

Darstellung der Beschleunigermassenspektrometrie für den Unterricht an höheren Schulen

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Magister der Naturwissenschaften
an der Formal- und Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Wien

eingereicht von:
Thomas STRASSER

Betreuer:
O. Univ.-Prof. Dr. Walter Kutschera
Institut für Isotopenforschung und Kernphysik

Wien, im Mai 2000

Elektronisch zusammengefügt am 26. Jänner 2014 von Niklas Stadler
und Fabio Sadkaoui

**Darstellung der
Beschleunigermassenspektrometrie
für den Unterricht an höheren
Schulen**

Begleitheft für LehrerInnen

Inhalt

I. Beschleunigermassenspektrometrie	3
Grundlagen der Beschleunigermassenspektrometrie	3
Vorteile der Beschleunigermassenspektrometrie	4
Prinzip der Beschleunigermassenspektrometrie	6
II. VERA – Vienna Environmental Research Accelerator	7
Chemische Vorbehandlung	7
Ionenquelle	7
Elektrostatischer Analysator	8
Injektormagnet	9
Beschleuniger und Stripper	10
Analysiermagnet	11
Wien-Filter	12
Detektor	13
III. Die Radiokarbonmethode – ^{14}C -Datierung	15
Produktion	15
Transport	15
Massenfractionierung	16
Schwankung der ^{14}C -Produktion	17
Dendrochronologie	18
IV. Umweltforschung	20
Die globale Ozeanströmung	20
Biomedizinische Anwendungen	21
V. Weiterführende Literatur	22

I. Beschleunigermassenspektrometrie

Grundlagen der Beschleunigermassenspektrometrie

Alle Materie besteht aus Atomen. Alle natürlich vorkommende Materie ist aus den Atomen von 92 verschiedenen Elementen aufgebaut. Dabei existieren von den meisten Elementen verschiedenen Isotope, das heißt die Atome haben zwar die gleiche Kernladungszahl aber unterschiedliche Masse. Die verschiedenen Isotope eines Elements unterscheiden sich nur in ihrer Neutronenzahl. Die chemischen Eigenschaften der verschiedenen Isotope unterscheiden sich nur minimal, da das chemische Reaktionsverhalten primär von der Anzahl der Hüllenelektronen abhängt.

Die Anzahl der Neutronen bestimmt die chemischen Eigenschaften eines Atoms nur geringfügig, hat aber Einfluß auf kernphysikalische Eigenschaften. Befinden sich zu viele oder zu wenige Neutronen im Kern, so ist der Kern instabil und zerfällt. Isotope, deren Kerne instabil sind und zerfallen, nennt man Radioisotope.

Der Zeitpunkt des Zerfalls eines Kernes ist unvorhersagbar, man kann aber für genügend viele Kerne statistische Aussagen über die durchschnittliche Halbwertszeit der Kerne machen. Das radioaktive Zerfallsgesetz besagt, daß die Anzahl der Zerfälle nur von der Anzahl der vorhandenen Kerne N und einer für jedes Radioisotop spezifischen Konstante, der Halbwertszeit $t_{1/2}$, abhängt:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$$

Radioisotope nehmen durch Zerfall ab. Bereits nach wenigen Halbwertszeiten sind praktisch alle Ausgangskerne zerfallen. In der Natur sind deshalb nur noch solche Radioisotope in meßbaren Konzentrationen vorhanden, die Halbwertszeiten von der Größenordnung des Erdalters (4.5×10^9 Jahre) haben, oder solche, die auf irgendeine Art neu produziert werden.

Radioisotope können durch verschiedene Prozesse produziert werden:

- in der Atmosphäre: durch Kernreaktionen von Teilchen kosmischer Strahlung und Atomen der Atmosphäre
- in der Erdoberfläche: durch Kernreaktionen von Teilchen sekundärer kosmischer Strahlung und Atomen im Gestein
- aus dem radioaktiven Zerfall anderer natürlicher Radioisotope
- durch spontane Kernspaltung
- durch künstliche Kernspaltung bei Kernwaffentests oder in Reaktoren
- durch künstliche Erzeugung in Beschleunigern

Bei gleichbleibender Produktionsrate für ein Radioisotop stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht zwischen Produktion und Zerfall ein. Da die oben genannten Prozesse nur geringe Produktionsraten bewirken, kommt es nur bei langlebigen Radioisotopen auch zu meßbaren Isotopenverhältnissen von stabilem zu radioaktivem Isotop. Doch auch diese langlebigen Isotope kommen nur in geringen Konzentrationen vor und werden deshalb als Spurenisotope bezeichnet.

Radioisotope können über ihre radioaktive Strahlung nachgewiesen werden. Die beim Zerfall der Kerne freigewordene Strahlung wird gemessen und aus der gemessenen Aktivität A kann bei bekannter Halbwertszeit die Menge an in der Probe vorhandenem radioaktivem Material bestimmt werden.

$$A = \frac{dN}{dt} = -\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$$

Vorteile der Beschleunigermassenspektrometrie

Die Zerfallsmessung ist eine gängige Forschungsmethode. Dennoch hat diese Methode für langlebige Spurenisotope gravierende Nachteile. Es sei dies am Beispiel des Kohlenstoffisotops ^{14}C veranschaulicht:

Dem Beispiel liegt eine Probe von 1mg Kohlenstoff zugrunde.

12g Kohlenstoff..... 6×10^{23} Atome
1g Kohlenstoff..... 5×10^{22} Atome
1 mg Kohlenstoff..... 5×10^{19} Atome

Da das natürliche Isotopenverhältnis von $^{12}\text{C}/^{14}\text{C}$ in lebenden Organismen (auch moderner Kohlenstoff genannt) 1.2×10^{-12} beträgt, befinden sich in der

Probe $5 \times 10^{19} \times 1.2 \times 10^{-12} = 6 \times 10^7$ ^{14}C -Atome. Diese ^{14}C -Atome zerfallen gemäß des radioaktiven Zerfallsgesetzes:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \times N = -\frac{0.693}{5730 \times 365 \times 24} \times 6 \times 10^7 \approx 1 \text{ Zerfall pro Stunde}$$

Schon bei modernem Kohlenstoff zerfällt in einer 1mg-Probe nur ungefähr ein Kern pro Stunde. In einer Probe mit altem Kohlenstoff, in der ein Teil des ursprünglichen ^{14}C bereits zerfallen ist, finden dem jeweiligen Alter der Probe entsprechend noch weniger Zerfälle statt. Um eine vernünftige Meßgenauigkeit (>10.000 Zerfälle) zu erreichen, muß daher entsprechend lange gemessen werden, oder es wird mehr Probenmaterial benötigt.

Die Zerfallszählung hat zwei Nachteile: man benötigt relativ viel Probenmaterial und muß lange Meßzeiten in Kauf nehmen. Dabei wird die Zerfallsmessung umso ungünstiger je langlebiger das Radioisotop ist.

Es ist klar erkennbar, daß es bedeutend effizienter wäre die radioaktiven Atome direkt zu zählen anstatt auf ihren Zerfall zu warten. Könnte man auch nur einen kleinen Bruchteil der in einer Probe vorhandenen ^{14}C - Atome direkt zählen, würde dies dennoch ausreichen um die Zerfallsmessung an Genauigkeit zu übertreffen.

Vor etwas mehr als 20 Jahren wurde mit AMS (Accelerator Mass Spektrometry, Beschleunigermassenspektrometrie) eine Methode entwickelt, die genau dies zu leisten vermag. Diese Methode erlaubt es in einer Stunde ca. 1% der in einer Probe vorhandenen ^{14}C -Atome direkt zu zählen. Von den 6×10^7 ^{14}C -Atomen in der 1mg-Probe können also ca. 600 000 in einer Stunde nachgewiesen werden (anstatt nur einem Zerfall bei der Zerfallsmessung). AMS benötigt im Vergleich zur Zerfallsmessung mindestens um den Faktor 1000 weniger Probenmaterial und eine um Faktor 100 geringere Meßdauer. AMS hat also gegenüber der konventionellen Zerfallsmessung den Vorteil einer um den Faktor 10^5 höheren Nachweisempfindlichkeit (Kutschera 1999).

Prinzip der Beschleunigermassenspektrometrie

Um die Atome des interessierenden Radioisotops direkt zählen zu können, muß es erst irgendwie gelingen eben diese Atome von allen anderen eindeutig abzutrennen, damit man sichergehen kann auch wirklich nur die Atome des Radioisotops zu zählen.

Dazu wird aus dem Probenmaterial in einer Ionenquelle ein Ionenstrahl erzeugt und auf niedrige Energien beschleunigt. Danach werden die Ionen des Radioisotops vorselektiert und nach einer Beschleunigung auf Energien von einigen MeV wiederum von anderen Ionen getrennt, um schließlich mit kernphysikalischen Methoden gemessen (gezählt) zu werden.

Die Schwierigkeit liegt dabei weniger in der Trennung des Radioisotops von anderen Isotopen desselben Elements (das leisten bereits konventionelle Massenspektrometer). Es können zwar einzelne Isotope getrennt werden, nicht aber Isobare. Isobare sind Atome oder Moleküle gleicher Massenzahl. Stickstoff hat eine Massenzahl von 14 und ist somit ein Isobar zum ^{14}C . Aber auch Moleküle wie ^{13}CH oder $^{12}\text{CH}_2$ haben eine Masse von 14. Da diese Moleküle und Stickstoff in jeder Kohlenstoffprobe vorhanden sind, können sie mit Massenspektrometrie nicht vom ^{14}C getrennt werden.

Die spezielle Anforderung an AMS ist daher die Abtrennung der Isobaren. Dazu werden mehrere Filter verwendet, die dafür sorgen, daß nach und nach alle störenden Ionen weggefiltert werden und am Ende nur noch Atome des untersuchten Radioisotops gemessen werden. Das Grundprinzip masseabhängiger Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld ist ein wesentlicher Bestandteil auch für AMS, jedoch ermöglicht erst eine zusätzliche Beschleunigung auf hohe Energien die Trennung der Isobaren.

II. VERA - Vienna Environmental Research Accelerator

VERA steht für Vienna Environmental Research Accelerator, die seit 1996 am Institut für Isotopenforschung und Kernphysik der Universität Wien bestehende AMS- Beschleunigeranlage. Anhand des VERA-Beschleunigers (siehe Abbildung) soll nun das Prinzip der Abtrennung störender Ionen, die für die Zählung der Atome des Radioisotops notwendig ist, anhand des Beispiels einer ^{14}C -Messung detaillierter dargestellt werden.

Chemische Vorbehandlung

Im Normalfall besteht das interessierende Material nicht aus reinem Kohlenstoff. Der erste Schritt besteht also darin das Probenmaterial chemisch aufzubereiten, das heißt den Kohlenstoff in der Probe mit chemischen Methoden zu isolieren. Dabei muß höchste Sorgfalt darauf verwendet werden keine Verunreinigungen ins Probenmaterial einzubringen. Eine Verunreinigung mit modernem Kohlenstoff würde beispielsweise das Ergebnis einer Altersbestimmung auf ein jüngeres Alter hin verfälschen. Auf dem Wege der chemischen Aufbereitung können auch störende Elemente bereits um einige Größenordnungen reduziert werden.

Das aufbereitete Material wird in einen Probenhalter gepreßt und in die Ionenquelle eingebaut.

Ionenquelle

Um Teilchen in einem Magnetfeld ablenken zu können, müssen die Teilchen elektrisch geladen sein und sich durch das Magnetfeld bewegen. Die Grundlage für AMS (wie auch für konventionelle Massenspektrometrie) ist daher ein Strahl von geladenen Teilchen: ein Ionenstrahl.

Der erste Bestandteil eines Beschleunigermassenspektrometers ist die Ionenquelle, in der negative Kohlenstoff-Ionen erzeugt und auf eine Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt werden.

In einem Ofen wird Cäsium erhitzt. Dabei entsteht Cäsium-Dampf, der über eine Zuleitung strömt und auf eine ca. 1000°C heiße Metallfläche trifft. Auf der heißen Metalloberfläche wird das Cäsium thermisch ionisiert. Die nun positiv geladenen Cäsium-Atome werden durch das relativ zur Metalloberfläche negative Potential des Probenhalters zur Probe hin

beschleunigt. Dabei sind sowohl die Metallfläche als auch das elektrische Potential so geformt, daß die Cäsium-Ionen auf die Probe hin fokussiert werden. Die auf der Probenoberfläche auftreffenden Cäsium-Ionen lösen im Material Stoßkaskaden aus, durch die auch Oberflächenatome aus dem Probenmaterial herausgelöst werden. An der Probenoberfläche angelagerte Cäsium-Atome wirken als Elektronen-Donator für diese Atome, was die Bildungswahrscheinlichkeit für negative Ionen erhöht. Die so entstehenden negativen Ionen werden durch eine Extraktionsspannung aus der Ionenquelle hinausbeschleunigt und durch eine Vorbeschleunigung auf eine Energie von ca. 70 keV gebracht.

Die Ionenquelle kann bereits als ein erster Filter dienen. Es gibt nämlich Elemente, die keine negativen Ionen bilden. So kommt uns für ^{14}C -Messungen die Tatsache zugute, daß Stickstoff keine stabilen negativen Ionen bildet. Damit wird schon in der Ionenquelle ein Isobar (^{14}N) ausgeschieden.

Die Ionen, die aus der Ionenquelle kommen, haben nicht alle die gleiche Energie. Aus der Probe werden Ionen unterschiedlich stark herausgeschlagen; dadurch haben die Ionen im Strahl leicht unterschiedliche Energien. Damit aber alle Ionen mit einer Masse von 14 im Magneten auf einer Kreisbahn bleiben, dürfen nur Ionen mit gleicher Energie in den Magneten eintreten. Man benötigt einen Energie-Filter.

Elektrostatischer Analysator

Als erstes Selektionselement müssen die Ionen deshalb den 45° elektrostatischen Analysator (ESA) passieren. Dieser besteht aus zwei sphärischen Ablenkplatten, zwischen denen eine Spannung liegt. Im so erzeugten elektrischen Feld ϵ werden nur jene Ionen auf eine vorgegebene Kreisbahn abgelenkt, die die dafür nötige elektrische Steifigkeit haben. Für Ionen auf Bahnen mit dem Sollradius r muß gelten: elektrische Kraft gleich Zentripetalkraft:

$$\epsilon q = \frac{mv^2}{r}$$

ϵ elektrische Feldstärke

q Ladung des Ions

m Masse des Ions

v Geschwindigkeit des Ions

r Radius der Kreisbahn

$$\epsilon r = \frac{mv^2}{q} = \frac{2\epsilon}{q} \text{ ...elektrische Steifigkeit}$$

Da es im Allgemeinen keine stabilen Ionen mit mehrfach negativen Ladungen gibt, haben alle Ionen im Ionenstrahl die Ladung $-1e$. Der ESA läßt somit nur Ionen mit einer bestimmten Energie passieren. Ionen mit anderen Energien, als der gewählten, stoßen gegen die Seitenwände oder gegen Blenden und werden so gestoppt. Haben die Ionen nach der Ionenquelle durch den Sputterprozeß noch eine ganze Bandbreite an verschiedenen Energien, so befinden sich nach dem ESA nur noch Ionen mit genau definierter Energie im Strahl.

Injektormagnet

Der nächste Filter ist der Injektormagnet. Durch sein Magnetfeld B können nur Ionen mit der richtigen magnetischen Steifigkeit auf Bahnen mit dem Sollradius r passieren. Hier gilt die Beziehung Lorentzkraft gleich Zentripetalkraft:

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$Br = \frac{mv}{q} \quad \text{mit } E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{folgt für } v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

$$\text{damit: } Br = \sqrt{\frac{2Em^2}{mq^2}} = \frac{\sqrt{2Em}}{q} \text{magnetische Steifigkeit}$$

q Ladung des Ions
 v Geschwindigkeit des Ions
 B magnetische Feldstärke
 m Masse des Ions

r Radius der Kreisbahn

Durch den ESA haben bereits alle Ionen gleiche Energie, der Injektormagnet selektiert somit Massen. Nur die Masse, auf die der Magnet eingestellt ist, kann den Magneten passieren, alle anderen werden durch Blenden wiederum abgestoppt.

Da für eine Isotopenkonzentration eines Radioisotops immer auch das stabile Isotop gemessen werden muß, müssen neben ^{14}C auch ^{13}C und ^{12}C in den Beschleuniger eingeschossen und danach gemessen werden. Dazu müßte aber der Injektormagnet jeweils auf die neuen Massen umgestellt werden. Magnetfelder lassen sich jedoch nur sehr langsam ändern und aus diesem Grund hat man sich eine andere Lösung einfallen lassen um auch bei einem unveränderlichen Magnetfeld verschiedene Massen in den Beschleuniger einschließen zu können:

Noch vor dem Magneten werden die Ionen durch ein zusätzliches, variables, elektrisches Feld beschleunigt. Da der Magnet ja nicht Massen sondern Produkte von Masse und Energie (und Ladung, aber die ist für alle Ionen gleich) selektiert, können so auch Ionen mit anderer Masse aber gleichem Masse-Energie-Produkt ebenfalls den Injektormagneten passieren. So können zum Beispiel auch ^{12}C und ^{13}C Ionen den auf Masse 14 eingestellten Magneten passieren, wenn ihre Energien entsprechend erhöht werden.

Nachdem sie den Magneten durchflogen haben, müssen diese Ionen natürlich wieder auf die ursprüngliche Energie abgebremst werden, da sie sonst andere Energien hätten als die Radioisotop-Ionen. Das elektrische Feld erhöht also die Energie der stabilen Isotope nur für die kurze Strecke durch den Magneten. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß elektrische Felder sehr schnell umgestellt werden können. Innerhalb weniger Microsekunden kann die elektrisch isolierte Vakuumkammer des Magneten auf Hochspannung gelegt werden.

Beschleuniger und Stripper

Nachdem sie den Injektormagneten durchflogen haben, befinden sich nur noch Ionen einer bestimmten Masse und Energie im Strahl. Der bisherige Aufbau der AMS-Anlage entspricht einem konventionellen Massenspektrometer moderater Auflösung. Noch sind im Strahl aber neben Atom-Ionen auch Molekül-Ionen vorhanden, die durchaus auch die gleiche Massezahl wie das Radioisotop besitzen können. So kommen beispielsweise auch die Molekülionen ^{13}CH und $^{12}\text{CH}_2$ durch den auf Masse 14 eingestellten

Magneten. Diese Molekülionen sind der Grund dafür, daß zum direkten Zählen der radioaktiven Atome die Methode der konventionellen Massenspektrometrie nicht ausreicht. Wegen des winzigen Massenunterschiedes könnten solche störenden Molekülisobare nur um den Preis eines drastischen Ausbeuteverlustes (durch enge Schlitze) eliminiert werden, was aber alle Vorteile dieser Methode der Zerfallsmessung gegenüber wieder zunichte macht. Um diese Molekülisobare auszuschneiden wird nun bei AMS der Beschleuniger verwendet, der der Methode ihren Namen gab.

Die Ionen werden in einen Tandembeschleuniger eingeschossen, in dessen Mitte ein positives Potential von ca. 3 MV liegt. Dadurch werden die Ionen auf Energien von 3 MeV beschleunigt. Mit diesen hohen Energien durchfliegen die Ionen dann einen sogenannten "Stripper". Das ist entweder eine kurze Gasstrecke oder eine dünne Folie. Durch Wechselwirkung mit der Materie im Stripper werden den negativen Ionen mehrere Elektronen entrissen. Die Ionen sind dadurch nach dem Stripper mehrfach positiv geladen und werden durch das positive Potential in der Mitte des Beschleunigers ein zweites Mal beschleunigt. Je nach Energie der Ionen und Strippermaterial entsteht eine charakteristische Ladungsverteilung von mehrfach positiv geladenen Ionen. Dabei brechen alle noch im Strahl befindlichen Moleküle auf, weil mehrfach positive Moleküle nicht stabil sind.

Da die Ionen nach dem Stripper verschiedene Ladungszustände aufweisen, werden diese durch die zweite Beschleunigung je nach Ladung ebenfalls auf unterschiedliche Energien beschleunigt: ein dreifach positives Ion erhält durch das Potential von 3 MV eine Endenergie von 12 MeV, ein vierfach positives Ion erhält eine Endenergie von 15 MeV. Zusätzlich kann es noch im Beschleuniger zu sogenannten Umladeprozessen kommen, wo sich der Ladungszustand durch Wechselwirkungen mit den Restgasatomen noch während der Beschleunigung ändert. Diese Teilchen haben dann eine Energie, die zwischen der der „gewöhnlichen“ Ladungszustände liegt.

Analysiermagnet

Nach Verlassen des Beschleunigers werden die Ionen erneut durch einen Magneten, den Analysier-Magneten, geschickt. Dieser muß nun auf die interessierende Masse und einen bestimmten Ladungszustand eingestellt werden. Da nach Passieren des Strippers verschiedene Ladungszustände mit unterschiedlichen Häufigkeiten vorkommen, geht hier unvermeidlich ein

Großteil der Atome des Radioisotops verloren, weil man sich für einen Ladungszustand entscheiden muß.

Auch der Analysier-Magnet selektiert nicht Massen, sondern Produkte von Masse, Energie und Ladung und deshalb können danach durchaus auch noch andere Ionen, außer denen des Radioisotops, im Strahl vorhanden sein. Dadurch können Ionen zwar eine andere Masse haben als die, auf die der Analysier-Magnet eingestellt ist, durch eine geeignete Kombination von Masse, Energie und Ladung aber dennoch den Magneten passieren.

Die stabilen Isotope, in unserem Beispiel ^{12}C und ^{13}C , werden im Analysier-Magneten auf anderen Bahnen abgelenkt als ^{14}C , sie werden aber nicht durch Blenden ausgeschieden, sondern durch geeignet angebrachte Faraday-Cups wird deren Ionenstrom gemessen.

Wien-Filter

Um die noch immer im Strahl befindlichen Störatome entfernen zu können benötigt man nach dem Analysier-Magneten ein weiteres Filterelement, den sogenannte Wien-Filter. Der Wien-Filter besteht aus einem Magnetfeld und einem dazu senkrecht stehenden elektrischen Feld. Die Kraftwirkungen dieser Felder auf den Ionenstrahl sind entgegengesetzt gerichtet und bei geeigneter Wahl der Feldstärken fliegen nur jene Ionen unabgelenkt durch das Wien-Filter, die gerade die richtige Geschwindigkeit haben:

Kraft des elektrostatischen Feldes : $q\epsilon$

q Ladung des Ions

ϵ elektrische Feldstärke

Kraft des Magnetfeldes: qvB

q Ladung des Ions

v Geschwindigkeit des Ions

B magnetische Feldstärke

Wenn beide Kräfte gleich groß sind, heben sie einander auf und auf das Ion wirkt keine Kraft – es wird nicht abgelenkt:

$$qvB = qE \quad \Rightarrow \quad v = \frac{E}{B}$$

Ionen, die trotz anderer Masse als der, auf die der Analysier-Magnet eingestellt ist, den Magneten passieren konnten, müssen auch eine andere Energie und damit eine andere Geschwindigkeit besitzen als die Ionen des Radioisotops. Damit können sie aber durch die Geschwindigkeitsselektion des Wien-Filters aus dem Strahl ausgeschieden werden.

Detektor

Jetzt ist der Strahl fast vollständig von allen störenden Ionen gereinigt. Dennoch können sich noch vereinzelt andere Ionen im Strahl befinden, aber auch die kann man noch von den Ionen des Radioisotops unterscheiden. Da die Ionen auf so hohe Energien beschleunigt wurden, kann man sie mit kernphysikalischen Methoden noch einmal voneinander unterscheiden. Die Ionen fliegen in einen Halbleiter-Detektor (oder einen anderen Detektortyp, z.B.: eine Ionisationskammer), in dem die Ionen Ladungsträgerpaare erzeugen und dadurch nachgewiesen werden. Mit Hilfe dieses Detektors kann man aber auch die Energie eines Ions im Detektor feststellen. Zusätzlich ist es möglich den Energieverlust in einer dünnen Detektionsschicht zu messen, der von der Ordnungszahl Z abhängt. Damit können Ionen anderer chemischer Elemente noch einmal vom Radioisotop unterschieden werden.

Ein Teil der Ionen geht auf dem Weg zum Detektor verloren. Nach Passieren des Strippers besteht der Ionenstrahl aus einem spezifischen Spektrum von Ladungszuständen. Aus diesen kann nur ein Ladungszustand gewählt werden, auf den der Analysiermagnet dann optimiert wird. Auch wenn man den häufigsten Ladungszustand $+3$ wählt, gehen hier ca. 50% aller Ionen verloren.

Viel größer sind die Verluste in der Ionenquelle, da nur wenige Prozent der Atome wirklich in negative Ionen verwandelt werden können. Aufgrund dieser Verluste ist es unvorteilhaft, ein Radioisotop absolut zu messen. Genauer gelingt die Messung im Verhältnis zu einem stabilen Isotop. Daher

muß neben der Zählung der ^{14}C -Ionen im Detektor noch der Ionenstrom von ^{12}C und ^{13}C gemessen werden: in einem Faraday-Cup wird die eingetroffene Ladung gemessen. Aus dem Ionenstrom wird der Teilchenstrom der ^{12}C - und ^{13}C -Atome berechnet und mit den ^{14}C -Zählereignissen werden die Verhältnisse gebildet.

Das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis einer Probe wird immer im Vergleich mit einer Eichprobe mit bekanntem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis gemessen. Die einzelnen Radioisotope können im Beschleuniger unterschiedlich stark verlorengehen und dieser Effekt kann durch eine Relativmessung mit einer Eichprobe bekannter Isotopenverhältnisse korrigiert werden.

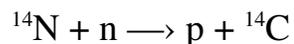
III. Die Radiokarbonmethode - ^{14}C -Datierung

In den 40er Jahren entdeckte Willard Libby, daß in lebenden Organismen Radiokarbon vorkommt, also das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C . Libby erkannte rasch die Möglichkeit, diese Tatsache zu nutzen, um damit eine Methode zur Datierung von organischer Materie zu entwickeln. Die Radiokarbonatierung entwickelte sich dann auch schnell zu einem unverzichtbaren Instrument der Archäologie und Libby erhielt für seine Arbeit 1960 den Nobelpreis für Chemie.

^{14}C kommt in lebenden Organismen in meßbaren Konzentrationen vor. Das heißt, daß ^{14}C ständig produziert wird. Ansonsten wäre ^{14}C mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren schon gänzlich zerfallen und nicht mehr nachweisbar. Nur durch ein Gleichgewicht von Produktion und Zerfall kann sich ausreichend ^{14}C ansammeln um nachgewiesen zu werden.

Produktion

Die Produktion von ^{14}C findet in der oberen Atmosphäre statt: die auf die Atmosphäre auftreffende kosmische Strahlung aus hochenergetischen Protonen produziert durch Kollision mit atmosphärischen Gasmolekülen zahlreiche Sekundärteilchen, darunter auch hochenergetische Neutronen. Durch elastische Stöße mit Luftmolekülen verlieren diese Energie. Mit niederenergetischen (thermischen) Neutronen reagiert der Stickstoff der Luft unter Bildung von ^{14}C und der Abgabe eines Protons:



Die Produktionsrate für ^{14}C beträgt ca. 2 Atome $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ und gleicht den permanenten Zerfall aus, so daß die Menge an vorhandenem ^{14}C konstant bleibt.

Transport

^{14}C bleibt nicht in der Atmosphäre. Kohlenstoff wird durch verschiedene Mechanismen transportiert und in verschiedenen Reservoiren deponiert, so auch ^{14}C : der Kohlenstoff der Luft geht als CO_2 in den Ozeanen in Lösung,

wird als Karbonat in Gestein eingebaut und über die Photosynthese von Pflanzen in die Nahrungskette von lebenden Organismen aufgenommen.

In lebenden Organismen wird über den Stoffwechsel ständig neues aufgenommen, so daß die ^{14}C -Konzentration im Organismus ziemlich genau der in der Atmosphäre entspricht. Mit dem Tod eines Organismus ist dieser Austausch mit der Atmosphäre beendet und das ^{14}C im Organismus zerfällt. Bei bekannter Halbwertszeit und Ausgangskonzentration kann somit aus der Restkonzentration von ^{14}C der zeitliche Endpunkt des Austausches mit der Atmosphäre bestimmt werden.

Libby's simple Idee einer Altersbestimmung mußte allerdings bald mit einigen Korrekturen versehen werden. Es stellte sich heraus, daß einige Grundannahmen auf denen die Methode beruhte, nicht zutreffen:

- auf dem Weg von der Atmosphäre in die Probe können manche Prozesse bestimmte Isotope bevorzugen und so das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis auch ohne Zerfall ändern
- die ^{14}C -Konzentration in der Atmosphäre ist nicht zeitlich konstant

Massenfractionierung

Verschiedene chemische und physikalische Prozesse sind teilweise von der Massenzahl abhängig. Dadurch entstehen auch Unterschiede für die verschiedenen Kohlenstoffisotope, man spricht von Massenfractionierung. Die Aufnahme von atmosphärischem Kohlenstoff in Pflanzen ist ein Beispiel dafür. Wenn leichtere Kohlenstoffisotope bevorzugt aufgenommen werden, kommt es in der Pflanze zu einer leicht niedrigeren Konzentration von ^{13}C und ^{14}C als in der Atmosphäre. Eine geringere ^{14}C -Konzentration in der Pflanze resultiert aber in einem scheinbar höheren Alter. Bei der unkritischen Messung wird die geringere Konzentration dem Zerfall zugeschrieben und die Probe wird älter datiert als sie eigentlich ist.

Dadurch, daß neben dem radioaktiven Isotop ^{14}C noch zwei stabile Kohlenstoffisotope existieren, kann der Einfluß der Massenfractionierung korrigiert werden. Das Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C in der Probe ist leicht bestimmbar und der Anteil von ^{13}C beträgt für einen international festgelegten Referenzwert im irdischen Kohlenstoff 1.112%. Die Abweichung des bestimmten $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses von diesem

Referenzwert gibt ein Maß für die Massenfraktionierung von ^{12}C und ^{13}C , den sogenannten Delta- ^{13}C -Wert:

Die Delta- ^{13}C -Werte sind für verschiedene organische Materialien unterschiedlich, für Holz beträgt er -25 Promille.

Unter der Annahme, daß massenabhängige Vorgänge in erster Ordnung proportional zum Massenunterschied sind, ist die prozentuelle Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses durch einen Prozeß doppelt so groß wie für das $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis. Man kann aus der Abweichung des $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses vom nominellen Wert auf die Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses rückschließen. Der gemessene ^{14}C Gehalt einer Probe wird mit dem doppelten Delta- ^{13}C -Wert korrigiert.

Schwankung der ^{14}C -Produktion

Ursprünglich ging Libby von einer zeitlich gleichbleibenden ^{14}C -Konzentration aus und verglich das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis seiner Proben mit dem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis der Atmosphäre. Bald stellte sich aber heraus, daß die ^{14}C -Konzentration in der Atmosphäre in der Vergangenheit schwankte und dies berücksichtigt werden muß. Neben der natürlichen Veränderung in der Vergangenheit hat auch der Mensch in jüngster Zeit den ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre massiv verändert.

Aufgrund der Industrialisierung wurde als Energielieferant verstärkt Kohle verbrannt und dadurch wurde alter Kohlenstoff, in dem ^{14}C schon zerfallen war, in die Atmosphäre eingebracht. Dadurch sank das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre leicht. Durch den enormen Neutronenfluß bei den Kernwaffentests der 50er Jahre wurden große Mengen an ^{14}C künstlich produziert - der ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre verdoppelte sich. Durch Lösung als $^{14}\text{CO}_2$ im Ozean nimmt dieses erhöhte $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre zwar schnell ab, muß aber dennoch berücksichtigt werden: so kann das derzeitige $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis nicht als Referenzwert zur Altersbestimmung verwendet werden.

Als Referenzwert für die Altersbestimmung wird eine Oxalsäure als Standard verwendet, die das (berechnete) $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis von Bäumen im Jahr 1950 aufweist. Den moderne Referenzwert stellt also das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in Bäumen im Jahre 1950 dar.

Die natürlichen Schwankungen im $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre haben ihre Ursache in veränderten Produktions- und Austauschraten. Dabei können mehrere Effekte unterschieden werden: langfristige und kurzfristige Schwankungen.

Der langfristige Trend in der Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses beruht auf der Änderung des Erdmagnetfeldes: ändert sich das Erdmagnetfeld, ändert sich die magnetische Abschirmung der Erdatmosphäre für geladene Teilchen der kosmischen Strahlung und damit die Produktionsrate für ^{14}C .

Die kurzfristigen Schwankungen korrelieren stark mit der Sonnenaktivität. Sie werden also vermutlich durch die Änderung der Sonnenaktivität verursacht, die sich ebenfalls in einer Änderung des Protonenflusses zur Erde und damit in einer geänderten Produktionsrate für ^{14}C bemerkbar macht.

Die bei weitem größten Änderungen wurden durch Änderungen der Meerestemperatur verursacht. Die Löslichkeit von CO_2 in Wasser ist temperaturabhängig. Bei einer Temperaturänderung wird entweder viel neues ^{14}C aufgenommen oder altes ^{14}C abgegeben.

Um aus der Aktivität oder dem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ Verhältnis einer Probe über die Halbwertszeit das Alter bestimmen zu können, muß man die Anfangsaktivität bzw. das Anfangsverhältnis von $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ kennen. Aufgrund der Produktionsschwankungen für ^{14}C war das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre in der Vergangenheit aber nicht das gleiche wie heute. Um Datieren zu können, muß man eine Möglichkeit finden das jeweilige $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Vergangenheit zu bestimmen. Diese Möglichkeit hat man in Form der Dendrochronologie gefunden.

Dendrochronologie

Die Dendrochronologie macht sich zunutze, daß das Wachstum von Bäumen stark von klimatischen Bedingungen abhängt. Je nach äußeren Bedingungen wächst ein Baum einmal stärker, in einem ungünstigen Jahr wieder schwächer. So entsteht eine charakteristische Abfolge von Jahresringen, deren Dicke die jeweiligen Wachstumsbedingungen in diesem Jahr widerspiegeln. Für Bäume einer Gegend können verschieden alte Bäume durch Überlappung von Abschnitten mit gleicher Abfolge von Baumringdicken eine Baumringchronologie bilden. Dabei können auch unter Sauerstoffabschluß konservierte tote Bäume herangezogen werden. Auf diese Art und Weise konnten Dendrochronologien für die letzten 11.500 Jahre erstellt werden. An Baumringen bekannten Alters aus diesen

Chronologien kann man nun das jeweilige $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis für die letzten 11.500 Jahre bestimmen.

Als Libby mit den ersten Datierungen begann, verwendete er eine Halbwertszeit von 5568 Jahren für ^{14}C (anstatt der heute akzeptierten 5730 Jahre). Für Radiokarbondatierungen rechnet man auch heute noch mit der von Libby verwendeten Halbwertszeit, um das sogenannte Radiokarbonalter zu bestimmen. Dazu wird zuerst die gemessene Aktivität (bzw. das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis) auf ein $\Delta^{13}\text{C}$ von -25 Promille (der für Holz übliche Wert) korrigiert. Mit der korrigierten Aktivität (bzw. dem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis) der Probe und der Standardaktivität (bzw. dem Verhältnis von $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ des Standards) wird dann unter Verwendung der Libby-Halbwertszeit von 5568 Jahren das Radiokarbonalter berechnet. Das Radiokarbonalter ist nur ein Rechenwert aber kein tatsächliches Alter, da erstens eine zu niedrige Halbwertszeit verwendet wurde und zweitens die Schwankungen des ^{14}C -Gehalts der Atmosphäre nicht berücksichtigt wurden. Diese können unter Verwendung der Daten aus der Dendrochronologie korrigiert werden, indem das Radiokarbonalter kalibriert wird. Dazu wird auf einer Achse das Radiokarbonalter gegen das aus der Dendrochronologie gewonnene Kalenderalter der gemessenen Bäume aufgetragen. Nun kann anhand des so entstandenen Graphen zu jedem Radiokarbonalter das zugehörige Kalenderalter bestimmt werden. Dabei wird gleichzeitig auch die Verwendung der zu niedrigen Halbwertszeit korrigiert.

IV. Umweltforschung

Die Datierung über Radiokarbon ist zwar die häufigste, aber bei weitem nicht die einzige Anwendung der Beschleunigermassenspektrometrie. Das Grundprinzip des Zählens einzelner Atome eines Radioisotops ist auch nicht auf ^{14}C beschränkt. Es gibt zahlreiche Radioisotope, mit denen durch Beschleunigermassenspektrometrie neue Erkenntnisse über unsere Umwelt gewonnen werden können. Dazu können neben den natürlichen Radioisotopen auch vom Menschen durch Kernwaffentests oder Kernkraftwerke erzeugte Radioisotope verwendet werden.

Radioisotope können räumliche und zeitliche Informationen über verschiedenste Prozesse in unserer Umwelt liefern. Das reicht von der Datierung von Grundwasser bis zur Untersuchung von Mondgestein, von Forschungen über tektonische Plattenverschiebungen bis zum Nachweis der Herkunft radioaktiver Spaltprodukte, vom Neutrinonachweis bis zur medizinischen Forschung. Zwei Beispiele für solche Anwendungen sollen noch kurz skizziert werden:

Die globale Ozeanströmung

CO_2 ist sehr gut wasserlöslich. In den Ozeanen der Erde ist daher bei weitem mehr CO_2 gelöst, als sich CO_2 in der Atmosphäre befindet. So sind auch 93% des Kohlenstoffisotops ^{14}C als $^{14}\text{CO}_2$ in den Ozeanen gespeichert. Durch den permanenten Austausch mit der Atmosphäre spiegeln die Ozeane an der Oberfläche das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis der Atmosphäre. In der Tiefe jedoch herrscht ein anderes $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis, das durch den radioaktiven Zerfall von ^{14}C umso geringer ist, je länger das Wasser nicht an der Oberfläche war und damit im Austausch mit der Atmosphäre. Eine genaue Analyse der Altersunterschiede von Tiefenwasser und Oberflächenwasser erlaubt so Rückschlüsse auf den globalen Wassertransport in den Ozeanen.

Strömungsuntersuchungen können sich auch ein anthropogen eingebrachtes Radioisotop zunutze machen. In den europäischen Wiederaufbereitungsanlagen von Kernbrennstäben, La Hague und Sellafield, gelangten in den letzten 20 Jahren ca. 1000 kg des Spaltproduktes ^{129}I in den Ozean. Diese Menge reicht aus um das $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ -Verhältnis im Ozean überall dort nachweisbar zu verändern, wo die Strömung es hintransportiert. Durch

diese zwei Punktquellen von ^{129}I ist somit eine weitere Untersuchung der Meeresströmungen möglich.

Aufgrund der hohen Halbwertszeit von 17 Millionen Jahren bedeutet die Freisetzung von ^{129}I im Vergleich zu anderen Nukliden übrigens keine Strahlengefahr. Das zusätzliche ^{129}I bedeutet pro Liter Wasser einen zusätzlichen Beta-Zerfall in sechs Jahren.

Biomedizinische Anwendungen

Biomedizinische Anwendungen von AMS wurden in den letzten Jahren immer wichtiger. Die Verwendung von langlebigen Radioisotopen anstelle von kurzlebigen, die zum Nachweis über Zerfallsmessung nötig sind, erniedrigt ganz wesentlich die Strahlungsbelastung. Zusätzlich ist gerade in der Medizin eine extrem hohe Nachweisempfindlichkeit von unschätzbarem Wert. Oft ist man an Transportvorgängen bestimmter Stoffe interessiert oder daran festzustellen, wo ein Element oder Molekül sich ablagert und wieviel. Dem Menschen können aber nicht beliebige Mengen jedes Untersuchungsmaterials verabreicht werden. Die interessierenden Stoffe sind vielfach in großen Mengen toxisch, um am Menschen Forschung zu betreiben. Zudem kann nicht garantiert werden, daß die untersuchten Prozesse durch unnatürlich hohe Stoffkonzentrationen beeinflusst werden und anders ablaufen, als bei natürlichen Konzentrationen. Hier ist es nötig mit geringeren Mengen zu arbeiten, die manchmal nur mit AMS nachgewiesen werden können.

So wurde beispielsweise die Aufnahme von Nitrophenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3$) über die menschliche Haut mit einer AMS-Messung untersucht. Nitrophenol, bei dem ein ^{12}C durch ein ^{14}C ersetzt war, wurde auf die Haut aufgebracht. Anschließend wurden mit Hilfe spezieller Pflaster einzelne, übereinanderliegende Zellschichten der Haut abgetragen und mit AMS deren jeweiliges $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis gemessen. Daraus konnte man ersehen, wie schnell Nitrophenol die Haut durchdringt.

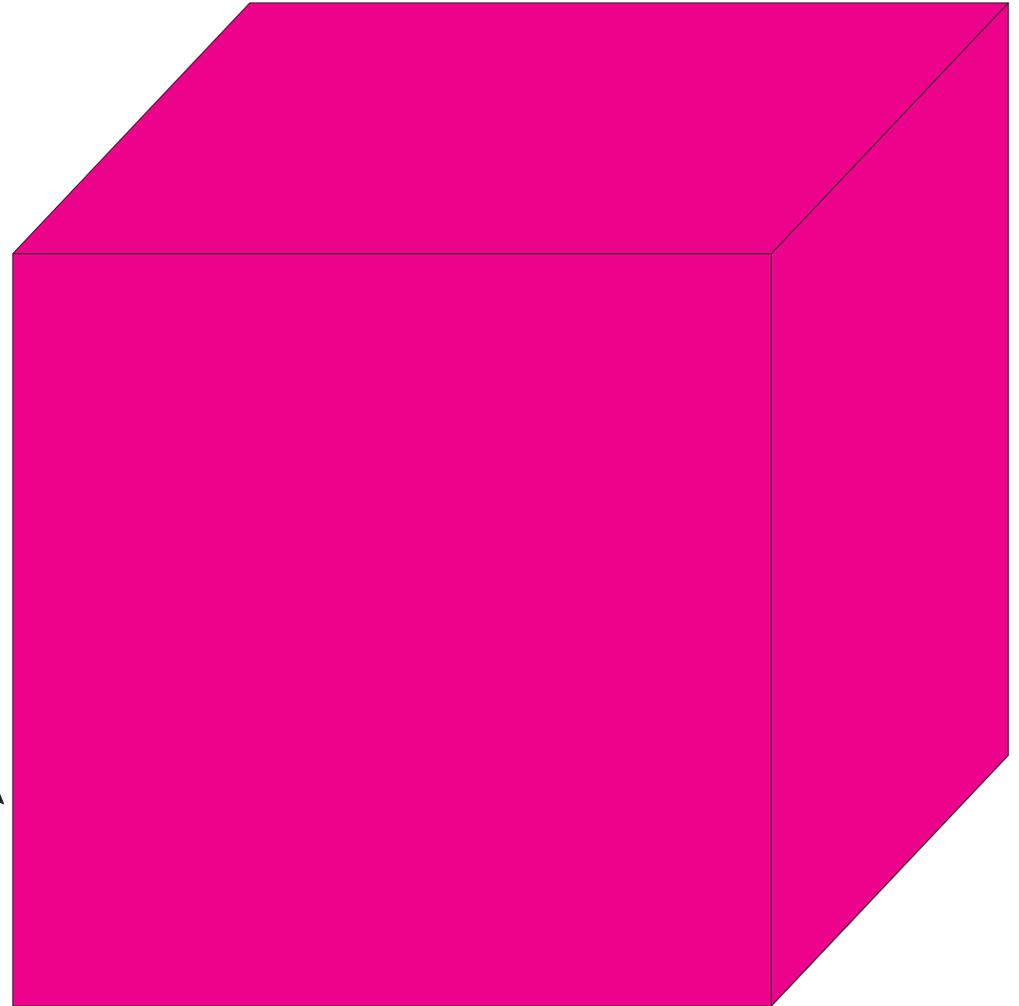
V. Weiterführende Literatur:

- Walter Kutschera: „Beschleuniger-Massenspektrometrie: Die ultimative Methode zum Sortieren von Atomen“, in: Physik in unserer Zeit, September 2000
- Th.E. Graedel und P.J. Crutzen: „Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und Umwelt“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994
- C. Tuniz et al.: „Accelerator Mass Spectrometry: Ultrasensitive Analysis for Global Science“, CRC Press, Boca Raton 1998
- R.E. Taylor, A. Long und R.S. Kra: „Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective“, Springer, New York 1992

**Atome zählen -
Beschleunigermassenspektrometrie
und ihre Anwendung**

Atome zählen statt auf den Zerfall warten

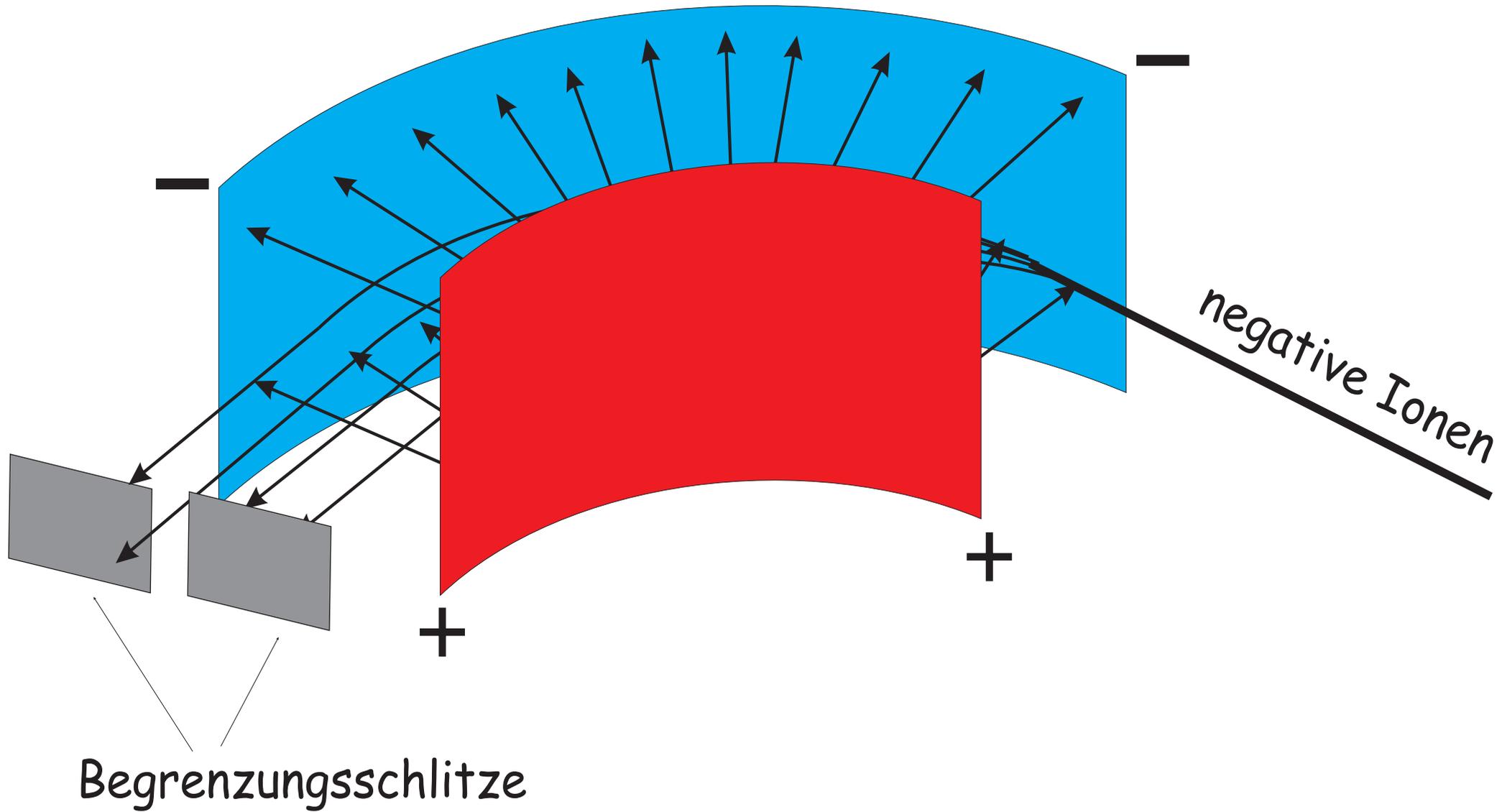
gemessene Kerne



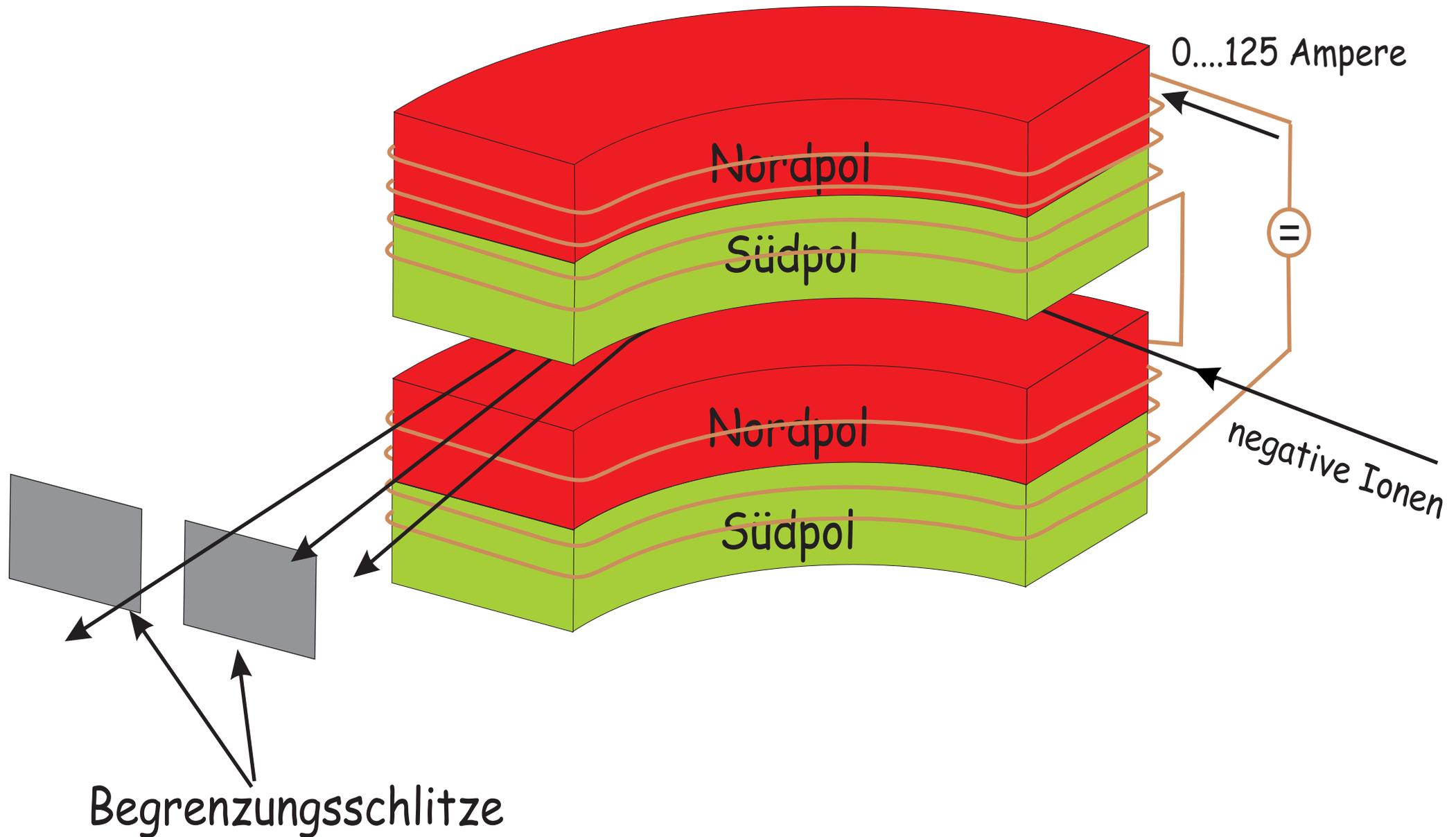
Zerfallsmessung
in einer Stunde

Beschleunigermassenspektrometrie
in einer Stunde

Ein elektrisches Feld trennt Energien



Die erste Massentrennung



Der Beschleuniger

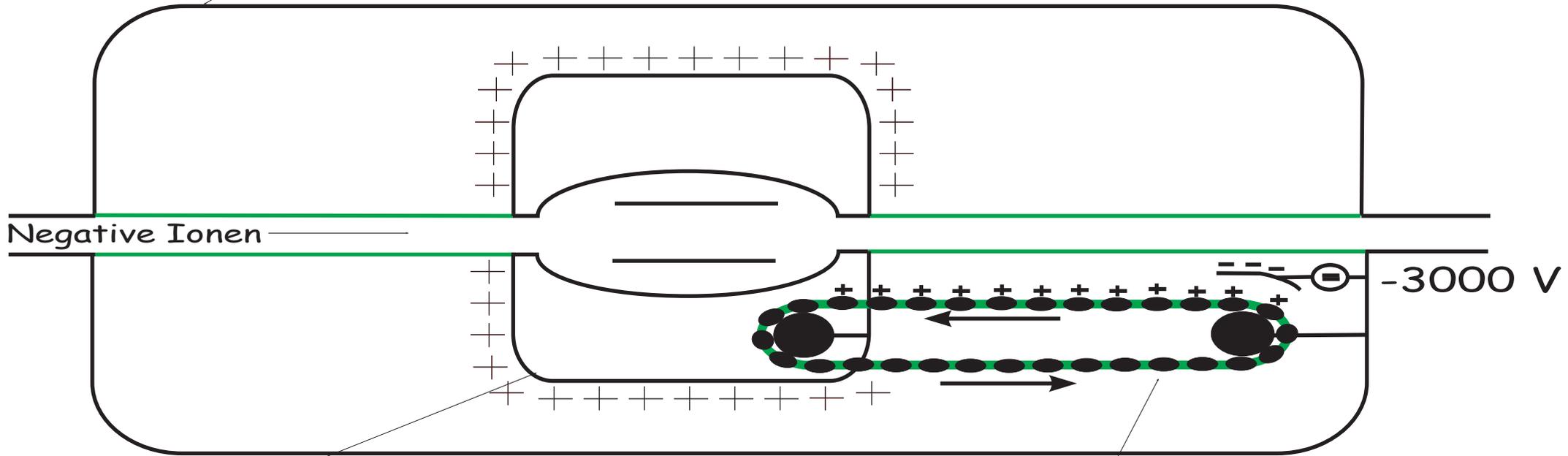
Isoliertank

Negative Ionen

-3000 V

Hochspannung:
3 Millionen Volt

Ladungskette



Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung	2
	Umweltforschung	2
	BesucherInnen bei VERA	4
	2. Aufgabenstellung	
	6	
	Primäre Zielgruppe: SchülerInnen	7
	Sekundäre Zielgruppe: LehrerInnen	9
III.	Was soll vermittelt werden?	11
IV.	Umsetzung	13
	Texte	14
	Folien	15
	Radioaktivität	16
	AMS	17
	Radiokarbondatierung	19
	Umweltforschung	21
I.	Schluß	22
V.	Literaturverzeichnis	23
VI.	Anhang: Overhead-Folien & Begleitheft	27

Einleitung

Seit 1996 besitzt das Institut für Isotopenforschung und Kernphysik der Universität Wien eine Anlage für Beschleunigermassenspektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry - AMS). Diese Anlage, genannt Vienna Environmental Research Accelerator (VERA), ist für ein breitgefächertes Anwendungsspektrum ausgelegt und betreibt das, was der Name der Anlage schon beinhaltet: Umweltforschung.¹

Mit Hilfe von verschiedenen Radioisotopen, die nur in geringen Konzentrationen vorkommen und mit AMS nachgewiesen werden können, ist es möglich Informationen über räumliche und zeitliche Vorgänge in unserer Umwelt zu erhalten. Dabei stehen natürlich produzierte, langlebige Radioisotope zur Verfügung, es können aber auch aus der Existenz der durch die Kernwaffentests vom Menschen erzeugten Radioisotope neue Erkenntnisse gewonnen werden.

Umweltforschung

Wenn hier immer wieder von Umwelt gesprochen wird, so ist ein sehr weit gefaßter Umweltbegriff gemeint, der den Alltagsbegriff weit übersteigt. Umwelt wird im Alltagsverständnis meist als das verstanden, was durch Umweltschutz zu schützen ist, also die unberührte Natur, Regenwälder, Sumpfgebiete, Bergalmen...

Demgegenüber befaßt sich Umweltforschung mittels AMS mit allem, was sich um den Menschen herum an Prozeßen abspielt, die auch - direkt oder indirekt - den einen oder anderen Einfluß auf den Menschen haben. Um-Welt in diesem Sinn kann in sieben Bereiche eingeteilt werden, in denen mit AMS Forschung betrieben werden kann²:

¹ Kutschera, W., Collon, P., Friedmann, H., Golser, R., Hille, P., Priller, A., Rom, W., Steier, P., Tagesen, S., Wallner, A., Wild, E., Winkler, G: *VERA: A new AMS facility in Vienna*. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B123 (1997), p. 47-50

² siehe auch: Kutschera, Walter: Conference summary: *Trends in AMS*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B123 (1997), p. 594-598

Umweltbereich	Verwendung
Atmosphäre	<p>Produktion und Verbreitung kosmogener und anthropogener Radioisotope (^3H, ^7Be, ^{10}Be, ^{14}C, ^{26}Al, ^{32}Si, ^{36}Cl, ^{39}Ar, ^{81}Kr, ^{85}Kr, ^{129}I)</p> <p>Studium von Spurengasen: CO_2, CO, OH, O_3, CH_4 (^7Be, ^{10}Be, ^{14}C)</p> <p>Herkunft und Transport von Aerosolen (^{14}C)</p>
Biosphäre	<p>Datierung in der Archäologie und in anderen Gebieten (^{14}C, ^{41}Ca)</p> <p>^{14}C Kalibration in Baumringen, Korallen und Sedimenten (^{14}C)</p> <p>Datierung mit Hilfe des Bomben-Peaks für gerichtsmedizinische Untersuchungen (^{14}C)</p> <p>Toxologische und biomedizinische Untersuchungen in lebenden Tieren und Menschen mit Hilfe von künstlich markierten Substanzen (^{14}C, ^{26}Al, ^{41}Ca, ^{79}Se, ^{129}I)</p>
Hydrosphäre	<p>Datierung von Grundwasser (^{14}C, ^{36}Cl, ^{39}Ar, ^{81}Kr, ^{129}I)</p> <p>Globale ozeanische Strömungen (^{14}C, ^{39}Ar, ^{129}I)</p> <p>Paläoklimatische Untersuchungen in Tiefseesedimenten (^{14}C)</p>
Kryosphäre	<p>Paläoklimatische Untersuchungen in Eisbohrkernen von Gletschern und polaren Eiskappen (^{10}Be, ^{14}C, ^{32}Si, ^{36}Cl, ^{39}Ar, ^{81}Kr)</p> <p>Zeitliche Variationen der kosmischen Strahlung (^{10}Be, ^{36}Cl)</p> <p>Identifikation des Bomben-Peak (^{36}Cl, ^{41}Ca, ^{129}I)</p>
Lithosphäre	<p>Expositionsalter und Erosion von Oberflächengesteinen (^{10}Be, ^{14}C, ^{26}Al, ^{36}Cl)</p> <p>Paläoklimatische Untersuchungen mit Löß (^{10}Be)</p> <p>Subduktion tektonischer Platten durch Analyse von Lavagestein (^{10}Be)</p> <p>Platingruppenelemente in Mineralien (stabile Spurenisotope)</p>
Kosmosphäre	<p>Reaktionsprodukte der kosmischen Strahlung in Meteoriten und Mondgestein (^{10}Be, ^{14}C, ^{26}Al, ^{36}Cl, ^{41}Ca, ^{44}Ti, ^{59}Ni, ^{60}Fe, ^{107}Pd, ^{129}I)</p> <p>Nachweis von Supernova Explosionen durch ausgestorbene und aktive Radioisotope in Meteoriten und Mangankrusten (^{10}Be, ^{26}Al, ^{36}Cl, ^{41}Ca, ^{60}Fe, ^{107}Pb, ^{146}Sm, ^{244}Pu)</p> <p>Geochemischer Nachweis von Sonnenneutrinos in Mineralien (^{98}Tc, ^{205}Pb)</p>

	Suche nach exotischen Teilchen (Überschwere Elemente, Freie Quarks, Seltsame Materie)
Technosphäre	<p>Nachweis von Radioisotopen, die durch die Kernindustrie freigesetzt werden (^{14}C, ^{36}Cl, ^{85}Kr, ^{90}Sr, ^{99}Tc, ^{126}Sn, ^{129}I)</p> <p>Temperaturmessung im Kernfusionsplasma durch Neutronenaktivierung (^{26}Al)</p> <p>Rekonstruktion des Neutronenflusses der Atombombe von Hiroshima durch Untersuchung von Material in der Umgebung der Explosion (^{36}Cl, ^{41}Ca, ^{63}Ni)</p> <p>Charakterisierung von Spaltmaterial in der Umwelt (^{236}U, ^{237}Np, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{242}Pu, ^{244}Pu)</p> <p>Untersuchung von ultrareinen Halbleitermaterialien (stabile Tracer Isotope)</p>

In allen Umweltbereichen kommen Radioisotope vor und können durch geeignete Fragestellungen zur Gewinnung von Informationen über einzelne Sphären, aber auch die wechselseitige Beeinflussung von Sphären, herangezogen werden. In vielen Bereichen eröffnen sich dadurch völlig neue Perspektiven, die anders als durch das Studium der Radioisotope nicht zugänglich sind. Die "Isotopensprache" zu verstehen, verhilft uns zu vielen neuen Erkenntnissen über unsere Umwelt - und die Methode, die uns diese Sprache verstehen läßt, heißt AMS.

BesucherInnen bei VERA

Seit VERA in Betrieb genommen wurde, erweckt die Anlage nicht nur innerhalb des Wissenschaftsbetriebes Interesse. Eine moderne, hochtechnische Forschungsanlage wie VERA ist für viele Menschen interessant. So kamen und kommen immer wieder verschiedene Personen ins VERA-Labor, um sich die Beschleunigeranlage anzusehen und sich deren Funktionsweise und Verwendung erklären zu lassen. Dies sind einerseits Wissenschaftler anderer Fachrichtungen, die AMS als Methode für ihre eigenen Forschungen benutzen (ArchäologInnen, ÄgyptologInnen, GeologInnen...), andererseits aber auch SchülerInnengruppen oder andere an physikalischer Forschung Interessierte.

Diese InteressentInnen kommen großteils in Gruppen ins VERA-Labor, teils zu speziell dafür vorgesehenen Terminen im Rahmen von LehrerInnenfortbildungsveranstaltungen oder während der NAWI-Tage. An speziell der InteressentInnenbetreuung gewidmeten Tagen findet die Besichtigung jeweils in einem speziell dafür geeigneten organisatorischen Umfeld statt: es ist genügend Zeit und Personal vorhanden um die Gruppen zu betreuen.

Vor allem Schulklassen kommen aber auch nach individueller Terminvereinbarung. Üblicherweise wird für BesucherInnen im VERA-Labor zuerst ein kurzer Einführungsvortrag gehalten, bevor die Anlage selber besichtigt wird. Diese Vorträge werden von Institutsangehörigen gehalten und sollen den BesucherInnen einen Einblick in die Grundlagen von AMS geben und mit den speziellen Vorteilen dieser Methode vertraut machen sowie mögliche Anwendungen skizzieren.

Im Laufe der Zeit ist der Wunsch nach Overhead-Folien als Lehrbehelf für diese Einführungsvorträge sowie für interessierte LehrerInnen, die AMS in der Schule in den Unterricht einbauen wollen, entstanden. Im Sommer 1998 ist man an mich als Lehramtstudierenden mit dem Vorschlag herangetreten, solche Lehrbehelfe im Rahmen einer Diplomarbeit zu erstellen. Mir erschien dies eine reizvolle Aufgabe und ich sagte zu.

Aufgabenstellung

Die ursprüngliche Idee war es, Overhead-Folien zu entwickeln, die für einführende Vorträge verwendet werden können. Vor allem aber sollte es auch möglich sein, diese

Folien LehrerInnen zukommen zu lassen, so daß diese damit schon in den Schulen den Besuch bei VERA vorbereiten können. Thema der Folien sollte die Beschleunigermassenspektrometrie (AMS) sein.

Aus diesem doppelten Verwendungszweck der Folien, einerseits für Einführungsvorträge am Institut und andererseits zur Vorbereitung an den Schulen, ergaben sich auch besondere Anforderungen an die Lehrbehelfe. Die einführenden Vorträge bei Besuchen am Institut werden von Institutsmitarbeitern gehalten, denen die Materie vertraut ist. Sie können solche Vorträge ohne spezielle Vorbereitung jederzeit halten und benötigen die Folien nur zur besseren Veranschaulichung technischer Gegebenheiten, zur Verdeutlichung von Vorgängen und allenfalls als Strukturierungshilfe. Sie verwenden gegebenenfalls Folien als Hilfsmittel für ihre Vorträge, um diese anschaulicher und abwechslungsreicher zu gestalten. Ganz anders die Situation, wenn Overhead-Folien im Unterricht eingesetzt werden, unabhängig davon, ob als Vorbereitung auf einen Besuch bei VERA oder im Rahmen des regulären Unterrichts.

Aus diesem Grund verlagerte sich die Aufgabenstellung bereits nach kurzem zu einer Schwerpunktsetzung auf die "Darstellung der Beschleunigermassenspektrometrie im Unterricht an höheren Schulen", wie denn auch der Titel der Diplomarbeit lautet. Es erschien mir einfach sinnvoller die Folien in Hinblick auf eine Verwendung im Unterricht zu konzipieren, da eine Verwendung solcher Lehrbehelfe auch am Institut ohne weiteres möglich ist. Auch für LehrerInnen bietet dieser Ansatz Vorteile: einerseits können die Lehrbehelfe zur Vorbereitung einer Exkursion ins VERA-Labor herangezogen werden, andererseits können sie aber auch im normalen Unterricht verwendet werden, ohne daß eine Exkursion geplant ist.

In Schulen werden die Folien im allgemeinen nicht von Personen mit Fachwissen über AMS oder Kernphysik eingesetzt. Overhead-Folien allein sind daher für die Zwecke von LehrerInnen nicht ausreichend. Um sie im Unterricht einsetzen zu können, muß den LehrerInnen mit den Folien auch ausreichend Information über AMS mitgeliefert werden, so daß sie mit den Folien arbeiten können. Diese Informationen müssen zusätzlich zu den Folien angeboten werden.

Primäre Zielgruppe der Folien sind in beiden Fällen jeweils SchülerInnen. Sie sind auf jeden Fall die EndkonsumentInnen der dargebotenen Informationen, im Falle des optischen Informationsträgers Overheadfolie auf direktem Wege, bei der den LehrerInnen zur Verfügung gestellten Informationen auf indirektem Wege über die Weitergabe der Informationen durch diese. Das primäre Augenmerk bei der Entwicklung der Lehrbehelfe muß also in jedem Fall immer auf den Bedürfnissen und Möglichkeiten der SchülerInnen liegen.

Primäre Zielgruppe: SchülerInnen

In der Regel wird AMS als Unterrichtsgegenstand im Rahmen der Kernphysik thematisiert. Es ist jedoch aufgrund der vielfältigen Anwendungen in verschiedenen Bereichen praktisch überall möglich AMS als Methode für moderne Forschung mit einzubeziehen. Dennoch sollten zum Verständnis der Prinzipien, die sich AMS zunutze macht, einige Voraussetzungen erfüllt sein. Grundkenntnisse über den Aufbau der Materie, Grundlagen des Elektromagnetismus und der Radioaktivität sowie eine ungefähre Vorstellung von den vorkommenden physikalischen Größenordnungen sollten von den SchülerInnen bereits mitgebracht werden, um das Prinzip hinter AMS und die Funktionsweise der VERA-Anlage in vertretbarer Zeit hinreichend gut verstehen zu können. Dies trifft im allgemeinen auf SchülerInnen der 11. und 12. Schulstufe zu, in Ausnahmefällen, beispielsweise in Projektgruppen oder im vertiefenden Unterricht, auch schon früher.

SchülerInnen der 11./12. Schulstufe haben bereits diverse Vorstellungen, Wertungen und Interessen auch über Physik und physikalische Forschung entwickelt, deren Existenz der geplanten Vermittlung von AMS als physikalische Forschungsmethode förderlich oder aber auch hinderlich sein kann, deren Kenntnis aber auf jeden Fall in die Entwicklung eines Lehrbehelfs zu AMS einfließen sollte³:

³ siehe: Duit, Reinders: *Lernen als Konzeptwechsel im naturwissenschaftlichen Unterricht*. In: Duit, Reinders, von Rhöneck, Christoph (Hrsg.): *Lernen in den Naturwissenschaften*. Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel 1996, p. 145-162

Moderne physikalische Großforschung stößt auf grosses Interesse. Gerade das Wort Beschleuniger wird mit sensationellen, geheimnisvollen und daher besonders interessanten Forschungen in der Elementarteilchenphysik in Verbindung gebracht. Bei Beschleuniger denken die meisten SchülerInnen zuerst an CERN (und rechnen auch bei VERA mit einem Ringbeschleuniger).

Der Begriff Umweltforschung trägt in den Ohren von SchülerInnen eine positive Konnotation. Natürlich verwenden SchülerInnen dabei an einen sehr eingeschränkten Umweltbegriff und denken oft mehr an Umweltschutz als an Forschungen in allen uns umgebenden Bereichen. Dennoch kommt dies einer Beschäftigung mit VERA zugute, da die Einstellung gegenüber einem Umweltforschungsbeschleuniger eine andere ist als die beispielsweise einem Forschungsreaktor gegenüber.

Die VERA-Anlage wird vom Institut für Isotopenforschung und Kernphysik betrieben und meist im Zuge der Beschäftigung mit Kernphysik behandelt. Mit Kernphysik verbinden SchülerInnen aber primär negative Assoziationen wie Kernwaffentests, Tschernobyl oder die Debatte um diverse grenznahe Kernkraftwerke. Der Begriff Kernphysik wird daher zunächst eher negativ gewertet.

Ein weiterer Vorteil der Kombination einer technischen Anlage mit der Anwendung derselben zur Umweltforschung liegt darin, daß die geschlechtsspezifischen Interessenslagen, die im in Frage kommenden Alter schon stark ausgeprägt sind, für beide Geschlechter berücksichtigt werden können. Burschen haben eher Interesse am technischen Aufbau der Beschleunigeranlage und deren Funktionsweise. Mädchen interessieren sich eher für die Anwendungen, sei es die ^{14}C -Datierung oder andere Anwendung mit direktem Bezug zu Naturphänomenen⁴.

⁴ Hoffmann, Lore: *Mädchen und Physik – ein aktuelles, ein drängendes Thema*. Naturwissenschaften im Unterricht Physik Heft 1/1990, p. 5ff. Hoffmann, Lore, Häußler, Peter, Peters-Haft, Sabine: *An den Interessen von Mädchen und Jungen orientierter Physikunterricht*. Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel 1997, p. 20

SchülerInnen assoziieren gewisse Vorstellungen mit Begriffen wie Umweltforschung, Beschleuniger oder Kernphysik. Man muß dies einerseits wissen, um nicht den Fehler zu machen, SchülerInnen als tabula rasa im Bereich von AMS zu betrachten, denen nur Informationen angeboten werden müssen. Vielmehr müssen oft schon bestehende (Vor)Urteile beseitigt oder zumindest umgedeutet werden, um zu einem besseren Verständnis zu gelangen. Wenn der Lehrbehelf bei manchen SchülerInnen eine andere - realistischere Bewertung - mancher Begriffe bewirkt, so ist dies durchaus auch ein Lernerfolg. Es ist beabsichtigt, wenn SchülerInnen den Begriff "Umwelt" weiter zu fassen beginnen als dies normalerweise geschieht. Es ist erwünscht, wenn SchülerInnen Kernphysik als Methode einmal in konstruktiven Zusammenhängen kennenlernen, anstatt immer in Zusammenhang mit Kernwaffen und Kernkraftwerken. Und es ist positiv, wenn SchülerInnen sehen, daß nicht jeder Teilchenbeschleuniger kreisförmig und kilometerlang sein muß (wie der wohl bekannteste Beschleuniger im CERN).

Sekundäre Zielgruppe: LehrerInnen

Die Entscheidung darüber, ob mögliche Lehrbehelfe im Unterricht eingesetzt werden und in welchem Ausmaß, liegt bei den LehrerInnen. Darauf muß bei deren Konzeption Rücksicht genommen werden. LehrerInnen werden Lehrbehelfe zu AMS vorwiegend zur Vorbereitung von Exursionen verwenden. Dazu muß es LehrerInnen ermöglicht werden sich selbst einmal ausreichend über die Grundprinzipien von AMS zu informieren um mit den Lehrbehelfen sinnvoll arbeiten zu können.

Dabei ist unbedingt darauf zu achten, daß diese Informationen auch verständlich dargebracht werden. Eine zu technische oder abstrakte Darstellung von AMS würde nur dazu führen, daß LehrerInnen die angebotenen Unterrichtsbehelfe nicht nützen würden. LehrerInnen erwarten sich von Unterrichtsbehelfen, daß sie auch effizient eingesetzt werden können. Dies ist nicht gegeben, wenn der Verwendung im Unterricht eine langwierige Einarbeitung in die Materie vorausgehen muß. Die Informationen für LehrerInnen sollen leicht verständlich sein und besser auch (scheinbar triviale) Grundlagen beinhalten, als zu viel vorauszusetzen. Schon Bekanntes kann gegebenenfalls übersprungen werden.

Was soll vermittelt werden?

Das hauptsächliche Ziel ist natürlich - wie der Titel schon verrät- die Darstellung der Beschleunigermassenspektrometrie.

Es soll dargestellt werden, daß jede Methode zur Radioaktivitätsmessung bestimmte Vor- und Nachteile hat. Im Vergleich mit der Zerfallsmessung soll dargestellt werden worin die spezifischen Nachteile dieser konventionellen Methode liegen. Es soll verdeutlicht werden, daß diese Methode nur einen sehr geringen Teil des vorhandenen ^{14}C messen kann und daß dieser Anteil umso geringer wird je länger die Halbwertszeit des Isotops ist. Die Idee, daß es besser ist die Radioisotope vor deren Zerfall direkt zu messen, statt auf den Zerfall zu warten, liegt dann schon sehr nahe. Es soll sodann auf die Vorteile dieser Methode im direkten Vergleich mit der Zerfallszählung hingewiesen werden.

Es soll ausgehend vom Wissen um den Vorteil einer Zählung gegenüber dem Nachweis von Zerfällen daran erinnert werden, wie Isotope verschiedener Massen getrennt werden können. Das Prinzip der Ablenkung elektrisch geladener Teilchen im Magnetfeld sollte bereits bekannt sein, muß aber auf jeden Fall wieder in Erinnerung gerufen werden, da es einen integralen Bestandteil des Verfahrens der Beschleunigermassenspektrometrie darstellt.

Sodann soll erklärt werden warum die konventionelle Massenspektrometrie nicht zu leisten vermag, was eine der Zerfallsmessung überlegene Methode leisten müßte: die Zählung einzelner Atome zu ermöglichen.

Es soll dargestellt werden, daß dies erst durch die geschickte Kombination verschiedener physikalischer Prinzipien gelingt, die den großen Aufwand dieser Methode bewirken. Dazu sollen am Beispiel der Wiener AMS-Anlage im VERA- Labor die einzelnen Schritte nachvollzogen werden, die letztlich die direkte Zählung von Atomen ermöglichen. Den Schülern soll exemplarisch veranschaulicht werden, wie ein gegebenes Problem durch geschickte Anwendung bekannter physikalischer Prinzipien gelöst wird, wie physikalische Forschung tatsächlich funktioniert.

Den SchülerInnen soll – speziell bei einer Exkursion – ein Einblick in den universitären Forschungsbetrieb ermöglicht werden, nicht nur in Hinblick auf die eigentliche physikalische Forschung im VERA-Labor. Die SchülerInnen sollen auch erfahren, wie

ein Forschungslabor unter organisatorischem Blickwinkel aussieht, beispielsweise wie viele Personen darin arbeiten oder was eine AMS-Anlage kostet.

Neben der Darstellung der Grundlagen von AMS und der technischen Funktionsweise der VERA-Anlage wollte ich ein Beispiel für eine Anwendung detaillierter darstellen. Dabei drängte sich die Radiokarbondatierung aus mehreren Gründen auf. Erstens ist sie die weitaus häufigste Anwendung, auch im VERA-Labor. Zweitens ist sie vielen SchülerInnen in Grundzügen schon bekannt, d. h. man kann schon auf Vorwissen aufbauen. Die Nützlichkeit der Radiokarbondatierung ist SchülerInnen unmittelbar klar (was bei anderen Anwendungen nicht immer der Fall ist).

Anhand des Beispiels der Radiokarbondatierung sollen die SchülerInnen sehen, wie man sich mit einer einfachen Überlegung ein physikalisches Phänomen zur Lösung eines Problems zunutze machen kann. Die SchülerInnen sollen dabei auch erkennen, daß solch eine Methode immer auf gewissen Annahmen basiert. Es soll ihnen gezeigt werden, daß sich diese Annahmen auch als unrichtig erweisen können und daß es trotzdem oft möglich ist durch weitere Überlegungen die Methode entsprechend zu modifizieren.

Zuletzt soll noch exemplarisch ein Ausblick auf weitere Anwendungen neben der Radiokarbondatierung gegeben werden. Dabei wollte ich vor allem auch ein Beispiel aus der biomedizinischen Forschung geben, in der sich AMS gegenwärtig zu einer immer häufiger eingesetzten Methode entwickelt. Hier kann auch schön noch einmal dargestellt werden, wie die hohe Nachweisempfindlichkeit von AMS in manchen Bereichen neue, bisher unmögliche Forschungsansätze ermöglicht.

Umsetzung

Nachdem die Entscheidung für eine Ausrichtung des zu entwickelnden Folienpackets auf den Schulunterricht gefallen war, wollte ich auch hier möglichst vielfältige

Einsatzmöglichkeiten offen lassen. Die Folien sollten nicht ausschließlich auf eine Verwendung durch die LehrerInnen im Rahmen eines LehrereInnen-Vortrags eingeschränkt werden. Ich wollte die Lehrbehelfe vielmehr so gestalten, daß damit auch die Verwendung in anderen Unterrichtsformen ermöglicht wird.

So ist es beispielsweise durchaus denkbar eine Exkursion in das VERA-Labor in kleinen Projektgruppen vorzubereiten. Jede Gruppe könnte dabei ein Thema übernehmen und dieses eingehender bearbeiten. Die übrigen SchülerInnen könnten dann durch Referate von SchülerInnen jeder Projektgruppe über die jeweils wichtigsten Inhalte informiert werden. Diese Vorbereitung hätte auch den Vorteil, daß es zu jedem Teilbereich schon im Vorhinein gut vorbereitete SchülerInnen gibt. Diese "ExpertInnen" können dann während der Exkursion in einigen Bereichen schon auf einer guten Basis aufbauen und auch ganz gezielt nachfragen, wo sie noch Verständnisschwierigkeiten hatten, wovon natürlich die ganze Klasse profitiert.

Damit der geplante Lehrbehelf auch von SchülerInnen eingesetzt werden kann, müssen allerdings einige Voraussetzungen erfüllt sein. Die Gestaltung der Folien muß ausdrücklich auf SchülerInnen als Zielpublikum Rücksicht nehmen. Wenn SchülerInnen den Folien nicht nur als RezipientInnen begegnen, sondern diese auch selbst aktiv zur Vermittlung verwenden, so muß auch dies berücksichtigt werden. SchülerInnen sind nun einmal nicht per se gute Vortragende, sie sollen im Physikunterricht ja unter anderem auch lernen sich verständlich über physikalische Phänomene auszudrücken. Lehrbehelfe, die auch von SchülerInnen eingesetzt werden, müssen daher unbedingt eine erkennbare Struktur und einen logischen Aufbau aufweisen. Sie müssen das Dargestellte auf das Wesentliche reduzieren und dürfen nicht vom Thema abschweifen. Die Darstellung soll kurz und prägnant sein und soll dennoch die Aufmerksamkeit der Rezipienten wecken. Vor allem aber: den SchülerInnen muß ausreichend Information geboten werden, um eine Präsentation z.B. in Form eines Referates auch wirklich vorbereiten und durchführen zu können.

Texte

Aufgrund dieser Erfordernisse resultierten gewisse Vorgaben für die Erstellung des Lehrbehelfs. Die Information, die SchülerInnen bereitgestellt werden soll, wollte ich unabhängig von der Information gestalten, die LehrerInnen bereitgestellt bekommen. SchülerInnen haben ganz andere Vorkenntnisse und operieren in einer ganz anderen (auch physikalischen) Sprache. Die Informationstexte für SchülerInnen müssen sich auf Wesentliches beschränken. Die Texte sollen kurz gehalten sein und dennoch Basisinformationen bereitstellen, anhand derer SchülerInnen selbständig arbeiten können. Die verwendete Sprache soll an die Sprache, die SchülerInnen vertraut ist, angepaßt sein und technisch-physikalische Fachsprache nur vorbereiten, aber nicht schon voraussetzen. Wichtig sind auch Querverweise auf schon Bekanntes, sogenannte advanced organizers⁵. All dies sind andere Anforderungen als sie an einen Informationstext für LehrerInnen gestellt sind. LehrerInnen sind physikalische Sprache und fachliche Argumentationslinien vertraut, sie können physikalische Phänomene schneller analysieren und kategorisieren. Ich habe mich daher dazu entschlossen jeder Folie einen speziell für SchülerInnen konzipierten Begleittext beizulegen. So sollten SchülerInnen mit den Folien selbständig arbeiten können und die Folien können beliebig einzelnen SchülerInnen bzw. Gruppen ausgegeben werden. JedeR erhält so genau die Information die zur Folie gehört und wird nicht durch andere (für sie/ihn nicht relevante) Information abgelenkt. Die Information für LehrerInnen hingegen wollte ich in einem in sich geschlossenen Begleitheft bereitstellen. LehrerInnen erhalten so einen Gesamtüberblick und können Querbezüge herstellen. Bei Bedarf können sich LehrerInnen die gewünschte Detail-Information auch aus einem längeren Text schnell herausfiltern. Es ist also nicht nötig ihnen ebenfalls zu jeder Folie einen eigenen Text beizulegen zumal vieles auf den Folien Dargestellte LehrerInnen schon bekannt sein wird. Außerdem gibt es ja zu jeder Folie einen - wenn auch für SchülerInnen konzipierten - Text, den LehrerInnen durchaus auch verwenden können.

Folien

⁵ Ballstaedt, Steffen-Peter: *Lerntexte und Teilnehmerrunterlagen*. Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1994 (Mit den Augen lernen, Bd. 2), p. 24

Bei der Gestaltung der Folien versuchte ich einerseits nur wesentliche, der Erklärung eines Sachverhalts dienliche Grafiken zu erstellen, die aber andererseits auch das Interesse von SchülerInnen wecken sollen.

Die Beschriftung der Folien reduzierte ich auf das Minimum. Nur für das Verständnis wesentliche Beschriftungen sollten als Text auf den Folien selbst aufscheinen, die restliche Information soll ja durch die Begleittexte oder eineN VortragendeN (LehrerIn oder SchülerIn) vorgebracht werden.

Physik soll sich in ihrer Selbstdarstellung durchaus auch populärer Transportmittel bedienen, um ihre Botschaften zu vermitteln. Physik ist nicht nur streng formale Deduktion unter Einhaltung mathematischer Operationsregeln, Physik ist auch Wahrnehmen, Beobachten, Analysieren, Probieren, Fragen formulieren und Wege suchen diese Fragen zu lösen - nicht viel anders als auch die Arbeit von Detektiven. Jugendliche (und nicht nur sie) verschlingen Detektivromane, Physik ist eines der unbeliebtesten Schulfächer⁶. Physik wird nicht wissenschaftlicher, wenn sie langweilig dargeboten wird. Physik wird auch nicht wissenschaftlicher, wenn sie spannend gestaltet wird; aber sie wird interessanter.

In der Auswahl der Bildmotive und der Farbgebung bemühte ich mich jugendlichen Gewohnheiten der Bildrezeption entgegenzukommen. Ich versuchte die Darstellung der physikalisch-technischen Inhalte durch eine eher an Comics oder Cartoons angelehnte optische Darstellung aufzulockern. Aus diesem Grund habe ich für die Beschriftung der Folien auch eine ungewöhnliche Schriftart gewählt: die Beschriftung aller Folien erfolgte in Comic Sans MS (Schiftprobe: **Comic Sans MS**). Diese Schriftart stellt sozusagen eine Mischform von Blockschrift und Schreibschrift dar und ähnelt sehr stark den in Comics verwendeten Schriftarten. Sie ist Jugendlichen also durchaus vertraut, wenn auch nicht unbedingt in diesem Zusammenhang. Dennoch wirkt die Schriftart sehr locker und bei weitem nicht so streng formell wie gängige Schriftarten (z.b.: Times New Roman). Comic Sans MS ist natürlich unter dem Kriterium der Lesbarkeit nicht die beste Wahl.

⁶ Muckenfuß, Heinz: *Lernen im Sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Cornelsen Verlag, Berlin 1995, p. 42f

Doch da erstens nur wenig Text auf einer Folie vorkommt und dieser zweitens nur bilderklärende, also sekundäre Funktion hat, wählte ich dennoch diese schlechter wahrnehmbare Schriftart. Dort, wo der Text das primäre Medium ist, verwendete ich die weitaus leichter lesbare Schriftart Times New Roman.

Auch in der Farbgebung wählte ich eher satte, kräftige Farben, wie sie ebenfalls im Comic und in der Werbung gerne eingesetzt werden. Neben diesen optischen Blickfängen habe ich versucht auch die Überschriften zu den Folien so zu gestalten, daß sie vielleicht Interesse wecken. So habe ich einige der Überschriften als Fragen formuliert bzw. versucht auf andere Weise "Appetit" zu machen auf das, was folgt.

Ausgehend von diesen grundlegenden Überlegungen versuchte ich die einzelnen Folien und die Texte zu gestalten:

Radioaktivität

Gewisse Grundkenntnisse können zwar beim Zielpublikum vorausgesetzt werden, dennoch habe ich mich dafür entschieden, die Grundlagen miteinzubeziehen, die für das weitere Verständnis der Darstellung von AMS unabdingbar sind. Grundlegendes Wissen über den Aufbau der Materie und das Phänomen Radioaktivität sollen wiederholt werden, Begriffe wie Isotop, radioaktiver Zerfall, radioaktive Strahlung, Aktivität oder Halbwertszeit sollen wieder in Erinnerung gerufen werden oder gegebenenfalls erklärt werden. Dafür stellte ich der eigentlichen Darstellung von AMS ein kleines Kapitel „Radioaktivität“ voran (bestehend aus vier Folien).

Die erste Folie hat den Aufbau der Materie zum Thema, erklärt den Aufbau von Atomen und den Begriff Isotop. Dabei habe ich Kohlenstoff als Beispiel ausgewählt, weil ich mich somit auch im später folgenden Kapitel Radiokarbondatierung wieder darauf beziehen kann.

Die zweite Folie zeigt zwei Beispiele für radioaktive Strahlung: Alpha- und Betastrahlung. Auf die sonst übliche Darstellung auch der Gamma-Strahlung habe ich verzichtet, weil die Wellennatur der Gammastrahlung ausführlicher behandelt werden müßte. Da Gammastrahlung in weiterer Folge der Darstellung aber nicht vorkommt,

würde dies ein unnötiges Abschweifen vom eigentlichen Thema bedeuten. LehrerInnen können gegebenenfalls darauf hinweisen, daß es auch noch andere Arten von Strahlung gibt und diese im Kernphysikunterricht detaillierter behandeln.

Die statistische Natur der Radioaktivität und die Begriffe Aktivität und Halbwertszeit werden mit der nächsten Folie behandelt. Dabei wählte ich die Uran-Isotope ^{238}U und ^{235}U , die aufgrund ihrer Halbwertszeitdifferenz eine gute graphische Darstellung ermöglichen (und außerdem, wenn auch in anderem Kontext, bekannt sein dürften).

Die letzte Folie des einleitenden Kapitels befaßt sich mit der Messung radioaktiver Strahlung am Beispiel der Ionisationskammer. Diese wurde gewählt, da sich daran das Prinzip des Nachweises von Strahlung über deren ionisierende Wirkung sehr anschaulich darstellen läßt.

AMS

Das nächste Kapitel soll zunächst das Interesse für AMS wecken. Es zeigt die Vorteile von AMS im Vergleich zur Zerfallsmessung und zeigt dann die verschiedenen Stufen der Abtrennung des interessierenden Radioisotops bei einer AMS-Messung bei VERA von der chemischen Aufbereitung bis zum Detektor.

Die erste Folie zeigt anhand von ^{14}C den Empfindlichkeitsunterschied zwischen AMS und der Zerfallszählung. Dabei wird der Zerfall in einer Stunde im Begleittext berechnet, damit diese Zahl auch nachvollziehbar ist – die Rechnung ist nicht schwer und das Zerfallsgesetz sollte bekannt sein.

Das Prinzip, daß man geladene Teilchen durch ein Magnetfeld ablenken kann, sollte vorausgesetzt werden können. Daß die Teilchen dabei ihrer Masse entsprechend abgelenkt werden, muß aber auf jeden Fall erwähnt werden, beruht doch AMS ganz wesentlich auch auf diesem Prinzip. Aus diesem Grund stellt eine Folie die Trennung von Massen durch Magnetfelder dar.

Die nächste Folie soll das Problem der Molekürisobaren veranschaulichen. Dazu habe ich eine Overlayfolie konzipiert, bestehend aus zwei übereinanderliegenden Folien. Die Folie zeigt symbolische $^{12}\text{CH}_2$ - und ^{13}CH -Moleküle und ein einziges ^{14}C -Atom. Dieses in der

Überzahl der „Isobaren“ zu finden, ist die nur schwer zu lösende Aufgabe, die mit AMS zu bewältigen ist. Klappt man die obere Folie zurück, sieht man nur noch das ^{14}C -Atom. Eine Folie soll auch Fotos von der VERA-Anlage zeigen, damit sich SchülerInnen auch vom tatsächlichen Aussehen der Anlage ein Bild machen können und nicht ausschließlich mit schematischen Darstellungen konfrontiert werden. Dazu gibt der Begleittext einige Informationen über das VERA-Labor⁷.

Der Schritt von vorgegebenem Probenmaterial zu targets eines Elements ist für das Verständnis von AMS sehr wichtig. Dieser Schritt wird in vielen Darstellungen von AMS übersprungen, sollte aber gerade für SchülerInnen schon erwähnt werden. Es ist nicht unmittelbar klar, daß der Kohlenstoff auf der Probe isoliert werden muß um gemessen zu werden. Wird dies nicht erwähnt, kann das zu eklatanten Mißverständnissen führen. Zudem zeigt sich hier, daß Forschung oft interdisziplinär betrieben wird. Daher habe ich mich für eine eigene Folie über die chemische Probenaufbereitung entschieden.

Grundvoraussetzung von AMS sind geladene Teilchen. Wie diese erzeugt werden und wie die Entscheidung für negative Ionen bereits einen erstern Filter bedeutet, ist Thema der Folie über die Ionenquelle.

Die siebente Folie zeigt die Ablenkung des Ionenstrahls im ESA. Die Ablenkung gemäß der Energie der Teilchen wird im Begleittext auch formal abgeleitet.

Die nächste Folie zeigt wiederum die Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld. Im Prinzip wiederholt sie nur Folie 2. Dennoch ist es wichtig, daß die Magneten beim imaginären Flug durch den Beschleuniger auch dort behandelt werden, wo sie ihre Funktion erfüllen. Sonst wird das Verständnis der Funktionsweise von AMS unnötig erschwert. Zudem habe ich bei dieser Folie (im Unterschied zu Folie 2) dargestellt, daß es sich bei den verwendeten Magneten um Elektromagneten handelt.

Der Tandem-Beschleuniger wird auf einer Folie dargestellt. Der Begleittext beschreibt die Erzeugung der Hochspannung, das Geschehen im Ionenstrahl jedoch nur bis zum Erreichen des Strippers.

Dem Stripper habe ich eine eigene Folie gewidmet, beruht doch das Tandemprinzip auf der Ladungsumkehr. Die Folie zeigt den schematischen Aufbau des Gaskanals und das, was der Stripper bewirkt. Der Begleittext beschreibt dies und auch die weitere

⁷ Fotos und Grafik von Phillippe Collon

Beschleunigung durch das Beschleunigungspotential. Es ist vom logischen Aufbau her besser verständlich, wenn dieser Teil, der eigentlich noch zum Beschleuniger gehört, erst nach erfolgter Umladung erklärt wird. Sonst müßte vorgegriffen werden auf Dinge, die noch nicht verständlich sind.

Die nächste Folie zeigt wiederum die Ablenkung im Magnetfeld, der Begleittext stellt die Darstellung aber wiederum in einen anderen Kontext, als die bisherigen Darstellungen der Massenablenkung.

Die vorletzte Folie zeigt das Wien-Filter, wobei im Begleittext die Ablenkung entsprechend der Geschwindigkeit wiederum auch formal abgeleitet wird. Wenn SchülerInnen die Ableitung anhand des Textes nachvollziehen können, erhält diese Tatsache höhere Glaubwürdigkeit.

Die letzte Folie zeigt das Detektorsystem, bestehend aus Ionenisationskammer und F-Cups. Wie der besseren Anschaulichkeit wegen bereits im Kapitel Radioaktivität eine Ionenisationskammer erklärt wurde, habe ich auch hier eine solche dargestellt. Tatsächlich arbeitet die VERA-Anlage mit Halbleiterdetektoren. Um das Grundprinzip zu erläutern ist eine Ionenisationskammer aber genauso geeignet.

Radiokarbondatierung

Der Radiokarbondatierung habe ich als wichtigster Anwendung ein ganzes Kapitel gewidmet. Eine Anwendung wollte ich relativ detailliert darstellen und dafür eignet sich die Radiokarbon-Datierung einfach am besten.

Zunächst zeigt eine Folie die Produktion des Radioisotops ^{14}C durch kosmische Strahlung.

Die zweite Folie zeigt den natürlichen Kohlenstoffkreislauf, durch den auch ^{14}C letztlich in jeden lebenden Organismus eingebaut wird. Hier wird auch schon der Austausch mit den Ozeanen angedeutet, der später bei der Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses eine Rolle spielen wird⁸.

⁸ Quellen der clip arts: www.iconbazaar.com/animals/pg07.php (Fische)
www.geocities.com/Heartland/Hills/9659/fleuricons.html (Vogel)
www.fortweb.com/cheryl/tree-01.htm (Baum)

Unter Wiederaufnahme einer bereits bekannten Darstellung der exponentiellen Abnahme der Aktivität zeigt die dritte Folie die Abnahme aufgrund des radioaktiven Zerfalls der in einem Organismus vorhandenen ^{14}C -Atome nach seinem Tod, die eine Altersbestimmung ermöglicht.

Die nächste Folie behandelt die Massenfraktionierung und deren Korrektur. Dies ist die erste von zwei falschen Grundannahmen der ursprünglichen Idee der ^{14}C -Datierung. Die verschiedenen Kohlenstoffisotope durchlaufen den Kohlenstoffkreislauf eben nicht völlig gleichartig und dies hat Auswirkungen auf die Altersbestimmung, die korrigiert werden müssen und können.

Die zweite falsche Grundannahme ist die eines zeitlich konstanten $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses in der Atmosphäre. Diese Folie zeigt natürliche und anthropogene Einflüsse, die das Verhältnis in der Vergangenheit verändert haben. Der Begleittext erläutert die jeweiligen Auswirkungen auf die Altersbestimmung⁹.

Das zeitlich schwankende $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis kann mittels Dendrochronologie korrigiert werden. Die sechste Folie zeigt das Grundprinzip der Dendrochronologie, das auf überlappenden Baumringabschnitten verschieden alter Hölzer basiert. Der Text erklärt dieses Prinzip und zeigt wie man es sich für die Altersbestimmung zunutze macht¹⁰.

Die letzte Folie dieses Kapitels zeigt anhand eines konkreten Beispiels wie ein Radiokarbonalter anhand einer Kalibrierkurve in ein Kalenderalter umgewandelt wird. Dabei wird auch erklärt, warum Altersbestimmungen oft nicht eindeutig sind und warum Altersangaben oft unterschiedliche Fehlergrenzen aufweisen.

⁹ Quellen der clip arts: www.spod.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html (Magnetfeld)
www.iconbazaar.com/animals/pg06.php (Fisch)
www.iconbazaar.com/animals/pg07.php (Fisch)
www.iconbazaar.com/animals/pg02.php (Taube)
<http://members.arttoday.com> (Pferd)
www.fortweb.com/cheryl/tree-01.htm (Baum)
www.fas.org/nuke/hew/Russia/Sovwpupprog.html (Explosion)

¹⁰ Quellen der clip arts: www.kidsdomain.com/icon/flowers.html (Blumen)
www.iconbazaar.com/animals/pg09.php (Hase)
<http://members.atrtoday.com> (Seerose, Haus)
www.iconbazaar.com/animals/pg06.php (Fisch)
www.iconbazaar.com/animals/pg07.php (Fisch)
www.fortweb.com/cheryl/tree-01.htm (Bäume)

Umweltforschung

Um das weite Feld verschiedener Anwendungen in der Umweltforschung zu skizzieren, wählte ich neben der Radiokarbon-Datierung noch zwei weitere Anwendungen aus, die ich in Umrissen auf je nur einer Folie darstellte.

Die Untersuchung der globalen Ozeanströmung zeigt, wie über Radioisotope räumliche und zeitliche Informationen über Naturvorgänge gewonnen werden können und wie AMS solche Messungen erleichtert, weil nur noch wesentlich kleinere Proben benötigt werden¹¹.

Eine Anwendung wollte ich aus dem Bereich der medizinischen Forschung wählen, weil dieser Bereich gerade immer wichtiger wird und AMS hier aufgrund der hohen Nachweisempfindlichkeit völlig neue Möglichkeiten eröffnet. Man kann Menschen nun einmal nicht beliebig viel einer toxischen Substanz verabreichen, um deren Transport im Körper zu studieren. Erst die hohe Nachweisempfindlichkeit von AMS erlaubt es mit toxischen Substanzen in ungefährlichen Dosen zu operieren und dennoch sinnvolle Messungen durchzuführen.

Schluß

Vorliegende Arbeit will LehrerInnen einen Lehrbehelf zur Verfügung stellen, der es ihnen ermöglicht eine Exkursion in das VERA-Labor inhaltlich vorzubereiten. Zudem soll es ermöglicht werden dies in Form von Gruppenarbeit die SchülerInnen selbständig

¹¹ Quelle der Weltkarte: www.graphicmaps.com/webimage/world/flatb.htm

erarbeiten zu lassen bzw. die Folien für SchülerInnenreferate einzusetzen. Dabei habe ich mich bemüht Physik darzustellen als die spannende, faszinierende Möglichkeit komplexe Probleme durch systematisches Nachdenken und kreative Einfälle zu lösen, eine Sichtweise von Physik, die ich in dieser Form erst an diesem Institut kennen und schätzen gelernt habe. Ob mir all dies auch gelungen ist liegt in der Beurteilung der BenutzerInnen.

Literaturverzeichnis:

Arnold, James A., *The Early Years With Libby At Chicago: A Retrospective*,
in: Taylor,R.E., Long A. and Kra R.S., *Radiocarbon After Four Decades. An
Interdisciplinary Perspective*, Springer, New York 1992, p. 19-33

- Ballstaedt, Steffen-Peter, *Lerntexte und Teilnehmerunterlagen*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1994 (Mit den Augen lernen, Bd. 2)
- Balsley, David R., Farwell, George W., Grootes, Pieter M. and Schmidt, Fred H., *Ion Source Samples Preparation Techniques For Carbon-14 AMS Measurements*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B29 (1987) 37-40
- Becker, Bernd, *The History Of Dendrochronology And Radiocarbon Calibration*, in: Taylor, R.E., Long A. and Kra R.S., *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*, Springer, New York 1992, p. 34-49
- Bimbot, René, *Rätsel der Radioaktivität*, Spektrum der Wissenschaften Dossier 1/97, p. 22-30
- Bowman, Sheridan, *Radiocarbon Dating*, British Museum Publications Ltd., London 1990
- Damon, Paul E., Linick, Timothy W., *Geomagnetic Modulation Of Atmospheric Radiocarbon Production*, Radiocarbon Vol. 28, No. 2A (1986), p. 266-278
- Duit, Reinders, von Rhöneck, Christoph (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften*, Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel 1996
- Elmore, David und Phillips, Fred M., *Accelerator Mass Spectrometry for Measurement of Long-Lived Radioisotopes*, Science 236 (1987), p. 543-550
- Finkel, R.C. and Suter, M., *AMS In The Earth Sciences: Technique And Applications*, Advances in Analytical Geochemistry Vol. 1 (1993), p. 1-114
- Godwin, H., *Half-life of Radiocarbon*, Nature Volume 195 (1962), p. 984
- Herkner, Werner, *Lehrbuch Sozialpsychologie*, Verlag Hans Huber, Bern/Stuttgart/Toronto 1991
- Graedel, T.E., Crutzen, Paul J., *Chemie der Atmosphäre. Bedeutung für Klima und Umwelt*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994
- Herzog, G.F., *Applications of accelerator mass spectrometry in extraterrestrial Materials*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B92 (1994) 492-499
- Hoffmann, Lore, *Mädchen und Physik – ein aktuelles, ein drängendes Thema*, Naturwissenschaften im Unterricht Physik Heft 1/1990, p. 4-11

- Hoffmann, Lore, Häußler, Peter, Peters-Haft, Sabine, *An den Interessen von Mädchen und Jungen orientierter Physikunterricht*, Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel 1997
- Keller, Cornelius, *Zeiger der Zeit*, Bild der Wissenschaft 1/1992, p. 16-20
- Kigoshi, Kunihiko and Hasegawa, Hiroichi, *Secular Variation of Atmospheric Radiocarbon Concentration and Its Dependence on Geomagnetism*, Journal of Geophysical Research Vol. 71, No. 4 (1966), p. 1065-1071
- Kittelberger, Rainer und Freisleben, Immo, *Lernen mit Video und Film*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1994 (Mit den Augen lernen; Bd. 5)
- Kocharov, G.E., Peristyk, A.N., Kereselidze, P.G., Lomtadze, Z.N., Metskhvarishvili, R.Ya., Tagauri, Z.A., Tsereteli, S.L., Zhorzholiani, I.V., *Variation Of Radiocarbon Content In Tree Rings During The Maunder Minimum Of Solar Activity*, Radiocarbon Vol. 34, No. 2 (1992), p. 213-217
- Kutschera, Walter. *Accelerator Mass Spectrometry: A versatile Tool for Research*, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B50 (1990), p. 252-261
- Kutschera, Walter, *Conference summary: Trends in AMS*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B123 (1997) 594-598
- Kutschera, W., Collon, P., Friedmann, H., Golser, R., Hille, P., Priller, A., Rom, W., Steier, P., Tagesen, S., Wallner, A., Wild, E., Winkler, G., *VERA: A new AMS facility in Vienna*, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B123 (1997), p. 47-50
- Laj, Carlo, Mazaud, Alain und Duplessy, Jean-Claude, *Altersbestimmung mit der Kohlenstoff-14-Methode*, Spektrum der Wissenschaft Dossier 1/97, p. 40-45
- Langner-Geißler, Traute und Lipp, Ulrich, *Pinwand, Flipchart und Tafel*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1994 (Mit den Augen lernen, Bd. 3)
- Leisen, Josef, *Fachlernen und Sprachlernen im Physikunterricht*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 2/47, p. 5-8
- Leisen, Josef, *Förderung des Sprachlernens durch den Wechsel von Symbolisierungsformen im Physikunterricht*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 2/47, p. 9-13
- Leisen, Josef, *Physikalische Begriffe und Sachverhalte. Repräsentationen auf*

- verschiedenen Ebenen*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 2/47, p. 14-18
- Leisen, Josef, *Sprache(n) im Physikunterricht*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 2/47, p. 2-4
- Litherland, A.E., *Accelerator Mass Spectrometry*, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B5 (1984), p. 100-108
- Melezinek, Adolf, *Ingenieurpädagogik. Praxis der Vermittlung technischen Wissens*, Springer Verlag, Wien 1986
- Middleton, R. A., *Review of Ion Sources for Accelerator Mass Spectrometry*, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B5 (1984), p. 193-199
- Motamedi, Susanne, *Rede und Vortrag: Sorgfältig vorbereiten, stilistisch ausarbeiten, erfolgreich durchführen*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1993
- Muckenfuß, Heinz, *Lernen im Sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*, Cornelsen Verlag, Berlin 1995
- Muller, Richard A., *Radioisotope Dating with a Cyclotron*, Science 196 (1977), p. 489-494
- Radvanyi, Pierre und Bordry, Monique, *Die Entdeckung der Radioaktivität*, Spektrum der Wissenschaften Dossier 1/97 p. 12-21
- Ralph, Elisabeth K. and Michael, Henry N., *Twenty-five Years of Radiocarbon Dating*, American Scientist Volume 62 (1974), p. 553-560
- Rode, Michael, *Modelle zum radioaktiven Zerfall. Erarbeitet mit einem Modellbildungssystem*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 3/44 (1995), p. 7-9
- Rode, Michael, *Ein Würfelspiel als Modell des radioaktiven Zerfalls*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 3/44 (1995), p. 9-12
- Rückl, Eckhard, *Statistik des Kernzerfalls*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 3/44 (1995), p. 15-18
- Schneider, Wolf, *Deutsch fürs Leben. Was die Schule zu lehren vergaß*, Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbeck bei Hamburg, 1994
- Schneider Wolf, *Deutsch für Kenner. Die neue Stilkunde*, Piper Verlag, München 1998
- Sonett, Charles P., *The Present Status Of Understanding Of The Long-Period*

- Spectrum Of Radiocarbon*, In: Taylor,R.E., Long A. and Kra R.S., *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*, Springer, New York 1992, p.50-61
- Starauschek, Erich, *Zur Sprache im Karlsruher Physikkurs*, Praxis der Naturwissenschaften Physik 2/47, p. 24-28
- Stuiver, Minze and Polach, Henry A., *Discussion Reporting Of ¹⁴C Data*, Radiocarbon Vol.19,No. 3 (1977), p. 355-363
- Stuiver, Minze and Pearson, Gordon W., *Calibration Of The Radiocarbon Time Scale, 2500-500BC*, in: Taylor,R.E., Long A. and Kra R.S., *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*, Springer, New York 1992, p. 19-33
- Suess, Hans E., *The Early Radiocarbon Years: Personal Reflections*, in: Taylor,R.E., Long A. and Kra R.S., *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*, Springer, New York 1992, p. 11-16
- Vogel, John S. and Turteltaub, K.W., *Accelerator mass spectrometry in biomedical research*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B92 (1994) 445-453
- Vogel, John S., McAnich, Jeffrey, Freeman, Stewart P.H.T., *Elements in biological AMS*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B123 (1997) 241-244
- Weidenmann, Bernd, *Lernen mit Bildmedien: psychologische und didaktische Grundlagen*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1994 (Mite den Augen lernen; Bd. 1)
- Will, Hermann (Hrsg.), *Mit den Augen lernen*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1994
- Will, Hermann, *Overheadprojektor und Folien*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel 1994 (Mit den Augen lernen; Bd. 4)
- Wölfli, W., *Advances in Accelerator Mass Spectrometry*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B29 (1987) 1-13

Anhang: Overheadfolien & Begleitheft

Im Anhang befindet sich der entwickelte Lehrbehelf, wobei die Overheadfolien als Ausdruck auf Papier beigelegt wurden. Die zwei Overlay-Folien, die aus zwei übereinander gelegten Folien bestehen, wurden als zwei getrennte Ausdrücke auf Papier beigelegt.

Inhalt

I. Radioaktivität

1. Atomgeschwister - die Isotope
2. Was ist Radioaktivität ?
3. Wie aktiv ist Radioaktivität ?
4. Man kann sie nicht sehen, nicht hören und nicht riechen - wie mißt man Radioaktivität ?

I. „Atome zählen“ mit Beschleunigermassenspektrometrie

1. Atome zählen statt auf den Zerfall warten
2. Ein Magnet trennt Massen
3. Suche nach der „Nadel im Heuhaufen“
4. Das VERA-Labor
5. Wie der Kohlenstoff aus der Probe kommt
6. Eine Quelle negativer Ionen
7. Ein elektrisches Feld trennt Energien
8. Die erste Massentrennung
9. Der Beschleuniger
10. Ein Gas entreißt Elektronen
11. Die zweite Massentrennung
12. Ein Filter für Geschwindigkeiten
13. Atome zählen - aber wie ?

II. **Wie alt ist Ötzi´s Bogen ? - Altersbestimmung mit ^{14}C**

1. Strahlung aus dem Weltall erzeugt ^{14}C
2. Wie ^{14}C in den Ötzi kommt
3. Der Tod startet die Uhr
4. Leichtere Atome bevorzugt !
5. Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses der Atmosphäre
6. Baumringe helfen weiter
7. Wie alt ist Ötzi´s Bogen ?

IV. **Was VERA sonst noch kann**

1. Das große Förderband im Ozean
2. Wie schnell wirkt das Gift ?

Radioaktivität

1. Atomgeschwister - die Isotope
2. Was ist Radioaktivität ?
3. Wie aktiv ist Radioaktivität ?
4. Man kann sie nicht sehen, hören oder riechen - wie mißt man Radioaktivität ?

„Atome zählen“ mit Beschleunigermassen- spektrometrie

1. Atome zählen statt auf den Zerfall warten
2. Ein Magnet trennt Massen
3. Suche nach der „Nadel im Heuhaufen“
4. Das VERA-Labor
5. Wie der Kohlenstoff aus der Probe kommt
6. Eine Quelle negativer Ionen
7. Ein elektrisches Feld trennt Energien
8. Die erste Massentrennung
9. Der Beschleuniger
10. Ein Gas entreißt Elektronen
11. Die zweite Massentrennung
12. Ein Filter für Geschwindigkeiten
13. Atome zählen - aber wie?

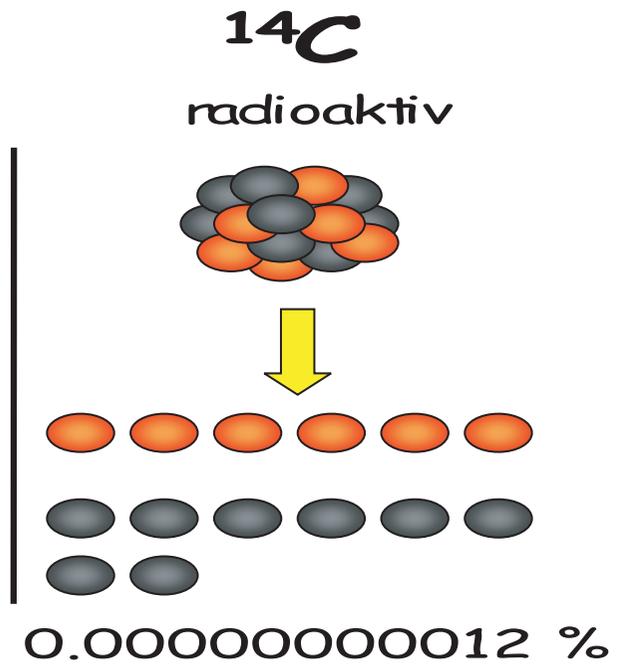
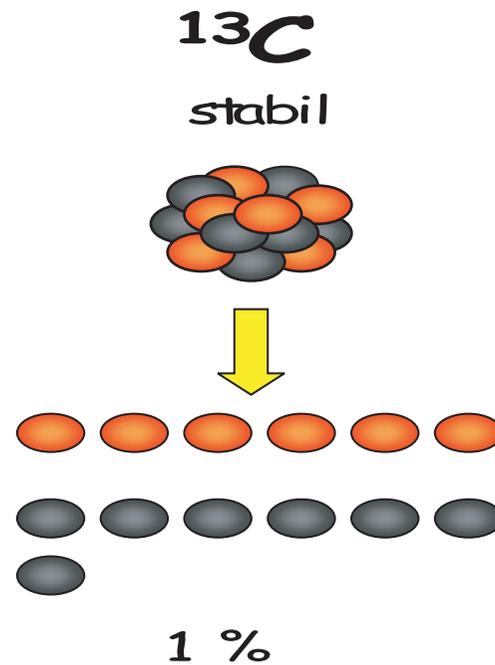
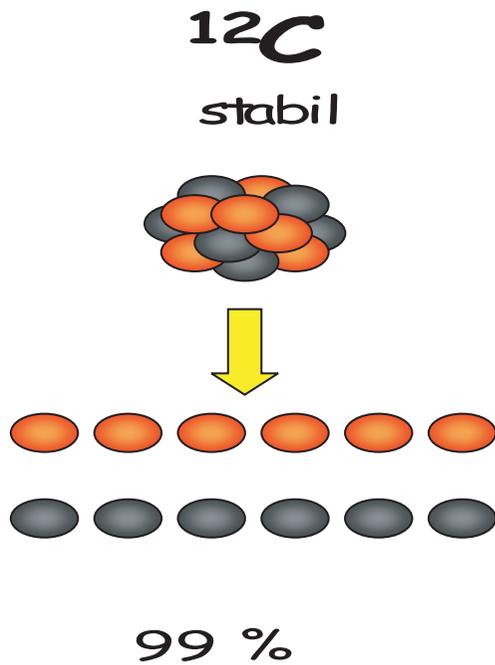
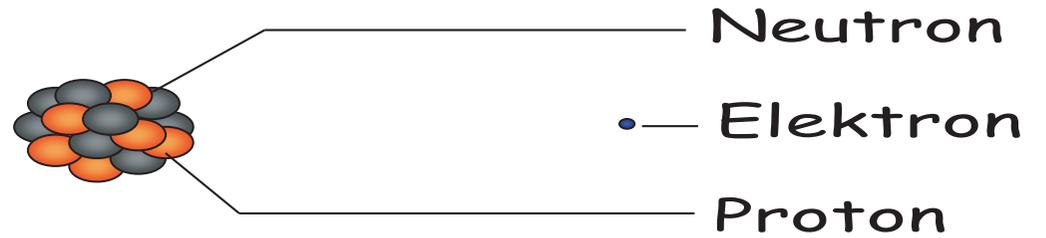
Wie alt ist Ötzi's Bogen ? - Altersbestimmung mit ^{14}C

1. Strahlung aus dem Weltall erzeugt ^{14}C
2. Wie ^{14}C in den Ötzi kommt
3. Der Tod startet die Uhr
4. Problematische Annahmen
5. Leichtere Atome bevorzugt !
6. Änderung des ^{14}C -Gehalts der Atmosphäre
7. Baumringe helfen weiter
8. Wie alt ist Ötzi's Bogen ?

Was VERA sonst noch kann

1. Das große Förderband des Ozeans
2. Wie schnell wirkt das Gift ?

Atomgeschwister - die Isotope



Atomgeschwister – die Isotope

Materie besteht aus Atomen. Ein Atom hat einen Atomkern und Elektronen, die eine Hülle um den Kern bilden. Der Atomkern setzt sich zusammen aus Protonen, die positiv geladen sind, und Neutronen, die elektrisch neutral sind. Die Anzahl der Protonen im Kern ist gleich groß wie die der negativen Elektronen in der Atomhülle. Das ganze Atom ist dadurch elektrisch nicht geladen.

Kerne mit gleich vielen Protonen haben die gleichen chemischen Eigenschaften, egal wie viele Neutronen sie haben. Atome mit gleich vielen Protonen, aber unterschiedlich vielen Neutronen, nennt man verschiedene Isotope vom gleichen chemischen Element. Wegen der unterschiedlichen Zahl von Teilchen im Kern sind Isotope unterschiedlich schwer.

Kohlenstoff besteht aus:

99 %	^{12}C
1 %	^{13}C
0.00000000012 %	^{14}C

Die hochgestellte Zahl gibt jeweils die Zahl der Kernteilchen (Protonen + Neutronen) an.

Unter 1200 Milliarden Kohlenstoffatomen befindet sich nur ein ^{14}C -Atom !

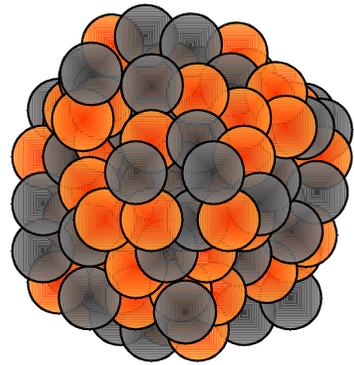
Was ist Radioaktivität ?

Manche Atomkerne sind nicht stabil – sie wandeln sich in andere Atomkerne um und senden dabei Teilchen aus: sie sind radioaktive Isotope.

Dabei kommen hauptsächlich folgende Arten radioaktiver Strahlung vor:

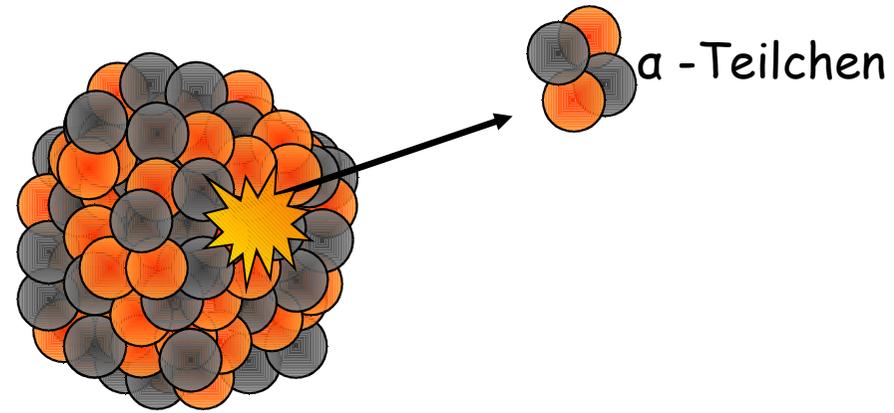
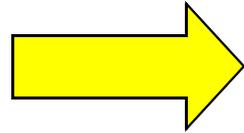
1. Die Alpha-Strahlung: ein Atomkern sendet ein sogenanntes Alpha-Teilchen aus, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht. Das Alpha-Teilchen ist also positiv geladen.
Der Kern hat zwei Protonen weniger und hat sich dadurch in ein anderes Element umgewandelt: zum Beispiel wird aus Uran Thorium.
2. Die Beta-Strahlung: im Atomkern verwandelt sich ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein weiteres Teilchen, das sogenannte Antineutrino. Das Elektron und das Antineutrino fliegen weg, das Proton bleibt im Kern, der dadurch ein Proton mehr hat und sich in ein anderes Element umgewandelt hat: zum Beispiel wird aus Kohlenstoff Stickstoff.

Was ist Radioaktivität ?



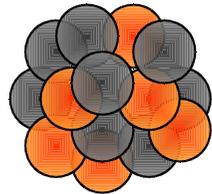
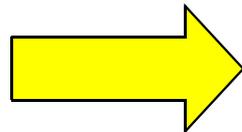
Uran: ^{238}U

α -Zerfall:

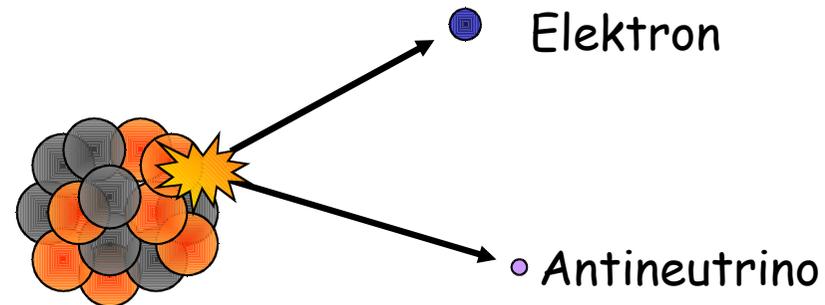


Thorium: ^{234}Th

β -Zerfall:



Kohlenstoff: ^{14}C



Stickstoff: ^{14}N

Wie aktiv ist Radioaktivität ?

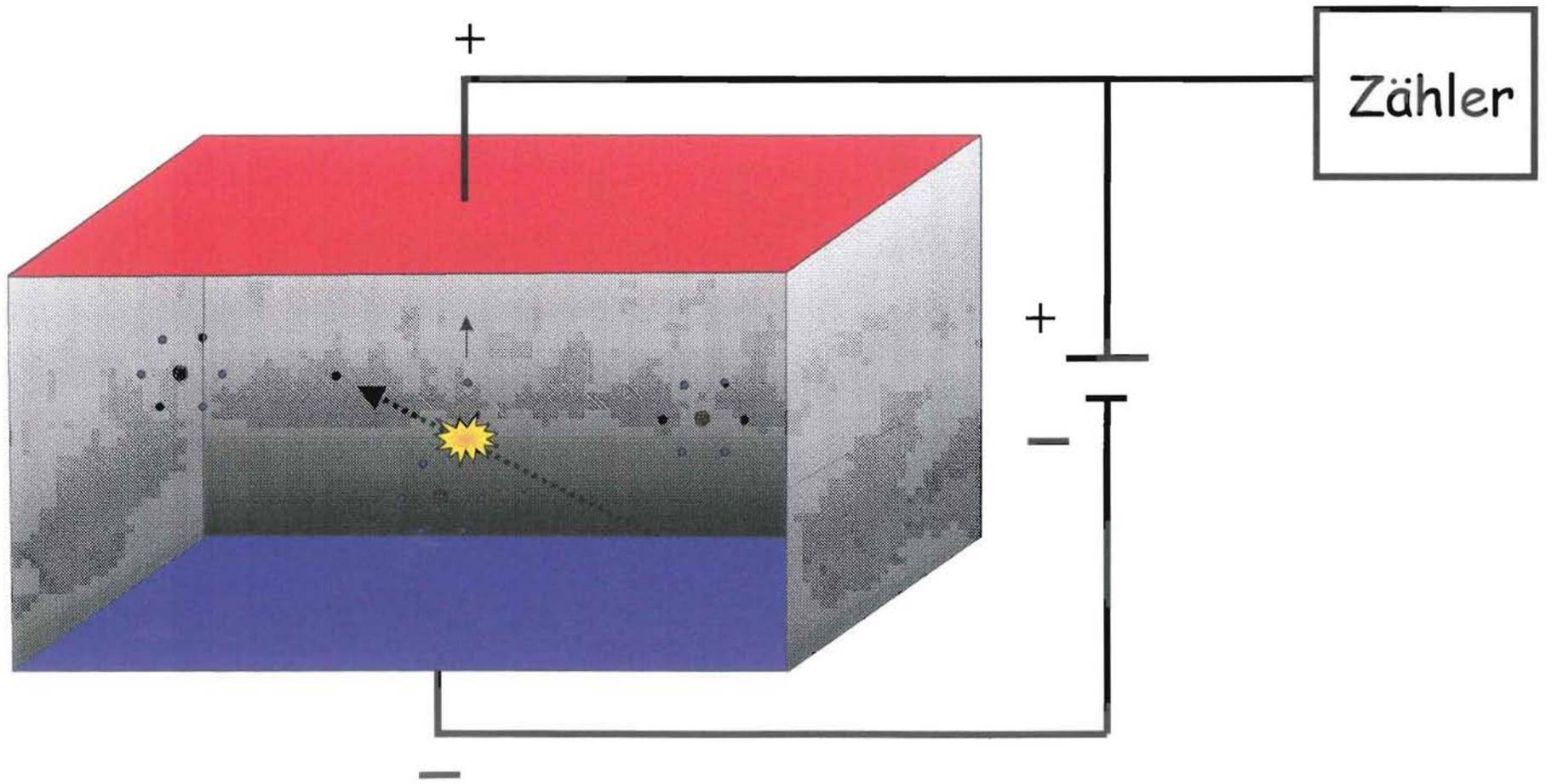
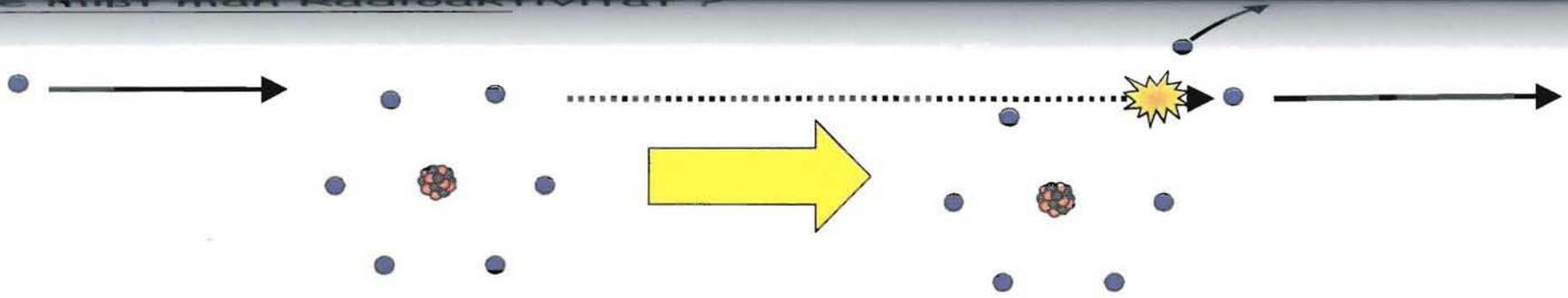
Wenn man 10 Münzen wirft, kann man nicht vorhersagen, welche Münze Kopf und welche Zahl zeigen wird. Man kann aber sagen, daß *im Durchschnitt* 5 Münzen Kopf und 5 Münzen Zahl zeigen werden.

Auch beim radioaktiven Zerfall kann man nicht voraussagen wann ein bestimmter Kern zerfallen wird. Man kann aber eine Zeit angeben, in der *im Durchschnitt* die Hälfte aller Kerne zerfallen wird: die Halbwertszeit.

Das Maß für den radioaktiven Zerfall ist die Aktivität. Die Aktivität gibt die Anzahl der radioaktiven Zerfälle pro Sekunde an. Sie hängt ab von der Anzahl der radioaktiven Kerne und von der Halbwertszeit:

Je mehr radioaktive Kerne vorhanden sind, desto mehr Kerne können zerfallen. Je kürzer die Halbwertszeit ist, desto mehr Kerne zerfallen in einer bestimmten Zeit.

Der Zusammenhang zwischen Halbwertszeit und Aktivität kann aus den Zerfallskurven von ^{238}U und ^{235}U direkt abgelesen werden: ^{235}U hat die kürzere Halbwertszeit und zerfällt schneller als ^{238}U .



Man kann sie nicht sehen, nicht hören und nicht riechen – wie mißt man radioaktive Strahlung ?

Trifft radioaktive Strahlung auf ein Atom, so schlägt sie ein Elektron aus der Atomhülle. Aus dem ursprünglich neutralen Atom werden zwei geladene Teilchen: ein negativ geladenes Elektron und der positiv geladene „Rest“ des Atoms, der auch Ion genannt wird. Dieser Vorgang heißt deshalb auch Ionisation.

Die Ionisationswirkung wird zum Nachweis radioaktiver Strahlung verwendet.

Eine Ionisationskammer besteht aus einer gasgefüllten Kammer. Zwischen dem Boden und dem Deckel liegt eine elektrische Spannung an. Tritt nun radioaktive Strahlung in die Kammer ein, so werden die Gasatome ionisiert: ihnen wird ein Elektron entrissen. Die so entstandenen Elektronen und Ionen wandern durch die angelegte Spannung zum Boden oder zum Deckel (je nach Ladung). Dort angelangt bewirken die elektrischen Ladungen der Elektronen und der Ionen einen Stromimpuls, der gemessen werden kann.

Atome zählen statt auf den Zerfall warten

^{14}C hat eine Halbwertszeit von 5730 Jahren. Um ausreichend viele Zerfälle messen zu können, braucht man daher entweder eine große Probe oder aber man muß lange Zeit messen. Nach dem radioaktiven Zerfallsgesetz zerfallen zum Beispiel von einer Milliarde ^{14}C -Kernen in einer Stunde nur 14!

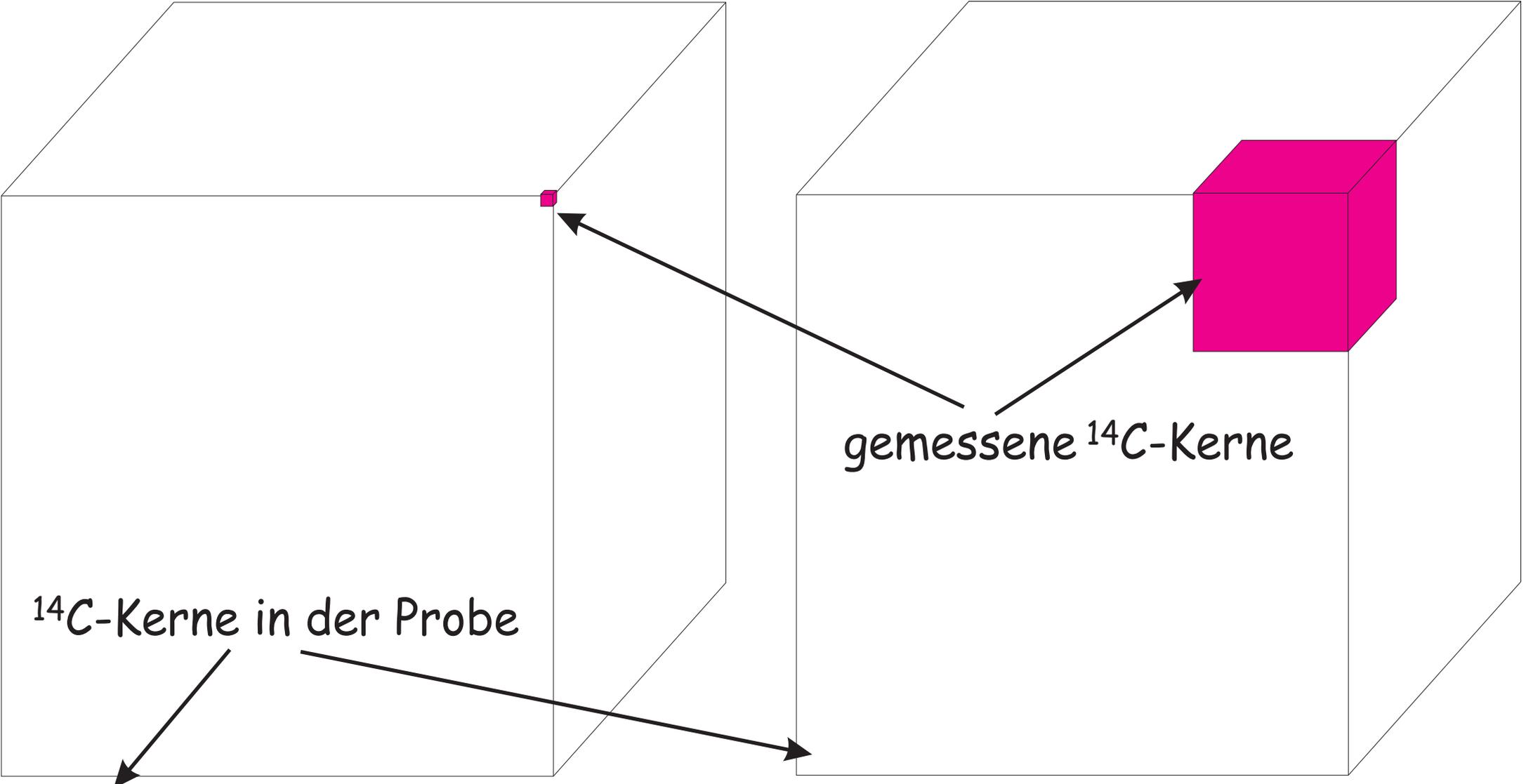
$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 = -\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \times N_0 = -\frac{0.69}{(5730 \times 365 \times 24)} \times 10^9 \approx -14 \text{ } ^{14}\text{C-Kerne pro Stunde}$$

Statt auf den Zerfall der ^{14}C -Kerne zu warten, wäre es doch viel günstiger, wenn man die ^{14}C -Atome direkt zählen könnte, noch bevor sie zerfallen.

Mit der Methode der Beschleunigermassenspektrometrie kann man in einer Stunde ca. 1% aller ^{14}C -Atome einer Probe direkt zählen.

Statt 14 Zerfällen kann man somit in einer Stunde ca. 10 Millionen ^{14}C -Atome zählen.

Atome zählen statt auf den Zerfall warten



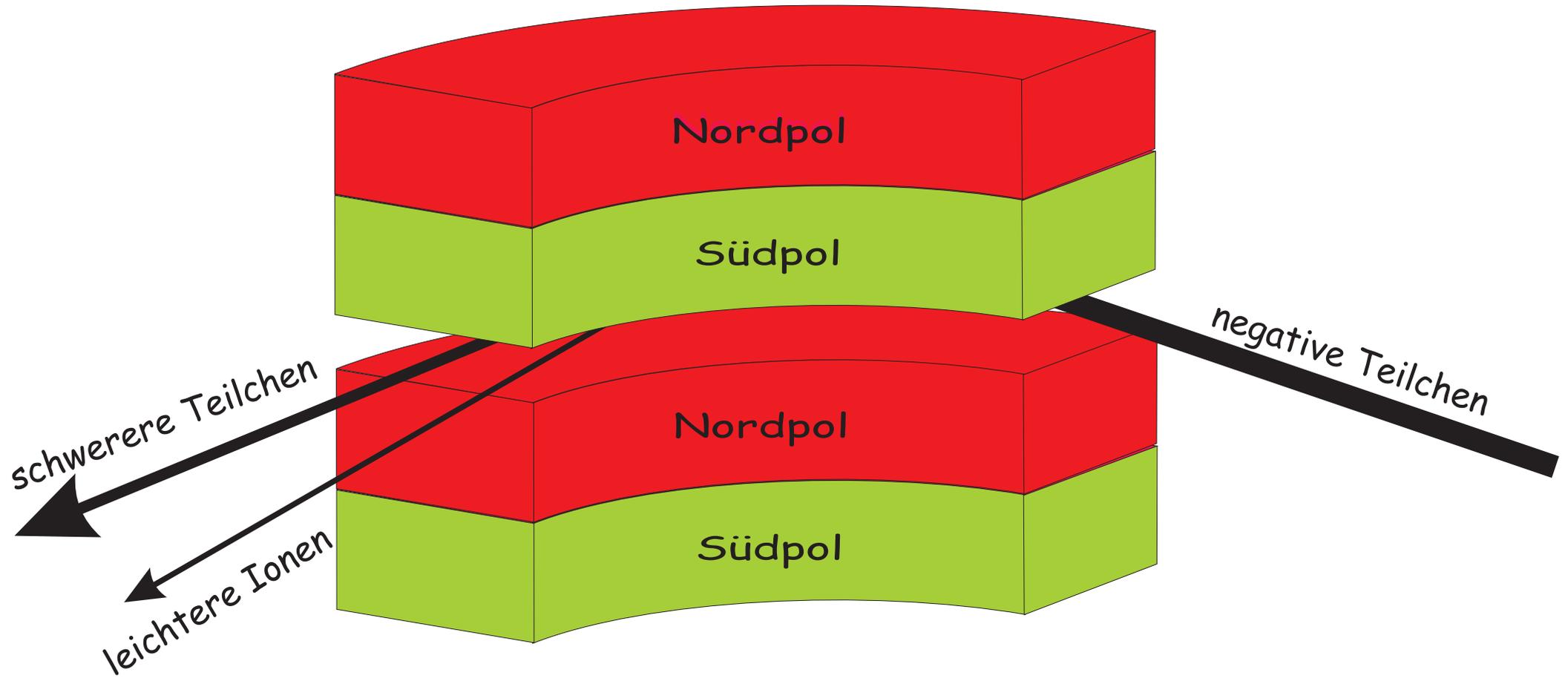
^{14}C -Kerne in der Probe

gemessene ^{14}C -Kerne

Zerfallsmessung
in einem Monat

Beschleunigermassenspektrometrie
in einer Stunde

Ein Magnet trennt Massen



Ein Magnet trennt Massen

Elektrisch geladene Teilchen werden abgelenkt, wenn sie ein Magnetfeld durchfliegen.

Leichte Teilchen werden dabei stärker abgelenkt als schwere Teilchen.

Wenn sich ein Teilchen mit der Masse m und der Ladung q mit einer Geschwindigkeit v senkrecht zu einem Magnetfeld B bewegt, so wirkt auf diese Ladung die Lorentzkraft $F = qvB$, wobei F senkrecht zu v und B steht. In einem konstanten Magnetfeld ändert die Lorentzkraft ständig die Richtung der Bewegung – das geladene Teilchen fliegt auf einer Kreisbahn mit dem Radius r . Die Zentripetalkraft kommt von der Lorentzkraft.

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Der Kreisradius ergibt sich daher $r = \frac{mv}{qB}$

Der Radius der Kreisbahn in einem konstanten Magnetfeld hängt also von den Teilcheneigenschaften Masse, Geschwindigkeit und Ladung ab. Wenn man verschiedene Teilchen mit gleicher Ladung und Geschwindigkeit durch ein Magnetfeld fliegen läßt, werden diese nach ihren Massen getrennt: Teilchen mit größerer Masse werden schwächer abgelenkt als Teilchen mit geringerer Masse.

Suche nach der „Nadel im Heuhaufen“

Die Tatsache, daß geladene Teilchen in einem Magnetfeld in Abhängigkeit von ihrer Masse, Ladung und Geschwindigkeit abgelenkt werden, wird benutzt um verschiedene Massen zu trennen. So ein Gerät heißt Massenspektrometer.

Ionen mit bestimmter Ladung und bekannter Geschwindigkeit werden dabei in ein Magnetfeld geschossen und je nach Masse unterschiedlich abgelenkt. Damit kann man auch verschiedene Isotope eines Elements trennen.

Das Problem bei der Messung von ^{14}C besteht darin, daß Kohlenstoff nur sehr wenig ^{14}C enthält. Gleichzeitig kommen aus Kohlenstoff aber immer auch andere Teilchen mit Masse 14, zum Beispiel die Moleküle ^{13}CH oder $^{12}\text{CH}_2$. Von diesen gibt es viel mehr als ^{14}C und ein gewöhnliches Massenspektrometer kann sie nicht unterscheiden.

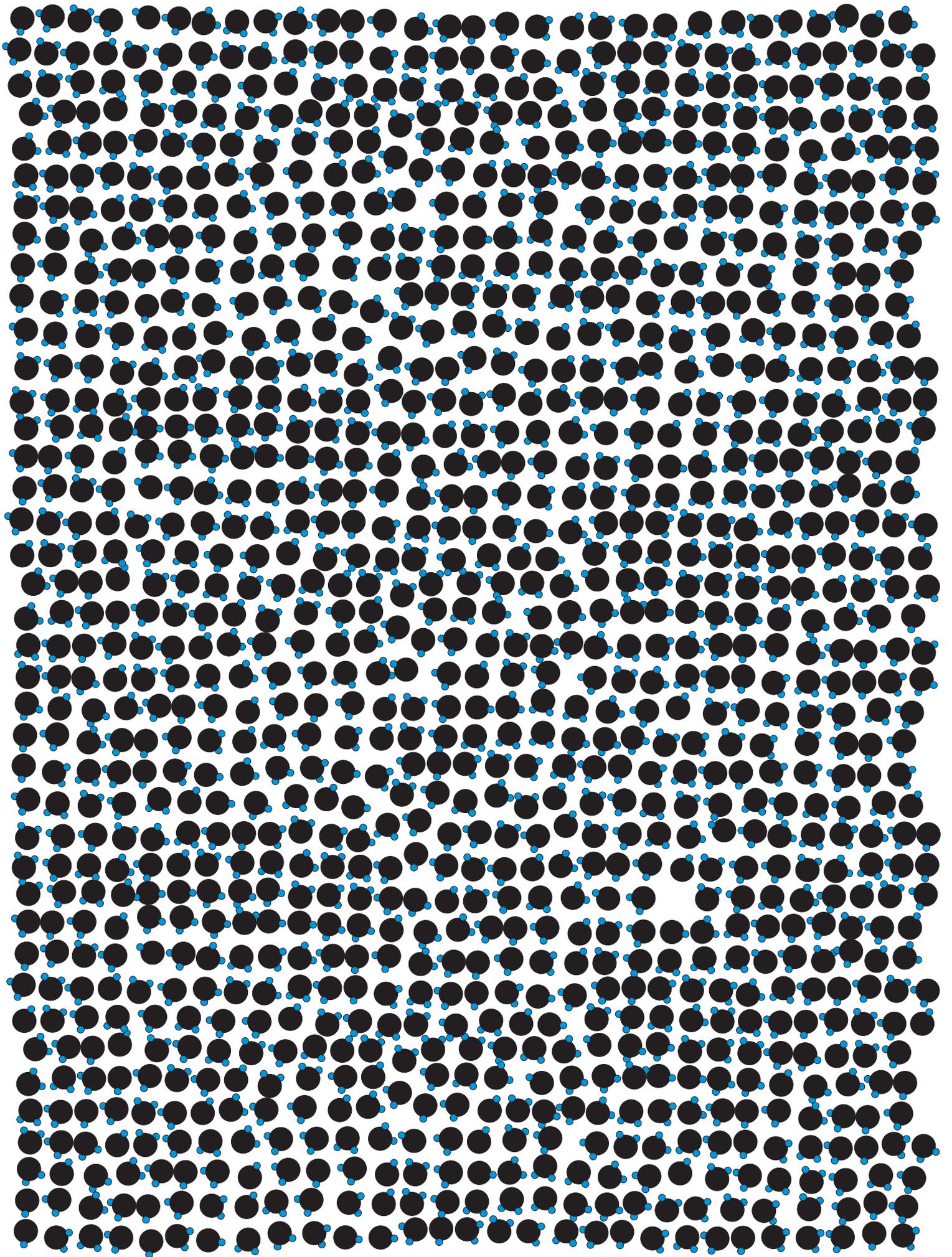
Man muß also diese Moleküle mit der gleichen Masse wie ^{14}C irgendwie abtrennen, um die ^{14}C -Atome messen zu können. Dazu braucht man ein *Beschleunigermassenspektrometer*.

Die Folie zeigt wie schwierig es ist, ein einzelnes ^{14}C -Atom unter vielen Molekülen zu finden. Es ist schon schwierig genug auf der kleinen Folie das einzelne ^{14}C -Atom zu finden. Um die Größenordnung richtig darzustellen, müßte die Folie aber noch größer sein: auf einer Folie mit der Fläche von 1000 km Autobahn wäre nur ein einzelnes ^{14}C -Atom eingezeichnet.

Mit dem Beschleunigermassenspektrometer kann man sozusagen die Nadel im Heuhaufen finden beziehungsweise das ^{14}C im „Molekülhaufen“.

Die Suche nach der "Nadel im Heuhaufen"

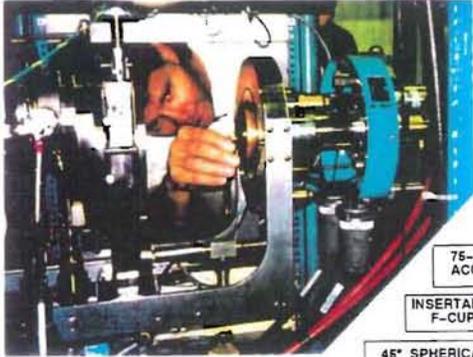




Das VERA-Labor

Seit 1996 besitzt die Universität Wien ein Beschleunigermassenspektrometer, VERA genannt. VERA steht für Vienna Environmental Research Accelerator. Der Beschleuniger und das VERA-Labor befinden sich in der Währingerstraße und sind Teil des Instituts für Isotopenforschung und Kernphysik der Universität Wien.

Insgesamt arbeiten ca. 15 Personen im VERA-Labor. Im ersten Stock befinden sich die Arbeitsräume, das Chemie-Labor und ein Seminarraum. Die Beschleunigeranlage befindet sich im Erdgeschoß und ist ca. 30 m lang. Eine Großforschungsanlage wie VERA hat natürlich auch ihren Preis: der VERA-Beschleuniger hat 25 Millionen Schilling gekostet.

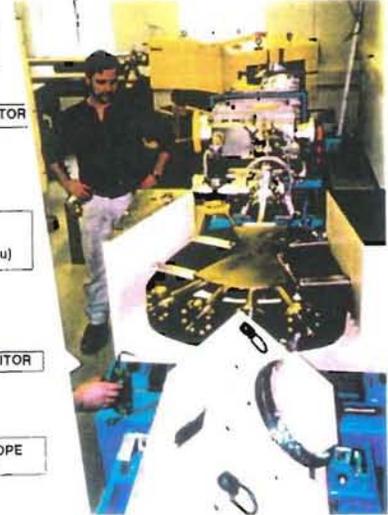
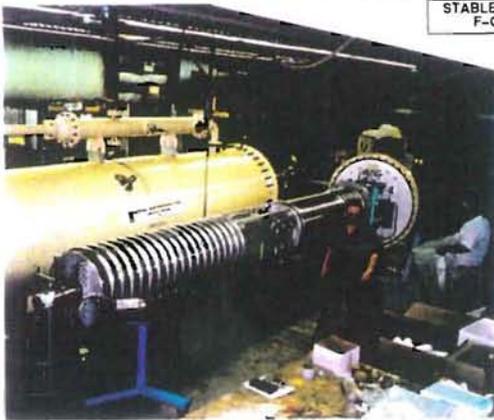
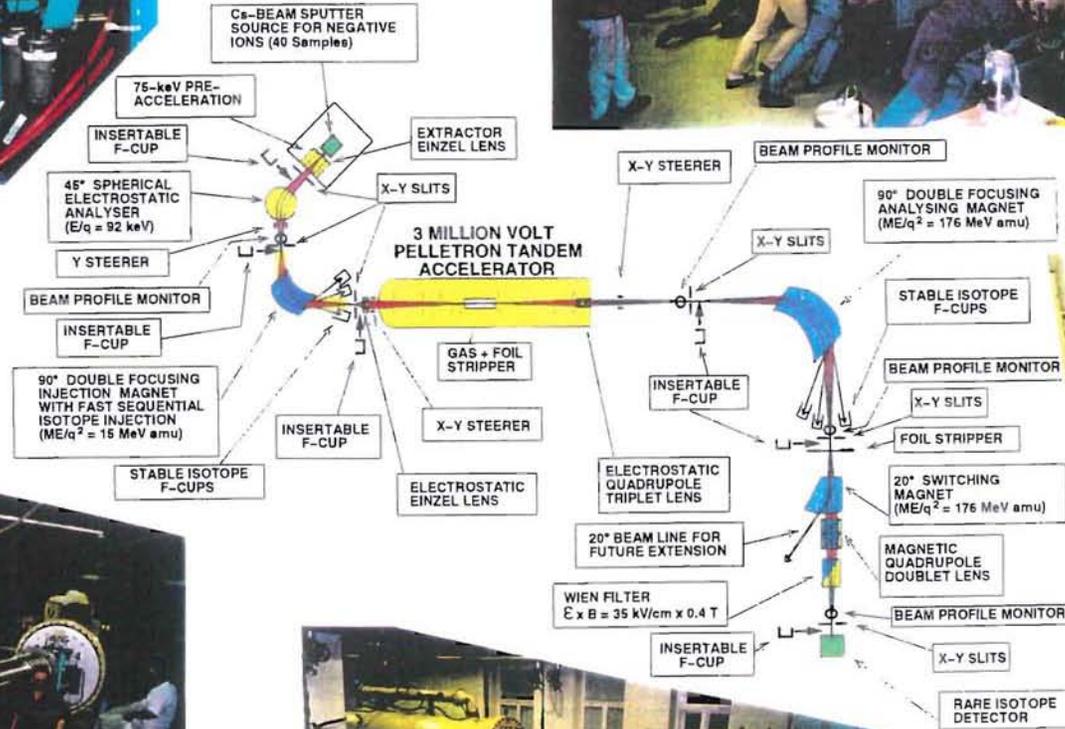


Environmental



Research

Vienna



Accelerator

Wie der Kohlenstoff aus der Probe kommt

Für die Messung muß der Kohlenstoff der Probe isoliert werden – die Probe wird zu Graphit verarbeitet.

Bei einer Holzprobe geht das so vor sich:

Wasser in der Erde kann eine Probe durchnässen. Dadurch können in der Probe Kohlenstoffverbindungen vorkommen, die von außen in die Probe gelangt sind: Mit einer Säure werden zuerst Karbonate entfernt, anschließend wird in einer Base Huminsäure entfernt. Danach kommt die Probe wieder in ein Säurebad um das CO₂ zu entfernen, das sich bei den vorherigen Schritten gebildet hat.

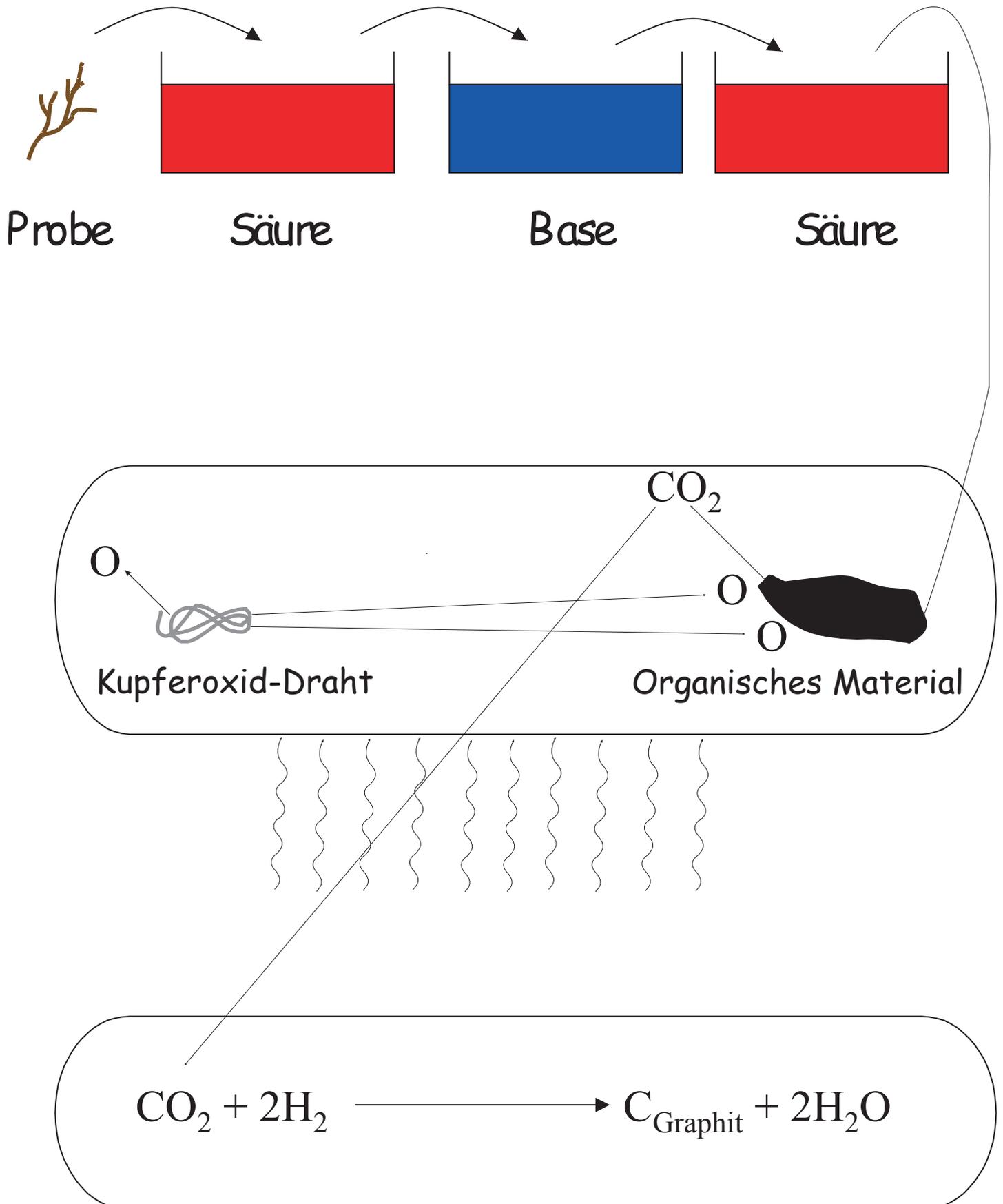
Das Probenmaterial wird dann zusammen mit einem Kupferoxid-Draht luftdicht in ein Quarzröhrchen eingeschmolzen und zu CO₂ verbrannt, wobei das Kupferoxid den Sauerstoff für die CO₂-Bildung liefert.

In einer speziellen Vorrichtung wird das CO₂ dann mit Wasserstoff zu Graphit und Wasser umgewandelt:



Das Graphit schlägt sich auf Eisenpulver nieder, das als Katalysator dient. Das so gewonnene Graphit-Eisen-Gemisch wird in eine Halterung gepreßt und kann nun zur Messung in das Beschleunigermassenspektrometer eingesetzt werden.

Wie der Kohlenstoff aus der Probe kommt

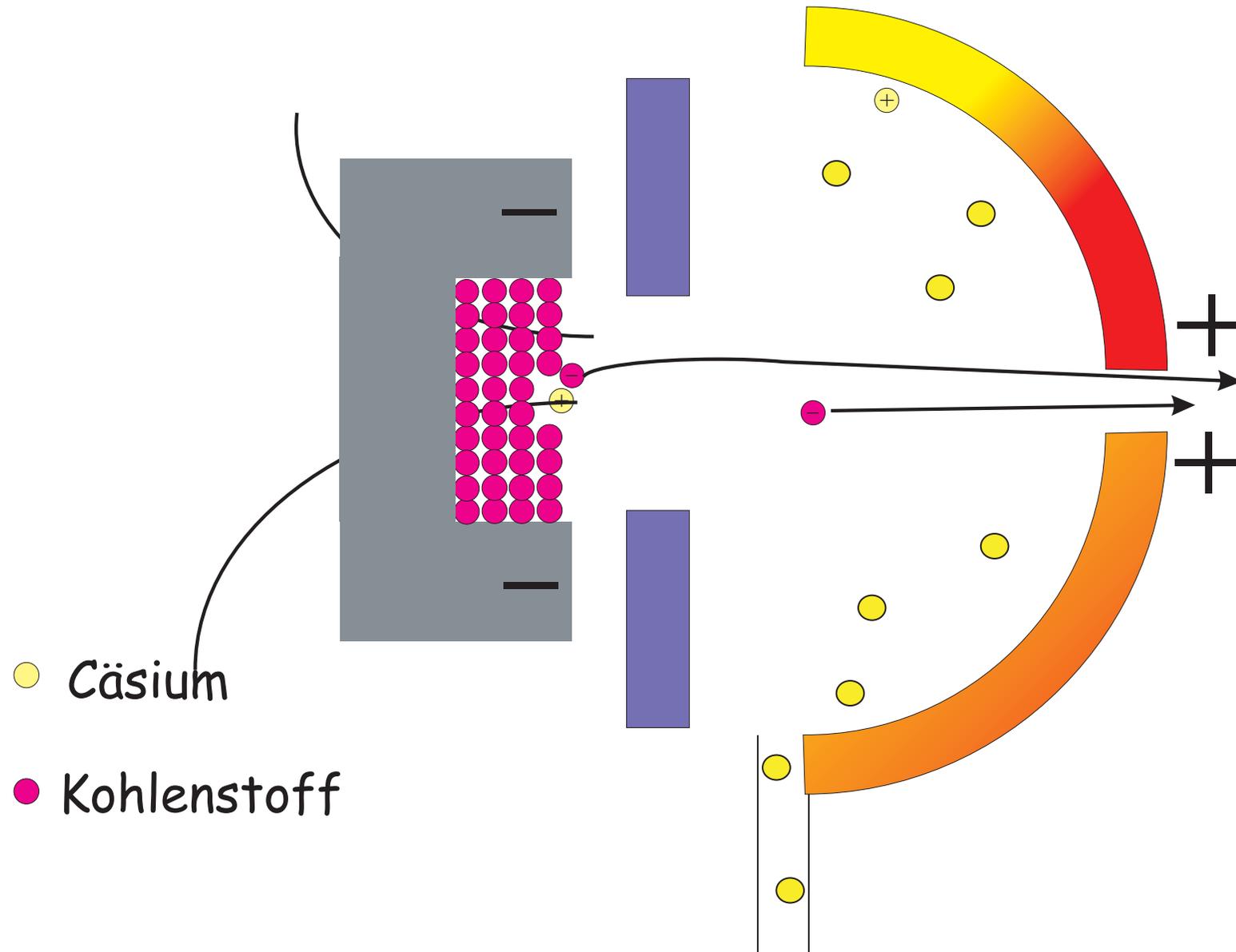


Eine Quelle negativer Ionen

In einem Ofen unter der Ionenquelle wird Cäsium erhitzt. Dabei entsteht Cäsiumdampf, der über ein Rohr auf eine glühende Metalloberfläche strömt: dabei wird den Cäsium-Atomen ein Elektron entrissen. Da die Probenhalterung relativ zur Metallplatte negativ geladen ist, wird das nun positive Cäsium-Atom sofort von der Metallplatte weg zur Kohlenstoffprobe hin beschleunigt.

Die positiv geladenen Cäsium-Atome prallen auf die Kohlenstoffoberfläche und schlagen dadurch Atome aus der Probe heraus. Davon haben ungefähr 5-10% ein zusätzliches Elektron. Diese sind dadurch jetzt negativ geladen und werden somit durch das elektrische Feld von der Probe weg beschleunigt. Ein Metallring vor der Probe wird genau so geladen, daß die negativen Ionen durch ein Loch in der glühenden Metalloberfläche gebündelt die Ionenquelle verlassen.

Eine Quelle negativer Ionen



Ein elektrisches Feld trennt Energien

Ein Ionenstrahl wird nicht nur in einem Magnetfeld abgelenkt sondern auch in einem elektrischen Feld. Zwischen zwei parallelen, geladenen Platten wirkt auf ein geladenes Teilchen die Kraft ϵq . Diese Kraft zwingt das Teilchen auf eine Parabelbahn.

Aus der Probe werden Ionen unterschiedlich stark herausgeschlagen; dadurch haben die Ionen nicht alle gleiche Energien, wenn sie aus der Ionenquelle kommen. Damit aber alle Ionen mit einer Masse von 14 im Magneten auf derselben Kreisbahn bleiben, dürfen nur Ionen mit gleicher Energie in den Magneten hineinfliegen.

Die Platten des sogenannten „Elektrostatischen Analysators“ sind so gekrümmt, daß geladene Teilchen auf Kreisbahnen fliegen:

$$\frac{mv^2}{r} = \epsilon q \quad \Rightarrow \quad r = \frac{mv^2}{\epsilon q}$$

m.....Masse des Teilchens
vGeschwindigkeit des Teilchens
r.....Radius der Kreisbahn
 ϵ elektrostatische Feldstärke
q.....Ladung des Teilchens

Setzt man für die kinetische Energie $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$, so erhält man:

$$mv^2 = 2E_{kin.}$$

Setzt man dies oben ein, folgt für den Radius:

$$r = \frac{2E_{kin}}{\epsilon q}$$

In diesem Feld ϵ fliegen also alle Teilchen gleicher Energie auf einer Kreisbahn, da die Ladung der Ionen aus der Quelle immer eine Elementarladung beträgt; Teilchen mit anderen Energien fliegen auf Kreisbahnen mit anderen Radien.

Man kann den Energiefilter also so einstellen, daß nur Ionen mit einer bestimmten Energie hindurchkommen.

Die erste Massentrennung

In einem Magnetfeld werden geladene Teilchen auf Kreisbahnen abgelenkt. Die Zentripetalbeschleunigung kommt von der Lorentzkraft:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

m.....Masse des Teilchens
vGeschwindigkeit des Teilchens
r.....Radius der Kreisbahn
q.....Ladung des Teilchens
B.....magnetische Feldstärke

Die kinetische Energie E_{kin} eines Teilchens beträgt: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$

Setzt man in die Formel für den Radius für $v = \sqrt{\frac{2E_{kin}}{m}}$ ein, so erhält man:

$$r = \frac{\sqrt{2mE_{kin}}}{qB}$$

Die Ionen werden im Magnetfeld B entsprechend ihrer Masse m , ihrer Ladung q und ihrer kinetischen Energie abgelenkt.

Wenn der Strahl zum Magneten kommt, sind alle Ionen mit falscher Ladung und Energie bereits entfernt worden. Dadurch hängt der Radius der Ablenkung im Magnetfeld nur noch von der Masse der Ionen ab. Die Stärke des Magnetfeldes kann nun durch Änderung des Stroms so eingestellt werden, daß nur Ionen mit einer ausgewählten Masse die Begrenzungsschlitze passieren können.

Der Beschleuniger

Nach dem Injektormagneten befinden sich nur noch Ionen mit der Masse 14 im Strahl. Diese Ionen fliegen nun in den Beschleuniger. In der Mitte des Beschleunigers liegt ein Gehäuse mit 3 Millionen Volt.

Die negativen Ionen werden davon angezogen und stark beschleunigt. Die negativ geladenen Teilchen erhalten durch diese Beschleunigung eine hohe Energie. Diese große Energie benötigt man, um das Isobaren-Problem der Molekülonen zu lösen.

In der Beschleunigertechnik mißt man der Einfachheit halber Energien in „eV“ (Elektronenvolt): wenn die negativ geladenen Teilchen die Mitte des Beschleunigers erreichen, haben sie die Energie $q \times U = e \times 3 \times 10^6 V$ ($1 \cdot e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{Coulomb}$) dazugewonnen

Die elektrische Spannung von 3 Millionen Volt wird folgendermassen erzeugt: Eine Kette, die abwechselnd aus leitenden und isolierenden Gliedern besteht, läuft über zwei Räder. Durch eine negativ geladene Elektrode werden die Elektronen aus den Metallgliedern der Kette in das Rad verdrängt. Dadurch sind die Glieder positiv geladen, wenn sie sich vom Rad lösen. Sie laufen zum Mittelgehäuse des Beschleunigers, wo sie ihre positiven Ladungen abgeben. Dadurch lädt sich das Mittelgehäuse schließlich auf 3 Millionen Volt auf.

Da 3 Millionen Volt in Luft bis zu drei Meter weit überschlagen würden, steckt man die ganze Konstruktion in einen Druckkessel, den man mit besonders gut isolierendem Gas füllt.

Ein Gas entreißt Elektronen

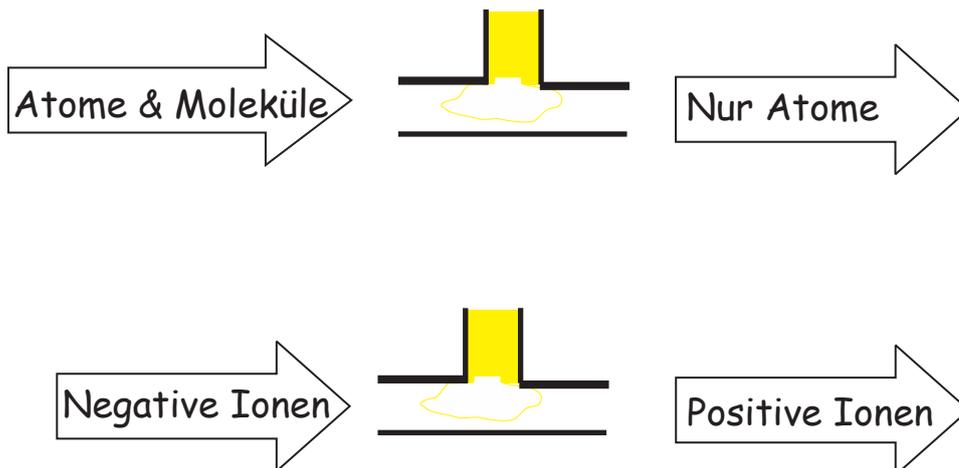
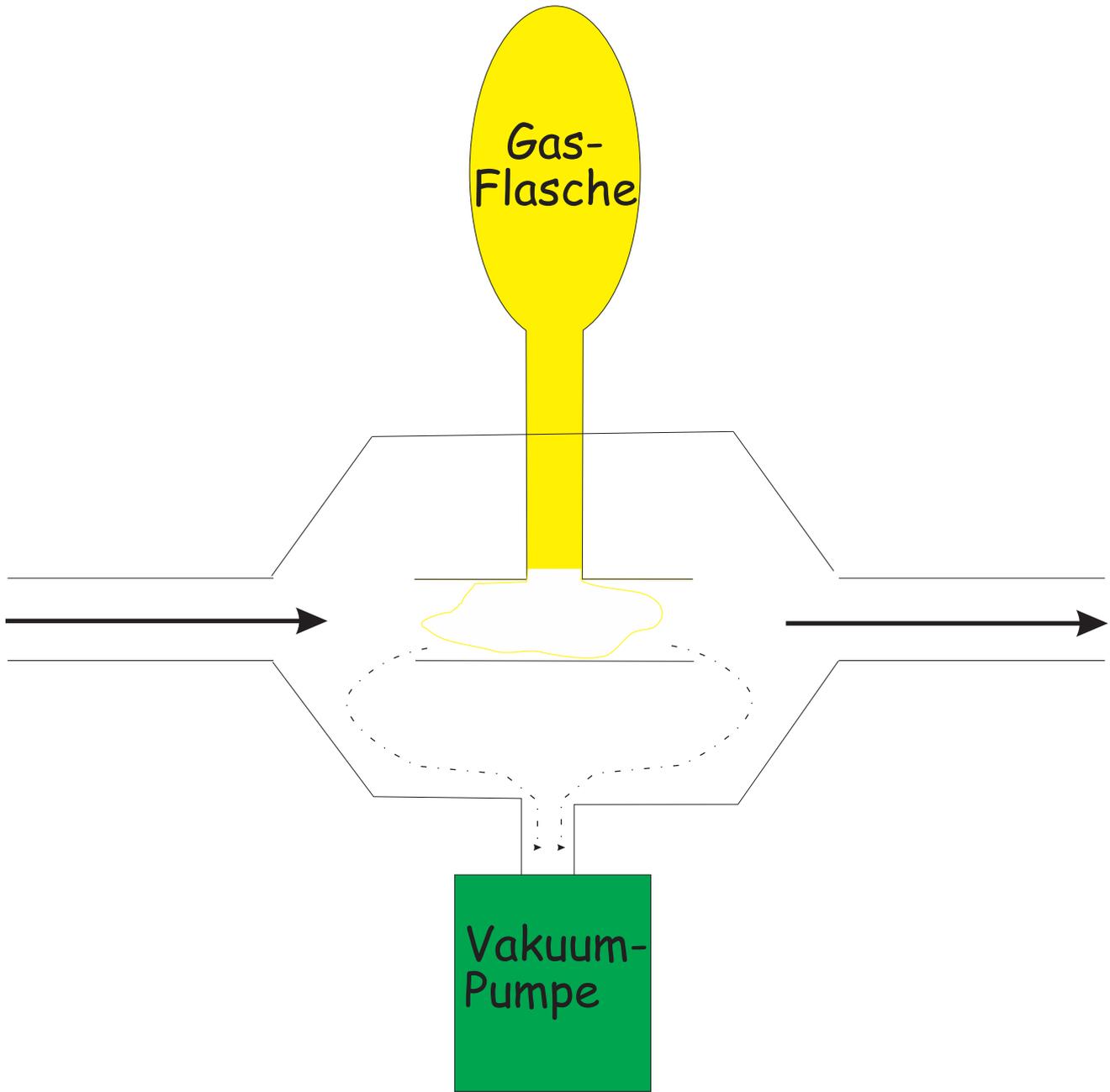
In der Mitte des Beschleunigers befindet sich der sogenannte Stripper. Das ist eine kurze gasgefüllte Strecke, durch die die Ionen hindurchfliegen. Dabei streifen die Ionen Elektronen ab: aus den zuvor negativen Teilchen werden somit positiv geladene Teilchen. Und zwar mehrfach positiv geladene: manchen Ionen werden drei Elektronen entrissen, anderen vier und manchen überhaupt alle.

Nachdem sie den Stripper durchflogen haben, sind alle Teilchen (mehrfach) positiv geladen. Dadurch werden sie vom positiven Potential in der Mitte abgestoßen und wiederum beschleunigt – je nach Ladung unterschiedlich stark. Ein dreifach positives Ion erhält durch das Potential von 3MV eine Energie von 9 MeV, ein vierfach positives Ion erhält eine Energie von 12 MeV.

Moleküle werden instabil, wenn man ihnen Elektronen wegnimmt: sie zerfallen in einzelne Atome. Das Molekülion ^{13}CH zerfällt also in seine Bestandteile ^{13}C und H. Alle Moleküle mit der Masse 14 werden durch das Abstreifen der Elektronen im Stripper zerstört. Die einzelnen Molekülbestandteile bleiben weiterhin im Strahl, sie haben nun aber nicht mehr die Masse 14;

Die positiv geladenen Teilchen werden von der positiven Ladung des Mittelgehäuses im Beschleuniger ein zweites Mal beschleunigt. Dadurch kann die Hochspannung zweimal zur Beschleunigung der Ionen verwendet werden – diese Art von Beschleuniger heißt deshalb „Tandembeschleuniger“.

Ein Gas entreibt Elektronen



Die zweite Massentrennung

Nachdem im Stripper die störenden Moleküle mit der gleichen Masse wie ^{14}C aufgebrochen wurden, werden die Ionen ein zweites Mal durch einen Magneten geschickt.

In einem Magnetfeld wirkt auf geladene Teilchen eine Kraft, die sie auf eine Kreisbahn zwingt:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

m Masse des Ions

v Geschwindigkeit des Ions

r Radius der Kreisbahn

q Ladung des Ions

B magnetische Feldstärke

Daraus folgt für den Radius: $r = \frac{mv}{qB}$

Die kinetische Energie eines Teilchens beträgt: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$

Setzt man in die Formel für den Radius für $v = \sqrt{\frac{2E_{kin}}{m}}$ ein, so erhält man:

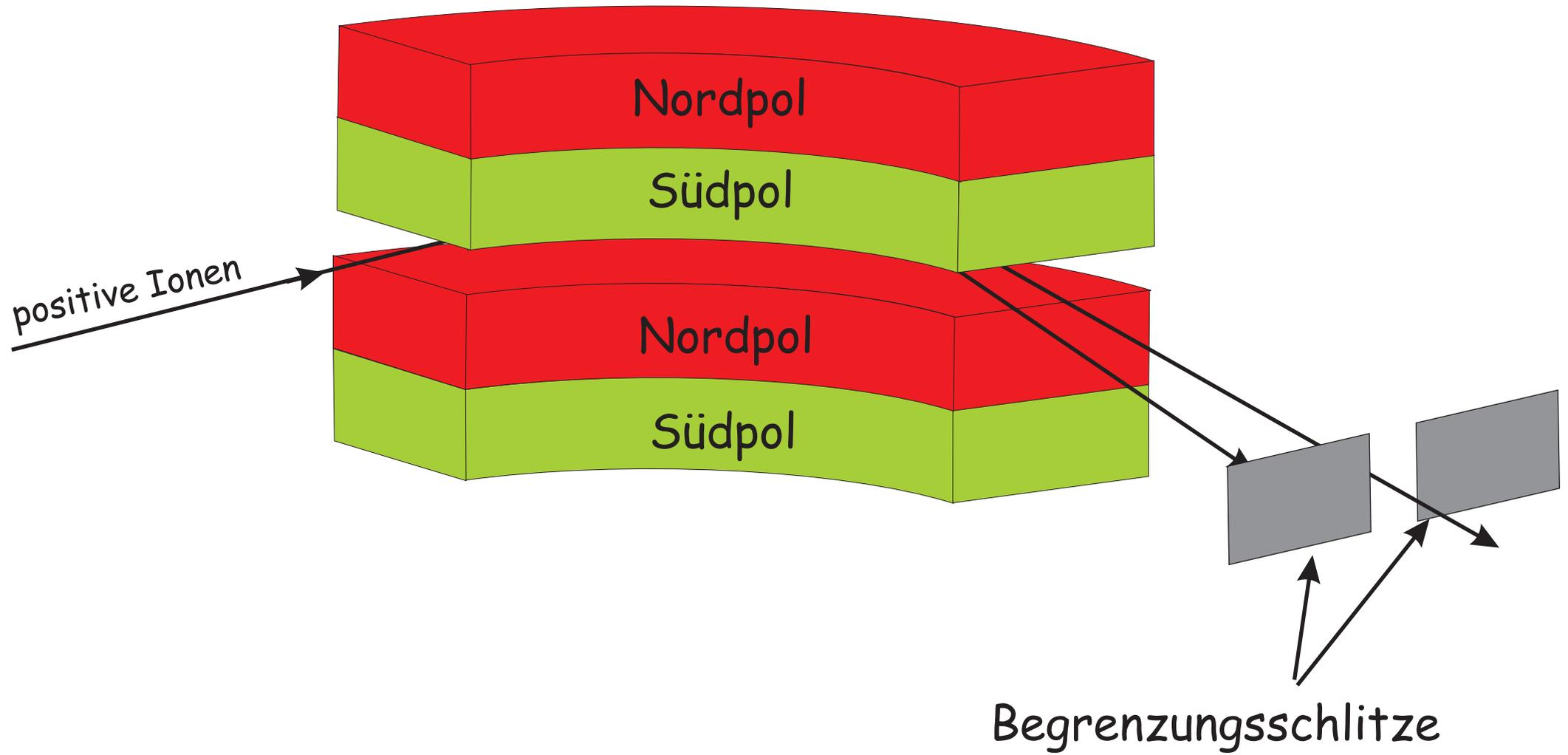
$$r = \frac{\sqrt{2mE_{kin}}}{qB}$$

Der Radius der Kreisbahn in einem Magnetfeld B hängt von der Masse, der Ladung und der Energie des Teilchens ab.

Nach dem Beschleuniger besteht der Strahl aus ^{14}C und Molekülbruchstücken verschiedener Ladungen und verschiedener Energien. Masse 14 haben jetzt aber nur mehr die ^{14}C -Ionen.

Manche Teilchen haben aber durch Stöße mit vereinzelt Gasatomen sowohl ihren Ladungszustand als auch ihre Energie geändert. Stellt man den Magneten so ein, daß die ^{14}C -Ionen mit Ladung $+3e$ durchkommen, werden fast alle anderen Ionen abgetrennt. Nur zufällig können Ionen mit einer anderen Masse als 14 so eine Kombination von Energie und Ladung haben, daß sie auf der gleichen Bahn fliegen wie ^{14}C . Weil aber ^{14}C so selten ist, sind dies dennoch zu viele.

Die zweite Massentrennung



Ein Filter für Geschwindigkeiten

Nachdem den zweiten Magneten auch Ionen mit einer anderen Masse als 14 passieren können, benötigt man eine weitere Vorrichtung um andere Ionen vom ^{14}C abzutrennen.

Damit Ionen mit anderer Masse als 14 durch den Magneten hindurchkommen müssen sie andere Energien haben als die ^{14}C -Ionen. Damit haben sie aber auch andere Geschwindigkeiten und können deshalb vom ^{14}C getrennt werden.

Dazu durchfliegen die Ionen ein sogenanntes Wien-Filter*, das aus einem elektrischen Feld und einem dazu senkrechten Magnetfeld besteht. Beide Felder üben eine Kraft auf die Ionen aus, wobei beide Kräfte entgegengesetzte Richtungen haben:

Elektrisches Feld: $F_{el.} = \epsilon q$ $F_{el.}$elektrische Kraft
 ϵ elektrische Feldstärke
 qLadung des Ions

Magnetfeld: $F_{mag.} = qvB$ (Lorentzkraft)
 $F_{mag.}$...magnetische Kraft
 q Ladung des Ions
 v Geschwindigkeit des Ions
 Bmagnetische Feldstärke

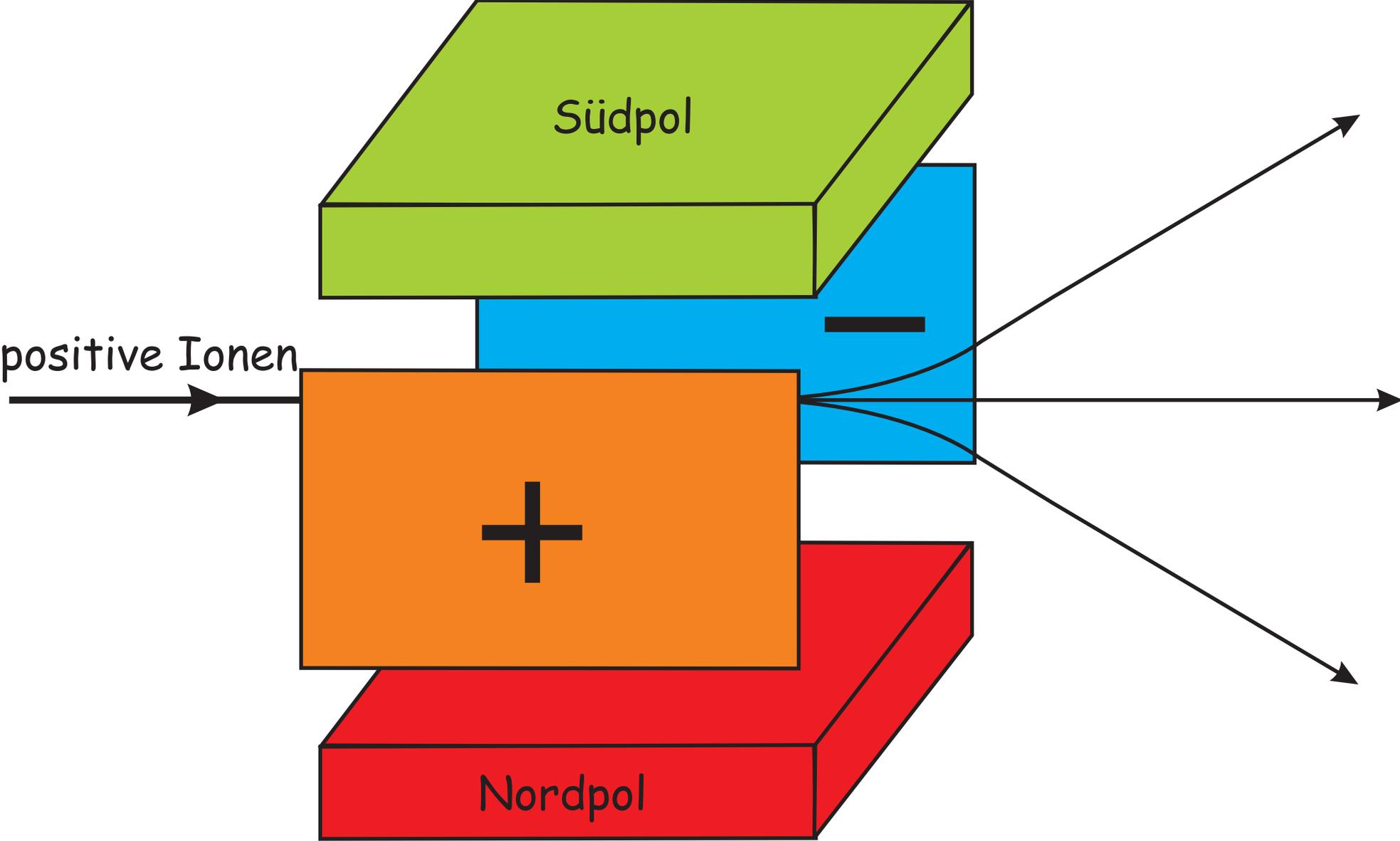
Die Lorentzkraft steht senkrecht auf das Magnetfeld und ist der Kraft vom elektrischen Feld entgegengerichtet. Nur für Ionen einer bestimmten Geschwindigkeit sind die entgegengesetzten Kräfte gleich groß und heben einander auf.

$$F_{el.} = F_{mag.} \quad \Rightarrow \quad \epsilon q = qvB \quad \Rightarrow \quad \frac{\epsilon}{B} = v$$

Ionen mit anderer Geschwindigkeit werden nach der einen oder anderen Seite abgelenkt. Man kann die Felder nun so einstellen, daß nur Ionen mit der Geschwindigkeit, die ^{14}C haben muß, das Wien-Filter durchfliegen können.

* benannt nach Wilhelm WIEN (1864-1928) einem deutschen Physiker

Geschwindigkeits-Filter



Atome zählen – aber wie?

Im auf die Ionisationskammer auftreffenden Strahl können die einzelnen ^{14}C -Ionen gezählt werden. Damit ist schon viel gewonnen, es gibt aber noch ein Problem: selbst wenn man alle Komponenten des Beschleunigermassenspektrometers optimal einstellt, kommen natürlich nicht alle ^{14}C -Atome der Probe auch bis zum Detektor. Schon aus der Ionenquelle kommt nur ein kleiner Teil aller Probenatome überhaupt heraus. Ein weiterer Teil geht durch Kollision mit Gasatomen im Strahlrohr verloren – das Vakuum im Strahlrohr kann nicht beliebig gut realisiert werden.

Es gehen also am Weg von der Probe in den Detektor etliche ^{14}C -Atome verloren. Das Problem ist nun, daß man nicht weiß, wie viele ^{14}C -Atome unterwegs „verloren gehen“. Um das Alter der Probe zu bestimmen muß man aber die in der Probe vorhandenen ^{14}C -Atome messen können. Im Detektor mißt man alle ^{14}C -Ionen, die auf dem Weg dorthin noch übrig geblieben sind, nicht aber die in der Probe vorhandenen ^{14}C -Atome!

Da man auch nicht weiß, welchen Anteil der in der Probe vorhandenen ^{14}C -Atome man unterwegs verliert, kann man aus den gemessenen ^{14}C -Ionen auch nicht auf die in der Probe vorhandenen ^{14}C -Atome rückrechnen. Das ist aber auch gar nicht nötig – des Rätsels Lösung heißt: Relativmessung

Um das Alter einer Probe zu bestimmen, muß man die ^{14}C -Atome der Probe nicht absolut messen können (was man auch nicht kann). Man muß nur das Verhältnis von ^{14}C zu ^{12}C messen können.

Wenn das ^{14}C in der Probe durch radioaktiven Zerfall weniger wird, so verringert sich auch das Verhältnis von ^{14}C zu ^{12}C , auch $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ geschrieben. Das Alter der Probe kann also auch aus dem Verhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ermittelt werden. Und das Verhältnis von $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ kann gemessen werden.

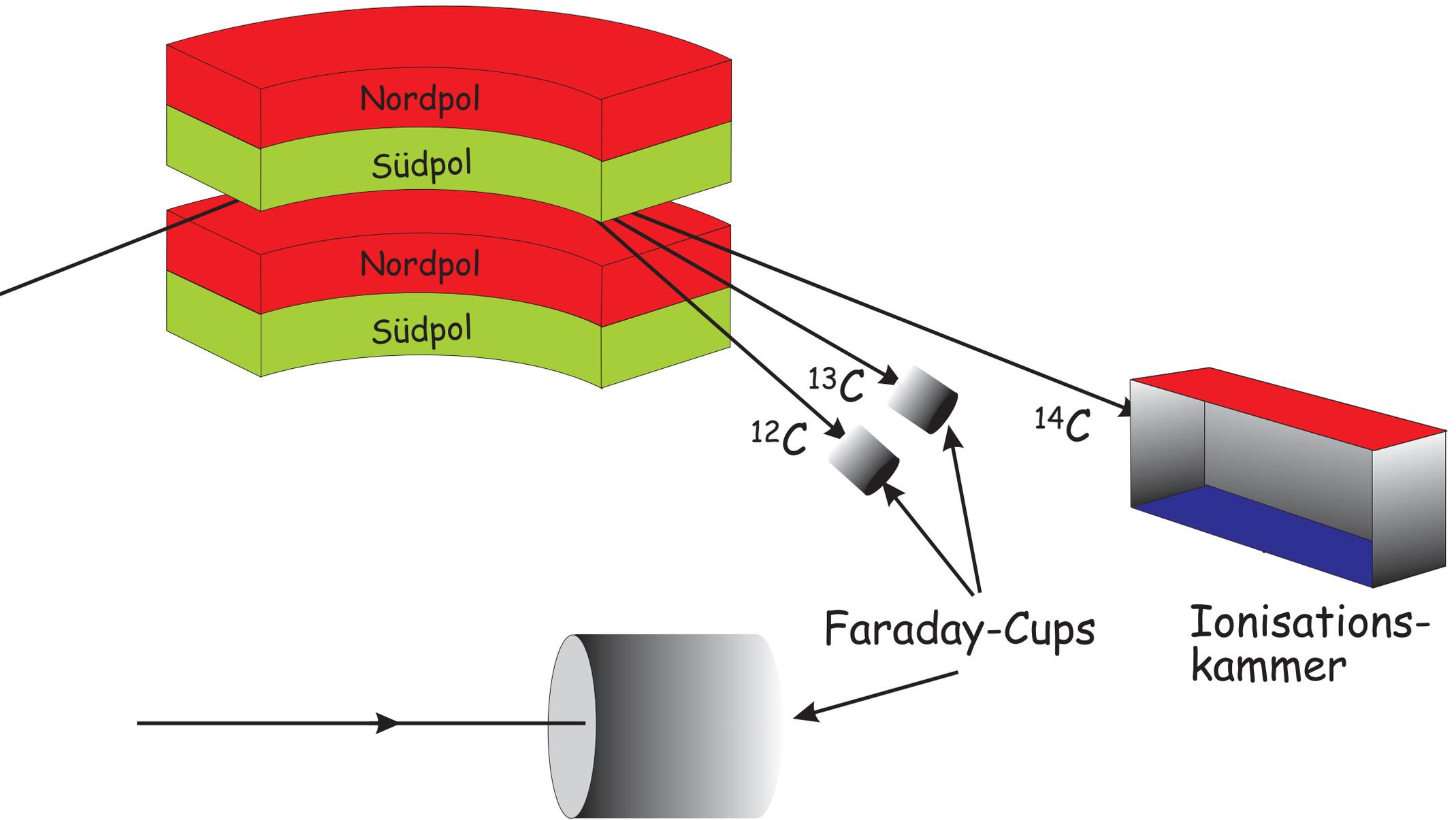
Man weiß nicht, welcher Anteil der ^{14}C -Atome auf dem Weg von der Probe zum Detektor verlorenght. Genausowenig weiß man, welcher Anteil der ^{12}C -Atome verloren geht. Daher mißt man Proben immer im Vergleich mit sogenannten Eichproben, deren Isotopenverhältnis bekannt ist. Im Vergleich mit diesen Eichproben mit bekanntem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis kann das unbekannte $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis der Probe bestimmt werden.

Für die Relativmessung werden ^{12}C , ^{13}C und ^{14}C immer abwechselnd in den Beschleuniger eingeschossen. Das heißt, das Magnetfeld des ersten Magneten muß immer verändert werden, je nachdem welches Isotop man einschießen will.

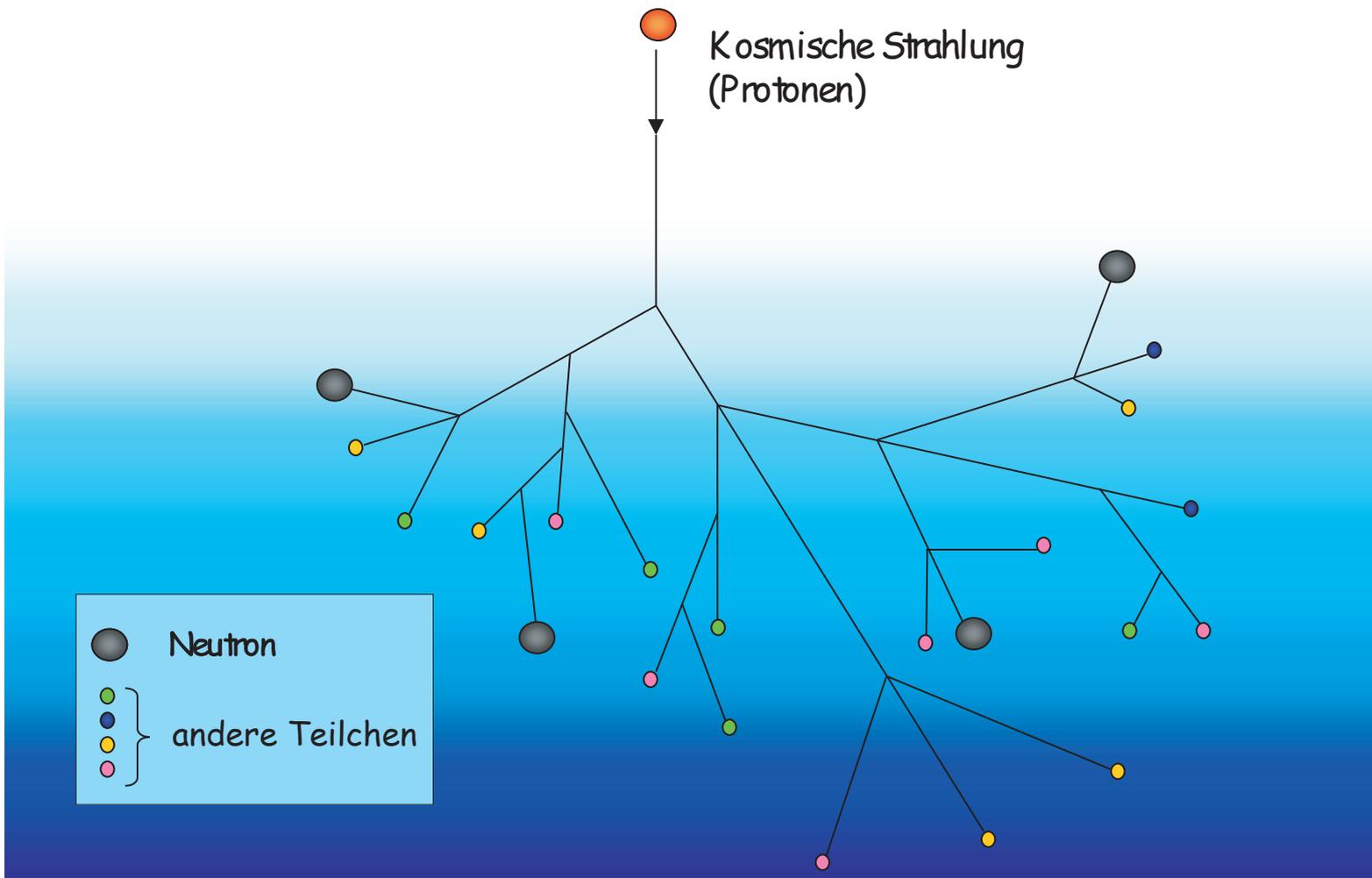
Nach dem Analysiermagneten treffen die ^{12}C - und ^{13}C -Ionen auf einen Faraday-Cup. Das ist ein Becher, in dem der auftreffende Strom gemessen wird. Aus den

gemessenen Ladungsströmen kann man berechnen, wie viele Teilchen pro Sekunde auf den Faraday-Cup getroffen sind. So kann man aus dem ^{12}C -Strom und dem ^{13}C -Strom die Anzahl der Teilchen pro Sekunde berechnen. Die Ionisationskammer wiederum mißt die einzelnen ^{14}C -Ionen während der Zeit, in der ^{14}C in den Beschleuniger geschossen wird. So kann auch die Zahl der ^{14}C -Ionen pro Sekunde ermittelt werden und die Verhältnisse $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ und $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ können gebildet werden.

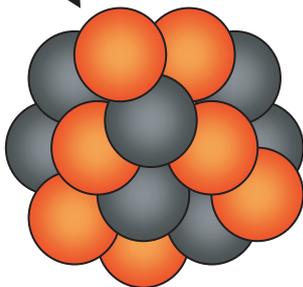
Atome zählen - aber wie ?



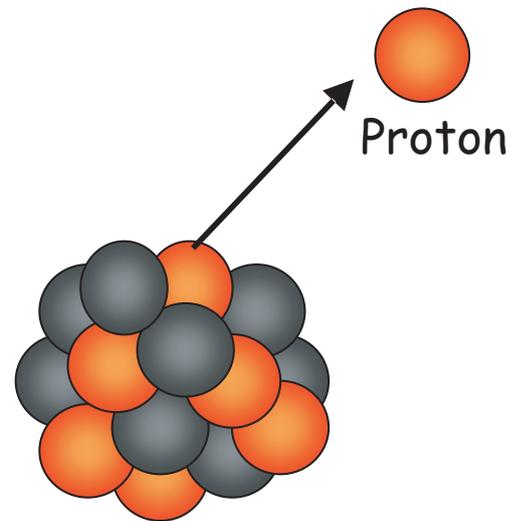
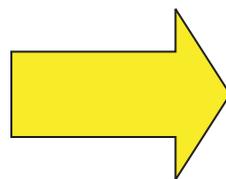
Strahlung aus dem Weltall erzeugt ^{14}C



Neutron



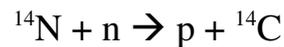
Stickstoffisotop ^{14}N



Kohlenstoffisotop ^{14}C

Strahlung aus dem Weltall erzeugt ^{14}C

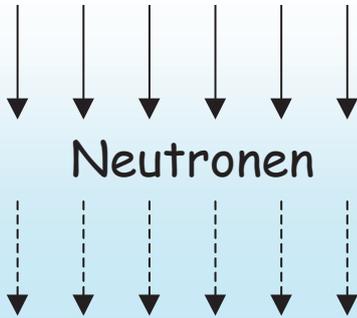
Aus dem Weltall treffen laufend sehr schnelle Protonen auf die Erdatmosphäre. Diese kosmische Strahlung erzeugt durch Zusammenstöße mit den Atomkernen in der Atmosphäre viele andere Teilchen, unter anderem auch Neutronen. Diese Neutronen können nun in der Atmosphäre mit dem Stickstoffisotop ^{14}N zusammenstoßen und erzeugen dabei das radioaktive Kohlenstoffisotop ^{14}C .



In der Atmosphäre wird durch die kosmische Strahlung kontinuierlich ^{14}C produziert. Dennoch wird das Kohlenstoffisotop ^{14}C nicht immer mehr, da es ja radioaktiv ist und im Laufe der Zeit zerfällt. Insgesamt befinden sich die Produktion und der Zerfall von ^{14}C im Gleichgewicht und die Menge an ^{14}C bleibt nahezu konstant.

Wie ^{14}C in den Ötzi kommt

Kosmische Strahlung



^{14}N



^{14}C

+ O_2

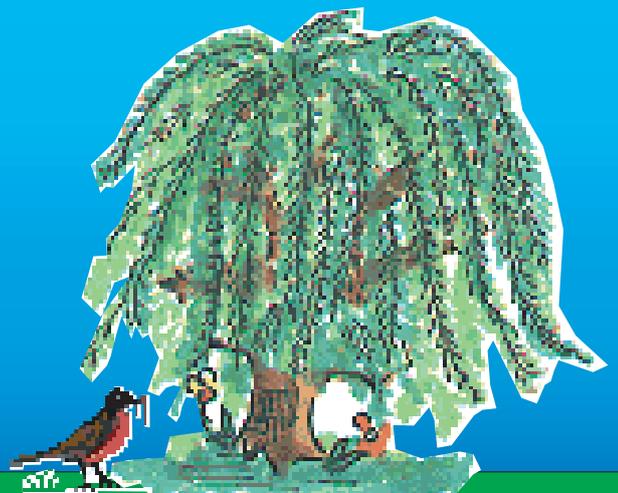


$^{14}\text{CO}_2$

Atmosphärische

Durchmischung

Austausch



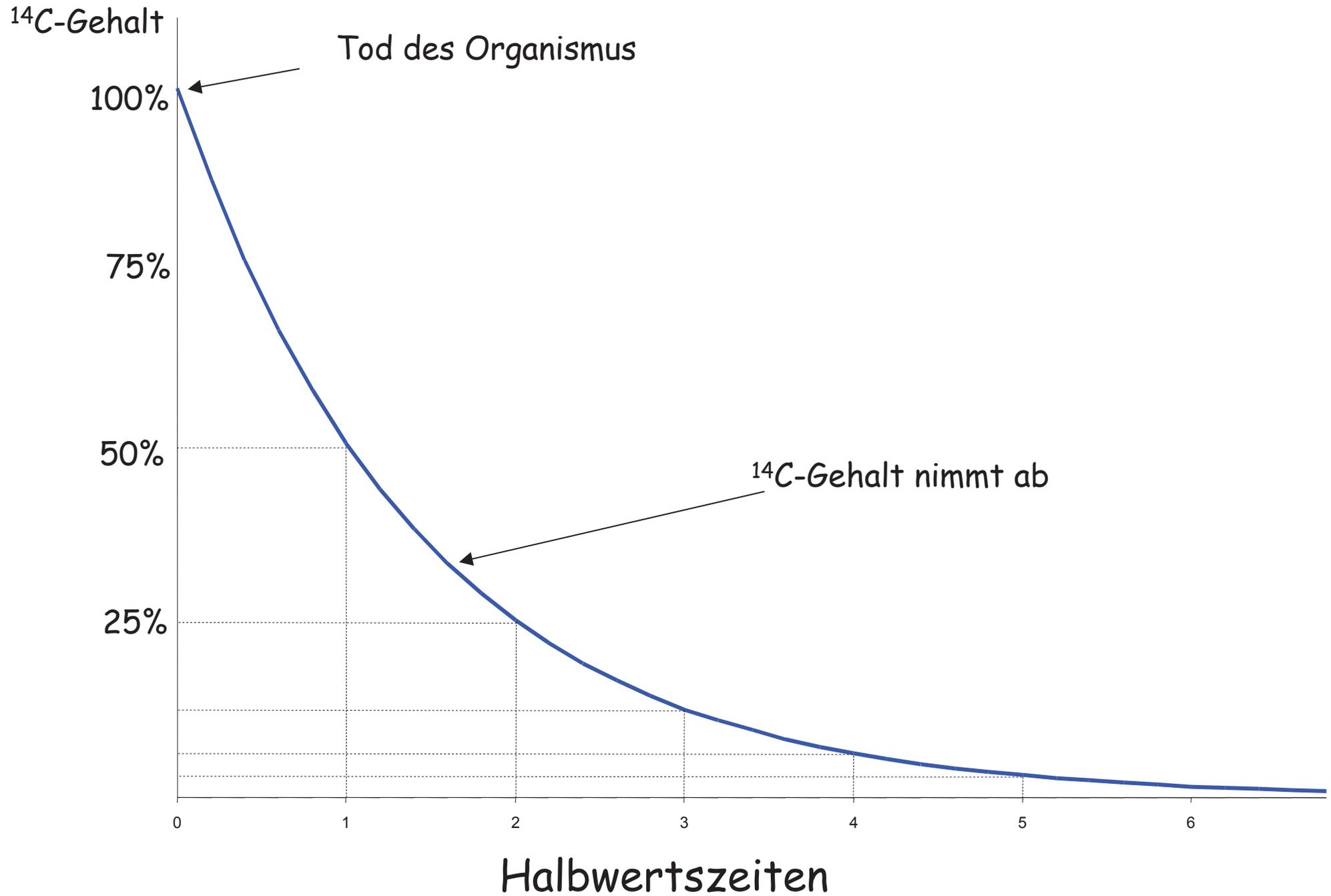
Wie ^{14}C in den Ötzi kommt

Das in der oberen Atmosphäre erzeugte ^{14}C oxidiert zu $^{14}\text{CO}_2$ und vermischt sich mit gewöhnlichem $^{12}\text{CO}_2$ und $^{13}\text{CO}_2$. Das radioaktive $^{14}\text{CO}_2$ verteilt sich wie CO_2 in der ganzen Atmosphäre.

CO_2 löst sich gut in Wasser – natürlich auch das radioaktive $^{14}\text{CO}_2$. So kommt es, daß 93% des gesamten ^{14}C der Erde in den Ozeanen gespeichert ist.

Kohlenstoff in der belebten Natur kommt aus der Atmosphäre. Genauso wie gewöhnliches CO_2 nehmen Pflanzen über die Photosynthese auch $^{14}\text{CO}_2$ auf, das dann über die Nahrungskette in alle lebenden Organismen gelangt – zum Beispiel auch in den Ötzi.

Der Tod startet die Uhr



Der Tod startet die Uhr

Sobald ein Organismus stirbt, findet kein Austausch mit der Umwelt mehr statt und es werden keine ^{14}C -Atome mehr aufgenommen. Die ^{14}C -Atome im Organismus werden durch den radioaktiven Zerfall immer weniger: nach 5730 Jahren (=eine Halbwertszeit) ist nur mehr die Hälfte der ursprünglichen ^{14}C -Atome vorhanden, nach zwei Halbwertszeiten nur noch ein Viertel.

Das Alter einer Probe kann somit bestimmt werden, wenn man den derzeitigen ^{14}C -Gehalt kennt und weiß, wie groß der ^{14}C -Gehalt im Organismus war, als er gestorben ist.

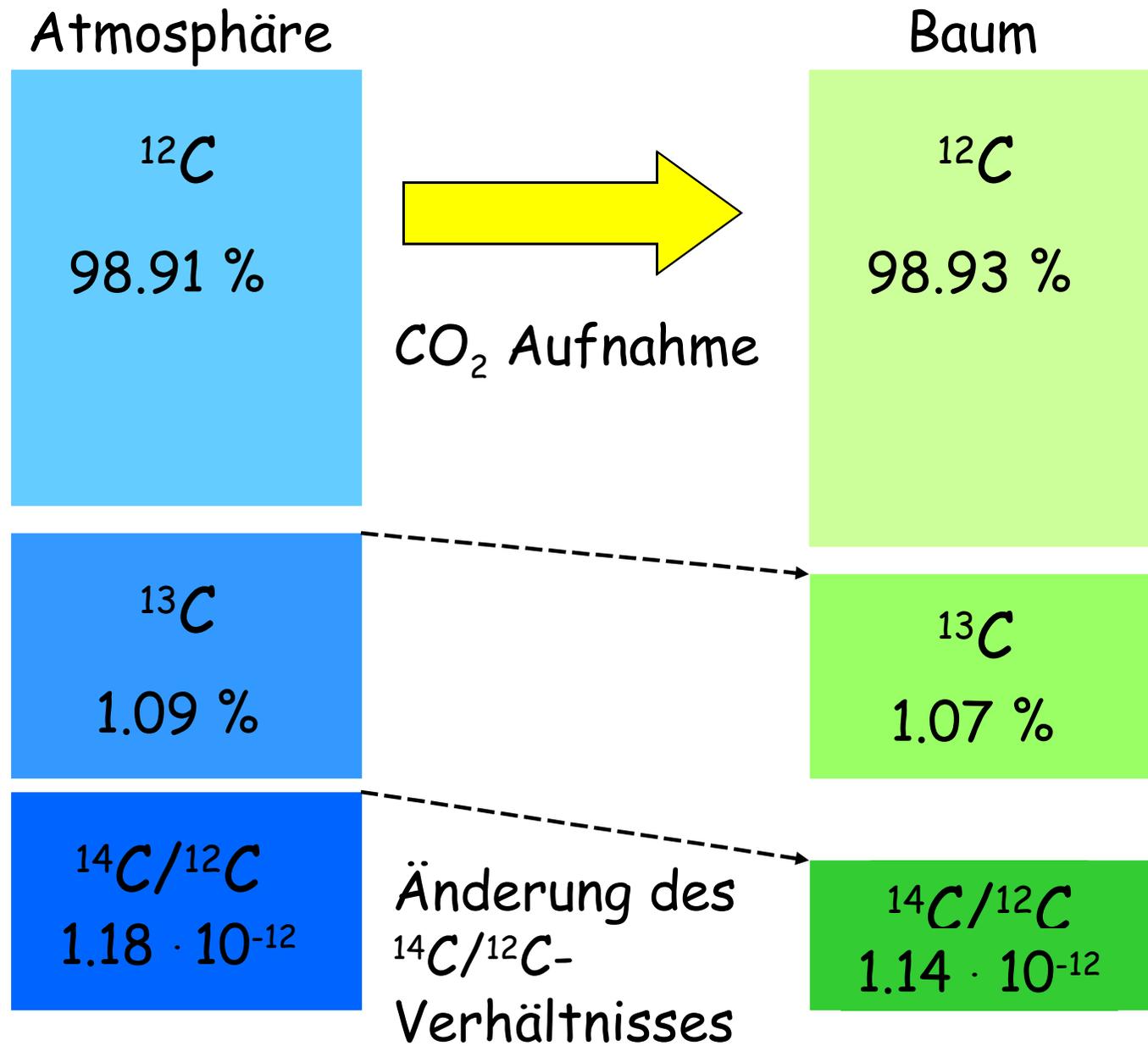
Leichtere Atome bevorzugt !

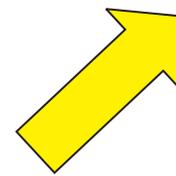
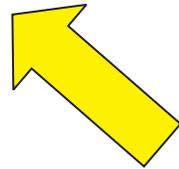
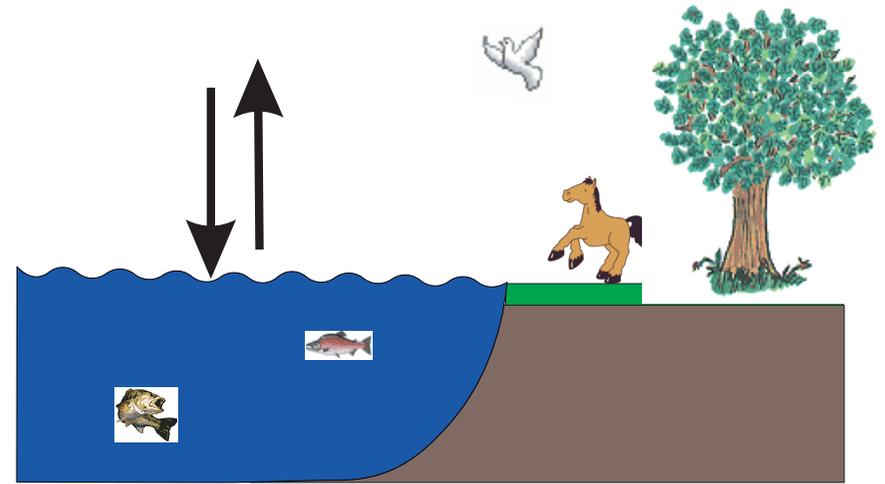
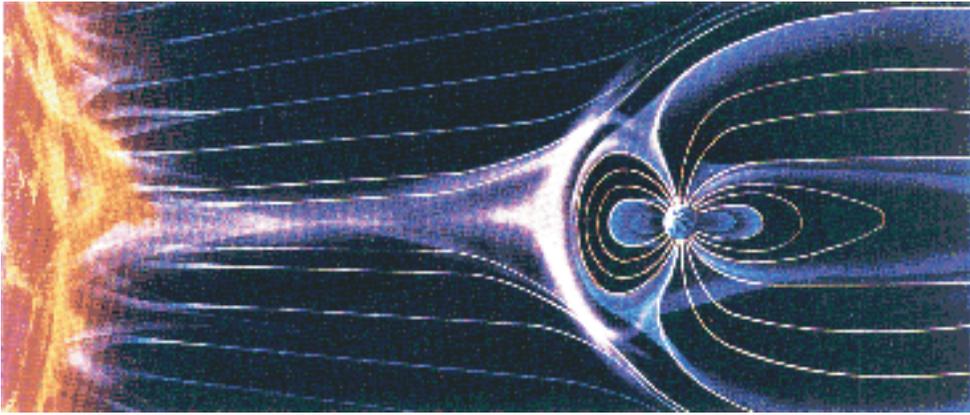
Die Kohlenstoffisotope ^{12}C , ^{13}C und ^{14}C sind chemisch gleich. Dennoch gibt es Prozesse, die teilweise von der Massenzahl abhängen. Die Aufnahme von CO_2 in Pflanzen ist zum Beispiel von der Masse abhängig. $^{12}\text{CO}_2$ wird leichter aufgenommen als $^{13}\text{CO}_2$. Dadurch treten in Pflanzen andere Isotopenverhältnisse auf als in der Atmosphäre. Dieser Effekt heißt Massenfraktionierung.

Durch die Massenfraktionierung ändert sich auch das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis. Ein geringeres $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis im Holz kann nun ein höheres Alter der Probe bedeuten: man kann nicht entscheiden, ob schon mehr ^{14}C -Atome zerfallen sind oder ^{14}C weniger stark aufgenommen wurde.

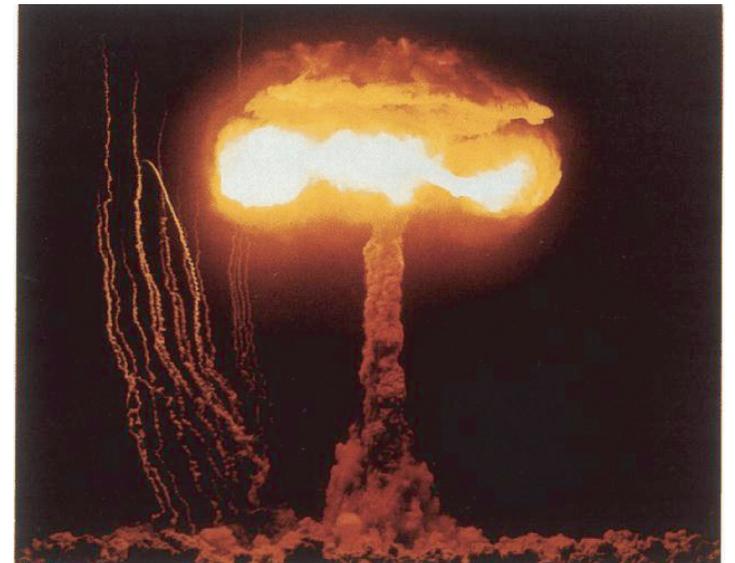
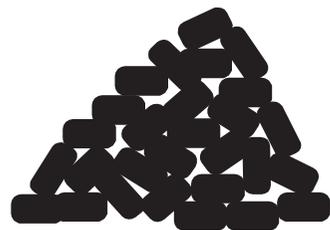
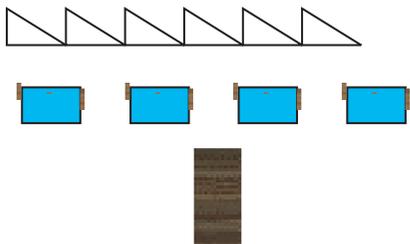
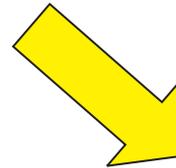
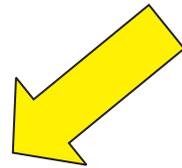
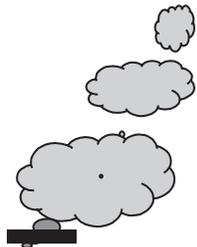
Um das Alter des Holzes bestimmen zu können, muß man wissen, wie groß die Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses durch die Massenfraktionierung ist. Um das festzustellen, mißt man das Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C in der Probe und vergleicht es mit dem $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis einer Eichprobe. Die Abweichung vom Vergleichswert ist ein Maß für die Massenfraktionierung. Da der Massenunterschied von ^{14}C zu ^{12}C doppelt so groß ist wie der Massenunterschied von ^{13}C zu ^{12}C , ist die Massenfraktionierung für ^{14}C doppelt so groß wie für ^{13}C . Indem man das Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C mißt, kann man die Massenfraktionierung für ^{14}C korrigieren.

Leichte Atome bevorzugt !





Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses der Atmosphäre



Änderung des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses der Atmosphäre

Um aus dem $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis einer Probe das Alter der Probe bestimmen zu können, muß man die Anfangskonzentration von ^{14}C kennen: man muß das ursprüngliche $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis kennen um aus dem derzeitigen $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis das Alter der Probe bestimmen zu können:

$$\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_t = \left(\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{t=0} \times e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \dots \text{Zerfallskonstante}$$

$t_{1/2}$Halbwertszeit

t.....vergangene Zeit

Daraus folgt:

$$t = \frac{1}{\lambda} \times \ln \frac{\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{t=0}}{\left(\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_t}$$

Das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre ist aber nicht immer gleich – es hat sich durch verschiedene Effekte im Lauf der Zeit verändert:

- 1.) Die kosmische Strahlung produziert nicht immer gleich viele ^{14}C -Atome. Der Großteil der kosmischen Strahlung kommt von der Sonne und wird durch die Sonnenaktivität beeinflusst. Das Erdmagnetfeld bildet eine Art Schutzschild vor kosmischer Strahlung. In der Vergangenheit hat sich das Erdmagnetfeld oft verändert und es drang unterschiedlich viel kosmische Strahlung in die Atmosphäre. Wenn sich die kosmische Strahlung ändert, die auf die Atmosphäre trifft, ändert sich aber auch die Produktion von ^{14}C und damit auch das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis.
- 2.) Die Löslichkeit von CO_2 im Meerwasser hängt von Klimafaktoren ab. Steigt zum Beispiel die Temperatur des Meerwassers, so wird CO_2 in die Atmosphäre abgegeben. Dieses CO_2 kann aber schon sehr lange im Meer gelöst sein, so daß die ^{14}C -Kerne größtenteils schon zerfallen sind und nur noch $^{12}\text{CO}_2$ und $^{13}\text{CO}_2$ in die Atmosphäre gelangen. Das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre nimmt dadurch ab. Es kann aber auch durch andere Klimafaktoren zunehmen.

- 3.) Im Zuge der industriellen Revolution wurde durch Kohleverbrennung sehr viel alter Kohlenstoff, in dem die ^{14}C -Atome schon zerfallen sind, in die Atmosphäre gebracht. Dadurch hat sich das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre seit der Mitte des 19. Jahrhunderts verringert.
- 4.) Atombomben erzeugen unter anderem auch viele Neutronen, die mit dem Stickstoff der Luft ^{14}C produzieren. Auf diese Weise wurde durch die oberirdischen Atombombentests in den 60er Jahren das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre vorübergehend verdoppelt!

Baumringe helfen weiter

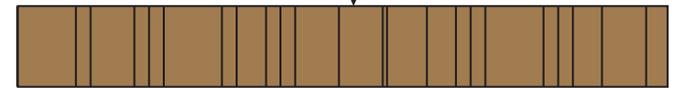
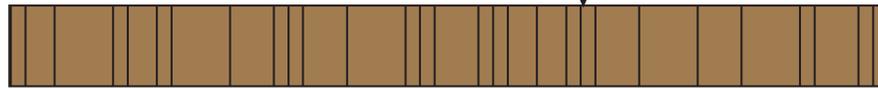
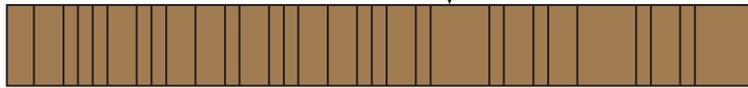
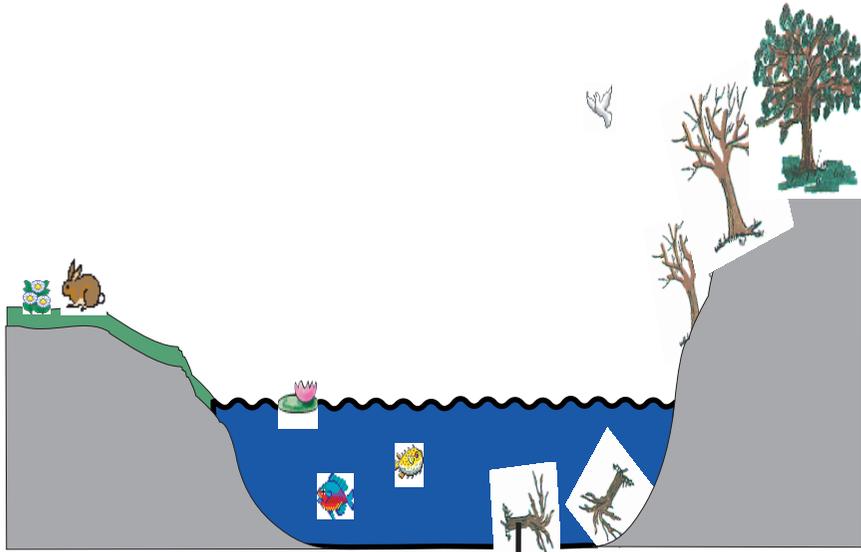
Um das Alter einer Probe bestimmen zu können, muß man das ursprüngliche $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis im lebenden Organismus kennen. Der ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre, und damit auch der von Organismen ist aber nicht immer gleich groß. Man muß also irgendwie herausfinden, wie groß das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre in der Vergangenheit jeweils war. Das kann man mit Hilfe von Baumringen:

Lebende Bäume bilden jedes Jahr einen neuen Baumring. Das Wachstum der Bäume hängt stark vom Klima ab, sodaß in trockenen Jahren dünne Ringe gebildet werden, in niederschlagsreichen Jahren dicke. So weist jeder Baum ein typisches Muster von Baumringen auf.

Indem man nun die Ringmuster von alten toten Bäumen aus verschiedenen Holzfunden und die Mustern lebender Bäume vergleicht und überlappende Abschnitte sucht, kann man das Alter des Holzes auf das Jahr genau bestimmen. Dazu benötigt man jeweils ca. 100 überlappende Baumringe.

Indem man das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis der Baumringe gemessen hat, konnte man so das natürliche $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis in der Atmosphäre bis 9,500 v. Chr. bestimmen.

Baumringe helfen weiter



Wie alt ist Ötzi's Bogen ?

Aus der ^{14}C -Konzentration in einer Probe kann zwar über das radioaktive Zerfallsgesetz ein Alter berechnet werden, nur muß man für das richtige Alter auch die Ausgangskonzentration von ^{14}C im lebenden Organismus genau kennen.

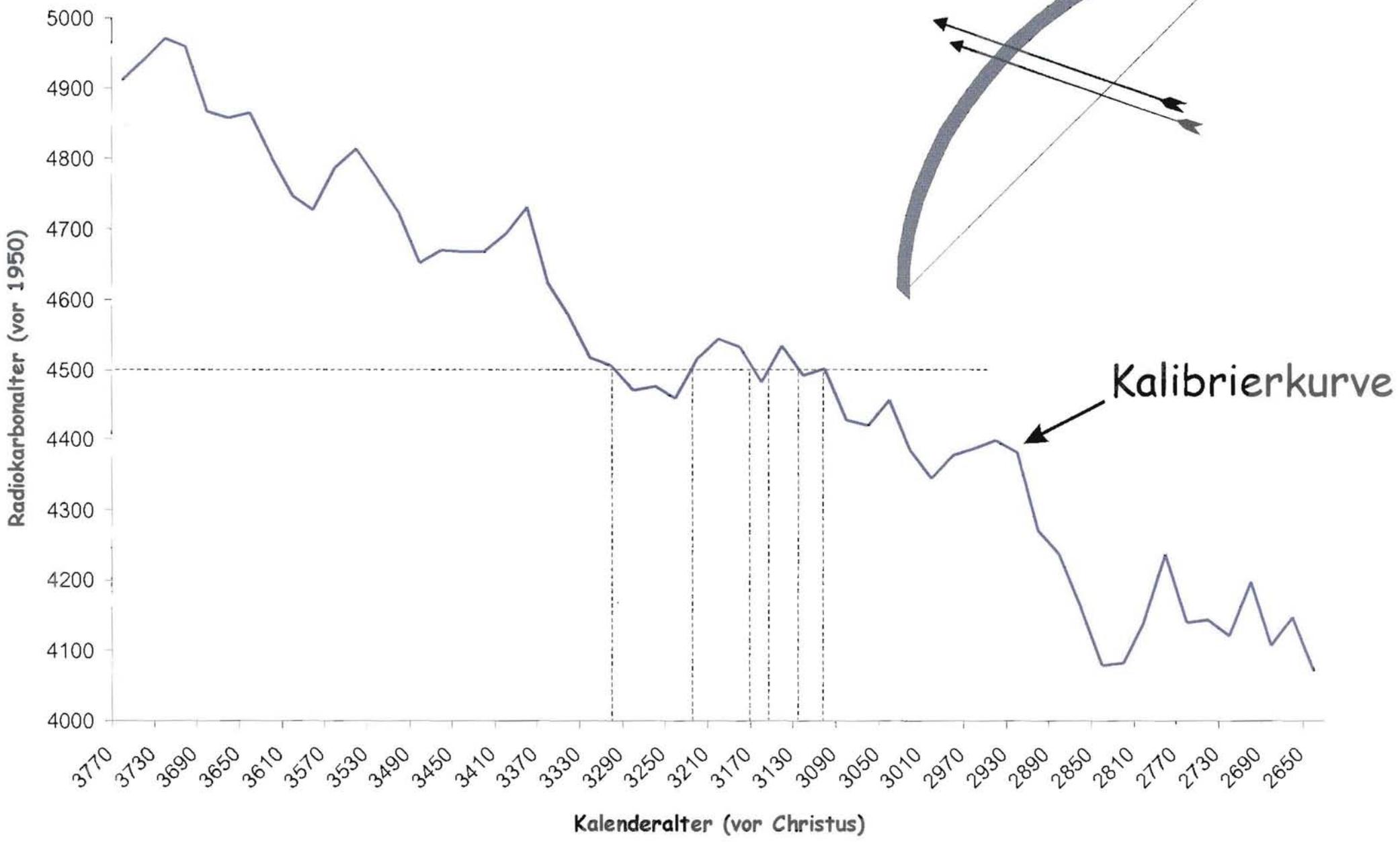
Trotzdem berechnet man aus der ^{14}C -Konzentration zuerst ein Alter, das von der Konstanz des $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses ausgeht – das sogenannte Radiokarbonalter. Wie wir wissen ist das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis aber nicht konstant. Das Radiokarbonalter muß daher noch in ein historisches „Kalenderalter“ umgewandelt werden, das die zeitlichen Schwankungen im $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis berücksichtigt. Das ist dadurch möglich, daß man mit Baumringen für die letzten 11.500 Jahre die ^{14}C -Konzentration in der Atmosphäre bestimmen konnte.

Dadurch kann man in einer Kalibrierkurve den Zusammenhang zwischen Radiokarbonalter (also ^{14}C -Konzentration der Probe) und Kalenderalter darstellen.

Für den Bogen, der neben dem Ötzi gefunden wurde, hat man ein Radiokarbonalter von 4500 Jahren gemessen, genauso wie auch für Knochenproben vom Ötzi. In der Kalibrierkurve zieht man nun beim Radiokarbonalter „4500 Jahre“ einen horizontalen Strich und bei den Schnittpunkten mit der Kurve vertikale Striche. Auf der x-Achse kann man dann das Kalenderalter ablesen.

Beim Ötzi-Bogen gibt es mehrere Schnittpunkte, weil die Kurve stark schwankt. Das weist darauf hin, daß die ^{14}C -Konzentration in der Atmosphäre zu der Zeit stark unterschiedlich war. Für die Altersbestimmung heißt das aber, daß man das Alter des Bogens nicht sehr genau bestimmen kann, auch wenn die Messung sehr genau durchgeführt werden kann: man kann ihn nur auf einen Zeitraum von ca. 3300 v. Chr. Bis 3100 v. Chr. datieren.

Wie alt ist Oziris Bogen?



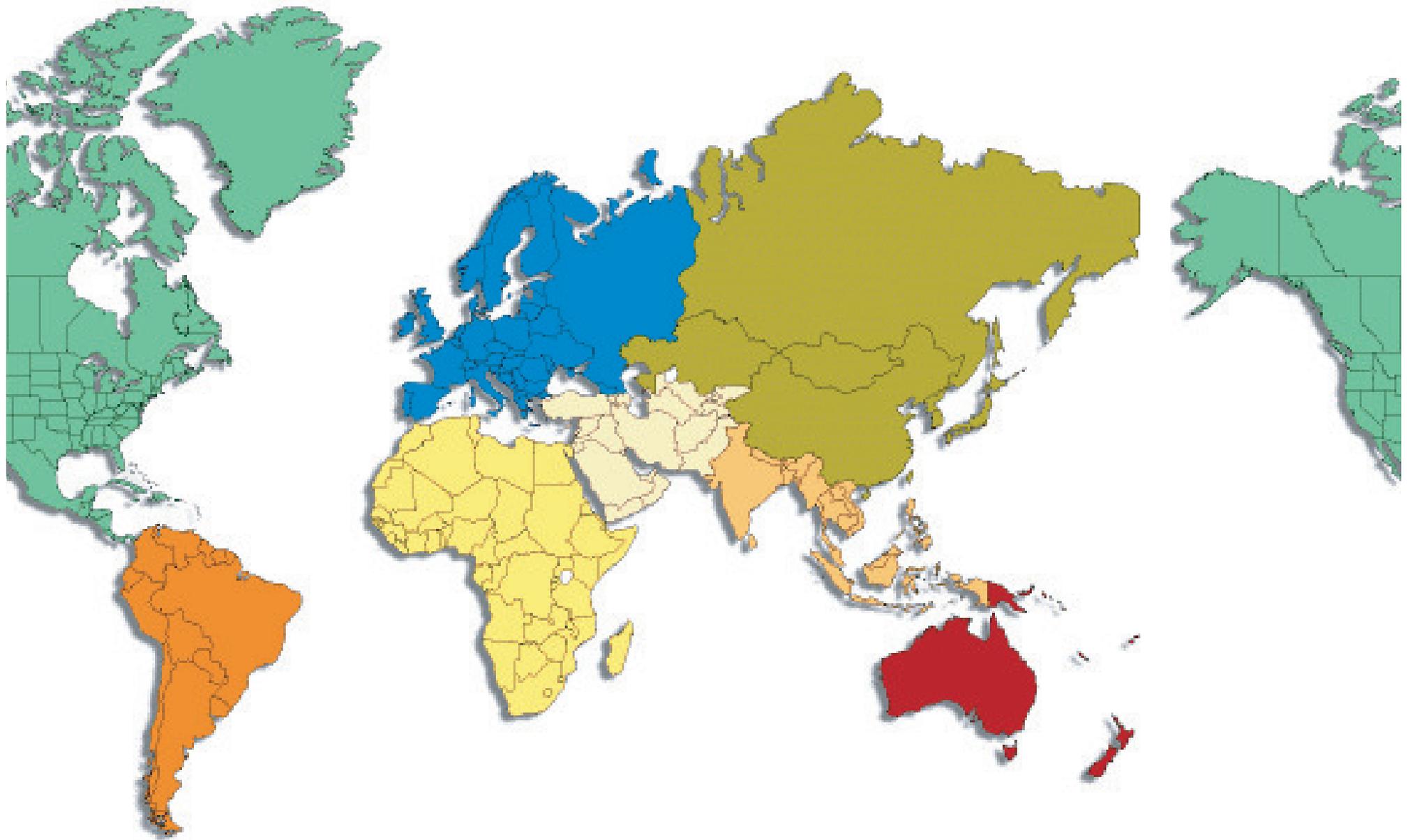
Das große Förderband des Ozeans

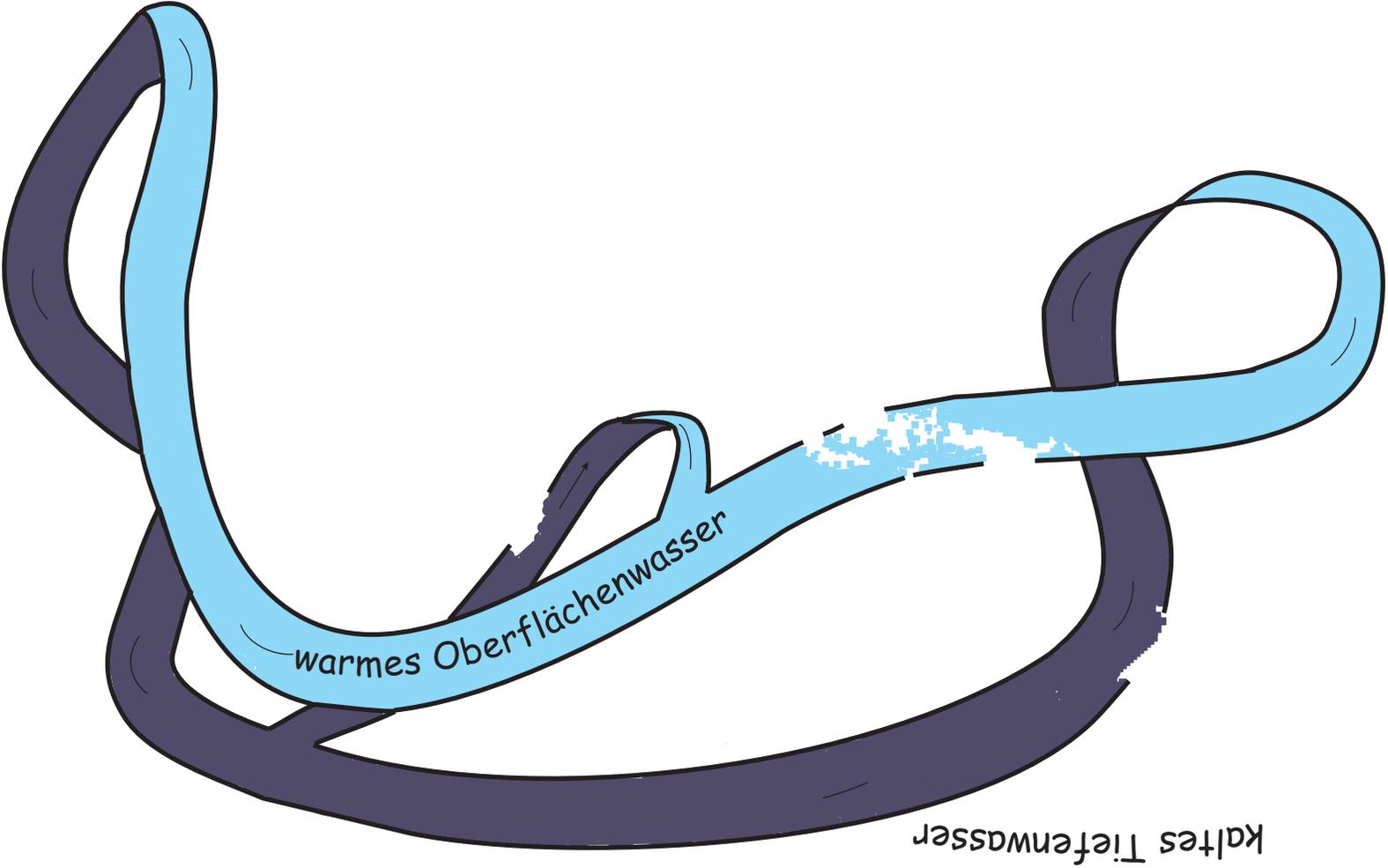
CO₂ ist sehr gut in Wasser löslich und 93% des gesamten CO₂ der Erde sind in den Ozeanen gelöst. Das in der oberen Atmosphäre erzeugte ¹⁴C verbindet sich mit Sauerstoff zu ¹⁴CO₂ und löst sich dann ebenso im Wasser wie ¹²CO₂. Die oberste Wasserschicht weist daher nahezu das gleiche ¹⁴C/¹²C-Verhältnis auf wie auch die Atmosphäre.

Das Wasser der Ozeane ist aber nicht bewegungslos. Es gibt in den Ozeanen riesige Strömungen, die Wasser von der Oberfläche in die Tiefe transportieren und umgekehrt, nur verlaufen diese Strömungen ganz langsam. Es dauert Jahrtausende bis Wasser aus der Tiefsee wieder an die Oberfläche gelangt. Wenn sich Wasser aber schon sehr lange nicht mehr an der Oberfläche befunden hat, wo es mit der Atmosphäre in Kontakt war, nimmt das ¹⁴CO₂ durch radioaktiven Zerfall des ¹⁴C ab. Je nachdem wie lange das Wasser schon nicht mehr an der Oberfläche war, hat es eine entsprechend niedrigere ¹⁴C/¹²C-Verhältnis. So kann man für Wasserproben aus unterschiedlichen Gebieten und Tiefen das Alter des Wassers bestimmen. Wenn man überall weiß, wie alt das Wasser ist, kann man daraus den Verlauf der Strömung bestimmen: dort, wo relativ junges Wasser in großer Tiefe vorkommt, wird das Wasser nach unten befördert und dort, wo altes Wasser an die Oberfläche kommt, nach oben.

Die große Strömung in den Weltmeeren heißt Great Conveyor Belt, auf Deutsch: das große Förderband.

Das große Förderband im Ozean





Wie schnell wirkt das Gift ?

Auch in der Medizin verwendet man die Beschleunigermassenspektrometrie. Sie hat den Vorteil, daß man bereits sehr geringe Mengen von Stoffen nachweisen kann, die ^{14}C oder ein anderes Radioisotop beinhalten.

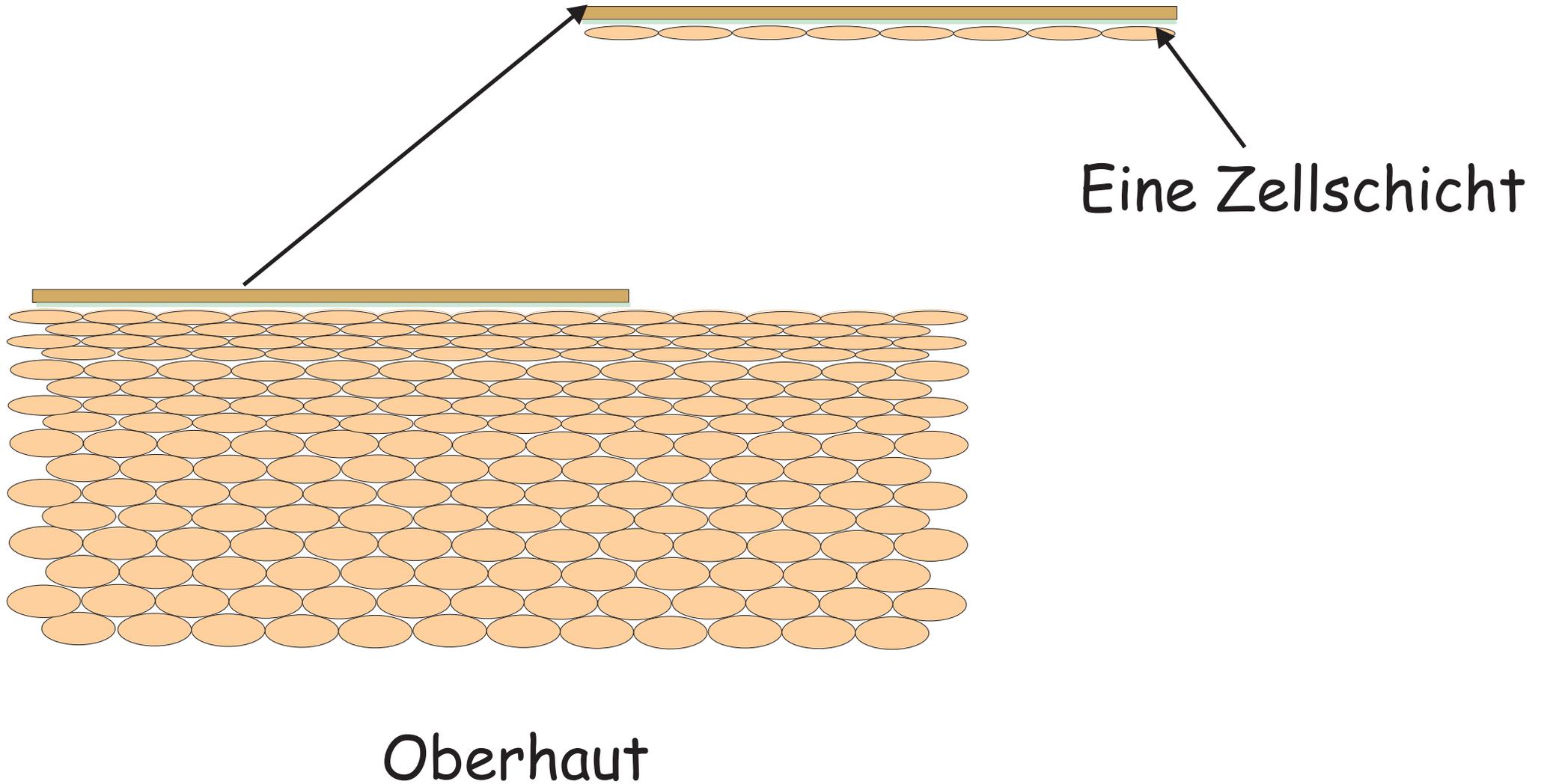
Nitrophenol ist eine Chemikalie, die unter anderem bei der Lederverarbeitung eingesetzt wird. Nitrophenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3$) ist leicht giftig und reizt die Haut und die Schleimhäute. Wenn man wissen will, wie tief diese Chemikalie in die Haut eindringt und wie schnell das geht, so kann man dies mit der Beschleunigermassenspektrometrie tun.

Für die Untersuchung muß man zuerst auf chemischem Weg Nitrophenol herstellen, das in jedem Molekül ein ^{14}C -Atom eingebaut hat. Dann wird zuerst ein wenig von diesem Nitrophenol auf die Haut aufgetragen. Nach einer gewissen Zeit werden dann spezielle Pflaster auf die Haut geklebt und wieder abgezogen. An diesen Pflastern klebt dann jeweils genau eine Zellschicht.

In jeder Zellschicht wird das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis gemessen. Wenn man das für mehrere Dutzend Zellschichten macht, dann erfährt man, wieviel Nitrophenol sich in welcher Tiefe befindet und weiß, wie schnell es in die Haut eindringt.

Mit der Zerfallsmethode könnte man diese Untersuchung nicht machen, da man dafür viel mehr Probenmaterial brauchen würde, als nur eine Zellschicht. Und auch mit chemischen Methoden kann man diese Untersuchung nicht machen, da man so viel Nitrophenol auftragen müßte, daß dies gesundheitsschädlich wäre.

Wie schnell wirkt das Gift?



Curriculum vitae

Name: Thomas STRASSER
Geburtsdatum: 27. Dezember 1973
Geburtsort: Salzburg
Staatsbürgerschaft: Österreich

Bildungsweg:
1980-1984: Volksschule Liefering I
1984-1992: Privatgymnasium der Herz-Jesu-Missionare in Liefering
seit 1992: Studium an der Universität Wien:
A412 Studienzweig Lehramtsstudium Physik und
A299 Lehramtsstudium Philosophie, Pädagogik, Psychologie
seit Okt. 1998: Diplomand am Institut für Isotopenforschung und
Kernphysik bei Univ. Prof. Dr. Walter Kutschera