



# Isotopenanalyse: Anwendungen und Grenzen

## 1 Vorbemerkungen

### Isotope

Isotope unterscheiden sich nur in der Neutronenanzahl. Mit der Zahl der Protonen ist auch die der Elektronen und deshalb der Aufbau der Elektronenhülle genau gleich, so daß sich Isotope eines Elementes chemisch exakt gleich verhalten und mit chemischen Methoden nicht getrennt werden können.

**Die Isotopenzusammensetzung der Elemente ist überall auf der Erde und für alle Zeiten genau gleich und unveränderlich.**

Ausnahmen sind stabile Isotope, die als Töchter radioaktiver Mutterisotope neu entstehen.

### Spurenelemente

Spurenelemente werden biologisch und chemisch teilweise sehr stark an- oder abgereichert. Werte im Gewebe erlauben kaum einen Rückschluß auf Nahrung Geologie. Für die Isotope der Spurenelemente gilt diese Einschränkung nicht. Alle verfälschenden Prozesse betreffen alle Isotope gleichermaßen, so daß ihr Verhältnis zueinander unverändert bleibt.

### Fraktionierung

Vor allem Verdampfung und biologische Prozesse verursachen eine geringe Fraktionierung der Isotope. Wegen der Kleinheit der Änderung gibt man den gemessenen Anteil nicht absolut an, sondern seine relative Änderung im Vergleich zu einem Standard.  $\delta^{15}\text{N} = 4\text{‰}$  bedeutet also einen Gehalt an schwerem Stickstoff im Gewebe, der um 0,4% über dem der Umgebungsluft liegt, der anstatt 0,366% also 0,3675% beträgt. Bei allen so ausgedrückten Differenzwerten ist stets die verwendete Referenz mit anzugeben.

Es handelt sich hier um sehr kleine, normalerweise vernachlässigbare Effekte. Daraus folgt direkt, daß alle anderen ähnlich kleinen Wirkungen, im Sinne der Fragestellung also Störgrößen, jetzt ebenfalls dieselbe Größenordnung erreichen und nicht mehr vernachlässigt werden dürfen. Zum Beispiel die wird die an- und Abreicherung des schweren Sauerstoffs je nach Kontext als Proxy für die folgenden Größen verwendet:

- Die Menge des in Eisschilden gebundenen Wassers
- Die Oberflächentemperatur der Meere
- Der Salzgehalt des Oberflächenwassers der Meere
- Die globale klimatische Mitteltemperatur
- Die Entfernung von der Küste in Hauptwindrichtung
- Die regionale Höhenlage
- Die regionale mittlere Jahrestemperatur
- Die regionale Niederschlagsmenge oder Aridität

Absolute Meßwerte an Funden enthalten deshalb selten eine verwertbare Aussage sondern nur der Vergleich mit jeweils passend gewählten Referenzmessungen.

## 2 Spurenelemente, $^{87}\text{Sr}$ , $^{206}, ^{207}\text{Pb}$

Strontium-87 ist das Zerfallsprodukt von Rubidium-87 und die drei wichtigsten Bleisotope bilden die Endpunkte der Thorium- und der beiden Uranzerfallsreihen. Ihr Anteil hängt also vom Alter und der Zusammensetzung des Gesteins ab.

Der Zahnschmelz wird in der Kindheit angelegt und die anorganische Knochensubstanz etwa alle zehn Jahre erneuert.

### 2.1 Wanderung in der Glockenbecherzeit

[Pr98] Der Boden in Bayern besteht südlich der Donau aus Sediment und Löß, nordöstlich aus Granit mit erhöhtem Anteil an  $^{87}\text{Sr}$ .

### 2.2 „Ötzi“, die Mumie vom Similaun

[Mü03] In den Alpen und ihrem Umland existieren zahlreiche charakteristisch unterschiedliche Gesteine.

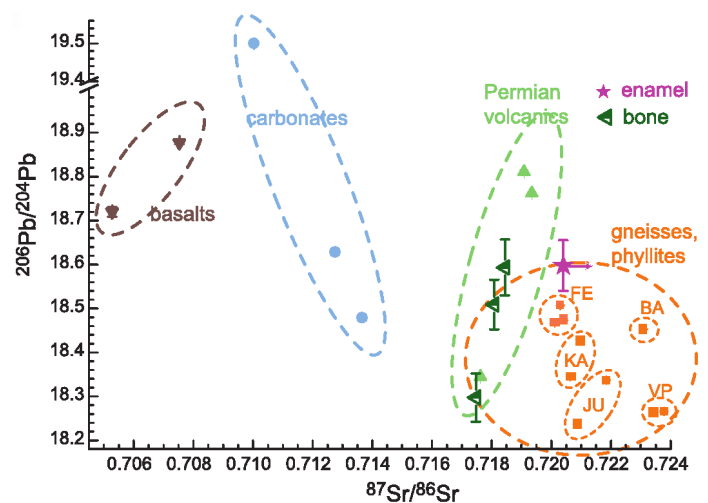


Abbildung 1: Vergleich der Isotopenwerte mit Gesteinen [Mü03]

### 2.3 Mobilität im britischen Frühneolithikum

[Bu03] Schwankungen der Strontiumwerte bestätigen eine größtenteils mobile Lebensweise mit allenfalls vorübergehender Sesshaftigkeit.

## 3 Wasser, $^2\text{H}$ und $^{18}\text{O}$

### Fraktionierung beim Verdunsten

Bei gleicher Temperatur und kinetischer Energie bewegen sich die schweren Wassermoleküle  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$  und  $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$  etwas langsamer und verdunsten etwas weniger. Ebenso kondensieren sie etwas stärker aus.

Während des gesamten Holozäns blieben die Eisbedeckung und damit die Zusammensetzung der Meere sowie die Verteilung der Klimazonen näherungsweise konstant. In diesem Zeitraum hängt die Zusammensetzung des Regenwassers also vor allem von der Entfernung zur Küste in Hauptwindrichtung und von der Höhenlage ab.

### Referenzwerte der Messungen

Referenzen für die Angabe von Sauerstoff und Kohlenstoff sind SMOW, Standard Mean Ocean Water, und PDB, Pee Dee Belemnite, fossile *Belemnitella americana* aus der kreidezeitlichen Pee Dee Formation in Südcarolina. Ohne Kenntnis der Referenz sind Angaben zu  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta^{13}\text{C}$  nicht vergleichbar.

### 3.1 Die Mumie vom Similaun

[Mü03] An der Wasserscheide des Alpenkammes stammt das Wasser des Regens entweder aus dem warmen Mittelmeer oder dem weiter entfernten Atlantik.

### 3.2 Der Amesbury Archer

[Ch07] In den Zähnen des Mannes ist  $^{18}\text{O}$  sehr viel stärker angereichert als irgendwo auf den Britischen Inseln.

### 3.3 Kinderopfer der Incas in den Hochanden

[Wi07] Der scharfe Anstieg in den letzten Monaten vor dem Tod ist mit einem Aufstieg in große Höhen auf den ersten Blick unvereinbar.

### 3.4 Ein amphibischer Elefantenvorfahr

[Li08] Betrachtet wird diesmal die Standardabweichung  $\sigma\delta^{18}\text{O}$ . Die Zusammensetzung größerer Gewässer schwankt viel weniger als einzelne Regelfälle auf dem Land.

## 4 Körpergewebe, $^{13}\text{C}$ und $^{15}\text{N}$

### 4.1 Die Grundlagen der Methode

[Am86, Am93, Mi84, Sc84, Ta81]

#### 4.1.1 Kohlenstoff $^{13}\text{C}$

$^{13}\text{C}$  ist in der Luft im Vergleich zum Meerwasser um rund 7.7‰ angereichert. Für Wasserpflanzen und -tiere liegt  $\delta^{13}\text{C}$  bei  $-10 \div -18$  und für die meisten terrestrischen Pflanzen bei  $-22 \div -30$ . C4-Pflanzen reichern  $^{13}\text{C}$  nur auf  $-10 \div -18$ ‰ ab. In den mittleren Breiten spielt C4 keine Rolle, nur bei Hitze, Trockenheit und starker Sonnenstrahlung.

#### 4.1.2 Stickstoff $^{15}\text{N}$

In Pflanzen beträgt  $\delta^{15}\text{N} = -1 \div 12$ ‰, bei symbiotischen Stickstofffixierern wie den Leguminosen etwa 5‰ weniger als bei den übrigen. Andere Lebewesen nehmen Stickstoff ausschließlich über die Nahrung auf und reichern ihn pro Schritt in der Nahrungskette um 3‰ an. Die Ausgangswerte streuen dabei beträchtlich und eine Aussage erfordert deshalb immer Vergleichsproben aus derselben Region und Zeitstellung.

Beim Vergleich von Tier- und Pflanzennahrung ist zu beachten, daß pflanzliche Öle und Kohlenhydrate völlig frei von

Stickstoff sind. Pflanzliche Nahrung im Sinne der Isotopenuntersuchung sind nur pflanzliche Proteine in z. B. Vollkorngetreide, Leguminosen und Nüssen, die in eigenes Protein umgewandelt werden. Pflanzenprodukte, die zwar zur Energie- nicht aber zur Eiweißversorgung dienen, bleiben unentdeckt und tragen zum Ergebnis der „reinen Fleischnahrung“ vieler Untersuchungen des Paläo- und Mesolithikums bei.

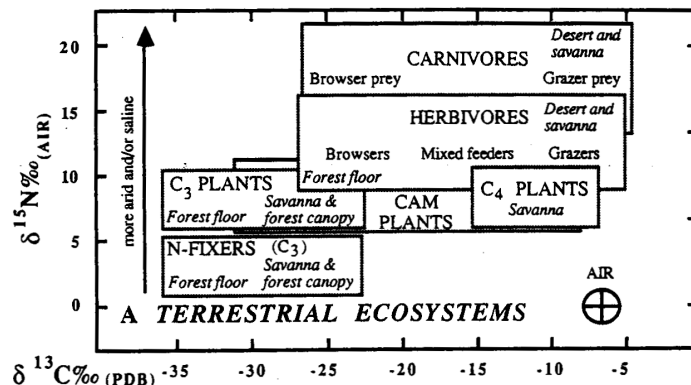


Abbildung 2: Spannbreite der Isotopenwerte für terrestrische Flora und Fauna [Am93]

### 4.2 Australopithecus und Paranthropus

[Sp99, Sp06] Der Anteil von Gräsern oder grasfressenden Tieren ist bei beiden höher als vermutet.

### 4.3 Ernährung des Neanderthalers

[Ri00] Die Neanderthaler scheinen ihren gesamten Eiweißbedarf aus tierischem Protein gedeckt zu haben und dürften somit erfolgreiche Jäger und nicht bloß Aassammler gewesen sein.

### 4.4 Wanderung oder Seßhaftigkeit am Cape

[Se85] Lager an der Küste und im Inland wurden offenbar ganzjährig genutzt, die saisonale Wanderung konnte widerlegt werden.

### 4.5 Präneolithische Besiedlung des Tropenwaldes in Malaysia

[Kr07] Der dichte tropische Regenwald wurde im Widerspruch zu Annahmen schon vor dem Ackerbau auf Lichtungen dauerhaft genutzt.

### 4.6 Beginn des Neolithikums am Eisernen Tor

[Bo04] Die Grenze zum Neolithikum ist schwach ausgeprägt und spricht für einen eher graduellen Übergang.

### 4.7 Neolithikum in Britannien und Dänemark

[Ta81, Ri03] Die Neolithisierung brachte einen schlagartigen Wandel zu rein terrestrischer Ernährung.

## 4.8 Erkennen von Milchwirtschaft

[Mi00, Co03] Stabile 16- und 18-kettige vollständig gesättigte Fettsäuren ( $C_{16:0}$  und  $C_{18:0}$ ) sind oft erhalten. Die  $C_{18:0}$ -Fettsäuren sind in Milch, nicht aber in Körperfett, um 3,3 ‰ abgereichert.

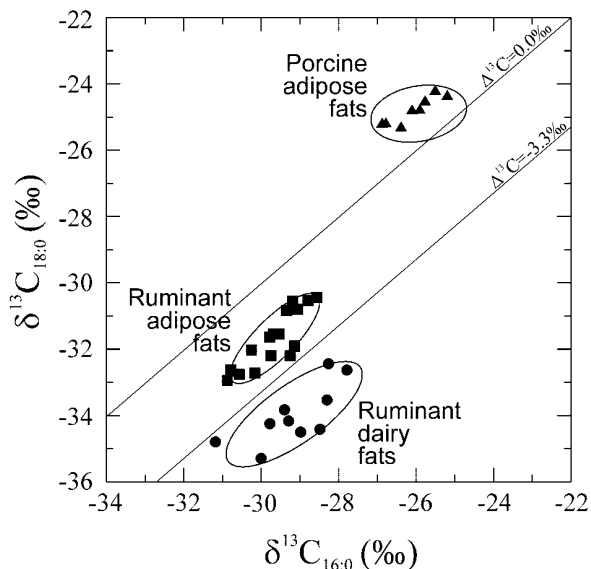


Abbildung 3:  $^{13}C$  in Fettsäuren rezenter Rinder und Schweine [Co03]

## 4.9 Fleischkonsum in Hinkelstein

[Dü03] Die Annahme eines deutlich höheren Fleischkonsums der Hinkelsteiner Kultur konnte widerlegt werden.

## 4.10 Ernährungsunterschiede auf einem Gräberfeld der Römerzeit

[Ri98] Hochgestellte Personen konsumierten deutlich mehr marine Nahrung.

## 4.11 Einheimische oder Fremde in einem Massengrab in Peru

[Ve93] Die Streuung läßt eine statistisch signifikante Aussage nicht zu. Eine Herkunft aus dem Inland scheint aber möglich.

## 4.12 Kinderopfer der Incas

[Wi07] Ein deutlicher Anstieg des Fleischkonsums und der Wechsel zu Mais aus dem Tiefland deuten an, daß Bauernkinder zu Mitgliedern der Oberschicht gemacht wurden, um als angemessenes Opfer dienen zu können.

## 5 Fehler und Grenzen der Methode

### 5.1 Die Notwendigkeit von Vergleichsdaten

[Am93] Es ist unmöglich aus den absoluten Meßwerten für  $\delta^{15}N$  und  $\delta^{13}C$  sinnvolle Schlüsse zu ziehen sondern nur im Vergleich zu Werten anderer Populationen oder von Fauna derselben Region und Zeitstellung.

### 5.2 Kollagen und seine Degradation

[Ni85, Ba97, Bo97] Kollagen mit einem Verhältnis Kohlenstoff zu Stickstoff außerhalb von 2.9 bis 3.6 ist stark degradiert und unbrauchbar.

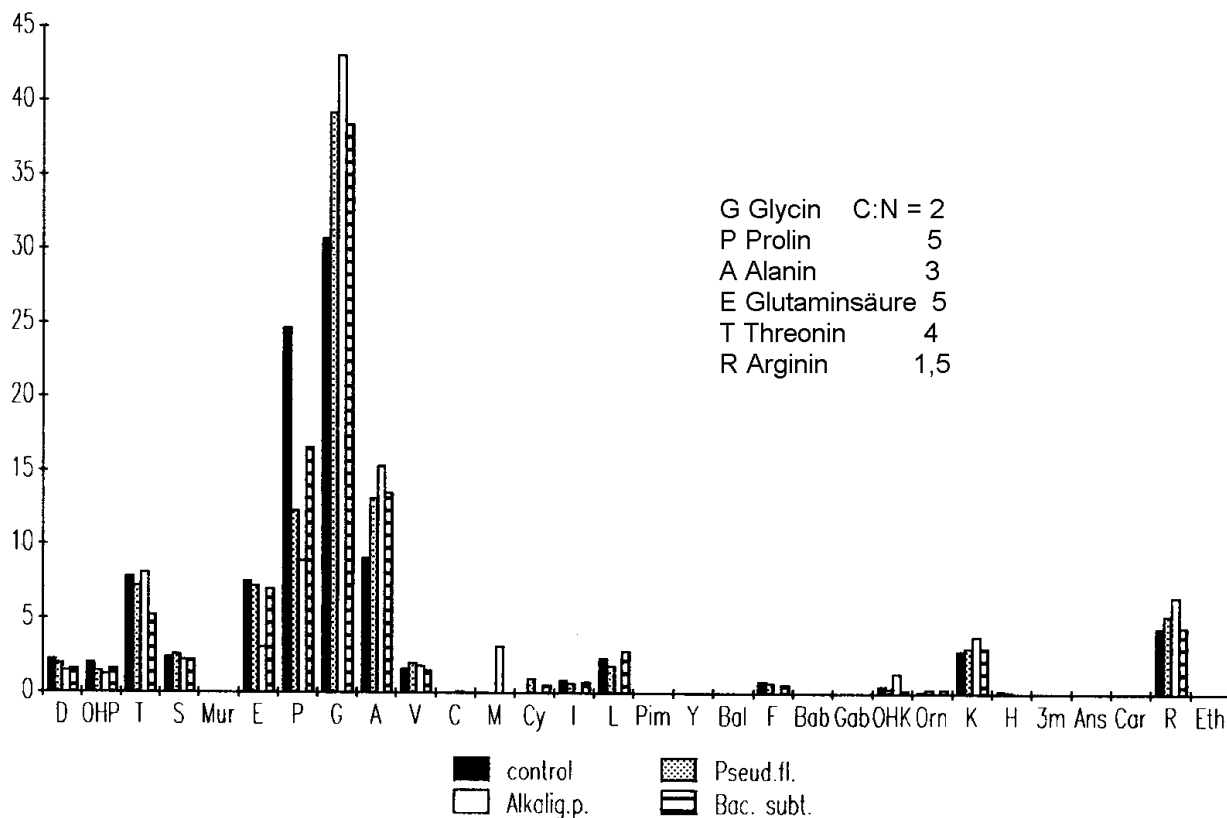


Abbildung 4: Änderung der Aminosäurenverhältnisse in degradiertem Kollagen [Ba97]

## 5.3 Experimentelle Degradation mit Bodenbakterien

[Ba97] Für eine sichere Kontrolle der Verwendbarkeit einer Kollagenprobe reicht das C:N-Verhältnis allein nicht aus, sondern es ist dringend angeraten auch das Verhältnis von Prolin zu Glycin zu bestimmen.

## Literatur

- Am86 STANLEY H. AMBROSE & MICHAEL J. DENIRO, *Reconstruction of African human diet using bone collagen carbon and nitrogen isotope ratios*. *nature* **319** (1986), 321–324.
- Am93 STANLEY H. AMBROSE, *Isotopic Analysis of Paleodiets: Methodological and Interpretative Considerations*. In: MARY K. SANDFORD (Hrsg.), *Investigations of Ancient Human Tissue, Chemical Analyses in Anthropology*. Food and Nutrition in History and Anthropology 10 (Langhorne / Berlin 1993), 59–130.
- Ba97 A BALZER, *In vitro decomposition of bone collagen by soil bacteria: the implications for stable isotope analysis in archaeometry*. *Archaeometry* **39** (1997), 415–429.
- Bo04 DUŠAN BORIĆ, GISELA GRUPE & JORIS PETERS, *Is the Mesolithic-Neolithic subsistence dichotomy real? New stable isotope evidence from the Danube Gorges*. *European journal of archaeology* **7** (2004), 221–248.
- Bo97 H. BOCHERENS, GISELA GRUPE, A. MARIOTTI & SUSANNE TURBAN-JUST, *Molecular preservation and isotopy of Mesolithic human finds from the Ofnet cave (Bavaria, Germany)*. *Anthropologischer Anzeiger* **55** (1997), 121–129.
- Bu03 PAUL BUDD, CAROLYN CHENERY, JANET MONTGOMERY & JANE EVANS, *You are what you ate: isotopic analysis in the reconstruction of prehistoric residency*. In: MIKE PARKER PEARSON (Hrsg.), *Food, Culture and Identity in the Neolithic and Early Bronze Age*. BAR International Series 1117 (Oxford 2003), 69–78.
- Ch07 CAROL CHENERY, *The Amesbury Archer: Oxygen isotope analysis*. (2008-05-10). [http://www.wessexarch.co.uk/projects/amesbury/tests/oxygen\\_isotope.html](http://www.wessexarch.co.uk/projects/amesbury/tests/oxygen_isotope.html).
- Co03 M. S. COPLEY, R. BERSTAN, S. N. DUDD, G. DOHERTY, A. J. MUKHERJEE, V. STRAKER, S. PAYNE, & R. P. EVERSLED, *Direct chemical evidence for widespread dairying in prehistoric Britain*. *PNAS* **100** (2003), 1524–1529.
- Dü03 DÜRRWÄCHTER, C., CRAIG, O.E., TAYLOR, G., COLLINS, M.J., BURGER, J. & ALT, K.W., *Rekonstruktion der Ernährungsweise in der mittel- und frühneolithischen Bevölkerungen von Trebur/Hessen und Herxheim/Pfalz*. *Bull. Soc. Suisse d'Anthropologie* **9** (2003), 1–16.
- Kr07 JOHN KRIGBAUM, *Prehistoric Dietary Transitions, Stable Isotope and Dental Caries Evidence from Two Sites in Malaysia*. In: MARK NATHAN COHEN & GILLIAN M. M. CRANE-KRAMER (Hrsg.), *Ancient Health, Skeletal Indicators of Agricultural and Economic Intensification*. (Gainesville 2007), 273–285.
- Li08 ALEXANDER G. S. C. LIU, ERIK R. SEIFFERT & ELWYN L. SIMONS, *Stable isotope evidence for an amphibious phase in early proboscidean evolution*. *PNAS* **105** (2008), 5786–5791.
- Mi00 ANDREW R. MILLARD, *An Evaluation of the Possible Use of Nitrogen Isotopes to Detect Milking in Cattle*. In: GEOFF BAILEY, RUTH CHARLES & NICK WINTER (Hrsg.), *Human Ecodynamics, Proceedings of the Association for Environmental Archaeology conference 1998 held at the University of Newcastle upon Tyne*. (Oxford 2000), 134–140.
- Mi84 MASAO MINAGAWA & EITARO WADA, *Stepwise enrichment of  $^{15}\text{N}$  along food chains: Further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **48** (1984), 1135–1140.
- Mü03 WOLFGANG MÜLLER, HENRY FRICKE, ALEX N. HALLIDAY, MALCOLM T. MCCULLOCH & JO-ANNE WARTHÖ, *Origin and Migration of the Alpine Iceman*. *science* **302** (2003), 862–866.
- Ni85 MICHAEL J. DENIRO, *Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to paleodietary reconstruction*. *nature* **317** (1985), 806–809.
- Pr98 T. DOUGLAS PRICE, GISELA GRUPE & PETER SCHRÖTER, *Migration in the Bell Beaker period of central Europe*. *Antiquity* **72** (1998), 405–412.
- Ri00 MICHAEL P. RICHARDS, PAUL B. PETTITT, ERIK TRINKAUS, FRED H. SMITH, MAJA PAUNOVIĆ, & IVOR KARAVANIĆ, *Neanderthal diet at Vindija and Neanderthal predation: The evidence from stable isotopes*. *PNAS* **97** (2000), 7663–7666.
- Ri03 MICHAEL P. RICHARDS, RICK J. SCHULTING & ROBERT E. M. HEDGES, *Sharp shift in diet at onset of Neolithic*. *nature* **425** (2003), 366.
- Ri98 M. P. RICHARDS, R. E. M. HEDGES, T. I. MOLLESON & J. C. VOGEL, *Stable Isotope Analysis Reveals Variations in Human Diet at the Poundbury Camp Cemetery Site*. *Journal of Archaeological Science* **25** (1998), 1247–1252.
- Sc84 MARGARET J. SCHOENINGER & MICHAEL J. DENIRO, *Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **48** (1984), 625–639.
- Se85 JUDITH C. SEALY & NIKOLAAS J. VAN DER MERWE, *Isotope assessment of Holocene human diets in the southwestern Cape, South Africa*. *nature* **315** (1985), 138–140.
- Sp06 MATT SPONHEIMER, BENJAMIN H. PASSEY, DARRYL J. DE RUITER, DEBBIE GUATELLI-STEINBERG, THURE E. CERLING & JULIA A. LEE-THORP, *Isotopic Evidence for Dietary Variability in the Early Hominin *Paranthropus robustus**. *science* **314** (2006), 980–982.
- Sp99 MATT SPONHEIMER & JULIA A. LEE-THORP, *Isotopic Evidence for the Diet of an Early Hominid, *Australopithecus africanus**. *science* **283** (1999), 368–370.
- Ta81 HENRIK TAUBER,  $^{13}\text{C}$  evidence for dietary habits of prehistoric man in Denmark. *nature* **292** (1981), 332–333.
- Ve93 JOHN W. VERANO & MICHAEL J. DENIRO, *Locals or Foreigners? Morphological, Biometric and Isotopic Approaches to the Question of Group Affinity in Human Skeletal Remains Recovered from Unusual Archaeological Contexts*. In: MARY K. SANDFORD (Hrsg.), *Investigations of Ancient Human Tissue, Chemical Analyses in Anthropology*. Food and Nutrition in History and Anthropology 10 (Langhorne / Berlin 1993), 361–386.
- Wi07 ANDREW S. WILSON ET AL., *Stable isotope and DNA evidence for ritual sequences in Inca child sacrifice*. *PNAS* **104** (2007), 16456–16461.

Die Hausarbeit und Literatur liegen auf:  
[www.axel.berger-odenthal.de/work/Referat/](http://www.axel.berger-odenthal.de/work/Referat/)