche Produktionsrate, 45*

#### C14-Chronologie

- Scheitern einer globalen, 121*  
*unkalkulierbare Ausformung der ~ ohne Kontrolle durch die Altertumswissenschaft, 272*

#### C14-Daten

- Abweisungsrate, 47, 270*  
*als »tentative« Absolutdaten, 67*  
*Befund starker Streuung, 70*  
*Faustregel zur Bestimmung ihrer Gleichzeitigkeit, 116, 118*  
*Inkonsistenz, 50, 119*  
 *Mißverständnis über die Ursache von Diskrepanzen in den, 52*  
*Problem der Inversion, 51, 302*  
*rigorose Verwendung von ~ zur Vor-datierung, 64*  
*Sicherheitsregeln beim Umgang mit, 133*

- statistische Unsicherheit*, 241  
*Summe aller Korrekturfehler*, 317  
*Unzufriedenheit der Historiker mit den*, 47  
*werden erst verworfen, wenn sie nahezu hundertprozentig korrupt sind*, 242, 268
- C14-Datierung  
*in jüngster Vergangenheit*, 170  
*Präzisionsmessungen an Baumringen*, 328  
*Unsicherheit*, 44
- C14-Diffusion in Holz, 296
- C14-Methode, 76  
*Abhängigkeit von der Dendrochronologie*, 27  
*allgemeine Grundlagen der*, 20  
*als gottgesandtes Geschenk*, 50  
*als Kind des vorletzten Jahrhunderts*, 141  
*als letzte Auffangposition vor der Kapitulation der Historiker*, 10  
*als unverzichtbar nur für das Verständnis der ungeschriebenen Geschichte*, 101  
*Definition*, 12, 13  
*Der Satz »one date is no date« als Sprengstoff für die*, 53  
*Erklärung durch Vergleich von »Idealwanderer« und »Kalibrierläufer«*, 56  
*gespaltene Gefühle der Historiker gegenüber der*, 47  
*gespanntes Verhältnis zwischen Historikern und Naturwissenschaftlern*, 108  
*heute angenommene notwendige Voraussetzungen*, 21  
*Idee zur Entwicklung*, 20  
*Mißtrauensvotum durch die hohe Abweisungsrate*, 47  
*mögliche zukünftige Einsatzmöglichkeit*, 105, 180  
*naturphilosophische Wurzeln der*, 140  
*Neudefinition als Methode zur zeitlichen Synchronisierung*, 27  
*ohne Kontrolle durch Vermessung von Mutter- und Tochterisotope*, 43  
*Probleme der ~ demonstriert am Beispiel einer archäologischen Kampagne*, 171  
*Simultanitätsprinzip als wichtigste Grundlage*, 81  
*ursprüngliche Voraussetzungen*, 20  
*vage Nachbesserungen werden als Feinheit der Methode verkauft*, 273  
*verkappte Bankrotterklärung*, 51  
*zur Überwindung der Schwächen der empirisch-stilistischen Verknüpfungsmethode*, 112
- C14-Produktion, 82  
*exzessives Verhalten*, 85, 105, 187, 189, 291, 334, 356  
*im Ungleichgewicht mit dem C14-Zerfall*, 172, 187, 278, 339  
*Modulation der ~ durch Schwankung der Stärke des Erdmagnetfeldes*, 169, 278  
*Schwankungen*, 39, 81, 83, 174  
*Überhang der ~ um rund 50%*, 63, 72, 183  
*Ursachen für starke Änderungen*, 348  
*Verlauf der C14-Konzentration in der Atmosphäre bei zeitweisem Stop der*, 344
- Cadbury Massaker, 266, 267  
 Calvin, M., 283  
 Calvin-Zyklus, 283  
 Centennial Stump, 238  
 Chadwick, W., 219  
 Childers (Fundort), 49  
 Chilesalpeter, 302  
 Chronologentagung (Gräfelfing 1995), 171  
 Chronologentagung (Hamburg 1996), 194  
 Chronologie, 80  
 Chronologierevision, 10, 59  
 Clark, R.M., 71, 100, 292, 309, 314  
 Collis, J., 66, 67, 183  
 »Cosmic Schwung«, 105, 172

Curve of Knowns, 152, 232, 236, 240

## D

Damon, P.E., 71, 100

Daniels, G., 50

»Dark Age of Greece«, 9, 110

Darwin, C., 140, 164

Datierungsmethoden, radiometrische, 41  
*Unsicherheit, 44*

Datierungsunsicherheit, numerische Zusammenhänge, 262

De Geer, G., 201

de Vries, H., 350

Dendrochronologie, 57, 159

»secret procedures« und »magic dates« in der, 173

als letzte Auffangposition vor der Kapitulation der Historiker, 10

Anspruch auf jahrgenaue Chronologie, 101

Definition, 10, 13

Dilemma der, 31, 33, 129, 135, 359

gemeinsames Gebäude mit der C14-Methode, 80

gleichsam atemberaubend in ihrer Eleganz und Einfachheit, 105

Heirat mit der C14-Methode unter vorgehaltener Pistole, 126

Hilflosigkeit ohne Vordatierung, 11, 13, 33, 176

Methodenwechsel, 77, 159, 173

methodische Schwächen, 128, 144

methodischer Sündenfall, 77, 135, 173, 192

Pakt mit der C14-Methode, 67, 99

Probleme der ~ mit einer Mittelalterlücke, 95

Tücken der C14-Vordatierung, 326

ungetrübte Vertrauensseligkeit hinsichtlich der Grundvoraussetzung der Stationarität der C14-Verhältnisse, 93

Zusammenfassung der Probleme, 74

de-Vries-Effekt, 24, 155

Diffusionseffekte, 39, 41, 82, 83, 86,

105, 174, 189, 279, 280, 291

Djoser, 238, 240

Doppelringe, 65, 238, 275

Douglas-Fichte, 129, 237, 238

Douglass, A.E., 238

Dunwiddie, P.W., 59, 193

Dyck, W., 356

## E

Edwards, I.E.S., 51

EEM (external error multiplier), 306

Eichenchronologie, Göttinger, 131

Eichenchronologie, Irische, 66, 89, 90, 126, 198, 360, 362

als Schlag ins Gesicht amerikanischer und deutscher Dendrochronologen, 74, 161

Eichenchronologie, Mitteleuropäische, 95

Eichenchronologie, Süddeutsche, 74, 76, 96, 131, 161, 362

Eichenchronologien, Europäische, 59,

64, 67, 70, 71, 80, 101, 112, 121,

130, 153, 162, 181, 183, 310, 346

C14-Verseuchung durch »wiggle-matchen«, 185

transatlantische Hilfe bei der Erstellung, 69, 70, 80, 122

Eifel, 289

Eiskernbohrungen, 199, 363

Eiszeit, 11, 13, 104, 110, 190, 202

Entwicklung der C14-Methode

als Findelkind der Medizintechnik, 204

aus der Sehnsucht, der Realität entfliehen zu können, 181, 223

Entdeckung des C14-Isotops, 204

Entwicklung des Anti-Koinzidenz-Prinzips, 227

Illusion über das Ausmaß bereits vorhandener Absolutdaten, 233

N14 als Ausgangsstoff für die Entstehung von C14 identifiziert, 220

Nachweis des Fundamentalprinzips, 235

Nachweis des Simultanitätsprinzips, 229

Nachweis einer langen Halbwertszeit von C14, 223

- Nachweis langsamer Neutronen in der kosmischen Strahlung*, 221  
*Nachweis von C14 in jungen Proben*, 225
- Erdmagnetfeld, 81  
 Evolutionstheorien, 43, 140
- F**
- Fehldatierung, 97  
 Fehlerfortpflanzung, 123  
 Fehlringe, 63, 91, 153, 200, 238, 275, 297, 309, 351  
 Ferguson, C.W., 18, 60, 65, 69, 71, 80, 137, 167, 181, 192, 337, 351, 360, 361  
 Feudvar (Fundort), 51, 171  
 F-Test, 118, 178, 255, 257, 260  
 Fundamentalprinzip, 13, 22, 23, 27, 72, 140, 152, 157  
*als Äquivalent einer jahrgenauen und lückenlosen Chronologie*, 25, 109, 246  
*Weiterbenutzung einer abgeschwächten Form*, 243
- G**
- Geochronologie, 43  
 Geschichte  
*ägyptische*, 9, 52, 60, 152, 164  
*chinesische*, 51  
*europäische*, 97  
*europäische Vor- und Frühgeschichte*, 59, 165, 202  
*griechisch/römische*, 9  
*Sündenfall der Geschichtswissenschaft*, 142  
 Geyh, M.A., 295  
 Gleichläufigkeitstest, 91, 92  
 Göksu, H.Y., 286  
 Goldhaber, M., 219  
 Gradualismus, 164  
 Grosse, A.V., 225
- H**
- Haeckel, E.H., 180  
 Halbwertszeit, 27, 148, 207, 250, 305, 317
- Harlan, T.P., 64  
 Heinsohn, G., 9, 110, 169, 202  
 Heske, I., 51, 171  
 Hill, P.H., 81  
 Hintergrundstrahlung, 21, 23, 213, 225, 227  
 Hochpräzisionskalibrierung, 52, 75, 103, 121, 192  
 Hollstein, E., 11, 33, 93, 95, 161  
 Holme-next-the-Sea (Fundort), 201  
 Holozän, 202  
 Holzkohle, 267, 286, 299, 300, 303, 304  
 Hoops, J., 112  
 Hroudá, B., 113  
 Huber, B., 69, 80, 126
- I**
- Illig, H., 9, 110, 168, 169, 171, 202  
 Irrtumswahrscheinlichkeit, 120, 128, 161, 178  
 Isotopenfraktionierung, 24, 230, 249, 279, 281, 282, 291, 301, 305  
*unsystematische Effekte*, 284
- J**
- Jansen, H.S., 63, 65, 191
- K**
- Kalibrierkurven für C14-Daten, 36, 80, 81  
*abgeleiteter Trend*, 85  
*übergeordneter Trend*, 171  
*waagerechter Verlauf bei Nullproduktion*, 188  
*Winkelhalbierende als Ur-Kalibrierkurve*, 67, 83, 84, 87, 88, 103, 173, 193
- Kalibrierung, 25, 27  
*als angeblich rein technisches Problem*, 55  
*als Retter-Komplex für die C14-Methode*, 103  
*das Problem der Mehrdeutigkeit*, 336  
*korrekte Vorgehensweise bei der*, 121, 322  
*mit Hilfe von Warvenchronologien*, 98

- Regeln für den Dendrochronologen*, 131
- Regeln für den Historiker*, 123
- Sinnlosigkeit der ~ ohne gültiges Simultanitätsprinzip*, 53
- Unterschied der ~ zum Prozedere der sogenannten Altersbestimmung*, 245
- Vorgehensweise bei der*, 55
- Kalium-Argon-Datierung, 44, 317
- Kalkstein, 301
- Kamen, M., 220
- Känozoikum, 317
- Katastrophen, 9, 164
- Katastrophismus, 10, 142, 165, 202
- Kauri-Baum, 63, 65, 73, 76, 87, 91, 136, 179, 350
- Kernholz, 296
- Kernphysik, 219
- Kirnsulzbachfehler, 75, 97, 161
- Kitchen, K.A., 114
- Klein, J., 314
- Knochen, 51, 55, 295, 302, 345
- Kohlendioxid, 354
- Kohlenstoff (Zahlenverhältnisse), 208
- Kohlenstoff, Eigenschaften des, 45
- Kohlenstoffreservoir, 37, 41, 274, 279
- Gesamtgröße aller globalen*, 45
- Kometen, 43
- komparativ-typologische Methode, 112, 117
- Kontamination, 21, 51, 52, 209, 243, 293, 298
- Faustformel für ihre quantitative Berücksichtigung*, 295
- Korff, S.A., 20, 221
- Kurie, F.N.D., 219
- L**
- Laborfehler, 305
- LaMarche, V.C., 64
- Lambert, G., 75
- Lansing, A., 232, 235
- Lavier, C., 75
- Lavoisier, A.L., 45
- Lawrence, E.O., 204
- Lee, R.E., 268, 276
- Leonhard Haag (Fundort), 49
- Libby, W.F., 20, 25, 38, 45, 113, 146, 152, 165, 166, 167, 178, 179, 214, 220, 221, 226, 230, 238, 277, 285, 349
- Analyse der seiner Theorie zugrundeliegenden Annahmen*, 349
- Schummelei zur Verifizierung des Simultanitätsprinzips*, 179, 200, 230, 259, 260
- Long, A., 120, 296
- Long, R.D., 115, 285
- Lyell, C., 140, 164
- M**
- MacKie, E.W., 167
- Manhattan Project, 204
- Marcus, L., 311
- Massenspektrometer, 250
- Master, lokaler, 31, 73, 89, 91, 129, 136
- Master, regionaler, 31, 33, 184
- McCormack, F.G., 70
- Megalithkulturen, 111
- Menschheitsgeschichte, 187
- Mesolithikum, 9, 110, 169, 202
- Meßlabore, 71, 133
- Allgemeine Probleme mit Fehlern*, 155, 200
- Empfehlung, nur die Meßdaten aus den letzten 5 Jahren zu verwenden*, 142
- International Collaborative Study*, 310
- Streuung der Meßwerte*, 170, 250
- Überwachung der Qualität*, 71
- Metafehler, 249, 277
- Meteoriten, 44
- Middle Littleton (Fundort), 70
- Mittelalterlücke, 11, 14, 168, 173, 195
- Mittelkurve, 30, 31, 130
- Mittelwertbildung, methodische Tücken, 118, 261, 276
- Mommsen, H., 45
- Monte Amiata, 289
- Müller, A., 9
- Müller-Karpe, H., 108, 111

Muscheln, 51, 230, 284, 286, 288, 290, 302  
*Probleme mit ~ als Datierungsobjekt, 301*

Mustererkennungsstrategie, 35

## N

National Bureau of Standards (NBS), 243

National Science Foundation (NSF), 71, 74

Natur, die ~ macht keine Sprünge, 12, 61, 106

Naturgeschichte, 141

Neolithikum, 73, 109, 110, 145, 169, 202

Neuseeland, 63, 65, 66, 72, 76, 110, 136, 350

*Maoris, 110*

Neustupný, E., 309

Newgrosh, B., 192

Niemitz, H.-U., 9, 95

Nobel-Symposium, 12. ~ in Uppsala, 172, 191, 309, 314, 351, 360

Normalverteilung, 252, 253, 254, 264, 271, 308

Nullhypothese, 123, 137, 178

## O

Oberflächenwasser, 37, 38, 39, 86, 274, 280

*Isotopenaustausch mit der Atmosphäre, 194*

Ogden, J.G., 219, 270, 276, 307

Oldenburg (Fundort), 300

Olsson, I.U., 114, 239, 297

»One Date is no Date«, 53, 89, 155, 256, 304

Ottaway, B.S., 71, 144

## P

Paläolithforschung, 108

Paläolithikum, 169

Paradigma, 10

Pardi, R., 311

PDB-Standard, 282, 283

Pearson, G.W., 126, 315

Pensée (Journal), 166

Phantomzeiten, 9

Photosynthese, 283

Physik, 80

Pleistozän, 273, 303

Plummer, M.A., 363, 364

Popov, S.G., 186

Popper, K.R., 147

Postglazial, 67, 93, 98, 121, 143, 176, 200, 337, 359, 363

Prigogine, I., 140

Probenvorbereitung, 295

## Q

Quartär, 203

## R

Radiocarbon (Journal), 71, 75, 104, 121  
*calibration issue, 75*

Radiokarbonrevolution, Zweite, 59, 70, 73, 109, 145, 165

Radiomedizin, 205, 256

Radon, 228

Rattenuirin, fossiler, 363

Replikation, 77

Reservoireffekt, 24, 279, 281, 284, 286, 287, 291, 301

*als anormaler Diffusionseffekt, 280*

Rippeteau, B., 120

Rohl, D., 102

Römerzeit, 11, 97, 176

Ruben, C., 219, 220

## S

Santorin, 289

Säve-Söderbergh, T., 114, 239

Schulman, E., 59

Screen-Wall-Zähler, 220, 226

Sequoia Sempervivens, 38, 91

Sesostris III, 238, 239

Shawcross, W., 63, 350

Shott, M.J., 49

Simultanitätsprinzip, 14, 21, 35, 53, 72, 74, 82, 89, 99, 122, 126, 136, 157, 177, 186, 199, 337

*als letzte Bastion zur Rettung der C14-Methode, 29*

*Definition*, 32

*Ungültigkeit des ~ aufgrund von Diffusionseffekten*, 34, 246

Sintflutereignis, 348

Snofru, 238, 239, 285

Sonnenaktivität, 81, 100, 129, 130

Sonnenfleckenzzyklus, 129

Sorensen, H.C., 167

Spätglazial, 194

Splintholz, 297

Standardabweichung, 71, 250, 254

Standardsequenz, 93

Starigard (Fundort), 304

Startaktivität, 22, 26, 280, 320, 324

Stocker, T.F., 195, 347

Strahlenschutzverordnung, 46

Strahlung, kosmische, 81

Strahm, C., 183

Stratosphäre, 274

Stuckenrath, R., 308, 310

Stuiver, M., 186

Suess, H.E., 67, 69, 71, 74, 100, 161, 172, 183, 297, 338, 360

Suess-Effekt, 24, 155

## T

Taylor, R.E., 91, 269, 273, 286, 295, 302

Teleconnection, 130

Tertiär, 203

Thayngen (Fundort), 69, 70, 193

Tiefenwasser, ozeanisches, 37, 38, 194, 275, 348

*C14-Inventar*, 85

*Zirkulation*, 86

Tracer-Isotope, 207

Transportbänder, ozeanische, 194, 274, 346

Tree-Ring Labor (Tucson), 193

Troposphäre, 70

Turpin and Sand Ridge (Fundort), 49

## U

Uniformitarismus, 57

Uppsala, 63, 65

*Der Skandal von ~*, 63, 73, 191, 351

Urey, H.C., 232

## V

Velikovsky, I., 9, 110, 164

Viking Fond, 233

Völkerwanderungslücke, 95, 97

Vulkane, 287

## W

Warvenchronologie, 98, 101, 104, 200, 201, 363

Weiserjahre, 31, 136

wiggle, 35, 36, 39, 80, 84, 86, 280, 288, 289, 311, 328, 335, 353

*als »radiochronologischer Fingerabdruck«, 189, 279*

*als genuin lokale Phänomene*, 83

*als lokale Kleinkatastrophe*, 105

*als angeblich simultane C14-Schwankungen*, 81

*als Spiegelbild angeblich global gleichförmiger Diffusionsvorgänge*, 289

*aus einem erratischen Meßwertkorpus extrahiert*, 100, 122, 128, 292

*Definition*, 83

*elegantes Hilfsmittel zur Kreuzdatierung schwimmender Baumringsequenzen*, 309

*ihre Entstehung aus der Verdopplung von Baumringsequenzen*, 174, 183

*mögliche Ursachen*, 79, 81, 102, 172, 188

wiggle-matching, 29, 33, 37, 72, 76, 83, 89, 96, 101, 125

*als »state of the art« der Dendrochronologie*, 67, 138

*als gänzlich unseriöse Methode*, 70, 362

*als Grundlage der süddeutschen Eichenchronologie*, 74

*Erfindung des Verfahrens zur Erstellung der Bristlecone-Pine-Chronologie*, 193

*Grundlage für die Erstellung der europäischen Eichenchronologien*, 59, 191, 200, 297

*Unzulässigkeit der überregionalen  
Anwendung, 137*

Willkomm, H., 304

Wright, D.G., 195, 347

**Y**

Yaku-Sugi-Baum, 191

Yamaguchi, D.K., 129

**Z**

Zbinden, H., 104

ZEIT-Magazin, 168

Zhimin, A., 51

Zirkelschluß

*Begründung des Simultanitätsprin-  
zips unter der Voraussetzung sei-  
ner Gültigkeit, 256*

*innerhalb der Dendrochronologie, 11  
zwischen C14-Methode und Dendro-  
chronologie, 12, 76, 77, 87, 145,  
151, 163, 202, 278*

Zyklotron, 204

## IT&W • Verlagsprogramm

Der Verlag bringt Bücher aus den Bereichen Technik und Wissenschaft als Druck, auf CD-ROM und für eBooks. Unsere Titel informieren über wissenschaftliche und technische Inhalte aus ungewohnten und vernachlässigten Blickwinkeln. Die lieferbaren Titel sind zur Zeit:



### **Eno Pertgen (<sup>2</sup>2000): »Der Teufel in der Physik. Eine Kulturgeschichte des Perpetuum mobile«**

ISBN 3-934378-50-1 • Broschur 14.8 x 21.0 cm • 232 Seiten  
• 32 Abbildungen • Personen- und Sachregister • DM 39,80 / 290,- ÖS / 38,- SFr



### **Christian Blöss (2000): »Ceno-Crash. Neue Überlegungen zum Ursprung und zum Alter des Menschengeschlechtes«**

ISBN 3-934378-51-X • Broschur 14.8 x 21.0 cm • 232 Seiten  
• 56 Abbildungen • Personen- und Sachregister • DM 39,80 / 290,- ÖS / 38,- SFr



### **C. Blöss / H.-U. Niemitz (<sup>2</sup>2000): »C14-Crash. Das Ende der Illusion, mit Radiokarbonmethode und Dendrochronologie datieren zu können«**

ISBN 3-934378-52-8 • Broschur 14.8 x 21.0 cm • 408 Seiten  
• 102 Abbildungen • Personen- und Sachregister • DM 49,80 / 360,- ÖS / 48,- SFr

Nächster geplanter Titel: Bernhard Schaeffer (Hgb., 3. Quartal 2000): »Der 2. Hauptsatz auf dem Prüfstand. Theoretische und experimentelle Untersuchungen«.

Alle Titel sind auch als PDF-Dateien (MS-Windows) auf CD-ROM zum Preis von DM 24,80 inkl. Versand direkt beim Verlag erhältlich. Wir versenden gegen Rechnung. Bitte beachten Sie die Darstellung des aktuellen Programms auf der Website des Verlages: <http://www.itetw.de>

## Mantis Verlag

Fax 089-87139139 <mantisillig@gmx.de> (Preise incl. Versandkosten)

### **Gunnar Heinsohn (<sup>3</sup>2000): Wie alt ist das Menschengeschlecht?**

Stratigraphische Grundlegung der Paläoanthropologie und der Vorzeit  
(<sup>1</sup>1991) 158 S. / 42 Abb. / Paperback (= Pb.) / 22,- DM

### **Alfred Tamerl (1999): Hrotsvith von Gandersheim.**

Eine Entmystifizierung  
327 S. / 17 Abb. / Pb. / 39,90 DM (für ZS-Abonnenten 36,- )

### **Heribert Illig • Franz Löhner (<sup>4</sup>1999): Der Bau der Cheopspyramide nach der Rampenzeit**

(<sup>1</sup>1993) 270 S. / 127 Abb. / 36,- (für ZS-Abonnenten 32,- )

### **Gunnar Heinsohn • Heribert Illig (<sup>3</sup>1999): Wann lebten die Pharaonen?**

Archäologische und technologische Grundlagen für eine Neuschreibung der Geschichte Ägyptens und der übrigen Welt  
(<sup>1</sup>1990) 503 S. / 192 Abb. / Pb. / 54,- (für ZS-Abonnenten 48,- )

### **Gunnar Heinsohn (<sup>3</sup>1999): Assyrer Könige gleich Perserherrscher!**

Die Assyrienfunde bestätigen das Achämenidenreich  
(<sup>1</sup>1992) 276 S. / 85 Abb. / Pb. / 36,- (für ZS-Abonnenten 32,-)

### **Gunnar Heinsohn (<sup>2</sup>1997): Wer herrschte im Indus?**

Die wiedergefundenen Imperien der Meder und Perser  
(<sup>1</sup>1993) 102 S. / 43 Abb. / Pb. / 20,-

### **Reinhard Sonnenschmidt (1994): Mythos, Trauma und Gewalt in archaischen Gesellschaften**

131 S. / 25 Abb. / Pb. / 22,-

### **Zeitensprünge. Interdisziplinäres Bulletin (= ZS)**

Quartalszeitschrift mit ca. 700 S. pro Jahr / 70,- / Ausland 75,-  
2000 = 12. Jahrgang / jährlicher Bezug, ohne Kündigungsfrist