



ANCIENT THEBES

RAUSCHER.XYZ

31. JULI 2026

WAS IST EINE **C14**- DATIERUNG? ALLES ÜBER DIE METHODE, DIE ZWISCHEN MORDFALL UND ARCHAOLOGIE ENTSCHEIDET

Die Radiokarbondatierung misst, wie viel Kohlenstoff-14 (C14) in einem Fund übrig geblieben ist, und bestimmt daraus, wann der Kohlenstoffaustausch im untersuchten Material endete. Wie das mathematisch und biologisch funktioniert, wie weit es zurückreicht, warum ein Ergebnis niemals eine einzelne Jahreszahl ist, was ein Zahn anders verrät als ein Knochen und wo das Verfahren kippt, erkläre ich anhand eines echten Laborberichts aus meiner Praxis.

Es gibt zu viele offene Fragen zu diesem Thema, und ich bekomme sie seit Jahren gestellt, ohne sie je an einer einzigen Stelle beantwortet zu haben. In fast jedem meiner Texte über Schädel, über Provenienz, über Beschlagnahmen und über Leichenfunde taucht dieselbe Abkürzung auf, meistens in einem Nebensatz, meistens als Selbstverständlichkeit. Erklärt habe ich sie nie.

Also habe ich mich die letzten Tage hingesezt und alles zusammengefasst, was ich über die Radiokarbondatierung weiß, und daneben gelegt, was in den vergangenen Jahren dazu wissenschaftlich publiziert wurde. Was ihr hier lest, ist der Versuch, dieses Thema einmal vollständig abzuräumen, von der Entstehung des Isotops in der oberen Atmosphäre bis zu jener Zeile auf einem Laborbericht, die kaum jemand liest und die über alles entscheidet.

WAS IST EINE C14-DATIERUNG?

Eine C14-Datierung, auch Radiokarbondatierung genannt, bestimmt, wann der Kohlenstoffaustausch in dem untersuchten biologischen Material geendet hat. Bei kurzlebigen Material entspricht das häufig ungefähr dem Todeszeitpunkt, bei Holz, bei Zähnen und bei langsam umgebautem Knochengewebe kann das gemessene Signal dagegen deutlich früher liegen. Sie funktioniert, weil in der oberen Atmosphäre ununterbrochen ein radioaktives Kohlenstoffisotop entsteht, nämlich Kohlenstoff-14, das über die Photosynthese und die Nahrungskette in jedes Lebewesen gelangt. Solange ein Organismus lebt, füllt er dieses Isotop laufend nach und hält seinen Anteil ungefähr konstant. Mit dem Tod endet die Aufnahme, und ab diesem Moment zerfällt der vorhandene Kohlenstoff-14 in einem Tempo, das keine Umwelteinwirkung beschleunigt oder verlangsamt. Wer misst, wie viel davon noch vorhanden ist, kann zurückrechnen, wann der Kohlenstoff in das untersuchte Material eingebaut wurde und wann dessen Austausch endete. Wie eng dieser Zeitpunkt am Tod liegt, entscheidet das Material.

Eine Verwechslung müsst ihr dabei von Anfang an ausschließen, weil sie mir häufiger begegnet als jede andere. Gemeint ist immer ein Punkt auf dem Kalender, also das Jahrhundert oder das Jahrtausend, in dem dieser Organismus gelebt hat. Gemeint ist nicht das Lebensalter. Ob dieser Mensch mit 20 oder mit 70 gestorben ist, sagt euch eine C14-Datierung nicht.

Das Verfahren reicht rund 50.000 Jahre zurück. Es funktioniert an allem, was einmal am Kohlenstoffkreislauf teilgenommen hat, also an Knochen, Zähnen, Holz, Holzkohle, Leder, Textilien, Pergament und Pflanzenresten, und es datiert weder Metall noch Stein noch den mineralischen Anteil einer Keramik, wohl aber geeignete organische Rückstände daran oder darin. Und es liefert, das ist der am häufigsten missverstandene Punkt, kein einzelnes Datum, sondern einen oder mehrere Zeiträume mit jeweils einer Wahrscheinlichkeit.

WAS SAGT MIR EINE C14-DATIERUNG KONKRET?

Stellt euch einen Schädel vor, der bei Bauarbeiten aus der Erde kommt. Er sieht alt aus, aber alt sieht fast jeder Schädel aus, sobald das Weichgewebe weg ist. Ein Mensch, der 1985 gestorben ist, und ein Mensch, der 3000 vor Christus gestorben ist, liegen nach der Verwesung optisch erschreckend nah beieinander. Die erste Frage der Polizei lautet deshalb nicht, wer das war, sondern ob es überhaupt ihre Sache ist.

Genau diese Frage beantwortet die C14-Datierung, und zwar besser als jede Einschätzung nach Augenschein. Sie sagt euch, ob der Fund aus den letzten Jahrzehnten stammt oder ob er Jahrhunderte oder Jahrtausende in der Erde lag. Aus einem Verdacht wird damit ein Zeitraum, und aus einem Zeitraum wird eine Zuständigkeit.

Ebenso wichtig ist, was sie euch nicht sagt, denn genau hier entstehen die meisten Missverständnisse. Sie nennt keinen Namen und keine Identität, dafür braucht es DNA oder Zahnvergleiche. Sie nennt keine Todesursache und beantwortet nicht, ob überhaupt ein Verbrechen vorliegt. Und sie nennt vor allem nicht das Lebensalter dieses Menschen. Sie beantwortet, wann er gelebt hat, und nicht, wie alt er dabei geworden ist. Das Sterbealter lesen wir aus dem Skelett selbst, aus Zahnabnutzung, Nahtverschluss und Knochenstruktur, und das ist ein völlig anderes Verfahren mit völlig anderen Fehlergrenzen. Sie nennt keinen Tag und keinen Monat, sondern immer einen oder mehrere Wahrscheinlichkeitsbereiche. Wie breit die ausfallen, hängt vom Alter der Probe ab, von der Messunsicherheit und vor allem vom Verlauf der Kalibrationskurve an dieser Stelle. Bei einem Toten aus den 1970er Jahren kann die Bombenpulsdatering auf wenige Jahre genau werden, während ein ungünstiger Kurvenabschnitt bei einem viel älteren Fund mehrere Jahrhunderte umfassen kann.

Und sie datiert genau genommen nicht den Menschen, sondern das Stück Material, das im Labor gelandet ist. Welches Gewebe ihr einschickt, entscheidet deshalb darüber, welchen Abschnitt eines Lebens ihr überhaupt misst. Das klingt nach einer Kleinigkeit, und es ist der wichtigste Satz in diesem ganzen Text.

Genau das ist die These, die diesen ganzen Text trägt. Ein C14-Ergebnis ist keine Jahreszahl. Es ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, und wer sie als Jahreszahl liest, hat die Methode nicht verstanden, egal wie teuer das Gerät war, das sie erzeugt hat.

Eine sachliche Klarstellung gehört an den Anfang, weil sie sonst zu Missverständnissen führt. Ich betreibe keinen Beschleuniger, das kann sich niemand leisten, der nicht ein Universitätsinstitut im Rücken hat, und warum das so ist, werdet ihr weiter unten an Zahlen sehen. Beauftragung, Auswahl der Probe und Auswertung dessen, was zurückkommt, laufen bei mir, gemessen wird im Labor. Das klingt nach wenig, es ist aber der Teil, an dem die meisten Datierungen scheitern.

Ich halte die Radiokarbondatierung für eines der interessantesten Verfahren, die Archäologie, Forensik und Anthropologie miteinander teilen. Und nach meiner Erfahrung

für eines der am seltensten eingesetzten. Auf diesen Punkt komme ich am Ende zurück, denn er ärgert mich mehr als alles andere an diesem Thema.

Fangen wir mit dem Irrtum an, der mir am häufigsten begegnet.

NEIN, DIE METHODE HAT NICHT AUF DIE BOMBE GEWARTET

Es gibt eine Vorstellung, die sich hartnäckig hält, und sie geht ungefähr so: Weil in den 1950er Jahren mit den atmosphärischen Kernwaffentests der Kohlenstoff-14-Gehalt der Luft hochgeschossen ist, und weil man diesen sogenannten Bombenpuls für Datierungen nutzt, funktioniert die C14-Datierung eben erst ab diesem Zeitpunkt. Alles davor sei Schätzung, Interpretation, Kaffeesatz.

Das ist grober Unfug, und zwar in einer Größenordnung, die man selten so sauber ausräumen kann.

Willard Libby und seine Kollegen Ernest Anderson und James Arnold haben die Methode 1949 in Science publiziert, in einer Arbeit über die weltweite Bestimmung natürlichen Radiokohlenstoffs, und zwar im Jahr 1949. Der erste sowjetische Atomtest fand im selben Jahr statt, die große Serie atmosphärischer Tests, die den Bombenpuls erzeugte, lief erst ab den frühen 1950er Jahren. Libby bekam 1960 den Nobelpreis für Chemie für ein Verfahren, das zu diesem Zeitpunkt bereits ein Jahrzehnt lang archäologische Chronologien umgeschrieben hatte. Die Methode war fertig, bevor der Bombenpuls überhaupt existierte.

Der Bombenpuls ist eine zusätzliche, völlig eigenständige Anwendung, die aus einem Nebeneffekt der Kernwaffentests entstanden ist, und sie beantwortet eine ganz andere Frage als die klassische Datierung. Die klassische Datierung fragt, wann der Kohlenstoffaustausch in einem Material endete. Der Bombenpuls fragt zunächst etwas anderes, nämlich wann dieses Gewebe gebildet wurde, und beim Zahnschmelz lässt sich daraus über die bekannte Zahnentwicklung auf das Geburtsjahr zurückrechnen. Beide nutzen dasselbe Isotop und ansonsten fast nichts Gemeinsames.

Wie weit die klassische Methode zurückreicht, sage ich gleich vorweg, damit die Größenordnung klar ist. Rund 50.000 Jahre, in Einzelfällen mit extrem aufwendiger Probenaufbereitung noch etwas mehr. Das reicht weit vor das letzte glaziale Maximum zurück und damit in eine Zeit, in der in Europa noch Neandertaler lebten. Wer behauptet, das gehe erst seit 1963, verwechselt eine Zusatzanwendung mit der Methode selbst.

Otto Sapiens, jene Spielart des Homo sapiens, die alles weiß, weil sie ein Hörbuch dazu gehört hat, wird an dieser Stelle einwenden, dass man das ja nicht überprüfen könne. Überprüfen kann man es sehr wohl, genau darum geht es im Abschnitt über die Kalibration, und die Überprüfung heißt Baumringe.

DER FUND, MIT DEM ALLES ANFÄNGT

Bevor ich in die Physik gehe, will ich euch die Frage zeigen, für die ich diese Methode tatsächlich brauche, denn sie ist banaler und dringlicher, als die meisten glauben.

Ein Wald, irgendwo in einem Mittelgebirge. Ein Spaziergänger, der abseits des Weges in eine Senke schaut. Eine teilweise skelettierte Leiche, Weichgewebe nur noch in Resten, aber der Unterkörper steckt noch in einer Jeans. Die Polizei kommt, die Staatsanwaltschaft kommt, und dann steht eine einzige Frage im Raum, bevor irgendjemand über Täter, Motiv oder Tatzeit nachdenkt: Ist das ein Fall für die Mordkommission oder für das Landesamt für Denkmalpflege?

Die Jeans hilft dabei weniger, als ihr denkt. Nietenhosen aus Baumwolldenim sind seit über 100 Jahren im Umlauf, und Baumwolldenim kann unter bestimmten Boden- und Feuchtigkeitsbedingungen überraschend lange erhalten bleiben. Ein Kleidungsstück datiert den Träger nicht, es datiert bestenfalls den frühesten möglichen Zeitpunkt. Wer aus einer Jeans auf ein Todesjahr schließt, hat einen Anhaltspunkt und keinen Befund.

Die Grenze, an der sich entscheidet, ob überhaupt noch verfolgt werden kann, liegt bei den Verjährungsfristen, und die sind von Rechtsordnung zu Rechtsordnung verschieden. In Deutschland verjährt Mord überhaupt nicht, das regelt Paragraph 78 Absatz 2 des Strafgesetzbuchs, wonach Verbrechen nach Paragraph 211 nicht verjähren. Auch die Verfolgung von Verbrechen nach dem Völkerstrafgesetzbuch verjährt nach dessen Paragraph 5 nicht. Dieses Gesetz trat am 30.06.2002 in Kraft, und wie früher begangene Taten zu behandeln sind, richtet sich nach der jeweils anwendbaren Rechtslage. In den französischen Fällen, die ich gleich zitiere, hing die rechtliche Einordnung der Autoren dagegen von den dort geltenden Verjährungsregeln ab. Für die praktische Ermittlungsarbeit nimmt die Aussicht auf lebende Tatverdächtige, auf Zeugen, auf zeitnahe Vermisstenmeldungen und auf unmittelbar vergleichbares Material mit wachsendem zeitlichem Abstand trotzdem regelmäßig stark ab. Ein hohes Alter macht einen Fund deswegen aber nicht automatisch zu einer rein archäologischen Angelegenheit. Dazu kommen Kriegsgräber, historische Identifizierungen, koloniale Erwerbskontexte, Rückführungsforderungen und ungeklärte Grabstörungen. Was die Datierung leistet, ist deshalb nicht die Trennung in wichtig und unwichtig, sondern die Klärung, welche Zuständigkeit und welche Fragestellung überhaupt greift. Und das leistet sie zuverlässiger als jede Einschätzung nach Augenschein.

Die drei publizierten Fälle, die Benoit Bertrand und Kollegen 2024 in Forensic Sciences Research beschrieben haben, zeigen die ganze Bandbreite dieser Weichenstellung. Im ersten Fall, einem Teilschädel vom Strand bei Audresselles in Nordfrankreich, ohne jeden Kontext und ohne Identität, ergaben 3 kombinierte Messungen bei 95,4 Prozent Gesamtwahrscheinlichkeit 2 getrennte Bereiche, nämlich 4332 bis 4231 vor Christus mit 83,9 Prozent und 4194 bis 4168 vor Christus mit 11,5 Prozent. Neolithikum, archäologisch bedeutsam, für die Frage eines modernen Tötungsdelikts ohne Bedeutung. Und schon dieser Fall zeigt, wie schnell aus einer Verteilung eine Zahl wird, denn die Kurzfassung derselben Arbeit nennt ein einzelnes kalibriertes Alter von 4232 vor Christus. Im zweiten Fall,

Skelettresten aus dem gefluteten Untergrund eines historischen Forts bei Wimereux, lag der Kohlenstoffgehalt deutlich über dem modernen Referenzwert. Die kombinierte Bombenpuls-Kalibration ergab für das untersuchte Knochengewebe zunächst einen Zeitraum von 1962 bis 1963 mit 14,2 Prozent oder 1974 bis 1976 mit 81,3 Prozent Wahrscheinlichkeit. In Frankreich verjähren Verbrechen nach 20 Jahren, mit Ausnahmen unter anderem für Kriegsverbrechen, und Verbrechen gegen die Menschlichkeit verjähren dort gar nicht. Nach dieser Einordnung lag der Fall jenseits der maßgeblichen Frist. Die Probe stammte aus kortikalem Oberschenkelknochen, und dazu nennen die Autoren eine Verzögerung zwischen tatsächlichem und gemessenem Todesjahr von im Median 29,5 und im Mittel 32,0 Jahren, was den Befund gefährlich nah an die Verjährungsgrenze rückt. Der dritte Fall ist der interessanteste, und ich komme später ausführlich darauf zurück, weil er beweist, worüber sich Laien und leider auch manche Ermittler regelmäßig täuschen.

Wie der Waldfall ausgegangen ist, schreibe ich hier nicht. Das ist nicht meine Entscheidung und nicht mein Verfahren. Was ich schreiben kann, ist der Weg, auf dem man zur Antwort kommt, und den gehe ich jetzt von vorn.

EIN STICKSTOFFATOM WIRD VON EINEM NEUTRON GETROFFEN

Ganz oben in der Atmosphäre, in der Stratosphäre und der oberen Troposphäre, prasselt permanent kosmische Strahlung auf die Lufthülle. Diese Strahlung erzeugt in Kollisionen sekundäre Neutronen, freie Neutronen also, die durch die dünne Luft fliegen und irgendwann auf einen Atomkern treffen. Trifft so ein Neutron einen Stickstoff-14-Kern, und dieses Gas ist mit rund 78 Prozent der mit Abstand häufigste Bestandteil unserer Atmosphäre, dann passiert etwas Elegantes: Das Neutron wird eingefangen, ein Proton herausgeschlagen, und übrig bleibt Kohlenstoff-14.

Der Kern hat danach dieselbe Massenzahl, aber ein Proton weniger und ein Neutron mehr, und damit ist er kein Stickstoff mehr, sondern ein Kohlenstoff, allerdings ein instabiler. Dieser neu entstandene Kohlenstoff-14 verhält sich chemisch weitgehend wie die stabilen Kohlenstoffisotope, unterliegt aber kleinen isopenabhängigen Fraktionierungseffekten. Er oxidiert zu Kohlendioxid, mischt sich in den atmosphärischen Kohlenstoffpool, und ab da nimmt ihn jede Pflanze über die Photosynthese auf, ohne unterscheiden zu können, ob sie gerade ein stabiles oder ein radioaktives Kohlenstoffatom verbaut.

Was die Pflanze aus der Luft aufnimmt und in Biomasse einbaut, gelangt über Pflanzenfresser und weitere Nahrungsketten in Tiere und in Menschen. Damit steht jeder lebende Organismus auf diesem Planeten in einem permanenten Austausch mit dem atmosphärischen Kohlenstoffreservoir, und das Isotopenverhältnis in seinem Gewebe folgt dem Kohlenstoffreservoir, das er tatsächlich nutzt. Bei terrestrischen Nahrungsketten liegt dieses meist nahe am atmosphärischen Signal, marine, limnische und geologisch beeinflusste Systeme können dagegen erheblich abweichen.

Wie selten dieses Isotop ist, sollte man sich einmal bewusst machen, weil es die eigentliche technische Leistung erklärt. Auf etwa eine Billion Kohlenstoffatome kommt in der natürlichen Atmosphäre ungefähr ein einziges Kohlenstoff-14-Atom. Eine Billion ist eine Eins mit 12 Nullen. Wenn ihr jede Sekunde ein Kohlenstoffatom prüfen könntet, ohne Pause, ohne Schlaf, dann wärt ihr gut 30.000 Jahre beschäftigt, bevor euch das erste C14 unterkäme. Genau diese Nadel im Heuhaufen zählen die Maschinen, über die ich weiter unten schreibe, und sie zählen sie einzeln.

DIE UHR BEGINNT ZU LAUFEN, WENN DER AUSTAUSCH AUFHÖRT

Solange ein Organismus lebt, wird das zerfallende C14 permanent nachgefüllt, weil er ja weiter atmet, frisst und Stoffe umbaut. Der Anteil in seinem Gewebe bleibt deshalb ungefähr konstant und folgt dem Wert der Umgebung.

Mit dem Tod endet dieser Austausch abrupt. Ab diesem Moment wird nichts mehr nachgefüllt, und der vorhandene Kohlenstoff-14 zerfällt weiter, in einem Prozess, den kein Umwelteinfluss beschleunigt oder verlangsamt. Er wandelt sich per Betazerfall zurück in Stickstoff-14, aus dem er entstanden ist. Der Kreis schließt sich, und was bleibt, ist eine Uhr. Für den Gesamtorganismus endet mit dem Tod die weitere Kohlenstoffaufnahme, die im Labor gemessene Uhr eines bestimmten Gewebes kann aber schon früher stehen geblieben sein, etwa mit der Bildung des Zahnschmelzes, oder sie kann wegen langsamen Umbaus einen langen Zeitraum vor dem Tod integrieren.

Der mathematische Kern ist ein Einzeiler, und ich schreibe ihn hin, weil er einfacher ist als sein Ruf. Die Zahl der verbliebenen Atome ist gleich der ursprünglichen Zahl, multipliziert mit e hoch minus Lambda mal t . Lambda ist die Zerfallskonstante, t die verstrichene Zeit. Wer das nach t auflöst, erhält das Alter. Wer die Zerfallskonstante durch die Halbwertszeit ausdrücken will, teilt den natürlichen Logarithmus von 2 durch die Halbwertszeit, und damit ist die gesamte Grundmathematik der Methode erzählt.

Der Rest sind Korrekturen, und die Korrekturen sind der Grund, warum ein C14-Bericht 2 Seiten hat und nicht 2 Zeilen.

Eine dieser Korrekturen betrifft die Fraktionierung. Pflanzen bevorzugen bei der Photosynthese leichtere Kohlenstoffisotope, und je nach Stoffwechselweg tun sie das unterschiedlich stark. Eine C4-Pflanze wie Mais oder Hirse fraktioniert anders als eine typische C3-Pflanze wie Weizen oder ein mitteleuropäischer Baum, und ein Meerestier anders als beide. Ohne Korrektur würde dieselbe Zeitspanne in verschiedenen Organismen verschiedene Alter liefern, was für eine Methode, die Zeit messen soll, ein spürbarer Nachteil wäre. Deshalb wird jedes Radiokarbonalter über das gemessene Verhältnis von Kohlenstoff-13 zu Kohlenstoff-12 auf einen Standardwert normiert, und dieser Standardwert liegt bei minus 25 Promille. Wenn ihr auf einem Zertifikat eine Zeile mit $\delta^{13}\text{C}$ findet, dann hat sie genau diesen Zweck, bevor sie irgendetwas über die Ernährung erzählt.

WARUM MIT EINER HALBWERTSZEIT GERECHNET WIRD, VON DER ALLE WISSEN, DASS SIE FALSCH IST

Jetzt wird es kurz kurios, und ich mag diese Stelle, weil sie zeigt, wie Wissenschaft mit ihren eigenen Irrtümern umgeht, wenn sie erwachsen ist.

Libby bestimmte die Halbwertszeit von Kohlenstoff-14 mit 5568 Jahren. Diese Zahl war die beste verfügbare Messung ihrer Zeit, und die gesamte frühe Radiokarbonliteratur rechnete damit. In den frühen 1960er Jahren zeigten präzisere Messungen, dass der wahre Wert bei etwa 5730 Jahren liegt, mit einer Unsicherheit von rund 40 Jahren. Harry Godwin veröffentlichte das 1962 in Nature, und seither heißt dieser Wert die Cambridge-Halbwertszeit, während der alte Wert die Libby-Halbwertszeit blieb.

Und jetzt kommt der Teil, an dem Laien regelmäßig aussteigen: Die Labore rechnen bis heute mit der falschen Zahl, und zwar absichtlich und weltweit.

Das ist keine Schlamperei, sondern eine bewusste Konvention, die Minze Stuiver und Henry Polach 1977 in Radiocarbon festgeschrieben haben. Der Grund ist so einfach wie zwingend. Das sogenannte konventionelle Radiokarbonalter ist keine Aussage über das echte Kalenderalter, sondern eine standardisierte Zwischengröße, die anschließend ohnehin kalibriert werden muss. Solange alle mit demselben Wert rechnen und die Kalibration diesen Wert berücksichtigt, kürzt sich die Halbwertszeit im Ergebnis wieder heraus. Hätte man in den 1960er Jahren umgestellt, wären sämtliche vorher publizierten Daten inkompatibel geworden, und jede archäologische Chronologie hätte man mit einem Umrechnungsfaktor im Hinterkopf lesen müssen.

Wer trotzdem umrechnen will, teilt das mit 5730 gerechnete Alter durch 1,029, und mehr steckt hinter dieser Umrechnung nicht.

Zur selben Familie von Konventionen gehört das Kürzel BP, das ihr auf jedem Bericht findet. Es heißt „before present“, also vor der Gegenwart, und die Gegenwart ist auf das Jahr 1950 festgelegt. Der Grund dafür ist ein doppelter. Erstens beziehen sich die Kalibrationsdatensätze darauf, zweitens liegt 1950 vor der massiven Veränderung des atmosphärischen C14-Gehalts durch die thermonuklearen Testserien der folgenden Jahre. Die moderne Aktivität selbst wird nicht über beliebiges altes Holz definiert, sondern über international festgelegte Oxalsäurestandards und eine mathematisch fixierte Normierung.

Das führt zu einer Formulierung, die ich nie ohne ein leises Vergnügen aufschreibe. Wenn ein Bericht 2517 BP ausweist, dann heißt das 2517 Jahre vor 1950, und ihr, die ihr das hier lest, seid nach der Zählweise der Radiokarbonatierung praktisch alle in der Zukunft geboren. Eine Konvention, die ihre eigene Begründung um mehr als 70 Jahre überlebt hat und trotzdem beibehalten wird, weil ein Wechsel mehr Schaden anrichten würde als der Fehler, den sie enthält. Ich kenne Behörden, die aus deutlich schlechteren Gründen an deutlich schlechteren Regeln festhalten, nur ohne die Selbstironie, das auf jedem Formular mitzudrucken.

Der Kern bleibt: BP ist keine Jahreszahl im landläufigen Sinn, sondern eine Rechengröße, und wer sie mit einem Kalenderdatum verwechselt, liegt um Jahrzehnte bis Jahrhunderte daneben.

DIE GRENZE BEI 50.000 JAHREN, UND WARUM 1 PROZENT DRECK SIE EINREISST

Warum ist bei rund 50.000 Jahren Schluss? Nach 10 Halbwertszeiten sind von der ursprünglichen Menge weniger als 0,1 Prozent übrig. Die Probe enthält dann so wenige C14-Atome, dass die Zählstatistik zusammenbricht und der Messuntergrund des Geräts größer wird als das Signal. Man misst dann nicht mehr die Probe, sondern die Maschine.

Der eigentliche Killer ist aber nicht die Restaktivität, sondern die Verunreinigung, und hier steckt eine Zahl, die ihr euch merken solltet, weil sie die ganze Sorgfalt der Probenaufbereitung erklärt.

Nehmt eine Probe, die unendlich alt ist, also gar kein eigenes C14 mehr enthält. Verunreinigt sie mit 1 Prozent modernem Kohlenstoff, etwa durch eine feine Wurzel, durch Huminsäuren aus dem Boden, durch Handschweiß, durch einen Konservierungsstoff. Diese Probe misst sich anschließend auf etwa 37.000 Jahre. Ein Ergebnis, das nach einem seriösen Befund aussieht, mit einer schönen Unsicherheitsangabe daneben, und das vollständig aus dem Dreck besteht, den jemand nicht entfernt hat. Eine Probe mit einem echten Alter von 40.000 Jahren rutscht unter derselben Verunreinigung auf rund 33.000 Jahre.

Ein einziges Prozent, also ein Hundertstel des Materials, entscheidet hier über mehr als 7.000 Jahre.

Genau deshalb gehört auf jeden ordentlichen Befund, welches Aufbereitungsverfahren verwendet wurde, und genau deshalb ist ein Ergebnis ohne nachvollziehbar dokumentierte Probenaufbereitung forensisch nicht belastbar. Ob das auf dem Zertifikat selbst steht oder in den ergänzenden Laborunterlagen, ist zweitrangig, auffindbar muss es sein. Auf dem Bericht, den ich euch gleich zeige, steht eine Säure-Base-Säure-Behandlung und eine Kollagenextraktion, und diese beiden Zeilen sind wichtiger als der halbe Rest.

An der jungen Grenze gibt es ein spiegelbildliches Problem. Material aus den letzten Jahrzehnten vor den Atomtests lässt sich kaum vom modernen Referenzwert unterscheiden, weil die Unterschiede im Bereich der Messunsicherheit liegen. Verschärft wird das durch den Suess-Effekt, benannt nach Hans Suess: Seit der Industrialisierung blasen wir gewaltige Mengen fossilen Kohlenstoffs in die Luft, Kohle und Erdöl, die so alt sind, dass ihr gesamtes C14 längst zerfallen ist. Dieser Kohlenstoff verdünnt die Atmosphäre und lässt sie radiokarbonmäßig altern. Ein Baum, der heute wächst, sieht deshalb älter aus, als er ist.

Für die Praxis heißt das: Zwischen ungefähr 1650 und 1950 wird die Auflösung schlecht. Ein Skelett aus dieser Spanne kann man grob einordnen, aber 1850 sauber von 1920 zu trennen, geht mit Radiokarbon allein meistens nicht.

EIN RADIOKARBONJAHR IST KEIN KALENDERJAHR

Und damit sind wir bei dem Punkt, an dem die meisten Missverständnisse entstehen.

Die ganze Rechnung oben setzt stillschweigend voraus, dass der C14-Gehalt der Atmosphäre immer gleich war, und das war er nicht. Die kosmische Strahlung, die C14 erzeugt, wird vom Erdmagnetfeld und vom Sonnenwind moduliert, und beide schwanken. Das Magnetfeld ändert seine Stärke über Jahrtausende, die Sonnenaktivität über Jahrzehnte bis Jahrhunderte, und die Ozeanzirkulation verschiebt zusätzlich, wie viel Kohlenstoff wann zwischen Luft und Wasser ausgetauscht wird. Der atmosphärische Ausgangswert war also über die Jahrtausende ein bewegliches Ziel.

Deshalb liefert die Messung zunächst nur ein konventionelles Radiokarbonalter, und dieses muss über eine Kalibrationskurve in Kalenderjahre übersetzt werden.

Diese Kurve beruht auf umfangreichen, unabhängig datierten Messreihen. Sie ist aber nicht deren bloße Aneinanderreihung, sondern ein statistisch konstruiertes Modell dieser Daten, mit ausgewiesenen Unsicherheiten und modellierten Übergängen zwischen den Datensätzen. Wie dieses Modell gebaut wird, haben Timothy Heaton und Kollegen in einer eigenen Methodenarbeit beschrieben, und schon deren Titel nennt das Verfahren beim Namen, nämlich bayessche Splines mit Fehlern in den Variablen. Wer die Kurve als reine Messreihe verkauft, unterschlägt genau diese Schicht. Sie beruht auf Material, dessen Kalenderalter unabhängig bekannt ist, und dessen C14-Gehalt man einfach nachmisst. Der wichtigste Lieferant sind Baumringe. Ein Baum bildet pro Jahr einen Ring, und über überlappende Ringfolgen lebender und toter Hölzer lassen sich lückenlose Chronologien über viele Jahrtausende aufbauen. Man weiß bei jedem einzelnen Ring exakt, in welchem Kalenderjahr er gewachsen ist, und misst dann, wie viel C14 der Baum in diesem Jahr eingebaut hat. Für die ältesten Abschnitte kommen Jahresschichten in Seesedimenten, Korallen, Tropfsteine und Foraminiferen aus Meeressedimenten dazu.

Die aktuellen Kurven wurden 2020 publiziert. IntCal20 für die Nordhalbkugel, verantwortet von Reimer und Kollegen, SHCal20 für die Südhalbkugel unter Federführung von Hogg, und Marine20 für marines Material, erarbeitet von der Gruppe um Heaton. Dass die Hemisphären getrennt behandelt werden, hat einen messbaren Grund: Hogg und Kollegen beziffern den mittleren Versatz der Südhalbkugel auf 36 plus minus 27 Radiokarbonjahre, das Material dort erscheint also im Schnitt älter. Alle drei reichen von heute bis 55.000 Kalenderjahre zurück. Wenn jemand behauptet, die Kalibration sei Willkür, dann hat er eine Kurve vor sich, die aus Zehntausenden Einzelmessungen an unabhängig datiertem Material besteht, und die von konkurrierenden Arbeitsgruppen in mehreren Ländern gegengeprüft wird.

Jetzt kommt der entscheidende Effekt. Diese Kurve ist nicht glatt. Sie hat Buckel, Dellen und, am unangenehmsten, Plateaus. Ein Plateau ist ein Abschnitt, in dem die Kurve fast waagerecht verläuft, in dem also mehrere verschiedene Kalenderjahre denselben C14-Wert erzeugen. Trifft eure Messung ein solches Plateau, dann bekommt ihr kein scharfes Ergebnis, sondern ein breites, und häufig ein mehrgipfliges.

Das berühmteste dieser Plateaus liegt zwischen ungefähr 800 und 400 vor Christus und heißt Hallstatt-Plateau. Es ist der Grund, warum die europäische Eisenzeit chronologisch so zäh ist, und es ist der Grund, warum das Zertifikat, das ich euch jetzt zeige, drei Antworten gibt statt einer.

Das ist kein Messfehler und keine schlechte Probe, sondern das Ergebnis damaliger Schwankungen des atmosphärischen C14-Gehalts, beeinflusst unter anderem von Sonnenaktivität, Erdmagnetfeld und Kohlenstoffkreislauf.

DAS ZERTIFIKAT, ZEILE FÜR ZEILE

Ich nehme dafür einen realen Bericht aus meiner eigenen Praxis. Die Probenbezeichnung lautet „Female mummy 215, Thebes 1877“, das Material ist ein Zahn, konkret ein Oberkiefermolar. Mehr sage ich zur Herkunft nicht, weil Auftraggeber und Verfahrensdetails nicht auf meinen Blog gehören. Die Ergebnisse zeige ich vollständig, denn an ihnen könnt ihr lernen, wie so ein Dokument gelesen wird.

Wer sehen will, um wen es hier überhaupt geht, findet das Foto dieser Mumie und die Röntgenaufnahmen in einem [älteren Beitrag auf dieser Seite](#), der das Thema populärer angeht als dieser hier.

Die erste Zeile, die zählt, ist das Radiokarbonalter: 2517 plus minus 31 BP.

Die 2517 sind Radiokarbonjahre vor 1950, gerechnet mit der Libby-Halbwertszeit, korrigiert über die Fraktionierung. Die 31 sind die Standardabweichung, also 1 Sigma. Das bedeutet, grob gesprochen, eine Wahrscheinlichkeit von rund 68 Prozent, dass der wahre konventionelle Wert zwischen 2486 und 2548 liegt. Es bedeutet ausdrücklich nicht, dass irgendetwas an dieser Probe genau 2517 Jahre alt ist.

Die zweite Zeile ist der pMC-Wert: 73,10 plus minus 0,28. pMC heißt „percent Modern Carbon“, also der prozentuale Anteil am modernen Referenzkohlenstoff. 73,10 pMC bedeutet, dass die Probe 73,10 Prozent der normierten modernen Referenzaktivität aufweist. Das ist ausdrücklich nicht dasselbe wie die Aussage, exakt 26,90 Prozent ihres individuellen ursprünglichen Bestands seien zerfallen, denn diesen Ausgangsbestand kennt niemand. Gemessen hat das Gerät Isotopenverhältnisse, und der pMC-Wert ist die daraus berechnete zentrale Ergebnisgröße, aus der wiederum das konventionelle Radiokarbonalter abgeleitet wird, und zwar mit einer Formel, die auf dem Bericht ausgeschrieben steht: $t \text{ gleich minus } 8033 \text{ mal dem natürlichen Logarithmus aus pMC geteilt durch } 100$. Setzt 73,10 ein, und ihr bekommt 2517,1, also gerundet exakt die Zahl aus der ersten Zeile. Setzt die Unsicherheit ein, also 8033 mal 0,28 geteilt durch 73,10, und ihr bekommt 30,8, also gerundet die 31. Ihr könnt dieses Zertifikat mit einem Taschenrechner gegenprüfen. Mit den gerundeten Werten muss sich das ausgewiesene Alter näherungsweise reproduzieren lassen, und eine relevante Abweichung gehört mit dem Labor geklärt, bevor der Befund irgendwo zitiert wird. In dieser Konstante 8033 steckt übrigens die ganze Konvention aus dem vorigen Abschnitt versteckt, denn 8033 mal dem natürlichen Logarithmus von 2 ergibt 5568, also genau die Libby-

Halbwertszeit. Wer die Formel auf seinem Bericht ernst nimmt, kann die verwendete Halbwertszeit daraus zurückrechnen, ohne dass sie irgendwo ausgeschrieben stünde. Für die forensische Praxis merkt euch eine Faustregel, die euch mehr bringt als jede Formel: Ein Wert unter 100 beweist für sich allein noch kein Bildungsdatum vor 1950, denn fossiler Kohlenstoff, Reservoirwirkungen und die inzwischen wieder gesunkenen atmosphärischen Werte drücken ihn ebenfalls nach unten. Liegt er bei geeignetem terrestrischem Material dagegen deutlich über 100, und das geht bei diesem Isotop, dann enthält die Probe Bombenkohlenstoff, und das untersuchte Gewebe wurde nach Beginn der atmosphärischen Kernwaffentests gebildet. Ob daraus ein Geburtszeitraum, ein Todeszeitraum oder nur ein über Jahre integrierter Gewebezeitraum folgt, entscheidet allein die Wahl des Materials. Ein Blick auf eine einzige Zahl trennt trotzdem schon einmal die Größenordnungen.

Dann kommen die beiden stabilisotopischen Werte. Delta-13C liegt bei minus 19,06 Promille, Delta-15N bei 11,95 Promille. Nur der Kohlenstoffwert hat eine technische Funktion in der Altersrechnung, er dient der Fraktionierungskorrektur. Der Stickstoffwert geht in die C14-Berechnung überhaupt nicht ein, er ist ein eigenständiger Parameter für Ernährung und Umweltbedingungen. Danach erzählen sie etwas über die Ernährung, und darüber schreibe ich weiter unten mehr, unter anderem, weil ich mich an dieser Stelle beinahe selbst hereingelegt hätte.

Es folgen Aufbereitung und Referenzmaterialien, konkret eine Säure-Base-Säure-Behandlung mit anschließender Kollagenextraktion. Als Standards dienten NIST-OXII und Phthalsäureanhydrid. NIST-OXII dient als moderner Referenzstandard. Das Phthalsäureanhydrid ist fossiles, praktisch C14-freies Material, an dem der prozess- und gerätebedingte Blindwert kontrolliert wird, also die Frage, wie viel Fremdkohlenstoff der eigene Ablauf einschleppt. Diese Hintergrundkorrektur muss im Qualitätsmanagement eines Labors nachvollziehbar dokumentiert sein, auch wenn nicht sämtliche Rohdaten auf jedem Kundenzertifikat erscheinen.

Gemessen wurde auf einem Single Stage Accelerator Mass Spectrometer von NEC, aufbereitet mit einer automatischen Graphitisierungsanlage AGE-3 von Ionplus. Kalibriert wurde mit OxCal in der Version 4.4.4, jener Software von Christopher Bronk Ramsey, die in der Radiokarbonwelt als Standardwerkzeug gilt, gegen die Kurve nach Reimer und Kollegen aus dem Jahr 2020, also IntCal20, in der Variante für die nordhemisphärische Atmosphäre. Der Befehl selbst steht mit auf dem Bericht und lautet R_Date mit den Parametern Sample A, 2517 und 31. Im Plotkopf steht außerdem die Angabe r:5, und die ist ein kleines Minenfeld für Missverständnisse. Sie bedeutet nicht Revision 5, sondern eine Bin-Breite von 5 Jahren für die berechnete Wahrscheinlichkeitsverteilung. Wer daraus schließt, dass alle Intervallgrenzen durch 5 teilbar sein müssten, irrt sich, denn OxCal rundet die Bereiche in der Voreinstellung überhaupt nicht, und sein Bezugspunkt liegt nicht auf 1950, sondern auf der Mitte des Jahres 1950. Ausdrücklich vermerkt ist schließlich, dass weder ein bayessches Sequenzmodell noch eine Reservoirkorrektur noch ein regionaler Delta-R-Versatz angewendet wurde. Diese Zeile über das, was NICHT gerechnet wurde, ist forensisch

wertvoller als die meisten, die etwas behaupten, denn sie sagt euch, welche Annahmen offen geblieben sind.

Und das Ergebnis dieser Kalibration ist der Grund, warum ich diesen Bericht ausgewählt habe.

Bei 68,3 Prozent Wahrscheinlichkeit liegen 3 Intervalle vor: 774 bis 749 vor Christus mit 15,5 Prozent, 687 bis 666 vor Christus mit 12,5 Prozent, und 641 bis 569 vor Christus mit 40,3 Prozent. Bei 95,4 Prozent Wahrscheinlichkeit ebenfalls 3 Intervalle: 788 bis 720 mit 25,1 Prozent, 708 bis 662 mit 18,6 Prozent, und 653 bis 543 mit 51,7 Prozent.

Da steht eine Maschine im Wert eines Einfamilienhauses in guter Lage, sie zählt einzelne Atome aus einer Billion, sie erreicht eine Messpräzision von unter einem halben Prozent, und dann liefert sie euch für einen einzigen Zahn drei getrennte Zeitfenster, verstreut zwischen 788 und 543 vor Christus. Und der Bericht schreibt ausdrücklich dazu, dass diese 3 Bereiche Bestandteile einer einzigen Wahrscheinlichkeitsverteilung sind und nicht zu einem durchgehenden Intervall zusammengefasst werden dürfen. Wer aus 788 bis 543 eine Spanne macht, hat aus 3 Aussagen eine erfunden. Wer das für ein Versagen der Methode hält, hat den Aufbau der Kalibrationskurve nicht verstanden, denn es ist das genaue Gegenteil. Es ist die einzige ehrliche Auskunft, die zu geben ist, denn jedes dieser 3 Fenster ist unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und der Unsicherheit der Kalibrationskurve mit dem gemessenen Radiokarbonwert vereinbar. Die Mehrgipfligkeit entsteht, wie der Bericht es formuliert, weil die Messwahrscheinlichkeit zusammen mit der Unsicherheit der Kurve auf einen nicht monotonen Abschnitt von IntCal20 trifft, also auf eine Stelle, an der die Kurve nicht brav in eine Richtung läuft, sondern zurückschwingt. Ein Labor, das euch daraus eine einzige Jahreszahl macht, hat nicht besser gemessen, sondern eine mehrgipflige Wahrscheinlichkeitsverteilung auf einen irreführenden Punktwert reduziert.

Wir befinden uns hier im älteren Teil des Hallstatt-Plateaus, in genau jener Zone, in der die Kalibrationskurve mehrfach auf sich selbst zurückschwingt. Die 51,7 Prozent für das jüngste Fenster sind der wahrscheinlichste Einzelbereich, aber sie sind eben keine Gewissheit, sondern eine knappe Mehrheit.

DREI UHREN IN EINEM EINZIGEN MENSCHEN

Jetzt kommt der Teil, den ich für den wichtigsten des ganzen Textes halte, und er ist auch der Teil, den ich in der Praxis am häufigsten erklären muss, meistens Menschen, die eigentlich Bescheid wissen müssten.

Ein Mensch ist kein einheitliches Objekt. Ein Mensch ist ein Bündel von Geweben, die zu völlig unterschiedlichen Zeitpunkten entstanden sind und zu völlig unterschiedlichen Raten erneuert werden. Wenn ihr eine Probe entnehmt, entnehmt ihr nicht „den Menschen“, sondern ein bestimmtes Zeitfenster aus seinem Leben. Welches, entscheidet ihr mit der Wahl des Gewebes, und diese Entscheidung fällt vor dem Labor, nicht danach.

Douglas Ubelaker hat diese Logik 2014 im Journal of Forensic Sciences zur Standardübersicht zusammengefasst, und sie beginnt mit dem stabilsten Gewebe. Der Zahnschmelz ist die stabilste Uhr im gesamten Körper. Er mineralisiert in Kindheit und Jugend, in einer Reihenfolge, die je nach Zahnposition unterschiedlich früh oder spät liegt und für die der London Atlas von Sakher AlQahtani und Kollegen das gängige Referenzwerk ist, und danach passiert nichts mehr. Kein biologischer Umbau, kein relevanter Kohlenstoffumsatz, kein Nachwachsen. Wer als Erwachsener seinen Zahnschmelz verliert, bekommt keinen neuen. Was biologisch ein Nachteil ist, ist forensisch ein Geschenk, denn dieser Schmelz konserviert das atmosphärische Signal jener Kindheitsjahre unverändert bis zur Verwesung und weit über sie hinweg. Genau darauf beruht die Bestimmung des Geburtsjahrs über den Bombenpuls.

Das Dentin darunter verhält sich anders. Primärdentin entsteht zusammen mit Krone und Wurzel, danach lagert der Zahn lebenslang langsam Sekundärdentin an. Eine Gesamtprobe aus Dentin kann deshalb je nach beprobter Region überwiegend die Zahnbildungsphase abbilden, sie kann aber auch spürbare spätere Anteile enthalten, und welcher Abschnitt entnommen wurde, entscheidet darüber mit.

Der Knochen ist die unruhigste dieser Uhren. Knochen wird permanent umgebaut, abgebaut und neu aufgebaut, und das Kollagen darin ist deshalb ein gleitender Mittelwert über Jahre. Robert Hedges und Kollegen haben das 2007 im American Journal of Physical Anthropology am Femurschaft modelliert, an 67 Personen, die zwischen 1990 und 1993 in Australien verstorben waren, im Alter zwischen 40 und 97 Jahren, und sie haben dafür ausgerechnet den Bombenpuls als Marker benutzt. Ergebnis: Bei Frauen sinkt die Umsatzrate von etwa 4 Prozent pro Jahr mit 20 auf etwa 3 Prozent mit 80, bei Männern liegt sie im selben Zeitraum bei 1,5 bis 3 Prozent, und in der Wachstumsphase zwischen 10 und 15 Jahren schnellst sie auf 5 bis 15 Prozent hoch.

Der Satz aus dieser Arbeit, den ich für den folgenreichsten halte, lautet sinngemäß, dass menschliches Femurkollagen die Ernährung eines Individuums über einen deutlich längeren Zeitraum als 10 Jahre abbildet, einschließlich eines erheblichen Anteils an Kollagen, das bereits in der Jugend gebildet wurde. Ein Oberschenkelknochen ist also selbst bei einem Achtzigjährigen kein Fenster auf seine letzten Jahre, sondern trägt noch immer Material aus der Zeit, in der er Fahrradfahren gelernt hat.

Trabekelreiche Bereiche wie Rippen, Wirbel und Teile des Beckens setzen im Mittel schneller um als der kompakte Femurschaft, weil sie mehr Oberfläche pro Volumen bieten. Douglas Ubelaker, Bruce Buchholz und John Stewart haben daraus 2006 einen Trick gemacht, den ich für einen der elegantesten der ganzen Disziplin halte. Weil trabekulärer Knochen schneller umbaut, liegen seine Radiokarbonwerte bei einer Bildung vor 1963 höher als die der Kortikalis desselben Skeletts, und bei einer Bildung nach 1963 kehrt sich das Verhältnis um. Der Vergleich von trabekulärem und kortikalem Knochen aus demselben Toten kann also einen zusätzlichen Hinweis darauf geben, auf welcher Seite des Bombengipfels man steht. Demonstriert haben sie das an 2 Personen mit bekannten Geburtsjahren 1925 und 1926 und bekannten Todesjahren 1995 und 1959. Das ist ein eleganter Machbarkeitsnachweis und

keine allein tragfähige Entscheidungsregel, denn die Umsatzraten schwanken individuell und anatomisch erheblich. Punktgenau wird ihr Kollagen deshalb trotzdem nicht, auch dort bleibt es ein über Jahre integriertes Signal, und die Raten schwanken erheblich zwischen Personen, Alter, Geschlecht und Erkrankungen. Weichgewebe erneuert sich in Monaten. Kopfhaar wächst im Mittel ungefähr 1 Zentimeter pro Monat und lässt sich segmentweise messen, sodass ein langer Strang eine grobe Abfolge der letzten Lebensmonate ergibt. Eine Uhr ist das nicht, denn individuelle Wachstumsraten und Haarzyklen verschieben die Zuordnung. Und die Kristalline im Kern der Augenlinse entstehen, wie Niels Lynnerup und Kollegen 2008 in PLoS ONE gezeigt haben, fast vollständig um die Zeit der Geburt. Danach gibt es nur noch eine sehr geringe und weiter abnehmende Neubildung, während einmal gebildete Kristalline praktisch keinem Umsatz mehr unterliegen. Mit einem passenden Bildungsmodell lässt sich daraus das Geburtsjahr schätzen.

Wie sehr das in der Praxis auseinanderläuft, zeigt der dritte Fall aus der Arbeit von Bertrand und Kollegen, den ich oben angekündigt habe. Ein Skelett bei Valenciennes, Verdacht auf eine bestimmte Identität. Man datierte verschiedene Gewebe desselben Menschen. Die Knochenprobe ergab einen kalibrierten Gewebezeitraum zwischen 1998 und 2002 mit 84,6 Prozent Wahrscheinlichkeit. Die Haarprobe ergab 2013 bis 2018 mit 83,3 Prozent. Roh gemessen liegen dazwischen rund 15 Jahre, an ein und derselben Leiche, mit ein und derselben Methode, im selben Labor. Die Autoren nennen den Grund beim Namen, den langsameren Umbau des Knochengewebes, und sie rechnen ihn heraus. Für trabekulären Wirbelknochen setzen sie nach Ubelaker eine mittlere Verzögerung von 8 Jahren an und kommen damit auf 2006 bis 2010, womit sich die beiden Befunde deutlich annähern. Die DNA-Analyse bestätigte anschließend die Identität eines Mannes, der ein Jahrzehnt vor dem Fund als vermisst gemeldet worden war, und die Zähne lieferten dazu passend das Geburtsjahr.

Wer in diesem Fall nur den Knochen datiert hätte, hätte das Todesjahr um mehr als ein Jahrzehnt zu früh angesetzt und wäre bei der Recherche in Vermisstendatenbanken im falschen Zeitraum gelandet, nicht wegen eines Messfehlers, sondern wegen der Wahl des Gewebes.

WAS DAS FÜR MEINEN MOLAR BEDEUTET

Und damit zurück zu meinem Zertifikat, denn dort steht ein Wort, an dem alles hängt: Kollagenextraktion.

Kollagen sitzt im Zahn nicht im Schmelz. Schmelz ist zu über 95 Prozent anorganisches Mineral und enthält praktisch kein Kollagen. Das Kollagen sitzt in den organischen Zahngeweben, vor allem im Dentin und im Zement der Wurzel. Aus der Angabe Kollagenextraktion folgt deshalb sicher, dass kein Schmelzkarbonat gemessen wurde, und das sind bereits 2 verschiedene Materialien im selben Zahn mit 2 verschiedenen Zeitfenstern.

Was daraus aber nicht folgt, und an dieser Stelle muss ich mich korrigieren, ist die Behauptung, es sei reines Dentinkollagen gewesen. Auch der Zement enthält Kollagen, und angelagert wird er bis ins Erwachsenenalter. Andrea Czermak und Kollegen haben 2020 genau davor gewarnt: Wer einen Zahn horizontal in Hälften oder Viertel schneidet, riskiert, mehrere Wachstumsschichten zu vermischen und dabei unerwünschten Zement oder Sekundärdentin einzuschließen. Ihr Gegenvorschlag ist eine Mikrobeprobung an anatomisch definierten Stellen, die genau jene Zonen ausspart.

Ob bei meiner Probe ausschließlich Dentin extrahiert wurde oder eine gemischte organische Zahnfraktion, entscheidet die mechanische Präparation vor der Extraktion, und die steht auf meinem Zertifikat nicht. Ohne diese Angabe darf ich nicht von Dentinkollagen sprechen. Bertrand und Kollegen beschreiben in ihrem dritten Fall genau dieses Problem: Weil sie genug Material brauchten, nahmen sie eine großzügige Zahnprobe, die mehrere Gewebe umfasste, was die Verzögerung vergrößerte und die Genauigkeit senkte. Um das Geburtsjahr scharf zu bekommen, hätte man Schmelz oder Primärdentin an einer genau definierten Stelle beproben müssen.

Daraus folgt eine Aussage, die der Bericht in seinem Abschnitt über forensische Grenzen selbst festhält, nämlich dass dieses Alter je nach beprobtem Zahngewebe und dessen Bildungs- und Umbaugeschichte nicht identisch mit dem Todesdatum der Person sein muss. Im Klartext: Die 2517 plus minus 31 BP datieren nicht unmittelbar den Tod dieser Frau. Sie bilden den Bildungszeitraum genau jener organischen Zahnfraktion ab, die tatsächlich extrahiert wurde. Enthielt die Probe überwiegend Primärdentin, dann liegt der Schwerpunkt wahrscheinlich in Kindheit und Jugend. Waren zusätzlich Sekundärdentin oder Zement enthalten, können deutlich spätere Anteile aus dem Erwachsenenleben eingeflossen sein.

Wenn diese Frau mit 40 gestorben ist, kann der Schwerpunkt des gemessenen Signals je nach Zahn und beprobter Dentinregion Jahre bis Jahrzehnte vor ihrem Todesjahr liegen. Bei einer Probe aus dem ersten vorchristlichen Jahrtausend verschwindet dieser Versatz weitgehend in der Streuung der kalibrierten Intervalle, die hier ohnehin über mehr als 2 Jahrhunderte verteilt liegen. Er verschwindet aber nicht deshalb, weil er nicht existiert, sondern weil das Rauschen größer ist als das Signal. Und er ist systematisch, er zeigt immer in dieselbe Richtung, nämlich zu alt.

Bei einem modernen Fall wäre derselbe Versatz verheerend. Wer in einem Waldfall den Zahn datiert und das Ergebnis als Todesjahr in ein Gutachten schreibt, liefert der Staatsanwaltschaft eine Zahl, die um eine halbe Lebensspanne danebenliegen kann. Genau darum ist die Frage, welches Gewebe man einschickt, keine logistische Frage, sondern die zentrale fachliche Entscheidung des gesamten Verfahrens.

Es gibt noch eine zweite Konsequenz, die kaum jemand mitdenkt. Wenn die Probe überwiegend früh gebildetes Dentin enthielt, dann beschreiben auch die Isotopenwerte auf diesem Bericht nicht die Ernährung dieser Frau als Erwachsene. Sie beschreiben mit hoher Wahrscheinlichkeit überwiegend die Ernährung während der Zahnbildung, können je nach

Zusammensetzung der Probe aber auch spätere Anteile enthalten. Wer aus minus 19,06 und 11,95 Promille auf ihren sozialen Status im Erwachsenenleben schließt, liest die falsche Lebensphase und weiß es nicht einmal.

Eine Rippe oder ein anderer trabekelreicher Knochen hätte im Mittel ein späteres Lebensfenster abgebildet als kompakter Femurschaft. Punktgenau datiert hätte auch ihr Kollagen den Tod nicht, sondern wieder einen über Jahre integrierten Zeitraum. Das ist der eigentliche Zielkonflikt: Das Gewebe mit dem präzisesten Zeitbezug ist selten auch das mit der besten Erhaltung. Zähne gewinnen diesen Konflikt häufig, weil sie außergewöhnlich gut überdauern, aber man bezahlt dafür mit einem Zeitfenster, das lange vor dem Tod liegen kann.

DER NILFISCH, DEN ICH BEINAHE ERFUNDEN HÄTTE

Jetzt die Stelle, an der ich mich selbst korrigieren muss, und ich schreibe sie ausdrücklich hin, weil ihr sehen sollt, wie so ein Fehler entsteht und wie er verhindert wird.

Der Stickstoffwert auf meinem Bericht liegt bei 11,95 Promille, und das ist ein hoher Wert. Die Standardinterpretation von erhöhtem Delta-15N lautet: höhere Trophiestufe, also mehr tierisches Protein, und bei Süßwasserfischanteil steigt der Wert besonders deutlich. Bei einer Frau aus Theben, also aus einer Stadt direkt am Nil, liegt der Schluss auf der Hand, dass sie viel Fisch gegessen hat.

Und wenn sie viel Nilfisch gegessen hätte, dann hätten wir ein Problem. Denn Süßwasser, das durch Kalkgestein fließt, enthält gelösten Karbonatkohlenstoff aus geologisch altem Gestein, in dem kein C14 mehr steckt. Wasserpflanzen bauen diesen alten Kohlenstoff ein, Fische fressen die Wasserpflanzen, Menschen fressen die Fische, und am Ende misst sich ein Mensch, der nie etwas falsch gemacht hat, um Jahrhunderte zu alt. Das nennt man den Süßwasser-Reservoireffekt, und im Nileinzugsgebiet gibt es reichlich Kalk. Eine Untersuchung von Süßwassermuscheln aus dem Nil wurde später als Hinweis auf einen Reservoirversatz von ungefähr 500 Radiokarbonjahren interpretiert.

Ich hatte die Passage im Kopf schon fertig. Erhöhtes Delta-15N, Nilfisch, Reservoireffekt, Datum womöglich mehrere hundert Jahre zu alt, ein eleganter Bogen von der Isotopenzeile zur Datierungszeile auf demselben Blatt.

Dann habe ich die Literatur geprüft, wie ich es bei jeder Behauptung tue, bevor sie in einen Text kommt. Und die Literatur hat mir die Passage zerlegt.

Alexandra Touzeau und acht Kollegen haben 2014 im Journal of Archaeological Science genau diese Frage untersucht, an ägyptischen Mumien aus einem Zeitraum von 5.500 bis 1.500 Jahren vor heute, an harten und weichen Geweben, mit Kohlenstoff, Stickstoff und zusätzlich Schwefel. Ihr Befund zu meinem Punkt ist unmissverständlich. Erstens: Touzeau und Kollegen interpretieren die hohen Delta-15N-Werte der untersuchten ägyptischen Population in erster Linie als Ariditätssignal und nicht als Beleg für einen besonders hohen

Anteil tierischen Proteins. In extrem trockenen Ökosystemen verschieben sich die Stickstoffwerte in Böden und Pflanzen nach oben, und dieses Signal wandert durch die gesamte Nahrungskette, ohne dass jemand mehr Fleisch oder mehr Fisch gegessen hätte. Zweitens, und das ist der eigentliche Beweis: In der von Touzeau und Kollegen untersuchten Population sprachen die Schwefelisotope gegen einen regelmäßigen Verzehr von Fisch wie dem Nilbarsch. Für meine Frau aus Theben ist das eine Aussage über ihre Zeit und ihre Region, aber kein Befund über sie selbst, denn ein eigener Schwefelwert liegt für sie gerade nicht vor. Drittens war die Ernährung fast ausschließlich C3-basiert, der C4-Anteil lag unter 10 Prozent, und die Herkunft der Nahrung war nach früheren Strontiumdaten auf das Niltal begrenzt.

Meine schöne Passage war also falsch. Nicht knapp daneben, sondern in der Kausalkette verkehrt herum.

Was mich daran beschäftigt, ist nicht der Fehler selbst, sondern wie plausibel er sich angefühlt hat. Erhöhter Stickstoff, Fluss vor der Haustür, bekannter Reservoireffekt, alles fügt sich. Genau so entstehen falsche Gutachten. Nicht durch Nachlässigkeit, sondern durch eine Kette, die an jeder einzelnen Stelle vernünftig aussieht und trotzdem am falschen Ende herauskommt, weil ein Glied nie geprüft wurde. Ich habe das in Verfahren gesehen, in denen es um mehr ging als um eine Frau, die vor 2.600 Jahren gestorben ist.

Und es gibt noch eine Lehre, die praktischer ist. Hätte ich damals zusätzlich Delta-34S bestimmen lassen, also Schwefel, und hätte ich lokale Vergleichswerte gehabt, dann hätte sich die Frage deutlich besser eingrenzen lassen. Ein alleiniger Beweis für oder gegen Fischkonsum wäre auch der Schwefel nicht gewesen. Bei meiner Probe fehlt er, und deshalb bleibt für diese eine Frau die Antwort offen. Der Bericht selbst formuliert es an dieser Stelle streng und sagt, dass die berichteten Werte für Kohlenstoff und Stickstoff allein einen ernährungsbedingten Reservoireffekt weder ausschließen noch beziffern können, weil dafür lokale Vergleichswerte, ein Ernährungskontext und gegebenenfalls ein gemischtes Kalibrationsmodell nötig wären. Das ist kein befriedigender Satz, aber er ist der ehrliche.

Der Süßwasser-Reservoireffekt selbst bleibt trotzdem real, und wo er zuschlägt, schlägt er hart zu.

RESERVOIREFFEKTE, DIE WIRKLICH ZUSCHLAGEN

Der bekannteste ist der marine. Die Tiefsee tauscht ihren Kohlenstoff nur langsam mit der Atmosphäre aus, weshalb Meerwasser an C14 verarmt ist. Alles, was daraus lebt, erscheint gegenüber zeitgleichen terrestrischen Proben typischerweise um mehrere hundert Radiokarbonjahre älter. Marine20 modelliert diesen globalen und zeitlich veränderlichen Effekt, regionale Abweichungen werden über lokale Korrekturwerte berücksichtigt. Ein Mensch, der überwiegend vom Meer lebte, trägt einen Teil dieser Verschiebung in seinen Knochen, und man muss den marinen Anteil seiner Nahrung aus den Isotopen abschätzen, um korrigieren zu können.

Der Süßwassereffekt ist tückischer, weil er lokal völlig unterschiedlich ausfällt. Karbonatgestein ist die häufigste, aber nicht die einzige Ursache, denn auch alter organischer Kohlenstoff, Grundwasser und geothermische Kohlenstoffquellen können erhebliche Versätze erzeugen. Bente Philippsen hat die Größenordnung 2013 in einer Übersichtsarbeit zusammengetragen, und die Zahl darin sollte jeden vorsichtig machen: Innerhalb eines einzigen Flusses können Altersunterschiede von bis zu 2.000 Radiokarbonjahren auftreten.

Das sauberste Beispiel liefern die steinzeitlichen Fundplätze am Eisernen Tor, jener Schlucht, in der die Donau zwischen Serbien und Rumänien durchbricht. Gordon Cook und Kollegen haben dort 2001 in Radiocarbon menschliche Überreste und unmittelbar zu den Bestattungen gehörende Artefakte aus Knochen terrestrischer Huftiere datiert. Die menschlichen Proben erschienen um etwa 300 bis 500 Jahre älter als das terrestrische Vergleichsmaterial, was die Autoren mit einem starken Anteil von Donaufisch an der Ernährung erklärten.

Stellt euch das kurz in einem Ermittlungskontext vor. Zwei Skelette in derselben Grube, dieselbe Erdschicht, dieselbe Verfüllung, und die Datierung setzt sie 400 Jahre auseinander. Wer diesen Effekt nicht kennt, konstruiert daraus eine Belegungsgeschichte, eine Nachbestattung, im schlimmsten Fall eine Erzählung über Umbettungen, die es nie gegeben hat. Und er wird sie überzeugend erzählen, weil er ja Zahlen hat.

Es gibt noch weitere Varianten dieses Effekts. In geothermisch aktiven Gebieten steigt C14-freies Kohlendioxid aus dem Boden auf, wird von Pflanzen aufgenommen und altert alles, was davon lebt. Und es gibt den Alt-Holz-Effekt: Ein Balken kann aus dem Kernholz eines bereits sehr alten Baumes stammen, sodass die Datierung nicht das Baujahr des Hauses angibt, sondern das Wachstumsjahr eines Holzes, das beim Fällen längst alt war.

WAS EINE PROBE VERJÜNGT UND WAS SIE ALTERN LÄSST

Verunreinigung ist die zweite große Fehlerquelle, und sie funktioniert in beide Richtungen.

Nach unten, also verjüngend, wirkt alles, was modernen Kohlenstoff einträgt, etwa feine lebende Wurzeln, die in poröse Knochenstruktur einwachsen, oder schlicht Handschweiß bei der Bergung. Huminsäuren aus dem umgebenden Boden gehören ausdrücklich nicht in diese Schublade, denn sie können je nach Herkunft und Alter des Bodenmaterials in beide Richtungen verschieben. Konservierungsmittel gehören dagegen in keine der beiden Richtungen eindeutig, und genau das macht sie so lästig. Biogene oder junge Stoffe wie manche Schellacke verjüngen eine Probe. Erdölbasierte Paraffine, Acrylate und Kunstharze bestehen aus fossilem, praktisch C14-freiem Kohlenstoff und lassen sie im Gegenteil altern. Bei historischen Mischungen weiß oft niemand mehr, welches Produkt überhaupt verwendet wurde, und manche Polymere lassen sich chemisch nur unvollständig wieder entfernen. Historische Sammlungspräparate wurden über Jahrzehnte mit Schellack, Polyvinylacetat,

Paraffinen, Leimen und Harzen behandelt, teils zur Stabilisierung, teils zur Verschönerung, und fast nie mit einer Dokumentation, die 100 Jahre später noch auffindbar wäre.

Deshalb sind alte anatomische Sammlungsschädel die undankbarsten Proben, die man bekommen kann. Sie sehen prächtig aus, sie sind vollständig, sie haben oft sogar eine Beschriftung, und sie sind chemisch eine Wundertüte. Man weiß nicht, was in den 1890er Jahren draufkam, man weiß nicht, was in den 1950er Jahren nachgebessert wurde, und man weiß nicht, ob das Stück zwischendurch in einer Werkstatt lag, in der es mit dem Zeug in Berührung kam, das man dort eben so verwendet. Genau diese Stücke sind es aber, über die Verfahren geführt werden.

Nach oben, also alternd, wirkt alter Kohlenstoff aus Karbonaten. Kalk aus dem Grundwasser, der sich in poröses Material einlagert. Deshalb die Säure-Base-Säure-Behandlung: Die erste Säure löst Karbonate, die Base entfernt Huminsäuren, die zweite Säure entfernt Kohlendioxid, das sich während der Basenbehandlung wieder aus der Luft angelagert hat.

Bei Knochen und Zähnen kommt die Kollagenextraktion dazu, meist nach der modifizierten Longin-Methode oder mit zusätzlicher Ultrafiltration. Ob das Kollagen anschließend brauchbar ist, prüft man an Qualitätskennzahlen, und die solltet ihr kennen, wenn ihr je ein Zertifikat bewerten müsst. Das atomare Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff muss zwischen 2,9 und 3,6 liegen, ein Kriterium, das auf Michael DeNiro und eine Arbeit in Nature aus dem Jahr 1985 zurückgeht. Der Kohlenstoffanteil sollte über 13 Prozent liegen, der Stickstoffanteil über 4,8 Prozent, Werte, die auf Stanley Ambrose zurückgehen. Es sind etablierte Richtwerte und keine amtlichen Grenzen, denn jedes Labor bewertet Kollagenausbeute und Elementgehalte zusätzlich anhand eigener validierter Bereiche. Werte außerhalb validierter Bereiche sprechen für unzureichende Erhaltung, für Fremdeintrag oder für eine problematische Aufbereitung. Sie erzwingen entweder die Zurückweisung der Probe oder eine nachvollziehbare Begründung mit zusätzlichen Qualitätsdaten.

Auf meinem Bericht stehen diese Kennzahlen nicht. Das ist kein Vorwurf an das Labor, denn solche Werte können in dessen Qualitätsunterlagen durchaus vorliegen, aus dem Kundenzertifikat selbst sind sie nur nicht beurteilbar. Es ist aber der Grund, warum ich bei diesem Bericht über die Ernährung dieser Frau nur eingeschränkt reden kann, und warum ich das auch so hinschreibe, statt so zu tun, als wäre es egal.

DIE MASCHINE, DIE MILLIONEN KOSTET UND TROTZDEM VERSCHLEISST

Wie zählt man ein Atom, das einmal in einer Billion vorkommt?

Dafür gibt es zwei Wege, und der ältere davon heißt Zerfallszählung. Man legt die Probe in ein Proportionalzählrohr oder einen Flüssigszintillationszähler und wartet darauf, dass Atome zerfallen, weil jeder Zerfall ein messbares Signal erzeugt. Der Nachteil liegt auf der Hand: Bei einer Halbwertszeit von über 5.000 Jahren zerfällt pro Sekunde fast nichts. Man braucht Gramm an Material und Zählzeiten von Tagen bis Wochen.

Der moderne Weg heißt Beschleunigermassenspektrometrie, kurz AMS, und er wartet nicht auf den Zerfall, sondern zählt die vorhandenen C14-Atome direkt. Das reduziert die benötigte Materialmenge um etwa den Faktor 1000 und die Messzeit auf Stunden. Deutsche Labore geben als Untergrenze für ihre Standardleistung Größenordnungen von einem halben Milligramm Kohlenstoff nach der chemischen Vorbehandlung an, wobei routinemäßige Messungen an ausreichend großen und gut erhaltenen jüngeren Proben häufig analytische Unsicherheiten von wenigen Jahrzehnten erreichen.

Wie das technisch geht, ist eine Kette von Tricks, und einer davon ist so elegant, dass ich ihn jedes Mal gern erkläre.

Für die klassische Messung mit Graphitkathoden wird die Probe zuerst zu Graphit reduziert und in ein Metallplättchen gepresst, daneben gibt es inzwischen auch Gasionenquellen. Dieses Plättchen wird in einer Ionenquelle mit Cäsium beschossen, wodurch Kohlenstoffatome herausgeschlagen und dabei negativ geladen werden. Genau hier liegt der Trick. Die große Störgröße bei Masse 14 wäre Stickstoff-14, das ja praktisch dasselbe Gewicht hat und in jeder Probe reichlich vorkommt. Aber Stickstoff bildet kein stabiles negatives Ion. Ein N-Minus-Ion zerfällt sofort wieder. Indem man ausschließlich mit negativen Ionen arbeitet, verschwindet das gravierendste Interferenzproblem der gesamten Messung von selbst, ohne ein einziges zusätzliches Bauteil.

Danach werden die Ionen beschleunigt und durch einen Stripper geschickt, ein dünnes Gas oder eine Folie, in der Molekülionen derselben Masse durch Kollisionen zerlegt werden. Übrig bleiben einzelne Atomkerne, die über Magnete nach Masse getrennt und einzeln gezählt werden. Parallel misst das Gerät die Verhältnisse von C14 zu C12 und von C13 zu C12, weshalb die Fraktionierungskorrektur direkt aus derselben Messung fällt.

Die frühen Anlagen waren Ungetüme. William Kieser und Kollegen haben 2015 die Anlage der Universität Ottawa beschrieben, einen maßgefertigten 3-Megavolt-Tandem, rund 44 Tonnen schwer, etwa 25 Meter lang, mit Einrichtungskosten von rund 10 Millionen kanadischen Dollar. Stewart Freeman und Kollegen schreiben über das schottische SUERC, eine dreijährige Förderung des Joint Infrastructure Fund über 3,9 Millionen Pfund habe dort Beschleuniger, eigens errichtetes Gebäude und Personal finanziert, eröffnet wurde die Anlage im September 2002. Und die National Science Foundation führt in ihrer Vergabeliste für 1998 unter der Antragsnummer 9871035 einen Betrag von 1.335.000 Dollar an die University of Arizona, allein für die Anschaffung eines neuen Geräts. Kommerzielle Labore formulieren es kürzer und sagen, Aufbau und Instandhaltung kosteten mehrere Millionen Dollar.

Was diese Zahlen nicht zeigen, ist der Betrieb, und dafür gibt es einen Beleg, den ich sehr schätze, weil er ungewöhnlich offen ist. Ravi Prasad und Kollegen vom Center for Applied Isotope Studies der University of Georgia haben 2013 in Radiocarbon beschrieben, warum ihr Institut einen zweiten Beschleuniger anschaffte. Nach einem Jahrzehnt Betrieb häuften sich die Ausfälle durch verschlissene Komponenten im Beschleunigertank. Allein in den 2 Jahren davor mussten Ladekette, Generating Voltmeter, die Lager des Kettenmotors, der Wellenmotor und die Riemenscheiben der Ladepulleys ersetzt werden. Ein Gerät für

Millionen, und was es lahmlegt, sind Lager und Riemenscheiben, also genau die Sorte Teile, die auch an einem Rasenmäher kaputtgeht.

Genau darauf antwortet die heutige Gerätegeneration. Der MICADAS wurde von Hans-Arno Synal und Kollegen an der ETH Zürich entwickelt und wird heute kommerziell von Ionplus vertrieben. Mit 3,2 mal 2,6 mal 2 Metern ist er kaum größer als ein Kleinwagen, und er arbeitet mit 200 Kilovolt statt mit Megavolt. Diese Spannung liefert ein Festkörpernetzteil ohne bewegliche Teile, der Terminal ist vakuumisoliert, und deshalb braucht die Anlage kein Schwefelhexafluorid als Isoliergas. Der Heliumstripper erreicht bis zu 47 Prozent Transmission, der Probenwechsler fasst 40 Kathoden, die Präzision liegt bei 0,2 Prozent oder besser, Blindwerte jenseits von 50.000 Radiokarbonjahren sind Routine, und die Strahlung liegt 10 Zentimeter neben dem Gehäuse unter 0,2 Mikrosievert pro Stunde.

Und trotzdem, und das ist der Punkt, an dem ich vom Techniklob zur kalten Feststellung wechsele: Das AMS-Radiokarbonlabor Erlangen hat 2015 nach 20 Jahren seinen Betrieb eingestellt. Ingo Barlovic hat das damals festgehalten, und er hat auch die naheliegende Frage gestellt, warum ausgerechnet in einer Zeit geschlossen wird, in der Provenienzforschung und Artenschutz im Kunsthandel wichtiger werden und nicht unwichtiger. Ein etabliertes Labor, an einer deutschen Universität, mit internationalem Ruf. Nach meiner eigenen Erfahrung werden deutsche Proben deshalb regelmäßig auch an Labore im europäischen Ausland vergeben.

DER BOMBENPULS, DAS UNFREIWILLIGE GESCHENK DES KALTEN KRIEGES

Seit den frühen 1950er Jahren führten mehrere Atommächte oberirdische Kernwaffentests durch, in einer Zahl und Sprengkraft, die man sich heute kaum noch vergegenwärtigt. Die intensivsten Serien, die den Bombenpuls prägten, lagen in den 1950er und frühen 1960er Jahren. Diese Explosionen setzten enorme Neutronenmengen frei, und Neutronen tun in der Atmosphäre genau das, was sie immer tun: Sie treffen Stickstoff und erzeugen Kohlenstoff-14.

Das Ergebnis war eine nahezu Verdopplung des atmosphärischen C14-Gehalts gegenüber dem vorindustriellen Niveau, mit dem Maximum im Jahr 1963 auf der Nordhalbkugel. Die Südhalbkugel folgte mit ein bis zwei Jahren Verzögerung, weil sich die Luftmassen der Hemisphären nur langsam mischen und die Tests überwiegend im Norden stattfanden. 1963 wurde der partielle Teststoppvertrag unterzeichnet. Er beendete atmosphärische Tests allerdings nur für seine damaligen Vertragsparteien, einzelne Staaten setzten sie noch über ein Jahrzehnt länger fort, und trotzdem lag das atmosphärische Maximum auf der Nordhalbkugel im Jahr 1963. Seither sinkt die Kurve wieder.

Wichtig ist, warum sie sinkt. Nicht durch Zerfall, denn dafür ist die Halbwertszeit viel zu lang. Sie sinkt, weil der überschüssige Kohlenstoff aus der Luft in Ozeane und Biosphäre wandert, und dieser Austausch hat eine charakteristische Zeitkonstante von rund 16 Jahren. Ingeborg Levin und Bernd Kromer haben das an der Messreihe des Schauinsland im

Schwarzwald bestimmt, einer der längsten kontinuierlichen atmosphärischen C14-Zeitreihen überhaupt.

Damit existiert für den Zeitraum ab 1955 eine steil verlaufende Kurve, an der sich Jahre unterscheiden lassen, wo die klassische Methode nur Jahrhunderte trennen kann. Die aktuellen Referenzdatensätze stammen von Quan Hua und Kollegen und decken inzwischen den Zeitraum 1950 bis 2019 ab, aufgeteilt in 5 Zonen der atmosphärischen Zirkulation, weil die Kurve regional unterschiedlich verläuft.

Kirsty Spalding, Bruce Buchholz, Henrik Druid und Jonas Frisén haben 2005 in Nature gezeigt, was das forensisch bedeutet. Weil Zahnschmelz nach seiner Bildung nicht mehr umgebaut wird, trägt er den atmosphärischen Wert genau jener Kindheitsjahre, in denen die Krone mineralisiert ist. Misst man diesen Wert und gleicht ihn gegen die Bombenkurve ab, unter Berücksichtigung des bekannten Bildungszeitpunkts des jeweiligen Zahns, erhält man das Geburtsjahr. Die Autoren geben eine Genauigkeit von 1,6 Jahren an. Zum Vergleich nennen sie im selben Atemzug, was die klassische morphologische Altersschätzung an Skelett und Zahnabnutzung bei Erwachsenen leistet: 5 bis 10 Jahre.

In der Literatur begegnet euch daneben ein Wert von 1,0 plus minus 0,6 Jahren, und der stammt aus einer späteren Arbeit von Kanar Alkass und Kollegen, erschienen 2010 in Molecular and Cellular Proteomics und gestützt auf 44 Zähne von 41 Personen. Dort steht er neben einer zweiten Zahl, die genauso interessant ist. Die parallel durchgeführte Aspartat-Razemisierung im Dentin, die das tatsächliche Lebensalter beim Tod schätzt, kam auf 5,4 plus minus 4,2 Jahre. Die beiden Verfahren korrelierten mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,66.

Warum überhaupt zwei verschiedene Verfahren? Weil sie verschiedene Fragen beantworten. Der Radiokarbonwert im Schmelz sagt, wann jemand geboren wurde. Die Razemisierung im Dentin sagt, wie alt jemand geworden ist. Aus beiden zusammen lässt sich das Todesjahr mit einer quantifizierbaren Unsicherheit abschätzen, ohne dass man ein einziges Dokument braucht.

Eden Johnstone-Belford und Soren Blau haben 2020 die gesamte Literatur zur Bombenpulsdatierung unidentifizierter Überreste durchgesehen und kommen zu einem zweigeteilten Befund. Die Ergebnisse sind zuverlässig und genau, die bisherigen Untersuchungen beruhen aber überwiegend auf kleinen Stichproben und stammen fast ausschließlich von der Nordhalbkugel. Und genau das ist der Punkt, an dem diese Methode für unidentifizierte Tote unbezahlbar wird. Ein Skelett ohne Papiere, ohne Kleidung, ohne Zeugen liefert euch über die Anthropologie ein geschätztes Geschlecht, eine geschätzte Körperhöhe und eine grobe Altersspanne. Damit sucht ihr in einer Vermisstenatenbank mit Tausenden Einträgen. Kommt ein Geburtsjahr mit 1 bis 2 Jahren Unsicherheit dazu, kann sich der Kreis passender Vermisstenfälle erheblich verkleinern und die Ermittlungsarbeit deutlich fokussieren. In manchen Fällen ist das der Unterschied zwischen einer Identifizierung und einem Grab ohne Namen.

DIE UHR, DIE GERADE ABLÄUFT

Und jetzt die schlechte Nachricht, die in der öffentlichen Wahrnehmung praktisch nicht vorkommt.

Der Bombenpuls verschwindet gerade aus der Atmosphäre. Er wird nicht schwächer im Sinne von unschärfer, er verschwindet als Signal, weil die Kurve wieder auf das natürliche Niveau zurückfällt und in absehbarer Zeit sogar darunter, angetrieben vom Suess-Effekt, also von unseren eigenen fossilen Emissionen. Heather Graven hat das 2015 in den Proceedings of the National Academy of Sciences durchgerechnet, und der Befund ist unangenehm eindeutig: Wenn wir weiter fossilen, C14-freien Kohlenstoff in die Luft blasen, dann wird die Atmosphäre radiokarbonmäßig immer älter, und irgendwann liefert frisches Material Werte, die von altem Material nicht mehr zu unterscheiden sind.

Für die Datierung von Gewebe, das in den kommenden Jahren gebildet wird, heißt das: Die Bombenpuls-Methode verliert ihre Eindeutigkeit. Bei Zahnschmelz, der heute oder künftig gebildet wird, kann die Zuordnung über die Bombenkurve deutlich mehrdeutiger werden und zusätzliche Informationen erfordern. Wie schnell das geht, hängt davon ab, wie sich die fossilen Emissionen entwickeln.

Hier muss ich einem Missverständnis vorbeugen, dem ich selbst aufgesessen bin. Das Bombenpulssignal in Geweben, die in den vergangenen Jahrzehnten gebildet wurden, bleibt erhalten und lässt sich auch in 50 Jahren noch messen. Ein Zahnschmelz aus dem Jahr 1970 trägt seinen damaligen Wert unverändert weiter, völlig unabhängig davon, was die heutige Atmosphäre macht. Für Altfälle schließt sich also kein Fenster. Schwieriger wird die Zuordnung von Gewebe, das heute und künftig entsteht, weil dessen Werte zunehmend mit vorindustriellen und älteren Bereichen überlappen. Das Werkzeug verschwindet nicht aus den bestehenden Fällen, es verliert seine Eindeutigkeit für künftig gebildetes Material.

WAS DIE ISOTOPE NOCH MITLIEFERN

Wenn man ohnehin Kollagen extrahiert und Isotope misst, dann fällt eine ganze Reihe von Informationen fast nebenbei mit an, und diese Informationen sind bei einem unbekannten Toten oft mehr wert als das Datum selbst.

Delta-13C trennt die Nahrungsketten voneinander. Pflanzen mit unterschiedlichen Photosynthesewegen unterscheiden sich systematisch. Die meisten heimischen europäischen Nahrungspflanzen gehören zur C3-Gruppe, Mais und Hirse zur C4-Gruppe. Ein hoher Anteil von C4-Pflanzen wie Mais oder Hirse kann sich in den Kohlenstoffwerten abzeichnen, sofern andere Nahrungsquellen und lokale Vergleichswerte berücksichtigt werden.

Delta-15N steigt mit der Trophiestufe, also mit dem Anteil tierischen Proteins, und es ist bei gestillten Säuglingen erhöht, weil das Kind sozusagen eine Stufe über der Mutter steht. Über

Zahnschnitte lässt sich daraus rekonstruieren, wann ein Kind abgestillt wurde. Und, wie ich oben schmerzhaft gelernt habe, es steigt auch mit der Trockenheit des Ökosystems, weshalb man es niemals allein interpretieren darf.

Delta-34S, also Schwefel, hilft zusammen mit Kohlenstoff und Stickstoff dabei, marine, terrestrische und teilweise auch limnische Nahrungsquellen voneinander zu trennen. Ein alleinstehender Test auf Fischverzehr ist es nicht, aber genau diese Kombination brachte Touzeau und Kollegen zu ihrem Befund.

Delta-18O im Zahnschmelz kann Hinweise auf Trinkwasser, Klima und Mobilität während der Zahnbildung geben. Ernährung, Physiologie, Stillzeit und die Zubereitung von Nahrung und Wasser können dieses Signal allerdings verschieben.

Und das Strontiumverhältnis, also ^{87}Sr zu ^{86}Sr , ist einer der wichtigsten geochemischen Marker für Mobilität und mögliche Aufwuchsregionen. Strontium stammt aus dem geologischen Untergrund, wandert über Wasser und Nahrung in den Körper und wird in das Kalziumgitter des Zahnschmelzes eingebaut. Weil dieser Schmelz danach nicht mehr umgebaut wird, konserviert er das geologische Signal der Region, in der jemand aufgewachsen ist. Vergleicht man Zahnschmelz und Knochen desselben Menschen, sieht man Hinweise darauf, ob sich die geochemische Umgebung zwischen Kindheit und späterem Leben verändert hat. Den Sterbeort bezeichnet der Knochenwert damit noch nicht, er bildet eher den Aufenthalts- und Ernährungskontext der letzten Jahre ab. Ein Vorbehalt gehört dazu, und er wird ernster, je moderner der Fall ist: In einer Welt, in der Lebensmittel aus aller Herren Länder im Regal liegen, wird das Herkunftssignal verwaschen. Bei vormodernen Populationen lassen sich lokale Nahrungsketten häufig besser abgrenzen als heute. Auch dort bleibt die Zuordnung aber probabilistisch und hängt von geeigneten lokalen Vergleichsdaten ab. Bei einem heutigen Vermissten ist sie ein Hinweis und kein Beweis.

Zusammengenommen können geeignet ausgewählte Gewebe Hinweise auf Geburtszeitraum, Todeszeitraum, Aufwuchsregion, Ernährung und Migration liefern, also ein biologisches Profil eines Menschen, von dem niemand den Namen kennt. Dafür braucht es allerdings mehrere Proben mit unterschiedlichen Bildungs- und Umsatzzeiten, nicht eine einzige.

DER LEDERGÜRTEL, DAS ELFENBEIN UND DIE GEFÄLSCHTE LEINWAND

Bis hierhin ging es um Menschen. Datierbar ist aber alles, was einmal am Kohlenstoffkreislauf teilgenommen hat, und das ist ziemlich viel.

Bei einer Grabung findet man einen Ledergürtel. Leder ist Tierhaut, Tierhaut ist Kollagen, Kollagen ist datierbar. Dasselbe gilt für Textilien aus Leinen, Wolle oder Baumwolle, für Holz und Holzkohle, für Pergament und Papier, für Knochenwerkzeuge, für Speisereste in einer Tonscherbe, für Samen und Getreidekörner. Nicht datierbar ist die mineralische Matrix von Metall, Stein und Keramik, weil dort kein biogener Kohlenstoff steckt. Organische

Magerungen, Speisereste, Ruß und andere kohlenstoffhaltige Bestandteile darin oder daran sind es dagegen sehr wohl. Eine Bronzeklinge datiert man nicht, man datiert das Holz ihres Griffs oder die organischen Reste an ihr.

Beim Elfenbein wird es politisch. Kevin Uno und Kollegen haben 2013 in den Proceedings of the National Academy of Sciences gezeigt, dass man über die Bombenkurve bestimmen kann, wann der beprobte Abschnitt eines Stoßzahns gebildet wurde, woraus sich bei geeigneter, zuletzt gebildeter Substanz der Todeszeitpunkt des Tieres eng eingrenzen lässt. Damit lässt sich unterscheiden, ob ein beschlagnahmter Stoßzahn aus legalen Altbeständen stammt oder aus einer Tötung nach dem Handelsverbot. Thure Cerling und Kollegen haben das 2016 an beschlagnahmtem Material fortgeführt und dabei auch die Zeitspanne zwischen Tod und Beschlagnahme bestimmt, was Rückschlüsse auf Schmuggelwege erlaubt. Eine Methode, die für Archäologie entwickelt wurde, beweist heute Wilderei.

Bei Kunst wird es unterhaltsam. Wer ein Gemälde als alt verkaufen will, braucht eine alte Leinwand, und alte Leinwände sind beschaffbar. Was schwerer zu fälschen ist, sind die organischen Bindemittel. Enthält das Material Kohlenstoff mit Bombenpuls-Signatur, dann ist es nach 1955 gewachsen, und die Diskussion über den angeblichen Meister des 18. Jahrhunderts ist beendet, bevor sie beginnt. Laura Caforio und Kollegen haben das 2014 publiziert. Ich mag diese Anwendung besonders, weil sie eine schöne Umkehrung enthält: Ausgerechnet die radioaktive Verseuchung der Atmosphäre, das schmutzigste Erbe des Kalten Krieges, ist heute eines der wirkungsvollsten Mittel, um Altersbehauptungen bei Kunstwerken zu widerlegen. Eine Fälschung kann sie nachweisen, Urheberschaft oder Provenienz bestätigen kann sie nicht.

Und dann gibt es noch die industrielle Anwendung, die kaum jemand kennt, obwohl sie täglich läuft. Wenn ein Unternehmen behauptet, sein Kunststoff sei biobasiert, also aus nachwachsenden Rohstoffen statt aus Erdöl, dann lässt sich das messen. Erdöl ist C14-frei, Pflanzenmaterial nicht. Aus dem normierten Anteil modernen Kohlenstoffs wird nach dem Standard ASTM D6866 der biobasierte Kohlenstoffanteil berechnet. Eine Nachhaltigkeitsbehauptung, die man nicht glauben muss, sondern nachzählen kann. Es gibt Gebiete, in denen ich mir das häufiger wünschen würde.

WER NICHT DATIERT, ERMITTELT INS BLAUE

Jetzt der Teil, bei dem ich meine Zurückhaltung ablege.

In den Verfahren, die ich über die Jahre begleitet habe, ist mir ein Muster begegnet, das mich weniger wütend als müde macht. Es werden Verfahren eröffnet, Wohnungen durchsucht, Sammlungen beschlagnahmt, Menschen als Beschuldigte geführt, und in einer erschreckenden Zahl dieser Fälle wird die eine Untersuchung, die den entscheidenden Zeitraum objektiv eingrenzen könnte, nie beauftragt. Man ermittelt monatelang über die Herkunft von Knochen, deren Alter niemand bestimmt hat.

Die Labore existieren, sie arbeiten international, und die Probenmengen sind minimal. Was nach meiner Erfahrung am häufigsten fehlt, ist nicht das Budget, sondern das Wissen darum, dass es diese Möglichkeit überhaupt gibt. Man beauftragt nicht, was man nicht kennt.

Und deshalb schreibe ich diesen Text. Nicht als Werbung, sondern weil ich glaube, dass ein Ermittler, der versteht, was ein pMC-Wert über 100 bedeutet, bessere Entscheidungen trifft als einer, der auf ein Foto schaut und sagt, das sehe alt aus. Ein Schädel, der wie neu aussieht, kann Jahrtausende alt sein. Ein Skelett, das jahrhundertealt wirkt, kann aus den 1970er Jahren stammen. Der Augenschein ist bei menschlichen Überresten der unzuverlässigste Zeuge überhaupt, und trotzdem entscheidet er in der Praxis über die Verfahrenseröffnung.

Es gibt an dieser Stelle eine Grenze, die ich ausdrücklich benenne, weil ich sie nicht überschreiten will. Ob und wie deutsche Gerichte Radiokarbonbefunde im Einzelfall bewerten, dazu ist mir nach meiner Recherche keine veröffentlichte Entscheidung bekannt, die diese Frage ausführlich behandelt. Was ich sagen kann, ist, dass die forensische Fachliteratur die Methode an den üblichen Maßstäben misst, also Überprüfbarkeit, standardisierte Protokolle, bekannte Fehlerraten, Validierung durch begutachtete Publikationen und Akzeptanz in der Fachgemeinschaft, und sie als Verfahren für tragfähig hält. Die Beweiskraft eines einzelnen Befundes hängt davon allerdings unberührt ab von Materialauswahl, Probenaufbereitung, Messunsicherheit, Kalibration, Reservoir- und Ernährungseffekten und der fachgerechten Interpretation. Das ist eine wissenschaftliche Aussage und keine juristische. Wer eine juristische braucht, muss sie sich von jemandem holen, der dafür ausgebildet ist.

WAS DIESE METHODE NICHT KANN

Damit wir uns richtig verstehen, hier die Liste dessen, was ihr nicht erwarten dürft, in ganzen Sätzen und ohne beschönigende Formulierung.

C14 datiert nicht den Todeszeitpunkt, sondern das Ende des Kohlenstoffaustauschs, und je nach Gewebe liegen dazwischen Jahre bis Jahrzehnte. C14 datiert nicht den mineralischen Anteil von Gestein, Metall oder Keramik, und es datiert keine Fossilien jenseits von 50.000 Jahren, weil dort entweder kein biogener Kohlenstoff vorhanden ist oder der verbleibende Anteil gegenüber Messuntergrund und Kontaminationsrisiko nicht mehr zuverlässig auflösbar ist. Geeignete organische Rückstände an oder in solchen Objekten sind dagegen sehr wohl datierbar. C14 identifiziert keine Person, es grenzt nur einen Zeitraum ein, und die Identifizierung braucht DNA, Zahnstatus oder andere Vergleichsmerkmale. C14 sagt nichts über die Todesursache. Und C14 liefert kein Datum, sondern eine Verteilung, wie ihr an meinen 3 Intervallen gesehen habt.

Wer diese Grenzen sauber ausspricht, hilft dem Verfahren. Wer sie verschweigt und Sicherheit vortäuscht, richtet mehr Schaden an als jemand, der gar nichts gemessen hat,

denn eine falsche Zahl mit Laborstempel ist schwerer aus einer Akte zu bekommen als eine ehrliche Wissenslücke.

ZURÜCK IN DEN WALD

Die Leiche in der Jeans, mit der ich angefangen habe, lässt sich mit dem, was ihr jetzt wisst, in wenigen Schritten einordnen.

Man nimmt möglichst mehrere Gewebe mit verschiedenen Bildungs- und Umsatzzeiten, niemals nur eine einzige Probe. Zahnschmelz kann über den Bombenpuls das Geburtsjahr eingrenzen, sofern die Bezaehlung erhalten ist. Haare, Nägel oder andere schnell umgesetzte Gewebe liegen zeitlich am nächsten am Tod, sofern sie überhaupt noch vorhanden und nicht kontaminiert sind. Trabekelreicher Knochen ergänzt das Bild, liefert wegen des verzögerten Umbaus aber ebenfalls kein präzises Todesjahr, sondern ein über Jahre gemitteltes Signal, und kompakter Femurschaft ist für eine möglichst todesnahe Datierung besonders ungünstig, weil sein Kollagen einen langen Zeitraum integriert.

Zeigt ein geeignetes Gewebe einen deutlich über 100 liegenden pMC-Wert, dann wurde es nach Beginn des Bombenpulses gebildet. Damit ist die mögliche medizinisch-rechtliche Relevanz geklärt, nicht aber automatisch eine Straftat, denn das Material kann ebenso aus einer legalen Sammlung oder einer bekannten Bestattung stammen. Liegt der Wert nicht signifikant über 100, lässt sich daraus allein noch keine einfache Trennung zwischen historisch und modern ableiten, denn seit den 2020er Jahren liegt frisch gebildetes Material selbst wieder unter 100. Dann müssen klassische Kalibration, Bombenpulskurven, mögliche Reservoirkorrekturen und weitere Gewebe gemeinsam ausgewertet werden. Ergibt das einen deutlich historischen Zeitraum, dann ändert das regelmäßig die Zuständigkeit und die Zielrichtung der Untersuchung, es beendet sie aber nicht. Ob strafrechtliche, denkmalrechtliche, wissenschaftliche, humanitäre oder provenienzbezogene Fragen offenbleiben, entscheidet sich unabhängig vom bloßen Alter des Fundes.

Der ganze Rest davon ist sauberes Handwerk. Dokumentation der Fundsituation, saubere Entnahme ohne Kontamination, Vermerk jeder Behandlung, die das Material je erfahren hat, und ein Bericht, der die Grenzen des Ergebnisses genauso deutlich benennt wie das Ergebnis selbst.

Was in diesem konkreten Fall herauskam, gehört nicht hierher. Aber ich kann euch sagen, wie sich das anfühlt, wenn die Zahlen zurückkommen. Es ist ein sehr stiller Moment. Da liegt ein Blatt Papier, auf dem ein Mensch auf ein Verhältnis von Isotopen reduziert ist, und dieses Verhältnis entscheidet, ob eine Familie nach Jahrzehnten eine Antwort bekommt oder ob ein Aktenzeichen geschlossen wird. Ich habe in diesem Beruf gelernt, Befunde kalt zu formulieren. Dieser eine Moment bleibt trotzdem nicht kalt.

ZU TEUER, ZU SELTEN, UND MIR FÄLLT NICHTS BESSERES EIN

Damit sind wir wieder bei dem Punkt, den ich am Anfang angekündigt habe, und er ist der einzige, bei dem ich diesen Text nicht kalt beenden kann.

Wir haben ein Verfahren, das seit über 75 Jahren funktioniert, das an fast jedem organischen Material arbeitet, das rund 50.000 Jahre zurückreicht, dessen Fehlergrenzen bekannt und publiziert sind, und das eine Frage beantwortet, an der ganze Ermittlungen hängen. Und es wird viel zu selten eingesetzt. Bertrand und Kollegen schreiben es 2024 offen hin, dass die Methode in der forensischen Anthropologie noch immer zu wenig genutzt wird, und sie nennen als Gründe Kosten und Bearbeitungsdauer, die von Praktikern regelmäßig überschätzt würden. Das deckt sich mit meiner Erfahrung, und fachlicher Zweifel ist es jedenfalls nicht. Eine Datierung kostet Geld, ein Beschleuniger kostet Millionen, ein Labor kostet laufend, und dazu kommen institutionelle Abläufe und schlicht fehlende Kenntnis der Möglichkeiten. Irgendwo in dieser Kette sitzt jemand, der ein Budget verwaltet und entscheidet, dass man auch ohne auskommt.

Man kommt nicht ohne aus. Man ermittelt dann nur so, als käme man ohne aus, und das ist ein Unterschied, den man erst bemerkt, wenn das Ergebnis Jahre später jemanden entlastet oder belastet, der die ganze Zeit über in der falschen Schublade lag.

Deshalb wäre es an der Zeit, ernsthaft nach Alternativen zu suchen, nach Verfahren, die dieselbe Frage billiger beantworten. Und hier muss ich ehrlich sein, denn ich habe keinen gleichwertigen Ersatz anzubieten. Es gibt günstigere Verfahren, die vorsortieren oder ergänzen können, etwa die Aspartat-Razemisierung im Dentin, die ich weiter oben beschrieben habe, dazu histologische und spektroskopische Methoden. Ein Partnerverfahren ist aber kein Ersatz, denn die Razemisierung schätzt das Lebensalter und nicht den Zeitpunkt. Einen universellen Ersatz, der dieselbe direkte Isotopenchronologie über diese Material- und Zeitspanne liefert, kenne ich nicht. Ich stelle die Aufgabe hier also hin, ohne sie lösen zu können, und ich halte das für die redlichere Variante, als so zu tun, als hätte ich eine Idee in der Schublade.

Was bis dahin bleibt, ist die Methode selbst, richtig angewendet. Wer menschliche Überreste findet, ruft die Polizei und nimmt keine eigenen Proben, weil eine unsachgemäße Entnahme ein Ergebnis zerstört, bevor es entsteht. Wer als Ermittler oder Gutachter mit so einem Fund zu tun hat, stellt zuerst die Frage nach dem Zeitraum und erst danach alle anderen. Und wer ein Zertifikat auf den Tisch bekommt, liest es so, wie ich es euch hier vorgelesen habe, mit dem pMC-Wert, der Formel, den kalibrierten Bereichen und der Zeile über das, was nicht gerechnet wurde.

Ein Zahn aus Theben, gemessen mit einem Gerät, das einzelne Atome zählt, liefert 3 Zeitfenster, einen hohen Stickstoffwert, der im ägyptischen Vergleich eher mit Trockenheit vereinbar ist als mit regelmäßigem Fischkonsum, und ein Zeitfenster, das möglicherweise überwiegend die Zahnbildungsphase dieser Frau abbildet und jedenfalls nicht ihren Tod. Nichts davon ist ein Mangel der Methode. Es ist die Methode, ehrlich gelesen.

Und wenn ihr aus diesem ganzen Text einen einzigen Satz mitnehmt, dann diesen: Fragt bei jedem Datierungsergebnis, das euch jemand vorlegt, welches Gewebe gemessen wurde. Die Antwort auf diese eine Frage entscheidet häufiger über die Richtigkeit eines Befundes als die gesamte übrige Diskussion darüber.

Mehr habe ich zu diesem Thema nicht, und ich hoffe, es ist euch damit ein Stück nähergekommen.

Dieser Beitrag ergänzt den älteren Text zur C14-Analyse an menschlichen Überresten auf rauscher.xyz und führt dessen Thema technisch aus. Redaktioneller Stand: 31.07.2026.

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Dieser Beitrag dient ausschließlich der Information und der allgemeinen Meinungsbildung. Er stellt keine rechtliche, medizinische oder kriminaltechnische Beratung dar und ersetzt weder die Begutachtung durch eine qualifizierte Fachperson noch die Beauftragung eines akkreditierten Labors im Einzelfall. Die zitierten Arbeiten bilden den Stand einer wissenschaftlichen Diskussion ab und begründen keine Handlungsempfehlung. Angaben zu Rechtsfragen, insbesondere zu Verjährung und Beweiswürdigung, sind allgemeine Beschreibungen und keine Rechtsberatung. Wer menschliche Überreste auffindet, verständigt unverzüglich die Polizei und nimmt keine eigenen Proben. Für Entscheidungen, die Leserinnen und Leser auf Grundlage dieses Textes treffen, wird eine Haftung, soweit gesetzlich zulässig, ausgeschlossen.

QUELLEN

- Alkass, K., Buchholz, B. A., Ohtani, S., Yamamoto, T., Druid, H., & Spalding, K. L. (2010). Age estimation in forensic sciences: Application of combined aspartic acid racemization and radiocarbon analysis. **Molecular & Cellular Proteomics**, 9(5), 1022–1030. <https://doi.org/10.1074/mcp.M900525-MCP200>
- AlQahtani, S. J., Hector, M. P., & Liversidge, H. M. (2010). Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. **American Journal of Physical Anthropology**, 142(3), 481–490. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21258>
- Ambrose, S. H. (1990). Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. **Journal of Archaeological Science**, 17(4), 431–451.
- Anonymisierter AMS-Laborbericht zur Probe „Female mummy 215, Thebes 1877“, interne Kennung Sample A, unveröffentlicht, Archiv des Autors.
- Barlovic, I. (2015, 8. Dezember). C-14 Labor Erlangen wurde geschlossen. about-africa.de. <https://www.about-africa.de/diverses-unsortiertes/631-c-14-labor-erlangen-wurde-geschlossen>
- Bertrand, B., Clauzel, T., Richardin, P., Bécart, A., Morbidelli, P., Hédouin, V., & Marques, C. (2024). Application and implications of radiocarbon dating in forensic case work: When medico-legal significance meets archaeological relevance. **Forensic Sciences Research**, 9(3), owae046. <https://doi.org/10.1093/fsr/owae046>
- Bronk Ramsey, C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. **Radiocarbon**, 51(1), 337–360. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
- Caforio, L., Fedi, M. E., Mandò, P. A., Minarelli, F., Peccenini, E., Pellicori, V., Petrucci, F. C., Schwartzbaum, P., & Taccetti, F. (2014). Discovering forgeries of modern art by the 14C bomb peak. **European Physical Journal Plus**, 129, 6. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2014-14006-6>
- Cerling, T. E., Barnette, J. E., Chesson, L. A., Douglas-Hamilton, I., Gobush, K. S., Uno, K. T., Wasser, S. K., & Xu, X. (2016). Radiocarbon dating of seized ivory confirms rapid decline in African elephant populations and

provides insight into illegal trade. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 113(47), 13330–13335. <https://doi.org/10.1073/pnas.1614938113>

Cook, G. T., Bonsall, C., Hedges, R. E. M., McSweeney, K., Boroneanț, V., & Pettitt, P. B. (2001). A freshwater diet-derived ^{14}C reservoir effect at the Stone Age sites in the Iron Gates Gorge. **Radiocarbon**, 43(2A), 453–460.

Czermak, A., Fernández-Crespo, T., Ditchfield, P. W., & Lee-Thorp, J. A. (2020). A guide for an anatomically sensitive dentine microsampling and age-alignment approach for human teeth isotopic sequences. **American Journal of Physical Anthropology**, 173(4), 776–783. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24126>

DeNiro, M. J. (1985). Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. **Nature**, 317, 806–809. <https://doi.org/10.1038/317806a0>

Freeman, S., Bishop, P., Bryant, C., Cook, G., Fallick, A., Harkness, D., Metcalfe, S., Scott, M., Scott, R., & Summerfield, M. (2004). A new environmental sciences AMS laboratory in Scotland. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, 223–224, 195–198.

Godwin, H. (1962). Half-life of radiocarbon. **Nature**, 195, 984. <https://doi.org/10.1038/195984a0>

Graven, H. D. (2015). Impact of fossil fuel emissions on atmospheric radiocarbon and various applications of radiocarbon over this century. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 112(31), 9542–9545. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504467112>

Heaton, T. J., Blaauw, M., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Reimer, P. J., & Scott, E. M. (2020). The IntCal20 approach to radiocarbon calibration curve construction: A new methodology using Bayesian splines and errors-in-variables. **Radiocarbon**, 62(4), 821–863. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.46>

Heaton, T. J., Köhler, P., Butzin, M., Bard, E., Reimer, R. W., Austin, W. E. N., Bronk Ramsey, C., Grootes, P. M., Hughen, K. A., Kromer, B., Reimer, P. J., Adkins, J., Burke, A., Cook, M. S., Olsen, J., & Skinner, L. C. (2020). Marine20, the marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP). **Radiocarbon**, 62(4), 779–820. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.68>

Hedges, R. E. M., Clement, J. G., Thomas, C. D. L., & O'Connell, T. C. (2007). Collagen turnover in the adult femoral mid-shaft: Modeled from anthropogenic radiocarbon tracer measurements. **American Journal of Physical Anthropology**, 133(2), 808–816. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20598>

Hogg, A. G., Heaton, T. J., Hua, Q., Palmer, J. G., Turney, C. S. M., Southon, J., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Boswijk, G., Bronk Ramsey, C., Pearson, C., Petchey, F., Reimer, P., Reimer, R., & Wacker, L. (2020). SHCal20 Southern Hemisphere calibration, 0–55,000 years cal BP. **Radiocarbon**, 62(4), 759–778. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.59>

Hua, Q., Turnbull, J. C., Santos, G. M., Rakowski, A. Z., Ancapichún, S., De Pol-Holz, R., Hammer, S., Lehman, S. J., Levin, I., Miller, J. B., Palmer, J. G., & Turney, C. S. M. (2022). Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2019. **Radiocarbon**, 64(4), 723–745. <https://doi.org/10.1017/RDC.2021.95>

Ionplus AG. MICADAS, technische Spezifikation. <https://www.ionplus.ch/micadas>

Johnstone-Belford, E. C., & Blau, S. (2020). A review of bomb pulse dating and its use in the investigation of unidentified human remains. **Journal of Forensic Sciences**, 65(3), 676–685. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14227>

Kieser, W. E., Zhao, X.-L., Clark, I. D., Cornett, R. J., Litherland, A. E., Klein, M., Mous, D. J. W., & Alary, J.-F. (2015). The André E. Lalonde AMS Laboratory: The new accelerator mass spectrometry facility at the University of Ottawa. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, 361, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.014>

Levin, I., & Kromer, B. (1997). Twenty years of atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observations at Schauinsland station, Germany. **Radiocarbon**, 39(2), 205–218.

Libby, W. F., Anderson, E. C., & Arnold, J. R. (1949). Age determination by radiocarbon content: World-wide assay of natural radiocarbon. **Science**, 109(2827), 227–228. <https://doi.org/10.1126/science.109.2827.227>

Lynnerup, N., Kjeldsen, H., Heegaard, S., Jacobsen, C., & Heinemeier, J. (2008). Radiocarbon dating of the human eye lens crystallines reveal proteins without carbon turnover throughout life. **PLOS ONE**, 3(1), e1529. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001529>

National Science Foundation. (1998). Major Research Instrumentation Program, 1998 MRI awards, Antrag 9871035. <https://www.nsf.gov/od/oia/programs/mri/1998.jsp>

- Philippson, B. (2013). The freshwater reservoir effect in radiocarbon dating. **Heritage Science**, 1, 24. <https://doi.org/10.1186/2050-7445-1-24>
- Ravi Prasad, G. V., Noakes, J. E., Cherkinsky, A., Culp, R., & Dvoracek, D. (2013). The new 250 kV single stage AMS system at CAIS, University of Georgia: Performance comparison with a 500 kV compact tandem machine. **Radiocarbon**, 55(2–3), 319–324.
- Reimer, P. J., Austin, W. E. N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hajdas, I., Heaton, T. J., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., Manning, S. W., Muscheler, R., ... Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). **Radiocarbon**, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Spalding, K. L., Buchholz, B. A., Bergman, L.-E., Druid, H., & Frisén, J. (2005). Forensics: Age written in teeth by nuclear tests. **Nature**, 437(7057), 333–334. <https://doi.org/10.1038/437333a>
- Strafgesetzbuch (StGB), § 78 Absatz 2, Verjährungsfrist. Bundesministerium der Justiz. https://www.gesetze-im-internet.de/stgb/_78.html
- Stuiver, M., & Polach, H. A. (1977). Discussion: Reporting of ^{14}C data. **Radiocarbon**, 19(3), 355–363. <https://doi.org/10.1017/S0033822200003672>
- Synal, H.-A., Stocker, M., & Suter, M. (2007). MICADAS: A new compact radiocarbon AMS system. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, 259(1), 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.01.138>
- Touzeau, A., Amiot, R., Blichert-Toft, J., Flandrois, J.-P., Fourel, F., Grossi, V., Martineau, F., Richardin, P., & Lécuyer, C. (2014). Diet of ancient Egyptians inferred from stable isotope systematics. **Journal of Archaeological Science**, 46, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.03.005>
- Ubelaker, D. H. (2014). Radiocarbon analysis of human remains: A review of forensic applications. **Journal of Forensic Sciences**, 59(6), 1466–1472. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12535>
- Ubelaker, D. H., Buchholz, B. A., & Stewart, J. E. B. (2006). Analysis of artificial radiocarbon in different skeletal and dental tissue types to evaluate date of death. **Journal of Forensic Sciences**, 51(3), 484–488. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00125.x>
- Uno, K. T., Quade, J., Fisher, D. C., Wittemyer, G., Douglas-Hamilton, I., Andanje, S., Omondi, P., Litoroh, M., & Cerling, T. E. (2013). Bomb-curve radiocarbon measurement of recent biologic tissues and applications to wildlife forensics and stable isotope (paleo)ecology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 110(29), 11736–11741. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302226110>
- Völkerstrafgesetzbuch (VStGB), § 5, Unverjährbarkeit. Bundesministerium der Justiz. https://www.gesetze-im-internet.de/vstgb/_5.html

SCHLAGWÖRTER: Was ist eine C^{14} -Datierung, C^{14} -Datierung, Radiokarbondatierung, Radiokarbonmethode, Kohlenstoff-14 Halbwertszeit, Altersbestimmung Knochen, Bombenpuls, Kalibrationskurve IntCal20, Zahnschmelz Geburtsjahr, forensische Anthropologie

IMPRESSUM

intelligent piXel GmbH
International Institute of Forensic Expertise (IIFE)
Enzianstraße 4a
82319 Starnberg, Deutschland

KONTAKT

george@rauscher.xyz · Telegram @intelligentpixel

GESCHÄFTSFÜHRER / PROKURISTIN

Geschäftsführer: George A. Rauscher
Prokuristin: Dr. Louise Morgott

VERANTWORTLICH FÜR JOURNALISTISCHE UND REDAKTIONELLE INHALTE

Verantwortlich für journalistische und redaktionelle Inhalte gemäß § 18 Abs. 2 MStV:
George A. Rauscher, c/o intelligent piXel GmbH, Enzianstraße 4a, 82319 Starnberg

UST-IDNR. / HANDELSREGISTER

USt-IdNr.: DE291416044
Handelsregister: HRB 207 679, Amtsgericht München