

¹⁴C und die Chronologie Ägyptens

Bei der Entwicklung der Radiokohlenstoffmethode vor mehr als 60 Jahren dienten Funde aus dem Reich der Pharaonen als Referenz. Heute versuchen umgekehrt Naturwissenschaftler ihren Teil dazu beizutragen, offene Fragen der ägyptischen Chronologie zu beantworten.

Von Eva Maria Wild und Walter Kutschera

»**S**eid Euch bewusst, dass von diesen Pyramiden 40 Jahrhunderte auf euch herabblicken«, ermahnte Napoleon Bonaparte seine Soldaten im Juli 1798 in Giseh. Nach heutigem Wissen irrte sich der Feldherr bezüglich der Cheopspyramide um etwa 400 Jahre; sie entstand im 26. Jahrhundert v. Chr. Seine Fehleinschätzung verwundert nicht, denn die wissenschaftliche Erforschung Altägyptens begann mit ebendiesem Feldzug: Im Tross der Invasionsarmee reisten Naturforscher und Ingenieure, die alles, was sie im Land der Pharaonen sahen, vermaßen und dokumentierten (SdW 12/1994, S. 72).

Nach gut 200 Jahren Forschung gilt heute die Chronologie des antiken Nilstaats, festgemacht an der Abfolge seiner Herrscher und Herrscherinnen, eigentlich als gut bekannt. Im Detail aber verbleiben Unsicherheiten, die immer wieder Anlass zur Diskussion geben (siehe den Beitrag S. 56). Als Folge davon verwenden Ägyptologen nicht eine einzige, sondern mehrere so genannte hohe und niedrige Chronologien, die ein höheres beziehungsweise niedrigeres Alter für Thronbesteigungen angeben. Sie differieren für das Neue Reich nur um etwa zehn Jahre, bei der Datierung des Alten Reichs hingegen beträgt der Unterschied gut 100 Jahre.

AUF EINEN BLICK

EINE UHR AUS KOHLENSTOFF

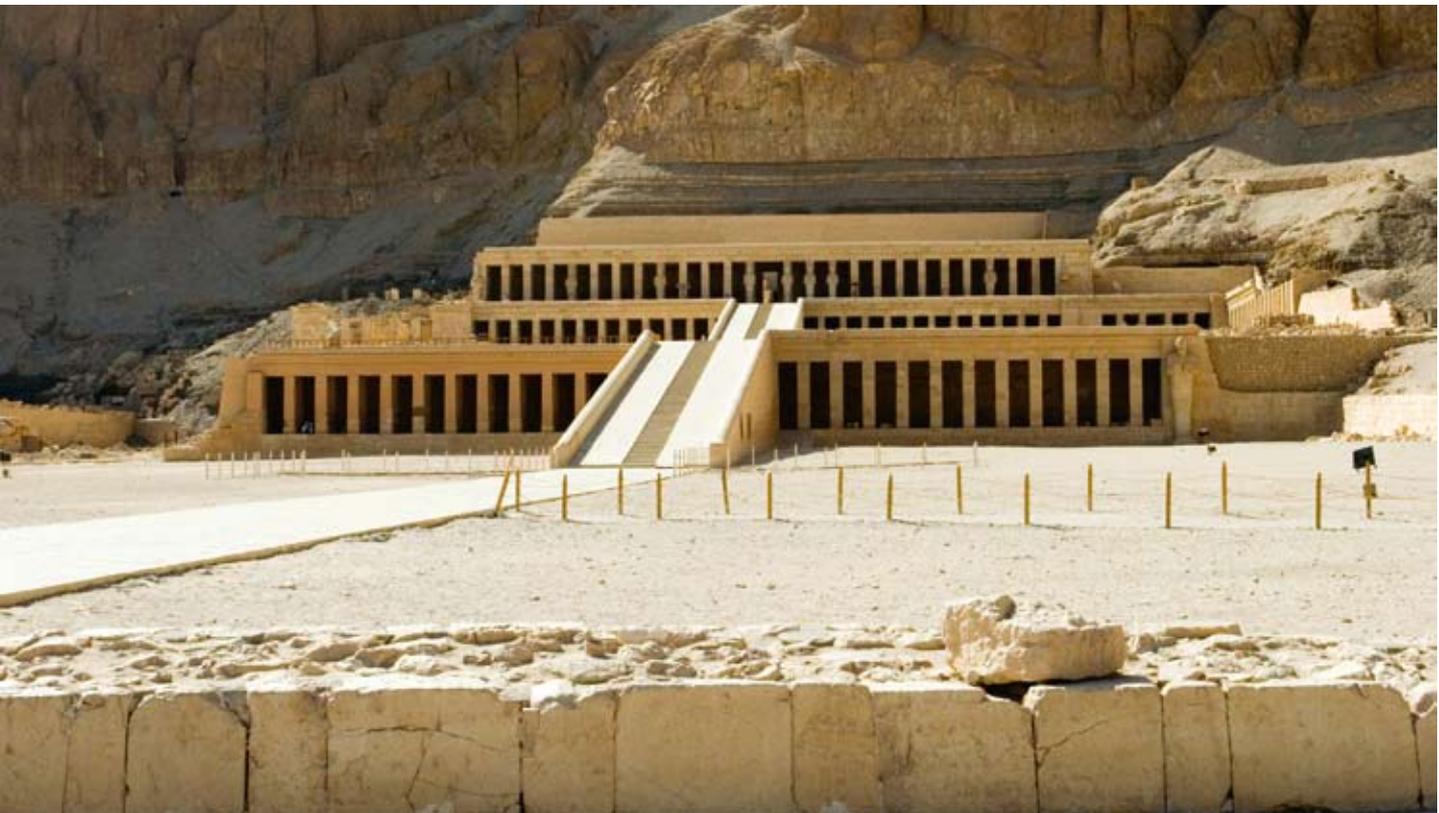
1 In der Lufthülle entsteht unablässig **radioaktives ¹⁴C**, das auch von Lebewesen aufgenommen wird. In der Atmosphäre wie in der Biomasse stellt sich annähernd dieselbe Konzentration davon ein. Sobald ein Lebewesen stirbt, zerfällt das aufgenommene ¹⁴C. Anhand der verbleibenden Konzentration sollte sich feststellen lassen, wie alt organisches Material aus einer archäologischen Fundstätte ist.

2 Tatsächlich können diverse Effekte die **¹⁴C-Datierung** verfälschen. Inzwischen kennen die Experten aber Methoden, sie zu korrigieren, Messungen und Berechnungen präziser zu machen. Ziel ist dabei auch, Kulturen, die keine oder wenige Schriftquellen hinterlassen haben, in ihrer zeitlichen Entwicklung zu erfassen.

3 Den bisherigen Höhepunkt stellt eine umfangreiche **Neudatierung altägyptischer Proben** dar. Sie stützt vor allem die von dem Ägyptologen Ian Shaw erstellte Chronologie, zeigt aber auch zu anderen Chronologien Ägyptens nur geringe Abweichungen.

Das Problem der korrekten Datierung teilt die Ägyptologie freilich mit anderen Altertumswissenschaften. Insbesondere die zeitliche Entwicklung prähistorischer Kulturen ließ sich mangels schriftlicher Quellen lange nur anhand ihrer Artefakte rekonstruieren. Vor allem Gebrauchskeramiken dienten dabei als »Leitfossilien«, da sie sich auf Grund technischer oder kultureller Entwicklungen in den verschiedenen Kulturphasen immer wieder in charakteristischer Weise verändert haben.

Eine absolute, nicht auf solchen Vergleichen oder Schriften beruhende Datierung ermöglichte erstmals die Radiokarbonmethode des US-amerikanischen Chemikers und Physikers Willard Frank Libby (1908–1980); 1960 wurde er dafür mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt. Die aus dem Weltraum einfallende kosmische Strahlung, so Libbys Überlegung, zertrümmert in den höheren Schichten der Atmosphäre Atomkerne und setzt dabei Neutronen frei. Diese verschmelzen mit den Atomkernen von ¹⁴N, dem häufigsten



ISTOCKPHOTO / JUNE DANIEK

Stickstoffisotop; aus diesen entstehen – unter Freisetzung von Protonen – Atome des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C . Da sie sich chemisch nicht anders verhalten als die der häufigeren stabilen Isotope ^{12}C und ^{13}C , reagieren sie mit dem Sauerstoff der Luft zu $^{14}\text{CO}_2$. Dieses Kohlendioxid nehmen Pflanzen ebenso wie das normale CO_2 auf und bauen es in ihre Biomasse ein. Über die Nahrungskette gelangt es dann in Tier und Mensch; über die Atmung und die Zersetzung von organischem Material wird es wieder an die Atmosphäre abgegeben. Des Weiteren findet ein Austausch von Radiokohlenstoff zwischen der Luft und dem Oberflächenwasser der Ozeane statt. Libby war davon überzeugt, dass Transportprozesse sowie das Gleichgewicht zwischen dem radioaktiven Zerfall des Isotops und seiner Neuproduktion dafür sorgen, dass dieselbe konstante Konzentration von ^{14}C in der Luft wie in der Biomasse vorliegt.

Die ^{14}C -Uhr beginnt zu ticken

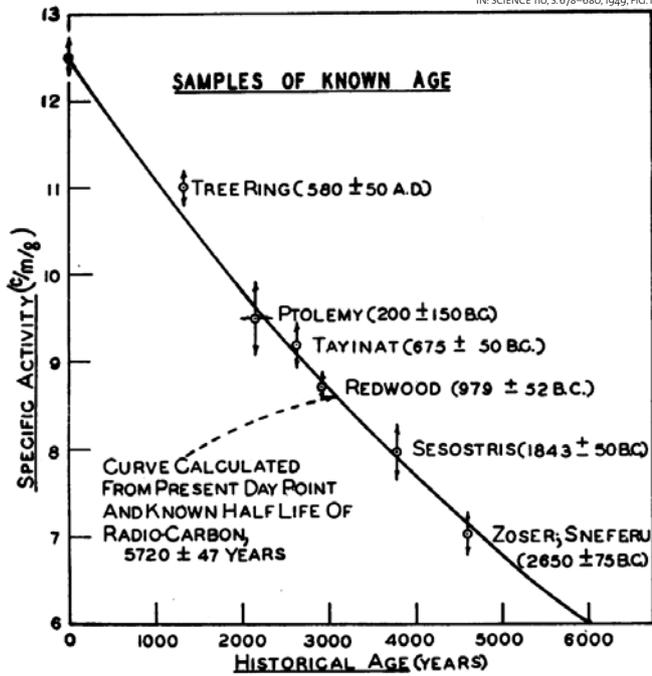
Entscheidend ist nun dies: Mit dem Tod endet aller Austausch, und die radioaktive Uhr startet. ^{14}C zerfällt zu ^{14}N , doch weil kein Nachschub kommt, nimmt sein Anteil am Gesamtkohlenstoff des Körpers exponentiell ab. Libby ging davon aus, dass der ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre stets dem heutigen entsprochen habe. Das Alter einer Probe organischen Materials ließe sich daher durch einen Vergleich der enthaltenen ^{14}C -Konzentration mit der anfänglichen berechnen. Schon bei der Entwicklung der Radiokohlenstoffmethode spielte die Ägyptologie eine wichtige Rolle: Libby und sein Team nutzten Fundmaterial aus altägyptischen Stätten,

Traubenkerne aus dem Tempel der Königin Hatschepsut (Bild) gehörten zu den Proben, die jetzt mit ^{14}C -Technik datiert wurden.

das bereits mit historischen Verfahren datiert worden war. Zum einen wollten die Forscher damit die Konstanz der kosmischen Strahlungsintensität nachweisen. Zum anderen ging es ihnen auch um den Beleg, dass es überhaupt organisches Material gibt, dessen ^{14}C -Konzentration ausschließlich durch den radioaktiven Zerfall verändert wurde, nicht aber durch die Lagerungsbedingungen.

Für diese Untersuchung verwendeten sie zum Beispiel eine Holzprobe vom Totenschiff des Pharaos Sesostris III. Diese Grabausstattung hatten Ägyptologen damals auf 1843 plus/minus 50 v. Chr. datiert, zum Zeitpunkt der Untersuchung im Jahr 1949 wäre sie also 3792 plus/minus 50 Jahre alt gewesen. Die Radiokohlenstoffdatierung ergab ein Alter von 3700 plus/minus 400 Jahren. 1949 galt dies noch als Punktlandung. Heute wissen wir, dass die große Fehlerbreite Störeffekte verschleiert hatte.

Insbesondere stimmt Libbys Annahme über den ^{14}C -Anteil im Kohlenstoff der Atmosphäre in der Vergangenheit nur bedingt. Später von verschiedenen Forschern durchgeführte Altersbestimmungen an Proben aus dem Alten Reich wichen deshalb um einige hundert Jahre von den Datierungen der Historiker ab. Denn eine lang anhaltende Schwächung des Erdmagnetfelds hatte in jener Epoche mehr kosmische Strahlung in die Lufthülle der Erde eintreten lassen, was die Anfangskonzentration des Radiokohlenstoffs erhöh-



Anhand einiger ägyptischer Proben bereits bekannten Alters bewiesen Willard Frank Libby und sein Assistent James Arnold 1949 die Machbarkeit der ¹⁴C-Datierung. Die dabei angenommene Halbwertszeit verkürzten sie später auf 5568 Jahre.

5568 Jahren als Basis. Anschließend wird der ermittelte Wert über eine Kalibrierkurve in ein Kalenderalter umgerechnet. In dieser Kurve nun stecken die Informationen aus der Dendrochronologie: Das ¹⁴C-Alter von Baumringen ist hier gegen das dendrochronologisch bestimmte aufgetragen. Dieser Schritt korrigiert Schwankungen des ¹⁴C-Anfangsgehalts. Ein Vorteil: Auf diese Weise spielt der exakte Wert der Halbwertszeit keine Rolle mehr – nach heutigem Kenntnisstand beträgt er 5700 plus/minus 30 Jahre.

Benachteiligung bei der Fotosynthese

Prinzipiell kann die ¹⁴C-Messung etwa 50 000 Jahre zurückschauen, die Dendrochronologie jedoch nur etwa 12 500 Jahre. Die seit 2009 gültige Kalibrierkurve (IntCal09) geht dennoch darüber hinaus. Sie beruht auf marinen ¹⁴C-Archiven wie etwa Korallen und Karbonaten in Sedimentablagerungen, die sich mit anderen Methoden absolut datieren lassen.

Nicht nur die Stärke des Erdmagnetfelds beeinflusst den Gehalt an Radiokohlenstoff in der Atmosphäre und folglich auch im organischen Gewebe. Einige physikalische und chemische Prozesse behandeln die verschiedenen schweren Kohlenstoffisotope unterschiedlich. So wird bei der Fotosynthese – abhängig vom Stoffwechsel der Pflanze – mehr oder weniger bevorzugt das leichtere ¹²C in die Biomasse eingebaut. Daher ist das Verhältnis von ¹⁴C zu ¹²C in der Biosphäre variabel, woraus sich ¹⁴C-Altersunterschiede von einigen hundert Jahren bei zeitgleichen Proben ergeben würden. Zum Glück gibt es eine verlässliche Lösung: die Messung der stabilen Isotope ¹³C und ¹²C. Ersteres wird bei der Fotosynthese ähnlich »benachteiligt« wie ¹⁴C, daher bietet die Bestimmung des

te und im Labor dann ein geringeres Alter vortäuschte. Libbys Verfahren geriet beinahe in Misskredit, während er selbst die Ergebnisse der Historiker bezweifelte. Anfang der 1960er Jahre aber wurde offenbar, dass die fraglichen Abweichungen auch bei Hölzern auftraten, deren Alter mittels Dendrochronologie ermittelt worden waren (siehe Kasten S. 52).

Dieses Verfahren dient deshalb seit den 1980er Jahren dazu, Radiokohlenstoffdatierungen zu korrigieren. Im Prinzip bestimmt man dazu den ¹⁴C-Anteil im Kohlenstoff des jeweiligen Materials und sucht eine Holzprobe mit demselben Gehalt, deren Alter bereits anhand ihrer Baumringe eindeutig bestimmt wurde. In der Praxis vergleicht man nicht die Konzentrationen selbst, sondern bestimmt aus jener der unbekannt Probe ein so genanntes unkalibriertes ¹⁴C-Alter; per Konvention dient dabei die »Libby-Halbwertszeit« von

Abweichung von der Theorie

Bei stets konstanter ¹⁴C-Konzentration in der Atmosphäre sollte das mit der Radiokohlenstoffmethode ermittelte Alter dem wahren entsprechen (rote Linie). Schwächelte das Erdmagnetfeld, entstand aber mehr ¹⁴C. Anhand dendrochronologisch datierter Holzproben (hier eine Eichenholzprobe aus römischer Zeit) erstellten Forscher die IntCal09-Kalibrierkurve (blau) zur Korrektur. Die Angabe BP (*Before Present*) bezieht sich auf das Jahr 1950, die Einheit calBP bedeutet kalibrierte Jahre vor 1950. Feinere Variationen der Kurve, so genannte *wiggles*, haben ihren Grund in kurzzeitigen Schwankungen der Sonnenaktivität.

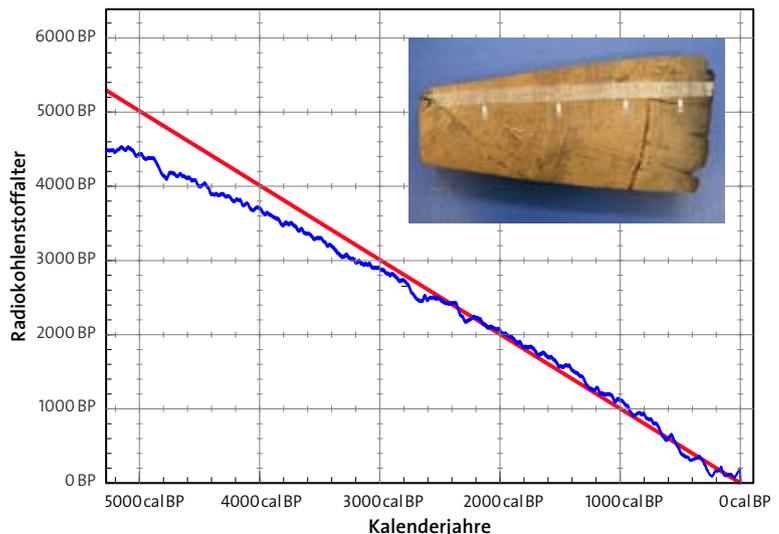


FOTO: MICHAEL FRIEDRICH-HOHNHEIM; DATEN NACH: REIMER, P. ET AL. (2009), OXCAL V2.10; BRONKH RAMSEY, C. (2005), CALIB 5.0.10; PROLUPT/CHRONO

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses, das im Lauf der Jahrhunderte unverändert blieb und keinem radioaktiven Zerfall unterlag, eine Korrekturmöglichkeit.

Damit sind allerdings noch nicht alle störenden Effekte berücksichtigt. So weist der Kohlenstoff im Oberflächenwasser der Ozeane eine geringere ^{14}C -Konzentration auf als der Kohlenstoff der Luft. Der Grund für diesen Reservoireffekt ist die relativ langsame Durchmischung der Ozeane: Aufsteigende Meeresströmungen bringen »altes Wasser« aus den Tiefen an die Oberfläche, das dort den Radiokohlenstoff verdünnt. Lebewesen, die sich aus dem Meer ernähren, erscheinen daher generell um etwa 400 Jahre zu alt, was auch bei der Verwendung mariner Proben zur Erweiterung der Kalibrierkurve berücksichtigt wird.

Dieser Effekt kann sich sogar auf Landlebewesen auswirken. Proben, die von der südlichen Halbkugel unserer Erde stammen, erscheinen auch nach der Kalibrierung etwa 40 Jahre zu alt. Der mittlere Gehalt an Radiokohlenstoff in der Atmosphäre ist dort nämlich etwas geringer, weil jener Teil der Erde zum größeren Teil von Meer bedeckt ist, so dass mehr ^{14}C -armes CO_2 in die Luft gelangt.

Unterstützung durch die Bayes-Statistik

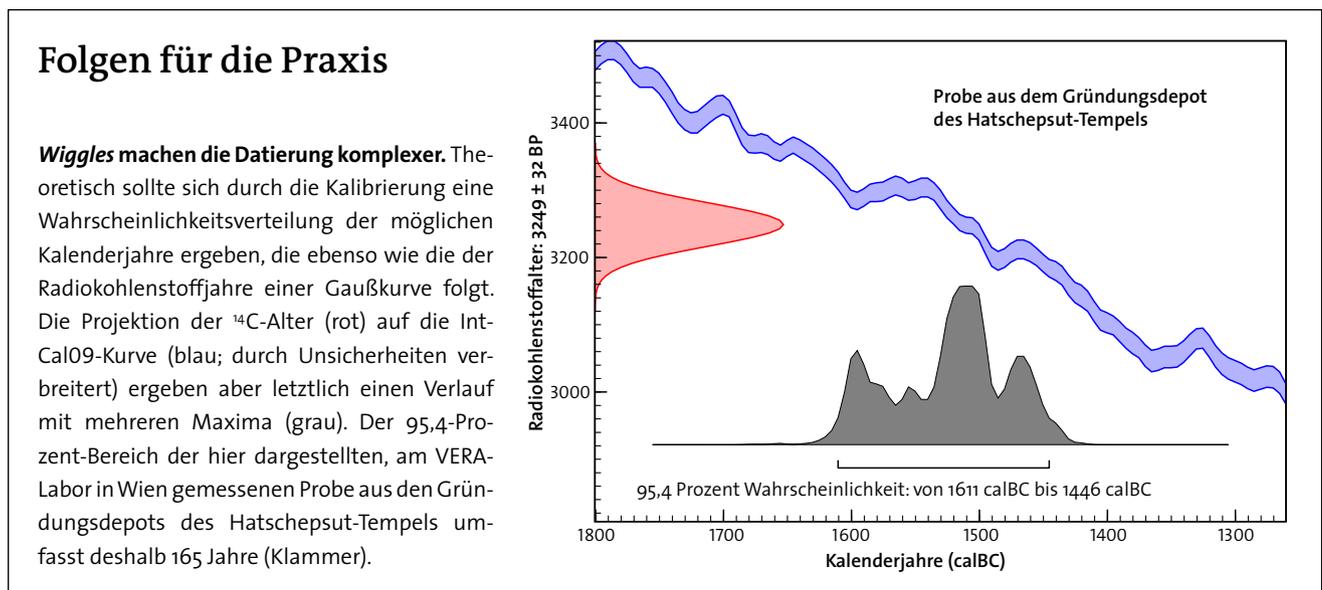
Betrachtet man die Kalibrierkurve, fallen neben Langzeitrends auch kurzfristige Schwankungen auf, so genannte *wiggles*. Die Ursachen dafür sind vielfältig und werden größtenteils auf Änderungen der Sonnenaktivität zurückgeführt, sind aber im Detail noch nicht verstanden. Mit den heutigen Messmethoden lässt sich zwar das unkalibrierte ^{14}C -Alter in der Regel auf wenige Jahrzehnte genau ermitteln, aber durch die *wiggles* kann der Kalenderzeitbereich, in den das wahre Alter der Probe fällt, oft nur auf einige hundert Jahre genau bestimmt werden.

Physikalische Messungen liefern auf Grund von statistischen Unsicherheiten nie 100-prozentig genaue Resultate. Meist erhält man eine glockenförmige Wahrscheinlichkeits-

verteilung von Werten. Eine Altersangabe X plus/minus 30 Jahre bedeutet dann: Der Maximalwert der Verteilung liegt bei X ; verfolgt man die Kurvenflanken bis zu ihren Wendepunkten, haben diese zum Maximum einen Abstand von 30 Jahren. Dieser als Standardabweichung bezeichnete Bereich umfasst 68,2 Prozent aller Messwerte, bei Verdopplung der Unsicherheit (plus/minus 60 Jahre) werden 95,4 Prozent erfasst. Die Prozentzahlen geben also die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Wert im jeweiligen Intervall liegt. Wäre der Zusammenhang zwischen der unkalibrierten Radiokohlenstoffdatierung und dem wahren kalendarischen Alter linear, so würde sich nach der Kalibrierung wieder eine solche Gaußkurve ergeben. Die *wiggles* aber sorgen für einen komplexeren Verlauf.

Dazu ein Beispiel aus unserem eigenen Labor: Wir untersuchten Traubenkerne aus einem der Gründungsdepots des Hatschepsut-Tempels (siehe Bild S. 49), der laut den historischen Chronologien um 1470 v. Chr. errichtet wurde. Die Altersbestimmung ergab zunächst ein nichtkalibriertes ^{14}C -Alter von 3249 plus/minus 32 Jahren BP (einer Konvention entsprechend wird das unkalibrierte ^{14}C -Alter in Jahren vor heute, englisch *Before Present*, BP, angegeben, wobei als Bezugspunkt das Jahr 1950 dient). Nach der Kalibrierung erhielten wir aber eine Kurve mit mehreren Maxima. Der Zeitbereich, in den das wahre Alter der Probe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,4 Prozent fiel, umfasste deshalb 165 Jahre, nämlich von 1611 bis 1446 v. Chr. (siehe Grafik unten). Eine einzige ^{14}C -Datierung ermöglicht daher oft keine Entscheidung zu Gunsten einer der historischen Chronologien.

Größere Präzision erreicht man durch mehrere Proben, sofern deren zeitliche Abfolge bekannt ist. Der englische Mathematiker Thomas Bayes (etwa 1701–1761) formulierte die Grundlagen dieser nach ihm benannten statistischen Methode. Bei einer ungestörten Abfolge a, b, c von Siedlungsschichten etwa muss eine Probe aus der untersten Schicht a älter sein als eine aus der darüberliegenden Schicht b, diese wie-



derum älter als eine aus c. Die Kombination des gemessenen ^{14}C -Gehalts von Proben mit solchen Vorinformationen liefert wesentlich präzisere Datierungen. Dieses Verfahren lässt sich auch bei Proben anwenden, die zwar nicht aus einer einzigen Ausgrabungsstätte stammen, bei denen jedoch die zeitliche Abfolge durch andere Informationen genau bekannt ist.

Entsprechende Fundobjekte sind in Museen vorhanden, doch darf davon allenfalls eine geringe Menge entnommen werden. Zur Zeit Libbys stellte deshalb das Nachweisverfahren des Radiokohlenstoffs die Forscher vor große Prob-

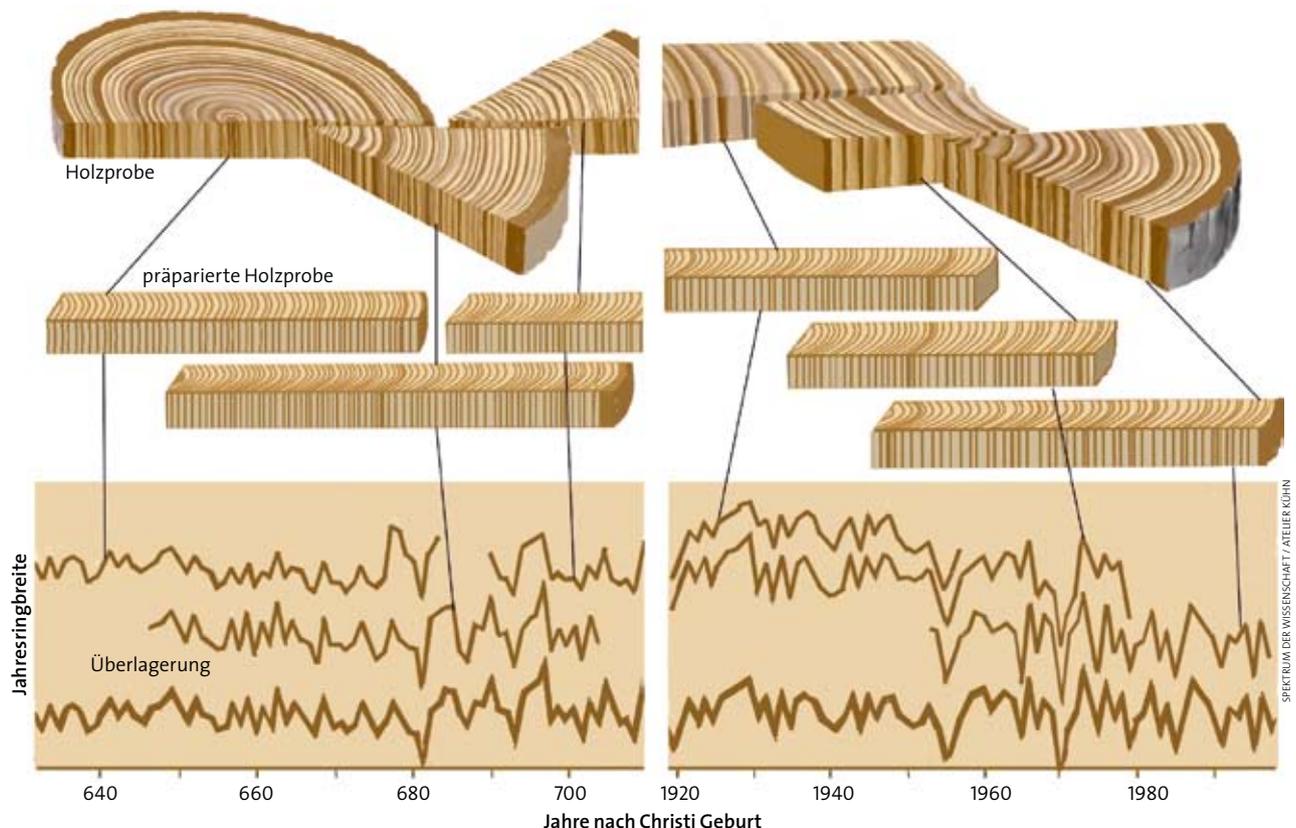
leme, denn sie hatten nur die radiometrische Methode zur Verfügung: Der Zerfall des ^{14}C -Isotops setzt Elektronen frei, die ein Detektor registriert. Zwar befinden sich derzeit in lebender Materie gut 60 Milliarden ^{14}C -Atome je Gramm Kohlenstoff, doch bei einer Halbwertszeit von 5730 Jahren zerfällt davon jede Minute weniger als ein Milliardstel. Genauer gesagt werden dabei im Mittel nur 13,6 Elektronen ausgesandt. Eine Präzision von 0,3 Prozent beziehungsweise 25 Jahren erfordert aber 100 000 Zerfallsereignisse. Das lässt sich in einer vernünftigen Messzeit nur erreichen, wenn

Stichwort Dendrochronologie

Bäume der gemäßigten Breiten bauen neues Holz nur während der Vegetationsperiode vom Frühjahr bis zum Herbst auf, im Spätherbst stellen sie das Wachstum ein. Das Resultat sind die Jahresringmuster, an denen sich das Lebensalter eines Baums abzählen lässt (der innerste Ring ist der älteste). Die Dicke der Baumringe hängt von den am Standort herrschenden Wachstumsbedingungen ab. In warmen, feuchten Jahren baut die Pflanze mehr Masse auf, in kälteren und/oder trockenen Zeiten fallen die Baumringe schmäler aus. Dadurch entsteht eine charakteristische Abfolge, die als Grundlage einer Jahresringchronologie herangezogen werden kann. Bäume einer Region zeigen typische Dickenabfolgen, die durch das regionale Klima verursacht werden. Lokal bedingte Schwankungen lassen sich dabei durch Mittelung von Dickenabfolgen mehrerer Bäume derselben Region herausrechnen.

Dendrochronologen verlängern solche Jahresringkurven immer weiter in die Vergangenheit. Wird eine geeignete ältere Probe vermessen, suchen sie dazu nach Überlappungen der Ringdickenmuster. Die mitteleuropäischen Jahresringchronologien von Eichen und Kiefern reichen derzeit bis zum Ende der Eiszeit vor etwa 12 500 Jahren zurück. Unbekannte Holzproben aus diesem Zeitbereich können durch Vergleich der Ringdickenmuster in günstigen Fällen bis auf ein Jahr genau datiert werden; damit ist die Dendrochronologie eine der genauesten Datierungsmethoden überhaupt.

Aus den Jahresringen von Holzproben, alten Bauhölzern und gefällten Stämmen werden Kurven der Ringbreiten gewonnen und zu einer Chronologie überlagert.



mehrere Gramm Kohlenstoff zur Verfügung stehen – was selten der Fall ist.

Den entscheidenden Fortschritt brachte eine Technik, mit der man die in der Probe vorhandenen ^{14}C -Atome direkt nachweisen kann: Die Beschleunigermassenspektrometrie (*Accelerator Mass Spectrometry*, AMS; siehe Kasten unten) reduziert die Probenmenge um etwa drei Größenordnungen in den Bereich »Milligramm«, was sogar für kostbare Fundstücke akzeptabel ist; sie verkürzt obendrein die Messzeiten. Drei Jahre lang hat ein Wissenschaftlerteam aus Großbritan-

nien, Österreich, Israel und Frankreich unter der Leitung von Christopher Bronk Ramsey von der University of Oxford daran gearbeitet, die ägyptische Chronologie mit den beschriebenen Verfahren auf eine neue naturwissenschaftliche Grundlage zu stellen. Dabei konnte auch unser Labor seine Erfahrungen einbringen.

Europäische und nordamerikanische Museen wurden nach geeigneten Materialien durchforstet. Diese sollten nur von Landpflanzen stammen, um den marinen Reservoir-effekt zu vermeiden. Ausgeschlossen wurde hingegen orga-

Auf der Jagd nach ^{14}C

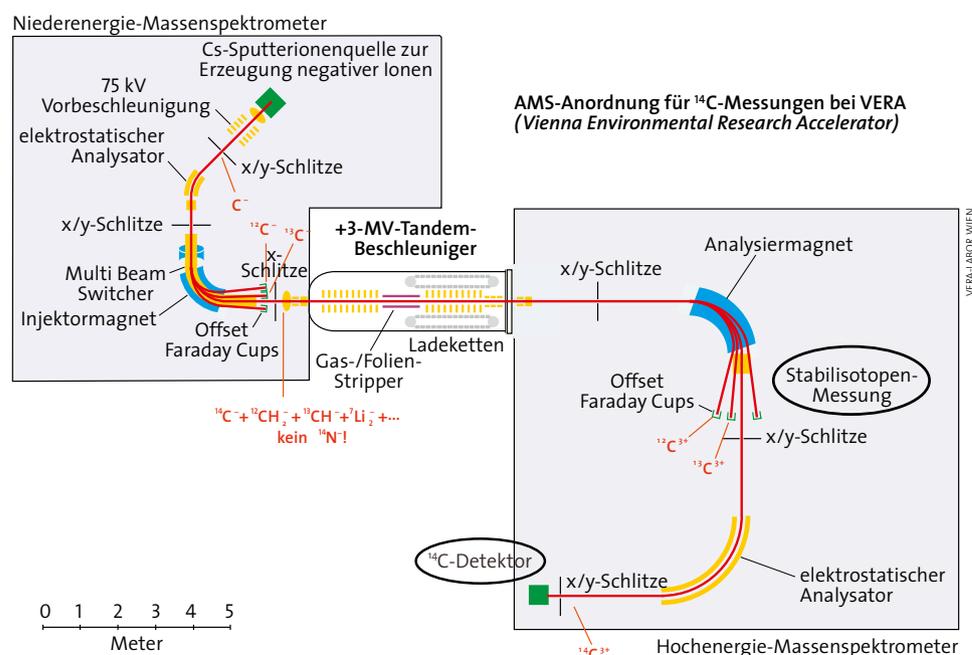
Ob Dopingkontrolle oder chemische Analyse – Massenspektrometer sind oft die erste Wahl, wenn es darum geht, bestimmte Stoffe in einem Gemisch zu identifizieren. Dazu wird die zu untersuchende Probe meist in die Gasphase überführt und ionisiert, dann ein beschleunigendes elektrisches Feld angelegt und ein gerichteter Strahl von Ionen erzeugt. Mit magnetischen Feldern lassen sich diese nun sortieren: Je geringer die Masse und je höher die Ladung, desto stärker werden die Teilchen abgelenkt. Sie gelangen so zu Detektoren, die sie zählen.

Die winzigen Mengen an ^{14}C in einer archäologischen Probe anhand ihrer Masse nachzuweisen, erfordert allerdings einigen Einfallsreichtum. Konventionelle Massenspektrometer sind dafür ungeeignet. Denn die Atommasse des Radiokohlenstoffs unterscheidet sich kaum von der des Stickstoffisotops ^{14}N , das den größten Teil der Luft ausmacht und das Messsignal völlig verdecken würde. Zum Glück bildet Stickstoff keine negativen Ionen. Bei der Beschleunigermassenspektrometrie (siehe Bild) werden Proben deshalb mit einem Zäsiumstrahl zerstäubt – dadurch entstehen negativ geladene Kohlenstoffionen.

Leider bilden sich dabei auch die Kohlenwasserstoffe $^{12}\text{CH}_2^-$ und $^{13}\text{CH}^-$. Beide weisen fast dieselbe Masse wie ^{14}C auf, wieder gibt es davon um viele Größenordnungen mehr. An dieser Stelle kommt nun der namensgebende Beschleuniger ins Spiel: Von einer positiven Drei-Megavolt-Hochspannung angezogen, durchqueren die Molekül- und Atomionen eine kurze Gasstrecke (Stripper) und verlieren dort Elektronen, wodurch die Moleküle aufbrechen und mehrfach positiv geladene ^{12}C -, ^{13}C - und ^{14}C -Ionen resultieren. Nunmehr von der gleichen Hochspannung abgestoßen und weiter beschleunigt, kann ein zweites Massenspektrometer sie unterscheiden. Den Detektor erreichen nur noch ^{14}C -Ionen.

Sowohl die ^{12}C - als auch die ^{13}C -Ionen werden nicht als Einzelereignisse, sondern als Ionenströme gemessen. Daraus lassen sich die benötigten Konzentrationsangaben ermitteln. Das Verhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ (10^{-12} bis 10^{-15}) dient der Datierung, der Wert $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (10^{-2}) der Korrektur einer im Artikel beschriebenen Fehlerquelle. Derzeit wird der ^{14}C -Nachweis mit hoher Präzision an Kohlenstoffmengen im Milligrammbereich durchgeführt.

Vereinfachtes Schema der Beschleunigeranlage VERA (Vienna Environmental Research Accelerator) und der dreistufigen Massenspektrometrie. Dabei sind nur die für eine ^{14}C -Messung wichtigen Komponenten dargestellt.



nisches Material aus Süßwasserseen und Flüssen, weil ¹⁴C-arme gelöste Karbonate eine ähnliche Wirkung haben (Hard-Water-Effekt). Auch Holz- und Holzkohleproben schieden aus: Sie hätten aus dem Inneren eines Baumstamms kommen können, während das zu datierende archäologische Ereignis eher dem Zeitpunkt des Fällens, also dem Alter der äußeren Baumringe, entsprechen würde (Altholzeffekt). Des Weiteren kamen Knochen nicht in Frage, da es nicht auszuschließen war, dass die betreffenden Lebewesen einst Fische und Mollusken verzehrt hatten – was den marinen Reservoir- oder den Hard-Water-Effekt durch die Hintertür hereingebracht hätte.

Trotzdem fanden sich ausreichend viele Proben aus dem Alten, Mittleren und Neuen Reich: Früchte, Samenkörner, Überreste kurzlebiger Pflanzen, Papyri, Textilien und anderes mehr. Sie ließen sich jeweils eindeutig einer Regierungsperiode zuordnen. Die Proben wurden in Oxford und ein Teil zur

Kontrolle noch einmal am AMS-Labor im französischen Saclay oder in unserer Einrichtung in Wien datiert. Manche hat man mehrfach untersucht, nachdem sie mit unterschiedlich starken chemischen Vorbehandlungsmethoden gereinigt worden waren. Auf diese Weise ließ sich ausschließen, dass Kontaminationen das Ergebnis verfälschen – in dem Fall hätten sich unterschiedliche Alter ergeben. Von den insgesamt 211 Datierungen mussten 23 auf Grund grober Inkonsistenz mit den erwarteten Werten unberücksichtigt bleiben, so dass letztlich 188 Ergebnisse verwendet werden konnten.

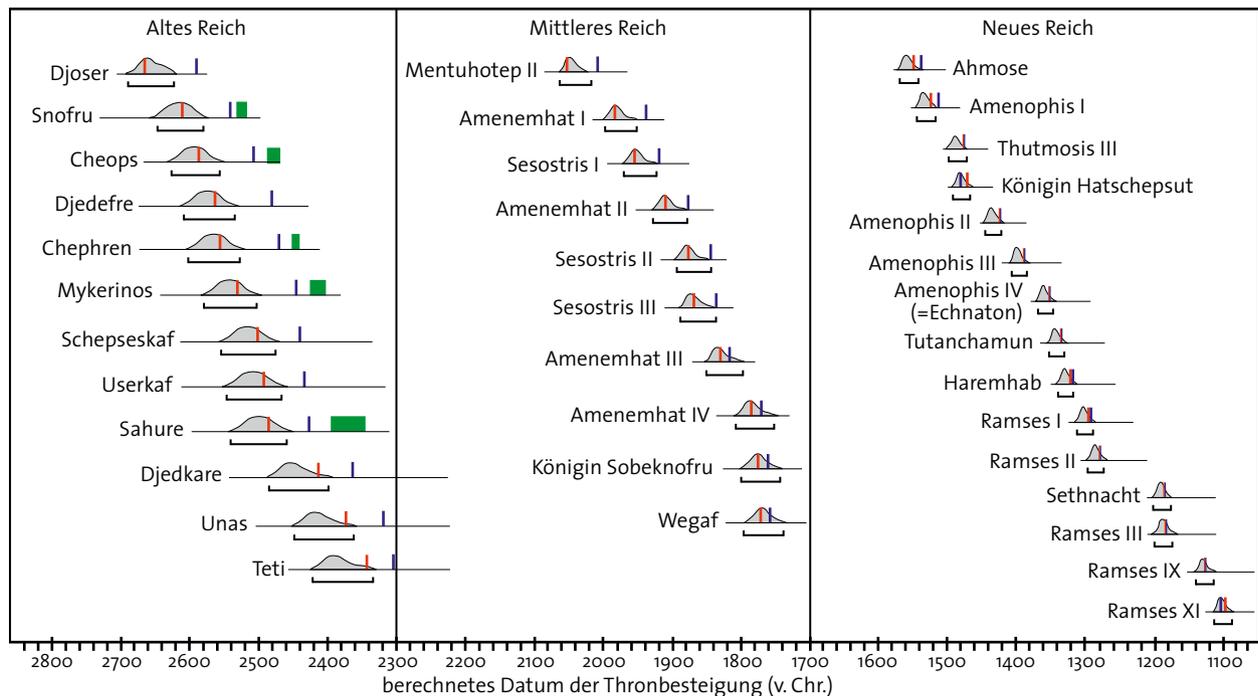
¹⁴C-Unterschiede von Sommer und Winter

Die Einbeziehung von zusätzlicher Information wie der Zuordnung zu Regierungsperioden und deren Dauer ermöglichte eine auf der beschriebenen bayesschen Sequenzierung beruhende Modellrechnung. Dabei wurde auch ein erst kurz zuvor von der Oxford-Datierungsgruppe erkannter Effekt

Der Lohn der Mühen

Im Rahmen eines internationalen Forschungsprojekts wurden Radiokohlenstoffdaten für eine Reihe ausgewählter Proben bestimmt. Dabei berücksichtigten die Forscher alle bekannten Fehlerquellen. Beispielsweise wurden die Überreste mariner Lebewesen von der Untersuchung ausgeschlossen, um den Reservoir-Effekt der Gewässer zu umgehen. Überdies nutzten die

Wissenschaftler die bayessche Statistik, um die Datierungen zu präzisieren. Kalenderzeitbereiche, die einer 95,4-Prozent-Wahrscheinlichkeit entsprachen, wurden mit Thronbesteigungsangaben historischer Chronologien verglichen. Zumeist stützt die Radiokohlenstoffdatierung die zu den hohen Chronologien gehörende Einteilung des britischen Ägyptologen Ian Shaw.



¹⁴C-Datum
95,4-Prozent-Intervall

Historische Chronologien
 | nach Shaw, I.: The Oxford History of Ancient Egypt. Oxford University Press, Oxford 2003 (hohe Chronologie)
 | nach Hornung, E. et al. (Hg.): Ancient Egyptian Chronology. Brill Publishers, Leiden 2006 (niedrigere Chronologie)
 | nach Spence, K.: Ancient Egyptian Chronology and the Astronomical Orientation of Pyramids. In: Nature 408, S. 320–324, 16. November 2000 (niedrige Chronologie des Alten Reichs)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / AEGÄNIUM
NACH: BRONK, RAMSEY, C. ET AL.: RADIOCARBON-BASED CHRONOLOGY FOR DYNASTIC EGYPT. IN: SCIENCE 308, S. 1554–1557, 2010



berücksichtigt: An botanischen Proben bekannten Alters aus dem 18. und 19. Jahrhundert n. Chr. stellte sich heraus, dass solche aus Ägypten laut der Radiokohlenstoffmethode ein um 19 plus/minus 5 ^{14}C -Jahre höheres Alter aufwiesen als zeitgleiche Proben aus mittleren geografischen Breiten. Das lässt sich relativ leicht erklären: Der ^{14}C -Gehalt der untersten Luftschicht (Troposphäre) unterliegt natürlichen Schwankungen von etwa vier Promille, da im Sommer mehr und im Winter weniger Radiokohlenstoff von der Stratosphäre in die Troposphäre gelangt. Pflanzen aus den gemäßigten Breiten, die vor allem im späten Frühjahr und im Sommer wachsen, bauen somit auch geringfügig mehr ^{14}C ein als solche aus Ägypten, deren Wachstumsperiode in die Wintermonate fällt. Letztere erscheinen dann etwas älter. Die Korrektur geht davon aus, dass die klimatischen Verhältnisse vor dem Bau des ersten Assuanstaudamms (1902) über lange Zeiträume konstant waren.

Die Modellrechnung ergab schließlich eine sehr präzise absolute Chronologie des pharaonischen Ägyptens (siehe Grafik links). Sie wurde 2010 im Fachmagazin »Science« publiziert und sorgt seitdem für Diskussion. Dank der großen Zahl an Proben aus dem Neuen Reich konnten die jeweiligen Thronbesteigungen mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von 24 Jahren fixiert werden. Die hohe historische Chronologie stimmt mit den ^{14}C -Daten am besten überein; diese Epoche könnte aber ebendiesen Daten nach sogar etwa eine Dekade früher begonnen haben als allgemein angenommen. Für das Alte und das Mittlere Reich standen leider weniger Proben zur Verfügung. Dennoch sind die Resultate ausreichend genau, um für ersteres die hohe historische Chronologie zu stützen. Für das Mittlere Reich lässt sich zwar keine eindeutige Aussage treffen, auch hier scheint die hohe Chronologie dennoch die stimmigere.

Bemerkenswerterweise ergaben die ^{14}C -Resultate jeweils nur geringfügige Abweichungen und nie größere Widersprüche zu den historisch bestimmten Daten. Das war nicht un-

bedingt zu erwarten, denn in den vergangenen Jahren wurde immer wieder Material aus der pharaonischen Zeit Ägyptens mit der ^{14}C -Methode datiert, und vielfach wichen die Resultate drastisch von der Einschätzung der Ägyptologen ab. Manche Unterschiede beruhen möglicherweise auf einer etwas zu unkritischen Auswahl, die nicht korrigierbare Fehler einbrachte. So mag der Altholzeffekt bei Holzkohleproben die Datierung verfälscht haben. Auch die Wiederverwendung von Holz wäre zu bedenken – der Zeitpunkt der letzten Verwendung könnte erheblich vom Fälldatum abweichen. Mitunter ist die Zuordnung eines historischen Datums unsicherer als von den Ägyptologen angenommen.

Es gibt jedoch durchaus Untersuchungen, bei denen trotz Ausschluss aller Störfaktoren Differenzen von 100 bis 150 Jahren auftraten, wobei die ^{14}C -Methode stets das höhere Alter ergab. Das betrifft etwa Funde aus Tell el-Dab'a im Nildelta, das vom Mittleren Reich bis zum Beginn des Neuen Reichs besiedelt war. Physiker wie Ägyptologen sind sich jeweils weit gehend sicher, dass ihre Datierung stimmt. Eine plausible Erklärung steht noch aus. Es ist zu hoffen, dass eine Lösung dank der in den vergangenen Jahren gewachsenen Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaften und Geisteswissenschaften bald gefunden wird. ~

DIE AUTOREN



Eva Maria Wild und **Walter Kutschera** sind Professoren an der Fakultät für Physik der Universität Wien und arbeiten auf dem Gebiet der Isotopenforschung an der AMS-Anlage VERA. Eva Maria Wild leitet das ^{14}C -Programm der Beschleunigeranlage VERA und war an der in »Science« veröffentlichten Arbeit über die ^{14}C -Datierung des pharaonischen Ägyptens beteiligt. Walter Kutschera hat das VERA-Laboratorium begründet und war zweiter Sprecher des FWF-Spezialforschungsbereichs SCIM2000 (The Synchronization of Civilizations in the Eastern Mediterranean in the 2nd Millennium BC).

QUELLEN

- Arnold, J.R., Libby, W.F.:** Age Determinations by Radiocarbon Content: Checks with Samples of Known Age. In: *Science* 110, S. 678–680, 1949
- Bowman, S.:** *Radiocarbon Dating (Interpreting the Past)*. British Museums Publications, London 1990
- Bronk Ramsey, C. et al.:** Radiocarbon-Based Chronology for Dynastic Egypt. In: *Science* 328, S. 1554–1557, 2010
- Dee, M.W. et al.:** Investigating the Likelihood of a Reservoir Offset in the Radiocarbon Record for Ancient Egypt. In: *Journal of Archaeological Science* 37, S. 687–693, 2010
- Shaw, I.:** *The Oxford History of Ancient Egypt*. Oxford University Press, Oxford 2003
- Taylor, R.E.:** *Radiocarbon Dating – An Archaeological Perspective*, Academic Press, Orlando 1987

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124695