

Isotope

Nuklid-Karte, Stabilitätskriterien, Anwendungsbeispiele

Eva-Maria Schäffer, WS 04/05

Gliederung

1	Was sind Isotope?	1
2	Nuklide und Nuklid-Karte	2
3	Stabilitätskriterien bei Nukliden	3
4	Ionenmassen-Bestimmung durch Massen-Spektrometrie	4
5	Anwendungsbeispiele für die Isotopen-Analyse	5
5.1	Medizin: Test auf Helicobacter pylorie	5
5.2	Paläopathologie: Isotopen-Untersuchungen an Mumien	6
5.3	Ökologie: Isotopen-Analyse bei Spargel	7

Einstieg: „taff“-Beitrag (ProSieben, Mo – Fr 17:00Uhr) vom 08.06.2004: Kommt deutscher Spargel wirklich aus Deutschland? Überprüfung durch Isotopen-Analyse!

1 Was sind Isotope?

Als Isotope werden alle zu einem Element gehörende Atome (Nuklide) gleicher Ordnungszahl aber unterschiedlicher Neutronen-Zahl bezeichnet, die im PSE denselben Platz einnehmen. Der Begriff Isotop wurde von dem englischen Physikochemiker Frederick Soddy (1877 – 1965) geprägt und bezieht sich auf die beiden griechischen Worte isos = gleich und topos = Platz (im PSE).

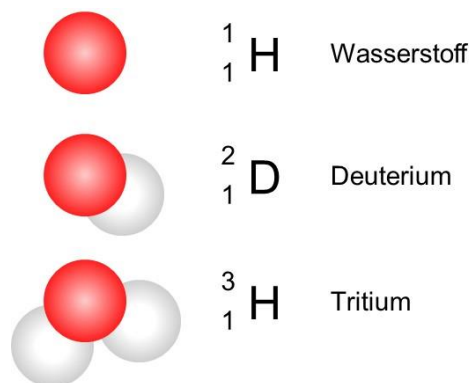


Abb. 1: Wasserstoff-Isotope

Da die Isotope eines chemischen Elements unterschiedlich viele Neutronen besitzen, unterscheiden sie sich sowohl hinsichtlich ihrer Atom-Massen als auch hinsichtlich physikalischer Eigenschaften. Diese „Isotopie-Effekte“ bilden die Grundlagen für die Anreicherung, Bestimmung und potentielle Analyse der Isotope. Allgemein werden stabile, radioaktive und instabile Isotope unterschieden. Insgesamt existieren etwa 500 stabile Isotope. Radioaktive Isotope zerfallen mit einer bestimmten Halbwertszeit (HWZ). Hierbei lässt sich nochmals zwischen natürlichen radioaktiven Isotopen und künstlich hergestellten radioaktiven Isotopen (ca. 1.000 verschiedene) differenzieren. Der Begriff instabile Isotope ist irreführend, da ja im Prinzip alle radioaktiven Isotope mehr oder weniger instabil sind. Deshalb findet er in der Literatur nur teilweise Verwendung.

2 Nuklide und Nuklid-Karte

Jedes durch die Anzahl seiner Protonen und Neutronen eindeutig bestimmbare Atom wird als Nuklid bezeichnet.

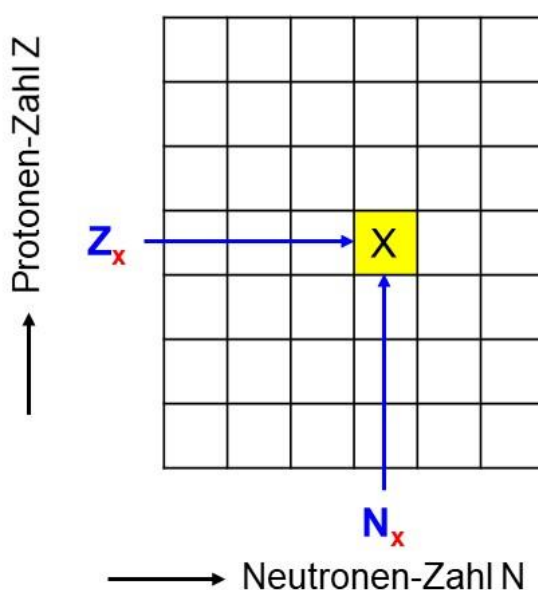


Abb. 2: Darstellung eines Nuklids

Wenn die Nuklide in ihrer Zusammensetzung eindeutig durch die Zahl der Protonen (Z) und die Zahl der Neutronen (N) bestimmt sind, dann lässt sich ein Z,N-Diagramm konstruieren, in dem jede Position einer eindeutigen Nuklid-Zusammensetzung entspricht. Dieses Diagramm heißt Nuklid-Karte.

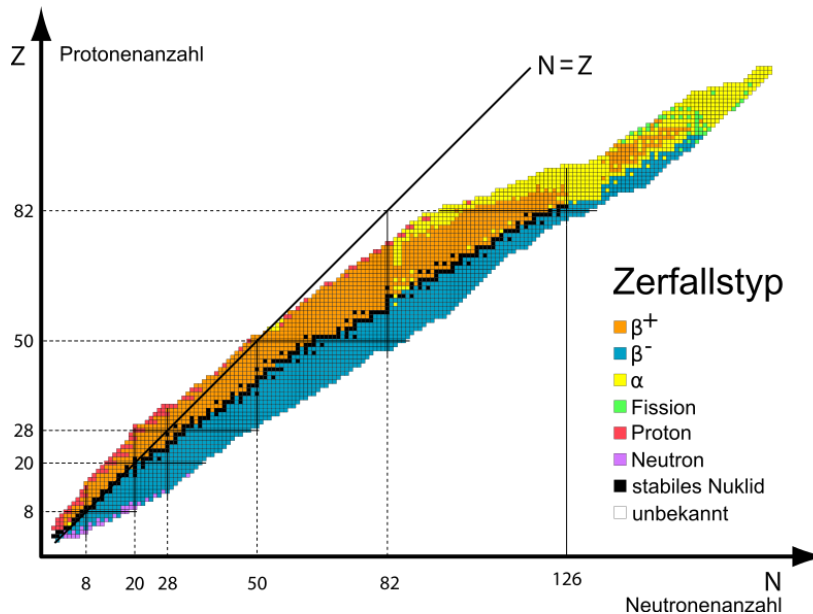


Abb. 3: Nuklid-Karte [16]

Die Ordinate gibt die Zahl der Protonen wieder (da die Zahl der Protonen in der Elementen-Nomenklatur der Ordnungszahl Z entspricht wird sie hier ebenfalls als Z bezeichnet), die Abszisse die Zahl der Neutronen. Zurzeit sind etwa 1.900 Nuklide bekannt, die sich auf 109 verschiedene Elemente verteilen. Es gibt 267 stabile Nuklide und 66 natürlich vorkommende radioaktive Nuklide. Die Nuklide können in unterschiedliche Gruppen zusammengefasst werden. Dabei werden isotope-, isobare-, und isotone Nuklide unterschieden: Isotope Nuklide stehen in waagrechten Reihen nebeneinander, isobare Nuklide in Diagonal-Reihen der Nuklid-Karte (Isobare: Nuklide mit gleicher Massenzahl $p+n$) und isotone Nuklide in senkrechten Reihen in der Nuklid-Karte (Isotone: Nuklide mit gleicher Neutronen-Zahl).

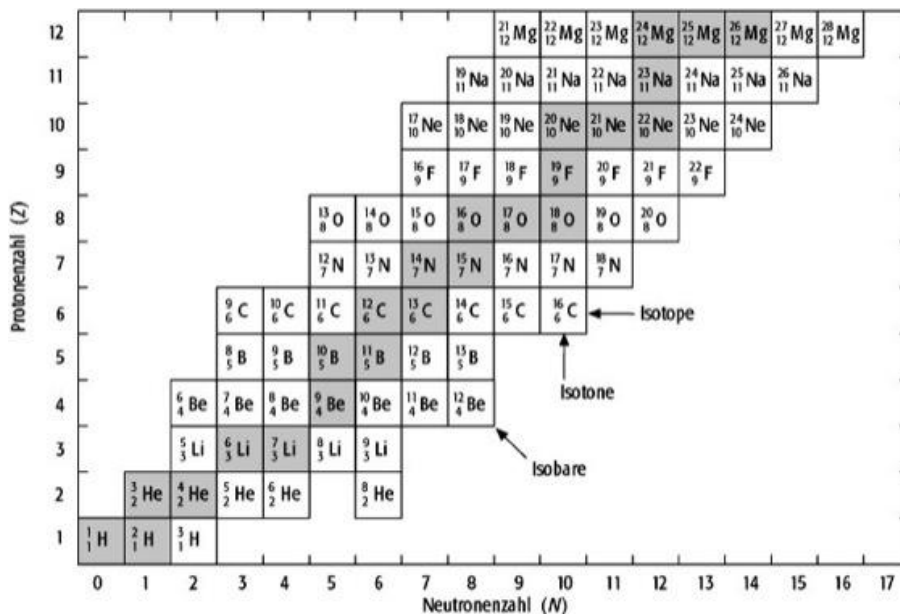


Abb. 4: Darstellungsweise in der Nuklid-Karte [17]

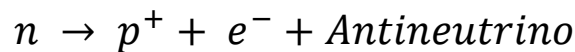
3 Stabilitätskriterien bei Nukliden

Die Stabilität ist abhängig vom relativem Gehalt an Neutronen, die gewissermaßen als „Kitt-Substanz“ den Zusammenhalt der sich gegenseitig abstoßenden, gleichgeladenen Protonen bewirken. Um also Aussagen zur Stabilität von Nukliden treffen zu können, ist es wichtig, das N/Z -Verhältnis der stabilen Nuklide zu betrachten: Bei den leichteren Nuk-

liden ist das Verhältnis $N/Z \sim 1$, bei den schwereren Nukliden dagegen $N/Z > 1$. Das bedeutet, dass mit steigender Protonen-Zahl ein immer größerer Neutronen-Überschuss erforderlich wird, um stabile Nuklide zu erhalten. Neutronen-Überschuss: $(Z + N) - 2Z$. Bei Verbindung der stabilen Nuklide in der Nuklid-Karte durch eine gemittelte Linie steigt diese zunächst unter einem Winkel von 45° an; bei höheren Protonen-Zahlen verläuft sie aber erheblich flacher („Linie der Betastabilität“). Bei den 267 stabilen Nukliden können verschiedene Kombinationen im Hinblick auf Protonen-Zahl (Z) und Neutronen-Zahl (N) unterschieden werden:

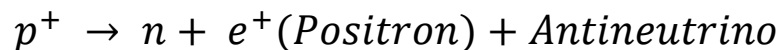
- Z gerade, N gerade (sehr häufig, 158 Nuklide), also besonders stabil!
- Z gerade, N ungerade (häufig, 53 Nuklide)
- Z ungerade, N gerade (häufig, 50 Nuklide)
- Z ungerade, N ungerade (selten, 6 Nuklide) Bei den Protonen-Zahlen bzw. Neutronen-Zahlen = 2, 8, 20, 28, 50, 82, (126) treten besonders stabile, z. T. auch besonders viele stabile Nuklide auf (magische Zahlen).

Ist in einem Atom-Kern das Verhältnis N/Z größer als das optimale Verhältnis erfolgt ein Ausgleich durch die Umwandlung eines Kern-Neutrons in ein Kern-Proton:



exothermer Vorgang, β^- -Strahlung

Umgekehrt kann, wenn das Verhältnis N/Z kleiner ist als das optimale Verhältnis auch ein Kern-Proton in ein Kern-Neutron übergehen:



endothermer Vorgang, β^+ -Strahlung

Ein Atom-Kern mit einem zu kleinen Verhältnis N/Z neigt zur Ausstrahlung des besonders stabilen Helium-Kerns ${}^4_2\text{He}^{2+}$ (α -Strahlung).

4 Ionenmassen-Bestimmung durch Massen-Spektrometrie

Prinzipiell gibt es zwei unterschiedliche Ansätze zur Anwendung der Isotopen-Analyse, zum einen kann die natürliche Variabilität der Isotopen-Verteilung in verschiedenen Kompartimenten eines Öko-Systems und deren Veränderung im zeitlichen Verlauf analysiert werden, zum anderen können Tracer eingesetzt werden. Diese unterscheiden sich in ihrer Isotopen-Zusammensetzung von der des natürlichen Hintergrunds und lassen so Aussagen zur Verlagerung und Umwandlung dieser markierten Substanzen zu.

Häufige Tracer sind z. B die Radioisotope ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{35}\text{S}$, sowie die stabilen Isotope ${}^2\text{H}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^{17}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}$. Die Isotopen-Verhältnisse bei den Elementen H_2 ; N_2 , C und O_2 werden durch Massen-Spektrometrie an den Gasen H_2 , N_2 und H_2O quantitativ bestimmt.

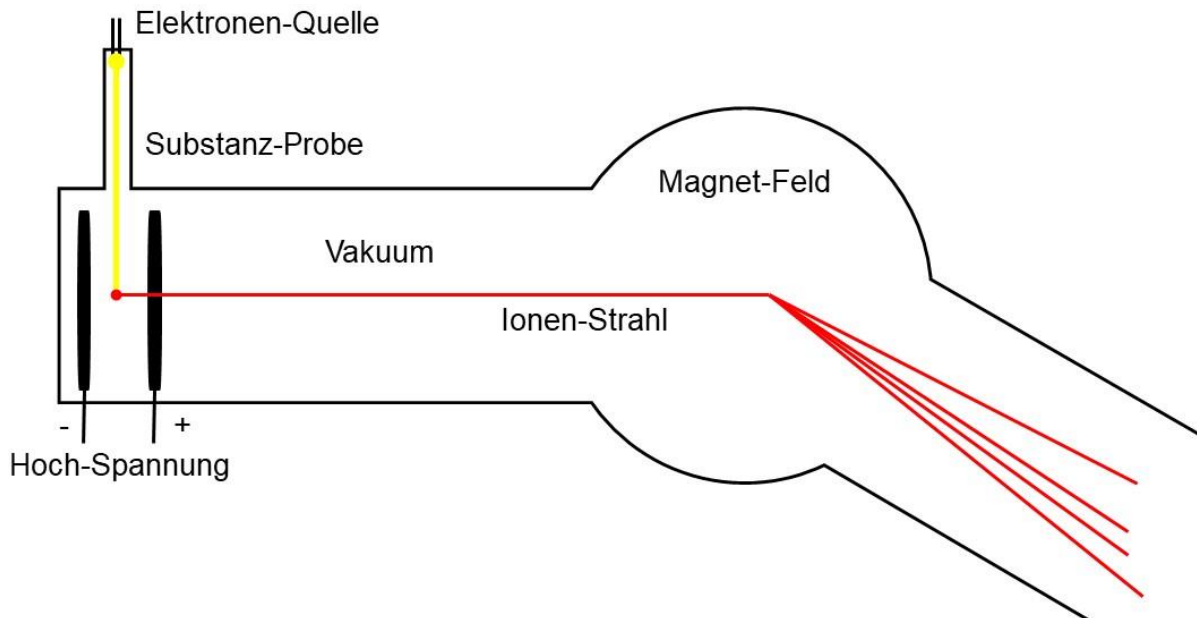


Abb. 5: Massen-Spektrometer

Das Massen-Spektrometer beinhaltet folgendes Funktionsprinzip: Schickt man Elektronen hoher Geschwindigkeit durch eine stark verdünnte, gasförmige Verbindungsprobe, so können die Gas-Partikel durch den Zusammenstoß mit den Elektronen in Ionen überführt werden. Beschleunigt man nun die gebildeten Kationen oder Anionen in einem elektrischen Feld und lässt sie anschließend durch ein magnetisches Sektor-Feld fliegen, so werden in letzterem Ionen unterschiedlicher Masse bzw. Ladung verschieden stark abgelenkt (die leichteren und höher geladenen stärker als die schwereren und weniger geladenen Ionen). Am Ausgang des Magneten erscheinen daher alle Ionen nach dem Verhältnis von Masse Ladung (m/z) getrennt an verschiedenen Stellen und können dort durch geeignete Mess-Anordnungen nachgewiesen werden. Die Massentrennungswirkung kann noch verstärkt werden, wenn man die Ionen vor ihrem Durchgang durch das magnetische Sektor-Feld durch ein elektrisches Sektor-Feld schickt. Zur Charakterisierung der Isotopen-Zusammensetzung einer Substanz wird das Verhältnis der beiden häufigsten stabilen Isotope zueinander herangezogen und eine Bezugsgröße, der Δ -Wert, definiert:

$$\Delta [0/00] = \left(\frac{R_{Probe} - R_{Standard}}{R_{Standard}} \right) * 10^3$$

R: ratio = Verhältnis des schweren zum leichten Isotop; als Standard wird ein Material bekannter Isotopen-Zusammensetzung verwendet.

5 Anwendungsbeispiele für die Isotopen-Analyse

5.1 Medizin: Test auf *Helicobacter pylori*

Stabile Isotope erlangten in den letzten Jahren in der Medizin immer größere Anwendung. Bei den Untersuchungen handelt es sich um Stoffwechsel-Krankheiten oder Infektionskrankheiten. Das Prinzip ist einfach: Durch den Einsatz von Tracern kann der Stoffwechsel der markierten Substanz beobachtet werden. Die Stoffwechsel-Produkte können in Blut, Urin, Kot, Schweiß oder durch Atem-Test nachgewiesen werden. Der Atem-Test findet beispielsweise bei der Identifizierung des Bakteriums *Helicobacter pylori* Anwendung. Das Bakterium *Helicobacter pylori* befindet sich bei ca. 50 % der Welt-Bevölkerung im Magen und ist häufig Ursache für Magen-Geschwüre oder Magen-Krebs.



Abb. 6: *Helicobacter pylori* [18]

Früher war zum Nachweis eine Magen-Spiegelung notwendig, heute wird dem Patienten lediglich ^{13}C -markierter Harnstoff verabreicht. Ist *Helicobacter pylori* vorhanden, so spaltet dieser den Harnstoff in CO_2 und NH_3 und im Atem-Test kann ^{13}C -markiertes CO_2 nachgewiesen werden. Andernfalls wird der Harnstoff wieder ausgeschieden.

5.2 Paläopathologie: Isotopen-Untersuchungen an Mumien



Abb. 7: Mumie [19]

Die wissenschaftliche Untersuchung von Mumien und Skeletten vergangener Bevölkerungen stellen eine zunehmend wichtige Informationsquelle für die Rekonstruktion geschichtlicher Zusammenhänge dar, speziell ergeben sich dadurch neue und bisher nicht zugängliche Einblicke in die Lebensbedingungen von Individuen aus historischen Epochen. Unter anderem bietet die chemische Untersuchung von Isotopen wichtige Daten über Zusammensetzung und Alter von Biomaterialien. Das „Standard-Verfahren“ hierbei ist die Radiocarbon-Methode: Durch den radioaktiven Zerfall von ^{14}C -Molekülen (HWZ 5600 Jahre) im Vergleich zu bekannten Kalibrierungsdaten kann das absolute Alter einer Probe angegeben werden; im Falle von menschlichem Biomaterial wird mit dem Eintritt des Todes kein weiteres ^{14}C aus der Nahrungskette aufgenommen, so dass hier der Zerfall von ^{14}C die Dauer zwischen Todeszeitpunkt und Datum der Messung wiedergibt (aktuelle Mess-Genauigkeit der Datierung liegt bei rund +/- 40 Jahren).

5.3 Ökologie: Isotopen-Analyse bei Spargel



Abb. 8: Spargel [20]

Um eine Herkunftsbestimmung durchführen zu können, muss jedes Erzeugnis Eigenschaften besitzen, die ursächlich mit dem Ort der Erzeugung zusammenhängen. Daraus ergibt sich der „isotope Fingerabdruck“, bei dem das Verhältnis der stabilen Isotope eines Elements im Erzeugnis das Verhältnis der Umgebung widerspiegelt! Bei der Isotopen-Analyse wird das Verhältnis bestimmter chem. Elemente (z.B. Wasser- oder Kohlenstoff-Isotope) im Spargel untersucht; je nach den Umwelt-Einflüssen, denen der Spargel im Wachstumsprozess ausgesetzt ist, ändert sich die Zusammensetzung dieser Stoffe.

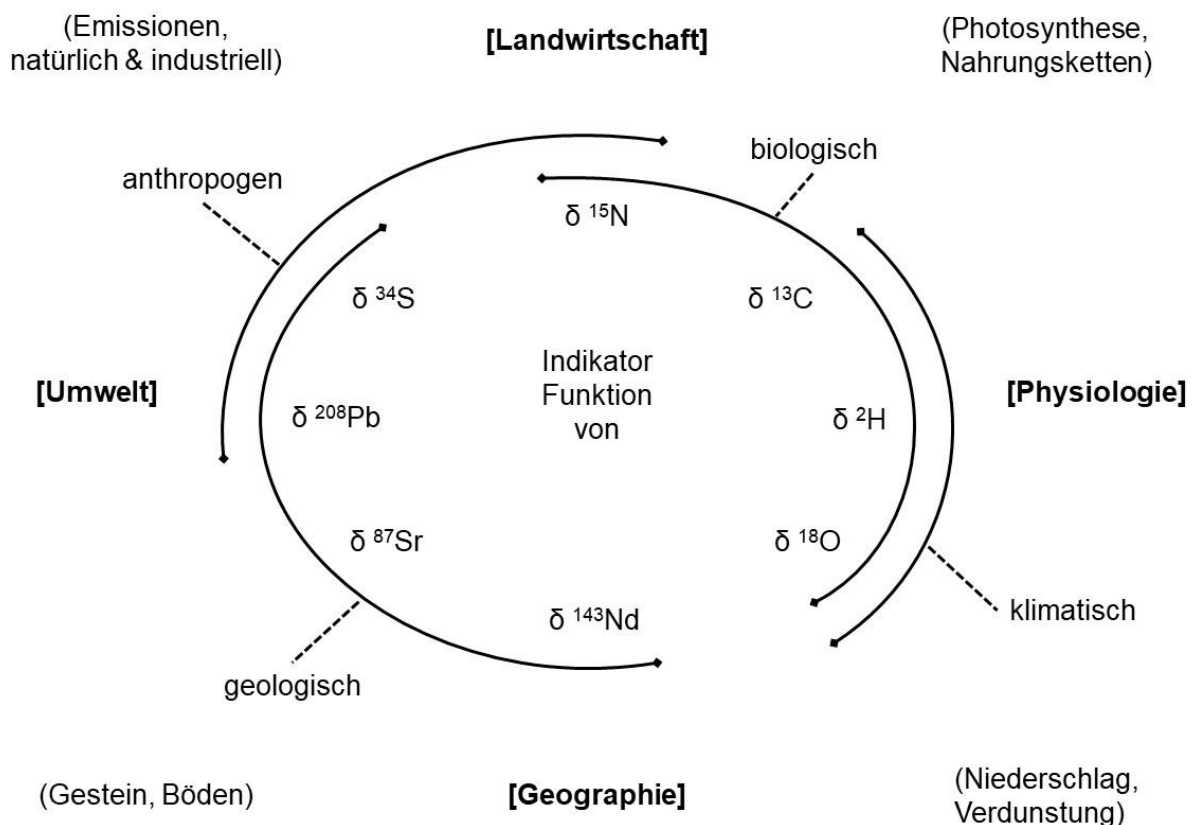


Abb. 9: Potentielle Umwelt-Einflüsse

Das Ergebnis dieser Analyse wird dann mit den Profilen verschiedener Anbau-Gebiete verglichen (diese Profile sind in einer „Spargel-Datenbank“ gespeichert, die das bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL) bereits seit 2001 führt). So kann festgestellt werden, ob das deklarierte Anbau-Gebiet mit der festgestellten chemischen Zusammensetzung des Gemüses übereinstimmt. Das Verfahren der Isotopen-Analyse zur Herkunftsbestimmung bei Spargel und anderen Lebensmitteln wird seit diesem Jahr auch von anderen Bundesländern eingesetzt.

Quellen:

1. Hollemann-Wiberg, Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 101. Auflage, Walter de Gruyter Berlin, New York, 1995
2. Lieser, K. H., Einführung in die Kernchemie, VCH, Weinheim, New York, Basel, 1991
3. Schmidt, Schmelz, Stabile Isotope in Chemie und Biowissenschaften, CHIUZ 1, 1980, S.25-34
4. www.aoe.fal.de/isotope.htm, 10.06.2004 (Quelle verschollen, 25.05.2020)
5. www.techfak.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_2/basics/b2_1_2.html, 10.06.2004
6. http://ac16.uni-paderborn.de/lehrveranstaltungen/_aac/vorles/skript/kap_2/kap2_5/n_karte.html, 20.05.2005 Zeichnung selbst nach Quelle erstellt
7. www.nano.geo.uni-muenchen.de/nanobio/paper/ST-13.pdf, 08.06.2004 (Quelle verschollen, 25.05.2020)
8. www.pci.uni-heidelberg.de/pci/fpraktikum/ss03/30-Matthias%20Heydt.pdf, 08.06.2004
9. www.lgl.bayern.de/de/left/presse/2004/29-04.htm, 17.06.2004 Zeichnung selbst nach Quelle erstellt
10. www.tgs-chemie.de/massenspektrometer.gif, 19.06.2004 Zeichnung selbst nach Quelle erstellt
11. www.mummymania.de/mumgraph/niagra2.jpg, 20.06.2004 (Quelle verschollen, 25.05.2020)
12. www.nature.com/nsu/030609/images/bacteria_180.jpg, 20.06.2004 (Quelle verschollen, 25.05.2020)
13. www.historel.net/egypte/anubis.jpg, 20.06.2004
14. www.daf.uni-freiburg.de/projekt4/markt1/spargel.jpg, 20.06.2004
15. www.zope.reaktor.fh-furtwangen.de, 17.06.2004 Zeichnung selbst nach Quelle erstellt
16. https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Isotopentabelle_Segre.svg;
Lizenz: „Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 nicht portiert“, (25.05.2020)
17. <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/nuklidkarte/11353>;
Lizenz nicht überprüfbar, 25.05.2020
18. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EMpylori.jpg?uselang=de>; 25.05.2020
19. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mummy_in_Vatican_Museums.jpg?uselang=de; Urheber: Joshua Sherurcij; 25.05.2020
20. <https://www.gesundheit.gv.at/leben/ernaehrung/saisonkalender/mai/spargel>;
Lizenz nicht überprüfbar, 25.05.2020