

Anmerkungen

- ¹ Die gute Abgrenzbarkeit auf Gattungsebene wird auch dadurch unterstrichen, daß sich die Abgrenzung der Gattungen mit mehreren in der Untersuchung berücksichtigten Arten bei verschiedenen Auswertungsmethoden nicht ändert. Würde man die Arten einer Gattung auseinanderreißen, ergäbe sich eine deutlich größere Baumlänge der Dendrogramme (BATEMAN et al. 1992, 526). Bis auf *Lepidophloios* gilt das auch, wenn die Betrachtung auf generative oder auf vegetative Merkmale beschränkt wird (BATEMAN et al. 1992, 533f.).
- ² Die Autoren sprechen von D-Genen („developmental genes“) nach ARTHUR (1984).
- ³ BATEMAN (1994, 580) begründet die Komplexität des hypothetischen Vorfahren wie folgt (vgl. auch BATEMAN 1996, 96):
 1. Die Morphologie der scheinkrautigen Lepidophyten und der stark reduzierten *Chaloneria* macht nur dann biologischen Sinn, wenn sie entwicklungsmäßig reduzierte Abkömmlinge baumförmiger Vorfahren seien.
 2. Man sollte annehmen, daß der Erwerb sekundärer Gewebe dazu führte, daß diese im ganzen Pflanzenkörper zunächst *einheitlich* ausgeprägt waren, und daß regionale *Differenzierungen* später erfolgen (weil dafür eine komplexere Steuerung erforderlich ist). Allerdings ist die einzige Gattung der cladistischen Analyse von BATEMAN et al. (1992) mit durchgängigem Sekundärxylem die *fortschrittliche*, monosporangiate Gattung *Diaphorodendron* (BATEMAN 1994, 580).
 3. Aufgrund des entwicklungsbiologischen Sparsamkeitsprinzips wäre zu erwarten, daß bei ursprünglichen Gattungen die überirdischen und unterirdischen Teile einander maximal ähneln. Unter der Annahme, daß ein großes, oft verzweigtes Stigmariensystem als ursprünglich anzusehen ist, folgt daraus, daß solche Gattungen primitiv sein sollten, die eine ausgiebig dichotom verzweigte Krone besitzen (dann besteht eine gute Entsprechung zum Stigmariensystem). Das trifft auf *Synchysidendron*, *Lepidodendron* und *Lepidophloios* zu, die wiederum sonst relativ wenig plesiomorphe Merkmale aufweisen, sondern „Bäume mit einer Architektur von mittlerer Komplexität“ darstellen (BATEMAN 1994, 581). Aus dieser verzwickten Situation schließt BATEMAN (1994, 581), daß die gesuchte Form, die an der Basis der karbonischen Lepidophyten steht, eine bislang unbekannte Architektur besitzen müsse.
- ⁴ Über verschiedene oberdevonische und unterkarbonische Gattungen schreibt THOMAS (1978, 327): „The available evidence seems to suggest that the largest of these plants had a main trunk with a crown of dichotomizing branches. The leaves were generally persistent although they may have withered and collapsed later in life. We know very little about their structure, and no anchoring or rooting organs have been described. The reproductive organs of most genera are unknown, and what little we know of the others suggests that some were homosporous while others were heterosporous.“ CICHAN & BECK (1987, 1750) stellen fest: „Despite the fact that the *Lepidodendrales* is one of the best-understood plant taxa of the Carboniferous, relatively little is known about

the early evolutionary history of the group, in particular the phylogenetic events that occurred prior to the invasion of the coal swamps.“

Literatur

- ARTHUR W (1984) Mechanisms of morphological evolution. Chichester: John Wiley & Sons.
- BATEMAN RM (1994) Evolutionary-developmental change in the growth architecture of fossil rhizomorphic lycopsids: scenarios constructed on cladistic foundations. *Biol. Rev.* 69, 527-597.
- BATEMAN RM (1996) Nonfloral homoplasy and evolutionary scenarios in living and fossil land plants. In: SANDERSON & HUFFORD (eds) Homoplasy. The recurrence of similarity in evolution. San Diego, Acad. Press, S. 91-130.
- BATEMAN RM & DiMICHELE WA (1991) *Hizemodendron*, gen. nov., a pseudoherbaceous segregate of *Lepidodendron* (Pennsylvanian): Phylogenetic context for evolutionary changes in lycopsid growth architecture. *Syst. Bot.* 16, 195-205.
- BATEMAN RM & DiMICHELE WA (1994) Saltational evolution of form in vascular plants: a neoGoldschmidtian synthesis. In: INGRAM DS & HUDSON A (eds) Shape and form in plants and fungi. Acad. Press, London, pp. 61-100.
- BATEMAN RM, DiMICHELE WA & WILLARD DA (1992) Experimental cladistic analysis of anatomically preserved arborescent lycopsids from the Carboniferous of Euramerica: an essay on paleobotanical phylogenetics. *Ann. Miss. Bot. Gard.* 79, 500-559.
- CICHAN MA & BECK CB (1987) A woody lycopsid stem from the New Albany shale (Lower Mississippian) of Kentucky. *Am. J. Bot.* 74, 1750-1757.
- HIRMER M (1927) Handbuch der Paläobotanik. München.
- JENNINGS (1972) A new lycopod genus from the Salem limestone (Mississippian) of Illinois. *Palaeontographica B* 137, 72-84.
- JUNKER R (1996) Evolution früher Landpflanzen. Neuhausen-Stuttgart.
- KUTZELNIGG H (1993) Verwandtschaftliche Beziehungen zwischen den Gattungen und Arten der Kernobstgewächse (Rosaceae, Unterfamilie Maloideae). In: SCHERER S (Hg) Typen des Lebens. Berlin, S. 113-127.
- MEYEN SV (1976) Carboniferous and Permian Lepidophytes of Angaraland. *Palaeontographica B* 157, 112-157.
- PHILLIPSTL & DiMICHELE WA (1992) Comparative ecology and life-history biology of arborescent lycopsids in Late Carboniferous swamps of Euramerica. *Ann. Miss. Bot. Gard.* 79, 560-588.
- SCHERER S (1993) Typen des Lebens. Berlin.
- SCHWEITZER HJ (1965) Über *Bergeria mimerensis* und *Protolpidodendropsis pulchra* aus dem Devon Westspitzbergens. *Palaeontographica B* 115, 101-137.
- SCHWEITZER HJ (1969) Die Oberdevon-Flora der Bäreninsel. 2. Lycopodiinae. *Palaeontographica B* 115, 117-138.
- SHUBIN N (1998) Evolutionary cut and paste. *Nature* 394, 12-13.
- THOMAS BA (1978) Carboniferous Lepidodendraceae and Lepidocarpaceae. *Bot. Rev.* 44, 321-364.

Datierung mittels Radiokarbon

IIb. Die Kalibrierung von ^{14}C -Altern: Die europäischen Eichenchronologien und weitere Langzeit-Dendrochronologien. Erweiterung der Kalibrierkurve ins Pleistozän

Uwe Zerbst, Weg der Jugend 16, 19258 Boizenburg

Die Isotopenverschiebung, d.h. die Veränderung des globalen $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses über der Zeit (vgl. Teil I des vorliegenden Aufsatzes) macht eine nachträgliche Korrektur der gemessenen ^{14}C -Alter nötig. Dies geschieht auf der Grundlage von Kalibrierkurven, die v.a. dendrochronologisch, d.h. mittels Baumringmethode gewonnen werden. In Teil IIa wurden bereits die grundlegende Arbeitsweise der Dendrochronologie und der Aufbau von ^{14}C -Kalibrierkurven erläutert. Von besonderer Bedeutung waren die seit dem Ende der 60er Jahre entwickelten nordamerikanischen Borstenkiefernchronologien. Das entscheidende Argument für die unbedingte Zuverlässigkeit der Baumringchronologien, ihre unabhängige Reproduzierbarkeit, war mit Hinweis auf die übliche Vordatierung der Proben mittels ^{14}C allerdings relativiert worden.

Im vorliegenden Teil des Aufsatzes soll diesem Argument unter Einbeziehung der jüngeren europäischen Eichenchronologien weiter nachgegangen werden. Aufgrund der vergleichsweise großen Ringbreiten der Eichen erlaubten die europäischen Chronologien erstmals die Generierung von Hochpräzisions-Kalibrierkurven. Ihre besondere Bedeutung bestand aber v.a. darin, daß die auf ihnen aufbauenden Kalibrierkurven mit denen der nordamerikanischen Borstenkiefern praktisch zusammenfielen. Das kann nicht nur als eine weitere Bestätigung der prinzipiellen Richtigkeit der Kurven gelten, sondern ist auch ein starkes Indiz für die Existenz einer global einheitlichen Kalibrierkurve, vorausgesetzt die Kurven sind unabhängig voneinander entstanden. Im Ergebnis der Diskussion wird jedoch gezeigt werden, daß auch bezüglich der Eichenchronologien nicht von einer völligen Unabhängigkeit gesprochen werden kann, da sie über ^{14}C -Vordatierung der Einzelproben und Wiggle-Matching der Kalibrierkurven untereinander und mit den Borstenkiefernchronologien in einem Wechselverhältnis stehen.

Dendrochronologisch begründete Kalibrierkurven reichen zeitlich bis ans Ende des Pleistozäns heran, eine weiterführende Kalibrierung für die Zeit vor ca. 10.000 Jahren muß sich auf andere Vergleichsverfahren stützen. Diese werden in einem zweiten Teil des vorliegenden Aufsatzes vorgestellt.

Die europäischen Eichenchronologien

Im Unterschied zu den amerikanischen Borstenkiefernchronologien sind die europäischen Eichenchronologien aus sehr viel kürzeren Einzelsequenzen aufgebaut. Sie bestehen im Schnitt aus 150 bis 250 (PILCHER et al. 1984) und nur in seltenen Fällen aus 300 bis 400 Ringen (LEUSCHNER & DELORME 1984). Für eine Langzeitchronologie werden auf diese Weise 5000 und mehr Einzelsequenzen benötigt (BECKER 1993). Das eigentliche Rückgrat der Eichen-Standardchronologien sind aber nicht die Einzelsequenzen, sondern lokale Chronologien, die bereits aus einer Vielzahl von Einzelsequenzen gemittelt sind (vgl. Teil IIa, „Chronologiebildung“, S. 59f.). Die Größe des Standortes, über den die lokalen Chronologien miteinander korreliert sind, ist beträchtlich. Abb. 33 zeigt die Gebiete, für die die europäischen Eichenchronologien erstellt worden sind. Es ist zunächst überraschend, daß Bäume an so verschiedenen Standorten wie Nordirland und Süddeutschland mit ganz unterschiedlichen Witterungsbedingungen vergleichbare Ringfolgen aufweisen sollen. Und in der Tat ist die Korrelation aufgrund unterschiedlicher Ausprägungen von Ringmustern auch nicht in jedem Fall möglich (LEUSCHNER & DELORME 1984).

Quellen für fossiles Holz waren in Europa zunächst archäologische Funde: Reste römischer Brücken und Kaianlagen, im Sumpf versunkene Pfahlbauten aus der Bronze- und Jungsteinzeit usw. Später gewannen subfossile, in Flußschottern eingeregelter und in Mooren konservierte Baumstämme an Bedeutung. Ein wesentlicher Vorteil der europäischen Eichen gegenüber den kalifornischen Borstenkiefern sind die sehr viel größeren Ringbreiten, die seit den 80er Jahren ^{14}C -Hochpräzisionsmessungen ermöglicht haben.

Angeregt durch die Arbeiten des Amerikaners DOUGLASS (vgl. Teil IIa) begann Bruno HUBER seit den 40er Jahren zunächst im erzgebirgischen Tharandt, später in München mit dem Aufbau einer mitteleuropäischen Standardchronologie auf der Grundlage von Eichenholz (BECKER 1992). Berühmt wurde seine Chronologie aus Spessart-Eichen. In den frühen 60er Jahren beteiligte sich HUBER an archäologischen Untersuchungen jungsteinzeitlicher Siedlungen in der Schweiz, für die er eine lokale „schwimmende“ Chronologie erstellen konnte. Mittels Wiggle-Matching mit der amerikanischen

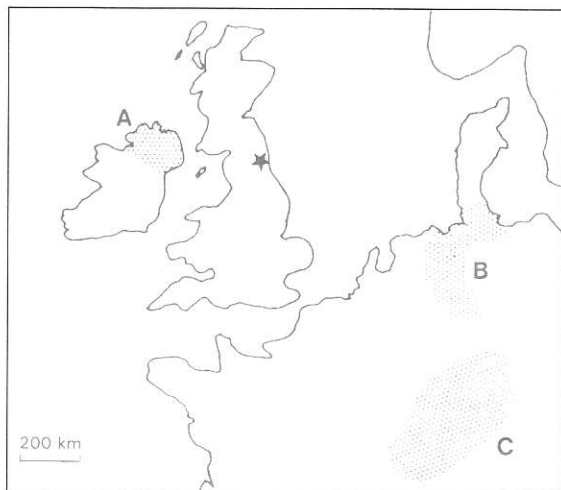


Abb. 33: Gebiete aus denen die Proben für die europäische Eichen-Standardchronologie entnommen wurden.

A: Nordirland;
B: Norddeutschland;
C: Süddeutschland;
* Swan Carr in Ostengland. (Nach PILCHER et al. 1984)

Borstenkiefernchronologie ermittelte er gemeinsam mit FERGUSON und SUESS ein Datum der Fundschichten in der ersten Hälfte des vierten vorchristlichen Jahrtausends. Für die Archäologen war dieses hohe Alter seinerzeit so ungewohnt, daß sie sich schwer taten, es zu

akzeptieren (BECKER 1992). Die Datierung der Steinzeitsiedlungen wurde bereits als das früheste Beispiel von Wiggle-Matching erwähnt (FERGUSON et al. 1966, vgl. Teil IIa, Abb. 22).

Eine im süddeutschen Raum generierte Standard-Eichenchronologie reichte Ende der 60er Jahre bis ins neunte Jahrhundert n. Chr. zurück und aufgrund vorhandener „schwimmender“ Chronologien erwarteten HUBER & GIRETZ (1970) eine künftige Erweiterung um weitere viertausend Jahre. Im Jahre 1976 konnte HOLLSTEIN von der Verlängerung der Chronologie bis 717 v. Chr. berichten, und es bestand Hoffnung, die Standardchronologie eines Tages auf eine Länge von 8700 Jahren auszuweiten (HOLLSTEIN 1980, DAMON 1987). Drei Jahre spä-

ter, 1979, konnten zwei der „schwimmenden“ Chronologien (2900-1600 v. Chr. und 4060-2820 v. Chr.) mittels Wiggle-Matching über die amerikanische Borstenkiefernchronologie vorläufig datiert werden (DAMON 1987). 1981 und 1982 wurde die Standardchronologie auf 1462 v. Chr. bzw. 2061 v. Chr. erweitert (vgl. BAILLIE 1990/91). Der sprunghafte Fortschritt war durch die Verschmelzung der süddeutschen Sequenzen (Hohenheim, Abb. 34) mit Sequenzen aus Westdeutschland (Köln) möglich geworden (BECKER & SCHMIDT 1982). Im folgenden soll die Gesamtchronologie verkürzt als „Hohenheimer Chronologie“ bezeichnet werden.

Parallel zu den Arbeiten in Deutschland hatte in den 70er Jahren eine Forschergruppe um BAILLIE und PILCHER in Belfast mit dem Aufbau einer irischen Eichenchronologie begonnen, die 1976 bereits bis 1000 n. Chr. zurückreichte. Hinzu kamen fünf „schwimmende“ Chronologien, die insgesamt etwa viertausend Jahre überstrichen. Das längste dieser Stücke umfaßte allein 2300 Ringe (Damon 1987). In Abb. 34 ist der Stand der Entwicklung bis 1982 dargestellt, als die Belfaster Chronologie bis zum Jahr 13 v. Chr. zurückreichte und die „schwimmenden“ Chronologien auf 5300 v. Chr. bis 200 v. Chr. datiert wurden. Die sogenannte „lange Chronologie“ reichte von 5300 v. Chr. bis 940 v. Chr., ein sich anschließendes, noch einmal aus 49 Einzelsequenzen bestehendes Stück, „Garry Bog 2“, von 940 v. Chr. bis 220 v. Chr. Beide „schwimmenden“ Chronologien waren durch Wiggle-Matching mit der amerikanischen Borstenkiefernchronologie fixiert worden (BAILLIE et al. 1983). Es fehlten also gerade einmal zwei Jahrhunderte zum Überbrücken zwischen der Standardchronologie und den „schwimmenden“ Chronologien.

In dieser Situation bot es sich an, die Belfaster und die Hohenheimer Eichenchronologie miteinander zu korrelieren. Auf diese Weise würde eine Gesamtchronologie entstehen, die ohne Unterbrechung bis ins sechste vorchristliche Jahrtausend zurückreichte. Die Kreuzkorrelation ergab ein Enddatum der „Garry Bog 2“-Chronologie im Jahre 158 v. Chr. Kurze Zeit zuvor hatte BAILLIE jedoch über mehrfache Kreuzkorrelation mit Holzfunden aus der Römerzeit in London und im englischen Carlisle sowie mit einer eisenzeitlichen Chronologie in Nordirland für denselben Zeitpunkt das Jahr 229 v. Chr. ermittelt (Abb. 35, BAILLIE 1982). An einer Stelle in der Kette mußte ein Fehler sein. Bei der Suche stellte sich heraus, daß die deutsche Chronologie um 550 v. Chr. nur durch drei Sequenzen belegt und diese vergleichsweise schwach miteinander korreliert waren. BECKER (1983a) hatte darüber hinaus einen Versatz der Chronologie gegenüber der amerikanischen Borstenkiefernchronologie von 69 bis 72 Jahren bemerkt. Daraufhin wurde die bestehende Chronologie an dieser Stelle aufgetrennt und ein zusätzlicher Abschnitt von 71 Jahren eingefügt (PILCHER et al.

Abb. 34: Die irische und die deutschen Eichen-Standardchronologien im Jahr 1982. (Ausschnitt nach BAILLIE 1990/91)

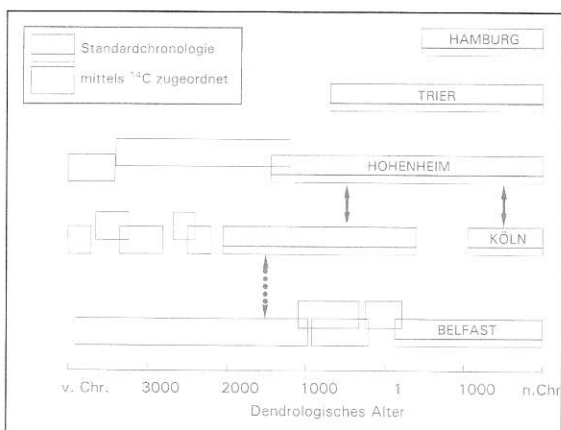
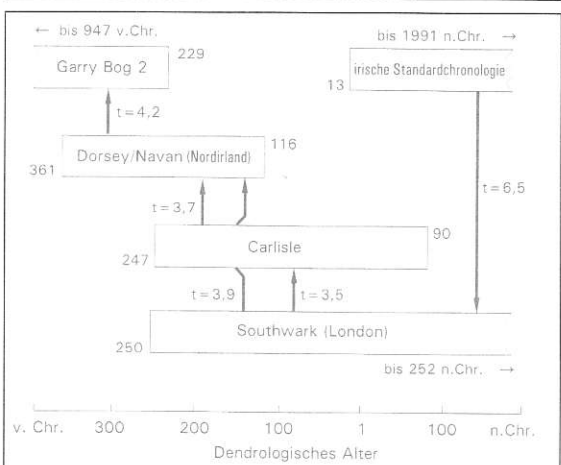


Abb. 35: Datierung des Endes der „Garry Bog 2“-Chronologie mit Hilfe englischer und nordirischer Chronologien auf das Jahr 229 v. Chr. Die Kreuzkorrelation mit der Hohenheimer Eichenchronologie hatte ein Datum von 158 v. Chr. ergeben. (Nach BAILLIE 1990/91)



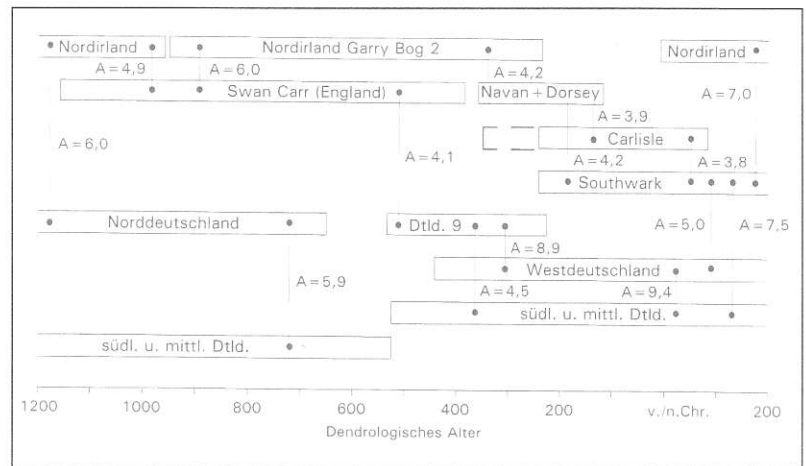
1984). Nach Vornahme der Korrektur wurde aus den irischen, englischen und deutschen Teilen eine einheitliche westeuropäische Eichen-Standardchronologie erarbeitet, die in Abb. 36 einschließlich der bei der Kreuzkorrelation ermittelten t-Werte wiedergegeben ist. Sämtliche Sequenzen durchliefen vor der Korrelation einen Hochpaßfilter. Außer im Falle Navan/Dorsey-Southwark wurde in jedem Fall die Überlappung mit dem höchsten möglichen t-Wert gewählt; die Autoren betonten jedoch, daß die statistische Analyse eher komplementär zur visuellen Beurteilung der Überlappung war. Die etwas höheren t-Werte im Vergleich zu Abb. 35 könnten sich aus einer modifizierten Aufbereitung der Rohdaten für die Kreuzkorrelationsanalyse ergeben haben.

BAILLIE (1990/91) wertet die Ausmerzung des oben beschriebenen Fehlers in der Hohenheimer Chronologie zurecht als ein Indiz für die Korrekturfähigkeit dendrochronologischer Aussagen. Zugleich illustriert der Vorgang jedoch die in Teil IIa gemachte Aussage, daß eine absolut sichere Kreuzkorrelation allein auf statistischer Grundlage nicht möglich ist. Vor dem Hintergrund der nachträglichen Korrektur läßt sich aber auch das Argument der Reproduktion, d.h. der Unabhängigkeit der Chronologien, zumindest für die oben beschriebenen Kurven nicht aufrechterhalten.

Es existiert jedoch noch eine weitere Langzeitchronologie. Im selben Jahr als PILCHER et al. ihre westeuropäische Eichenchronologie veröffentlichten, publizierten Göttinger Wissenschaftler ebenfalls eine Standardchronologie (LEUSCHNER & DELORME 1984), die von 4008 v.Chr. bis 785 n.Chr. reichte (Abb. 37) und später bis 6255 v.Chr. erweitert wurde (LEUSCHNER & DELORME 1988). An ihrem jüngeren Ende war sie durch die Eichenchronologie von HOLLSTEIN (s.o.) fixiert worden.

Abb. 38 zeigt einen Vergleich der Göttinger mit der Belfaster Standardchronologie, der teilweise über lokale Chronologien aus Ostengland und Schleswig-Holstein (NOW 10 W) vorgenommen, eine gute Korrelierbarkeit der beiden Kurven ergab (BROWN et al. 1986). Unlängst durchgeführte Vergleiche der Göttinger mit der Hohenheimer Eichenchronologie führten jedoch zur Aufdeckung einer Unstimmigkeit in der Hohenheimer Chronologie im sechsten Jahrtausend v.Chr. Nachdem ihr um 5241 weitere 41 Jahre hinzugefügt wurden, ergab sich eine zufriedenstellende Korrelation zwischen den Chronologien bis 7200 v.Chr. (Vergl. auch SPURK et al. 1998)

Es ist aus dem publizierten Material nicht ersichtlich, ob auch im Falle der Göttinger Chronologie Teile durch Wiggle-Matching vordatiert wurden. Auf jeden Fall fand zumindest in den älteren Teilen der Kurve eine Vordatierung mittels ^{14}C statt (Abb. 37). Klarer sind die Verhältnisse bei der Hohenheimer Chronologie. Nach 1982 ist die Chronologie mehrfach erweitert worden: 1983 bis



ca. 4000 v.Chr. (BECKER 1983b), 1992 bis 7938 v.Chr. (BECKER 1992), 1993 bis 8021 v.Chr. (BECKER 1993) und 1998 bis 8480 v. Chr. Das Teilstück von ca. 8050 bis 7800 v. Chr. mußte Ende der 90er Jahre revidiert werden (KROMER et al. 1996, SPURK 1998). Ähnlich verhält es sich mit einer Hohenheimer Kiefernchronologie, die 1992 publiziert wurde und bis 9420 v.Chr. zurückreichte (BECKER 1992). Mittels Wiggle-Matching lassen sich beide Chronologien heute um 8800 v.Chr. synchronisieren, wobei die Kiefernchronologie zu älteren Werten verschoben wird (KROMER et al. 1996, SPURK et al. 1998).

Wesentliche Teile der Hohenheimer Chronologie sind ähnlich der Belfaster „Langen Chronologie“ (s.o.) über Wiggle-Matching mit der amerikanischen Borstenkiefernchronologie fixiert worden (LINICK et al. (1985). Das betrifft neben den bereits erwähnten Abschnitten beispielsweise die lokalen Chronologien „Donau 8“, „Main 6/13“ und „Main 4/11“, die aus 266 einzelnen Sequenzen bestehen und eine Zeitspanne von 7215 v.Chr. bis 4035 v.Chr. überstreichen. Andere „schwimmende“ Sequenzen und Chronologien, die nicht durch Wiggle-Matching zuordenbar waren, z.B. „Main 9“, deren Alter mit 7825 bis 7215 v.Chr. die Reichweite der Borstenkiefernchronologie überschreitet, sind – wie praktisch alle „schwimmenden“ Chronologien – mit ^{14}C vordatiert worden (BECKER 1993). In

Abb. 36: Einheitsliche westeuropäische Eichen-Standardchronologie (Ausschnitt nach PILCHER et al. 1984)

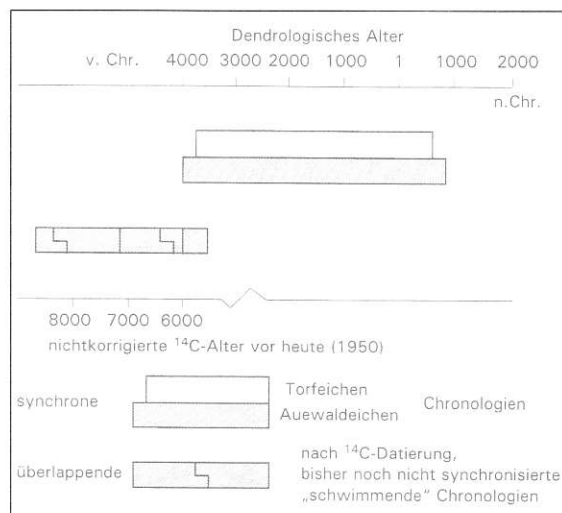


Abb. 37: Göttinger Eichen-Standardchronologie. Stand: 1984. (Nach LEUSCHNER & DELORME 1984)

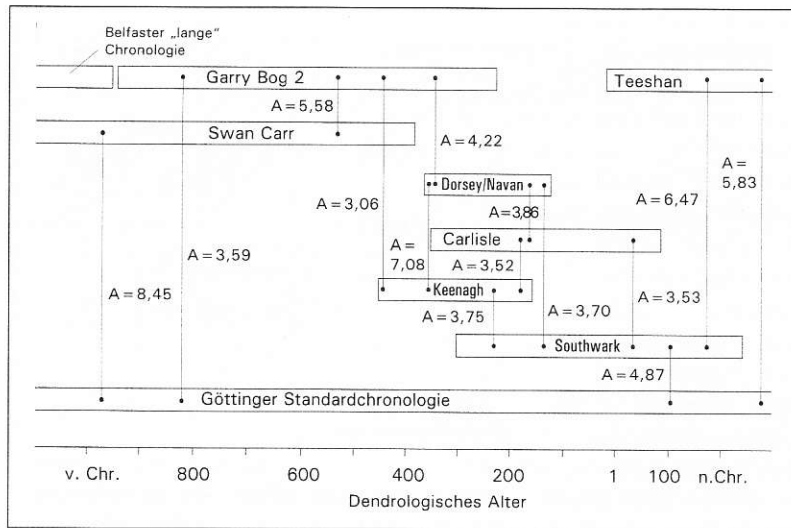


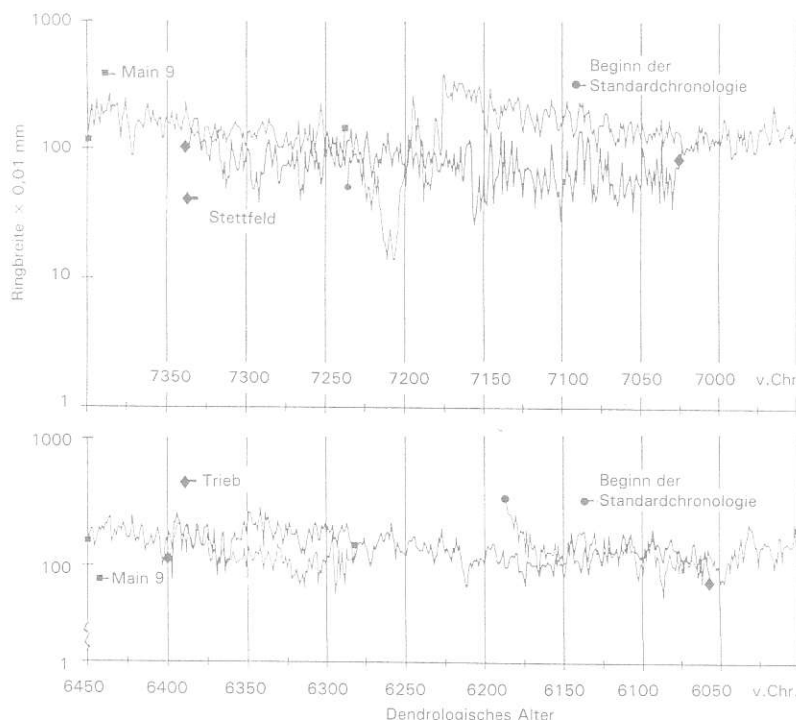
Abb. 38: Kreuzkorrelation der irischen und englischen Eichenchronologien mit der Göttinger Chronologie. (Ausschnitt nach BROWN et al. 1986)

Abb. 39 ist der Aufbau zweier älterer Abschnitte der Hohenheimer Chronologie auf der Ebene von Ringfolgen illustriert.

Weitere im Aufbau befindliche Langzeit-Dendrochronologien

Weitere Langzeitchronologien sind in Tasmanien und in Anatolien im Aufbau. Die tasmanischen Koniferenchronologien reichen derzeit bis 571 v. Chr. zurück (BARBETTI et al. 1992; BARBETTI et al. 1995). Darüber hinaus existieren mehrere „schwimmende“ Chronologien (z.B. 9280-8990 v. Chr. und 9840-9480 v. Chr.), die über Wiggle-Matching mit der Hohenheimer Eichenchronologie.

Abb. 39: Beispiele für überlappende Teilstücke der Hohenheimer Eichenchronologie. (Nach BECKER 1993)



gie korreliert wurden. Eine Reihe von Holzfunden weisen entsprechend ^{14}C -Vordatierung noch erheblich höhere Alter auf.

Für den anatolischen Raum, dem antiken Kleinasien, berichteten KUNIHOLM et al. (1996) unlängst über den Aufbau einer 1503 Jahre langen „schwimmenden“ Chronologie aus Resten ausgegrabener Bauhölzer. Mittels Wiggle-Matching an die internationale Hochpräzisions-Kalibrierkurve von 1993 (vgl. Teil IIa) angebunden, wurde sie auf 2220 bis 718 v. Chr. datiert. Die besondere Bedeutung der Kurve liegt darin, daß sie historische Fundstätten dendrochronologisch datiert. Die Fundstätten können archäologisch mit Grabungshorizonten im gesamten östlichen Mittelmeerraum, in der Ägäis, auf Zypern, in der Levante und in Ägypten synchronisiert werden. Eine Folge könnten nachhaltige Revisionen der historischen Chronologien der Alten Welt vom 18. bis 15. Jhd. v. Chr. sein, eine Thematik, die in Teil III dieses Aufsatzes noch eingehender diskutiert werden soll.

Regionale Unterschiede in der ^{14}C -Isotopenverschiebung an der Atmosphäre?

In Teil IIa, Abschnitt „Frühe ^{14}C -Kalibrierkurven“ (S. 64) wurde darauf hingewiesen, daß zu Beginn der 70er Jahre mögliche regionale Unterschiede im atmosphärischen $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopengleichgewicht der nördlichen und südlichen Halbkugel diskutiert wurden, auf die dendrochronologische Daten von verschiedenen Kontinenten hinzuweisen schienen. Im Zusammenhang mit der Archäologie des Nahen Ostens gewann diese Diskussion dadurch an Bedeutung, daß ein Autor größere Diskrepanzen zwischen den historisch-archäologischen und den kalibrierten ^{14}C -Altern damit erklärte, daß die in den nordamerikanischen White Mountains generierte Kalibrierkurve auf andere Teile der Erde und speziell auf Ägypten möglicherweise gar nicht anwendbar sei (LONG 1976). Neuere dendrochronologische Untersuchungen auf der südlichen Halbkugel ergaben jedoch keinen oder nur einen sehr geringen Versatz mit dem Norden (vgl. BARBETTI et al. 1992, SPARKS et al. 1995, McCORMAC et al. 1998). Eine Übersicht über die aktuellen Messungen findet sich bei STUVIER et al. (1998). Danach betragen die Unterschiede zwischen 21 ± 5 (Südküste – Washington) und 40 ± 5 ^{14}C -Jahren (Südafrika – Niederlande).

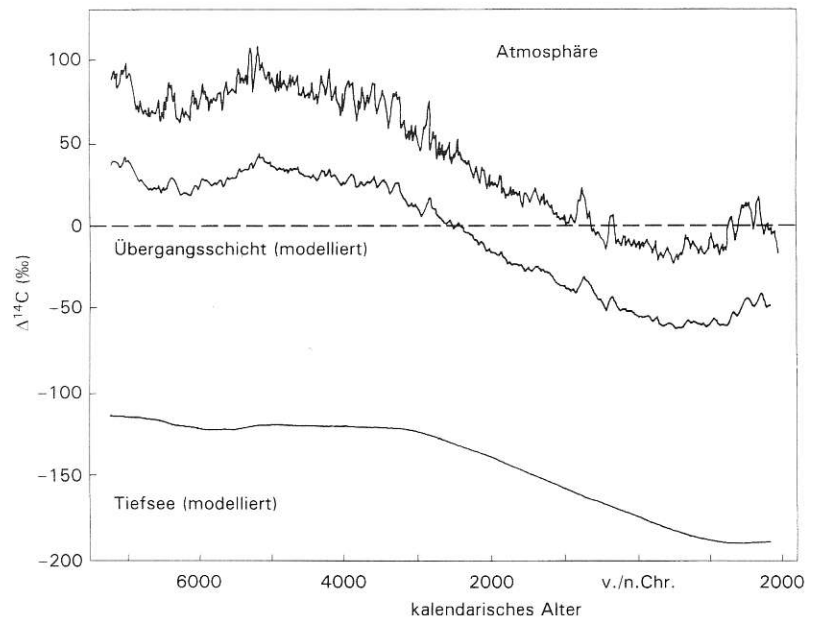
Aber auch innerhalb der nördlichen Hemisphäre wurden in jüngster Zeit Abweichungen des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Gleichgewichtes beobachtet. So berichten McCORMAC et al. (1995) von Vergleichsmessungen an deutschem und irischem Eichenholz und nordamerikanischer Borstenkiefer, bei denen um 500 v. Chr. lokale Unterschiede in der Größenordnung von 40 ^{14}C -Jahren auftraten, wobei das irische Holz

zu geringeren Altern tendierte. Für das siebente Jahrtausend v. Chr. sind die Unterschiede zwischen den Messungen an deutschen Eichen und amerikanischen Borstenkiefern noch deutlich größer. Für andere Zeitabschnitte wurde hingegen kein Versatz festgestellt. Die Ursachen für die Diskrepanzen sind bislang noch unklar (KROMER et al. 1996). Man geht allgemein davon aus, daß sie keinen größeren Effekt auf die vorhandenen Kalibrierkurven haben werden. Inwieweit dies auch auf die Datierung archäologischer Funde mit Hilfe des sog. archäologischen Wigggle-Matchings (das in Teil III noch diskutiert werden soll) zutrifft, ist aber fraglich.

Erweiterung der ^{14}C -Kalibrierkurve ins Pleistozän

Übersicht über die wichtigsten Verfahren. Auf der geologischen Zeitskala reicht die dendrochronologische Datierung bis ans Ende des Pleistozäns heran, auf der archäologischen Zeitskala entspricht dies etwa dem Beginn der Mittleren Steinzeit (Mesolithikum) in Europa. Aus der Zeit davor existiert kaum Fundmaterial, das eine Erweiterung erlauben würde. Die gegenwärtig forciert vorangetriebene Erweiterung der Kalibrierkurve in die Zeit deutlich vor 10.000 Jahren muß darum auf andere Verfahren zurückgreifen (VAN ANDEL 1998). Dies sind zum einen Methoden, die ähnlich wie die Baumringmethode auf dem Auszählen jährlicher Zuwachsschichten basieren und zum anderen Verfahren, die im Folgenden vereinfacht als physikalisch begründete Meßverfahren bezeichnet werden sollen. Zur ersten Gruppe gehören die Warvendatierung, die Datierung warvenähnlicher Schichtungen im Meer und die Eisschichtdatierung, zur zweiten alternative radiometrische Datierungen (v.a. die Th/U- oder Ioniummethode), die paläomagnetische Datierung und die Thermolumineszenzdatierung.

Da Kalibrierungen auf der Basis all dieser Verfahren vergleichsweise ungenau sind, spielen sie in dem Zeitbereich, der durch die Dendrochronologie abgedeckt ist, praktisch keine Rolle. Im Sinne der Archäologie beziehen sie sich auf die sog. Vorgeschichte, für die keine schriftlichen Quellen und damit auch keine unabhängigen Altersangaben existieren. Damit liegen sie auch bezüglich der im vorliegenden Aufsatz abgehandelten Thematik eher am Rande. Von Bedeutung sind sie aber deshalb, weil sie die dendrochronologischen Kalibrierkurven nicht nur verlängern, sondern diese in bestimmten Bereichen auch überlappen. Damit könnten sie potentiell eine Bestätigung für den durch die Baumringkurven vorgegebenen Trend liefern oder diesem widersprechen, d.h. aus der zeitlichen Erweiterung der Kurve sollten in



begrenztem Maße Rückschlüsse auf die Korrektheit oder Fehlerhaftigkeit der Baumringkurven gezogen werden können, sofern die Ergebnisse voneinander unabhängig sind.

Verfahren, die auf dem Auszählen jährlicher Zuwachsschichten basieren

Warven- und vergleichbare Chronologien. Der Begriff „Warve“ kommt aus dem Schwedischen und bedeutet soviel wie „periodische Wiederkehr“. Typische Warven sind Bändertone, die beim Abschmelzen des Inlandeises des Pleistozäns in großen Becken sedimentiert wurden. Sie weisen ein charakteristisches Muster auf, in dem sich helle, sandige Sommerlagen mit dunklen tonigen Winterlagen, die oft organische Rückstände enthalten, abwechseln (HOHL 1981). Abb. 41 zeigt ein Beispiel. Für die Datierung erfüllen die Jahresschichten dieselbe Funktion wie die Jahrringe in der Dendrochronologie. Der erste, der auf dieser Grundlage eine etwa 12.000 Jahre zurückreichende Chronologie geschaffen hat, war 1912 der schwedische Geologe Gerard DE GEER. Im folgenden sollen neben den eigentlichen Warvenchronologien auch Chronologien diskutiert werden, die an vergleichbaren Schichtungen z.B. im Meer gewonnen wurden.

Bereits frühzeitig wurden Warven für die Kalibrierung von ^{14}C -Daten herangezogen (YANG & FAIRHALL 1972). Für die ^{14}C -Datierung wird fossiler Kohlenstoff, z.B. Blätter, Zweige oder Insektenflügel verwendet. Gegenüber den an Holz ermittelten ^{14}C -Daten weisen die an den Warven ermittelten Alter aber aufgrund der geringeren Mengen datierungsfähigen Materials eine größere Meßwertstreuung auf. Ein Problem ist, daß die jüngeren Schichten (mitunter in der Größenordnung bis zu

Abb. 40: ^{14}C -Kalibrierkurven in verschiedenen ^{14}C -Reservoirs. Die Kurven für die Tiefsee und die Übergangsschicht zur Atmosphäre sind im Computer modelliert. (Nach STUVIER et al. 1986a)

Reservoiralter

Im Zusammenhang mit den im folgenden besprochenen Verfahren ist der Begriff des Reservoiralters zu klären, der immer dann von Bedeutung ist, wenn die für die Kalibrierung genutzten Proben nicht an der Atmosphäre, sondern in einem anderen Reservoir, gewöhnlich dem Meer, gebildet wurden.

Bereits in Teil I ist darauf hingewiesen worden, daß sich in unterschiedlichen ^{14}C -Reservoirs wie der globalen Atmosphäre, den Weltmeeren, dem Oberflächenwasser in den Meeren usw. spezifische $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Gleichgewichte einstellen, die sich von denen anderer Reservoirs unterscheiden. Für die ^{14}C -Datierung relevant ist jeweils das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Gleichgewicht, in dem die Probe zum Zeitpunkt ihres Todes existiert hat. Eine Kalibrierkurve, die für ein bestimmtes Reservoir ermittelt wurde, kann nicht einfach auf ein anderes Reservoir übertragen werden, sondern es ist eine zusätzliche Reservoirkorrektur nötig. In kleinen ^{14}C -Reservoirs wie flachen Binnenseen spielt der Stoffaustausch mit der Atmosphäre allerdings oft eine so dominierende Rolle, daß eine solche Korrektur nicht erforderlich ist, vorausgesetzt, es ist keine Quelle für „fremden“ Kohlenstoff (z.B. ein kalkhaltiger Untergrund) vorhanden. Grundsätzlich anders verhält es sich mit den Ozeanen, bei denen gewöhnlich zwischen der Tiefsee und einer etwa 75 Meter tiefen Übergangsschicht unterschieden wird, die durch Wind und Wellen im Kontakt mit der Atmosphäre

steht. Aufgrund der gegenüber der Atmosphäre langsameren Durchmischung in diesen Reservoirs ist das Wasser der Ozeane ^{14}C -ärmer. Eine unter Zugrundelegung atmosphärischer Bedingungen durchgeführte ^{14}C -Datierung täuscht darum ein um Jahrhunderte zu hohes Alter vor. Dieser Fehler wird als „scheinbares“ oder „Reservoiralter“ (R) bezeichnet.

Weil das Reservoir selbst in der Vergangenheit Veränderungen erfahren haben kann, z.B. Variationen seines Volumens, der ein- oder abfließenden Stoffmenge oder auch des Austausches mit der Atmosphäre, ist das Reservoiralter kein konstanter Wert, sondern eine zeitabhängige Variable $R(t)$. Diese Zeitabhängigkeit ist aber nur schwer zu ermitteln, weshalb viele Autoren die Größe als eine Konstante anwenden, die sie einfach in die Vergangenheit extrapolieren (vgl. z.B. BARD et al. 1990; EDWARDS et al. 1993; HUGHEN et al. 1998a, b). Das Reservoiralter wird beispielsweise an Muscheln aus der Region der zu datierenden Materialien bestimmt, deren Alter bekannt ist. Typische Reservoiralter in der Übergangsschicht der Weltmeere betragen zwischen 200 und 400 Jahren (vgl. die Zusammenstellung bei STUVIER et al. 1986a).

Einen alternativen Weg beschreiten STUVIER et al. (1986a, 1998), die sowohl für die Tiefsee als auch für die Übergangsschicht ^{14}C -Alter im Rechner simulierten. Eingangsgröße der Rechnung war die zeitabhängige Veränderung der Isotopenverschiebung

(d.h. die Kalibrierkurve) an der Atmosphäre. Wichtige Parameter zur Bestimmung der Durchmischung im Meer waren empirisch gewonnene CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre und im Meer und der vertikale Diffusionskoeffizient für ^{14}C . Es wurde vereinfachend angenommen, daß die Veränderung der ^{14}C -Isotopenverschiebung an der Atmosphäre ausschließlich eine Folge von Variationen der ^{14}C -Bildungsrate war, d.h. Faktoren, wie globale Klimaveränderungen, die den ^{14}C -Austausch zwischen Atmosphäre und Ozeanen zusätzlich beeinflusst hätten, wurden vernachlässigt.

Die Ergebnisse sind in Abb. 40 dargestellt. Das Modell ergab nicht nur eine Glättung des Verlaufes der ^{14}C -Isotopenverschiebung, sondern auch eine zeitliche Verschiebung, die der Trägheit des Systems Ozean besser gerecht wird, als die Annahme eines konstanten Reservoiralters über der Zeit. Aus den Werten der ^{14}C -Isotopenverschiebung läßt sich unmittelbar eine Kalibrierkurve für ozeanische Proben ableiten (vgl. auch Abb. 12 in Teil I des vorliegenden Aufsatzes), wenn die Richtigkeit der atmosphärischen Kurven als gegeben angenommen wird. Ein Problem ist die Vernachlässigung der geographischen Variation der Isotopenverschiebung im Rechenmodell. STUVIER et al. schlagen deshalb eine zusätzliche Korrektur des Reservoiralters (DR) vor, die von der geographischen Lokalisierung der zu datierenden Probe abhängt.

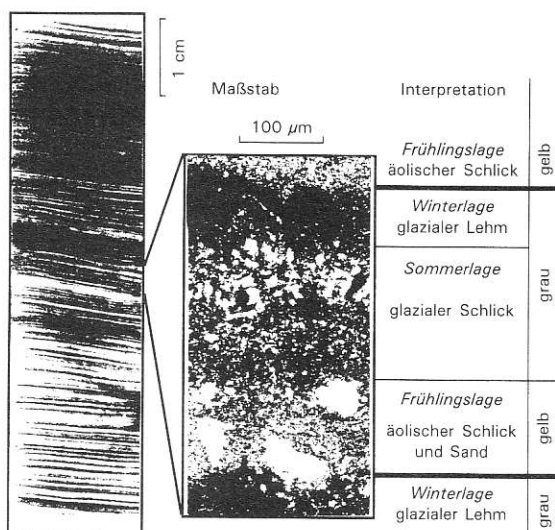
zehntausend Jahren) häufig weniger eindeutig identifizierbar sind als die älteren Schichten. Warvenchronologien sind daher gewöhnlich „schwimmende“ Chronologien, die mittels Wiggle-Mat-

ching an die vorhandenen Hochpräzisions-Baumringchronologien angebunden sind (z.B. GOSLAR et al. 1995; HUGHEN et al. 1998a, b; KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998a, b).

Die älteren Warvenchronologien wurden in der Vergangenheit mehrfach Revisionen unterzogen (WOLFARTH 1996). Ein bekanntes Beispiel ist die ursprüngliche schwedische Warvenchronologie, die gegenüber der amerikanischen „Lake-of-the-Clauds“-Chronologie von Minnesota in deren ältestem Abschnitt einen Versatz von fast tausend Jahren aufwies (STUVIER et al. 1986b). Ein Teil dieser Diskrepanz konnte durch eine Neuauswertung der schwedischen Chronologie behoben werden, in deren Folge den vorhandenen Sequenzen 365 neue Warven hinzugefügt wurden. STUVIER et al. (1986b) korrelierten schließlich den jüngeren Teil der schwedischen Warvenchronologie mit den ältesten Teilen der „Lake-of-the-Clauds“-Warvenchronologie mittels Wiggle-Matching.

Die verbliebene Diskrepanz weist eventuell auf ein spezielles Problem der Warvendatierung hin: es kann nicht einfach vorausgesetzt werden, daß

Abb. 41: Aufbau einer Warvensequenz am Bodensee. (Nach NIESSEN et al. 1992)



jedes Jahr eine Schicht gebildet wird. So stießen HAJDAS et al. (1995) bei einer jüngeren Untersuchung an einem kleinen See in der Eifel durch den Vergleich mit der dendrochronologischen Kalibrierkurve zwischen 0 und 2000 v. Chr. auf eine Diskrepanz von nicht weniger als 878 Jahren, um die sie die Warvenchronologie dann nachträglich korrigierten. Die Autoren folgerten daraus, daß für Zeiten oberhalb der Baumringkurven eine relative Sicherheit nur durch den Vergleich unterschiedlicher Warven-Kalibrierkurven unterschiedlicher Lokalität gewonnen werden kann.

Die heute vorhandenen Chronologien werden bis etwa 11.000 Jahre als konsistent angesehen (KITAGAWA & VAN DER PLICHT 1998a, b). Neuere Chronologien wurden von Hajdas et al. (1993), HAJDAS et al. (1995), GOSLAR et al. (1995) und WOLFARTH (1996) vorgestellt. HUGHEN et al. (1998a, b) erstellten eine Chronologie an warvenähnlichen Schichtungen im Meer.

Während die älteren schwedischen Chronologien aus relativ kurzen Teilsequenzen zusammengefügt waren, werden neuere Chronologien teilweise an durchgehenden Bohrkernen ermittelt. Datierungsfehler gehen deshalb nicht auf Probleme bei der Kreuzanalyse zurück, sondern auf potentielle Unregelmäßigkeiten in der Schichtfolge, auf Fehler bei der (automatischen) Auszählung der Schichten und auf Verluste bei den Bohrkernen. Ein Beispiel ist die unlängst von KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a, b) vorgestellte Warvenchronologie für einen japanischen See, die mit ca. 45.000 Jahren nahezu den gesamten Bereich der ^{14}C -Datierung abdeckt (Abb. 42). Die 29.100 Jahre lange Sequenz ist eine „schwimmende“ Chronologie, die mittels Wiggle-Matching mit der einheitlichen dendrochronologischen Hochpräzisions-Kalibrierkurve auf 8830 bis 37930 v. Chr. datiert wurde. Oberhalb dieser Zeit wurde das Alter über eine als konstant angenommene Sedimentationsrate abgeschätzt. Die Anzahl der Schichten wurde per Bildverarbeitung über eine Grauwertanalyse ermittelt. Der Datierungsfehler, der von den Autoren bei 40.000 Jahren auf höchstens 2000 Jahre geschätzt wird, wird hauptsächlich darauf zurückgeführt, daß der 75 Meter lange Bohrkern in Teilstücken von 85 bis 90 Zentimeter Länge geborgen wurde, wobei üblicherweise um die zwei Zentimeter verloren gingen. Die ganze Analyse setzt natürlich voraus, daß es sich bei den ausgewerteten Warven tatsächlich durchgängig um Jahresschichten handelt, und daß keine unerkannten Lücken in der Schichtung existieren. Als Beleg für die Richtigkeit ihrer Annahmen wird von den Autoren auf die weitgehende Übereinstimmung ihrer Warvenchronologie mit $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Datierungen verwiesen (s.u.)

Datierung der periodischen Schichtung in Eis. Ähnlich den Warven weist auch polares Eis eine jahreszeitliche Schichtung auf. Bei modernen Analy-

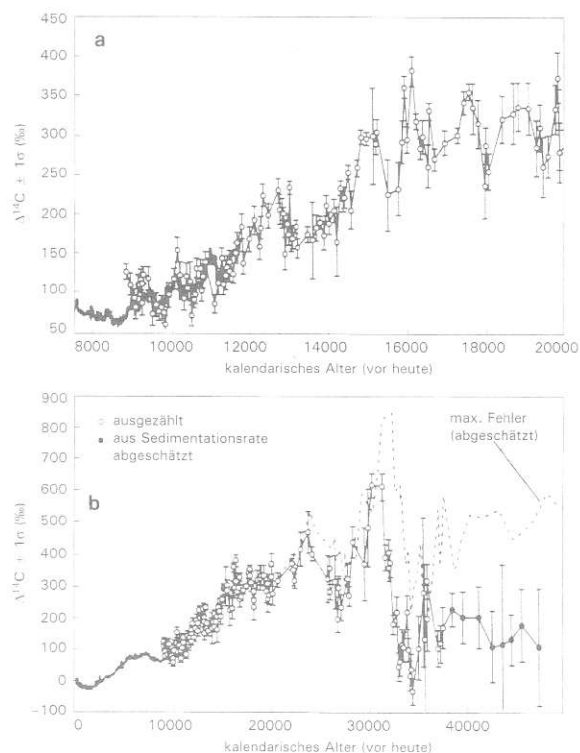


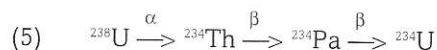
Abb. 42: Die 45.000 Jahre überstreichende Warvenchronologie nach KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a). a) Wiggle-Matching mit der einheitlichen dendrochronologischen Kalibrierkurve, b) Fehlerabschätzung im höheren Altersbereich.

sen an Bohrkernen wird diese Schichtung über jahreszeitliche Unterschiede im Säuregehalt - nachweisbar über Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit -, über eine unterschiedliche Konzentration an Staubpartikeln, die einen Einfluß auf die Streuung von Laserlicht haben, und über Schwankungen der Isotopenkonzentration an Sauerstoff ^{18}O ermittelt (vgl. z.B. ALLEY et al. 1993). Die Verschiebung des Isotopenverhältnisses $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ folgt der jährlichen Temperaturschwankung (FLOHN & FANTECHI 1984). Neben der exakten Ermittlung der Jahresschichtung, die mit zunehmender Tiefe schwieriger wird (OESCHGER 1987), ist auch die ^{14}C -Messung nicht ganz unproblematisch, was zum einen auf die extrem geringen Mengen an Kohlenstoff im Eis, zum anderen auf unterschiedliche Quellen des Kohlenstoffs (atmosphärisches Kohlendioxid und windtransportierter Löß) zurückzuführen ist (WILSON & DONAHUE 1992).

Ungeachtet dieser Probleme wurden seit den 80er Jahren an verschiedenen Bohrkernen im grönländischen Eis ^{14}C -Kalibrierungen vorgenommen. Ein Beispiel aus dieser Zeit, eine Auswertung des sog. „Dye 3“-Bohrkernes, ist bei HAMMER et al. (1986) publiziert. Noch ältere Daten von der sog. „Camp-Century“-Bohrung wurden später revidiert (vgl. a. die Diskussion bei BAILLIE 1995). Anfang der 90er Jahre wurden zwei neue Bohrungen („GRIP“ = Greenland Ice Core Project und „GISP 2“ = Greenland Ice Sheet Project 2) eingebracht, u.a. mit der Hoffnung, die Diskrepanzen zwischen den älteren Messungen auf diese Weise aufklären zu können. Beide Kalibrierkurven decken den ganzen Bereich der ^{14}C -Datierung (45.000-50.000 Jahre) ab. Sie weisen einschließlich der Wiggles einen

sehr ähnlichen Verlauf auf, die absoluten Altersangaben differieren aber fast durchweg um mehr als 10%, wobei GISP 2 die höheren kalibrierten Alter ergibt (vgl. JÖRIS & WENIGER 1998). VOELKER et al. (1998) haben unlängst versucht, die Probleme bei der ^{14}C -Messung im Eis dadurch zu umgehen, daß sie letztere an zwei Sedimentbohrkernen im Nordmeer vornahmen. Über die $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Aufzeichnung haben sie die Messungen dann mit der Jahresschichtung in GISP 2 korreliert und auf diese Weise eine Kalibrierkurve erhalten, die ebenfalls 40.000 Jahre zurückreicht.

Physikalisch begründete Meßverfahren. Ionium (Th/U)-Methode. Die wichtigste physikalische Datierungsmethode, deren Ergebnisse mit der ^{14}C -Datierung verglichen werden können, ist die $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Methode, häufig verkürzt als ^{230}Th -, Th/U- oder auch Ioniummethode bezeichnet. Das Isotop ^{238}U zerfällt unter Abgabe von α -Teilchen bzw. β -Teilchen über Thorium ^{234}Th und Protaktinium ^{234}Pa zu Uran ^{234}U :



Im Ozean (und mit lokalen Variationen auch in Binnengewässern) stellt sich ein universales Aktivitätsgleichgewicht zwischen den beiden Uranisotopen ^{238}U und ^{234}U ein. Das ^{234}U zerfällt seinerseits zu Thorium ^{230}Th (Ionium). Uran ist im Wasser viel besser löslich als Thorium und Protaktinium. Dieser geochemische Unterschied bildet die Basis für zwei alternative Datierungsverfahren (BENDER 1985):

a) Verschiedene Meeresbewohner wie Muscheln, Korallen und Foraminiferen weisen eine gegenüber dem Wasser tausendfach höhere Urankonzentration auf, während sie nahezu kein Thorium enthalten. Sobald es vom Meerwasser isoliert ist, zerfällt das überschüssige ^{234}U zu ^{230}Th , bis sich ein sekundärer Gleichgewichtszustand zwischen den Uranisotopen eingestellt hat. Nimmt man an

– daß die Aktivität des ^{230}Th in frisch abgelagertem Kalziumkarbonat tatsächlich null war,

– daß die Probe in Bezug auf die erwähnten Isotopenreaktionen seit ihrer Entstehung ein geschlossenes System war (d.h. kein späterer Stoffaustausch mit der Umgebung stattgefunden hat), und

– daß das ursprüngliche Verhältnis der Uranisotopen bekannt ist, z.B. dem heutigen Gleichgewichtsverhältnis entspricht, so kann der Zeitpunkt (t) der Ablagerung näherungsweise aus dem Verhältnis der Aktivitäten (A) von ^{230}Th und ^{234}U bestimmt werden:

$$(6) \quad \left(\frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{234}\text{U}} \right)_A = 1 - e^{-\lambda_{230} t}$$

Die Größe λ_{230} kennzeichnet dabei die Zerfallskonstante des ^{230}Th , die mit der Halbwertszeit des Isotops ($t_H = 75.200$ Jahre) korreliert ist. Eine ausführlichere Diskussion findet sich bei FAURE (1986). Neben den bereits erwähnten Organismengruppen können auf diese Weise auch Ooide, Oolithe, Höhlensinter, Phylliten und Hornblendensinter datiert werden. Bestimmbar sind Alter ab etwa 1000 Jahren.

b) Mit dem zweiten Verfahren ist die Datierung von Sediment möglich. Aufgrund der schnellen Sedimentation von Thorium aus dem Meerwasser weisen junge pelagische Gesteine einen Thoriumüberschuß auf, der in der Folgezeit infolge des Zerfalls des ^{230}Th immer mehr abgebaut wird. Daraus läßt sich über die Halbwertszeit des Ioniums auf den Zeitpunkt der Sedimentation zurückrechnen, sofern kein allochthones, thoriumhaltiges Material (z.B. Ton) im Sediment eingeschlossen ist.

Beide Verfahrensvarianten wurden in der Vergangenheit kombiniert mit ^{14}C -Messungen auf die Datierung unterschiedlichster Materialien angewendet (z.B. STUVIER 1978; VOGEL 1983; PENG et al. 1978; HILLAIRE-MARCEL et al. 1986; BURNETT & KIM 1986; BURNETT et al. 1988; AHARON 1988; Bard et al. 1990; DENIEL et al. 1992; FONTES et al. 1992; BURR et al. 1992; EDWARDS et al. 1993; VOGEL & KRONFELD 1997).

Aus dem Vergleich von Th/U- und kalibrierten ^{14}C -Altern sollten u.a. Schlußfolgerungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit beider Verfahren bei der Anwendung auf bestimmte Materialien und Zeitintervalle gezogen werden. Stimmt die Alter überein, so wurden beide Methoden als zuverlässig angesehen (BURNETT & KIM 1985; VOGEL 1983; Bard et al. 1990); wichen die Ergebnisse in dem durch dendrochronologisch kalibrierte ^{14}C -Alter belegten Altersbereich voneinander ab, so wurden die Fehler in der Regel auf der potentiell als fehleranfälliger angesehenen Th/U-Seite gesucht, wobei v.a. die Annahme, zwischen den entsprechenden Proben und ihrer Umgebung hätte in der Vergangenheit kein Stoffaustausch stattgefunden, hinterfragt wurde (BURNETT & KIM 1986; BURNETT et al. 1988; FONTES et al. 1992).

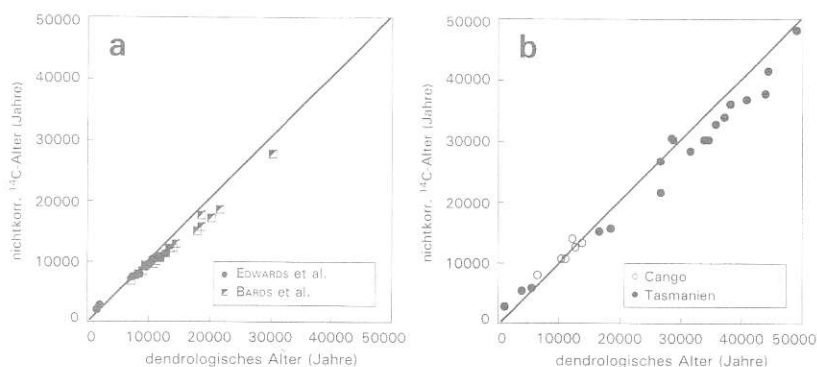
Bereits 1965 versuchten KAUFMAN und BROECKER (1965) darüber hinaus Th/U-Datierungen zur Kalibrierung von ^{14}C -Altern heranzuziehen. Verschiedene Autoren schlossen sich an (PENG et al. 1978; STUVIER 1978; VOGEL 1983). Obwohl die Daten untereinander und im Vergleich mit Ergebnissen, die an Warven gewonnen wurden, oft widersprüchlich waren (BARD et al. 1990), schien sich der generelle Trend, nach dem die ^{14}C -Datierung in den Jahrtausenden v.Chr. die wirklichen Alter unterschätzte, zu bestätigen. Ein Problem der frühen Messungen war der vergleichsweise große Meßfehler bei der Ermittlung der Isotopenkonzentrationen an ^{14}C , ^{234}U und ^{230}Th . Während der Meßfehler für ^{14}C aufgrund der Natur der zu datierenden Materialien auch heute noch sehr hoch ist (z.B.

zwischen ± 200 Jahre um 4000 v.Chr. und ± 1500 Jahre um 30.000 vor heute) konnte der Meßfehler für die Th/U-Alter mit der Einführung der Massenspektrometrie in der zweiten Hälfte der 80er Jahre erheblich reduziert werden (zwischen ± 50 Jahre und ± 250 Jahre für denselben Zeitraum; vgl. die Ergebnisse bei BARD et al. 1990).

In Abb. 43 sind neuere Ergebnisse (BARD et al. 1990; EDWARDS et al. 1993; VOGEL & KRONFELD 1997) vergleichend gegenübergestellt. Die Daten von BARD et al. und EDWARDS et al. wurden an Korallen vor Mururoa, Barbados und Papua Neuguinea gewonnen, während VOGEL und KRONFELD Stalagmiten in Karsthöhlen in Südafrika untersuchten. Weitere Daten an Korallen wurden unlängst von BARD et al. (1998) vorgestellt.

Da die Korallen im Ozean in der Übergangsschicht zwischen der Atmosphäre und der Tiefsee – also einem von der Atmosphäre unterschiedlichen Reservoir – gebildet wurden, mußten die ^{14}C -Daten hinsichtlich ihres Reservoiralters korrigiert werden. BARD et al. nahmen eine pauschale Korrektur um 400 Jahre (für niedrige Breitengrade) vor, EDWARDS et al. korrigierten um 407 ± 52 Jahre. Den Wert hatten sie zuvor bei der Analyse einer Oberflächenprobe ermittelt. In Teil I des vorliegenden Aufsatzes wurde bereits darauf hingewiesen, daß Kalkschalen denkbar ungeeignete Materialien für die ^{14}C -Datierung sind. Eine Ursache besteht darin, daß den Schalen über diagenetische Prozesse signifikante Anteile von Kohlenstoff mit einem abweichenden $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis zugefügt werden können. In den Barbados-Korallen könnte dieser Effekt noch einmal einen Fehler von 460 Jahren verursacht haben (EDWARDS et al. 1993). Zur Vermeidung derartiger Fehler ist eine chemische Vorbehandlung der Proben erforderlich, um artfremden Kohlenstoff auszuschcheiden. BARD et al. (1993) nahmen eine solche Behandlung nachträglich vor, wodurch sich die ^{14}C -Alter gegenüber Abb. 43a noch einmal etwas verringerten. Der Unterschied bewegte sich allerdings lediglich im Bereich zweier Standardabweichungen des Meßfehlers. EDWARDS et al. führten von vornherein eine Vorbehandlung der Proben durch.

Oberhalb 5000 v. Chr. spiegeln alle Kurven die allgemeine Tendenz zu geringeren nichtkorrigierten ^{14}C -Altern wider. Bis ca. 5000 v.Chr. scheren die Daten von VOGEL und KRONFELD aber aus diesem Trend aus. Hier sind die Th/U-Alter geringer als die ^{14}C -Alter. Die Autoren sehen in diesen Messungen Artefakte und korrigieren deshalb die ^{14}C -Alter pauschal um 1450 Jahre nach unten, wodurch die Th/U-Alter mit den dendrochronologisch datierten ^{14}C -Altern nachträglich zur Übereinstimmung gebracht werden. Begründet wird die Korrektur der ^{14}C -Alter mit einem angenommenen Reservoir effekt und mit einer Diskontinuität im datierten Stalagmiten in der südafrikanischen



Cango-Höhle (VOGEL et al. 1997). Während die oberen 95 cm (die die ersten sechs Meßpunkte enthalten) völlig farblos sind, weist der weitere Verlauf eine leichte bräunlich-gelbe Färbung auf. VOGEL (1983) vermutet hier eine längerfristige Unterbrechung in der Erweiterung des Höhlensystems. Mehrere Autoren haben von der Zahl 1450 abweichende Korrekturen (900 bzw. 3000 Jahre) vorgeschlagen (vgl. GEYH & SCHLÜCHTER 1998). In Abb. 44 ist ein Vergleich der Th/U-Alter nach BARD et al. (1990) und EDWARDS et al. (1993) mit den Warvenaltern nach KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998a, b) wiedergegeben.

Paläomagnetische Datierung. Eisenhaltige Schmelzen werden bei der Erstarrung permanent magnetisiert. Sowohl die Intensität als auch die Richtung des magnetischen Momentes entsprechen fortan den Verhältnissen zum Zeitpunkt der Erstarrung. Für die Zeit bis etwa 50.000 Jahre, die im Zusammenhang mit ^{14}C interessant ist, stützt sich die paläomagnetische Datierung auf Variationen des Magnetfeldes, die durch die westwärts gerichtete Wanderung der Nichtdipol-Komponenten bedingt sind (vgl. BENDER 1985). Die Idee der paläomagnetischen Kalibrierung von ^{14}C -Altern beruht auf dem Abschirmeffekt des Magnetfeldes gegen kosmische Strahlung (vgl. Teil I). Ist für einen gegebenen Zeitpunkt die Intensität des Dipolmomentes bekannt, so kann daraus im Computer die entsprechende ^{14}C -Bildungsrate und daraus das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in den verschiedenen ^{14}C -Reservoirs simuliert werden. Das setzt natürlich voraus, daß andere Einflußfaktoren auf das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis, z.B. Klimaänderungen oder Veränderungen der Ozeanzirkulation (vgl. Teil I, Tab. 1) im Vergleich zum Magnetfeld nur eine untergeordnete Rolle spielen; eine Annahme, der sich gegenwärtig nicht alle Forscher anschließen (vgl. die Diskussion bei GEYH & SCHLÜCHTER 1998).

Das Verhältnis zwischen dem Erdmagnetfeld und dem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis wurde bereits frühzeitig quantitativ modelliert (vgl. KIGOSHI & HASEGAWA 1966; STUVIER 1978), eine erste durchgehende Kalibrierkurve auf paläomagnetischer Grundlage wurde aber erst 1991 von MAZAUD et al. vorgelegt. Unlängst präsentierten LAJ et al. (1996) eine ver-

Abb. 43: Vorgeschlagene ^{14}C -Kalibrierkurve auf der Grundlage von $^{230}\text{Th}/^{232}\text{U}$ -Daten. a) an Korallen gemessene Daten nach BARD et al. (1990) sowie EDWARDS et al. (1993), b) an Stalagmiten gemessene Daten nach VOGEL & KRONFELD (1997) (ohne Berücksichtigung der Meßfehler)

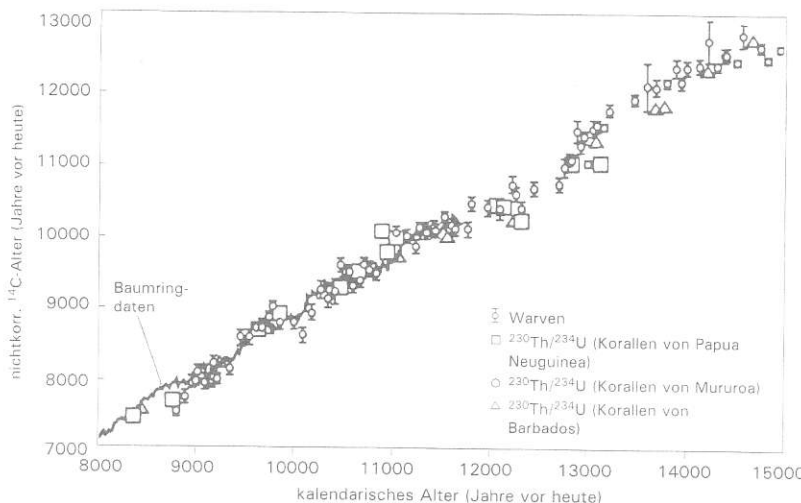


Abb. 44: Vergleich der vorgeschlagenen Warvenchronologie nach KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998) mit $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Daten nach BARD et al. (1990) sowie EDWARDS et al. (1993) und Hochpräzisions-Baumringdaten.

besserte Version dieser Kurve. Sie ist im Vergleich zu dendrochronologischen und Th/U-Daten in Abb. 45 dargestellt. Weitere Arbeiten zu paläomagnetischen ^{14}C -Kalibrierungen sind bei KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998) aufgeführt. Ein Problem der Paläomagnetik besteht in der Auswahl der Bohrkerne. So wiesen die vier Bohrkerne aus dem Mittelmeer, die MAZAUD et al. (1991) ihrer Analyse zugrundegelegt hatten, individuelle Unterschiede im paläomagnetischen Befund auf. LAJ et al. (1996) ersetzten sie später durch einen Bohrkern nahe der Azoren, den sie in Bezug auf die globalen Verhältnisse für repräsentativer hielten. Auch die unabhängige geologische Datierung der Magnetfeldveränderungen ist als potentielle Fehlerquelle nicht außer acht zu lassen.

Abb. 45: Vergleich der paläomagnetisch vorhergesagten ^{14}C -Isotopenverschiebung (nach LAJ et al. 1996) mit dendrochronologischen und Th/U-Daten.

Thermolumineszenz (TL)-Datierung. Grundlage der Thermolumineszenzdatierung (TL) ist eine Leuchterscheinung (FAURE 1986). Viele elektrisch nichtleitende Festkörper werden bei Einwirkung ionisierender Strahlung geringfügig geschädigt. Die wichtigsten Strahlenquellen für den TL-Effekt sind

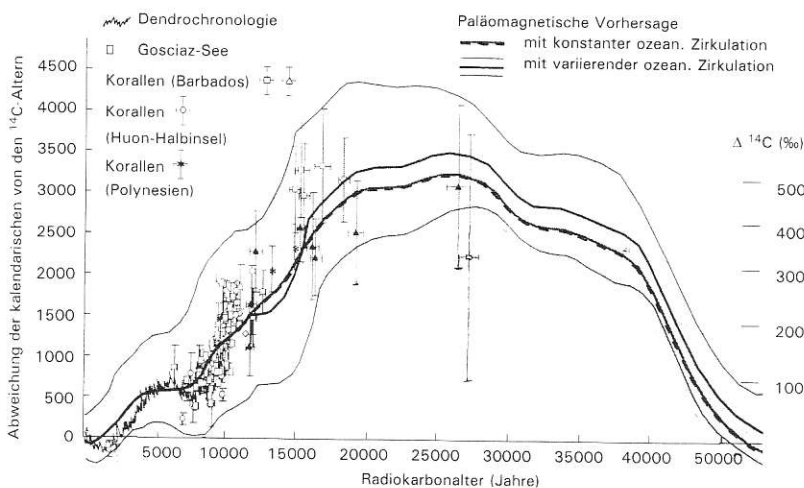
radioaktives Uran und Thorium, deren Tochterisotope und Kalium, aber auch energiereiche kosmische Strahlung, ja sogar Sonnenlicht können eine Rolle spielen. Als Folge der Strahleneinwirkung werden Elektronen von ihren Atomen abgelöst und an anderen Stellen im Kristallgitter metastabil fixiert. Bei Erwärmung des Festkörpers kehren sie in ihren stabilen Grundzustand zurück, wobei sie die überschüssige Energie in Form von Licht an die Umgebung abgeben. Diese Energie ist ein Maß für die Strahlungsdosis, der die Probe ausgesetzt war, seitdem sie das letzte Mal über 450°C erwärmt wurde. Aus der Konzentration an Uran, Thorium und Kalium und ihrer Zerfallsprodukte in der Probe kann auf die jährliche Strahlungsdosis geschlossen werden. Aus beiden Informationen, der bei der Erwärmung im Labor freigesetzten Energie und der Strahlungsdosis kann schließlich die Zeitdauer abgeschätzt werden, über die die Probe der Strahlung ausgesetzt war:

$$(7) \quad t = \frac{\text{akkumulierte Strahlendosis}}{\text{jährliche Strahlendosis}}$$

Eingesetzt wird TL in der Archäologie zur Datierung von Scherben und gebrannten Tonen, in der Geologie u.a. zur Datierung verkieselter Fossilien und eiszeitlicher Sedimente (BENDER 1985). Zwar werden Thermolumineszenzdaten gelegentlich zum Vergleich mit ^{14}C herangezogen, für die Kalibrierung spielen sie aber aufgrund der bislang vergleichsweise geringen Genauigkeit nur eine untergeordnete Rolle. Die berichteten Ergebnisse der Vergleichsmessungen zwischen TL und ^{14}C reichen von sehr guter Übereinstimmung bis zu völliger Unvereinbarkeit (STUVIER 1978; BLUSZCZ & PAZDUR 1985; GARDNER et al. 1987; BELL 1991; PAZDUR et al. 1995; ROBERTS et al. 1998).

Vergleichende Diskussion der erweiterten ^{14}C -Kalibrierkurven

Die Entwicklung der Kalibrierkurven, die über das Ende des Pleistozäns hinausgreifen, ist z.Z. noch im Fluß, was in einer Reihe von widersprüchlichen Ergebnissen zum Ausdruck kommt. So weichen die an Korallen gewonnenen Th/U-Ergebnisse und verschiedene Warven-Kurven (Stoppensee, Holzmaar, schwedische Warven) vor 12.000 Jahren teilweise signifikant voneinander ab (HUGHEN et al. 1998b). Während für die Eisschicht-Kalibrierkurve aus der grönländischen GISP-2-Bohrung eine gute Übereinstimmung mit den Th/U-Daten berichtet wurde, existiert für die Parallelbohrung aus dem GRIP-Programm ein signifikanter Versatz (JÖRIS & WENIGER 1998). Untersuchungen an warvenähnlichem Sediment im Cariaco-Becken vor der Küste



Venezuelas ergaben wiederum eine gute Übereinstimmung mit GISP 2 (HUGHEN et al. 1998a). KITAGAWA & VAN DER PLICHT (1998) fanden eine befriedigende Übereinstimmung der Warvenkurve für den japanischen Suigetsu-See mit anderen Daten bis etwa 31.000 Jahre. Oberhalb dieser Zeit stimmen die Warvendaten aber mit den Th/U-Ergebnissen VOGELS und KRONFELDS (1997) sowie mit paläomagnetischen Befunden nicht überein. Die Ursachen für die Diskrepanzen sind in vielen Fällen noch unklar. Unlängst wurde eine 24.000 Jahre zurückreichende einheitliche Kalibrierkurve vorgestellt, die neben dendrochronologischen Daten auch Th-U-Daten an Korallen und Meßwerte von warvenähnlichen Schichtungen im Meer einbezieht (STUVIER et al. 1998). Terrestrische Warven- und Eisschichtdaten wurden zunächst nicht berücksichtigt. Die Kurve stellt eine Erweiterung und Aufdatierung der Standardkalibrierkurven von 1986 und 1993 dar. Eine Besonderheit besteht darin, daß sie sich in einzelnen Abschnitten anstelle der üblichen 10-Jahresblöcke auf eine jährliche

bau mit Hilfe von Wiggle-Matching) nur eingeschränkt aufrechterhalten. Dasselbe gilt für das Verhältnis der Eichenchronologien untereinander.

Erweiterungen der ^{14}C -Kalibrierkurven über das Ende des Pleistozäns hinaus wurden auf der Grundlage unterschiedlicher Vergleichsverfahren (Warvendatierung, Datierung warvenähnlicher Schichtungen im Meer, Eisschichtdatierung, Th/U-Datierung und paläomagnetische Datierung) vorgenommen. Obwohl zwischen den einzelnen Ergebnissen gegenwärtig noch nicht vernachlässigbare Differenzen existieren, deutet sich doch an, daß der dendrochronologisch ermittelte Trend zu geringeren nichtkalibrierten ^{14}C -Daten auch vor 24.000 Jahren eine Fortsetzung findet. In den Bereichen, wo die dendrochronologischen Daten mit den Daten der alternativen Verfahren überlappen, sind die Kurven in der Regel über Wiggle-Matching oder (in einzelnen Fällen) nachträgliche Anpassung aufeinander abgestimmt, so daß eine unabhängige Bestätigung nicht gegeben ist.

Literatur

Das Argument der Unabhängigkeit der Eichen- von den älteren Borstenkiefernchronologien (Reproduktion) läßt sich nur eingeschränkt aufrechterhalten. Dasselbe gilt für das Verhältnis der Eichenchronologien untereinander.

bzw. 3-jährliche Auflösung stützt. Eine Bestätigung oder Widerlegung der dendrochronologischen Kalibrierkurve ist aufgrund der vorliegenden Daten allerdings in der Regel nicht möglich, da die erweiterten Kurven über Wiggle-Matching an die Baumringdaten angefügt oder (in einzelnen Fällen) nachträglich an diese angepaßt wurden.

Zusammenfassende Bemerkungen

Nachdem in Teil IIa des Aufsatzes die nordamerikanischen Borstenkiefernchronologien vorgestellt wurden, konzentrierte sich der vorliegende Teil auf die europäischen Eichenchronologien. Die besondere Bedeutung der Eichenchronologien liegt darin, daß sie seit den 80er Jahren die Entwicklung von Hochpräzisions-Kalibrierkurven ermöglicht haben, und daß ihre Übereinstimmung mit den amerikanischen Kurven die Existenz einer global einheitlichen Kalibrierkurve nahegelegt hat. *Das Argument der Unabhängigkeit der Eichen- von den älteren Borstenkiefernchronologien (Reproduktion) läßt sich jedoch aufgrund verschiedener Wechselbeziehungen (^{14}C -Vordatierung der einzelnen Proben, Auf-*

- AHARON P (1988) Oxygen, carbon and U-series isotopes of aragonites from Vestfold Hills, Antarctica: Clues to geochemical processes in subglacial environments. *Geochimica and Cosmochimica* 52, 2321-2331.
- ALLEY RB, MEESE DA, SHUMAN CA, GOW AJ, TAYLOR KC, GROOTES PM, WHITE JWC, RAM M, WADDINGTON ED, MAYEWSKI PA UND ZIELINSKI GA (1993) Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the younger Dryas event. *Nature* 362, 527-529.
- BAILLIE MGL (1982) *Tree-Ring Dating and Archaeology*. Croom Helm, London und Canberra.
- BAILLIE MGL (1990/1991) Dendrochronology and Thera: The scientific case. *J. Anc. Chron. Forum* 4, 15-28.
- BAILLIE MGL (1995) *A Slice Through Time. Dendrochronology and Precision Dating*. B.T. Batsford Ltd., London.
- BAILLIE MGL, PILCHER JR & PEARSON GW (1983) Dendrology at Belfast as a background to high-precision calibration. *Radiocarbon* 25, 171-178.
- BARBETTI M, BIRD T, DOLEZAL G, TAYLOR G, FRANCEY R, COOK E & PETERSON M (1992) Radiocarbon variations from Tasmanian conifers: First results from late Pleistocene and Holocene logs. *Radiocarbon* 34, 806-817.
- BARBETTI M, BIRD T, DOLEZAL G, TAYLOR G, FRANCEY R, COOK E. & PETERSON M (1995) Radiocarbon variations from Tasmanian conifers: Results from three Holocene logs. *Radiocarbon* 37, 361-370.
- BARD E, HAMELIN B, FAIRBANKS RG & ZINDLER A (1990): Calibration of the ^{14}C time scale over the past 30,000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals. *Nature* 345, 405-409.
- BARD E, ARNOLD M, HAMELIN B, TISNERAT-LABORDE N & CABIOCH G (1998) Radiocarbon calibration by means of mass spectrometric $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{14}C ages of corals; an updated database including samples from Barbados, Mururoa and Tahiti. *Radiocarbon* 40, 1085-1092.
- BARD E, ARNOLD M, FAIRBANKS RG & HAMELIN B (1993) ^{230}Th - ^{234}U and ^{14}C ages obtained by mass spectrometry on corals. *Radiocarbon* 35, 191-199.
- BECKER B (1983a) The long-term radiocarbon trend of the absolute German oak tree-ring chronology, 2800 to 800 BC. *Radiocarbon* 25, 197-203.
- BECKER B (1983b) In: ECKSTEIN D, WROBEL S & ANIOL RW (Hg.)

- Dendrochronology and Archaeology in Europe. Hamburg (Wiedebusch), 61-78.
- BECKER B (1992) The history of dendrochronology and radiocarbon calibration. In TAYLOR RE, LONG A & KRA RS (Hg.) Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective. Springer New York, 34-49.
- BECKER B (1993) An 11,000-year German oak and pine dendrochronology for radiocarbon calibration. Radiocarbon 35, 201-213.
- BECKER B & SCHMIDT B (1982) Verlängerung der mitteleuropäischen Eichenjahrchronologie in das zweite Jahrtausend (bis 1462 v.Chr.). Archäologisches Korrespondenzblatt 12, 101-106.
- BELL WT (1991) Thermoluminescence dates for the Lake Mungo aboriginal fireplaces and the implication for radiocarbon time scale. Archaeometry 33, 43-50.
- BENDER F (Hg.) (1985) Angewandte Geowissenschaften. Bd. II: Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. Ferdinand Enke Verl. Stuttgart.
- BLUSZCZ A & PAZDUR MF (1985) Comparison of TL and C-14 dates of young Eolian sediments - a check of the zeroing assumption. Nucl. Tracks 10, 703-710.
- BROWN DM, MUNRO MAR, BAILLIE MGL & PILCHER JR (1986) Dendrochronology - the absolute Irish standard. Radiocarbon 28, 279-283.
- BURNETT WC, BAKER KB, CHIN PA, McCABE W & DITCHBURN R (1988) Uranium-series and AMS ^{14}C studies of modern phosphatic pellets from Peru shelf muds. Marine Geology 80, 215-230.
- BURNETT WC & KIM KH (1985) Comparison of radiocarbon and uranium-series dating methods as applied to marine apatite. Quaternary Research 25, 369-379.
- BURR GS, EDWARDS RL, DONAHUE DJ, DRUFFEL ERM & TAYLOR FW (1992) Mass spectrometric ^{14}C and U-Th measurements in corals. Radiocarbon 34, 611-618.
- DAMON PE (1987) The history of the calibration of radiocarbon dates by dendrochronology. In: AURENCHÉ O, EVIN J & HOURS F (Hg.) Chronologies in the Near East, BAR International Series.
- DENIEL C, KIEFFER G & LECOINTRE J (1992) New ^{230}Th - ^{238}U and ^{14}C age determinations from Piton des Neiges volcano, Reunion - A revised chronology for the different series. J. Volcanol. Geotherm. Res. 51, 253-267.
- EDWARDS RJ, BECK JW, BURR GS, DONAHUE DJ, CHAPPELL JMA, BLOOM AL, DRUFFEL ERM & TAYLOR FW (1993) A large drop in atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ and reduced melting in the younger Dryas, documented with ^{230}Th ages of corals. Science 260, 962-968.
- FAURE G (1986) Principles of Isotope Geology. John Wiley & Sons, New York, 2. Aufl.
- FERGUSON CW, HUBER B & SUESS HE (1966) Determination of the age of Swiss lake dwellings. Z. Naturforsch. 21a, 1173-1177.
- FLOHN H & FANTECHI R (1984) The Climate of Europe. Past, Present and Future. Bericht d. EU-Kommision, Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Boston und Lancaster.
- FONTES JC, ANDREWS JN, CAUSSE C & GIBERT E (1992) A comparison of radiocarbon and U/Th ages on continental carbonates. Radiocarbon 34, 602-610.
- GEYH M & SCHLÜCHTER C (1998) Calibration of the ^{14}C time scale beyond 22,000 BP. Radiocarbon 40, 475-82.
- GARDNER GJ, MORTLOCK AJ, PRICE DM, READHEAD ML & WASSON RJ (1987) Thermoluminescence and radiocarbon dating of Australian desert dunes. Austr. J. Earth Sci. 34, 343-357.
- GOSLAR T, ARNOLD M, BARD E, KUC T, PAZDUR MF, RALSKA-JASIEWICZOWA M, ROZANSKI K, TISNERAT N, WALANUS A, WICK B & WIEKOWSKI K (1995) High concentration of atmospheric ^{14}C during the younger Dryas cold episode. Nature 377, 414-417.
- HAJDAS I, IVY SD, BEER J, BONANI G, IMBODEN D, LOTTER AF, STURM M & SUTER M (1993) AMS radiocarbon dating and varve chronology of Lake Stoppensee: 6000 to 1200 ^{14}C years BP. Climate Dynamics 9, 241-244.
- HAJDAS I, ZOLITSCHKA B, IVY SD, BEER J, BONANI G, LEROY SAG, NEGENDANK JW, RAMRATH M & SUTER M (1995) AMS radiocarbon dating of annually laminated sediments from Lake Holzmaar, Germany. Quat. Sci. Rev. 14, 137-143.
- HAMMER CU, CLAUSEN HB & TAUBER H (1986) Ice-core dating of the Pleistocene/Holocene boundary applied to a calibration of the ^{14}C time scale. Radiocarbon 28, 284-291.
- HILLAIRE-MARCEL C, CARRO O & CASANOVA J (1986) ^{14}C and Th/U dating of Pleistocene stromatolites from east African paleolakes. Quatern. Res. 25, 312-329.
- HOHL R (Hg.) (1981) Die Entwicklungsgeschichte der Erde. Brockhaus-Nachschlagewerk Geologie, Leipzig, 6. Aufl.
- HOLLSTEIN E (1980) Mitteleuropäische Eichenchronologie. Mainz.
- HUBER B & GIRETZ V (1970) Central European dendrochronology for the middle ages. In: BERGER R (Hg) Scientific Methods in Medieval Archaeology, 201-212.
- HUGHEN KA, OVERPECK JT, LEHMAN SJ, KASHGARIAN M, SOUTHERN J, PETERSON LC, ALLEY R & SIGMAN DM (1998a) Deglacial changes in ocean circulation from an extended radiocarbon calibration. Nature 391, 65-68.
- HUGHEN KA, OVERPECK JT, LEHMAN SJ, KASHGARIAN M, SOUTHERN J & PETERSON LC (1998b) A new ^{14}C calibration data set for the last deglaciation based on marine varves. Radiocarbon 40, 483-494.
- JORIS O & WENINGER B (1998) Extension of the ^{14}C calibration curve to ca. 40,000 cal BC by synchronising Greenland $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ice core records and North Atlantic foraminifera profiles: A comparison with U/Th coral data. Radiocarbon 40, 495-504.
- KAUFMANN A & BROECKER WS (1965) Comparison of ^{230}Th and ^{14}C ages for carbonate materials from Lakes Lahontan and Bonneville. Journal of Geophys. Res. 70, 4039-4054.
- KIGOSHI K & HASEGAWA H (1966) Secular variation of atmospheric radiocarbon concentration and its dependence on geomagnetism. J. Geophys. Res. 71, 1065-1071.
- KITAGAWA H & VAN DER PLICHT (1998a) Atmospheric radiocarbon calibration to 45,000 yr B.P.: Late glacial fluctuations and cosmogenic isotope production. Science 279, 1187-1190.
- KITAGAWA H & VAN DER PLICHT (1998b) A 40,000-year varve chronology from lake Suigetsu, Japan: Extension of the ^{14}C calibration curve. Radiocarbon 40, 505-515.
- KROMER B, AMBERS J, BAILLIE MGL, DAMON P, HESSHAIMER V, HOFMAN J, JORIS O, LEVIN I, MANNING SW, McCORMAC FG, VAN DER PLICHT J, SPURK M, STUVIER M & WENINGER B (1996) Report: Summary of the workshop „Aspects of high-precision radiocarbon calibration“. Radiocarbon 38, 607-610.
- KUNIHOLM PI, KROMER B, MANNING SW, NEWTON M, LATINI CE & BRUCE MJ (1996) Anatolian tree rings and the absolute chronology of the eastern Mediterranean. Nature 381, 780-783.
- LAJ C, MAZAUD A & DUPLESSY JC (1996) Geomagnetic intensity and ^{14}C abundance in the atmosphere and ocean during the past 50 years. Geophys. Res. Lett. 23, 2045-2048.
- LEUSCHNER HH & DELORME A (1984) Verlängerung der Göttinger Eichenjahrchronologien für Nord- und Süddeutschland bis zum Jahr 4008 v.Chr. Forstarchiv 55, 1-4.
- LEUSCHNER HH & DELORME A (1988) Three-ring work in Göttingen. Absolute oak chronologies back to 6255 BC. PACT 22, 123-132.
- LINICK WF, SUESS HE & BECKER B (1985) La Jolla measurements of radiocarbon in south German oak tree-ring chronologies. Radiocarbon 27, 20-32.
- LONG RD (1976) Ancient Egyptian chronology, radiocarbon dating and calibration. Zeitschrift für Ägyptische Sprache 103/4, 30-48.
- MAZAUD A, LAJ C, BARD E, ARNOLD M & TRIC E (1991) Geo-