



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology



DIPLOMARBEIT

AUSWIRKUNGEN VON RADIOPHARMAKA IN DER NUKLEARMEDIZIN AM BEISPIEL VON PET UND SPECT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Im Rahmen des Studiums

E 066 453 Masterstudium Biomedical Engineering

eingereicht von

John BECHARA

Matrikelnummer 08126681

ausgeführt am Institut für Analysis und Scientific Computing

Fakultät für Mathematik und Geoinformation

an der Technischen Universität Wien

Wiedner Hauptstraße 8 – 10, 1040 Wien, Österreich

Betreuung: Rattay, Frank Ao.Univ.Prof.i.R. Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.sc.med. Dr.techn. Dr.rer.nat.

Wien, am 10.03.2022

(Unterschrift des Verfassers)

(Unterschrift des Betreuers)

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	2
DANKSAGUNG	3
FRAGESTELLUNGEN.....	3
ZUSAMMENFASSUNG.....	6
SUMMARY	8
VORWORT	10
1. PET.....	10
2. SPECT	12
KURZZUSAMMENFASSENGE DEFINITIONEN ZUM THEMA PET UND SPECT	19
DIAGNOSE IN DER NUKLEARMEDIZIN MITTELS PET: ^{18}F -FDG IM ÜBERBLICK.....	49
1. HISTORISCHE EINLEITUNG ZU PET UND SPECT	53
2. POSITRON UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLEARMEDIZIN	59
3. STRAHLUNG UND IHRE ANWENDUNG IN DER NUKLEARMEDIZIN	64
3.1 α -STRAHLUNG	69
3.2 β -STRAHLUNG	80
3.3 γ -STRAHLUNG	85
4. RADIOAKTIVITÄT und ZERFALLSGESETZ: IHRE ANWENDUNG IN DER NUKLEARMEDIZIN	86
5. DAS METASTABILE ISOTOP TECHNETIUMATOM $^{99\text{m}}\text{Tc}$ UND SEINE KÜNSTLICHE ERZEUGUNG	96
6. BESCHREIBENDE FUNKTIONALITÄT DER POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAPFIE (PET)	112
7. RADIOPHARMAKA UND LADME.....	142
LITERATUR.....	154
INTERNETZUGANG.....	161
BILDERVERZEICHNIS	166

DANKSAGUNG

Für die Betreuung der vorliegenden Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof.i.R. Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.sc.med. Dr.techn. Dr.rer.nat. Frank Rattay recht herzlichst.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Huber, Institut für Krebsforschung der Medizinische Universität Wien, der mir beim Thema „Toxikologie, Pharmakokinetik und Pharmakodynamik“ beibrachte.

FRAGESTELLUNGEN

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf folgende Fragestellungen, die im historischen Zusammenhang aus physikalisch-chemischer Sicht und medizinischen Perspektiven behandelt werden.

Die erste Frage stellt die *pharmakokinetische Auswirkung* dar:

1. Was macht der Körper mit den Radiopharmaka als Fremdstoffe?

Kurz zusammenfassende Antwort: In der Nuklearmedizin werden im Rahmen der Diagnostik und der Therapie radioaktiv-markierte Substanzen, genannt auch *Radiopharmaka* oder *Tracer*, wie u. a. ^{18}F (in **PET**) und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (in **SPECT**), in einer schwach geringen Dosis – im Grunde genommen in die Vene eines Menschen – verabreicht (intravenöse Injektion). Das Isotop ^{18}F wird in **PET** angewendet und hat eine Halbwertszeit von etwas weniger als 110 Minuten. Während $^{99\text{m}}\text{Tc}$ eine Halbwertszeit von etwas mehr als 6 Stunden hat und in **SPECT** eingesetzt wird. Deshalb hinterlassen sie keine Nebenwirkung: Die Halbwertszeiten sind relativ sehr kurz und die Dosis unschädlich gering. Diese beide Isotope radioaktiv-markierter Substanzen werden aus dem Körper in fünf biochemischen Prozessphasen der Pharmakokinetik ausgeschieden. Diese fünf Phasen werden mit dem englischen Akronym **LADME** dargestellt:

- i. **Liberation** (Befreiung, Entfernung, Entlastung).
- ii. **Absorption** (Aufnahme, Resorption).
- iii. **Distribution** (Verteilung).
- iv. **Metabolism** (Metabolismus, Stoffwechsel).
- v. **Excretion** (Ausscheidung, Absonderung, Ausfluss, Abbau).

Die zweite Frage setzt die *pharmakodynamische Auswirkung* auseinander:

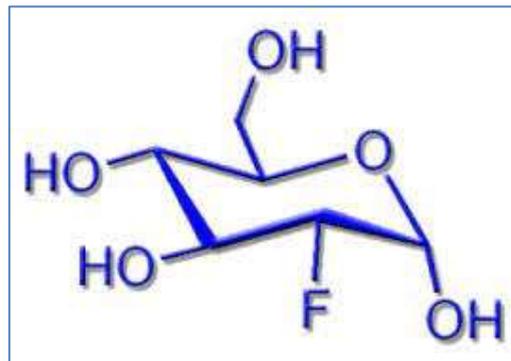
2. Was machen die Radiopharmaka (Fremdstoffe) mit dem Körper?

Kurz zusammenfassende Antwort: Wie es in der ersten oben aufgestellten Frage bereits hingedeutet wurde, werden die radioaktiv-markierte Radiopharmaka ^{18}F (in **PET**) und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (in **SPECT**) für die Diagnostik und die Therapie eingesetzt. Beide Isotope sind Wirkstoffe und haben – wie jedes Arzneimittel – eine Auswirkung auf den organisch-lebenden Körper eines Menschen. Sie haben beide verschiedene und unterschiedliche Dosiswirkprofile sowie biochemisch wechselwirkende Dosiswirkmechanismen mit den menschlichen Organen, Zellen und Molekülen (Nieren, Lungen, Darm, Magen, Leber, Herz, Blutzellen, Hormonen usw.). Die Pharmakodynamik – im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit – beschreibt also die biochemischen Auswirkungen auf den menschlich lebenden Körper im Rahmen ihres Einsetzens bei der Diagnostik und der Therapie und werden in dieser Untersuchung eingehend auseinandergesetzt.

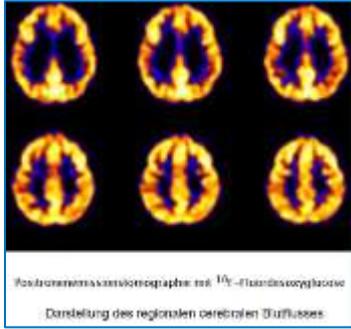
Ebenfalls werden folgende Fragestellungen in der vorliegenden Arbeit zusätzlich diskutiert:

3. Welche physikalischen Eigenschaften machen das Radiopharmakon ^{18}F besonders **PET** tauglich?

Kurz zusammenfassende Antwort: Bei der Diagnostik und der Therapie wird eine Strahlenexposition (effektive Dosis) – wegen der Radioaktivität von ^{18}F in **PET** – von etwa 0,018421 mSv/MBq geschätzt und hinterlässt deshalb keine gesundheitlichen Schäden auf den untersuchten Menschen. Auch die winzig gering verabreichte Injektionsdosis des Radionuklids ^{18}F wird mit der chemischen Substanz **2-Fluor-2-desoxy-D-glucose** (siehe



3D-chemische Struktur Darstellung oben – genannt auch *Fluordesoxyglucose*, geschrieben auch mit der Abkürzung **FDG**) markiert und kann in den menschlich lebenden Zellen und Geweben des menschlichen Körpers leicht aufgenommen und verarbeitet. Der Vorteil der *Fluordesoxyglucose* ist, dass sie genau zum bei der Diagnostik oder der Therapie untersuchend gezielten Gewebe tomografisch aufgezeichnet wird. Deshalb wird das markierte Radiopharmakon ^{18}F -**FDG**



geschrieben. Das aktive Gewebe ist damit sichtbar (siehe Bild links)¹. Man kann **PET** mit **CT** kombinieren (**PET/CT**). In der ersten oben aufgestellten Frage wurde die Halbwertszeit des radioaktiven Isotops ^{18}F auf etwas weniger als 110 Minuten hingewiesen. Das beeinträchtigt nicht den menschlich lebenden Körper und verursacht keine gesunden Schäden.

4. Welche physikalischen Eigenschaften machen das Radiopharmakon $^{99\text{m}}\text{Tc}$ besonders **SPECT** tauglich?

Kurz zusammenfassende Antwort: Wie bei **PET** kann man auch bei **SPECT** mit der **CT** kombinieren. **SPECT** macht den Stoffwechsel in verschiedenen Organen sichtbar und ist u. a. für die Durchblutung des Herzmuskels oder für Hirnanfälle dementsprechend sehr gut tauglich. Auch die Strahlenexposition (effektive Dosis) bei der Diagnostik und der Therapie liegt bei etwa 0,005698 mSv/MBq. Also keine gesundheitlichen Gefahren. Die Halbwertszeit des radionuklids $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist etwa 6,01 Stunden. Es gibt verschiedene $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -markierte Substanzen, wie u. a. das $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -markierte myocardaffine Isonitrit, das bei der Diagnostik verwendet, um eine genaue Information über die Funktion und die Durchblutung des Herzmuskels zu erlangen. Für jede Diagnostik eines Körperorgans gibt es charakteristisch eigene $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -markierte Substanzen.

Es werden verschiedene und unterschiedliche physikalisch-chemische Methoden und Reaktionen benutzt, um die Radiopharmaka ^{18}F und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ herzustellen. Diese Radionuklide zeigen hervorragende Anwendungen bei der Diagnostik und der Therapie, um die verschiedenen Tumore im menschlich lebenden Körper zu behandeln.

Die oben dargestellten Fragestellungen sowie ihre kurz zusammenfassenden Antworten werden mit historisch-wissenschaftlichen, physikalischen, chemischen und medizinischen Referenzen in der vorliegenden Arbeit eingehend untermauert und ausführlich auseinandergesetzt.

¹ Bildquelle:

<http://www.e-learning.chemie.fu-berlin.de/bioanorganik/fluor/molekuele/fluorodeoxyglucose/index.html> (01.03.2022).

ZUSAMMENFASSUNG

1. Eine **Positronenemissionstomografie (PET)** ist eine diagnostisch bildgebende Methode, mit der man erkennen, feststellen und darstellen kann, wie Energiestoffwechsel und biochemische Stoffwechselfvorgänge in Körpergeweben und -organen ablaufen. Dementsprechend ist **PET** eine morphologische und biochemische Bildgebung. **PET** ist eine physikalisch nuklearmedizinische Analyse, die im Scan (bildgebende Untersuchungsmethode) ein Körperorgan dreidimensional (3-D-Bildaufnahme) darstellt, und beruht auf Anwendung von Radionuklide oder radioaktiv markierter Substanzen (genannt in Englisch *Tracer* – auf Deutsch übersetzt *Spur* – also ein *Radiopharmakon*). In diesem Zusammenhang wird ein biochemisches Molekül verwendet, ein Radiopharmakon, das mit dem radioaktiv chemischen isotonen Element Fluor-18 (^{18}F) markiert wird: Fluorodesoxyglukose (FDG). Das heißt ^{18}F -FDG (in **PET**).

Die Anwendung von **PET** wird also in der Medizin eingesetzt, um u. a. Krebs im lebenden Körper nachweisbar zu suchen (z. B. Lungenkrebs, Brustkrebs, Gehirnkrebs, Magenkrebs, Darmkrebs usw). Mittels **PET** wird auch die Ausbreitung vom Krebs im Körper festgestellt (oder in welchem Stadium die Metastase steht).

Wenn man den Begriff *Tomografie* in **Positronenemissionstomografie (PET)** etymologisch näher betrachtet, stellt man fest, die Herkunft des Wortes wird von dem Altgriechischen $\tau\omicron\mu\eta$ (sprich: *tomé*) und $\gamma\rho\acute{\alpha}\phi\epsilon\iota\nu$ (sprich: *grafein*) abgeleitet. $\tau\omicron\mu\eta$ bedeutet *Schnitt* und $\gamma\rho\acute{\alpha}\phi\epsilon\iota\nu$ *schreiben*. Zusammengefasst: **PET** erzeugt ein dreidimensional bildgebendes Verfahren (*Schnittbilder* von einem bestimmten untersuchten Körperorgan).

Der Begriff *Positronenemission* ist in der Physik eindeutig klar: Es handelt sich um *Emission von Positronen*. Das Positron ist das Antiteilchen (Antimaterie) des Elektrons, deshalb kommt der Begriff aus **positiver** Ladung und **Elektron** her, da es die gleiche Masse, das gleiche magnetische Moment, die gleiche Ruheenergie, den gleichen Spin (und noch anderen physikalischen Eigenschaften) wie das Elektron nachweist. Allerdings mit **positiv** elektrischer Ladung im Unterschied vom **Elektron** (negativ elektrische Ladung).

2. Eine **Einzelfotonenemissionscomputertomografie**, Abkürzung **SPECT** (aus dem Englischen: **S**ingle **P**hoton **E**mission **C**omputed **T**omography) ist, wie bei **PET**, eine nuklearmedizinische Tomografiebildgebungstechnik, die informelle 3-D-Bildaufnahme bei der Diagnostik liefert. **SPECT** ist somit ein tomografisch bildgebendes Verfahren in der nuklearmedizinischen Diagnostik und ergibt genaue 3-D-Darstellung von Schilddrüsenbildung, Knochenszintigrafie, Infektionsbildung (Leukozytenbildung), Tumorbildung, funktionelle Herz- oder Gehirnbildung usw.

Physikalisch betrachtet, ist die Comptonstreuung von γ -Strahlung in der **SPECT**-angewandten Radioisotope der dominierende Wechselwirkungsprozess in Geweben. Wie bei **PET** verwendet man auch bei **SPECT** einen radioaktiven *Tracer* (Radiopharmakon) und Detektion von γ -Strahlungen, durchgeführt unter Verwendung einer γ -Kamera. Allerdings ist es anders wie bei **PET**, wobei (in **PET**) der *Tracer* Positronen emittiert, die sich auf Elektronen stoßen und sich gegenseitig vernichten, wobei zwei Photonen (γ -Strahlungen) mit einem Winkel von (approximativ knapp) 180° in entgegengesetzte Richtungen entstehen: Bei **SPECT** emittiert der verwendete *Tracer* (Radiopharmakon) γ -Strahlung, die mit Detektoren direkt gemessen wird. Das Radiopharmakon ^{99m}Tc eignet sich bei **SPECT** sehr gut und kommt deshalb häufig zum Einsatz. Das radioisotope eingesetzte ^{99m}Tc -markierte Radiopharmakon wird nach intravenöser Applikation injiziert, wie u. a. ^{99m}Tc -Tetrofosmin und -Sestamibi für funktionelle Bildgebung des Herzens, oder ^{99m}Tc -Exametazim für funktionelle Bildgebung des Gehirns. Im Vergleich: Anwendung von der radioaktiven markierten Substanz ^{18}F -FDG als *Tracer* (Radiopharmakon) in **PET**.

Diese häufigste radioisotope eingesetzte ^{99m}Tc - und ^{18}F -markierte Radiopharmaka² und ihr Einsatz in der nuklearmedizinischen Diagnose mittels **SPECT** beziehungsweise **PET** werden in der vorliegenden Abhandlung physikalisch-medizinisch eingehend dargestellt. Es handelt sich um *pharmakokinetische* und *pharmakodynamische Auswirkungen* dieser Radiopharmaka im menschlichen Körper.

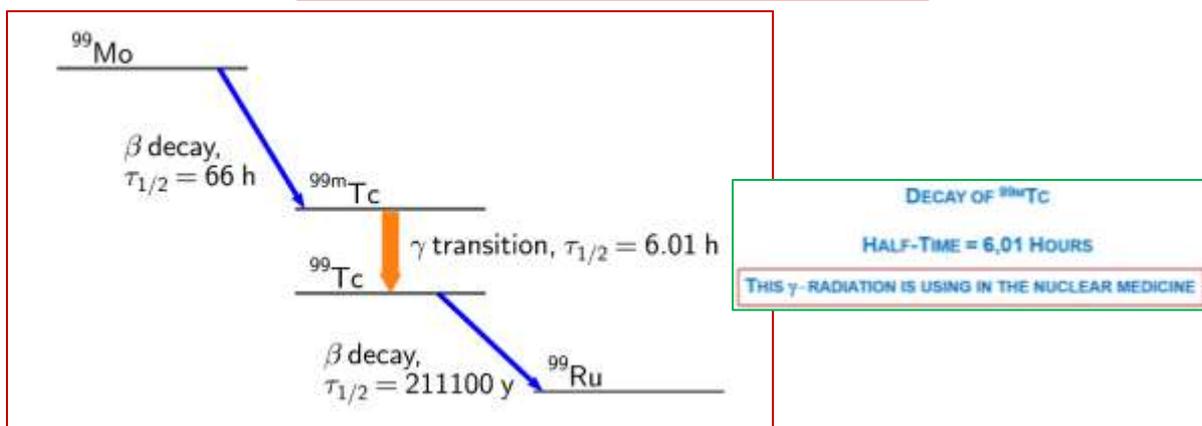
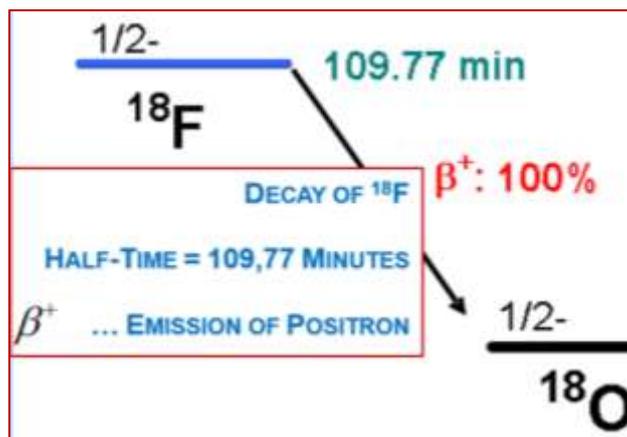
² *Pharmakon* (Altgriechisch φάρμακον) bedeutet nicht nur *Arzneimittel*, sondern auch *Droge* und *Giftstoff*.

SUMMARY

1. **Positron Emission Tomography (PET)** is a diagnostic imaging method that can be used to identify, determine and display how energy metabolism and biochemical metabolic processes take place in body tissues and organs. Accordingly, **PET** is a morphological and biochemical imaging. **PET** is thus a physical nuclear medicine analysis that shows a body organ in three dimensions in a scan (imaging examination method) and is based on the use of radionuclides or radioactively labeled substances (called *tracers*). In this context, a biochemical molecule is used, a radiopharmaceutical that is labeled with the isotope, the radioactive chemical element fluorine-18 (^{18}F): fluorodeoxyglucose (^{18}F -FDG). The application of **PET** is therefore used in medicine, among other things. To search for cancer in the living body (e.g., lung cancer, breast cancer, brain cancer, stomach cancer, colon cancer, etc.). **PET** is also used to determine the spread of the cancer in the body (or at what stage the metastasis is). If we take a closer look at the term tomography in positron emission tomography (**PET**) etymologically, we find that the origin of the word is derived from the ancient Greek τομή (pronounced: *tomé*) and γράφειν (pronounced: *grafein*). τομή means *to cut* and γράφειν *to write*. In summary: **PET** generates a three-dimensional (3-D-) imaging process (sectional images of a certain examined body organ). Regarding the term *positron emission*, it is clearly taken from the *Physics of Particles and Nuclei*, which will be discussed in detail under the next headings. The positron is the antiparticle (antimatter) of the electron, which is why the term comes from **positive** charge and **electron** because it reveals the same mass, the same magnetic moment, the same rest energy, the same spin (and other physical properties) as the electron. However, with a positive electrical charge in contrast to the electron (negative electrical charge).
2. **Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)** is, like **PET**, a nuclear medicine tomography imaging technique that provides informal 3-D-image acquisition for diagnosis. **SPECT** is thus a tomographic imaging method in nuclear medicine diagnostics and produces precise 3-D-representations of thyroid imaging, bone scintigraphy, infection imaging (leukocyte imaging), tumor imaging, functional heart or brain imaging. From a physical point of view, the

Compton scattering of γ -radiation in the **SPECT**-applied radioisotopes is the dominant interaction process in tissue. As with **PET**, radioactive tracers (radiopharmaceuticals) and detection of γ -radiations, carried out using a γ -camera, are also used for **SPECT**. However, it is different to **PET**. Where in **PET** the tracer emits positrons, which are annihilated with electrons, whereby two photons (γ -rays) arise in opposite directions with an angle of almost 180° . With **SPECT**, the tracer (radiopharmaceutical) used emits γ -radiation, which is measured directly with detectors. The radiopharmaceutical ^{99m}Tc is very suitable for **SPECT** and is therefore often used. The radioisotopic ^{99m}Tc -labeled radiopharmaceutical used is injected after intravenous application, for instance, mainly ^{99m}Tc -tetrofosmin and -sestamibi for functional imaging of the heart, or ^{99m}Tc -Exametazim for functional imaging of the brain.

These ^{99m}Tc - and ^{18}F -labeled radiopharmaceuticals, which are most frequently used radioisotopes, and their use in nuclear medicine diagnosis by means of **SPECT** and **PET** (respectively) are presented in detail in this thesis from physical and medical perspectives. It is a matter of the pharmacokinetic and pharmacodynamic effects of these radiopharmaceuticals in the human body.



VORWORT

„Röntgenstrahlung macht einen Blick in den inneren Körper möglich. Heute stellt die *funktionelle Bildgebung* unsere inneren Organe in hochauflösenden Bildern dar. In der Nuklearmedizin gehören sowohl **SPECT** als auch **PET** dazu“³.

„Die wichtigsten Radionuklide der nuklearmedizinischen Diagnostik sind heute das γ -strahlende Isomer ^{99m}Tc und der Positronenstrahler ^{18}F “ (Krieger 2017,11)⁴.

Diese zwei radioisotope eingesetzte ^{99m}Tc - und ^{18}F -markierte Radiopharmaka (auch *Tracer* genannt) und ihr Einsatz in der nuklearmedizinischen Diagnose, sowie ihre *pharmakokinetische* und *pharmakodynamische Auswirkungen* werden in der vorliegenden Arbeit detailliert erörtert.

1. PET

Die Positronenemissionstomografie (**PET**) ist eine Bildgebungstechnik, bei der radioaktive Substanzen zur Visualisierung und Messung von Stoffwechselprozessen im Körper verwendet werden (Abb. 1)⁵.

PET wird hauptsächlich im Bereich der medizinischen Bildgebung zum Nachweis oder zur Messung von Änderungen physiologischer Aktivitäten wie Stoffwechsel, Blutfluss, regionaler chemischer Zusammensetzung und Absorption verwendet und daher auch als funktionelle Bildgebungstechnik bezeichnet.

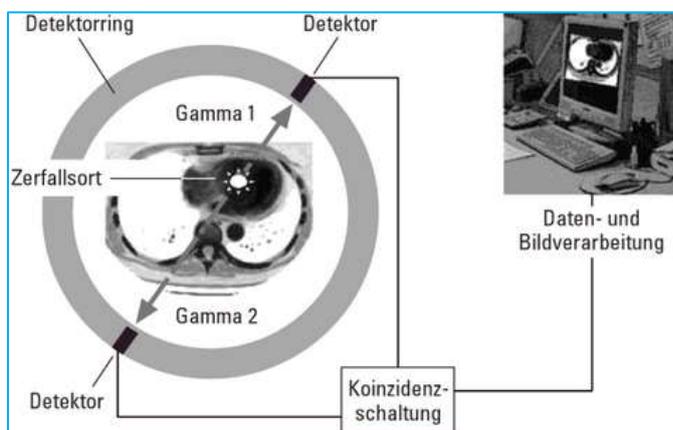


Abb. 1: SEHR VEREINFACHTE SCHEMATISCHE AUFBAUWEISE EINES PET-SCANNERS (DETEKTORRING)

Da diese **PET**-Technik radioaktive Materialien (*Tracer* genannt) für die Bildgebung verwendet, wird sie im Allgemeinen in den Bereich der Nuklearmedizin eingeteilt. Der *Tracer* (häufig eingesetztes ^{18}F -markiertes Radiopharmakon)⁶ wird in den Körper intervenös injiziert, der in den interessierenden Geweben eingeschlossen wird.

³ Beckert, Kerstin: *PET und SPECT. Diagnose in der Nuklearmedizin*. Textquelle online verfügbar unter: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/radiopharmaka/pet-und-spect/> (Zugang am 12.02.2021).

⁴ Krieger, Hanno: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. Berlin und Heidelberg: Springer 2017.

⁵ Bildquelle: Bender et al. 2004, 123.

⁶ Genauer: ^{18}F -FDG.

Der instabile Kern des Radioliganden emittiert Positronen, die sich mit benachbarten Elektronen stoßen, um zwei γ -Strahlungen in entgegengesetzter Richtung bei (annähernd) 180° zueinander zu erzeugen (Abb. 1)⁷. Beide γ -Strahlungen werden vom Detektorring erfasst, der sich im donutförmigen Körper des Scanners befindet. Die Energie und der Ort dieser γ -Strahlung werden aufgezeichnet und von einem Computerprogramm verwendet, um dreidimensionale (3-D-) Bilder der Tracerkonzentration im Körper zu rekonstruieren (Abb. 1)⁸.

Es werden drei Definitionen zum Thema zitiert:

- „Die Positronenemissionstomografie (**PET**) ist eines der wichtigsten Bildgebungsverfahren in der Nuklearmedizin und wird seit Anfang des Jahrtausends ausschließlich als Kombinationsverfahren mit der Computertomografie (**PET/CT**) und neuerdings auch mit der Magnetresonanztomografie (**PET/MRT**) weiterentwickelt. Für die **PET**-Bildgebung wird die beim Positronenzerfall entstehende sekundäre Strahlung genutzt. Man bildet also im Gegensatz zur Szintigrafie oder **SPECT** nicht direkt den Zerfallsort des eingesetzten radioaktiven Isotopen ab, sondern den Ort, an dem sich das emittierte Positron mit einem Elektron aus der Umgebung in Vernichtungsstrahlung umwandelt. Diese Besonderheit prägt die Bildgebungseigenschaften der **PET**, da sie einerseits messtechnische Vorteile mit sich bringt, andererseits aber auch eine grundsätzliche physikalische Grenze in der möglichen Ortsauflösung des Verfahrens darstellt“ (Mix 2018, 350).
- „Die Positronenemissionstomografie (**PET**) hat sich von einem reinen Forschungsinstrument zu einem diagnostischen Verfahren in der Klinik entwickelt. Sie ist ein nuklearmedizinisches, toposfunktionelles Schnittbildverfahren, für das kurzlebige Radionuklide verwendet werden, um so nichtinvasiv metabolische Prozesse und deren Veränderungen bei pathologischen Zuständen im lebenden Organismus bildlich darzustellen ... **PET** stellt biochemische und physiologische Funktionen bildlich und quantitativ dar“ (Bender et al. 2004, 123).
- „Die Positronenemissionstomografie (**PET**) ist eine nuklearmedizinische Technologie, im Rahmen derer dem Blutstrom der Testperson durch Injektion

⁷ Bildquelle: Bender et al. 2004, 123.

⁸ Ebd.

oder Inhalation ein schwach-radioaktiv markierter Stoff (so genannte *Radionuklide*) in Verbindung mit einer am Stoffwechsel beteiligten Substanz dem Blutkreislauf zugeführt wird. Da diese Radionuklide dieselben Eigenschaften haben wie ihre nicht radioaktiven Isotope, können die Radionuklide diese in den biologisch relevanten Molekülen ersetzen. Beim Zerfall der Radionuklide werden dann Positronen freigesetzt. Es lassen sich verschiedene radioaktiv markierte Substanzen (*Tracer*) herstellen, mit denen der Blutfluss (z. B. markiertes Wasser), Glucoseverbrauch (Fluordesoxyglucose), Zellstoffwechsel (z. B. Methionin) sowie die Funktion von Nervenzellrezeptoren (verschiedene Rezeptorliganden) und andere Funktionen gemessen werden können. Mithilfe entsprechender Detektoren (**PET-Scanner**), die ringförmig um den Kopf der Versuchsperson angelegt werden, wird die räumliche Verteilung der Positronen bzw. die γ -Strahlung, die sich beim Zerfall der Radionuklide ergibt, gemessen. Mithilfe eines Computers lassen sich Zerfallsort und Zerfallsmenge genau berechnen und in ein dreidimensionales Aktivitätsbild umsetzen. Das örtliche Auflösungsvermögen dieser Methode ist ziemlich hoch; sie beträgt ca. 3 – 8 mm. Zur zeitlichen Auflösung finden sich in der Literatur unterschiedliche Zahlen. Schnellere neuronale bzw. kognitive Prozesse lassen sich daher mit der **PET** nicht erfassen. Auch gibt sie keine Darstellung der Anatomie des untersuchten Gehirns wieder. Daneben erfordert die kurze Halbwertszeit von Positronenstrahlen eine Produktion der meisten Radionuklide vor Ort mit einem Zyklotron (Teilchenbeschleuniger). Dadurch wird **PET** zur teuersten neurowissenschaftlichen Forschungsmethodik. Zudem ist sie umstritten, da einer (gesunden) Versuchsperson ein radioaktives Kontrastmittel verabreicht wird. Weiterhin limitiert die Strahlungsdosis die Anzahl der möglichen Versuchsdurchgänge und somit die Komplexität des Versuchsdesigns“ (Raab et al. 2009, 184 f.).

2. SPECT

„Röntgenbilder zeigen nur die Bauweise der inneren Organe, nicht aber ihre Funktion, zum Beispiel den Stoffwechsel. Hierzu sind modernere Verfahren nötig – wie die γ -Kameras (Abb. 2)⁹ (Abb. 3)¹⁰. Sie kommt vor allem in der diagnostischen

⁹ Bildquelle: Peter 2018, 341.

¹⁰ Bildquelle online verfügbar unter: <https://theconversation.com/the-science-of-medical-imaging-spect-and-pet-14086> (Zugang am 12.02.2021).

Nuklearmedizin zum Einsatz. Dazu wird dem Patienten eine radioaktiv markierte Substanz verabreicht, das Radiopharmakon. Diese Substanz reichert sich in dem zu untersuchenden Organ an und sendet dabei γ -Strahlung aus, die in Form von elektromagnetischen Wellen abgestrahlt wird“. „Strahlungsexposition bei der **PET** beträgt in diesem Fall rund fünf *Millisievert*, bei der **SPECT** fallen rund zwei *Millisievert* an“¹¹.

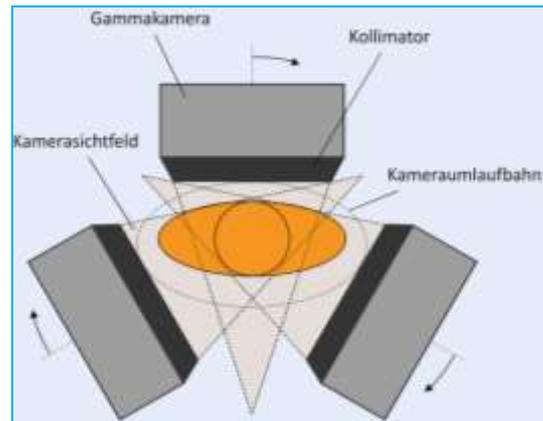


Abb. 2: SEHR VEREINFACHTE SCHEMATISCHE AUFBAUWEISE EINER SPECT

Ein *Millisievert* = 10^{-3} Sievert oder [Sv].

Zwei Definitionen zur physikalischen Einheit Sievert [Sv]:

- „Die **Äquivalentdosis D_q** ist im Strahlenschutz ein Maß für die Strahlenbelastung, die durch ionisierende Strahlen hervorgeht“¹²:

$$D_q = q \cdot D \text{ [Sv]}$$

Wobei **q** der so genannte *Bewertungsfaktor* ist, und **D** die in der physikalischen Einheit [J/kg] oder [Gy] angegebene *Energiedosis*. Der *Bewertungsfaktor q* ist eine dimensionslose Größe.

$$D = \frac{E}{m} \text{ [J/kg]}$$

E ist die mittlere Energie [J], die von einer bestimmten ionisierenden Strahlungsquelle an eine bestimmte Materie abgibt, zum Beispiel an einen menschlichen Körper oder an ein bestimmtes Körperorgan der Masse **m** [kg].

- „Die Äquivalentdosis ist die Messgröße für die relative biologische Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen. Ihre Einheit ist [J/kg] mit dem

¹¹ Beckert, Kerstin: *PET und SPECT. Diagnose in der Nuklearmedizin*. Textquelle online verfügbar unter: [s://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/radiopharmaka/pet-und-spect/](https://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/radiopharmaka/pet-und-spect/) (Zugang am 12.02.2021).

¹² Textquelle online verfügbar unter:

<https://www.bfs.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/M/millisievert.html> (Zugang am 12.02.2021).

speziellen Namen Sievert [Sv]. Das Sievert [Sv] ist die Einheit der Äquivalentdosis und der effektiven Dosis“¹³.

Das Radiopharmakon ^{99m}Tc eignet sich bei **SPECT** sehr gut und kommt deshalb häufig zum Einsatz. Das wird in der vorliegenden Abhandlung eingehend erörtert.

Es wird kurz die „wesentliche Funktionsweise konventioneller **SPECT**-Systeme eingeführt (Abb. 2)¹⁴ (Abb. 3)¹⁵, wie sie in der standardmäßigen nuklearmedizinischen Diagnostik Anwendung finden“ (Peter 2018, 341 f.)¹⁶.

„Den zentralen Bestandteil eines konventionellen **SPECT**-Systems bilden im Allgemeinen mehrere γ -Kameras, welche an einer rotierenden Aufnahmeeinheit befestigt sind (Abb. 2)¹⁷ (Abb. 3)¹⁸, um radioaktive Quellverteilungen in vivo aus unterschiedlichen Aufnahmewinkeln zu detektieren. Aus den akquirierten Projektionsbildern werden mittels mathematischer Rekonstruktion transversale Bilder berechnet, welche zur Diagnostik herangezogen werden“ (Peter 2018, 341 f.)¹⁹.



Abb. 3: PATIENT ZWISCHEN ZWEI ROTIERENDEN SPECT- γ -KAMERAS

¹³ Ebd.

¹⁴ Bildquelle: Peter 2018, 341.

¹⁵ Bildquelle online verfügbar unter: <https://theconversation.com/the-science-of-medical-imaging-spect-and-pet-14086> (Zugang am 12.02.2021).

¹⁶ Peter, Jörg: *Single Photon Emission Computer Tomography*. In: Schlegel, Wolfgang; Karger, Christian und Jäkel, Oliver (Herausgeber): *Medizinische Physik. Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik*. Heidelberg: Springer 2018.

¹⁷ Bildquelle: Peter 2018, 341.

¹⁸ Bildquelle online verfügbar unter: <https://theconversation.com/the-science-of-medical-imaging-spect-and-pet-14086> (Zugang am 12.02.2021).

¹⁹ Peter, Jörg: *Single Photon Emission Computer Tomography*. In: Schlegel, Wolfgang; Karger, Christian und Jäkel, Oliver (Herausgeber): *Medizinische Physik. Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik*. Heidelberg: Springer 2018.

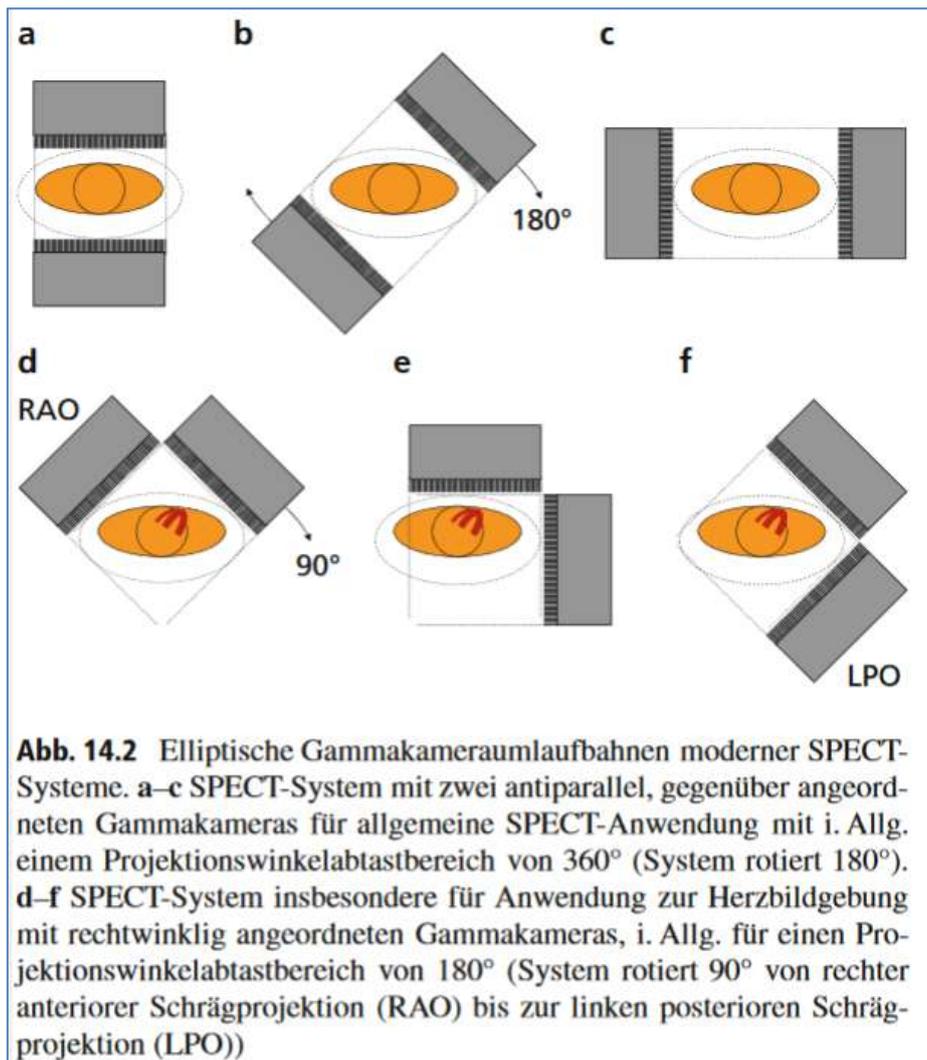


Abb. 4: PATIENT UND ROTIERENDE SPECT- γ -KAMERAS

Radiopharmakon	Anwendungsbereich
$^{99m}\text{TcO}_4^-$	Hirn, Blutvolumen, Schilddrüse
^{99m}Tc -Humanserumalbumin	Blutvolumen
^{99m}Tc -Humanserumalbumin- Makroaggregate	Lunge
^{99m}Tc -Humanserumalbumin- Mikrosphären	Lunge, Milz, Leber, Herz
^{99m}Tc -Schwefelkolloid	Leber, Milz
^{99m}Tc -Phytat	Leber, Milz
^{99m}Tc -Methan-1,1-diphosphonat	Skelett
^{99m}Tc -1-Hydroxyethan-1,1-diphosphonat	Skelett
^{99m}Tc -Phosphat	Skelett, Herz, Gelenk
^{99m}Tc -Erythrozyten	Kreislauf, Blutvolumen
^{99m}Tc -Dimercaptosuccinat	Niere
^{99m}Tc -Gluconat	Niere
^{99m}Tc -Diethylentriaminpentaacetat	Niere, Hirn
^{99m}Tc -N(2,6-Diethylphenylcarbamoyl)- iminodiacetat	Leber, Galle

Abb. 5: ANWENDUNGSBEREICH DER ^{99m}Tc -MARKIERTEN RADIOPHARMAKA

„In der **SPECT** (wie in der Szintigrafie) werden γ -strahlungsemitterende Radioisotope eingesetzt“ (Peter 2018, 342)²⁰. Das radioisotope eingesetzte ^{99m}Tc -markierte Radiopharmakon wird häufig angewendet (Abb. 5)²¹.

„Die Verteilung von radioaktiv markierten Substanzen (Radiopharmaka) in vivo wird mittels mindestens eines – in klinischen **SPECT**-Systemen im Allgemeinen zwei bis vier – extern positionierten, in zwei Ortsrichtungenauflösenden Strahlungendetektors (Abb. 2)²² (Abb. 3)²³ aufgezeichnet“ (Peter 2018, 342)²⁴.

„Im Unterschied zur Szintigrafie sind die γ -Kameras auf einer im Allgemeinen rotierenden Aufnahmeeinheit. Bildgebung mittels **SPECT**, beispielhaft in der

²⁰ Ebd.

²¹ Ebd.

²² Bildquelle: Peter 2018, 341.

²³ Bildquelle online verfügbar unter: <https://theconversation.com/the-science-of-medical-imaging-spect-and-pet-14086> (Zugang am 12.02.2021).

²⁴ Peter, Jörg: *Single Photon Emission Computer Tomography*. In: Schlegel, Wolfgang; Karger, Christian und Jäkel, Oliver (Herausgeber): *Medizinische Physik. Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik*. Heidelberg: Springer 2018.

Herzdiagnostik zur Gewinnung funktioneller Informationen über die Durchblutung des Herzmuskels nach intravenöser Applikation von ^{99m}Tc -markierten myocardaffinen Isonitrit. Im **SPECT**-System stehen angeordneten γ -Kameras mit zwei in 90-Grad-Position zueinander. Im Anschluss an die Datenaufnahme wird aus den Projektionsdaten mittels eines mathematischen Verfahrens, der sogenannten Bildrekonstruktion (Image Reconstruction), die projektionsdatenerzeugende dreidimensionale (3-D) Aktivitätsverteilung berechnet. Während mittels Szintigrafie 2-D-Abbildungen einer 3-D-Radiopharmakaverteilung mit nur begrenzter Tiefeninformation erstellt werden, so liefert die **SPECT** eine vollständig dreidimensionale Darstellung (3-D-Datenvolumen) der radioaktiven Quellverteilung in vivo mit gegenüber der Szintigrafie deutlich verbessertem Organ/Tumor/Läsion-zu-Hintergrundkontrast sowie verbesserter Quantifizierbarkeit der Aktivitätsverteilung“ (Peter 2018, 342)²⁵.

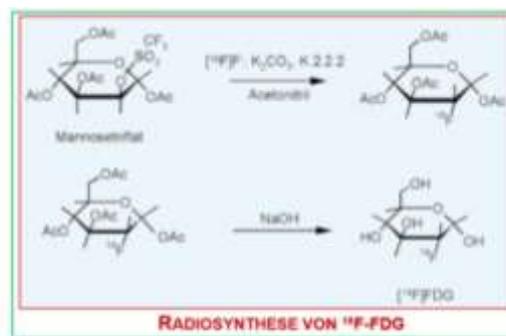
„Um tomografische Bilddaten zu generieren, werden im Allgemeinen mehrere γ -Kameras an einer rotierbaren Aufnahmeeinheit befestigt (Abb. 2)²⁶ (Abb. 3)²⁷. Durch Rotation der γ -Kameras um das bildgebende Objekt herum wird die Radioaktivitätsverteilung sequenziell unter einer Vielzahl von Projektionswinkeln aufgenommen und die Projektionsbilder (Szintigramme) einzeln gespeichert. Die Projektionen werden im Allgemeinen über einen Winkelbereich von 180° (allgemeine Anwendung; insbesondere Herzbildgebung) oder 360° (Schwächungskorrektur; verbesserte Bildqualität) mit einem Winkelversatz von ca. $3^\circ - 9^\circ$ gleichmäßig verteilt. Hierbei kann im Allgemeinen die Datenakquisition entweder schrittweise (Step-and-Shoot, d. h., die Datenaufnahme erfolgt an festen Projektionswinkeln) oder aber kontinuierlich erfolgen. Aus den gespeicherten Projektionsbildern wird die zugrunde liegende radioaktive Verteilung in vivo mittels eines mathematischen Bildrekonstruktionsverfahrens geschätzt. Da **SPECT**-Messungen aufgrund der Vielzahl der notwendigen Projektionsaufnahmen recht lange dauern können – eine einzelne Projektionsaufnahme kann beispielsweise 30 Sekunden dauern, wodurch eine Gesamtaufnahmezeit bei 90 Projektionen von 45 Minuten resultiert, bestehen **SPECT**-Systeme im Allgemeinen aus mehreren, oft zwei oder drei γ -Kameras. Mittels multipler γ -Kameras können mehrere Szintigramme aus unterschiedlichen

²⁵ Ebd.

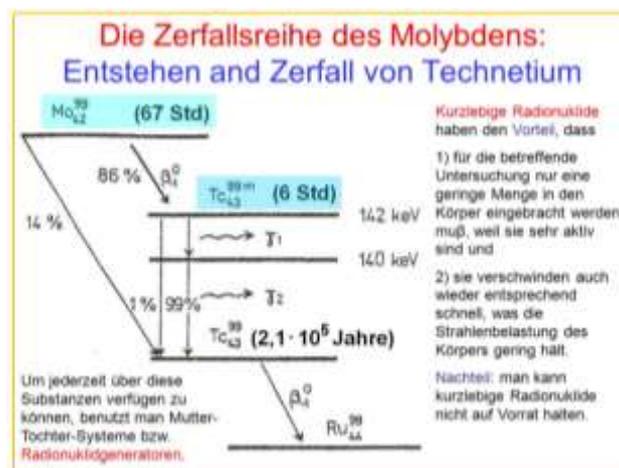
²⁶ Bildquelle: Peter 2018, 341.

²⁷ Bildquelle online verfügbar unter: <https://theconversation.com/the-science-of-medical-imaging-spect-and-pet-14086> (Zugang am 12.02.2021).

Projektionswinkeln simultan aufgenommen werden, wodurch die Gesamtaufnahmezeit entsprechend der Anzahl vorhandener γ -Kameras verringert oder aber die relative Nachweisempfindlichkeit bei unveränderter Gesamtaufnahmezeit entsprechend erhöht werden kann. Die gewählte Aufnahmezeit ist ein Kompromiss zwischen guter Zählratenstatistik und folglich hoher Bildqualität (lange Aufnahmezeit angestrebt) und Patientenkomfort (kurze Aufnahmezeit angestrebt). Im Allgemeinen wird man bestrebt sein, eine adäquate Gesamtzählrate innerhalb von 20 – 30 Minuten zu akquirieren. Im Allgemeinen erfolgt die Rotation der γ -Kameras um die Längsachse eines liegenden Patienten (Abb. 2)²⁸ (Abb. 3)²⁹ (Abb. 4)³⁰ herum“ (Peter 2018, 343 f.)³¹.



Quelle: http://www.dgop.org/download/artikel_selbststudium_0409.pdf
(Zugang 12.02.2021)



Quelle: <https://slideplayer.org/amp/8900104/>
(Zugang 12.02.2021)

²⁸ Bildquelle: Peter 2018, 341.

²⁹ Bildquelle online verfügbar unter: <https://theconversation.com/the-science-of-medical-imaging-spect-and-pet-14086> (Zugang am 12.02.2021).

³⁰ Bildquelle: Peter 2018, 342 und 244.

³¹ Peter, Jörg: *Single Photon Emission Computer Tomography*. In: Schlegel, Wolfgang; Karger, Christian und Jäkel, Oliver (Herausgeber): *Medizinische Physik. Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik*. Heidelberg: Springer 2018.

1. **Aktivität:** Genannt auch *physikalische Aktivität*, *Radioaktivität* oder auch *Zerfallsrate*, um von der *chemischen Aktivität* zu unterscheiden. Die radioaktive Zerfallsrate (Aktivität) bezeichnet die Anzahl der Atomkernzerfälle pro Zeiteinheit. Das physikalische Formelzeichen der **Aktivität** ist **A** und die physikalische Einheit im *Système International* (SI) ist [s⁻¹], also im *internationalen Einheitensystem* (SI) ist die Einheit der Aktivität die reziproke Einheit der Zeit t [s]:

$$A = - dN / dt$$

Die Aktivität ist also die mathematische Ableitung von N nach der Zeit t, wobei

- N ist die Anzahl der radioaktiven Atomkernzerfälle zur Zeit t und ist dimensionslos, d. h., N ist eine Zahl und hat somit keine physikalische Einheit.
- t ist die Zeitvariable mit der physikalischen Einheit *Sekunde* [s] im SI.

Die Aktivität wird auch in *Becquerel* [Bq] angegeben. Allerdings ist diese Einheit nicht im *Système International* (SI) aufgezeichnet. 1 Bq entspricht einem Kernzerfall pro Sekunde. Die *Sekunde* ist eine SI-Basiseinheit in der Naturwissenschaft und entspricht „dem 9.192.631.770-fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ¹³³Cs“³³.

Die Aktivität hängt mit dem radioaktiven Zerfallsgesetz zusammen. Das radioaktive Zerfallsgesetz lautet:

$$dN = - \lambda \cdot N \cdot dt$$

$$\Rightarrow dN / N = - \lambda \cdot dt$$

Die Integralrechnung ergibt:

$$\boxed{- \int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = \lambda \int_0^t dt} \Rightarrow \ln N_t - \ln N_0 = - \lambda \cdot t$$

³² Ausgearbeitete Definitionen stammen aus Stöcker, Horst: *Taschenbuch der Physik Formeln, Tabellen, Übersichten herausgegeben*. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer 2018.

³³ Textquelle online verfügbar unter:

https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/countdown_new_si/Lesezeichen_zu_m_neuen_SI.pdf (Zugang am 12.02.2021).

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -\lambda t$$

Mit der Anwendung der Euler'schen Zahl e erhält man $\Rightarrow e^{\ln(N_t/N_0)} = e^{-\lambda t}$

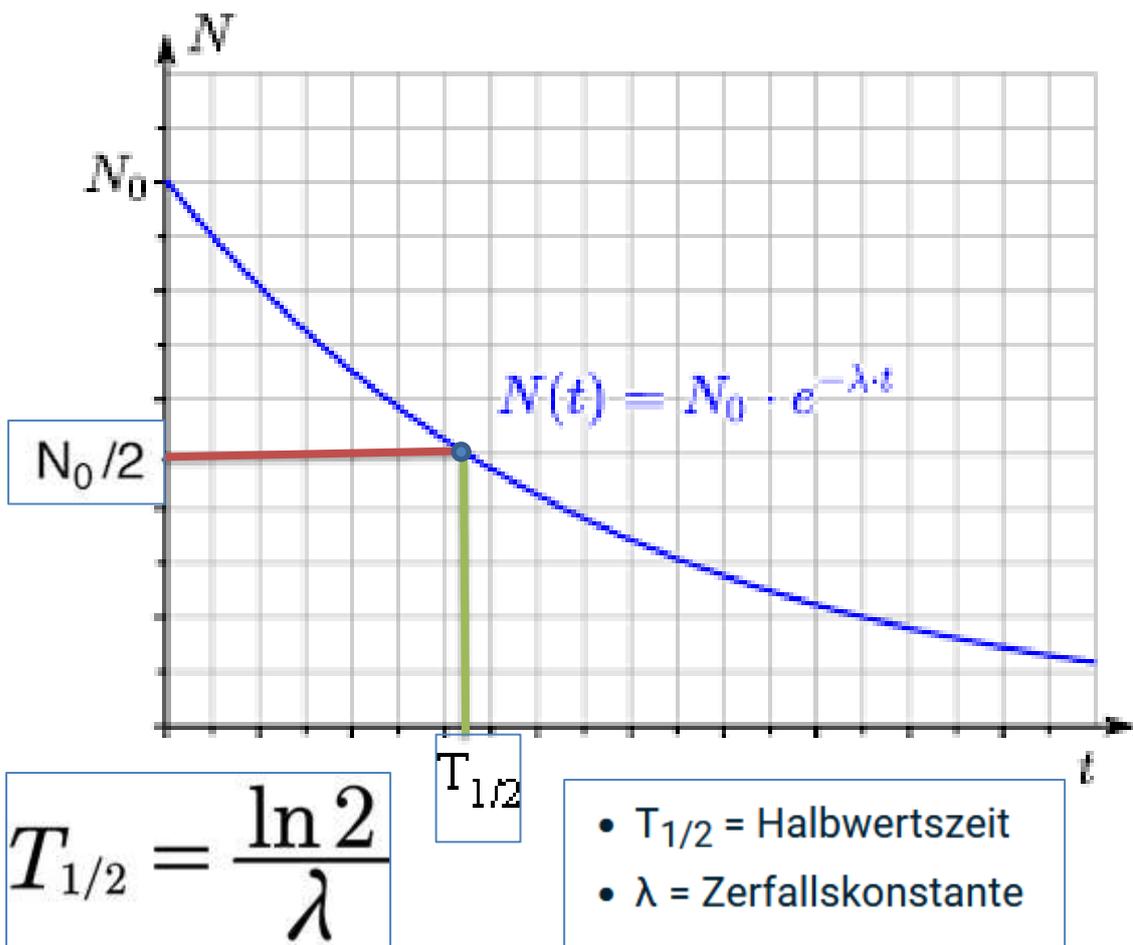
$$\Rightarrow \frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$\Rightarrow N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

λ ist die Zerfallskonstante mit der physikalischen Einheit $[\text{s}^{-1}]$, also die reziproke Einheit der Zeit $[\text{s}]$ im *Système International* (SI).

Die Zerfallskonstante λ beschreibt die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte radioaktive Zerfallsart. Jedes Radionuklid hat eine bestimmte charakteristische Zerfallskonstante λ .

- N ist die Anzahl der radioaktiven Atomkerne und ist dimensionslos.
- N_0 ist die Anzahl der radioaktiven Atomkerne zur Zeit $t_0 = 0$ und ist dimensionslos.
- Der Verlauf der Funktion N_t in Abhängigkeit von der Zeit t nach dem Gesetz des radioaktiven Zerfalls fällt somit exponential ab (Abbildung unten).



Somit ist die Aktivität A , mit angegebener physikalischen Einheit nach dem SI entweder $[s^{-1}]$ oder $[Bq]$:

$$A(t) = -\frac{dN}{dt}(t) \quad [s^{-1}] \text{ oder } [Bq]$$

$$\Rightarrow A(t) = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\Rightarrow A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [s^{-1}] \text{ oder } [Bq]$$

- $A_0 = \lambda \cdot N_0$ $[s^{-1}]$ oder $[Bq]$ ist die Aktivität zur Zeit $t_0 = 0$.
- $\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \approx 0,693 / T_{1/2}$ $[s^{-1}]$



$\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -\lambda t$	
$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$	Damit ergibt sich für t: $t = -\frac{T_{1/2}}{\ln(2)} \cdot \ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$

$T_{1/2}$ ist die Halbwertszeit mit der Einheit $[s]$ im *Système International* (SI). Sie gibt an, nach welcher Zeit t ist die Hälfte von der Stoffmenge des radioaktiven Nuklids zerfallen wurde ($N_0/2$). Das wurde auf der vorherigen Seite darstellend skizziert (Verlauf der Funktion N_t in Abhängigkeit von der Zeit t nach dem Gesetz des radioaktiven Zerfalls). Es werden einige Beispiele gegeben: Ein Kilogramm Radium ^{223}Ra zerfällt nach etwa 274 Stunden (ungefähr nach 11,4 Tagen) um die Hälfte und wiegt nun mehr 0,5 Kilogramm. Sein Isotop ^{226}Ra zerfällt nach etwa 1602 Jahren um die Hälfte. Das Uran ^{239}U zerfällt nach etwa 23,45 Minuten um die Hälfte und sein Isotop ^{238}U nach etwa 4,468 Milliarden Jahren.

Die *spezifische Aktivität* mit der Einheit $[Bq/kg]$ entspricht dem Verhältnis der Aktivität A $[Bq]$ zur Masse m $[kg]$ und sie bezieht sich auf der konstanten Eigenschaft und auf der Masse m $[kg]$ eines reinen Radionuklids. Somit ist die *spezifische Aktivität* $= A / m$ $[Bq/kg]$.

2. **Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908)** war ein französischer Physiker, der 1896 die radioaktive Strahlung des Urans entdeckte. Im Jahr 1899 wies er experimentell auf die Ablenkung der β -Strahlung im magnetischen Feld hin. Er erhielt zusammen mit den französischen Physikern und Chemikern

Pierre Curie (1859 – 1906) und seiner Ehefrau Marie Curie (1867 – 1934) den Nobelpreis für Physik 1903 „als Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, den sie sich durch ihre gemeinsamen Arbeiten über die entdeckten Strahlungsphänomene erworben haben“³⁴ (Abb. 6 – 12).

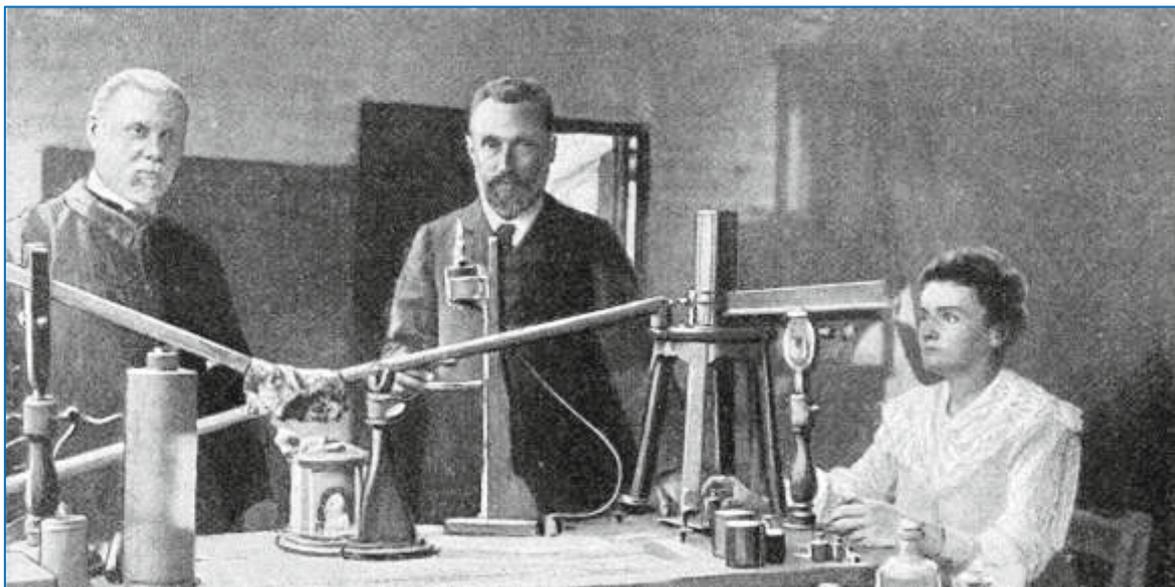
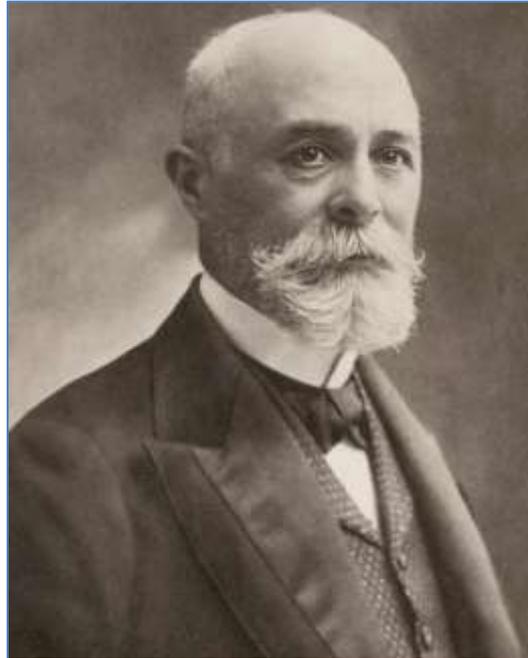


Abb. 6: BECQUEREL IM JAHR 1908 (OBEN) UND MIT EHEPAAR CURIE IM LABOR (LINKS) 1899

BILDQUELLE: <https://www.lindahall.org/henri-becquerel>

(ZUGANG AM 09.01.2021)

³⁴ Textquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 09.01.2021).

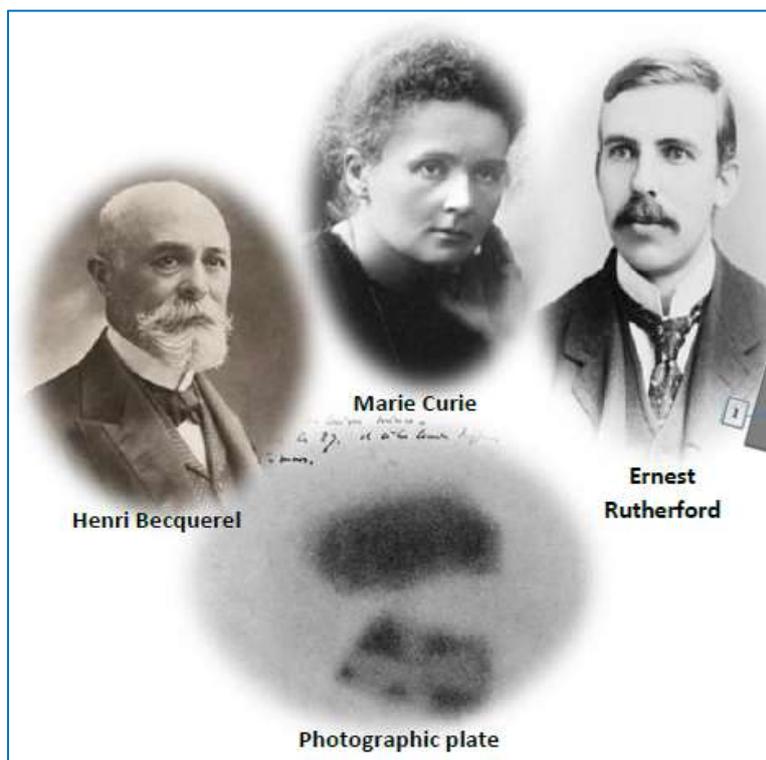
Die Aktivität wird zu seiner Ehrung in *Becquerel* [Bq] angegeben. Eine veraltete Einheit war *Rutherford* [rd], zur Ehre des neuseeländischen Physikers und Chemikers Ernest Rutherford (1871 – 1937) angegeben:

$$1 [\text{rd}] = 10^6 [\text{Bq}]$$

Rutherford erhielt den Nobelpreis für Chemie 1908 „für seine Untersuchungen über den Zerfall der Elemente und die Chemie der radioaktiven Stoffe“³⁵. Die reziproke Sekunde [s⁻¹] wurde 1977 in der zweiten Auflage des zitierten Verordnungstextes in Becquerel [Bq] umbenannt. Die veraltete Einheit war *Curie* [Ci]:

$$1 [\text{Ci}] = 3,7 \cdot 10^{10} [\text{Bq}]$$

$$1 [\text{Bq}] = 2,7027 \cdot 10^{-11} [\text{Ci}]$$



**Abb. 7: DIE ERSTEN RADIOAKTIVITÄTSPIONIERE
BECQUEREL, CURIE UND RUTHERFORD**

UNTEN IM BILD: DIE ENTDECKUNG DER RADIOAKTIVITÄT DURCH BECQUEREL 1896 BEIM ZUFALL DURCH FOTOGRAFISCHE PLATTE (SIEHE RADIOAKTIVITÄT – DAS WIRD IN DER VORLIEGENDEN ARBEIT NÄHER ERKLÄRT)

BILDQUELLE:

**https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/chemie/gym/bp2016/fb6/2_k19/7_rutherford/1_curr1/
(ZUGANG AM 09.01.2021)**

³⁵ Textquelle online abrufbar unter:
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 09.01.2021).

Nach dem gegenwärtigen Wissen in der Physik ist die **Aktivität** von 1 g Radium-226 (^{226}Ra)

$$A = 0,989 [\text{Ci}] = 3,66 \cdot 10^{10} [\text{Bq}] \text{ oder } [\text{s}^{-1}]$$

Das heißt, es entstehen $3,66 \cdot 10^{10}$ radioaktiven Zerfälle vom Atomkern des Radionuklids ^{226}Ra in der Sekunde, oder auch: Die Anzahl der Atomkernzerfälle des Radionuklids ^{226}Ra pro Zeiteinheit ist $3,66 \cdot 10^{10}$ radioaktive Zerfälle.

„Eine reziproke Sekunde [s^{-1}] als Einheit der Aktivität einer radioaktiven Substanz ist gleich der Aktivität einer Menge eines radioaktiven Nuklids, in der der Quotient aus dem statistischen Erwartungswert für die Anzahl der Umwandlungen oder isomeren Übergänge und der Zeitspanne, in der diese Umwandlungen oder Übergänge stattfinden, bei abnehmender Zeitspanne dem Grenzwert $1/\text{s}$ zustrebt“ (Krieger 2019, 128 ff.)³⁶.

Die Einheit [Ci] wurde zur Ehre der polnisch-französischen Physikerin und Chemikerin Marie Curie angeführt (geboren in Warschau *Maria Salomea Skłodowska*). Im Jahr 1895 ehelichte sie den französischen Physiker und Chemiker Pierre Curie. Aus dieser Ehe entsprossen zwei Töchter: Irène (1897 – 1956) und Ève Denise (1904 – 2007). Irène war – ebenfalls wie die Mutter und der Vater – eine hervorragende Physikerin und Chemikerin. Sie heiratete 1926 auch einen französischen Physiker und Chemiker, Frédéric Joliot (1900 – 1958) und hieß nach der Verehelichung Irène Joliot-Curie. Mit dem Ehemann erhielt sie den Nobelpreis für Chemie 1935 „für ihre gemeinsam durchgeführten Darstellungen von neuen radioaktiven Elementen“³⁷.

Die zweite Tochter Ève Denise Curie-Labouisse wurde eine berühmte Schriftstellerin, Journalistin und politische Beraterin. Sie vermählte sich 1954 mit dem amerikanischen Juristen und Diplomaten französischer Herkunft Henry Richardson Labouisse (1904 – 1987) und war mit ihm jahrelang politisch tätig und eine unentbehrliche Beraterin des Generalsekretariats der Vereinigten Nationen (UNO)!

³⁶ Textquelle online abrufbar unter: Hanno, Krieger: *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Wiesbaden: Springer 2019 (Zugang am 09.01.2021).

³⁷ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 09.01.2021).



Abb. 8: PIERRE UND MARIE MIT DER 5-JÄHRIGEN TOCHTER IRÈNE 1902
BILDQUELLE: https://www.wikiwand.com/de/Ir%C3%A8ne_Joliot-Curie
(ZUGANG AM 09.01.2021)



Abb. 9: MARIE CURIE (MITTE) MIT TÖCHTERN IRÈNE (RECHTS) UND ÈVE DENISE (LINKS) 1908

BILDQUELLE: https://www.wikiwand.com/de/Ir%C3%A8ne_Joliot-Curie

(ZUGANG AM 09.01.2021)



Abb. 10: ÈVE DENISE (4 JAHRE ALT) AUF DEM SCHOß IHRER SCHWESTER IRÈNE (14 JAHRE ALT) 1911

BILDQUELLE: https://www.wikiwand.com/de/Ir%C3%A8ne_Joliot-Curie

(ZUGANG AM 09.01.2021)

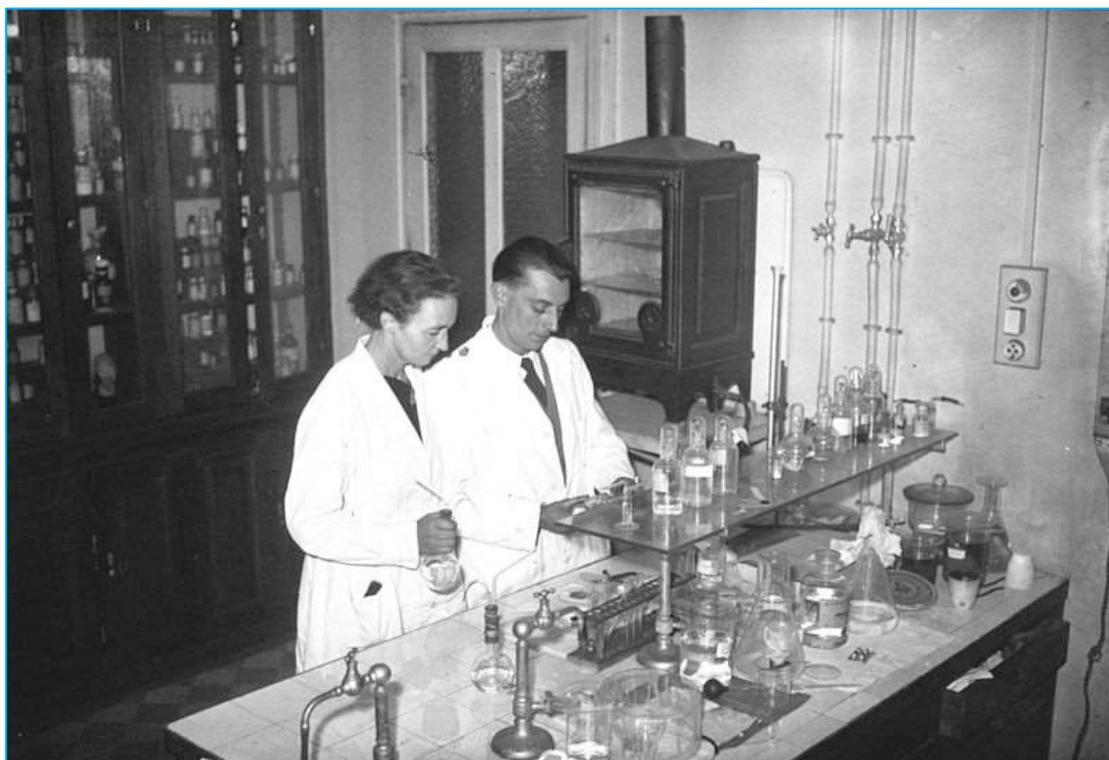


Abb. 11: IRÈNE JOLIOT-CURIE (LINKS) MIT EHEMANN FRÉDÉRIC JOLIOT (RECHTS) IM LABOR 1935 (OBEN)

BEI DER EINLADUNG IN LONDON VON THE ROYAL SOCIETY 1934 (UNTEN)

BILDQUELLE: https://www.wikiwand.com/de/Ir%C3%A8ne_Joliot-Curie

(Zugang AM 09.01.2021)



Abb. 12: WIE DIE MUTTER, SO DIE TOCHTER
MARIE CURIE (RECHTS) MIT TOCHTER IRÈNE (LINKS) IM LABOR 1925
BILDQUELLE: https://www.wikiwand.com/de/Ir%C3%A8ne_Joliot-Curie
(ZUGANG AM 09.01.2021)

3. **Äquivalentdosis** berücksichtigt die unterschiedliche Wirksamkeit verschiedener Strahlungsarten. Die Äquivalentdosis D_q ergibt sich aus der Multiplikation des Bewertungsfaktor q mit der Energiedosis D [Gy]. Die Einheit der Äquivalentdosis D_q ist Sievert [Sv]:

$$D_q = q \cdot D \text{ [Sv]}$$

4. **Carrier**: Das sind radioaktive Nuklide die im Falle von ^{18}F kovalent oder im Falle von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ über Komplexbildung an einen **Carrier** gebunden werden können. Der Begriff *Carrier* stammt aus dem Englischen und bedeutet – auf Deutsch übersetzt – *Träger*.
5. **Clusterzerfall**: Der Zerfall von Atomkernen durch Emission von Clustern, wie z. B. ^{12}C und ^{14}C . Dieser Zerfall weist auf die Bedeutung von Schalenabschlüssen für die Stabilität von Atomkernen hin.
6. **Dosisleistung**: Das ist die auf die Zeiteinheit [s] bezogene Äquivalentdosis D_q [Sv]:

$$\dot{D} = D_q / t \text{ [Sv/s]}$$

7. **K-Elektroneneinfang**: Der Elektroneneinfang ist ein



Abb. 14: ALVAREZ

Einfang eines Hüllenelektrons \bar{e} aus der atomaren K-Schale durch einen Atomkern unter Umwandlung eines Protons p in ein Neutron n :



Das Neutron n bleibt im Atomkern. Das Elektronenneutrino (Elektron-Neutrino) ν_e

entsteht in diesem Prozess. Der japanische Physiker Hideki Yukawa (1907 – 1981) sagte 1935 den Elektroneneinfang theoretisch vorher

und erhielt den Nobelpreis für Physik 1949 „für seine auf der Theorie der Kernkräfte beruhende Vorhersage der Existenz der Mesonen“ (Abb. 14)³⁸. Zwei Jahre später (1937) wies der amerikanische Physiker Luis Walter Alvarez (1911 – 1988) diese Theorie experimentell nach und bekam dafür ebenfalls den Nobelpreis für Physik 1968 „für seinen entscheidenden Beitrag zur Elementarteilchenphysik, insbesondere seine Entdeckung einer großen Anzahl von Resonanzzuständen, ermöglicht durch seine Entwicklung von



Abb. 13: YUKAWA

³⁸ Bildquelle und Textquelle online abrufbar unter:
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 09.01.2021).

Techniken mit der Wasserstoffblasenkammer und Datenanalyse“ (Abb. 13)³⁹. Dieser radioaktive Atomkernprozess unterliegt der schwachen Wechselwirkung. Das wird in dieser Arbeit eingehend noch erörtert.

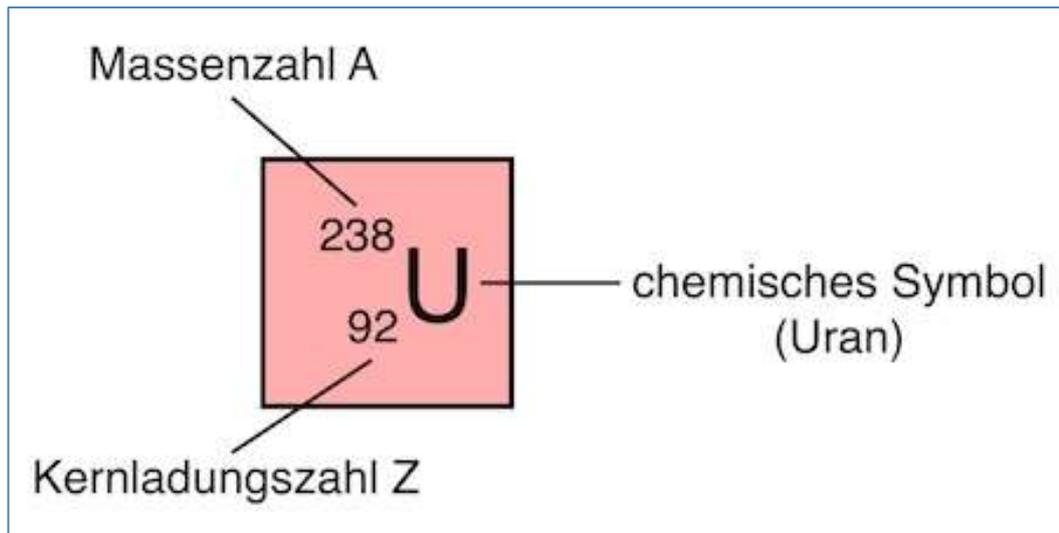
8. **Energiedosis:** Maß für die physikalische Strahlungswirkung. Die Energiedosis D [Gy] ist das Verhältnis der absorbierten Strahlungsenergie E [J] zur Masse m [kg]:

$$D = E / m \text{ [Gy] oder [J/kg]}$$

9. **Generator:** Eine elektrische Maschine dient der Umwandlung einer Energieform in eine Andere. Man macht sich das Induktionsgesetz sowie die Lorentzkraft zunutze, um einen Generator oder einen Motor zu betreiben. Ein Motor nimmt die elektrische Energie auf und wandelt sie in Rotationsenergie um. Der Generator nimmt diese Rotationsenergie auf und wandelt sie in elektrische Energie um. In der vorliegenden Abhandlung wird ein Technetium-99m-Generator (sprich: *Radionuklidgenerator für das metastabile Isotop* ^{99m}Tc) betrachtet. Er dient zum Herausziehen vom ^{99m}Tc beim künstlichen Radiozerfall des chemischen Elements Molybdänisotop ^{99}Mo (Eingebaut im hergestellten $^{99}\text{Mo} / ^{99m}\text{Tc}$ -Generator), um unmittelbar danach in der nuklearmedizinischen Diagnose einzusetzen, da die Halbwertszeit $T_{1/2}$ vom ^{99m}Tc etwa 6,01 Stunden ist ($T_{1/2}$ vom ^{99}Mo ist 66 h).
10. **Halbwertszeit:** Siehe **Aktivität**.
11. **Ionendosis:** Das ist ein Maß für die Ionisierungsintensität. Die Ionendosis [C/kg] ist das Verhältnis der freigesetzten Ladung Q [C] pro Masse m [kg] der bestrahlten Substanz: Q / m [C/kg].
12. **Ionisation:** Abtrennung von mindestens einem Elektron aus einem neutralen Atom (Kation) oder Anlagerung von mindestens einem Elektron an ein neutrales Atom (Anion). Das neutrale Atom wird elektrisch positiv (Kation) oder elektrisch negativ (Anion) geladen. Somit ist eine Ionisation eine Erzeugung eines freien Elektrons und eines positiven Ions (Kations) in Stößen des einfallenden Teilchens mit einem Atom auf „Kosten“ der kinetischen Energie des einfallenden Teilchens.
13. **Ionisierende Teilchen:** Elektrisch geladene Teilchen, die in Stößen mit Hüllenelektronen positive Ionen und freie Elektronen erzeugen. Das wird in der vorliegenden Arbeit eingehend noch auseinandergesetzt.

³⁹ Ebd.

14. **Isotope**: Atome mit gleicher Ordnungszahl Z (genannt auch Kernladungszahl Z) aber verschiedener Neutronenzahl N . Die Ordnungszahl Z (oder die Kernladungszahl Z) bezeichnet die Anzahl der Protonen im Atomkern und damit die (gleiche) Anzahl der Elektronen in der Atomhülle eines neutralen Atoms. Die relative Atommassenzahl $A = Z + N$ (Anzahl der Protonen Z und der Neutronen N im Atomkern) wird auch *Nukleonenzahl* genannt. Am Beispiel des Urans ist die Anzahl der Neutronen $N = A - Z = 238 - 92 = 146$ (Siehe Abbildung unten).



Einige in **PET** angewendete Isotope und ihre Halbwertzeiten (in Minuten angegeben) sowie ihre emittierten Positronenenergie (β^+ -Energie in Kiloelektronenvolt [**KeV**]) stehen unten im blauen Kasten.

^{11}C	:	20 min, β^+ (970 KeV), $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$
^{13}N	:	10 min, β^+ (1190 KeV), $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$
^{15}O	:	2 min, β^+ (1720 KeV), $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$
^{18}F	:	110 min, β^+ (635 KeV), $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$

Es werden einige Isotope dargestellt, die in der Nuklearmedizin im Einsatz vorkommen: ^{18}F (in PET) und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (in SPECT):

Fluor Isotope	Halbwertszeit	Zerfallprozess	Zerfallenergie (MeV)	Zerfallprodukt
^{17}F	64,49 s	β^+	2,761	^{17}O
^{18}F Anwendung in Nuklearmedizin (PET)	109,77 min	β^+	1,656	^{18}O
^{19}F	Stabil			
^{20}F	11,00 s	β^-	7,025	^{20}Ne
^{21}F	4,158 s	β^-	5,684	^{21}Ne

Technetium Isotope	Halbwertszeit	Zerfallprozess	Zerfallprodukt
^{85}Tc	<110 ns	β^+	^{85}Mo
		p	^{84}Mo
		β^+ , p	^{84}Nb
^{86}Tc	55(6) ms	β^+	^{86}Mo
$^{86\text{m}}\text{Tc}$	1,11(21) μs		
^{87}Tc	2,18(16) s	β^+	^{87}Mo
$^{87\text{m}}\text{Tc}$	2 s		
^{88}Tc	5,8(2) s	β^+	^{88}Mo
$^{88\text{m}}\text{Tc}$	6,4(8) s	β^+	^{88}Mo
^{89}Tc	12,8(9) s	β^+	^{89}Mo
$^{89\text{m}}\text{Tc}$	12,9(8) s	β^+	^{89}Mo
^{90}Tc	8,7(2) s	β^+	^{90}Mo
$^{90\text{m}}\text{Tc}$	49,2(4) s	β^+	^{90}Mo
^{91}Tc	3,14(2) min	β^+	^{91}Mo
$^{91\text{m}}\text{Tc}$	3,3(1) min	β^+ (99%)	^{91}Mo
		TI (1%)	^{91}Tc
^{92}Tc	4,25(15) min	β^+	^{92}Mo
$^{92\text{m}}\text{Tc}$	1,03(7) μs		
^{93}Tc	2,75(5) h	β^+	^{93}Mo
$^{93\text{m}1}\text{Tc}$	43,5(10) min	TI (76,6%)	^{93}Tc
		β^+ (23,4%)	^{93}Mo
$^{93\text{m}2}\text{Tc}$	10,2(3) μs		
^{94}Tc	293(1) min	β^+	^{94}Mo
$^{94\text{m}}\text{Tc}$	52,0(10) min	β^+ (99,9%)	^{94}Mo
		TI (0,1%)	^{94}Tc
^{95}Tc	20,0(1) h	β^+	^{95}Mo
$^{95\text{m}}\text{Tc}$	61(2) j	β^+ (96,12%)	^{95}Mo
		TI (3,88%)	^{95}Tc
^{96}Tc	4,28(7) j	β^+	^{96}Mo
$^{96\text{m}}\text{Tc}$	51,5(10) min	TI (98%)	^{96}Tc
		β^+ (2%)	^{96}Mo
^{97}Tc	$2,6 \times 10^6$ a	CE	^{97}Mo
$^{97\text{m}}\text{Tc}$	91,4(8) j	TI (99,66%)	^{97}Tc
		CE (0,34%)	^{97}Mo
^{98}Tc	$4,2(3) \times 10^6$ a	β^-	^{98}Ru
$^{98\text{m}}\text{Tc}$	14,7(3) μs		
^{99}Tc	$2,111(12) \times 10^5$ a	β^-	^{99}Ru
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ Anwendung in Nuklearmedizin (SPECT)	6,0058(12) h	TI (99,99%)	^{99}Tc
		β^- (0,0037%)	^{99}Ru

^{100}Tc	15,8(1) s	β^- (99,99%) CE (0,0018%)	^{100}Ru ^{100}Mo
$^{100\text{m}1}\text{Tc}$	8,32(14) μs		
$^{100\text{m}2}\text{Tc}$	3,2(2) μs		
^{101}Tc	14,22(1) min	β^-	^{101}Ru
$^{101\text{m}}\text{Tc}$	636(8) μs		
^{102}Tc	5,28(15) s	β^-	^{102}Ru
$^{102\text{m}}\text{Tc}$	4,35(7) min	β^- (98%) TI (2%)	^{102}Ru ^{102}Tc
^{103}Tc	54,2(8) s	β^-	^{103}Ru
^{104}Tc	18,3(3) min	β^-	^{104}Ru
$^{104\text{m}1}\text{Tc}$	3,5(3) μs		
$^{104\text{m}2}\text{Tc}$	0,40(2) μs		
^{105}Tc	7,6(1) min	β^-	^{105}Ru
^{106}Tc	35,6(6) s	β^-	^{106}Ru
^{107}Tc	21,2(2) s	β^-	^{107}Ru
$^{107\text{m}}\text{Tc}$	184(3) ns		
^{108}Tc	5,17(7) s	β^-	^{108}Ru
^{109}Tc	860(40) ms	β^- (99,92%) β^-, n (0,08%)	^{109}Ru ^{108}Ru
^{110}Tc	0,92(3) s	β^- (99,96%) β^-, n (0,04%)	^{110}Ru ^{109}Ru
^{111}Tc	290(20) ms	β^- (99,15%) β^-, n (0,85%)	^{111}Ru ^{110}Ru
^{112}Tc	290(20) ms	β^- (97,4%) β^-, n (2,6%)	^{112}Ru ^{111}Ru
^{113}Tc	170(20) ms	β^-	^{113}Ru
^{114}Tc	150(30) ms	β^-	^{114}Ru
^{115}Tc	100 ms [>300 ns]	β^-	^{115}Ru
^{116}Tc	90 ms [>300 ns]		
^{117}Tc	40 ms [>300 ns]		
^{118}Tc	30 ms [>300 ns]		

Der Einsatz von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und ^{18}F in der nuklearmedizinischen Diagnose werden in der vorliegenden Abhandlung detailliert beschrieben.

15. **Mittlere Lebensdauer:** Siehe **Aktivität**.

16. **Nuklid:** Ein Nuklid ist ein durch die Kernladungszahl und die Neutronenzahl bestimmter Atomtyp (Atomgattung, Atomklasse, Atomkategorie). **Radionuklide** emittieren ionisierende Strahlung. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und ^{18}F sind Radionuklide.

17. **Positronenstrahler:** Sie sind chemische Elemente, die Positronen emittieren (**PET**). Das Positron ist die Antimaterie (auch *Antiteilchen* genannt) des Elektrons. ^{18}F ist ein in **PET** angewendeter Positronenstrahler.

Das Positron besitzt im Vergleich zu dem Elektron folgende Eigenschaften:

- Positronen sind Fermionen. Sie besitzen einen halbzahligen Spin: $s = \frac{1}{2}$ (genau wie das Elektron).

- Die elektrische Ladung des Positrons beträgt $+1,602176634 \cdot 10^{-19}$ [C] (Das Elektron: $-1,602176634 \cdot 10^{-19}$ [C]).
- Die Positronenmasse ist (gleich der Elektronenmasse): $9,109383701528 \cdot 10^{-31}$ [kg].
- Die Ruheenergie des Positrons (auch des Elektrons) beträgt $0,5109989500015$ [MeV].
- Das Positron (wie das Elektron) besitzt eine Comptonwellenlänge von $2,426310238\ 6773 \cdot 10^{-12}$ [m].
- Das magnetische Moment sowohl von dem Positron als auch von dem Elektron ist $9,284764704328 \cdot 10^{-24}$ [J/T].
- Die mittlere Lebensdauer des Positrons (auch des Elektrons) ist stabil.
- Das Positron (und sein Antiteilchen oder seine Antimaterie: Das Elektron) gehorchen der schwachen, der elektromagnetischen und der gravitativen Wechselwirkungen.

18. **Radioaktive Isotope**: Siehe **Isotope**.

19. **Radioaktives Zerfallsgesetz**: Siehe **Aktivität**.

20. **Radioaktivität**: Siehe **Aktivität** und **Antoine Henri Becquerel**. Historisch-naturwissenschaftliche Ereignisse: Antoine Henri Becquerel entdeckte 1896 die Radioaktivität durch Zufall mittels Uransalze, die eine „neue Strahlungsart“ sendete (Brockhaus 1911, 171)⁴⁰. Er beobachtete und untersuchte diese „Beschaffenheit von andersartiger Strahlung“ monatelang: Sie war keineswegs „Röntgenstrahlung“, die gerade noch vor einem Jahr (1895) vom ersten Nobelpreisträger für Physik 1901 Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923), „als Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, den er sich durch die Entdeckung der nach ihm benannten Strahlungen erworben hat“ beobachtet und entdeckt wurde (Abb. 15)⁴¹.



Abb. 15: RÖNTGEN

⁴⁰ Siehe *Becquerelstrahlen*. In: Brockhaus' Kleines Konversations-Lexikon. 5. Auflage. Band 1, F. A. Brockhaus, Leipzig 1911, S. 171. Text online abrufbar unter: <http://images.zeno.org/Brockhaus-1911/K/big/brockh-1911-011-0171.png> (Zugang am 05.01.2021).

Siehe *Becquerelstrahlen*. In: Meyers Großes Konversations-Lexikon. 6. Auflage. Band 2, Bibliographisches Institut, Leipzig/Wien 1905, S. 541 – 542. Text online abrufbar unter: <http://www.zeno.org/Meyers-1905/K/meyers-1905-002-0541> (Zugang am 05.01.2021).

⁴¹ Bildquelle und Textquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 09.01.2021).

Becquerel gab die Uransalze in einen Behälter aus Blei. Zwei Monate lang blieb den Behälter geschlossen, also in „vollständige Dunkelheit“ („Lichtlosigkeit“) aufgehoben, um das Uransalz vom Licht „gänzlich abzuschirmen“. Nach zwei Monaten öffnete Becquerel den Behälter und war überrascht zu sehen, dass der Innenbehälter dunkler als vor zwei Monate wurde! Interessanterweise schwärzte diese Strahlung fotografische Platten, die er auf dem Uransalz gelegt hatte, ohne vorherige Belichtung (siehe Abb. 7 und 16). Also würde er sie phänomenologisch nicht unter „Fluoreszenz“ bezeichnen. Seine Neugier führte ihn zu monatelangen experimentellen Untersuchungen, um im Schlusseffekt diese „neue Form“ von Strahlung noch genauer anzuordnen: Sie drang auf Grund ihrer wirksamen Intensität stoßend durch lichtundurchlässige chemische Substanzen durch, und sie ionisierte unter Überwindung aller Arten von Hindernissen die umgebende Luft! Was aber noch verblüffend war, die umgebende Temperatur blieb konstant und die chemischen Substanzen wurden nicht verändert! Becquerel veröffentlichte darüber zahlreiche historisch-wissenschaftlichen Artikel über seine Versuche.⁴²

⁴² Becquerel, Henri Antoine: *Sur les radiations émises par phosphorescence*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 420 – 421.

- Becquerel, Henri Antoine: *Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 501 – 503.
- Becquerel, Henri Antoine: *Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles émises par divers corps phosphorescents*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 559 – 564.
- Becquerel, Henri Antoine: *Sur les radiations invisibles émises par les sels d'uranium*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 689 – 694.
- Becquerel, Henri Antoine: *Sur les propriétés différentes des radiations invisibles émises par les sels d'uranium, et du rayonnement de la paroi anticathodique d'un tube de Crookes*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 762 – 767.
- Becquerel, Henri Antoine: *Émission de radiation nouvelles par l'uranium métallique*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 1086 – 1088.
- Becquerel, Henri Antoine: *Sur diverses propriétés des rayons uraniques*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 123, 1896, S. 1086 – 1088.
- Becquerel, Henri Antoine: *Recherches sur les rayons uraniques*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 124, 1897, S. 438 – 444.
- Becquerel, Henri Antoine: *Sur la loi de la décharge dans l'air de l'uranium électrisé*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 124, 1897, S. 800 – 803.
- Becquerel, Henri Antoine: *Influence d'un champ magnétique sur le rayonnement des corps radio-actifs*. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 129, 1899, S. 996 – 1001.
- Becquerel, Henri Antoine: *Sur le rayonnement de l'uranium et sur diverses propriétés physiques du rayonnement des corps radio-actifs*. In: Rapports présentés au Congrès international de physique réuni à Paris en 1900 sous les auspices de la Société française de physique. Band 3, Gauthier-Villars, Paris 1900, S. 47 – 78.
- Becquerel, Henri Antoine: *Recherches sur une Propriété Nouvelle de la Matière. Mémoires de l'Académie des Sciences*. Band 46, Fermin-Didot, Paris 1903.

Zwei Jahre später (1898) wurde diese neue von Antoine Henri Becquerel beobachtete und wissenschaftlich gut beschriebene „andersartige Strahlung“ „Radioaktivität“ gekennzeichnet (Curie 1898, 1215 ff.)⁴³. Marie und Pierre Curie waren in Paris im Bereich der Chemie und Physik in ihrem Labor tätig (vgl. Diehl 2008, 2)⁴⁴. Sie untersuchten diese „Becquerel’sche Uranstrahlung“ oder „Becquerelstrahlen“⁴⁵ weiter. Im Jahr 1898 nannten Marie und Pierre Curie diese Strahlung „Radioaktivität“ oder „radioaktive Strahlung“⁴⁶.

Es soll noch erwähnt werden: Marie Curie verfasste eine Dissertation 1896 bei Becquerel (ihr Universitätsprofessor damals) über die „Becquerel’sche Uranstrahlung“ der *Pechblende*! Dieses uranhaltige Erz, genannt *Pechblende*, emittierte Strahlung. Die *Pechblende* (oder auch *Bechblende* genannt) wird chemisch „Uraninit“ genannt (Abb. 16)⁴⁷.



Abb. 16: „Uraninit“
(*Pechblende*)

Es gehört der Mineralklasse der Oxide und Hydroxide: Uran(IV)-oxid (UO_2). Auch aus einem Thoriumoxid konnten Marie und Pierre Curie zwei bis dahin unbekannte chemische Elemente entdecken. Diese waren das *Radium* und das *Polonium*, die – ebenfalls wie das Uran – radioaktive Substanzen waren. Das chemische Element *Thorium* emittiert ebenfalls Strahlung, ähnlich wie die Uransalze. Marie und Pierre Curie führten unmittelbar danach den Begriff „Radioaktivität“ 1898 an. Sie wussten bescheid, es handelte sich um physikalisch-chemischen Umwandlungsprozess, also um „radioaktiven atomaren Zerfall“. Vom „Atomkernzerfall“ wussten sie zu dieser Zeit noch

⁴³ Curie, Pierre; Curie, Marie; Bémont, Gérard: *Sur une nouvelle substance fortement radio-active contenue dans la pechblende*. In: Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Band 127, 1898, S. 1215 – 1217.

Text online abrufbar unter:

<https://archive.org/stream/surunesubstancen127curi#page/1214/mode/2up/search/curie> (Zugang am 05.01.2021).

⁴⁴ Diehl, Johannes Friedrich: *Radioaktivität in Lebensmitteln*. Weinheim, Verlag Wiley-VCH 2008.

⁴⁵ Siehe *Becquerelstrahlen*. In: Brockhaus' Kleines Konversations-Lexikon. 5. Auflage. Band 1, F. A. Brockhaus, Leipzig 1911, S. 171. Text online abrufbar unter: <http://images.zeno.org/Brockhaus-1911/K/big/brockh-1911-011-0171.png> (Zugang am 05.01.2021).

Siehe *Becquerelstrahlen*. In: Meyers Großes Konversations-Lexikon. 6. Auflage. Band 2, Bibliographisches Institut, Leipzig/Wien 1905, S. 541 – 542. Text online abrufbar unter: <http://www.zeno.org/Meyers-1905/K/meyers-1905-002-0541> (Zugang am 05.01.2021).

⁴⁶ Ebd.

⁴⁷ Bildquelle online abrufbar unter: <https://deacademic.com/pictures/dewiki/80/Pichblende.jpg> (Zugang am 09.01.2021).



nicht. Erst 1932, nachdem der britische Physiker – Rutherfords Student und Mitarbeiter – James Chadwick (1891 – 1974) das Neutron im Atomkern entdeckt hatte, wurde der „radioaktive Atomkernzerfall“ nachweisbar (Chadwick 1932, 312)⁴⁸. James Chadwick (Abb. 17)⁴⁹ erhielt den Nobelpreis für Physik 1935 „für die Entdeckung des Neutrons“⁵⁰.

Abb. 17: CHADWICK

Das Zeitalter der Erzeugung von künstlichen radioaktiven Elementen mittels Beschusses von Neutronen auf Atomkernen begann: Die französischen Physiker und Chemiker Frédéric Joliot (1900 – 1958) und seine seit 1926 Ehefrau Irène Curie-Joliot (1897 – 1956), die Tochter von Pierre und Marie Curie, waren 1933 die ersten Pioniere auf diesem Gebiet. Sie erhielten gemeinsam den Nobelpreis für Chemie 1935 „für ihre gemeinsam durchgeführten Darstellungen von neuen radioaktiven Elementen“ (Abb. 18)⁵¹. Das Ehepaar Joliot spalteten Atomkerne (genannt auch *induzierte Atomkernspaltung*) nicht nur mit Neutronenbeschuss, sondern auch mit α -Strahlung.⁵²



Abb. 18: FRÉDÉRIC JOLIOT UND IRÈNE CURIE-JOLIOT

Zu diesem Thema wichtig: Die italienischen Chemiker und Physiker Carlo Perrier (1886 – 1948) bzw. Emilio Gino Segrè (1905 – 1989) stellten durch mit **Beschuss von Neutronen an Molybdän** das **Technetium** her (Perrier et al. 1937)⁵³. Die Entdeckung des Technetiumatoms in 1937 bewirkte den Einsatz des Radiopharmakons **Technetium** (^{99m}Tc) im **SPECT**.

Das ist das Hauptthema der vorliegenden Arbeit!

⁴⁸ Chadwick J.: *Possible Existence of a Neutron*. In: Nature, Ausgabe Februar 27, 1932. Text online abrufbar unter: <http://web.mit.edu/22.54/resources/Chadwick.pdf> (Zugang am 07.10.2020).

⁴⁹ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.sutori.com/item/1935-james-chadwick-sir-james-chadwick-was-a-british-physicist-who-discovered> (Zugang am 09.01.2021).

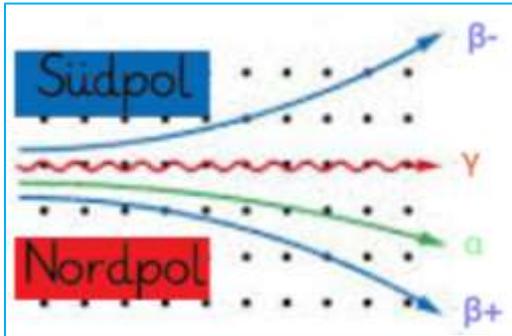
⁵⁰ Bildquelle online abrufbar unter: <https://en.ppt-online.org/414955> (Zugang am 07.10.2020).

⁵¹ Textquelle und Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 09.01.2021).

⁵² In den 1930er Jahren war die α -Strahlung bereits als Heliumatomkern bekannt. Denn entdeckte Rutherford 1919 das Proton und Chadwick 1932 das Neutron.

⁵³ Perrier, Carlo; Segrè, Emilio (1947): *Technetium: The Element of Atomic Number 43*. Nature 159 (4027): 24.

Im Jahr 1898 konnte Ernest Rutherford, nach Erforschungen von den neuen entdeckten „andersartigen“ Strahlungen, zwei Arten charakterisieren, die er α - und β -Strahlungen kennzeichnete (Rutherford 1898, 116 ff.)⁵⁴.



Bereits 1899 wiesen die österreichischen Physiker Stefan Meyer (1872 – 1949), Egon Schweidler (1873 – 1948) und Friedrich Oskar Giesel (1852 – 1927) darauf hin, dass die α - und β -Strahlungen im magnetischen Feld in entgegengesetzte Richtung ablenken (Meyer et al. 1899, 834 ff.)⁵⁵.

Abb. 19: ABLENKUNG DER α - UND β -STRAHLUNGEN IM MAGNETISCHEN FELD
 γ -STRAHLUNG ERFÄHRT DAS FELD NICHT, DA SIE ELEKTRISCH NEUTRAL IST

Im Jahr 1900 veröffentlichte der französische Physiker und Chemiker Paul Ulrich Villard (1860 – 1934; Abb. 20)⁵⁶ einige Publikationen über eine wiederum neue andersartige Strahlung, die – im Gegensatz zu α - und β -Strahlungen – im Magnetfeld nicht ablenkbar ist (Abb. 18). Sie ist charakteristisch durchdringlicher und schneller als die α - und β -Strahlungen, und somit noch gefährlicher (Villard 1900)⁵⁷.

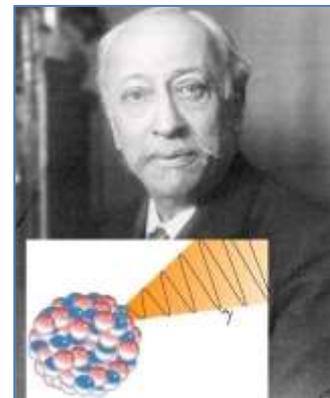


Abb. 20: VILLARD

⁵⁴ Rutherford, Ernest: *Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It*. In: Philosophical Magazine. 5. Folge, Band 47, Nummer 284, 1899, S. 116.

Sändulescu, Aureliu; Poenaru, Dorin N.; Walter Greiner: *New type of decay of heavy nuclei intermediate between fission and α decay*. In: Soviet Journal of Particles and Nuclei. Band 11, Nummer 6, 1980, S. 528 (= Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnoya Yadra. Band 11, 1980, S. 1334).

Rose, H. J.; Jones, G. A.: *A new kind of natural radioactivity*. In: Nature. Band 307, Nummer 5948, 19. Januar 1984, S. 245 – 247.

⁵⁵ Meyer, Stefan; Schweidler, Egon; Giesel, Friedrich Oskar: *Ueber die Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen im magnetischen Felde*. in: Annalen der Physik und Chemie. 1899, 69: S. 834 – 836.

⁵⁶ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.pinterest.com/pin> (Zugang am 18.02.2021).

⁵⁷ Villard, Paul: *On the chemical action of the X-rays*. In: Philosophical Magazine. 5. Folge, Band 49, Nummer 297, 1900, S. 244.

· Villard, Paul: *Sur la décharge des corps électrisés et la formation de l'ozone*. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 125 – 127.

· Villard, Paul: *Sur la discontinuité de l'émission cathodique*. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 1750 – 1772.

· Villard, Paul: *Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviés du radium*. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 1010 – 1012.

· Villard, Paul: *Sur le rayonnement du radium*. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 1178 – 1179.

Im Jahr 1903 taufte Ernest Rutherford die „Villard'sche Strahlungsart“ γ -Strahlung (Rutherford 1903, 117 ff.)⁵⁸. In diesem Jahr noch (1903) postulierten Rutherford und sein Mitarbeiterschüler, der britische Chemiker Frederick Soddy (1877 – 1956), dass es sich bei der Radioaktivität um Transmutation (Veränderung und Umwandlung von Elementen) handelt. Soddy erhielt den Nobelpreis für Chemie 1921 „für seine Beiträge zur Kenntnis der Chemie der radioaktiven Stoffe und seine Untersuchungen über das Vorkommen und die Natur der Isotopen“ (Abb. 21)⁵⁹.



Abb. 21: SODDY

Bis 1909 vermuteten Rutherford und seine schulischen Mitarbeiter, dass α -Strahlung ein elektrisch positiv geladenes Heliumatom sei.

Im Jahr 1913 stellten Frederick Soddy und der aus Polen stammende Physiker und Chemiker Kasimir Fajans (1887 – 1975) die *radioaktiven Verschiebungssätze* auf (Fajans und Soddy 1913)⁶⁰. Die Fajans-Soddy'schen Verschiebungssätze sind aufgestellte radioaktive Umwandlungsprozesse und Atomzerfallsregeln. Sie stellen die Umänderungen von der Ordnungszahl und von der Massenzahl der Atome bei radioaktivem Zerfall dar.

Das Verständnis von einem *Atomkern* im gegenwärtigen Sinne war allerdings noch nicht zu dieser Zeit deutlich und klar genug!

Erst 1914 bewiesen Rutherford und der britische Physiker Edward Neville da Costa Andrade (1887 – 1971), dass die γ -Strahlung elektromagnetische Wellenteilchen ist. Seine Energie beträgt somit $E = h \cdot f$. Sie bewegt sich mit der Lichtgeschwindigkeit und ist deshalb gefährlicher!

Die mit dem französischen Physiker und Chemiker Frédéric Joliot verheiratete Tochter von Marie und Pierre Curie, Irène Curie (Abb. 6 – 12,

⁵⁸ Rutherford, Ernest: *The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium*. In: Philosophical Magazine. 6. Folge, Band 5, Nummer 25, 1903, S. 177.

⁵⁹ Bildquelle und Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 09.01.2021).

⁶⁰ Fajans, Kasimir: *Die radioaktiven Umwandlungen und das periodische System der Elemente*. In: Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft. Nr. 46, 1913, S. 422 – 439.

Soddy, Frederick: *The Radio Elements and the Periodic Law*. In: Chem. News. Nr. 107, 1913, S. 97 – 99.

Soddy, Frederick: *The Radio Elements and the Periodic Law*. In: Nature. Band 91, Nr. 2264, 20. März 1913, S. 57 – 58.

18), konnte mit ihrem Ehemann im Jahr 1933 künstlich radioaktive Elemente erzeugen. Im Jahr 1934 bewiesen sie experimentell die im Jahr 1928 von Paul Adrien Maurice Dirac (1902 – 1984) und Carl David Anderson (1905 – 1991) das hypothetisch postulierte Positron (β^+ -Strahlung). Seitdem wurde es zwei Arten von β -Strahlungen festgestellt: β^+ - und β^- -Strahlungen.

Im Jahr 1980 sagten die rumänischen Physiker Aureliu Emil Săndulescu (1932 – 2019) und Dorin N. Poenaru (1936) mit ihrem aus Deutschland stammenden Kollegen Walter Greiner (1935 – 2016) „aufgrund theoretischer Überlegungen eine neue Art der Radioaktivität voraus, bei der Kerne emittiert werden, die schwerer als α -Teilchen sind. Der erste experimentelle Nachweis eines solchen Clusterzerfalls gelang H. J. Rose und George Arnold Jones 1983 an der University of Oxford. Sie beobachteten, dass ^{223}Ra , normalerweise ein α -Strahler, sehr selten unter Aussendung eines ^{14}C -Kerns zu ^{209}Pb zerfällt“⁶¹ (siehe **Clusterzerfall**).

21. **Radionuklid**: Nuklid, das radioaktiven Zerfall zeigt. Siehe auch **Nuklid**.
22. **Sekunde**: „Die Einheit *Sekunde* mit dem „Einheitenzeichen [s], ist die SI-Einheit der Zeit. Sie ist definiert, indem für die Cäsiumfrequenz $\Delta\nu$, der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms 133, der Zahlenwert 9.192.631.770 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit [Hz], die gleich $[\text{s}^{-1}]$ ist. Das heißt, eine *Sekunde* ist gleich der Dauer von 9.192.631.770 Schwingungen der Strahlung, die der Energie des Übergangs zwischen den zwei Hyperfeinstruktur-niveaus des ungestörten Grundzustands im ^{133}Cs -Atom entspricht“. Nach den „neuen Definitionen im Internationalen Einheitensystem (SI) 2019“⁶².
23. **Zerfallskonstante**: Siehe **Aktivität**.
24. **Zerfallsgesetz**: Siehe **Aktivität**.
25. **Zyklotron**: „Das ist ein Hochfrequenzkreisbeschleuniger für schwere geladene Teilchen wie Protonen, Deuteronen, Alphateilchen oder Ionen. Die Idee für das Zyklotron geht auf den amerikanischen Physiker Ernest Orlando Lawrence (1901 – 1958) und Nobelpreisträger für Physik 1939 zurück, „für

⁶¹ Textquelle online abrufbar unter: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Radioaktivität> (Zugang am 05.01.2021).

⁶² Text online abrufbar unter:

https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/countdown_new_si/Lesezeichen_zu_m_neuen_SI.pdf (Zugang am 05.01.2021).

die Erfindung und Entwicklung des Zyklotrons und die dadurch erzielten Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf künstliche radioaktive Elemente“ (Abb. 22)⁶³. Das erste funktionierende Zyklotron wurde 1931 gebaut.

Zyklotrons dienen heute vor allem der Produktion kurzlebiger Radionuklide für nuklearmedizinische Zwecke, insbesondere zur Herstellung von Positronenstrahlern, zur Neutronenproduktion über Kernreaktionen, zur Sterilisation von Materialien, zur Polymerisation von Kunststoffen und als vielseitige

Strahlungsquelle für die Forschung. Wegen der starken Coulombabstoßung zwischen den geladenen Beschussteilchen und den Atomkernen, die zu Radionukliden umgewandelt werden sollen, liegen die Reaktionsschwellen vieler Protonenreaktionen bei etwa 20 – 30 MeV. Es werden daher wesentlich höhere Protoneneinschussenergien benötigt, als sie mit einfachen Zyklotrons erreicht werden können. Dies erforderte die Konstruktion höherenergetischer relativistischer Zyklotron Varianten. Zyklotrons wurden in der Vergangenheit meistens nicht unmittelbar für strahlentherapeutische Zwecke eingesetzt. In letzter Zeit häufen sich jedoch auch die Anwendungen schwerer geladener Teilchen für die Behandlung von Tumoren. Die wichtigste Strahlungsart in diesem Zusammenhang sind die Protonen, die ein für die Beschleunigung optimales Ladungszahl-Massenzahlverhältnis aufweisen. Ihre Tiefendosiskurve hat die Form einer Bragg-Kurve. Sie weist den höchsten Energietransfer am Ende der Teilchenbahn auf und ist deshalb besonders günstig für die Schonung gesunden Gewebes. Die relative Biologische Wirksamkeit der in den Tumoren – also am Ende der Protonen-Tiefendosiskurven wechselwirkenden Protonen – wird im Mittel zu etwa RBW = 1,1 abgeschätzt. Das einfachste Zyklotron besteht aus einem dosenförmigen Vakuumgefäß mit Durchmessern von wenigen Zentimetern bis einigen Metern. In ihm befinden sich zwei halbkreisförmige Hohlelektroden, die auf ihrer geraden Seite offen sind. Sie werden als Duanten oder anschaulicher ihrer Form



Abb. 22: LAWRENCE

⁶³ Bildquelle und Textquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 09.01.2021).

wegen als "DEEs" bezeichnet. In der Mitte zwischen den "DEEs" befindet sich eine Quelle bzw. eine Zufuhr für die zu beschleunigenden Teilchen. Die ganze Anordnung befindet sich in einem starken, homogenen Dipolmagnetfeld, dessen Feldlinien die Hohlelektroden in der Mitte senkrecht durchsetzen. Legt man an die beiden Elektroden eine hochfrequente elektrische Wechselspannung an, bildet sich im Spalt zwischen den "DEEs" eine beschleunigende elektrische Feldstärke aus. Elektrisch geladene Teilchen, die diesen Spalt durchfliegen, werden bei richtiger Phase bei jedem Durchlaufen des Spaltes vom elektrischen Wechselfeld beschleunigt. Anschließend bewegen sie sich mit konstanter Bewegungsenergie auf Kreisbahnen bis zur nächsten Beschleunigung durch die Hochfrequenz. Dadurch nimmt die Geschwindigkeit der Teilchen und mit ihr auch der Radius der Kreisbahnen zu (Abb. 23). Die Teilchenbahnen werden zu Spiralen mit zunehmendem Bahnradius. Wenn sie die Grenzen des Führungsmagneten erreicht haben, werden sie durch die an eine "Auslenk-Elektrode" (Deflektor) angelegte Spannung oder durch einen Bereich mit abgeschirmtem Magnetfeld aus der Kreisbahn entfernt und verlassen das Zyklotron tangential.

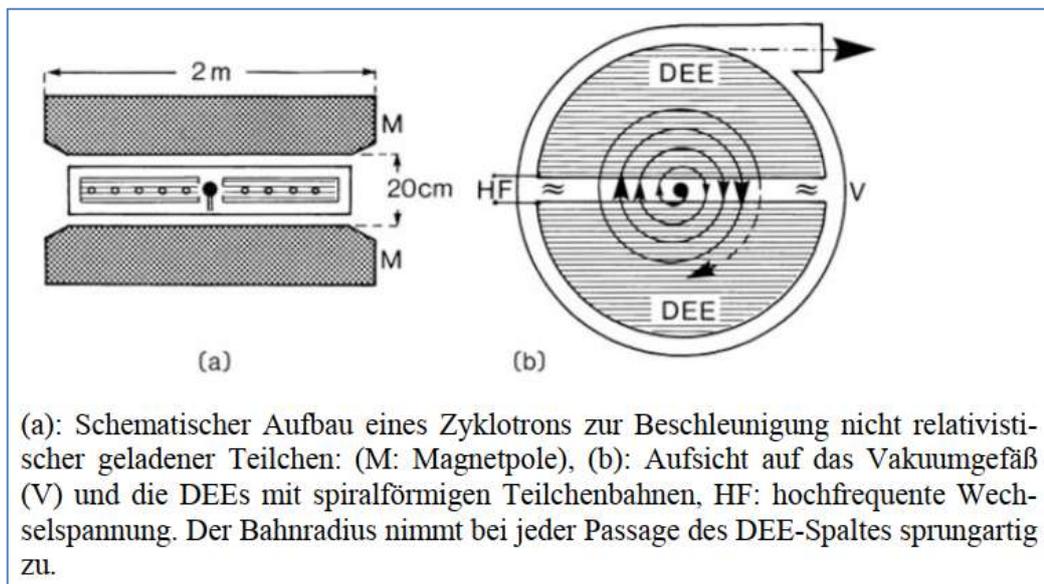


Abb. 23: ZYKLOTRON

BILDQUELLE: HANNO KRIEGER (2012, 272)

Die Hochspannung an den DEEs ist wegen der Gefahr elektrischer Überschläge auf etwa 100 kV bis maximal 200 kV bei größeren Kammerdurchmessern beschränkt. Damit ein einfach elektrisch geladenes Teilchen wie ein Proton oder ein Deuteron eine Bewegungsenergie von 10 MeV erreicht, benötigt das Teilchen unter optimalen Bedingungen also $10\text{MeV}/0,1\text{MeV} = 100$ Beschleunigungsvorgänge im DEE-Spalt. Dies entspricht wegen der zweifachen Beschleunigung pro Umlauf 50 vollständigen Umläufen. Bei kleineren Beschleunigungsspannungen benötigt man entsprechend höhere Umlaufzahlen. Den Bahnradius r [m] berechnet man aus der Lorentzkraft und der Zentrifugalkraft im Magnetfeld zu“ (Krieger 2013, 171 ff.)⁶⁴:

$$r = \frac{m \cdot v}{Q \cdot B} \quad [\text{m}]$$

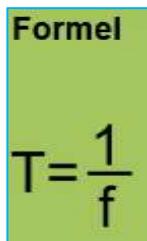
m ... Teilchenmasse [kg]

v ... Teilchengeschwindigkeit [m/s]

Q ... Elektrische Ladung des Teilchens [C]

B ... Magnetische Flussdichte [T]

Die Umlauffrequenz ω [s^{-1}] des Teilchens (die Kreisfrequenz ω) erhält man aus mit $\omega = v/r$ zu:



Formel

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{Q \cdot B}{m} \quad [\text{s}^{-1}]$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{Q \cdot B}{2\pi m} \quad [\text{Hz}]$$

T ... Periodendauer [s]

f ... Frequenz [Hz]

Somit ist ein Zyklotron ein Kreisbeschleuniger mit zeitlich variablem Magnetfeld. Geladene Teilchen werden im Zyklotron mit Hilfe eines Magnetfelds spiralförmig beschleunigt und dann auf das gewünschte Target gelenkt. So können direkt Radionuklide direkt hergestellt werden.

· **WIESO IST DAS ZYKLOTRON IN DIESER ARBEIT WICHTIG?**

¹⁸F WIRD IM ZYKLOTRON ERZEUGT (Abb. 24)

⁶⁴ Krieger, Hanno: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. Wiesbaden: Springer 2013.

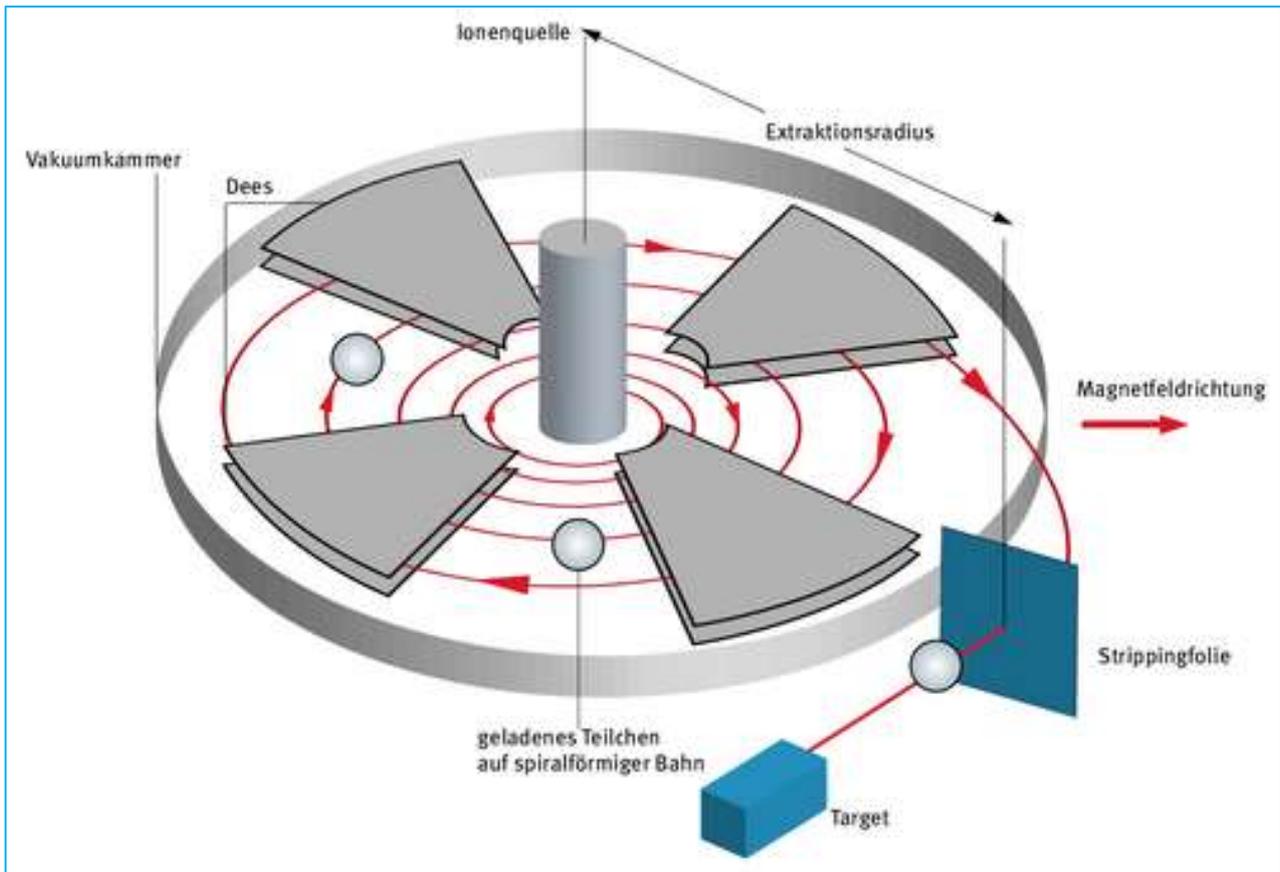


Abb. 24: „IN EINEM ZYKLOTRON WERDEN GELADENE TEILCHEN WIE ETWA WASSERSTOFFIONEN IN EINEM MAGNETFELD BIS AUF NAHEZU LICHTGESCHWINDIGKEIT BESCHLEUNIGT UND AUF EIN ZIELOBJEKT (TARGET) GESCHOSSEN. BEI DEM TARGET KANN ES SICH ZUM BEISPIEL UM EINE FOLIE AUS MOLYBDÄN HANDELN, ODER AUCH UM WASSER, DAS MIT RADIOAKTIVEN SAUERSTOFF-18-ISOTOPEN ANGEREICHERT IST. BESCHLEUNIGT WERDEN DIE TEILCHEN, INDEM SIE DURCH METALLKAMMERN FLIEGEN, AN DIE EINE ELEKTRISCHE SPANNUNG ANGELEGT IST. DIESE KAMMERN WERDEN DEES GENANNT. KURZ VOR DEM TARGET PASSIEREN DIE TEILCHEN EINE STRIPPING-FOLIE. HIER WERDEN NEGATIV GELADENEN IONEN ELEKTRONEN ENTZOGEN, SODASS SIE ZU POSITIV GELADENEN IONEN WERDEN“

BILDQUELLE UND TEXT: KERSTIN BECKERT 15.03.2012

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/radiopharmaka/pet-und-spect> (ZUGANG AM 09.01.2021)

WIESO IST DAS ZYKLOTRON IN DIESER ARBEIT WICHTIG?

ERZEUGT WIRD ^{18}F IM ZYKLOTRON DURCH BESCHUSS VON ^{18}O (MEIST ALS ^{18}O -WASSER, DAS HEIßT H_2^{18}O) MIT PROTONEN UNTER AUSSENDUNG VON NEUTRONEN

Die **innere Konversion** wird nach Hanno Krieger geschildert (Krieger 2013, 118 ff.)⁶⁵

Der Text dient zum Verständnis des ^{99m}Tc-Zerfall aus dem ⁹⁹Mo

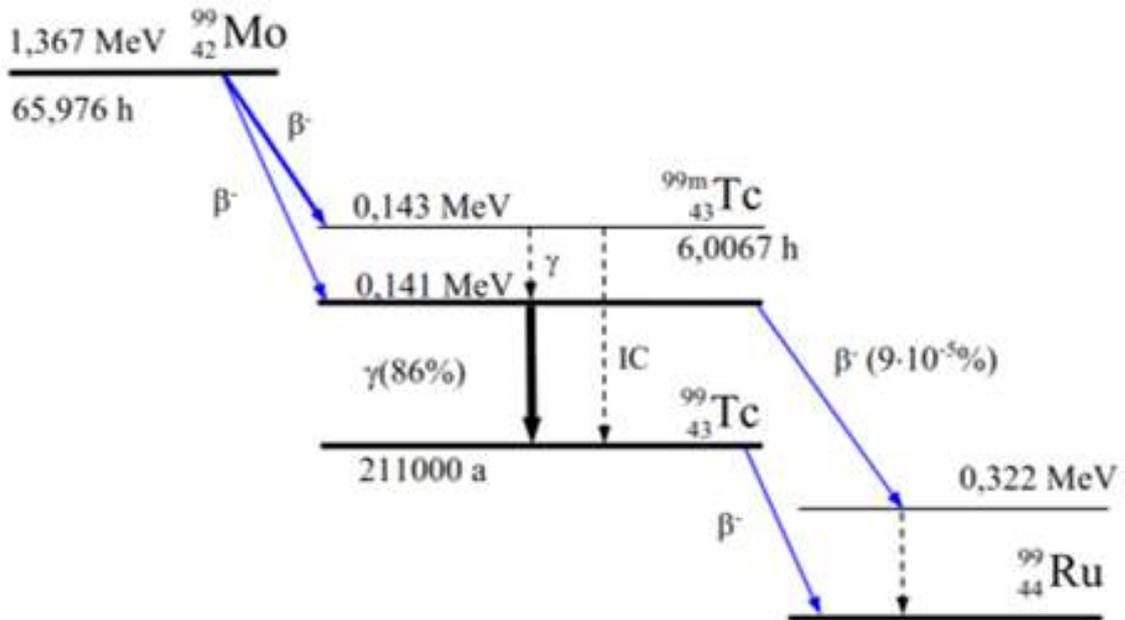
^{99m}Tc wird in **SPECT** eingesetzt

Sind die Wahrscheinlichkeiten für Gammaemissionen angeregter Kernzustände wegen komplizierter Nukleonenkonfigurationen oder geringer Anregungsenergien sehr klein, kann der Atomkern durch einen weiteren Mechanismus auch ohne Photonenemission überschüssige Energie abgeben. Dabei wird die Anregungsenergie unmittelbar auf ein inneres Hüllenelektron übertragen. Dieser Prozess ist vor allem an K- und L-Elektronen beobachtet worden und wird als **Innere Konversion** (engl.: *inner conversion, IC*) bezeichnet. Innere Konversion tritt häufig bei hohen Kernladungen auf, da bei solchen Nukliden durch die starke Coulombanziehung die inneren Elektronenverteilungen dicht an der Kernoberfläche oder teilweise innerhalb der Atomkerne verlaufen und somit dort eine höhere lokale Elektronendichte als bei leichten Kernen besteht. Diese inneren Elektronen haben dann eine erhöhte Aufenthaltswahrscheinlichkeit am Kernort, so dass sie die Anregungsenergie unmittelbar vom Kern übernehmen können. Wie beim Gammazerfall ändern sich auch bei der Inneren Konversion weder die Nukleonenzahl A noch die Ordnungszahl Z oder die Neutronenzahl N . Der Mutterkern verliert lediglich Anregungsenergie und ändert dadurch seinen Massendefekt. Die Elektronen aus der direkten Kern-Hülle-Energieübertragung werden als **Konversionselektronen** bezeichnet. Ihre Energien entsprechen der Differenzenergie des Kernübergangs vermindert um die Bindungsenergie des freigesetzten Elektrons. Für die Energie der Konversionselektronen gilt daher der folgende Zusammenhang:

$$E_e = E_\gamma - E_{bind,e}$$

Die Energieverteilungen der Konversionselektronenenergien sind deshalb diskrete Linienspektren. Sie unterscheiden sich also von den kontinuierlichen Energiespektren der Betaumwandlungen. Die Energien der Konversionselektronen sind wie die Gammaenergien charakteristisch für ein bestimmtes Nuklid.

⁶⁵ Krieger, Hanno: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. Wiesbaden: Springer 2013.



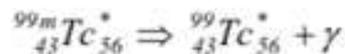
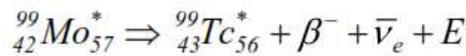
Vereinfachtes Zerfallsschema des Molybdän-99. Es zerfällt mit 66 h Halbwertszeit in angeregte Zustände des Technetium-99. Die Betaübergänge bevölkern zu etwa 14% den Anregungszustand des ^{99}Tc bei 140 keV und zu ca. 86% den metastabilen Zustand $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Dieser hat eine Anregungsenergie von 143 keV und zerfällt über einen Zwischenzustand durch Gammaemission und Innere Konversion mit einer Halbwertszeit von 6,01 h in den instabilen Grundzustand des ^{99}Tc (β^- -Zerfall in Ruthenium-99 mit der Halbwertszeit von 211000 a).

Innere Konversion tritt als Konkurrenz zum Gammazerfall auf, wenn dieser aus den oben genannten Gründen behindert ist. In einem Ensemble radioaktiver Kerne findet man neben den Zerfällen durch Innere Konversion auch die Gammaumwandlungen der angeregten Mutterkernide. An einem bestimmten Kernindividuum können Innere Konversion und Gammazerfall natürlich nicht gleichzeitig stattfinden, da ein einzelner Atomkern nur auf die eine oder die andere Art zerfallen kann. Das Verhältnis der Wahrscheinlichkeit für eine Innere Konversion zur Wahrscheinlichkeit für einen Gammazerfall aus dem gleichen angeregten Zustand wird als **Konversionskoeffizient α** bezeichnet. Experimentell wird dieser als Verhältnis der Anzahl der pro Zeitintervall emittierten Konversionselektronen N_e und der Zahl der Gammaquanten N_γ bestimmt. Er wird getrennt für die verschiedenen Elektronenschalen angegeben und erhält zur Kennzeichnung als Index die jeweilige Schalenkennung ($\alpha_K, \alpha_L, \dots$). K-Konversion

nimmt mit Z^3 zu und mit $1/E_\gamma$ ab. Konversionskoeffizienten sind unter anderem in ([Lederer], [Hager-Seltzer]) als Funktion der Gammaenergie, Multipolarität und der Ordnungszahl tabelliert.

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma}$$

Innere Konversion ist übrigens eine wirkliche Alternative zur Gammaemission, es wird dabei also nicht etwa erst ein reelles Gammaquant emittiert, das dann mit einem der Hüllenelektronen, z. B. über einen Photoeffekt wechselwirkt. Einen direkten Beweis der "Eigenständigkeit" der Inneren Konversion liefert das Zerfallsschema des ^{99}Mo (Fig. 3.16), dessen Tochternuklid ^{99}Tc eine wichtige Rolle in der nuklearmedizinischen Diagnostik spielt. Es wird dort als so genannter **Technetium-Generator** zur Gewinnung des metastabilen gammastrahlenden $^{99\text{m}}\text{Tc}$ verwendet.



Die Halbwertszeit des metastabilen Zustandes des ^{99}Tc ist geringfügig beeinflussbar durch die chemische Verbindung, in der das Technetium vorliegt, da die Zerfallswahrscheinlichkeit für die Innere Konversion von der Elektronendichteverteilung am Kernort abhängt und diese wiederum von der chemischen Bindung. Die Wahrscheinlichkeit des konkurrierenden Gammazerfalls ist dagegen völlig unabhängig von der Hüllenstruktur und kann die mit der chemischen Verbindung variierende Halbwertszeit des metastabilen Zustands nicht erklären. Ein besonders drastisches Beispiel ist die Variation der Halbwertszeit des ^7Be mit der chemischen Form [Chih-An Huh 1999]. Sie variiert je nach chemischer Bindung zwischen 53,416 d und 54,226 d. Bei der Inneren Konversion entstehen wie beim Elektroneneinfang Elektronenlücken in den inneren Schalen der Atomhülle. Diese werden sukzessiv von Elektronen der äußeren Elektronenschalen aufgefüllt. Dabei wird wie üblich die Bindungsenergiedifferenz der nach innen fallenden Elektronen in charakteristische Photonenstrahlung oder in kinetische Energie von Augerelektronen umgewandelt. Innere Konversion ist also grundsätzlich mit der Emission von Hüllenstrahlung verbunden.

Eine weitere Alternative zur Gammaumwandlung ist die **innere Paarbildung**, die bei Überschreiten der Paarbildungsschwelle von 1022 keV für die Photonenenergie auftreten kann, wenn die Gammaumwandlung wegen der Drehimpulsverhältnisse behindert ist. Dabei wird im Inneren des Atomkerns ähnlich wie bei der Paarbildung in der Atomhülle spontan ein Elektron-Positron-Paar gebildet. Der Prozess ist selten. Seine Wahrscheinlichkeit nimmt anders als bei der inneren Konversion mit der Gammaenergie zu.

DIAGNOSE IN DER NUKLEARMEDIZIN MITTELS PET: ^{18}F -FDG IM ÜBERBLICK

Die Positronenemissionstomografie (**PET**) wird in der Nuklearmedizin zur Erzeugung von Schnittbildern von bestimmten Geweben oder Organen eines lebenden menschlichen Körpers, um eine bestimmte Krankheit eines Patienten zu diagnostizieren, wie u. a. Karzinom. Daher wird eine **PET** ein *funktionelles bildgebendes Verfahren* oder ein *Schnittbildverfahren* bezeichnet.

Um ein klares Bild eines kranken Gewebes oder Körperorgans (z. B. Diagnose von Krebserkrankung) machen zu können, wird bei der diagnostischen Untersuchung ein so genanntes *Radiopharmakon* benutzt. Ein Radiopharmakon wird auch in Englisch *Tracer* genannt, was *Spur* bedeutet. Tatsächlich handelt es sich um einen radioaktiven markierten Stoff, der in der Nuklearmedizin, sowie in der Atomphysik und der Kernphysik *Radionuklid* genannt, in den Körper eines Patienten gleich unmittelbar vor der Untersuchung in einer sehr winzigen *Spur* in die Vene injiziert wird. Das heißt, die injizierte Radionuklidosis schädigt die Gesundheit nicht, da diese radioaktiv markierte Substanz innerhalb von einigen Tagen völlig von dem Körper durch die Nieren ausgeschieden wird. Das wird in der vorliegenden Abhandlung noch näher eingehend auseinandergesetzt.

In der **PET** wird im Grunde genommen ^{18}F -Fluordesoxyglucose (Abb. 25 und 26) an den Patienten verabreicht (intervenös injiziert).

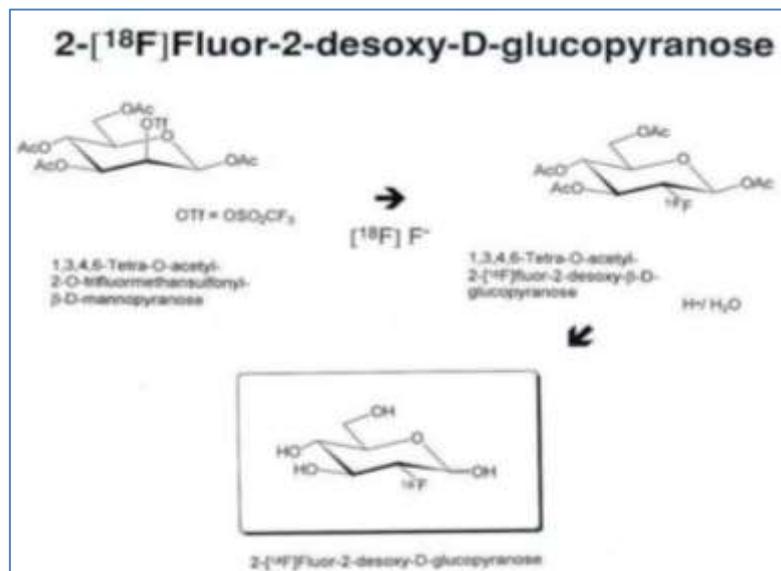


Abb. 25: ^{18}F -FLUORDESOXYGLUCOSE

Bildquelle: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Fluordesoxyglucose>

(Zugang am 09.01.2021)

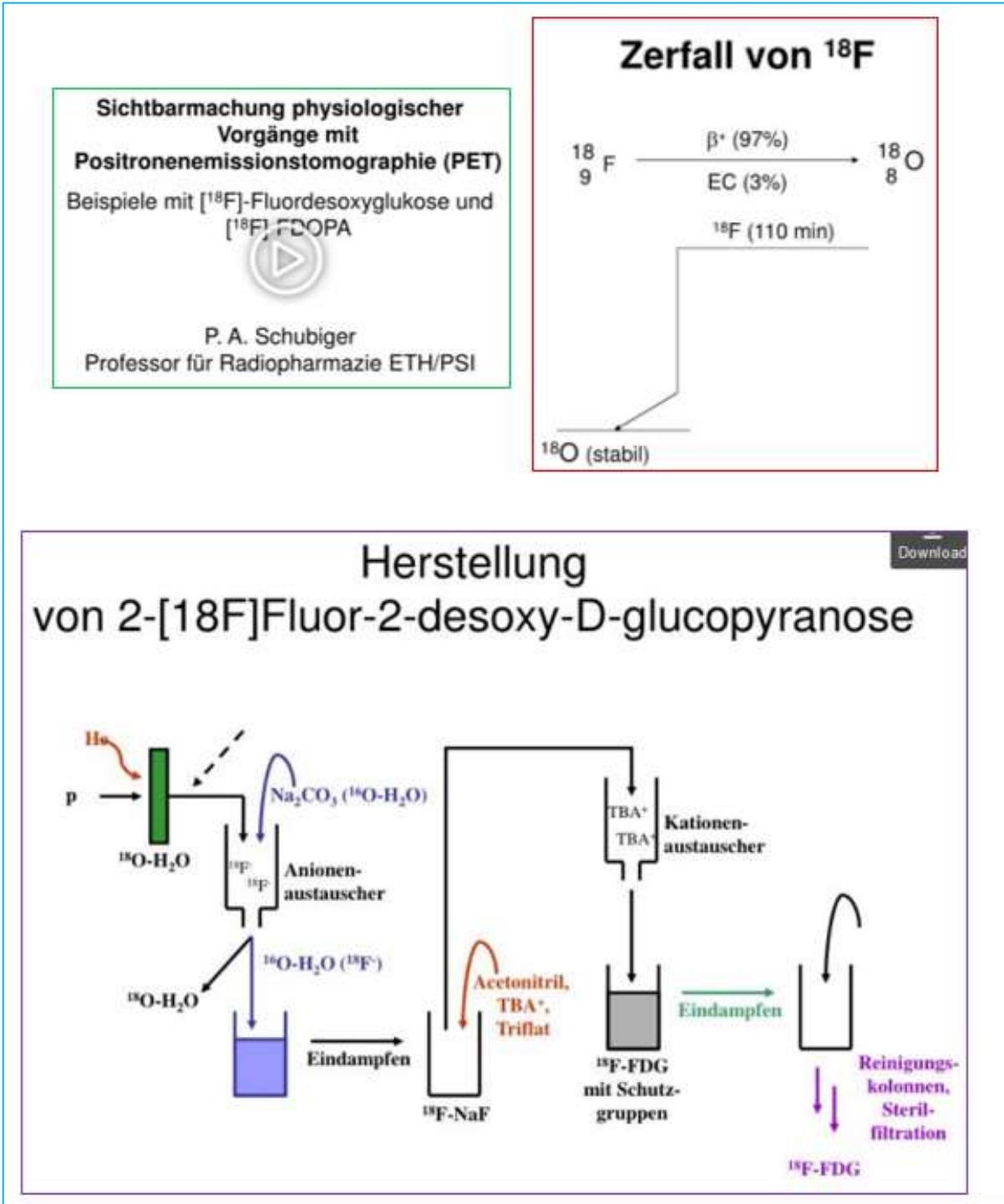


Abb. 26: ZERFALL UND HERRSTELLUNG VON ¹⁸F

FÜR POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAFIE (PET) WERDEN POSITRONENSTRAHLER EINGESETZT, WIE U. A.

¹⁸F, ⁶⁸GA, ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O, ³⁰P

DIESE CHEMISCHEN ELEMENTE SIND INSTABILE ISOTOPE UND ZERFALLEN IN BESTIMMTEN HALBWERTZEITEN

IN DER VORLIEGENDEN ARBEIT WIRD ¹⁸F BETRACHTET, DA DIESES RADIOAKTIVE ELEMENT HAUPTSÄCHLICH IN DER

DIAGNOSE DER NUKLEARMEDIZIN ANGEWENDET WIRD

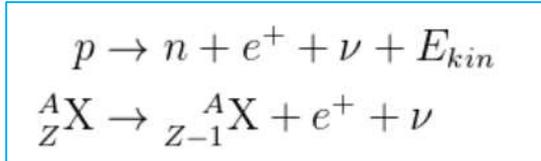
Bilderquelle: PROF. P. A. SCHUBIGER

<https://www.slideserve.com/nibaw/center-for-radiopharmaceutical-science-of-eth-psi-and-usz>

(Zugang am 09.01.2021)

Jedes radioaktive chemische Element gehorcht dem so genannten *Zerfallsgesetz*. Das Radiopharmakon, das in die Vene des Patienten gleich unmittelbar vor der diagnostischen Untersuchung injiziert wird, hat eine sehr kurzeffektive *Halbwertszeit*. Eine sehr geringe *Dosis* des Radiopharmakons hat eine große Wirksamkeit auf die Diagnostik und zeigt eindeutige Bilder einer bestimmten Krankheit (z. B. Tumor). Allerdings weist das Radiopharmakon keineswegs Schädigungen hin, da eine minimal winzige *Dosis* intervenös verabreicht wird.

Das chemische Element Fluor ^{18}F ist radioaktiv. Es emittiert beim Zerfall ein *Positron*. Auf Grund des Protonenüberschusses im Fluoratomkern und einer bestimmten Energiedifferenz zwischen Mutter- und Tochternuklid von mindestens 1,02 MeV, zerfällt ein Proton unter Aussendung eines Positrons und eines Neutrinos in ein Neutron, das im Atomkern des chemischen Elements Fluor ^{18}F bleibt.

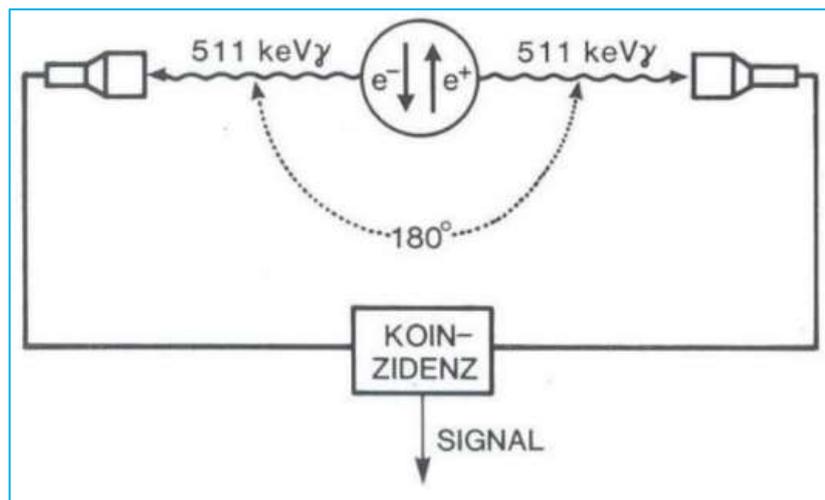


Das *Positron* ist das Antimaterieteilchen des Elektrons und stößt nach kurzer Wegstrecke mit dem Elektron in eine Vernichtungsstrahlungsenergie 511 keV (0,511 MeV) über, die diametral (etwa 180°) abgestrahlt wird (Abb. 27).



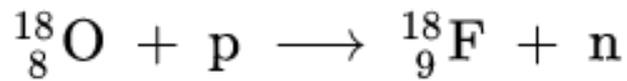
Das begünstigt die apparative Konstruktion und Detektion mittels γ -Kamera (*Gammakamera*), da nur jene Detektoren ansprechen, die in Koinzidenz geschaltet sind (Abb. 27).

Abb. 27: DETEKTION MITTELS γ -KAMERA (GAMMAKAMERA)



Durch und nach der mathematischen Transformation des verstärkten Signals kann auf den Zerfallsort im Körper geschlossen werden.

Erzeugt wird ^{18}F im *Zyklotron* durch Beschuss von ^{18}O (meist als ^{18}O -Wasser, das heißt H_2^{18}O) mit Protonen unter Aussendung von Neutronen:



Diese Nuklearreaktion wird auch so angegeben: $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$.

^{18}F wird als Anion isoliert und wird meist in nukleophilen Substitutionsreaktionen umgesetzt, wie eben z. B. bei der Herstellung von ^{18}F -FDG (Fluor-18-markierte **F**luor**d**esoxy**g**lucose, FDG). Auch elektrophile Additionsreaktionen sind mit ^{18}F -Anion möglich. Die Markierung folgt dem Prinzip der direkten chemischen Synthese. Als Ausgangsverbindungen dienen, je nach vorhandenen weiteren Funktionalitäten im Molekül, geschützte und mit guten Abgangsgruppen versehene **Präkursoren** wie z. B. die Tetra-O-acetyl-2-O-trifluormethansulfonylmannopyranose für da ^{18}F -FDG (Abb. 28).

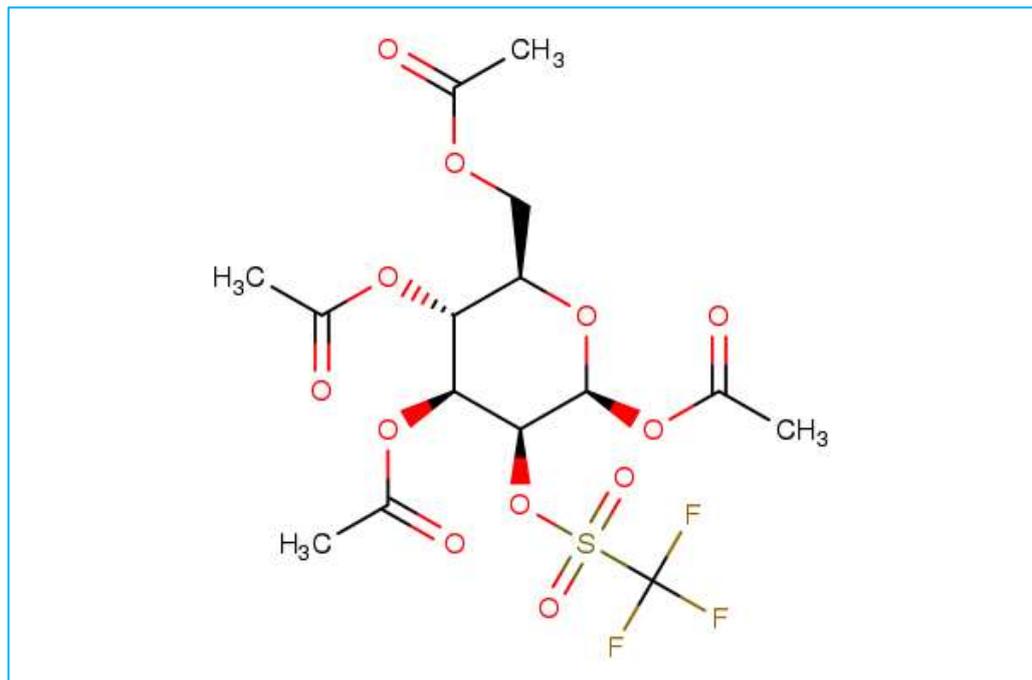


Abb. 28: TETRA-O-ACETYL-2-O-TRIFLUORMETHANSULFONYLMANNOPYRANOSE

1. HISTORISCHE EINLEITUNG ZU PET UND SPECT

Der Entwurf der Positronenemissionstomografie (**PET**) wurde bereits Anbeginn der 1950er Jahren von dem amerikanischen Physiker und Nuklearmediziner David E. Kuhl (1929 – 2017) dargestellt. Er ist der erste Pionier in Bezug auf die Positronenemissionstomografie und das Bildgebungsverfahren in der Nuklearmedizin.

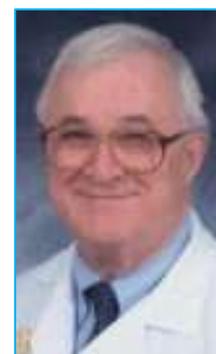


Abb. 29: KUHLE

„In den 1980er Jahren rekrutierte Herr Professor Kuhl (Abb. 29)⁶⁶ eine außergewöhnliche Forschergruppe nach Los Angeles, um die gerade neu etablierte Positronenemissionstomografie in die Klinik zu transferieren. In dieser Gruppe arbeiteten neben Heinz Schelbert auch Michael Phelps, Edward Hoffman sowie Henry Huang. Professor Kuhl persönlich engagierte sich besonders für die funktionelle Bildgebung der Hirnfunktion. Der Einsatz von Fluor-18-deoxyglukose (FDG) bei Epilepsie und der Alzheimer'schen Erkrankung geht auf seine Initiative zurück. Bereits in Pennsylvania hat er mit seinen Kollegen die erste Fluor-18-deoxyglukose (FDG)-Messung, damals noch mit einer **SPECT**-Kamera, durchgeführt. Dank des synergetischen Wettstreits zwischen David Kuhl und Michael Phelps entwickelte sich die Nuklearmedizin in Los Angeles zu einer der aktivsten Forschungseinheiten auf dem Gebiet der molekularen Bildgebung. Neben der Positronenemissionstomografie führte Professor Kuhl intensiv seine Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der **SPECT** fort. ... Herr Professor Kuhl hat in seiner langjährigen Karriere wesentlich zur Entwicklung der Nuklearmedizin beigetragen und durch seine bahnbrechenden Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der **SPECT** und **PET** unser Fachgebiet entscheidend vorangetrieben“ (Markus Schwaiger 2017)⁶⁷.

Die Arbeiten von William H. Sweet (1910 – 2001) und Gordon L. Brownell (1922 – 2008) am *Massachusetts General Hospital* trugen maßgebend zur Entwicklung der **PET**-Technologie bei und umfassten die erste Demonstration der Strahlung für die medizinische Bildgebung (Sweet 1951, 875)⁶⁸.

⁶⁶ Bildquelle online abrufbar unter:

www.nuklearmedizin.de/leistungen/news/newsdetail.php?newsId=229 (Zugang am 22.12.2020).

⁶⁷ Schwaiger, Markus: *Professor David E. Kuhl verstorben*. In: Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. am 20. Juni 2017. Text online abrufbar unter: www.nuklearmedizin.de/leistungen/news/newsdetail.php?newsId=229 (Zugang am 22.12.2020).

⁶⁸ Sweet, William H.: *The use of nuclear disintegration in the diagnosis and treatment of brain tumor*. In: *New England Journal of Medicine* (1951). 245: 875 – 878.

Vgl. Text: *Nuklearmedizinische Bildgebung. Positronenemissionstomographie*. Text online abrufbar unter: www.epileptologie-bonn.de/cms/upload/homepage/lehnertz/06-SPECT-PET.pdf (Zugang am 22.12.2020).

„1953 beschrieben William H. Sweet (Abb. 30)⁶⁹ und Gordon L. Brownell (Abb. 31)⁷⁰ vom *Massachusetts General Hospital Boston* das erste Positronenbildgebungsgerät und den ersten Versuch, dreidimensionale Daten in der Positronendetektion in ihrem Papier mit dem Titel *Lokalisierung von Hirntumoren mit Positronenemitter*“⁷¹.



Abb. 31: BROWNELL



Abb. 30: SWEET

„Das war der Beginn der **PET**“⁷².

Kurze retrospektive Geschichte: Ein siebenjähriges Mädchen aus dem Bundesstaat Rhode Island (der Vereinigten Staaten von Amerika) hatte einen Gehirntumor. Im Jahr 1953 fuhren die Eltern mit dem Mädchen nach Boston. Sie legten etwa 110 Kilometer zurück, um einen Neurologen zu besuchen, da sie glaubten, ihre Tochter hätte eine Nervenerkrankung. Die Diagnose beim Neurochirurgen am *Massachusetts General Hospital* erbrachte keine Ergebnisse und der Arzt fragte seinen Kollegen Gordon L. Brownell, ob eine Behandlung im Bereich der Nuklearmedizin möglich wäre.

Dr. Brownell entwickelte eine Scanmaschine, wobei die Position des Tumors sichtbar wurde (Abb. 33). Der Neurochirurg operierte erfolgreich das Mädchen, wobei er die Krebsgeschwulst entfernte. Blitzartig entwickelte sich diese Scanmaschine von Dr. Brownell zu einer Positronenemissionstomografie und wurde deshalb **PET-Scan** (dann etwas später *Positronenemissionsbildgebung*) genannt (Abb. 33).

Das erste Mal in der Medizingeschichte wurde einen radioaktiven *Tracer* verwendet, um die Stellung von dem Geschwür im Gehirn (Hirntumor) ganz genau zu bestimmen. Dr. Brownell war nicht nur Arzt, sondern auch Physiker, tätig in der Abteilung für Radiologie und Nuklearmedizin am *Massachusetts Institute of Technology*. Seitdem wurde **PET** zur Behandlung der Krebspatienten eingesetzt.⁷³

⁶⁹ Bildquelle online abrufbar unter: www.epileptologie-bonn.de/cms/upload/homepage/lehnertz/06-SPECT-PET.pdf (Zugang am 22.12.2020).

⁷⁰ Ebd.

⁷¹ Sweet, William H.; Brownell, Gordon L.: *Localization of brain tumors with positron emitter*. In: *Nucleonics XI* (1953). S. 40 – 45.

⁷² Textquelle online abrufbar unter: *The Beginning of Positron Emission Tomography (PET). History of Information. Gordon L. Brownell, Professor emeritus, 86 | MIT News | Massachusetts Institute of Technology*.

Text online abrufbar unter:

http://archive.boston.com/news/education/higher/articles/2008/11/23/gordon_l_brownell_invention_evoled_into_the_pet_scan_at_86/ (Zugang am 22.12.2020).

⁷³ Die Geschichte ist online abrufbar unter: techtalk53-9.pdf (mit.edu) (Zugang am 22.12.2020).

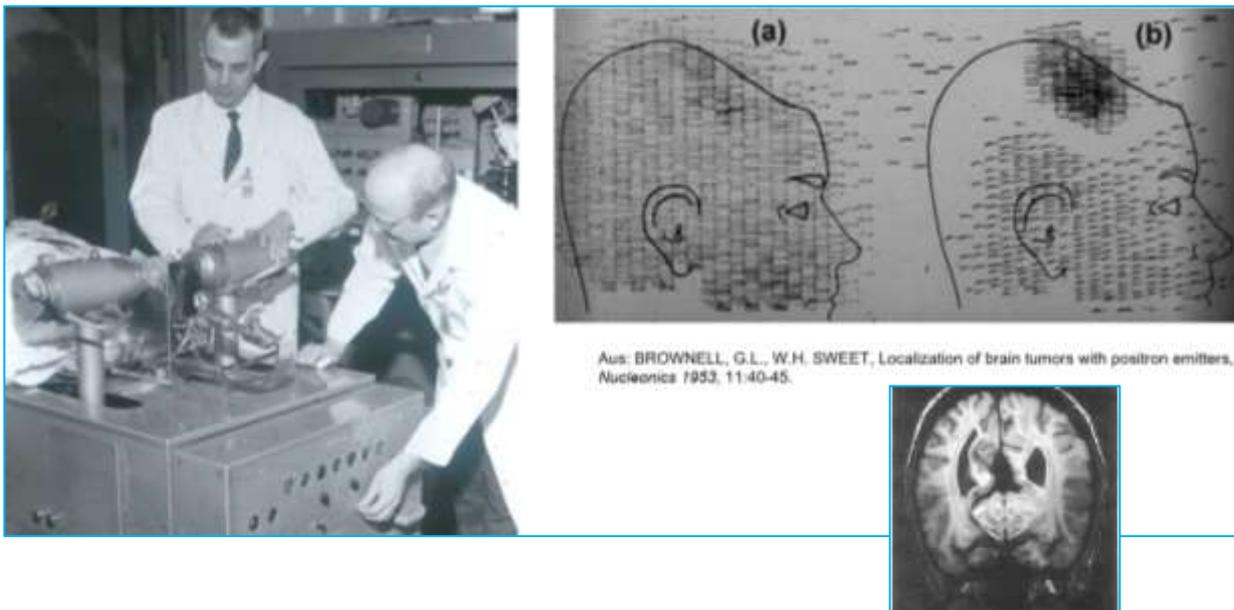


Unmittelbar danach entwickelten William H. Sweet (Abb. 30) und Gordon L. Brownell (Abb. 31) die *Positronenemissionsbildgebung* sowie die *Positronenemissionstomografie* gemeinsam und schrieben darüber einen Artikel (Abb. 33)⁷⁴.



Im Jahr 1960 entwickelten David E. Kuhl und Roy Q. Edwards den ersten bildgebenden Scanner *Mark IV-SPECT* mit γ -Kamera, die von dem amerikanischen Biophysiker und Elektrotechniker Hal Oscar Anger (1920 – 2005) bereits im Jahr 1957 entwickelt wurde. Deshalb bezeichnet man die im nuklearmedizinischen diagnostischen eingesetzten Gerät γ -Kamera (*Gammakamera*) auch „Anger Kamera“ (Abb. 32)⁷⁵.

Abb. 32: HAL OSCAR ANGER (OBEN) UNTERSUCHT EINE PATIENTIN MIT SEINER γ -KAMERA (UNTEN)



Aus: BROWNELL, G.L., W.H. SWEET, Localization of brain tumors with positron emitters. Nucleonics 1953, 11:40-45.

**Abb. 33: BROWNELL UND SWEET BEI DER ENTWICKLUNG DER PET 1953 (LINKS)
DIE GEZEICHNETEN BILDER (RECHTS) ZEIGEN DIE POSITION DES TUMORS BEI DEM MÄDCHEN**

⁷⁴ Sweet, William H.; Brownell, Gordon L.: *Localization of brain tumors with positron emitter*. In: Nucleonics XI (1953) 1953 40 – 45.

⁷⁵ Bildquelle online abrufbar unter: <https://vanderbiltnuclearmedicine.com/era-2/path-a-nuclear-instrumentation-developments/> (Zugang am 22.12.2020).



Abb. 34: VON LINKS NACH RECHTS

MICHAEL TER-POGOSSIAN – MICHAEL EPIC PHELPS – EDWARD JOSEPH HOFFMAN

Im Jahr 1975 wurden tomografische Bildgebungstechniken (CT)⁷⁶ von dem amerikanischen Physiker Michael Ter-Pogossian (1925 – 1996), dem amerikanischen Mathematiker und Chemiker Michael Epic Phelps (geboren 1939) sowie dem amerikanischen Chemiker Edward Joseph Hoffman (1942 – 2004) durchgreifend weiterentwickelt (Abb. 34 und 35)⁷⁷.

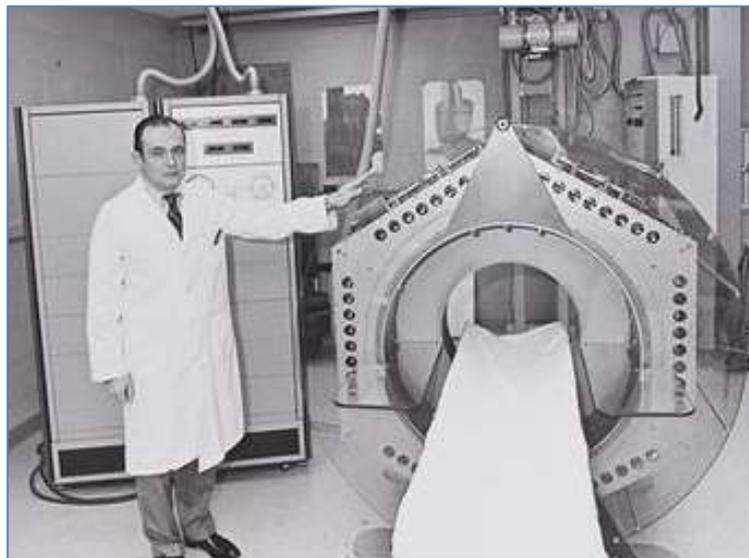


Abb. 35: TER-POGOSSIAN POSIERTE NEBEN EINEM DER ERSTEN PET-SCANNER IM JAHR 1975

⁷⁶ **Computed Tomography (CT) Imaging.**

⁷⁷ Bilderquelle online abrufbar unter: <https://beckerarchives.wustl.edu/VC265-S354-B16-i02> (Zugang am 26.09.2020).

Ter-Pogossian, Michael M. et al. (Michael E. Phelps, Edward J. Hoffman, Nizar A. Mullani): *A Positron-Emission Transaxial Tomograph for Nuclear Imaging (PETT)*. In: *Radiology*. Band 114, Nr. 1, 1975, S. 89 – 98.

Ter-Pogossian, Michael M. et al. (Michael E. Phelps, Edward J. Hoffman, Nizar A. Mullani): *Application of Annihilation Coincidence Detection to Transaxial Reconstruction Tomography*. In: *J Nucl Med*. Band 16, Nr. 3, 1. Februar 1975, S. 210 – 224.

Die Positronenemissionstomografie, zweck medizinischen Untersuchungen und Diagnostik, wurde im Wegweisenden von Mathematikern, Physikern und Chemikern entwickelt. Somit wird die Medizin mit anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen verknüpft: Chemie, Physik und Mathematik. Radiochemie und Radiophysik, sowie Nuklearchemie und Nuklearphysik sind Bestandteile der Chemie und der Physik. Daraus

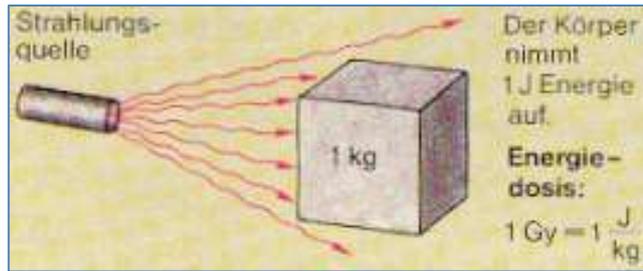


Abb. 36: „FÜR DIE ABSORPTION DER ENERGIE SIND VOR ALLEM DIE BEI DER WECHSELWIRKUNG ENTSTEHENDEN SEKUNDÄRELEKTRONEN VERANTWORTLICH. UM DIESE AUS DEN ATOMEN FREIZUSETZEN, BENÖTIGT MAN FÜR VERSCHIEDENE ATOME AUCH VERSCHIEDENE ENERGIEN (BINDUNGSENERGIEN). DAS BEDEUTET, DASS DIE ENERGIEDOSIS BEI GLEICHER STRAHLUNGSINTENSITÄT IN JEDER MATERIEUNTERSCHIEDLICH IST“ (Poljanc 2019, 3)

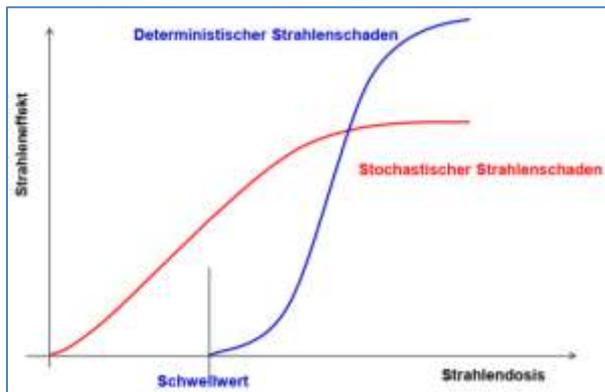


Abb. 37: GRAFISCHE FUNKTIONSDARSTELLUNG DES STRAHLENEFFEKTS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER STRAHLENDOSIS IM MATHEMATISCHEN KOORDINATENSYSTEM

resultierend ist die Nuklearmedizin und Radiopharmazie selbstständige Disziplinen der Medizin bzw. Pharmazie und somit wesentlich integrale Bestandteile der Radiochemie und der Radiophysik, sowie der Nuklearchemie und der Nuklearphysik.

Die Mathematik wird als Hilfsmittel zur Beschreibung u. a. von bestimmten chemischen und physikalischen Phänomenen in der Medizin (und der Biologie), wie z. B. Einfluss der Strahlung auf das organisch lebende Gewebe, sowie zur Aufstellung von Integral- und Differenzialrechnungen (mit mathematisch-physikalischen Formeln und Gleichungen), um – beispielweise – die beeinflussend bestimmende Wirkung dieser Strahlung auf das organisch lebende Gewebe zu berechnen, wie z. B. die Energiedosis D [J/kg] oder [Gy] bei einer Bestrahlung mit ionisierender Strahlung von einem Absorbermaterial (Abb. 36 und 37)⁷⁸.

Die absorbierte Energie E [J] dividiert durch die Masse m [kg] des bestrahlten Volumens ergibt die Energiedosis (Abb. 36):

⁷⁸ Poljanc K.: *Skriptum Strahlenphysik*, Kapitel 10 *Strahlenschutz, Dosimetrie und nukleare Sicherheit*. Lehrveranstaltung an der TU Wien 2019.

$$D = E / m \text{ [J/kg] oder [Gy]}$$

Man kann die Strahlendosis vs. den Strahlungeneffekt mathematisch in Grafen darstellen (Abb. 37)⁷⁹.

Zum Begriff *Positronenemission* ist es in der Physik eindeutig klar: Es handelt sich um *Emission von Positronen*. Das Positron ist das Antiteilchen (die Antimaterie) des Elektrons, deshalb kommt der Begriff aus positiver Ladung und Elektron her, da es die gleiche Masse, das gleiche magnetische Moment, die gleiche Ruheenergie, den gleichen Spin (und anderen physikalischen Eigenschaften) wie das Elektron nachweist. Allerdings mit positiv elektrischer Ladung im Unterschied vom Elektron (negativ elektrische Ladung). Das Positron wird demnächst kurz dargestellt.

„Positronenemission: Zerfall von Sondenkernen unter Aussendung von Positronen. Bei orts aufgelöster Detektion der Positronen (bzw. der bei ihrer Annihilation mit einem Elektron zwei entstehenden antiparallel abgestrahlten γ -Strahlungen) kann die Verteilung der mit den Sondenkernen markierten Moleküle als Funktion der Zeit registriert werden. Wichtigste Anwendung ist die Positronenemissionstomografie in der Medizin. Bei Oberflächenuntersuchungen kann an Stelle von Sondenkernen auch mit Positronenstrahlen gearbeitet werden, die dann zunächst mit Elektronen aus dem Material ein Positronium-Atom bilden, das dann als Sonde wirkt“ (McClain 1998)⁸⁰.

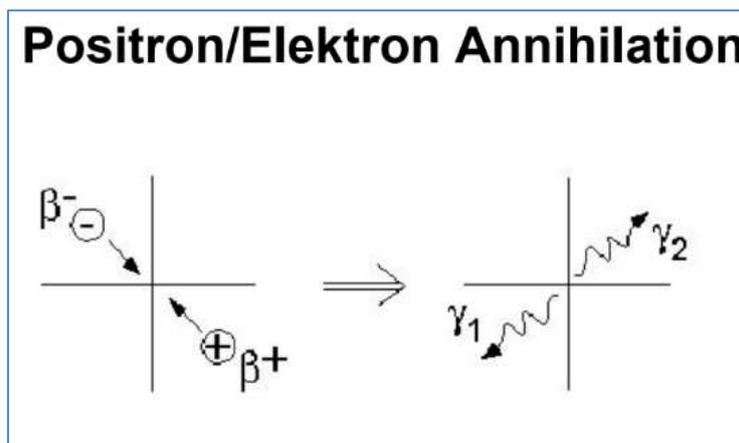


Abb. 38: EIN POSITRON β^+ BEI SEINER ANNIHILATION MIT EINEM ELEKTRON β^- UND DIE ENTSTEHUNG ANTIPARALLELER ABGESTRAHLTEN γ -QUANTEN γ_1 UND γ_2

⁷⁹ Poljanc, Karin: *Skriptum Strahlenphysik*, Kapitel 10 *Strahlenschutz, Dosimetrie und nukleare Sicherheit*. Lehrveranstaltung an der TU Wien 2019.

⁸⁰ McClain, Demetrius: *Positronenemission*. In: LEXIKON DER PHYSIK. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1998.

Online abrufbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/positronenemission/11552> (Zugang am 22.12.2020).

2. POSITRON UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLEARMEDIZIN



Abb. 39: ANDERSON

Das Positron ist das Antiteilchen (die Antimaterie) des Elektrons. Theoretisch wurde es von dem britischen Physiker Paul Adrien Maurice Dirac (1902 – 1984) im Jahr 1928 vorausgesagt. Vier Jahre später wurde das Positron von dem amerikanischen Physiker Carl David Anderson (1905 – 1991) experimentell entdeckt und dafür den Nobelpreis für Physik 1936 „für die Entdeckung des Positrons“ erhielt (Abb.



Abb. 40: DIRAC

39)⁸¹. Bereits 1933 bekam Dirac den Nobelpreis für Physik „für die Entdeckung neuer produktiver Formen der Atomtheorie“ (Abb. 40)⁸².

Das Positron ist ein Elementarteilchen aus der Gruppe der Leptonen. Es unterliegt der gravitativen, der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung. Das Positron hat die gleiche Masse wie ein Elektron ($9,1093835611 \times 10^{-31}$ [kg]), eine elektrische Ladung von $+1,60217656535 \times 10^{-19}$ [C] (die elektrische Ladung des Elektrons beträgt $-1,60217656535 \times 10^{-19}$ [C]), einen Spin von 1/2 (das gleiche wie das Elektron), ein magnetisches Moment von $-9,284764704328 \times 10^{-24}$ [J/T]. Sein physikalisches Symbol (Formelzeichen) ist e^+ (das Elektron e^-) oder β^+ (das Elektron β^-).

Die *Teilchen* β^+ (oder e^+) und β^- (oder e^-) werden auch *Strahlungen* genannt.⁸³

Wenn ein Positron mit einem Elektron kollidiert, tritt eine Vernichtung auf (Abb. 38 und 41). Wenn diese Kollision bei niedrigen Energien auftritt, entstehen mindestens zwei Photonen (γ -Strahlungen).

Positronen können durch Emission radioaktiven Zerfalls (schwache Wechselwirkung) oder durch Paarbildung aus energiereichem Photon erzeugt werden, das mit einem Atom in einem Material interagiert (Abb. 41)⁸⁴.

⁸¹ Text und Bildquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

⁸² Ebd.

⁸³ Das wird demnächst in der Überschrift *Strahlung* näher erörtert.

⁸⁴ Bildquelle online abrufbar unter:

<https://www.up.ac.za/media/shared/Legacy/sitefiles/file/45/1335/809/2010pretoriapetprinciples.pdf> (Zugang am 07.10.2020).

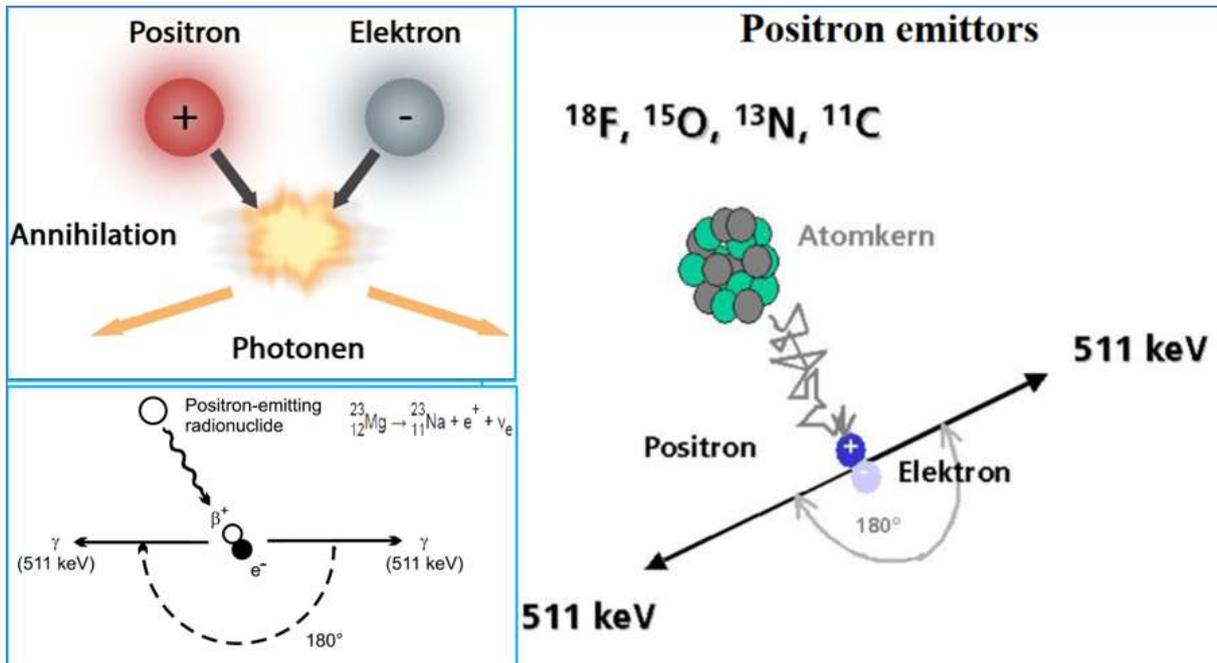


Abb. 41: KOLLISION POSITRON-ELEKTRON UND ENTSTEHUNG ZWEIER PHOTONEN (γ -STRAHLUNGEN)
POSITRONEN KÖNNEN DURCH RADIOAKTIVEN ZERFALL DER POSITRONENEMISSION (DURCH SCHWACHE WECHSELWIRKUNG) ODER DURCH PAARBILDUNG AUS EINEM ENERGIEREICHEN PHOTON (γ -STRAHLUNG) ERZEUGT WERDEN, DAS MIT EINEM ATOM ODER IN EINEM MATERIAL INTERAGIERT

Positronen (e^+) entstehen auch u. a. bei

- dem Zerfall positiver Muonen: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- dem Zerfall von Protonen: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- der Proton-Proton-Reaktion:
- der Paarbildung in energiereichen Stoßprozessen: Wechselwirkung harter γ -Strahlung (Fotonen) mit Materie.



Abb. 42: PET-SCANNER (KOMBINATIONSGERÄT PET/CT)

Die Anwendung von Positronen wird in der vorliegenden Arbeit bei der Positronenemissionstomografie (**PET**) in der Medizin dargestellt (Abb. 42 und 43)⁸⁵. Es wird einem Patienten ein positronenemittierendes Radiopharmakon (eine β^+ -radioaktive Arzneimittelsubstanz) angekuppelt an einer Glucose verabreicht. „Die Glucose wird von Geweben mit hohem Energiebedarf wie Tumoren oder dem Gehirn vermehrt verstoffwechselt, ist dort also höher konzentriert als in anderen Regionen. Die bei der Positron-Elektron-Annihilation paarweise entstehenden Gammaquanten werden mit Detektoren außerhalb des Körpers nachgewiesen. Da die Quanten eines Paares stets in entgegengesetzten Richtungen davonfliegen, lässt sich eine Anhäufung der strahlenden Glucosemoleküle gut lokalisieren, und ihre Konzentration kann bildlich sichtbar gemacht werden. Zu beachten ist in der Nuklearmedizin, dass das radioaktive Nuklid einerseits langlebig genug ist, damit es in ein Biomolekül eingebaut und vom Herstellungslabor (meist einer Zyklotron-Anlage) zum Patienten gebracht werden kann, andererseits jedoch kurzlebig genug, um während der Messung Bildgebung zu ermöglichen, danach aber den Patienten nicht mehr unnötig

⁸⁵ Bildquelle: „PET Positronen-Emissions-Tomographie“ (Bender et al. 2004, 123).

mit Strahlung zu belasten. Der hauptsächlich benutzte *Tracer* bei der **PET** ist PDG, bei dem ein Atom ^{19}F durch ein radioaktives Atom ^{18}F (Halbwertszeit 109,77 min) ersetzt ist⁸⁶.

„Die nuklearmedizinische Bildgebung beruht auf dem Nachweis von Gammastrahlungen (oder γ -Strahlungen, hochenergetische Photonen), die beim Zerfall von radioaktiven Isotopen (Radionuklide) auftreten. Zum Nachweis dieser γ -Strahlungen kommen in der konventionellen Nuklearmedizin dabei stationäre Ein- oder Zwei-Kopf-Kameras zum Einsatz, die zweidimensionale Bilder erzeugen. Bei der Single-Photonen-Emissionstomografie (**SPECT**) erfolgt eine Rotation der Kameraköpfe um den Patienten, wobei Aufnahmen in multiplen Winkeln aufgenommen werden. Die speziellen Abbildungseigenschaften der **PET** beruhen auf der Physik der Positronenemission und der Anwendung der Koinzidenzmessung sowie der Vielzahl zur Verfügung stehender radioaktiver Substanzen. Im Gegensatz zu den üblichen Radionukliden, die einen Gammazerfall zeigen, emittieren Positronenemitter nicht direkt ein Photon, sondern ein positiv geladenes Elektron (oder Positron = Antielektron). Das freigesetzte Positron wird sich nach kurzer Passage im Gewebe aufgrund elektrostatischer Anziehungskräfte mit einem Elektron der Umgebung vereinen, wobei beide Partikel unter Aussendung von zwei γ -Strahlungen mit der charakteristischen Energie von 511 keV (Abb. 41) vernichtet werden (Annihilation). Dieses Gammastrahlungspaar bewegt sich dabei in einem Winkel von annähernd 180° voneinander weg und kann mit entsprechenden Detektoren aufgezeichnet werden. Wird in einem Detektorpaar innerhalb eines engen Zeitfensters (wenige Nanosekunden) ein Signal aufgezeichnet, spricht man von einer Koinzidenz. Da die Annihilationsphotonen in entgegengesetzte Richtungen abstrahlen, muss im Falle einer Koinzidenzmessung das Zerfallereignis auf der Verbindungslinie des deaktivierten Detektorpaars liegen, der so genannten Aktivitätslinie (englisch: *line of response*). Da die gängigen Positronenemitter zumeist Bausteine natürlicher biochemischer Moleküle sind (Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff), können biologisch identische oder äquivalente Verbindungen (Radiopharmazeutika) synthetisiert werden. Theoretisch kann jedes Biomolekül und/oder Medikament als radioaktive Variante erzeugt und somit der spezifische Stoffwechselprozess (qualitativ und quantitativ) in vivo mittels der **PET**-Technik sichtbar gemacht werden“ (Bender et al. 2004, 124).

Die α -, β - und γ -Strahlungen werden demnächst kurz zusammenfassend dargestellt.

⁸⁶ Textquelle online abrufbar unter: <https://de.linkfang.org/Positron> (Zugang am 07.10.2020).

Strahlungsart	Quelle	Medizinische Anwendung
Photon	Radionuklide (\leq wenige MeV), bspw.: <ul style="list-style-type: none"> • ^{137}Cs • $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I, ^{131}I (Abb. 1.4b), ^{67}Ga, ^{111}In • ^{60}Co (Abb. 1.4c) • ^{192}Ir, ^{125}I, ^{198}Au, ^{103}Pd LINAC, Röntgenröhren (keV–MeV)	Brachytherapie, Prüfstrahler für Gammaskpektrometer Planare Szintigraphie, SPECT Teletherapie (weitgehend durch LINACs ersetzt), Brachytherapie Brachytherapie Teletherapie, Röntgendiagnostik, Computertomographie
Elektron	Radionuklide (\leq wenige MeV), bspw.: <ul style="list-style-type: none"> • ^{131}I (Abb. 1.4b), ^{177}Lu, ^{90}Y • ^{90}Sr, ^{106}Ru LINAC, Betatron (keV–MeV)	Nuklearmedizinische Therapie Brachytherapie Teletherapie
Positron	Radionuklide (\leq wenige MeV), bspw.: <ul style="list-style-type: none"> • ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{18}F, ^{68}Ga • ^{15}O, ^{11}C, ^{10}C (β^+-Zerfall durch induzierte Kernreaktion bei der Strahlentherapie mit Protonen oder Ionen) 	PET <i>In-vivo</i> Dosisverifikation mittels PET
α -Strahlung	Radionuklide (\leq wenige MeV), bspw.: <ul style="list-style-type: none"> • ^{226}Ra (Abb. 1.4a) • ^{223}Ra 	Teletherapie (historische Bedeutung) Nuklearmedizinische Therapie
Protonen, Ionen	Teilchenbeschleunigung im Synchrotron oder Zyklotron	Teletherapie
Neutronen	Radionuklide (\leq wenige MeV), bspw.: <ul style="list-style-type: none"> • ^{252}Cf Neutroneninduzierte Kernspaltung in Kernreaktoren oder induzierte Kernreaktionen in Beschleunigungsanlagen (Neutronengeneratoren)	Brachytherapie (relativ selten, bspw. auch in Zusammenhang mit Bor-Einfangtherapie), Kalibrierung von Neutronendosimetern Teletherapie (heute kaum noch verwendet), Bor-Einfangtherapie

Abb. 43: STRAHLUNGSART, QUELLE UND MEDIZINISCHE ANWENDUNG

BILDQUELLE: STEFFEN GREILICH

IN: SCHLEGEL, WOLFGANG; KARGER, CHRISTIAN UND JÄKEL, OLIVER (HERAUSGEBER)

MEDIZINISCHE PHYSIK. PETER, JÖRG: SINGLE PHOTON EMISSION COMPUTER TOMOGRAPHY. IN: SCHLEGEL, WOLFGANG; KARGER, CHRISTIAN UND JÄKEL, OLIVER (HERAUSGEBER): MEDIZINISCHE PHYSIK. GRUNDLAGEN – BILDGEBUNG – THERAPIE – TECHNIK. HEIDELBERG: SPRINGER 2018 (SEITE 9)

IN DIESER ABHANDLUNG WIRD DIE NACH DEM ARBEITSTITEL

ANWENDUNG VON ^{18}F IN PET UND $^{99\text{m}}\text{Tc}$ IN SPECT IN DER NUKLEARMEDIZINISCHEN DIAGNOSE

PHYSIKALISCH-MEDIZINISCH NÄHER EINGEHEN

3. STRALUNG UND IHRE ANWENDUNG IN DER NUKLEARMEDIZIN

„Die Strahlung ist nicht an Medien gebundene Energie- und Massentransport“ (Poljanc 2019, 4). Es gibt verschiedene Strahlungsarten, wie u. a. die elektromagnetische Strahlung (genannt auch *Fotonenstrahlung*). Der Strahlung wird in der Quantenphysik eine *Materiewelle* zugeschrieben: *Teilchen-Welle-Dualismus*. Das heißt, der Strahlung wird in der Quantenphysik die gekoppelten Eigenschaften von der klassisch beschreibenden Welle und den atomaren Teilchen (Fotonen, Protonen, Elektronen usw.) gleichzeitig zugeschrieben.

Der französische Historiker (!) und Physiker Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892 – 1987) postulierte bereits 1924 die Wellennatur des Elektrons als Teilchen (*Teilchen-Welle-Dualismus*) in seiner Dissertation.⁸⁷ Er erhielt den Nobelpreis für Physik 1929 „für die Entdeckung der Wellennatur der Elektronen“ (Abb. 44)⁸⁸ genannt heute *De-Broglie-Welle*:



Abb. 44: DE BROGLIE

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ [m]} \quad \text{mit} \quad \mathbf{p} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{v} \text{ [kgm/s]}$$

Wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum ($6,62.607.015 \times 10^{-34}$ [Js]) und p der Impuls [kgm/s] des Teilchens sind.

m ist die Teilchenmasse [kg] und v die Teilchengeschwindigkeit [m/s].

De Broglie stellte weiter fest, dass jedes Teilchen (nicht nur das Elektron) mit einer bestimmten Masse m einen Wellencharakter der Wellenlänge λ (*De-Broglie-Welle*) besitzt:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} \text{ [m]}$$

Die Energie der elektromagnetischen Strahlung (Abb. 46)⁸⁹ wurde von dem deutschen Physiker Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947; Abb. 45)⁹⁰ bereits im Jahr 1899 aufgestellt:

$$\mathbf{E} = \mathbf{h} \cdot \mathbf{f} = \frac{\mathbf{h} \cdot \mathbf{c}}{\lambda} \text{ [J]} \quad \text{mit} \quad \mathbf{f} = \frac{\mathbf{c}}{\lambda} \text{ [Hz]}$$



Abb. 45: PLANCK

⁸⁷ De Broglie, Louis Victor Pierre Raymond: *Recherches sur la théorie des quanta*. Thèse, Paris 1924, Ann. de Physique (10) 3, 22 (1925). Text (Dissertation) online abrufbar unter: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006807/document> (Zugang am 23.02.2021).

· Übersetzungsausgabe auf Deutsch von Walther Becker: *Untersuchungen zur Quantentheorie*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1927.

· Übersetzungsausgabe auf Englisch von A. F. Kracklauer (2004): *Researches on the quantum theory*. Text (Englische Übersetzung der Dissertation) online abrufbar unter: https://fondationlouisdebroglie.org/LDB-oeuvres/De_Broglie_Kracklauer.pdf (Zugang am 23.02.2021).

⁸⁸ Textquelle und Bildquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

⁸⁹ Bildquelle online abrufbar unter: <https://vetsuisse.com/vet->

[iml/lernmodule/htmls/print_all.html?radiosurfvet|radgeneral|radbi](https://vetsuisse.com/vet-) (Zugang am 30.09.2020).

⁹⁰ Textquelle und Bildquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

f ist die elektromagnetische Strahlungsfrequenz [Hz].

$c = 299.792.458$ [m/s] ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

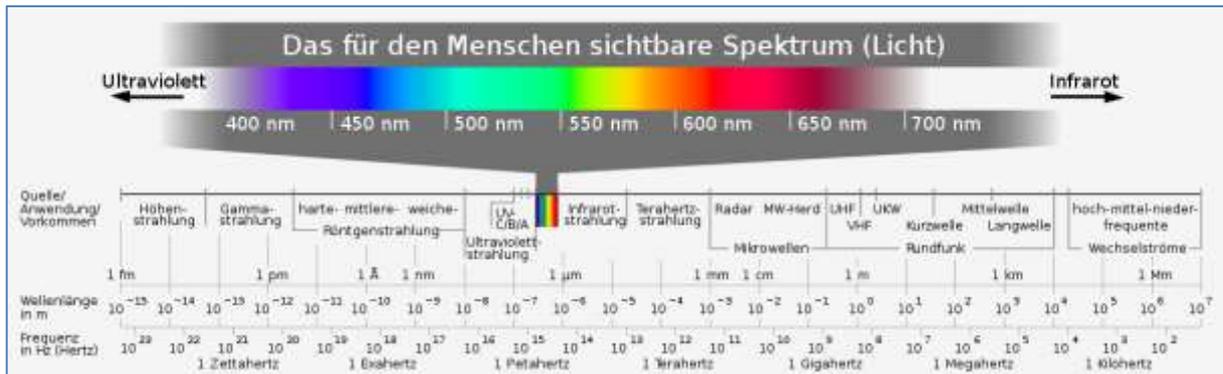
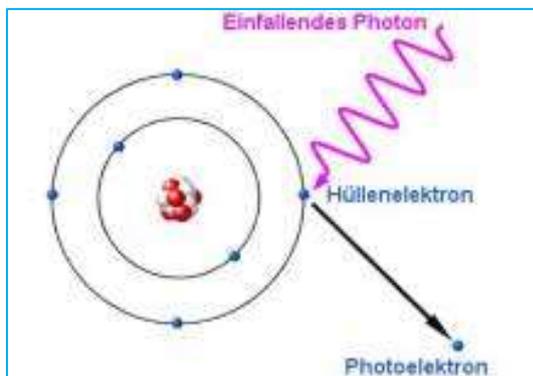


Abb. 46: SPEKTRUM DER ELEKTROMAGNETISCHEN STRAHLUNG (FOTONENSPEKTRUM)

Planck gründete damit die Quantenphysik. Er erhielt im Jahr 1919 den Nobelpreis für Physik 1918 „als Anerkennung des Verdienstes, den er sich durch die Entdeckung der Energiequanten um die Entwicklung der Physik erworben hat“⁹¹.

Teilchen, wie etwa Elektronen, Positronen, Neutronen, Protonen usw. sind an sich gleichzeitig ein Strahlungstransport und ein Materietransport (wegen Welle-Teilchen-Dualismus). Bei der Emission von Strahlung entstehen Strahlungsfelder (wie z. B. Photonenfelder oder elektromagnetische Felder), die räumlich und zeitlich verteilt sind: *Energiespektrumsverteilung*.

Wechselwirkung von Strahlung und Materie bewirkt einen Übergang von



Strahlungsenergie auf die absorbierende Materie oder eine Übertragung von kinetischer Energie und Ruheenergie der Teilchen auf die absorbierende Materie. Bei direkt und indirekt ionisierender Strahlung könnte ein atomares Hüllenelektron freigesetzt (ausgelöst). Das hängt von der Energie der ionisierenden Strahlung ab (Abb. 47)⁹².

Abb. 47: „ELEKTRONEN AUS IHRER BINDUNG ZU LÖSEN BEDARF ES ENERGIEZUFUHR VON AUßEN. DIESE KANN U. A. DURCH EXTERNE FOTONEN WELCHE DIE ELEKTRONEN AUS IHRER BINDUNG REIßEN – FOTOEFFEKT. DIE LOSGELÖSTEN ELEKTRONEN NENNT MAN FOTOLEKTRONEN. ALBERT EINSTEIN WAR DER ERSTE DER MIT HILFE DER QUANTENTHEORIE DIESES PHÄNOMEN ERKLÄREN KONNTE“

⁹¹ Textquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

⁹² Bildquelle und Text online abrufbar unter: <http://display-magazin.net/thema/science/klassische-und-moderne-physik> (Zugang am 30.09.2020).

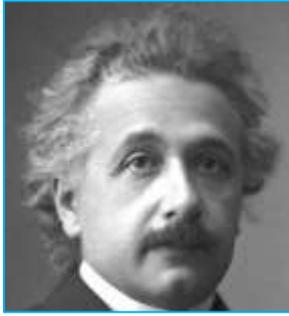


Abb. 48: EINSTEIN

Im Jahr 1905 stellte Albert Einstein (1879 – 1955) die Formel des äußeren fotoelektrischen Effekts auf (Abb. 49)⁹³. Albert Einstein (Abb. 48)⁹⁴ erhielt dafür den Nobelpreis für Physik 1921 „für seine Verdienste um die theoretische Physik, besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des fotoelektrischen Effekts“⁹⁵.

Beim Fotoelektrischen Effekt gibt das Foton seine gesamte Energie an das Elektron ab.

Somit wird das **Foton vom Elektron völlig absorbiert**.

Treffen **Photonen** auf ein **Metall** oder **Halbleiter**, so geben sie ihre **Energie** an die **Elektronen** ab. Ein Teil der **Energie** wird benötigt, um die **Elektronen** aus dem **Atomverband** herauszulösen und aus der **Metalloberfläche** heraustreten zu lassen (**Austrittsarbeit** W_A). Diese Wechselwirkung bezeichnest du als **äußeren Photoeffekt**. Die **Restenergie** dient zur **Beschleunigung** der **Elektronen**. Es folgt damit die **Energiebeziehung**

$$h \cdot f = E_{kin} + W_A$$

wobei E_{kin} die **Restenergie** bezeichnet. Das ist die **kinetische Energie** der herausgelösten **Elektronen**. Wir sehen, dass es eine **Grenzfrequenz** f_{Grenz} geben muss, ab der überhaupt **Elektronen** herausgelöst werden können. Sie ergibt sich aus der Gleichung

$$h \cdot f_{Grenz} = W_A$$

Abb. 49: „EINFALLENDEN FOTON LÖST ELEKTRON AUS SEINER BINDUNG – PHOTOELEKTRON. DER PHOTOEFFEKT, AUCH PHOTOELEKTRISCHER EFFEKT, IST ALLGEMEINER BEGRIFF FÜR DIE BILDUNG UND FREISETZUNG VON ELEKTRISCH GELADENEN TEILCHEN AUS MATERIE, WENN DIESE MIT LICHT ODER ANDERER ELEKTROMAGNETISCHER STRAHLUNG BESTRAHLT WIRD“

⁹³ Bilderquellen und Text:

<https://www.lecturio.de/magazin/ionisierende-strahlung-radioaktivitaet/> (Zugang am 30.09.2020).

https://wiki.fh-muenster.de/fb3/boesche/doku.php?id=public:mt_licht (Zugang am 30.09.2020).

⁹⁴ Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

⁹⁵ Textquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

Wechselwirkung eines Fotons mit Materie erfolgt nicht nur durch Fotoeffekt (Abb. 47 und 49). Es gibt noch zwei weitere Fotoeffektsprozesse:

1. Die Paarbildung, indem das **Foton verschwindet**, um die Bildung eines Teilchen-Antiteilchen-Paares zu erzeugen, wie u. a. eines Elektron-Positron-Paares, eines Myon-Antimyon-Paares oder eines Proton-Antiproton-Paares.
2. Der Comptoneffekt, genannt auch Comptonstreuung, indem – im Gegensatz zum **Fotoelektrischen Effekt** – das **Foton auf ein Elektron stößt und ein Teil seiner Energie an das gestoßene Elektron abgibt**. Seine Energie wird reduziert. Das Foto und das Elektron „fliegen“ zerstreut nach dem Stoß in zwei voneinander verschiedene Richtungen weiter.

Trifft ein Photon auf ein ruhendes Elektron, gibt es analog zum klassischen elastischen Stoß zweier Teilchen Energie an das Elektron ab, die dieses als kinetische Energie E_{kin} aufnimmt:

$$E' = E - E_{kin}$$

wobei E und E' die Photonenenergie vor bzw. nach dem Stoß bedeuten. Wegen $E = h \cdot f$ bedeutet der Energieverlust beim Stoß eine geringere Frequenz f nach dem Stoß, es gilt

$$h \cdot f = h \cdot f' + E_{kin} \quad \Rightarrow \quad f = f' + \frac{E_{kin}}{h}$$

(h: Planck'sches Wirkungsquantum).

Benannt nach dem amerikanischen Physiker **Arthur Holly Compton** (1892 – 1962) und Nobelpreisträger für Physik 1927 „für die Entdeckung des nach ihm genannten Comptoneffekt“





Energie des ...		Impuls des ...	
Elektrons vorher	Photons vorher	Photons vorher	Elektrons vorher
$E_e = m_e c^2$	$E_\gamma = h\nu$	$p_\gamma = h\nu/c$	$p_e = 0$
Elektrons nachher	Photons nachher	Photons nachher	Elektrons nachher
E'_e	$E'_\gamma = h\nu'$	$p'_\gamma = h\nu'/c$	p'_e

Für die Wellenlänge λ des Photons gilt $\lambda = \frac{c}{\nu}$ bzw. $\lambda' = \frac{c}{\nu'}$ (c : Lichtgeschwindigkeit). Die Wellenlängenänderung hängt vom Streuwinkel ϕ ab. Man bezeichnet sie als **Compton-Verschiebung**. Es ergibt sich unter Anwendung des Impulssatzes:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C \cdot (1 - \cos\phi)$$

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e \cdot c} \approx 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

ist die **Compton-Wellenlänge** des Elektrons (m_e : Elektronenmasse)

Es gilt der Energie- bzw. Impulserhaltungssatz⁹⁶

$$E_e + E_\gamma = E'_e + E'_\gamma \quad \vec{p}_\gamma = \vec{p}'_e + \vec{p}'_\gamma$$

⁹⁶ Textquelle und Bildquelle online abrufbar unter:
<https://learnattack.de/schuelerlexikon/physik/compton-effekt> (Zugang am 19.02.2021).

„Direkt ionisierende Strahlung (Abb. 50)⁹⁷: Geladene Teilchenstrahlung (wie z. B. α - und β -Strahlung), die durch Stöße unmittelbar Ionisationen in der bestrahlten Materie erzeugen“ (Poljanc 2019, 6).

„Indirekt ionisierende Strahlung (Abb. 50)⁹⁸: Ungeladene Teilchenstrahlung (wie z. B. Neutronenstrahlung (n-Strahlung) und γ -Strahlung), die ihre Energie auf Stoßpartner überträgt, der dann seinerseits die umgebende Materie ionisiert“ (Poljanc 2019, 6).

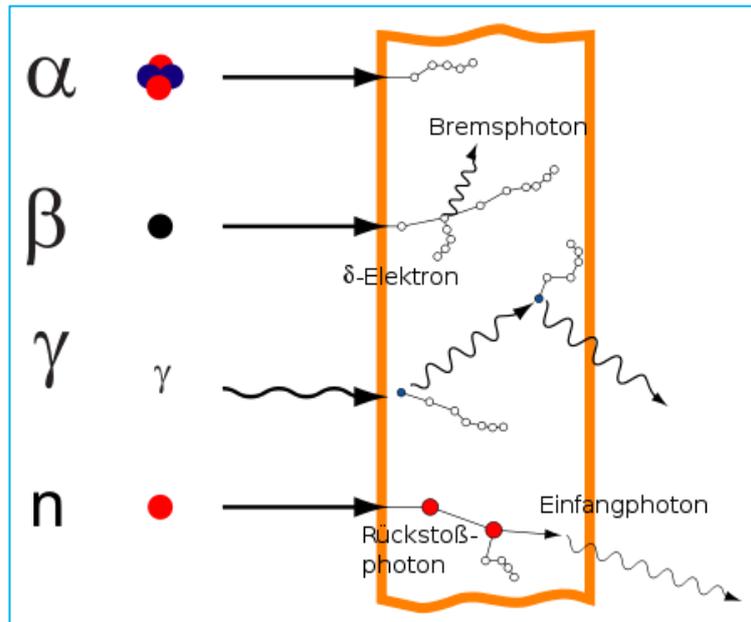


Abb. 50: α -STRAHLUNG UND β -STRAHLUNG SIND GELADENE TEILCHEN UND SOMIT DIREKT IONISIEREND

γ -STRAHLUNG UND n-STRAHLUNG SIND UNGELADENE TEILCHEN UND SOMIT INDIREKT IONISIEREND

γ -STRAHLUNG IST EINE ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG (MATERIEWELLE ODER TEILCHEN-WELLE -DUALISMUS) WIE RADIOWELLE, MIKROWELLE, INFRAROT, SICHTBARES LICHT, ULTRAVIOLETT, RÖNTGENSTRAHLUNG USW. (Abb. 46)

DIE NEUTRONENSTRAHLUNG ODER n-STRAHLUNG SIND BESTANDTEILE DES ATOMKERNS, WIE DIE PROTONEN

DIESE STRAHLUNGEN – NACH DE BROGLIE – WEISEN EINE WELLENNATUR AUF (MATERIEWELLE ODER TEILCHEN-WELLE-DUALISMUS)

DIE VORLIEGENDE ARBEIT WIRD SICH NÄCHSTENS DAMIT BEFASSEN

⁹⁷ Bildquelle und Text online abrufbar unter: https://www.wikiwand.com/de/Ionisierende_Strahlung (Zugang am 07.10.2020).

⁹⁸ Ebd.

Es gibt verschieden Arten ionisierender Strahlung, die die Materie durchdringen und mit ihr wechselwirken (Abb. 50): Diese Strahlungen werden nun dargestellt.

3.1 α -STRAHLUNG

Auch α -Zerfall genannt. Die α -Strahlung wurde erstmals 1899 in den Untersuchungen zur Radioaktivität von dem neuseeländischen Physiker Ernest Rutherford (1871 – 1937; Abb. 51)⁹⁹ beschrieben (Rutherford 1899, 109 ff.)¹⁰⁰ und 1907 als positiv geladenes Heliumatom von seinen Studenten und Mitarbeitern dem deutschen Physiker Johannes (genannt auch *Hans*) Wilhelm Geiger (1882 – 1945; Abb. 54) und dem neuseeländischen Physiker Ernest Marsden (1889 – 1970; Abb. 54) vermutet wurde (Abb. 52)¹⁰¹. Erst im Jahr 1908 wurde es festgestellt, es handelt sich tatsächlich um eine positiv geladene Ladung eines Heliumatoms und 1909 publizierte Rutherford mit seinen Studenten und Mitarbeitern (Geiger, Marsden und Royds) diese Entdeckung (Rutherford et al. 1909)¹⁰². Allerdings waren das Proton und das Neutron noch nicht bekannt. Rutherford erhielt den Nobelpreis für Chemie 1908 „für seine Untersuchungen über den Zerfall der

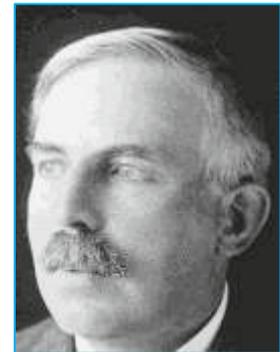


Abb. 51: RUTHERFORD

⁹⁹ Bildquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 07.10.2020).

¹⁰⁰ Rutherford, Ernest: *Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It*. In: *Philosophical Magazine*. 5. Folge, Band 47, Nummer 284, 1899, S. 109 – 163.

Rutherford veröffentlichte weitere Publikationen zu diesem Thema, wie u. a. (die Wesentlichsten werden hier aufgelistet):

- Rutherford, Ernest: *A Radioactive Substance emitted from Thorium Compounds*. In: *Philosophical Magazine*. 5. Folge, Band 49, Nummer 296, 1900, S. 1 – 14.
- Rutherford, Ernest: *Radioactivity produced in Substances by the Action of Thorium Compounds*. In: *Philosophical Magazine*. 5. Folge, Band 49, Nummer 297, 1900, S. 161 – 192.
- Rutherford, Ernest and Brooks, Harriet: *Comparison of the Radiations from Radioactive Substances*. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 4, Nummer 19, 1902, S. 1 – 23.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: *Condensation of the Radioactive Emanations*. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 5, Nummer 29, 1903, S. 561 – 576.
- Rutherford, Ernest: *Bakerian Lecture. Nuclear Constitution of Atoms*. In: *Proceedings of the Royal Society of London / A*. 97, Nummer 686, 1920, S. 374 – 400.

¹⁰¹ Dass das Heliumatom aus 2 Protonen und 2 Neutronen besteht, haben Rutherford, Marsden und Geiger zu dieser Zeit *noch nicht* gewusst. Erst 1919 entdeckte Rutherford experimentell das Proton und 1920 postulierte er theoretisch die Existenz des Neutrons (als neutrales – neben dem positiv geladenen Proton – Atomkernteilchen), das sein Schüler James Chadwick (1891 – 1974) im Jahr 1932 experimentell bewies. Dafür bekam Chadwick den Nobelpreis für Physik 1935 „für die Entdeckung des Neutrons“.

Siehe: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁰² Rutherford, Ernest; Marsden, Ernest and Geiger, Hans: *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. *Proceedings of the Royal Society 82A* (1909). S. 495 – 500.

Rutherford, Ernest and Royds, Thomas: *The Nature of the Alpha Particle from Radioactive Substances*. In: *Philosophical Magazine*. Band 17, 1909, S. 281 – 286.

Elemente und die Chemie der radioaktiven Stoffe¹⁰³.

Die Kernkraft (starke Wechselwirkung), die einen Atomkern zusammenhält, ist um etwa 10^{15} -mal stärker als die schwache Wechselwirkung (Kraft), aber auch um etwa 10^2 -mal stärker als die elektromagnetische Kraft zwischen den positiven geladenen Protonen (Abb. 53), und um etwa 10^{41} -mal stärker als die Gravitationskraft zwischen den Atomkernmassen (Neutronenmasse und Protonenmasse im Atomkern). Andererseits ist die Kernkraft kurzreichweitig und nimmt schnell über etwa 10^{-15} [m] an Stärke ab, während die elektromagnetische Kraft, sowie die gravitative Kraft (Gravitation) eine „unendlich“ unbegrenzte Reichweite haben (Abb. 53). Die Reichweite der schwachen Wechselwirkung ist weniger als 10^{-15} [m] (Abb. 53).

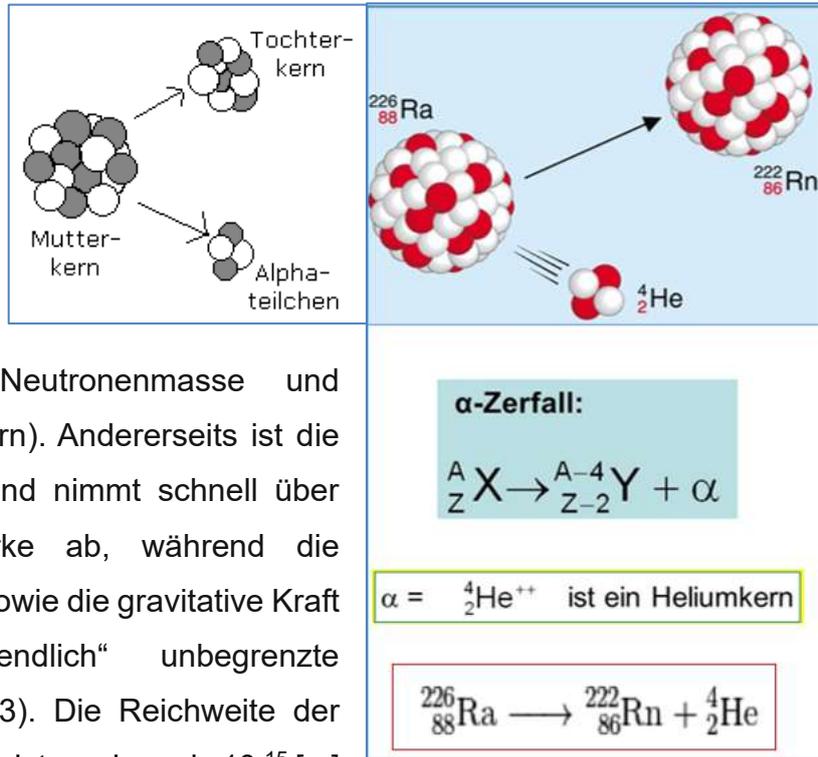


Abb. 52: ATOMKERNZERFALL DES RADIUMS

Grundkraft	Stärke (relativ zur starken Wechselwirkung)	Reichweite in [m]
Gravitation	10^{-41}	∞
Elektromagnetische Kraft	10^{-2}	∞
Schwache Wechselwirkung	10^{-15}	$< 10^{-15}$
Starke Wechselwirkung	1	$\approx 10^{-15}$

Abb. 53: DIE VIER FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN: GRAVITATION, ELEKTROMAGNETISMUS, SCHWACHE WECHSELWIRKUNG UND STARKE WECHSELWIRKUNG.

DIE VIER FUNDAMENTALE WECHSELWIRKUNGEN WERDEN AUCH GRUNDKRÄFTE ODER NATURKRÄFTE DER PHYSIK BEZEICHNET.

¹⁰³ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 23.10.2020).

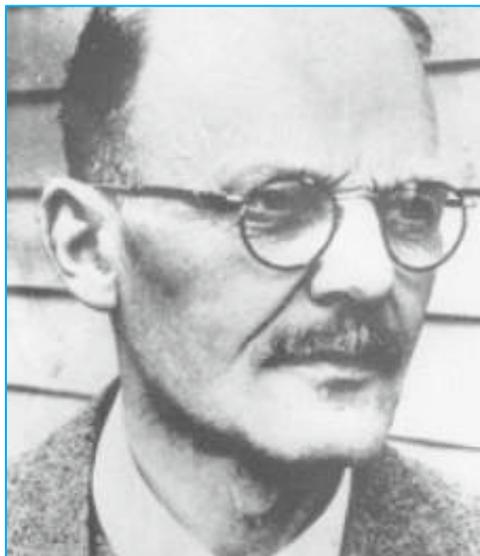
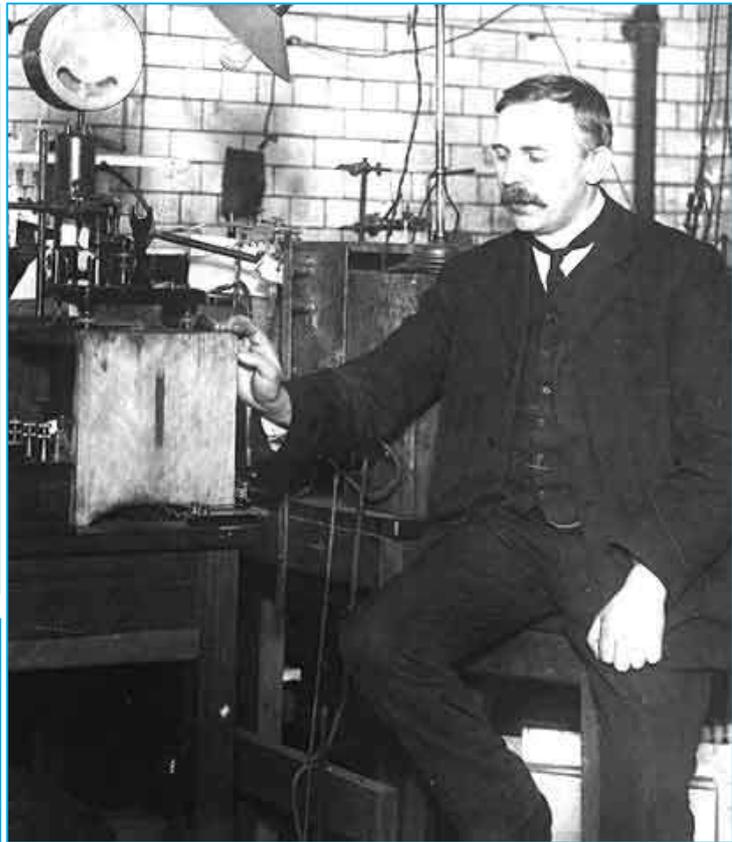
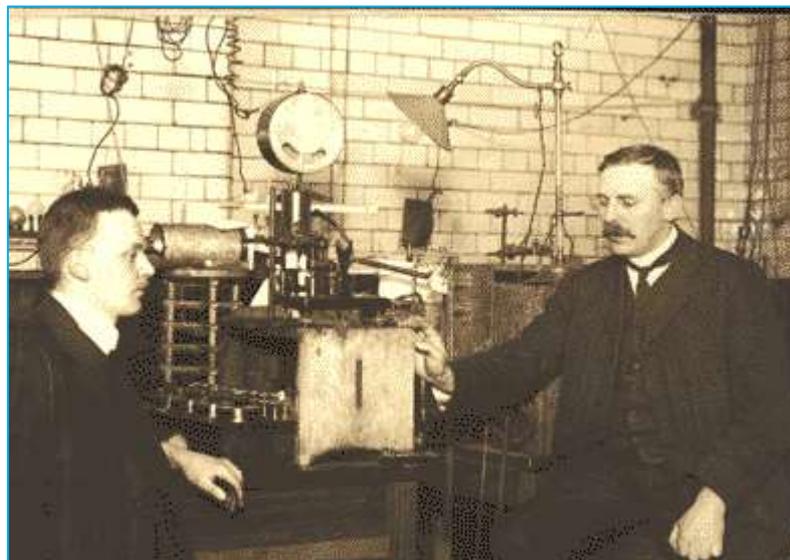


Abb. 54: ERNEST MARSDEN (OBEN RECHTS) NEBEN DER VERSUCHSAPPARATUR („BEWEIS VOM POSITIVEN HELIMUKERN“) BILD UNTEN: GEMEINSAM MIT RUTHERFORD (LINKS SITZEND) BILDQUELLE: <https://zildchurch.com/2013/08/> (Zugang am 23.12.2020)

HANS GEIGER (2 BILDER LINKS OBEN UND UNTEN): BEKANNT WURDE ER AUCH DURCH DEN NACH IHM BENANNTEN GEIGERZÄHLER, UND FÜR DIE WEITERE ENTWICKLUNG DES ZÄHLERS MIT SEINEM SCHÜLER UND MITARBEITER WALTHER MÜLLER DANN ALS GEIGER-MÜLLER-ZÄHLROHR ANGEFÜHRT BILDERQUELLEN ONLINE ABRUFBAR UNTER: <https://hansgeigerbyreginaguiao.wordpress.com/2015/0/hans-wilhelm-geiger-1882-1945/> (Zugang am 23.12.2020)



Kurze retrospektive Geschichte: „Rutherford untersuchte die ionisierende Wirkung radioaktiver Strahlung auf Gase und entdeckte zwei unterschiedlich stark absorbierbare Komponenten, die er α -Strahlung und β -Strahlung nannte. ... 1903 gelang ihm die α -Strahlungenablenkung im starken Magnetfeld und der Nachweis, dass sie positiv geladen sind“¹⁰⁴ (Rutherford 1903, 177 ff.)¹⁰⁵. Etwa vier Jahre später kamen Ernest Rutherford, Hans Geiger, Ernest Marsden und Thomas Royds auf die Spur der α -Strahlung: Es könnte ein positiv geladenes Heliumatom sein. Allerdings waren weder das *Proton* noch das *Neutron* bekannt (Rutherford et al. 1909)¹⁰⁶.



Abb. 55: ROYDS

Thomas Royds (1884 – 1955; Abb. 55)¹⁰⁷ war ein englischer Physiker.

„Royds ist bekannt dafür, dass er 1909 zusammen mit Ernest Rutherford und Hans Geiger nachwies, dass α -Strahlung ein zweifach positiv geladenes Heliumatom ist. Außerdem war Royds Sonnenforscher“¹⁰⁸.



„Im Sommer 1898 erhielt Rutherford eine Berufung als Professor für Physik an die Mc Gill-Universität in Montreal, Kanada, an der er bis 1907 blieb. ... Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls, die herausragende Entdeckung seiner *kanadischen Zeit*, fand er 1902 zusammen mit Frederick Soddy“¹⁰⁹.

Abb. 56: SODDY

¹⁰⁴ Textquelle online abrufbar unter: *Lord Ernest Rutherford of Nelson - Wilhelm Exner Medaillen Stiftung*. <https://www.wilhelmexner.org/medalists/> (Zugang am 23.10.2020).

¹⁰⁵ Rutherford, Ernest: *The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium*. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 5, Nummer 25, 1903, S. 177 – 187.

¹⁰⁶ Von 1907 bis 1908 experimentierten Rutherford und seine Studenten (Mitarbeiter) darüber und sendeten ihre protokollierten Versuche Ende 1908. Ihre Arbeiten wurde 1909 publiziert:

- Rutherford, Ernest; Marsden, Ernest and Geiger, Hans: *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. *Proceedings of the Royal Society* 82A (1909). S. 495 – 500.
- Rutherford, Ernest and Royds, Thomas: *The Nature of the Alpha Particle from Radioactive Substances*. In: *Philosophical Magazine*. Band 17, 1909, S. 281 – 286.

¹⁰⁷ Bildquelle online abrufbar unter:

<http://prints.iap.res.in/bitstream/handle/2248/1038/Royds.pdfweb.lemoyne.edu/~giunta/royds.html> (Zugang am 23.10.2020).

¹⁰⁸ Textquelle online abrufbar unter: https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Thomas_Royds (Zugang am 23.10.2020).

- Rutherford, Ernest and Royds, Thomas: *The Nature of the Alpha Particle from Radioactive Substances*. In: *Philosophical Magazine*. ser 6, Band 17, 1909, S. 281 – 286.

¹⁰⁹ Textquelle online abrufbar unter: *Lord Ernest Rutherford of Nelson - Wilhelm Exner Medaillen Stiftung*. <https://www.wilhelmexner.org/medalists/> (Zugang am 23.10.2020).

- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: *The Cause and Nature of Radioactivity*. – Part I. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 4, Nummer 21, 1902, S. 370–396.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: *The Cause and Nature of Radioactivity*. – Part II. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 4, Nummer 21, 1902, S. 569–585.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: *The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium*. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 5, Nummer 25, 1903, S. 177–187.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: *A Comparative Study of the Radioactivity of Radium and Thorium*. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 5, Nummer 28, 1903, S. 445 – 457.

Frederick Soddy (1877 – 1956), ein Schüler und ein Mitarbeiter von Rutherford war ein englischer Radiochemiker und Nobelpreisträger für Chemie 1921 „für seine Beiträge zur Kenntnis der Chemie der radioaktiven Stoffe und seine Untersuchungen über das Vorkommen und die Natur der Isotopen“ (Abb. 56)¹¹⁰.

XIX. *Retardation of the α Particle from Radium in passing through Matter.* By E. RUTHERFORD, F.R.S., Professor of Physics, McGill University, Montreal.

[Plate II.]

Abb. 57: IM JAHR 1906 VERÖFFENTLICHTE RUTHERFORD (WÄHREND SEINES AUFENTHALTES IN KANADA) WIEDER EINEN ARTIKEL IN PHILOSOPHICAL MAGAZINE, BAND 12, S. 134 FF. (1906) ÜBER DIE „VERZÖGERUNG DES α -PARTIKELS VON RADIUM BEIM DURCHGANG DURCH MATERIE“. ER WAR DAMALS NOCH UNSICHER (1906), OB ES SICH TATSÄCHLICH UM „HELIUMKERN“ HANDLE. DESHALB SCHRIEB ER STATTDESSEN „ α -PARTIKEL“.

On the Scattering of the α -Particles by Matter.

By H. GEIGER, Ph.D., John Harling Fellow, University of Manchester.

(Communicated by Professor E. Rutherford, F.R.S. Read June 18; MS. received July 17, 1908.)

Abb. 58: IM JAHR 1908 VERÖFFENTLICHTE RUTHERFORD GEMEINSAM MIT GEIGER EINEN ARTIKEL IN PHILOSOPHICAL MAGAZINE, S. 174 FF. „ÜBER DIE STREUUNG DES „ α -PARTIKELS DURCH MATERIE“. BEIDE HABEN BEREIT 1907 EINSCHNEIDEND VERMUTET, DASS „ α -PARTIKEL“ EIN „HELIUMATOM“ SEI.

„1907 kehrte Rutherford nach England zurück. Im Anschluss an die 1906 beobachtete Schmalwinkelstreuung von α -Teilchen beim Durchgang durch dünne Materieschichten suchten im Frühjahr 1909 Ernest Marsden und Hans Geiger in Rutherfords Labor nach einer potentiellen Weitwinkelstreuung. Das Ergebnis war so verblüffend, dass Rutherford später darüber sagte: *Es war bestimmt das unglaublichste Ergebnis, das mir je in meinem Leben widerfuhr. Es war fast so unglaublich, als wenn einer eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier*

¹¹⁰ Bildquelle und Textquelle online abrufbar unter: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1921/soddy/biographical/> (Zugang am 23.10.2020).

abgefeuert hätte und diese zurückgekommen wäre und ihn getroffen hätte“¹¹¹
(Rutherford et al. 1909)¹¹².

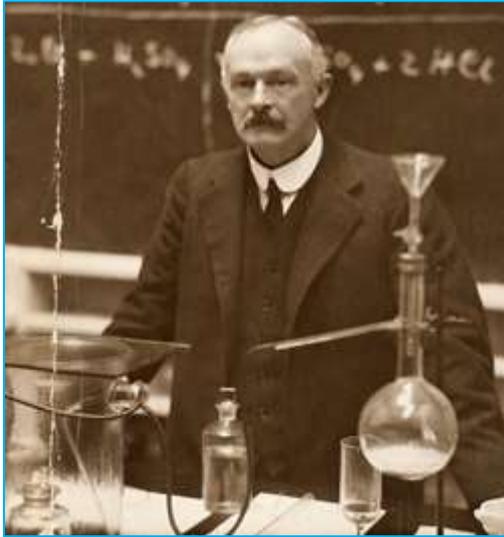


Abb. 59: MASSON

Dass das Heliumatom aus 2 Protonen und 2 Neutronen besteht, haben Rutherford, Royds, Marsden und Geiger (und alle Physiker und Chemiker zu dieser Zeitperiode) noch nicht gewusst. Erst im Jahr 1919 entdeckte Rutherford nach jahrelangen Experimenten das in jedem Atomkern ein positiv geladenes Teilchen, indem er *Protyle* vorab nannte. Der englische Chemiker David Orme Masson (1858 – 1937; Bild 59)¹¹³, der an der Universität Melbourne (Australien) Professor für Chemie war, schrieb 1921 einen Artikel *The Constitution of Atoms* (Masson 1921, 281 ff.)¹¹⁴:

*Finally the name „proton“ met with general approval, particularly as it suggests the original term given by Prout in his well-known hypothesis that all atoms are built up of hydrogen. The need of a special name for the nuclear unit of mass 1 was drawn attention to by Sir Oliver Lodge at the Sectional meeting, and the writer then suggested the name „proton“. By the end of the 19th century, however, Prout was best known for the hypotheses that atomic weights were multiples of that of hydrogen and that hydrogen was a fundamental building block of matter.*¹¹⁵

¹¹¹ Textquelle online abrufbar unter: *Lord Ernest Rutherford of Nelson - Wilhelm Exner Medaillen Stiftung*. <https://www.wilhelmexner.org/medalists/> (Zugang am 23.10.2020).

¹¹² Rutherford, Ernest; Marsden, Ernest and Geiger, Hans: *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. *Proceedings of the Royal Society* 82A (1909). S. 495 – 500.

· Rutherford, Ernest and Royds, Thomas: *The Nature of the Alpha Particle from Radioactive Substances*. In: *Philosophical Magazine*. Band 17, 1909, S. 281 – 286.

· Rutherford, Ernest; Marsden, Ernest and Geiger, Hans: *The Laws of Deflexion of a Particles through Large Angles*. *Philosophical Magazine* 25 (1913). S. 604 – 623.

· Rutherford, Ernest: *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*. *Philosophical Magazine*. Series 6, 21 (May 1911). S. 669 – 688.

· Rutherford, Ernest and Geiger, Hans: *The probability variations in the distribution of α -particles*. In: *Philosophical Magazine*. Band 20, Nummer 118, 1910. S. 698 – 707.

¹¹³ Bildquelle online abrufbar unter: museum.chemistry.unimelb.edu.au/people/view/35 (Zugang am 23.10.2020).

¹¹⁴ Masson, David Orme: *The Constitution of Atoms*. In: *The Philosophical Magazine*, Vol 41 (1921), S. 281 – 285.

¹¹⁵ Textquelle online abrufbar unter: https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Proton#cite_ref-15 (Zugang am 23.10.2020).

Das *Proton* wurde in den wissenschaftlichen Forschungsarbeiten von dem deutschen Physiker Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864 – 1928) bereits 1898 theoretisch postuliert! Wien (Abb. 60)¹¹⁶ erhielt den Nobelpreis für Physik 1911 „für seine Entdeckungen betreffend die Gesetze der Wärmestrahlung“ (genannt *Wien'sches Verschiebungsgesetz*)¹¹⁷. Wien „erforschte vor allem die Gesetzmäßigkeiten der Wärmestrahlung“. Er erfuhr experimentell, „dass man die Geißleröhre mit Wasserstoff füllen muss, um Kanalstrahlen mit dem größten Verhältnis von

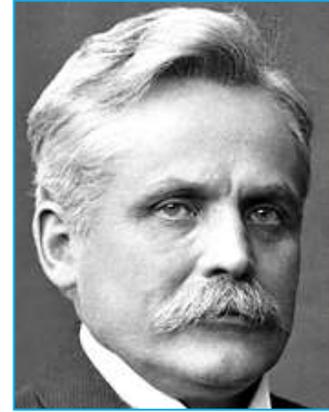


Abb. 60: WIEN

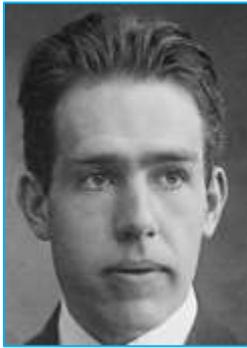


Abb. 61: BOHR

Ladung zu Masse zu erhalten“¹¹⁸.

Allerdings dachte Wien, diese Strahlung bestünde aus „positiven Elektronen“¹¹⁹.

Auch der dänische Physiker Niels Henrik David Bohr (1885 – 1962) stellte ein sonnenähnliches planetarisches Modell für das Wasserstoffatom dar (bekannt als *Bohr'sches Atommodell*)¹²⁰.

Nach seiner theoretischen Vorstellung dreht das negativ geladene Elektron um einen positiv geladenen Atomkern, wie die Planeten um die Sonne (im Sonnensystem). Allerdings

wurde das *Proton* wissenschaftlich per Definitionem noch nicht klar (wie heute) bestimmt. Die Physiker vermuteten noch, es handle sich um ein positiv geladenes Elektron! Niels Bohr (Abb. 61)¹²¹ reiste im Jahr 1907 nach Cambridge (England), um zuerst mit dem englischen Physiker, Entdecker des Elektrons (1897)



Abb. 62: THOMSON

¹¹⁶ Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 24.10.2020).

¹¹⁷ Textquelle online abrufbar unter: Ebd.

¹¹⁸ Textquelle online abrufbar unter: https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Proton#cite_ref-15 (Zugang am 23.10.2020).

¹¹⁹ Wien, Wilhelm: *Über positive Elektronen und die Existenz hoher Atomgewichte*. In: *Annalen der Physik*. Band 318 (4), 1904, S. 669 – 677.

¹²⁰ Bohr, Niels: *On the constitution of atoms and molecules I*. In: *Philosophical Magazine* 26, 1 (1913). S. 1 – 24.

· Bohr, Niels: *On the constitution of atoms and molecules II*. *Philosophical Magazine* 26 (1913). S. 476 – 502.

Dafür erhielt Bohr den Nobelpreis für Physik 1922 „für seine Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung“. Textquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 24.10.2020).

¹²¹ Bildquelle online abrufbar unter: www.biologie-schule.de/niels-bohr.php (Zugang am 24.10.2020).

und Nobelpreisträger für Physik 1906 Joseph John Thomson (1856 – 1940; Abb. 62)¹²² zusammenzuarbeiten. Thomson erhielt den Nobelpreis für Physik 1906 „als Anerkennung des großen Verdienstes, den er sich durch seine theoretischen und experimentellen Untersuchungen über den Durchgang der Elektrizität durch Gase erworben hat“¹²³.

Danach reiste Bohr nach Manchester (England) weiter, wo er mit Ernest Rutherford von 1911 – 1916 mitwirkte. Im Jahr 1911 veröffentlichte Rutherford beinahe ein Bohr'sches Atommodell, wo die negativ geladenen Elektronen um den positiv geladenen Atomkern kreisen. Auch Geiger und Marsden veröffentlichte ähnlich theoretische Arbeiten über das Atommodell (Rutherford 1911; Geiger und Marsden 1909 und 1913)¹²⁴. Niels Bohr bedankte sich für die Ermunterung von seinem Professor: *„In order to explain the results of experiments on scattering of α rays by matter Prof. Rutherford has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atom consists of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the nucleus is assumed to be the seat of the essential part of the mass of the atom, and to have linear dimensions exceedingly small compared with the linear dimensions of the whole atom. The number of electrons in an atom is deduced to be approximately equal to half the atomic weight. Great interest is to be attributed to this atom-model; for, as Rutherford has shown, the assumption of the existence of nuclei, as those in question, seems to be necessary in order to account for the results of the experiments on large angle scattering of the α rays. In an attempt to explain some of the properties of matter on the basis of this atom-model we meet, however, with difficulties of a serious nature arising from the apparent instability of the system of electrons: difficulties purposely avoid in atom-models previously considered, for instance, in the one proposed by Sir. J.J. Thomson According to the theory of the latter the atom consists of a sphere of uniform positive electrification, inside which the electrons move in circular orbits. ... I*

¹²² Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 24.10.2020).

¹²³ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 24.10.2020).

¹²⁴ Rutherford, Ernest: *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*. Philosophical Magazine. Series 6, 21 (May 1911). S. 669 – 688.

- Marsden, Ernest and Geiger, Hans: *On a Diffuse Reflection of the α -Particles*. Proceedings of the Royal Society 82A (1909). S. 495 – 500.
- Marsden, Ernest and Geiger, Hans: *The Laws of Deflexion of Particles through Large Angles*. Philosophical Magazine 25 (1913). S. 604 – 623.

wish here to express my thanks to Prof. Rutherford for his kind and encouraging interest in this work (Niels 1913, 1 ff.)¹²⁵.

Übersetzung: *Um die Ergebnisse von Experimenten zur Streuung von α -Strahlung durch Materie zu erklären, hat Prof. Rutherford eine Theorie zur Struktur von Atomen gegeben. Nach dieser Theorie besteht das Atom aus einem positiv geladenen Kern, der von einem Elektronensystem umgeben ist, das durch Anziehungskräfte des Kerns zusammengehalten wird. Die gesamte negative Ladung der Elektronen ist gleich der positiven Ladung des Kerns. Ferner wird angenommen, dass der Kern der Sitz des wesentlichen Teils der Masse des Atoms ist und lineare Abmessungen aufweist, die im Vergleich zu den linearen Abmessungen des gesamten Atoms außerordentlich klein sind. Die Anzahl der Elektronen in einem Atom wird als ungefähr gleich der Hälfte des Atomgewichts abgeleitet. Diesem Atommodell ist großes Interesse zuzuschreiben. Denn wie Rutherford gezeigt hat, scheint die Annahme der Existenz von Kernen notwendig zu sein, um die Ergebnisse der Experimente zur Großwinkelstreuung der α -Strahlung zu erklären. In einem Versuch, um die Eigenschaften der Materie auf der Grundlage dieses Atommodells zu erklären, stoßen wir jedoch auf ausschlaggebende Schwierigkeiten, die sich aus der offensichtlichen Instabilität des Elektronensystems ergeben. Also Schwierigkeiten der Atommodelle, die zuvor beispielsweise nach der vorgeschlagenen Theorie von Sir J. J. Thomson postuliert wurde. Nach Thomson besteht das Atom aus einer Kugel gleichmäßiger positiver Elektrifizierung, in der sich die Elektronen in Kreisbahnen bewegen. ... Ich möchte hier bei Prof. Rutherford für sein ansprechendes und ermutigendes Interesse an dieser Arbeit meinen Dank mitteilen (Niels 1913, 1 ff.)¹²⁶.*

Erst 1919 geforderte Ernest Rutherford, dass der Stickstoffatomkern aus „positiv geladenen Wasserstoffkernen“ aufgebaut sein sollte. „Dabei nahm er Bezug auf das



Wort *Protyle*, das eine hypothetische Grundsubstanz aller Materie bezeichnet. William Prout (Abb. 63)¹²⁷ hatte 1815 vermutet, dass Wasserstoff diese Substanz sei, so dass alle Atome aus Wasserstoffatomen aufgebaut seien. Rutherford schlug den Begriff *Proton* vor¹²⁸. „Umwandlung“ des Begriffs *Protyle* in *Proton*!

Abb. 63: PROUT

¹²⁵ Bohr, Niels: *On the constitution of atoms and molecules I*. In: *Philosophical Magazine* 26, 1 (1913). S. 1 – 24.

¹²⁶ Ebd.

¹²⁷ Bildquelle online abrufbar unter: <https://time.graphics/period/494486> (Zugang am 24.10.2020).

¹²⁸ Textquelle online abrufbar unter: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Proton> (Zugang am 24.10.2020).

William Prout (1785 – 1850) war ein englischer Chemiker, Arzt und Theologe (Prout 1815, 321 ff.)¹²⁹.

Protyle war nicht anders, als eine von Prout hypothetische Theorie, basiert auf chemischen Experimenten (Prout 1815, 321 ff.; 1816, 111 ff.)¹³⁰. *Protyle* wurde im 19. Jahrhundert als Basismaterie aller chemischen Elemente, Moleküle und Substanzen betrachtet. Rutherford nannte das Wort *Protyle* um, das von Prout 1815 dargestellt wurde und welches aus dem Altgriechischen $\pi\rho\omega\tau\eta\ \acute{\upsilon}\lambda\eta$ (*prōtē hylé*) herkam. $\pi\rho\omega\tau\eta\ \acute{\upsilon}\lambda\eta$ bedeutet *erste Materie* oder *erste Substanz*. Aus dem Begriff *Protyle* stammt die Benennung *Proton* ebenfalls aus dem Altgriechischen $\tau\omicron\ \pi\rho\omega\tau\omicron\nu$ (*tō prōton*) und heißt *das Erste*. Somit wurde die hypothetische Überlegung von *Protyle*, als Basissubstanz aller Atome, zu einem subatomaren Teilchen betrachtet: Das *Proton*.

Die α -Strahlung wurde nun mehr endgültig verhüllt: Sie ist ein Heliumkern mit zwei Protonen. Es dauerte dreizehn Jahre, bis die Physiker darauf gekommen sind, dass der Heliumkern besteht noch zusätzlich aus zwei Neutronen: Im Jahr 1932 publizierte der britische Physiker und Rutherfords Student und Mitarbeiter James Chadwick (1891 – 1974) seine bahnbrechende Entdeckung (Chadwick 1932, 312)¹³¹. Er erhielt den Nobelpreis für Physik 1935 „für die Entdeckung des Neutrons“ (Abb. 64)¹³².

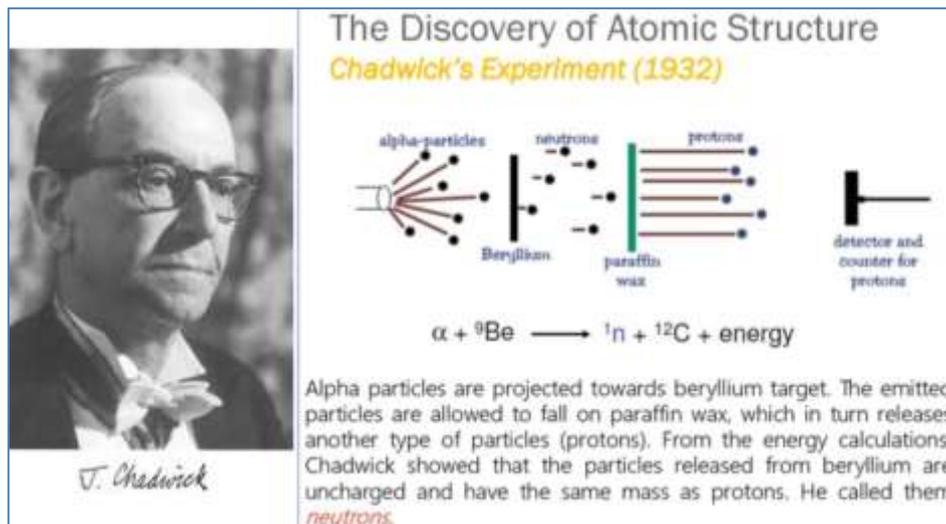


Abb. 64: DAS EXPERIMENT VON CHADWICK

¹²⁹ Prout, William: *On the Relation between the Specific Gravities of Bodies in their Gaseous State and the Weights of their Atoms*. Annals of Philosophy 6 (1815). S. 321 – 330.

¹³⁰ Ebd.

Prout, William: *Correction of a Mistake in the Essay on the Relation between the Specific Gravities of Bodies in their Gaseous State and the Weights of their Atoms*. Annals of Philosophy 7 (1816). S. 111 – 113.

¹³¹ Chadwick James: *Possible Existence of a Neutron*. In: Nature, Ausgabe Februar 27, 1932). Text online abrufbar unter: <http://web.mit.edu/22.54/resources/Chadwick.pdf> (Zugang am 07.10.2020).

¹³² Bildquelle online abrufbar unter: <https://en.ppt-online.org/414955> (Zugang am 07.10.2020).

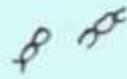
Name	Alpha-Strahlung	Beta-Strahlung	Gamma-Strahlung
Art der Strahlung	Teilchen aus 2 Protonen und 2 Neutronen  Da es identisch mit einem Helium-Atomkern ist, wird es auch als Helium-Ion bezeichnet. Kurz: He ²⁺ -Ion	Teilchen  Ein einzelnes Elektron, das den Atomkern mit hoher Geschwindigkeit verlässt.	Elektromagnetische Wellen  Bildlich lässt sich die Gamma-Strahlung als Bruchstücke der gesprengten Kette verstehen, welche den Atomkern zusammenhielt.
Ladung	zweifach positiv	negativ	elektrisch neutral
Reichweite	ca. 10 cm an Luft	ca. 5 - 10 m	unendlich
Abschirmung	1 Blatt Papier	dünnes Aluminiumblech ca. 100 Blatt Papier	nie vollständig möglich, aber durch sehr dicke Blei- oder Betonschichten kann sie eingedämmt werden.

Abb. 65: DARSTELLUNG VON DEN DREI STRAHLUNGEN, DIE VON ERNEST RUTHERFORD α -, β - UND γ -STRAHLUNGEN BENANNT WURDEN

Die α -Strahlung kann durch ein „Blatt Papier“ abgeschirmt werden (Abb. 65). Ihre biologische Wirkung ist nicht gefährlich, wenn sie auf ein lebend menschliches Gewebe trifft, da ihre Eindringtiefe dadurch gedämpft wird und in etwa „oberflächlich“ bleibt. In der erdatmosphärischen Luft beträgt die Reichweite von der α -Strahlung bei dem Normaldruck¹³³ und der Raumtemperatur¹³⁴ einige Zentimeter (Abb. 65)¹³⁵. Allerdings wirkt die α -Strahlung schädlich, falls sie in die Lungen eines lebenden Menschen durch Einatmen eindringt. Die β - und die γ -Strahlungen werden nächstens nun mehr dargestellt.

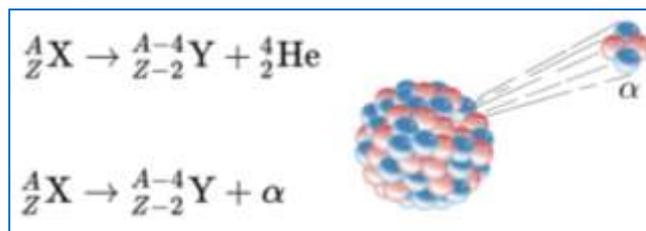


Abb. 66: RADIOAKTIVER ZERFALL DES HELIUMKERNS ODER α -STRAHLUNG (AUCH α -ZERFALL GENANNT)

¹³³ Der mittlere atmosphärische Luftdruck beträgt auf der Meereshöhe 101.325 Pa. Das entspricht in etwa 1 bar.

¹³⁴ In der Naturwissenschaft (Physik, Chemie, Biologie usw.) wird die Raumtemperatur um etwa 20°C betrachtet.

¹³⁵ Bildquelle online abrufbar unter: www.minicles.de/physik/radioaktivitaet/strahlung.htm (Zugang am 24.12.2020).

3.2 β -STRAHLUNG

β -Strahlung mit Energie von ungefähr 10 MeV kann durch eine „etwa 5 mm dünne“ Aluminiumplatte gedämpft werden (Abb. 65 und 67). In der erdatmosphärischen Luft beträgt die Reichweite von der β -Strahlung mit Energie von ca. 10 MeV bei dem Normaldruck und der Raumtemperatur rund 3 m. Die Reichweite der Strahlung ist Energieabhängig und könnte bei noch erhöhter Energie (mehr als 10 MeV) die 5 m überschreiten. β -Strahlung ist durchdringender als die α -Strahlung, aber weniger als die γ -Strahlung (Abb. 67)¹³⁶.

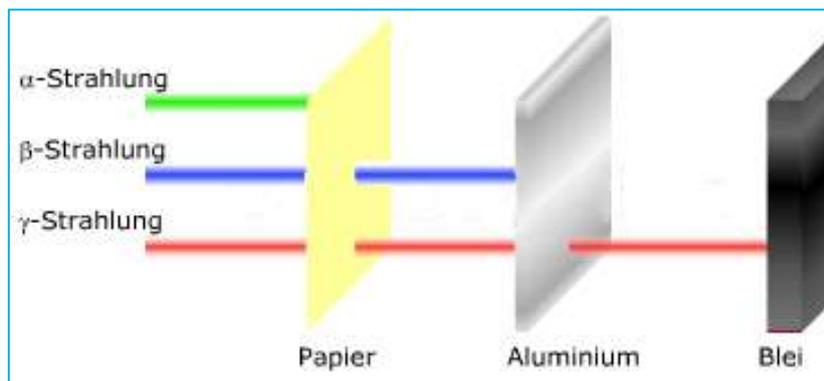


Abb. 67: EINDRINGSREICHWEITE UND MATERIALDÄMPFUNG DER STRAHLUNGEN

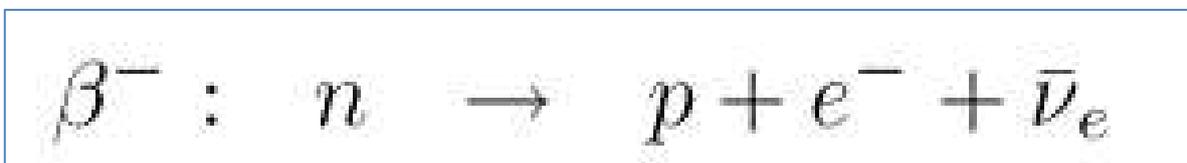
Es gibt – wie es vorher erwähnt wurde – positive und negative β -Strahlungen:

- β^- ist das Elektron e^-

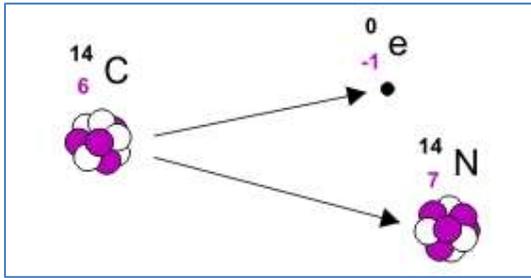
und

- β^+ ist das Positron e^+ .

β^- besteht aus energiereichen Elektronen. Es tritt auf, wenn beispielsweise ein Neutron n im Atomkern in ein Proton p zerfällt und das Teilchen e^- sowie ein Elektron-Antineutrino freisetzt. Dieser Zerfall unterliegt der schwachen Wechselwirkung (auch *schwache Kernkraft* genannt):



¹³⁶ Bildquelle online abrufbar unter:
<http://docplayer.org/27835688-Radiokaktivitaet-und-kernreaktionen.html> (Zugang am 07.10.2020).



Ein klassisches Beispiel ist der Zerfall vom Kohlenstoffatom in Stickstoffatom, β^- (e^-) und Elektron-Antineutrino (Siehe Kasten unten)¹³⁷. β^- -Strahlung wird manchmal therapeutisch in der Strahlentherapie zur Behandlung oberflächlicher Tumoren eingesetzt.

Schreibt man wie üblich Massenzahlen A oben und Kernladungszahlen Z unten an die Symbole, kann demnach der Zerfall des Neutrons durch folgende Formel beschrieben werden:

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Bezeichnet X das Mutter- und Y das Tochternuklid, so gilt für den β^- -Zerfall allgemein:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}_e$$

Kurz zum Elementarteilchen Neutrino: Es gibt bis dato drei bekannte Arten (Generationen) von Neutrinos bzw. drei Arten (Generationen) von Antineutrinos (Abb. 68).

Fermion	Symbol
Generation 1	
Electron neutrino	ν_e
Electron antineutrino	$\bar{\nu}_e$
Generation 2	
Muon neutrino	ν_μ
Muon antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$
Generation 3	
Tau neutrino	ν_τ
Tau antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$

Abb. 68: NEUTRINOS SIND ELEMENTARTEILCHEN UND GEHÖREN DER GRUPPE DER LEPTONEN (WIE DIE ELEKTRONEN, MUONEN UND TAUONEN). SIE SIND FERMIONEN MIT SPIN = 1/2. ELEKTRON-(ANTI)NEUTRINOS UNTERLIEGEN DER SCHWACHEN UND DER GRAVITATIVEN WECHSELWIRKUNGEN. DIE MUON- UND DIE TAU-(ANTI)NEUTRINOS UNTERLIEGEN DER ELEKTROMAGNETISCHEN, DER SCHWACHEN SOWIE DER GRAVITATIVEN WECHSELWIRKUNGEN.

¹³⁷ Textquelle online abrufbar unter:
<https://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/164738> (Zugang am 01.10.2020).

Das Elektron-Neutrino wurde erstmals 1930 von Wolfgang Ernst Pauli (1900 – 1958; Abb. 69)¹³⁸ postuliert, um zu erklären, wie der β -Zerfall Energie, Impuls und Drehimpuls „sparen“ kann. Im Gegensatz zu Niels Henrik David Bohr (1885 – 1962; Abb. 71)¹³⁹, der eine statistische Version der Erhaltungssätze vorschlug, um die beobachteten kontinuierlichen Energiespektren beim β -Zerfall zu erklären, vermutete Pauli ein unentdecktes Teilchen, das er als „Neutron“ bezeichnete. Er ging davon aus, dass das neue Teilchen zusammen mit dem Elektron beim β -Zerfall aus dem Atomkern emittiert wurde (vgl. Steinicke 2019, 12)¹⁴⁰. Der Nobelpreis für Physik 1945 erhielt Pauli „für die Entdeckung des als *Pauli-Prinzip* bezeichneten *Ausschlussprinzips*“¹⁴¹.



Abb. 69: PAULI



Abb. 70: BOHR

Bereits erhielt Niels Henrik David Bohr (Abb. 71) den Nobelpreis für Physik 1922 „für seine Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung“¹⁴².

Man sollte anmerken, dass der englische Physiker James Chadwick (1891 – 1974; Abb. 70)¹⁴³ Anfang der 1930er experimentell bewiesen konnte, dass der Atomkern auch aus Neutronen besteht (Chadwick 1932, 312)¹⁴⁴. Er erhielt den Nobelpreis für Physik



Abb. 71: CHADWICK

1935 „für die Entdeckung des Neutrons“¹⁴⁵.

Die im Jahr 1930 vorgestellte Pauli'sche Hypothese vom *Neutron* wurde im Jahr 1933 in *Neutrino* von dem italienischen Physiker

¹³⁸ Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹³⁹ Ebd.

¹⁴⁰ Steinicke, Wolfgang: *Wolfgang Pauli. Leben und Werke*. Textquelle online abrufbar unter: <http://docplayer.org/23905290-Wolfgang-pauli-leben-und-werk.html> (Zugang am 07.02.2022).

· Vgl. Artikel: „Das leichteste Teilchen des Universums wurde erstmals gewogen. Mit einer tonnenschweren Waage ist es gelungen, die Masse eines Neutrinums zu bestimmen“.

Textquelle online abrufbar unter:

<https://www.msn.com/de-at/nachrichten/other/das-leichteste-teilchen-des-universums-wurde-erstmals-gewogen/ar-AATT23R?cvid=ce4bf38472c84f78ab1686d720bef6c0&ocid=winp1taskbar> (Zugang am 16.02.2022).

¹⁴¹ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁴² Ebd.

¹⁴³ Ebd.

¹⁴⁴ Chadwick J.: *Possible Existence of a Neutron*. In: *Nature*, Ausgabe Februar 27, 1932). Online abrufbar unter: <http://web.mit.edu/22.54/resources/Chadwick.pdf> (Zugang am 07.10.2020).

¹⁴⁵ Textquelle online abrufbar unter: Ebd.



Abb. 72: FERMI

Enrico Fermi (1901 – 1954) ersetzt, um die Ambiguität mit der Entdeckung des „echten“ Neutrons vom Atomkern zu vermeiden. Das von Fermi vorgeschlagene *Elektron-Neutrino* „bedeutet (entsprechend der italienischen Verkleinerungsform *ino*) *kleines Neutron*“¹⁴⁶. Im Jahr 1938 erhielt Enrico Fermi (Abb. 72)¹⁴⁷ den Nobelpreis für Physik „für die Bestimmung von neuen, durch Neutronenbeschuss erzeugten radioaktiven Elementen und die in Verbindung mit diesen Arbeiten durchgeführte Entdeckung der durch langsame Neutronen ausgelösten Kernreaktionen“¹⁴⁸.

Die Abbildung gibt einen Überblick über Neutrinos (Abb. 73)¹⁴⁹.

Quarks

u	c	t
d	s	b

Leptonen

e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

Nach unserem heutigen Verständnis der Teilchenphysik teilen wir die fundamentalen Partikel in 3 Familien von Quarks und Leptonen ein.

Leptonen erscheinen in "Duplets". Wenn ein Neutrino mit Materie reagiert, produziert es sein entsprechendes geladenes Lepton:

Ein Elektron-Neutrino (ν_e) produziert ein Elektron (e).

Ein Myon-Neutrino (ν_μ) produziert ein Myon (μ), das in ein Electron und zwei Neutrinos zerfällt.

Ein Tau-Neutrino (ν_τ) produziert ein Tau (τ), das sehr schnell in leichtere Teilchen zerfällt.

Im Teilchenstrahl am CERN werden vor allem Myon-Neutrinos und einige Elektron-Neutrinos produziert. Der Nachweis von Wechselwirkungen von Tau-Neutrinos wäre der direkte Beweis, dass einige der Myon-Neutrinos im Strahl zu Tau-Neutrinos oszilliert sind, was nur möglich ist, wenn die Neutrinos tatsächlich eine Masse besitzen.

Neutrino-Oszillation!

Der positive Nachweis, dass Neutrinos massiv sind, würde einen grossen Einfluss auf unser Verständnis der Wechselwirkung zwischen den Elementarteilchen haben.

Abb. 73: ÜBER NEUTRINOS

¹⁴⁶ Textquelle online abrufbar unter: <https://web.physik.rwth-aachen.de/~stahl/Seminar/Behrens.pdf> (Zugang am 07.10.2020).

¹⁴⁷ Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁴⁸ Ebd.

¹⁴⁹ Bildquelle online abrufbar unter: <https://slideplayer.org/slide/12679554> (Zugang am 07.10.2020).

Die positive β -Strahlung, also β^+ ist das Positron (e^+).

β^+ besteht aus energiereichen Positronen. Es tritt auf, wenn beispielsweise ein Proton p in einem Atomkern in ein Neutron n zerfällt und das Teilchen e^+ sowie ein Elektron-Neutrino freisetzt. Dieser Zerfall unterliegt der schwachen Wechselwirkung (auch *schwache Kernkraft* genannt):



Wenn ein Positron (β^+) auf ähnliche Geschwindigkeiten wie die Elektronen im Material verlangsamt wird, vernichtet das Positron ein Elektron und setzt dabei zwei γ -Strahlungen mit 511 keV frei (Abb. 74)¹⁵⁰. Diese beiden γ -Strahlungen werden aus der Positronenvernichtung erzeugt und bestehen aus energiereichen Photonen, d. h. elektromagnetischer Strahlung (Abb. 76). Sie bewegen sich in entgegengesetzte Richtung mit Lichtgeschwindigkeit (Abb. 74).

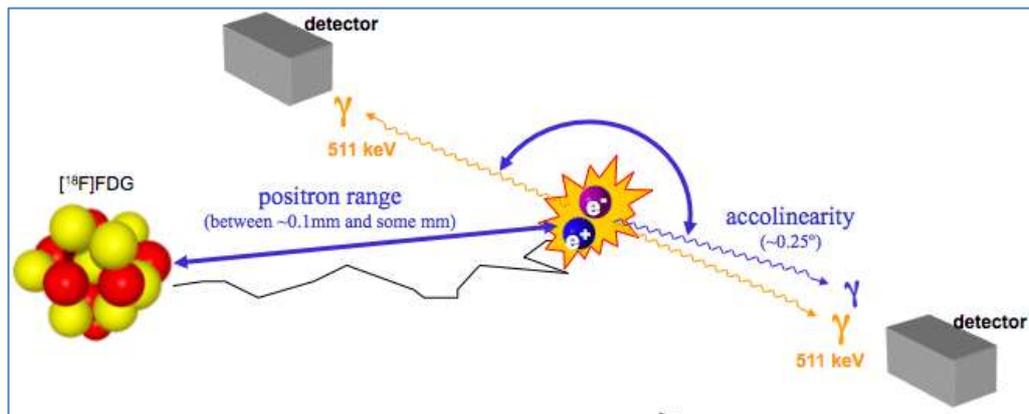
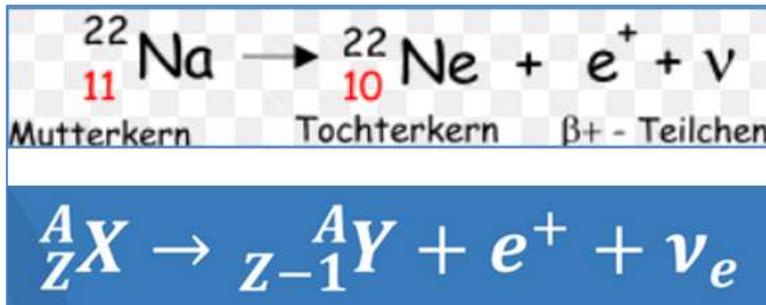


Abb. 74: DAS POSITRON VERNICHTET EIN ELEKTRON UND SETZT DABEI ZWEI γ -STRAHLUNGEN MIT 511 KEV FREI. AUF DIESEM PHYSIKALISCHEN PHÄNOMEN BERUHT EINE POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAFIE (PET).

Beispiel für β^+ -Zerfall:



¹⁵⁰ Bildquelle:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Radiopharmaceutical-chemistry-for-positron-emission>
(Zugang am 07.10.2020).

3.3 γ -STRAHLUNG

Die ionisierende γ -Strahlung wurde 1900 bei Untersuchungen an Radium (γ -Strahlungsquelle) vom französischen Chemiker und Physiker Paul Ulrich Villard (1860 – 1934; Abb. 75)¹⁵¹ entdeckt. Die vom Radiumatomkern emittierte Strahlung wurde von Ernest Rutherford 1903 γ -Strahlung genannt und bezeichnete sie als radioaktiven Zerfallsprozess des Radiumatomkerns (vgl. Trenn 1976, 61 ff.)¹⁵².



Abb. 75: VILLARD

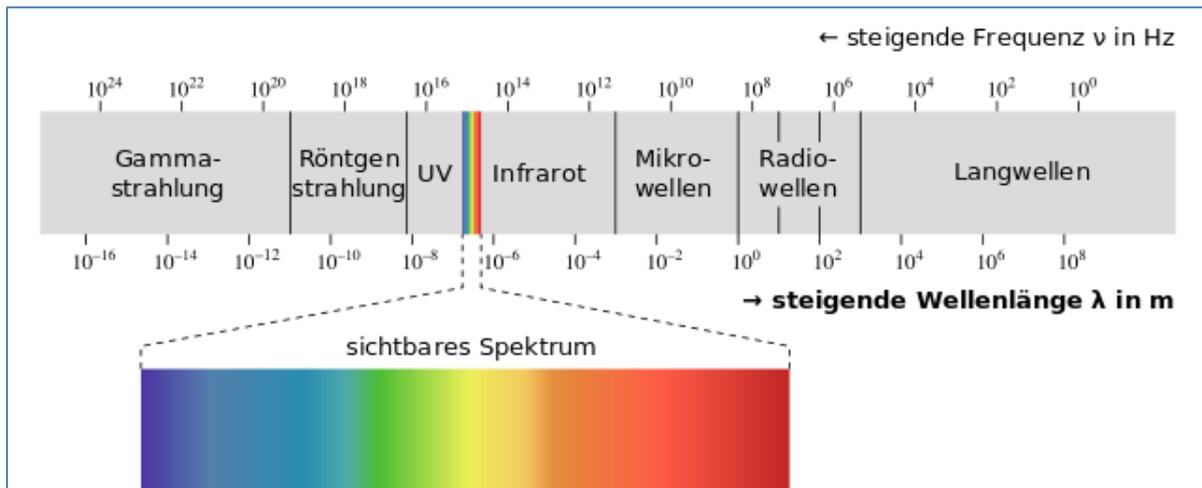


Abb. 76: DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM

Rutherford hat danach jahrelang experimentelle Versuche gemacht, um die Wellenlänge von der γ -Strahlung des Radiums zu messen. Er stellte fest, dass sie der Röntgenstrahlung ähnlich ist, jedoch kürzere Wellenlänge und damit höhere Frequenz aufweist (Abb. 76)¹⁵³. Es handelt sich also um elektromagnetische Strahlung (elektromagnetische Welle), die durch den radioaktiven Zerfall vom Radiumatomkern entsteht. Diese Strahlung ist somit eine elektromagnetische Welle (Abb. 76) mit der Fotonenenergie (nach der im Jahr 1900 aufgestellten Planck'schen Formel):

¹⁵¹ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.pinterest.com/pin/136374694941511811/> (Zugang am 02.10.2020).

¹⁵² Trenn, Thaddeus J.: *Rutherford on the Alpha-Beta-Gamma Classification of Radioactive Rays*. Isis Bd. 67 (1976) S. 61ff. Online abrufbar unter: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/351545> (Zugang am 02.10.2020).

¹⁵³ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.lampe.de/magazin/das-elektromagnetische-spektrum/> (Zugang am 02.10.2020).

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ [J]} \quad \text{mit} \quad f = \frac{c}{\lambda} \text{ [Hz]}$$

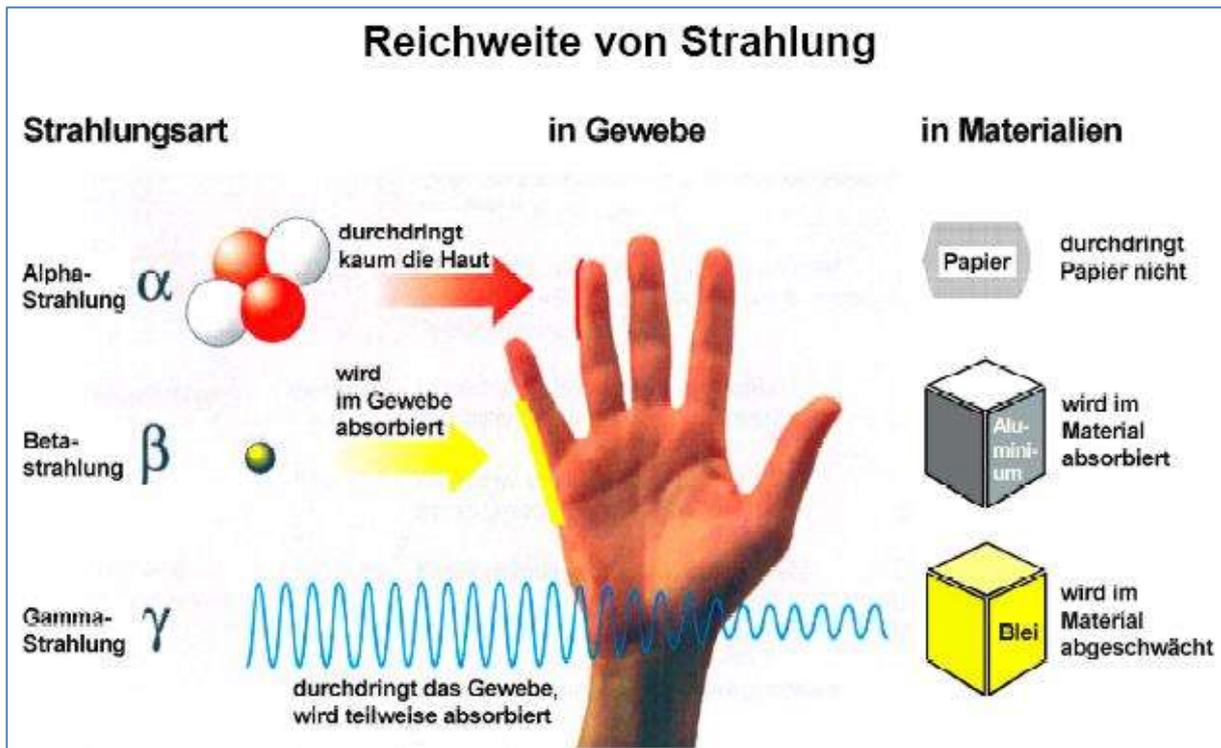


Abb. 77: EINE HOHE γ -STRAHLUNGSDOSIS VERURSACHT GESUNDHEITLICHE GENETISCHE SCHÄDEN (SCHWERE UND AKUTE GEWEBESCHÄDIGUNG WIE KREBS) IM LEBENDEN KÖRPERORGANISMUS. FÜR DIE ÜBERLEBENDEN DER ATOMBOMBENANSCHLÄGE AUF HIROSHIMA UND NAGASAKI (1945) STARBEN DANACH ETWA 90% AN KREBS.

Es wird demnächst die *Halbwertszeit* beim radioaktiven Zerfall eines atomaren Radionuklids dargestellt. Dieses physikalische Phänomen (*Radioaktivität* genannt) kann entweder natürlich entstehen oder durch künstliche Quellen vom Menschen induziert erzeugt.



Abb. 78: DAS EHEPAAR MARIE UND PIERRE CURIE IN IHREM LABOR IN PARIS

4. RADIOAKTIVITÄT UND ZERFALLSGESETZ: IHRE ANWENDUNG IN DER NUKLEARMEDIZIN

Der zusammengesetzte Begriff *Radioaktivität* stammt aus dem Lateinischen *radiare* (Englisch: *radiation*) und bedeutet *strahlen* und *activus* bedeutet *tätig* (*Radioaktivität* bedeutet wörtlich übersetzt *Strahlungstätigkeit*).



Abb. 79: VON LINKS NACH RECHTS

ANTOINE HENRI BECQUEREL UND DAS EhePAAR MARIE UND PIERRE CURIE

MARIE CURIE WURDE IN WARSCHAU (POLEN) ALS MARIA SALOMEA SKŁODOWSKA GEBOREN

Marie (1867 – 1934; Abb. 78 und 79)¹⁵⁴ und Pierre Curie (1859 – 1906; Abb. 78 und 79)¹⁵⁵ führten diesen *Terminus technicus* (auf Französisch *radioactivité*)¹⁵⁶ 1898 ein, um instabile Atomkerne (*Radionuklide* genannt), die natürlich spontan ionisierende Strahlung aussenden, zu bezeichnen.

Die Radioaktivität wurde bereits 1896 vom französischen Physiker Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908; Abb. 79)¹⁵⁷ bei der Arbeit mit phosphoreszierenden Materialien zufälligerweise entdeckt. Es handelt sich dabei um einen Umwandlungsprozess eines Atomkerns beim radioaktiven Atomkernzerfall. Dieser natürliche Zerfall (Radioaktivität) ist ein physikalischer Atomkernspaltungsprozess: Das Atom wandelt in ein anderes Atom um.

Die drei häufigsten Arten des atomaren Kernzerfalls wurden bereits in der vorliegenden Arbeit erklärt: α -Zerfall, β -Zerfall und γ -Zerfall (oder -Strahlung).

Die moderne Nuklearmedizin (u. a. **PET** und **SPECT**) beruht auf diesen physikalischen Zerfallprozessen. **PET** und **SPECT** sind „nuklearmedizinische Verfahren, die unter Verwendung verschiedener radioaktiver Stoffe (*Tracer* genannt) zur Darstellung metabolischer Vorgänge im Körper eingesetzt werden“¹⁵⁸.

¹⁵⁴ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.hanisauland.de/kalender/marie-curie-geburtstag/> (Zugang am 26.09.2020).

¹⁵⁵ Ebd.

¹⁵⁶ Curie, Pierre; Curie, Marie; Bémont, Gérard: *Sur une nouvelle substance fortement radio-active contenue dans la pechblende*. In: *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Band 127, 1898, S. 1215 – 1217.

Text Online abrufbar unter: <http://archive.org/stream/surunesubstancen127curi#page/n9/mode/2up> (Zugang am 26.09.2020).

¹⁵⁷ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/chimie-radioactivite-pionniers-784/> (Zugang am 26.09.2020).

¹⁵⁸ Textquelle online abrufbar unter:

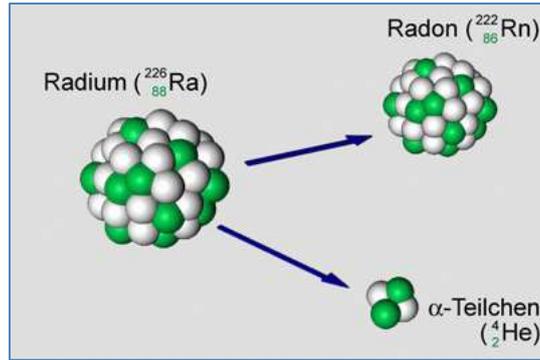


Abb. 80: BEIM RADIOAKTIVEN KERNZERFALL EINES RADIUMATOMS ENTSTEHEN EIN RADONATOM UND EIN HELIUMATOMKERN (α -ZERFALL ODER α -STRAHLUNG). DIE α -STRAHLUNG „FLIEGT“ AUS DEM RADIUMATOMKERN MIT EINER GESCHWINDIGKEIT BIS ETWA 2×10^7 m/s (RUND 10% DER LICHTGESCHWINDIGKEIT IM VAKUUM).

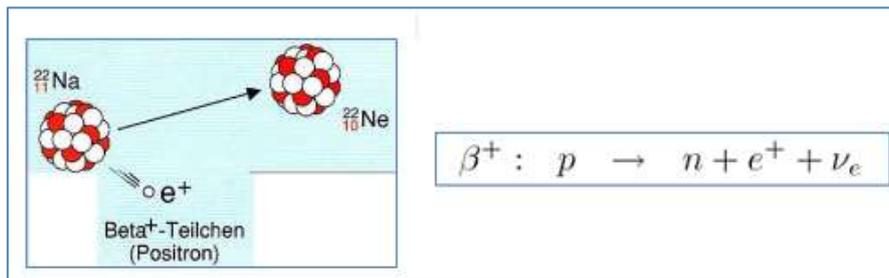


Abb. 81: BEIM RADIOAKTIVEN KERNZERFALL EINES NATRIUMATOMS ENTSTEHEN EIN NEONATOM UND EIN POSITRON (β^+ -ZERFALL ODER β^+ -STRAHLUNG): DABEI ZERFÄLLT EIN PROTON p UNTER AUSSENDUNG EINES POSITRONS e^+ (ODER β^+) UND EINES ELEKTRON-NEUTRINOS IN EIN NEUTRON n , DAS IM NATRIUMATOMKERN BLEIBT. DAS POSITRON e^+ ODER DIE β^+ -STRAHLUNG „FLIEGT“ AUS DEM NATRIUMKERN MIT EINER GESCHWINDIGKEIT BIS ETWA $2,7 \times 10^8$ m/s (ANNÄHERND 90% DER LICHTGESCHWINDIGKEIT IM VAKUUM).

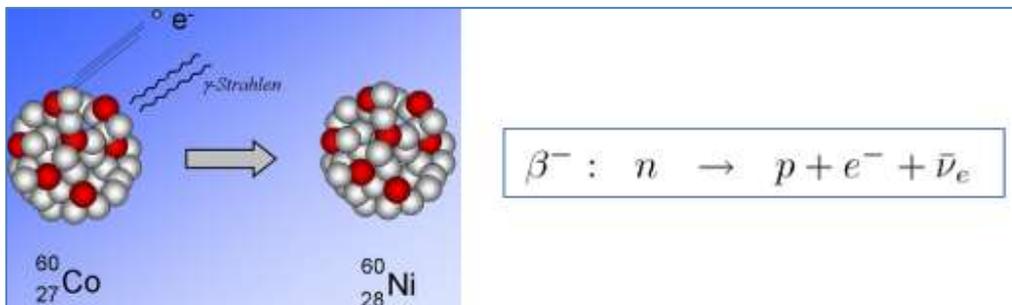


Abb. 82: BEIM RADIOAKTIVEN KERNZERFALL EINES KOBALTATOMS ENTSTEHEN EIN NICKELATOM UND EIN ELEKTRON (β^- -ZERFALL ODER β^- -STRAHLUNG): DABEI ZERFÄLLT EIN NEUTRON n UNTER AUSSENDUNG EINES ELEKTRONS e^- UND EINES ELEKTRON-ANTINEUTRINOS IN EIN PROTON p , DAS IM KOBALTATOMKERN BLEIBT. DABEI WIRD AUCH EINE IONISIERENDE γ -STRAHLUNG ENTSTEHEN. DIE γ -STRAHLUNG IST EINE ELEKTROMAGNETISCHE WELLE UND SIE „FLIEGT“ AUS DEM KOBALTATOMKERN MIT LICHTGESCHWINDIGKEIT IM VAKUUM: $c = 299.792.458$ m/s.

<https://www.klinikum-kulmbach.de/leistungsspektrum/spalte-2/klinikum-kulmbach-2/institut-fuer-nuklearmedizin/leistungsspektrum/pet/ct-untersuchung> (Zugang am 26.09.2020).

„Atomkerne heißen **radioaktiv**, wenn sie spontan unter Strahlungsemission und Energieabgabe aus einem instabilen Zustand in eine stabilere Konfiguration oder Struktur übergehen. Die zeitliche Abfolge dieser Umwandlungen erfolgt stochastisch, also vom Zufall abhängig, und ist für einen individuellen Atomkern nicht vorhersagbar. Finden die Kernumwandlungsprozesse ohne vorherige Einwirkung auf den Atomkern statt, bezeichnet man dies als **natürliche** oder spontane Radioaktivität. **Künstliche** oder induzierte Radioaktivität entsteht dagegen, wenn durch Kernreaktionen oder durch Kernspaltung das energetische Gleichgewicht der als Reaktionsprodukte entstehenden Atomkerne gestört wird“ (Krieger 2019, 91)¹⁵⁹.

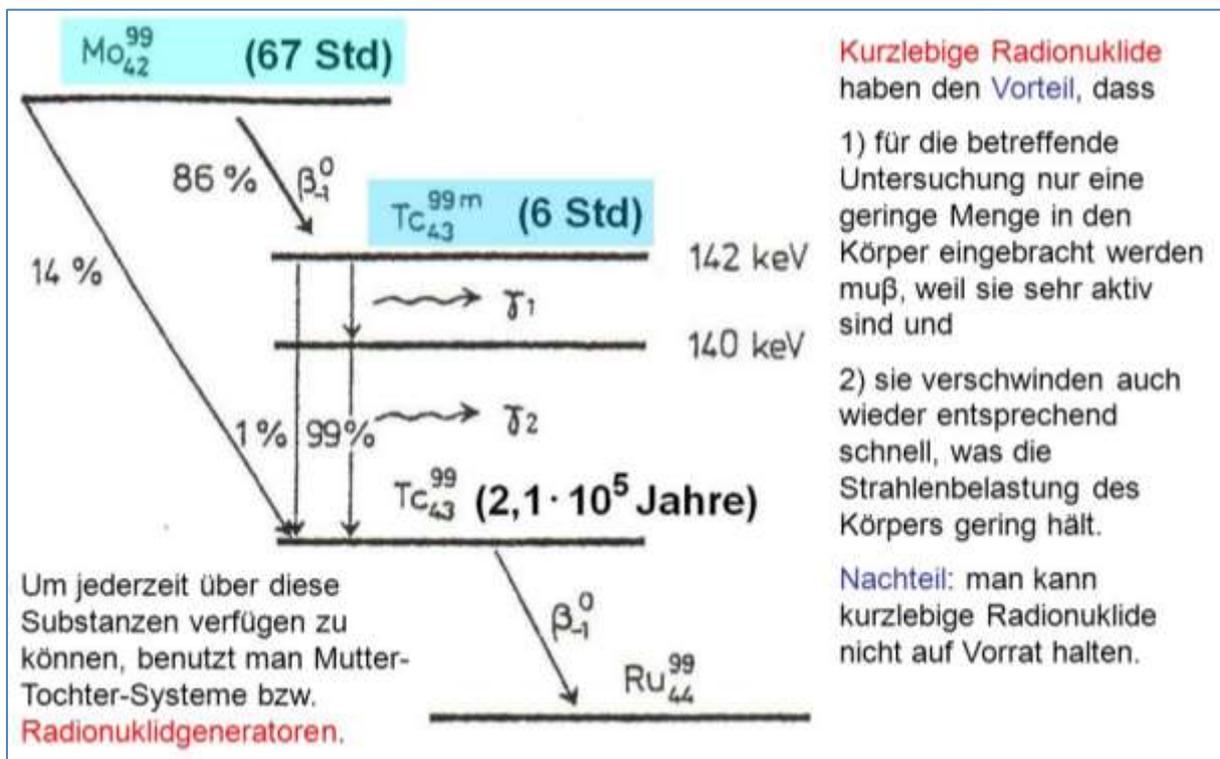


Abb. 83: ZERFALL VON MOLYBDÄN UND TECHNETIUM

BILDQUELLE: <https://slideplayer.org/slide/8900104/>

AUTOR: PÉTER MARÓTI (ZUGANG AM 14.10.2020)

¹⁵⁹ Krieger, Hanno: Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes. Heidelberg: Springer 2019.

Die Radioaktivität verläuft exponentiell (Abb. 84)¹⁶⁰ nach folgender mathematisch-physikalischen Formel (Zerfallsgesetz):

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$N(t)$... Anzahl radioaktiver Atomkerne zu einer bestimmten Zeit t , das heißt, Anzahl der zu einer bestimmten Zeit t noch nicht zerfallenen radioaktiven Atomkerne.

N_0 ... Anzahl radioaktiver Atomkerne zu der Zeit $t = 0$ (am Anfang).

λ ... Zerfallskonstante [s^{-1}]

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ wird angegeben durch

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Das Zerfallsgesetz wird somit wie folgt dargestellt:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-t \cdot (\ln 2) / T_{1/2}}$$

Wobei

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$$

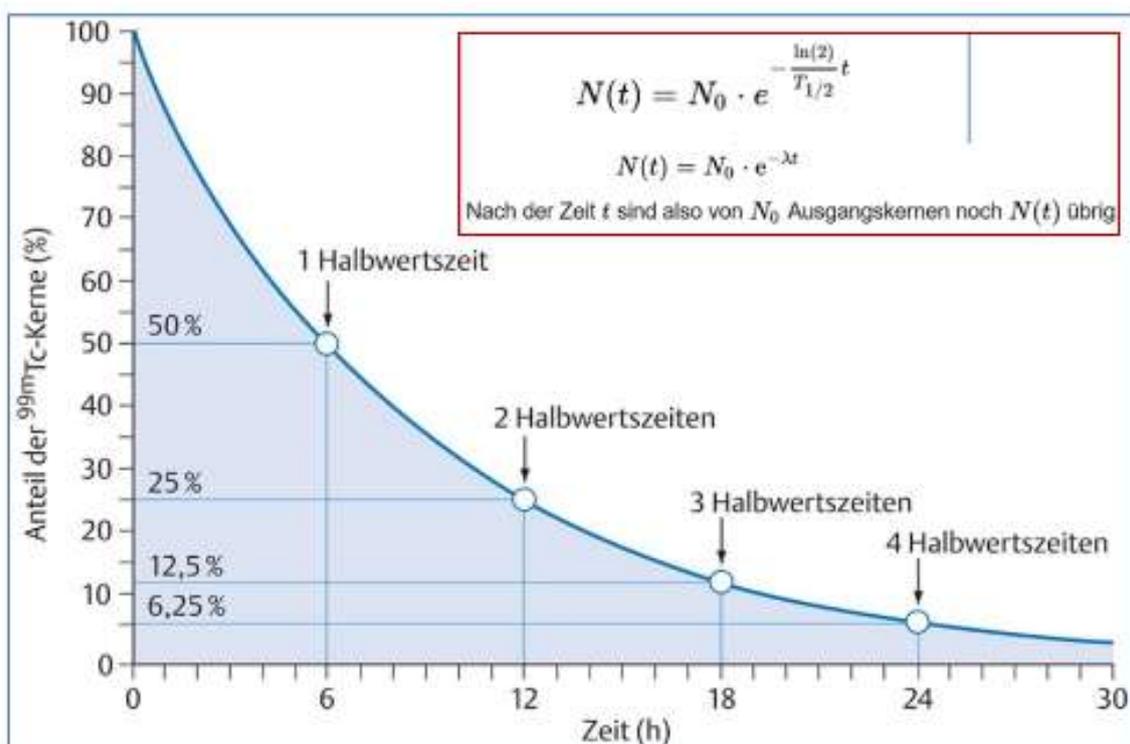


Abb. 84: „Das ZERFALLSGESETZ AM BEISPIEL VON ^{99m}Tc. NACH JEWEILS EINER HALBWERTSZEIT (ETWA 6,01 STUNDEN) IST DIE HÄLFTE DER ZUVOR NOCH VORHANDENEN KERNE ZERFALLEN. DADURCH HALBIERT SICH AUCH DIE AKTIVITÄT.

DER RADIOAKTIVE ZERFALL IST EIN STOCHASTISCHER PROZESS. FÜR EINEN EINZELNEN ATOMKERN KANN NUR DIE ZERFALLSWAHRSCHEINLICHKEIT PRO ZEITINTERVALL (ZERFALLSKONSTANTE λ) ODER DIE MITTLERE LEBENSDAUER $\tau = 1/\lambda$ ANGEGEBEN WERDEN.

DARAUS ERGIBT SICH DAS ZERFALLSGESETZ $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$. ES GIBT AN, WIE VIELE VON DEN ANFÄNGLICH VORHANDENEN KERNEN N_0 NACH ABLAUF DER ZEIT t IM MITTEL NOCH VORHANDEN SIND“.

¹⁶⁰ Bildquelle und Textquelle online abrufbar unter: <https://eref.thieme.de/ebook> (Zugang am 26.09.2020).

Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ gibt an, dass nach einer bestimmten Zeit t , die Anzahl radioaktiver Atomkerne $N(t)$ um die Hälfte ihres Anfangswertes gesunken ist. Bei dem metastabilen Isotop Technetiumatom ^{99m}Tc ist $T_{1/2} = 6,01$ Stunden. ^{99m}Tc ist ebenfalls ein Hauptthema dieser Arbeit, wegen seiner wichtigen Rolle in der modernen Nuklearmedizin (u. a. **SPECT**). Das wird demnächst ausführlicher durchgeleuchtet.

Historisch wurde der ursprüngliche Begriff der *Halbwertszeit* im Jahr 1907 von dem neuseeländischen *Physiker* Ernest Rutherford (1871 – 1937) eingeführt, der den *Nobelpreis für Chemie* 1908 „für seine Untersuchungen über den Zerfall der Elemente und die Chemie der radioaktiven Stoffe“¹⁶¹ erhielt.

Rutherford bestimmte als Erster das Alter von Gesteinen, indem er den Zerfall von dem natürlich radioaktiven Radium ^{226}Ra in Abhängigkeit von Zeit t zu Blei (^{206}Pb) festlegte. Radium wurde 1898 von der polnischen Physikerin Marie Skłodowska-Curie und dem französischen Physiker (ihrem Ehemann) Pierre Curie (Abb. 86)¹⁶² in Frankreich als radioaktives Nuklid entdeckt.

Im Jahr 1903 teilten Marie und Pierre Curie gemeinsam mit dem

französischen Physiker Antoine Henri Becquerel (Abb. 85)¹⁶³ den Nobelpreis für



Abb. 86: EHEPAAR CURIE

Physik. Antoine Henri Becquerel erhielt den Nobelpreis „als Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, den er sich durch die Entdeckung der spontanen Radioaktivität erworben hat“ und Marie und Pierre Curie (Abb. 86) „als Anerkennung des außerordentlichen Verdienstes, den sie sich durch ihre gemeinsamen Arbeiten über die von Becquerel entdeckten Strahlungsphänomene erworben haben“¹⁶⁴.

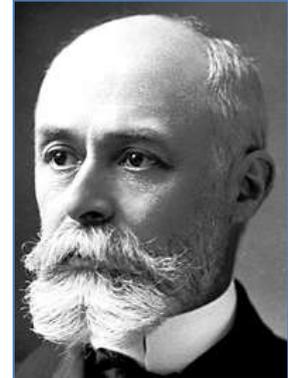


Abb. 85: BECQUEREL

¹⁶¹ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 23.10.2020).

¹⁶² Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.br.de/service/programm/br-magazin/marie-curie-dokumentation-2016-13-100.html> (Zugang am 07.10.2020).

¹⁶³ Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁶⁴ Ebd.

Wie es bereits vorher erwähnt wurde: Der Begriff *Radioaktivität* wurde 1898 von dem Ehepaar Marie und Pierre Curie (Abb. 86) bezeichnet.

Bereits 1896 entdeckte Antoine Henri Becquerel das natürlich radioaktive Phänomen. Becquerel entdeckte zufällig die Radioaktivität, während er die Fluoreszenz von Uransalze untersuchte (Abb. 88)¹⁶⁵. Auf Vorschlag von dem französischen Mathematiker und Physiker Jules Henri Poincaré (1854 – 1912; Abb. 87)¹⁶⁶ versuchte er festzustellen, ob dieses Phänomen von der gleichen Natur ist wie Röntgenstrahlen. Durch Beobachtung einer Fotoplatte, die mit dem Material in Kontakt gebracht wurde, stellt er fest, dass es sogar beeindruckend ist. Wenn das Material keinem Sonnenlicht ausgesetzt wurde, dann sendet das Material



Abb. 87: POINCARÉ



Abb. 88: DIE URANSALZE

seine eigene Strahlung aus, ohne dass eine Anregung durch Licht erforderlich ist. Diese Strahlung wurde *Hyperphosphoreszenz* genannt. Antoine Henri Becquerel publizierte seine Entdeckung in der französischen Zeitschrift *Comptes-rendus de l'Académie des sciences (Berichte der Akademie der Wissenschaften)* am 24. Februar 1896 unter dem Titel *Sur les radiations émises par phosphorescence (Über die durch Phosphoreszenz emittierten Strahlungen)*, Becquerel 1896, 420 – 421). Danach verfasste er einen weiteren Artikel am 1. März 1896 unter dem Titel *Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents (Über die durch phosphoreszierenden Körper unsichtbar emittierte Strahlung)*, Becquerel 1896, 501 – 502).

Antoine Henri Becquerel publizierte seine Entdeckungen über die Radioaktivität zwischen 1896 und 1903:

- *Sur les radiations émises par phosphorescence*. In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*. Band 122, 1896, S. 420 – 421.

¹⁶⁵ Bildquelle online abrufbar unter: https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Antoine_Henri_Becquerel (Zugang am 26.09.2020).

¹⁶⁶ Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

- *Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 122, 1896, S. 501 – 503.
- *Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles émises par divers corps phosphorescents.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 122, 1896, S. 559 – 564.
- *Sur les radiations invisibles émises par les sels d'uranium.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 122, 1896, S. 689 – 694.
- *Sur les propriétés différentes des radiations invisibles émises par les sels d'uranium, et du rayonnement de la paroi anticathodique d'un tube de Crookes.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 122, 1896, S. 762 – 767.
- *Émission de radiation nouvelles par l'uranium métallique.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 122, 1896, S. 1086 – 1088.
- *Sur diverses propriétés des rayons uraniques.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 123, 1896, S. 1086 – 1088.
- *Recherches sur les rayons uraniques.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 124, 1897, S. 438 – 444.
- *Sur la loi de la décharge dans l'air de l'uranium électrisé.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 124, 1897, S. 800 – 803.
- *Influence d'un champ magnétique sur le rayonnement des corps radio-actifs.* In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences.* Band 129, 1899, S. 996 – 1001.
- *Sur le rayonnement de l'uranium et sur diverses propriétés physiques du rayonnement des corps radio-actifs.* In: *Rapports présentés au Congrès international de physique réuni à Paris en 1900 sous les auspices de la Société française de physique.* Band 3, Gauthier-Villars, Paris 1900, S. 47 – 78.
- *Recherches sur une Propriété Nouvelle de la Matière.* *Memoires de l'Académie des Sciences.* Band 46, Fermin-Didot, Paris 1903.

Bernard Pire berichtet: „Découverte de la radioactivité naturelle“. „En février 1896, Antoine Henri Becquerel prépare des cristaux de sulfate double d'uranyle et de potassium et, afin d'étudier leur phosphorescence, les place sur une plaque photographique entourée d'un papier. Le soleil étant absent, il enferme ses plaques dans un tiroir. Quelques jours plus tard, il constate qu'elles ont été fortement impressionnées dans le noir. Il en conclut que le sel émet un rayonnement de façon intrinsèque. Ces rayons «uraniques» aiguisent la curiosité de Pierre et Marie Curie qui comprennent

que l'origine de ce rayonnement est due à certains éléments, l'uranium en particulier. Après avoir manipulé des tonnes de minerai, ils parviennent à isoler deux nouveaux éléments radioactifs, le polonium et le radium. Pour ces découvertes capitales, Henri Becquerel et les Curie reçoivent le prix Nobel de physique en 1903¹⁶⁷.



Abb. 89: NOTIZEN VON BECQUEREL AUF DER FOTOGRAFISCHE PLATTE
DIE STRAHLUNG SCHWÄRZTE FOTOGRAFISCHE PLATTE OHNE VORHERIGE BELICHTUNG

Übersetzung:

„Entdeckung der natürlichen Radioaktivität“: „Im Februar 1896 stellte Antoine Henri Becquerel Kristalle aus Doppelsulfat von Uranyl und Kalium her und legte sie zur Untersuchung ihrer Phosphoreszenz auf eine von einem Papier umgebene Fotoplatte. Da die Sonne nicht vorhanden ist, schließt er seine Teller in eine Schublade. Einige Tage später stellt er fest, dass sie im Dunkeln sehr beeindruckt waren (Abb. 89)¹⁶⁸. Er

¹⁶⁷ Pire, Bernard: *Découverte de la radioactivité naturelle*.

Text online abrufbar unter: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/decouverte-de-la-radioactivite-naturelle/> (Zugang am 26.09.2020).

¹⁶⁸ Ebd.

kommt zu dem Schluss, dass Salz von Natur aus Strahlung abgibt. Diese „Uran“-Strahlungen wecken die Neugier von Pierre und Marie Curie, die verstehen, dass der Ursprung dieser Strahlung auf bestimmten Elementen beruht, insbesondere auf Uran. Nachdem sie Tonnen Erz gehandhabt haben, schaffen sie es, zwei neue radioaktive Elemente, Polonium und Radium, zu isolieren. Für diese bedeutenden Entdeckungen erhielten Henri Becquerel und die Curies 1903 den Nobelpreis für Physik“ (Bernard Pire)¹⁶⁹.

Acht Jahre später wurde es Marie Curie einen zweiten Nobelpreis verliehen: Im Jahr 1911 erhielt sie den Nobelpreis für Chemie „als Anerkennung des Verdienstes, das sie sich um die Entwicklung der Chemie erworben hat durch die Entdeckung der Elemente Radium und Polonium, durch die Charakterisierung des Radiums und dessen Isolierung in metallischem Zustand und durch ihre Untersuchungen über die Natur und die chemischen Verbindungen dieses wichtigen Elements“¹⁷⁰.

Pierre Curie wurde im Jahr 1906 von einem Pferdکutscher tod überfahren (Abb. 90)¹⁷¹. Antoine Henri Becquerel starb 1908 an Leukämie (Abb. 90)¹⁷².

Marie Curie starb 1934 ebenfalls an Leukämie (Abb. 90)¹⁷³.

Sie fassten mit blossen Händen die radioaktiven Stoffe an. Ohne Strahlungsschutz waren sie direkt mit diesen Radionukliden in Berührung!

In der vorliegenden Arbeit werden den Strahlungsschutz und die Radioaktivitätsgefahr eingehend noch auseinandergesetzt.

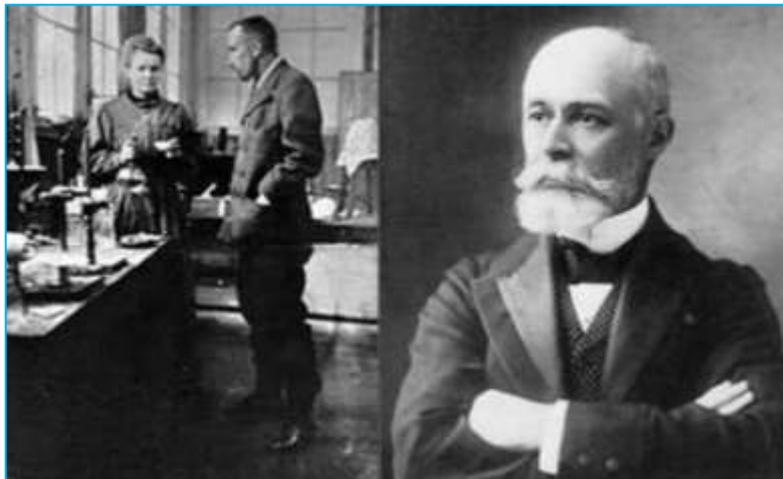


Abb. 90: BECQUEREL (RECHTS) ERWECKTE DIE „RADIOAKTIVE“ NEUGIER VOM Ehepaar CURIE (LINKS)

¹⁶⁹ Ebd.

¹⁷⁰ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁷¹ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.trtworld.com/art-culture/culturally-dosed-how-the-atomic-era-shaped-our-stories> (Zugang am 07.10.2020).

¹⁷² Ebd.

¹⁷³ Ebd.

5. DAS METASTABILE ISOTOP TECHNETIUMATOM ^{99m}Tc UND SEINE KÜNSTLICHE ERZEUGUNG

Das Zerfallsgesetz in der Abb. 84 wurde am Beispiel von dem metastabilen Isotop Technetiumatom ^{99m}Tc dargestellt. Seine Ordnungszahl ist 43 (Abb. 91 ff.; Tab. 1).

Eigenschaften		$^{99m}\text{Tc}_{43}$ Tc ₅₆ Technetium $T_{1/2}$ 6.01 h
Dichte:	11,49 g/cm ³	
Siedepunkt:	4877 °C	
Schmelzpunkt:	2172 °C	
Elektronegativität:	1,4	
Verwendung: Nur geringe Mengen werden wirtschaftlich genutzt, größter Anteil kommt in der Medizin als Bestandteil von Radiopharmaka zur Verwendung, es findet jedoch auch als Korrosionsschutz und als Betastrahlenquelle Verwendung.		

Abb. 91: EINIGE EIGENSCHAFTEN VON ^{99m}Tc

Einige Technetiumisotope	Halbwertszeit ($T_{1/2}$)	Zerfallprodukt
^{95}Tc	20 Stunden	^{95}Mo
^{96}Tc	4,28 Tage	^{96}Mo
^{97}Tc	$2,6 \cdot 10^6$ Jahre	^{97}Mo
^{98}Tc	$4,2 \cdot 10^6$ Jahre	^{98}Ru
^{99}Tc	211.100 Jahre	^{99}Ru
	6,01 Stunden	^{99}Tc ^{99}Ru

Tabelle 1

Kernreaktionen: nach Beschuss von Molybdän (Mo) mit Neutronen (n). Durch β -Zerfall (unter Abgabe von e^-) entsteht $^{99m}\text{Technetium}$, dann $^{99}\text{Technetium}$, daraus Ruthenium (Ru).

$$^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow ^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$$

Es ist diese Strahlung, die in der medizinischen Diagnostik genutzt wird

Abb. 92: ZERFALL DES METASTABILEN ISOTOPS TECHNETIUMATOM ^{99m}Tc

Technetium (Abb. 91 ff.; Tab. 1) ist ein sehr seltenes Übergangsmetall und liegt in der 5. Periode und der 7. Nebengruppe im Periodensystem (Mangangruppe).

Legende

Ordnungszahl	Atommasse	Symbol	Serie (Flächenfarbe)
17	35,451	Cl	Metalle
1,16	3,22		Alkalimetalle
			Übergangsmetalle
			Metalle
			Halbmetalle
			Nichtmetalle
			Lanthanoide
			Actinoide
			Halogene
			Edekgase
			unbekannt

Gruppe

13	14	15	16	17	18
B	C	N	O	F	Ne
10,811	12,011	14,007	15,999	18,998	20,180
2,04	2,46	2,26	3,04	3,25	3,43
2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46

Technetium (Tc) Properties:

- Symbol: Tc
- Ordnungszahl: 43
- Atommasse: 98,9063 u
- Dichte: 11,49 g/cm³ (25°C)
- Schmelzpunkt: 2430 K (2157°C)
- Siedepunkt: 4538 K (4265°C)
- Elektronegativität: 1,9 (Pauling-Skala)

Abb. 93: TECHNETIUM

- **ORDNUNGSZAHL:** 43
- **NEUTRONENZAHL:** 56
- **ATOMMASSE:** 98,9063 u
- **ELEKTRONENKONFIGURATION:** [Kr] 4d⁶ 5s¹ ODER [Kr] 4d⁵ 5s²
- **ATOMRADIUS:** 185 pm
- **AGGREGATZUSTAND:** FEST
- **KRISTALLSTRUKTUR:** HEXAGONAL
- **DICHTE:** 11,49 g/cm³ (25°C)
- **SCHMELZPUNKT:** 2430 K (2157°C)
- **SIEDEPUNKT:** 4538 K (4265°C)
- **ELEKTRONEGATIVITÄT:** 1,9 (PAULING-SKALA)

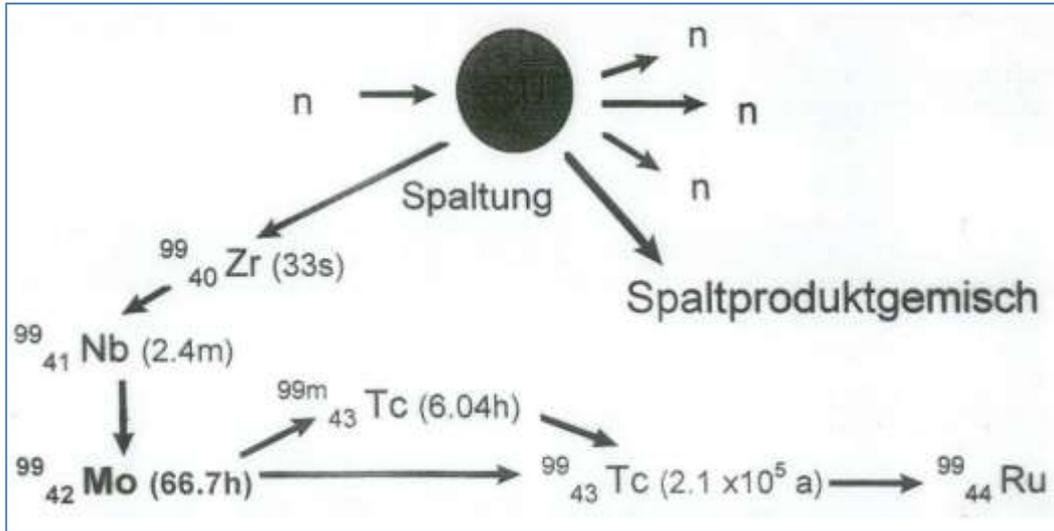


Abb. 95: ERZEUGUNG VON MOLYBDÄN UND TECHNETIUM

BILDQUELLE: <https://slideplayer.org/slide/8900104/>

AUTOR: PÉTER MARÓTI

(ZUGANG AM 14.10.2020)

Erzeugung durch (n,γ) - Reaktion	
- durch Neutronenaktivierung im Reaktor:	$_{42}^{98}\text{Mo} \text{ (n,}\gamma\text{)} _{42}^{99}\text{Mo}$
- natürliches Molybdän:	
Isotopengemisch	15,86% ^{92}Mo , 9,12 % ^{94}Mo , 15,70% ^{95}Mo , 16,50% ^{96}Mo , 9,45% ^{97}Mo , 23,75% ^{98}Mo , 9,62% ^{100}Mo
- Bestrahlungstarget:	metallisches Molybdän, Molybdäntrioxid
- mittels Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) erzeugbar:	1,342 10^{10} Bq/g Mo (0,362 Ci/g Mo) (durch Anreicherung ca. Faktor 4 Erhöhung)
- Auflösung:	in Lauge
- Kontaminationen:	$^{106,108}\text{Re}$, $^{187,188}\text{W}$, ^{60}Co u.a.
- Hauptnachteil:	zu geringe spezifische Aktivität

Abb. 94: ERZEUGUNG VON MOLYBDÄN UND TECHNETIUM

TEXTQUELLE: <https://slideplayer.org/slide/8900104/>

AUTOR: PÉTER MARÓTI

(ZUGANG AM 14.10.2020)

Der ^{99m}Tc -Atomkern befindet sich in einem angeregten Zustand (Abb. 91 ff.; Tab. 1)¹⁷⁴. Als physikalischer Folgeprozess der Atomkernanregung vom ^{99m}Tc „kommt es zur Emission von γ -Strahlung. Bedingt durch die diskreten Energiezustände ist auch das Spektrum eines γ -Strahlers diskret. Die Massenzahlen des Nuklids bleiben unverändert. Verglichen mit anderen Strahlungsarten ist die Reichweite der neutralen, masselosen γ -Quanten am Höchsten“¹⁷⁵ (Abb. 91 ff.; Tab. 1).

Der ^{99m}Tc -Atomkern geht mit einer Halbwertszeit von rund 6 Stunden durch Aussendung von γ -Strahlung in den Grundzustand ^{99}Tc über (Abb. 91 ff.; Tab. 1): „In der Medizin hat v. a. das metastabile ^{99m}Tc Bedeutung. Grund hierfür ist die recht kurze Halbwertszeit und die aus dem Zerfallsprozess emittierte γ -Strahlung. Außerdem besitzt das Tc-Isotop (Tab. 1) die Fähigkeit, sich an Biomoleküle anzulagern, weshalb es als *Tracer* bei szintigrafischen Untersuchungen zum Einsatz kommt (z. B. bei Schilddrüsenuntersuchungen)“. Das wird hauptsächlich in **SPECT** angewendet.¹⁷⁶

„Produktion von Radionukliden

- Natürlich vorkommende Radioisotope haben im Allgemeinen lange Halbwertszeiten, gehören zu relativ schweren Elementen, und sind daher für die medizinische Diagnostik unbrauchbar.
- Radioisotope für die medizinische Diagnostik werden im Allgemeinen künstlich hergestellt.
- Spaltungsprozesse können so verwendet werden, dass die interessanten Radioisotope chemisch von den Spaltprodukten getrennt werden können.
- Ein Zyklotron kann benutzt werden um geladene Teilchen auf so hohe Energien zu beschleunigen, dass das Material des Targets mit dem sie zu Kollision gebracht werden aktiviert wird.
- Ein Radioisotopengenerator wird im Allgemeinen im Krankenhaus verwendet um kurzlebige Radioisotope herzustellen.
- Ein Technetium-99m-Generator (^{99m}Tc -Generator) besteht aus einer Aluminiumsäule, die ^{99}Mo enthält welches in ^{99m}Tc zerfällt (Abb. 91 ff.; Tab. 1). Eine Salzlösung wird durch den Generator gepresst um das entstandene ^{99m}Tc zu eluieren. Die entstehende Lösung heißt Natriumpertechnetat.

¹⁷⁴ Bei ^{99m}Tc handelt es sich um relative Atommasse des Technetiumatoms (99) als metastabiles Isotop (99m). Also ^{99m}Tc .

¹⁷⁵ Textquelle online abrufbar unter: <https://medizinphysik.wiki/physikalische-grundlagen/> (Zugang am 26.09.2020).

¹⁷⁶ Textquelle online abrufbar unter: <https://flexikon.doccheck.com/de/Technetium> (Zugang am 26.09.2020).

- Sowohl Überdruck- als auch Unterdruck-Generatoren werden verwendet.
- Ein Dosiskalibrator wird benötigt, wenn ein ^{99m}Tc -Generator verwendet wird. Zum einen um die Radioaktivität bei der Herstellung der am Patienten anzuwendenden Dosis zu messen und um zu prüfen ob Reste von ^{99}Mo in der gesamten Lösung vorhanden sind¹⁷⁷ (Abb. 91 ff.; Tab. 1).

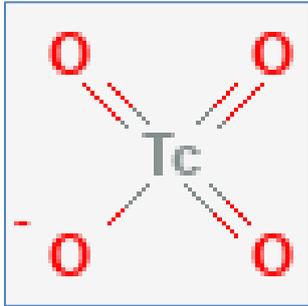


Abb. 96: PERTECHNETATE

Pertechnetate (TcO_4^-) ist eine häufige verfügbare chemische Verbindung (Abb. 96). Pertechnetate ist ein γ -emittierendes Radionuklid und dient als Bildgebungsverfahren, das zur Diagnose von Krankheiten in vielen Geweben verwendet wird, insbesondere im Magen-Darm-System, im kardiovaskulären und zerebralen Kreislauf, im Gehirn, in der Schilddrüse und in den Gelenken. Natriumpertechnetat $\text{Na}^+(\text{TcO}_4^-)$ ist ebenfalls eine bekannte chemische Verbindung (Abb. 97).¹⁷⁸

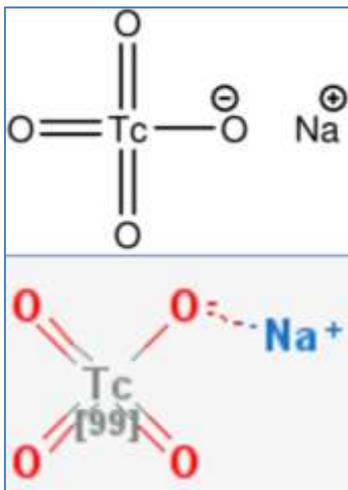
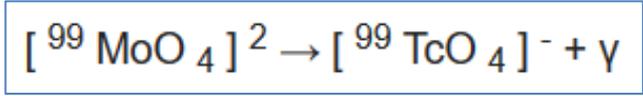


Abb. 97: NATRIUMPERTECHNETAT

Die Herstellung vom Natriumpertechnetat (Abb. 97) erfolgt durch Zerfall des radioaktiven $^{99}\text{MoO}_4$. Pertechnetate (TcO_4^-) kann als „Lösung intravenös verabreicht werden. Diese reichert sich in Regionen mit hoher Stoffwechselrate, zum Beispiel in Karzinomen, an. Im Körper zerfällt das metastabile Technetiumnuklid unter Gammazerfall mit einer Halbwertszeit von ca. 6 Stunden. Mit einer Gammakamera kann die vom Technetium emittierte Strahlung aufgenommen werden und daraus ein so genanntes Szintigramm erstellt werden¹⁷⁹ (Abb. 91 ff.; Tab. 1).

¹⁷⁷ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikibooks.org/wiki/Physikalische_Grundlagen_der_Nuklearmedizin/_Kapitelzusammenfassungen (Zugang am 04.10.2020).

¹⁷⁸ Natrium[^{99}Mo]molybdat-Lösung aus Kernspaltprodukten. Europäisches Arzneibuch, 8. Ausgabe, Grundwerk 2014, Band 1. Stuttgart: Deutscher Apotheker Verlag. S. 1670.

¹⁷⁹ Textquelle online abrufbar unter: [https://www.chemgeo.uni-](https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegemedia/arbeitsgruppe+chemiedidaktik/radioaktivität_tc.pdf)

[jena.de/chegemedia/arbeitsgruppe+chemiedidaktik/radioaktivität_tc.pdf](https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegemedia/arbeitsgruppe+chemiedidaktik/radioaktivität_tc.pdf) (Zugang am 10.10.2020).

Technetium ist ein silbergraues kristallines Übergangsmetall. Es ist das leichteste Isotop aller radioaktiven chemischen Elemente. Technetiumisotope sind instabil, außer dem vollständigen ionisierten Zustand von ^{97}Tc (Tab. 1). Fast das gesamte verfügbare Technetium wird synthetisch hergestellt. Natürlich vorkommendes Technetium ist ein spontanes Spaltprodukt in Uranerz und Thoriumerz. Das häufigste natürliche Isotop ist ^{99}Tc , allerdings nur in Spuren.

Im Jahr 1937 wurde das Technetiumisotop ^{97}Tc als erstes vorwiegend *künstliches* Element hergestellt. Deshalb wurde seine Bezeichnung (*Technetium*) aus dem Griechischen $\tau\epsilon\chi\nu\eta\tau\acute{o}\varsigma$ (*Handwerk* oder *Kunst*) hergeleitet.



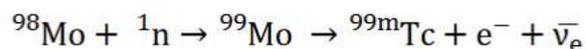
Abb. 99: **PERRIER**

Eine kurzlebige γ -Strahlung eines *künstlichen* emittierenden $^{99\text{m}}\text{Tc}$ wird in der

Nuklearmedizin für Diagnose verwendet: „Soll Technetium in der Medizin eingesetzt werden, so beschießt man Molybdän mit Neutronen (Abb. 100). Das daraus entstandene Molybdän zerfällt als β -Strahler (e^-) in das metastabile $^{99\text{m}}\text{Tc}$ “ (Wiegrebe 2015)¹⁸⁰



Abb. 98: **SEGRÈ**



Der italienische Chemiker Carlo Perrier (1886 – 1948; Abb. 99)¹⁸¹ und der italienische Physiker Emilio Gino Segrè (1905 – 1989; Abb. 98)¹⁸² sind die ersten Hersteller des künstlichen Technetiumisotops ^{97}Tc (im Jahr 1937).



Segrè und Perrier stellten u. a. auch durch mit Beschuss von Neutronen an Molybdän das Technetium her (Abb. 100). Sie isolierten dadurch die Isotope $^{95\text{m}}\text{Tc}$ und ^{97}Tc (Perrier et al. 1937)¹⁸³. Das Neutron wurde bereits von Chadwick 1932 entdeckt. Also fünf Jahre zuvor.

¹⁸⁰ Wiegrebe, Wolfgang: *Technetium in der Diagnostik*. Text online abrufbar unter: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020).

¹⁸¹ Bildquelle online abrufbar unter:

<http://newlandsproject.com/Biographies/perrier.htm> (Zugang am 04.10.2020).

¹⁸² Bildquelle online abrufbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁸³ Perrier, Carlo; Segrè, Emilio (1937): *Technetium: The Element of Atomic Number 43*. Nature 159 (4027): 24.

$${}^{98}_{42}\text{Mo} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{99}_{42}\text{Mo} + \gamma$$

$${}^{98}_{42}\text{Mo}(n,\gamma){}^{99}_{42}\text{Mo}$$

$${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc} + e^- + \bar{\nu}_e$$

Kernreaktionen: nach Beschuss von Molybdän (Mo) mit Neutronen (n). Durch β -Zerfall (unter Abgabe von e^-) entsteht ${}^{99\text{m}}$ Technetium, dann 99 Technetium, daraus Ruthenium (Ru).

$$\begin{array}{ccccccc} & & \gamma & & e^- & & \gamma & & e^- \\ & \nearrow & & \nearrow & & \nearrow & & \nearrow & \\ \text{n} & & & & & & & & \\ \downarrow & & & & & & & & \\ {}^{98}_{42}\text{Mo} & \rightarrow & {}^{99}_{42}\text{Mo} & \rightarrow & {}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc} & \rightarrow & {}^{99}_{43}\text{Tc} & \rightarrow & {}^{99}_{44}\text{Ru} \end{array}$$

$${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$$

Es ist diese Strahlung, die in der medizinischen Diagnostik genutzt wird

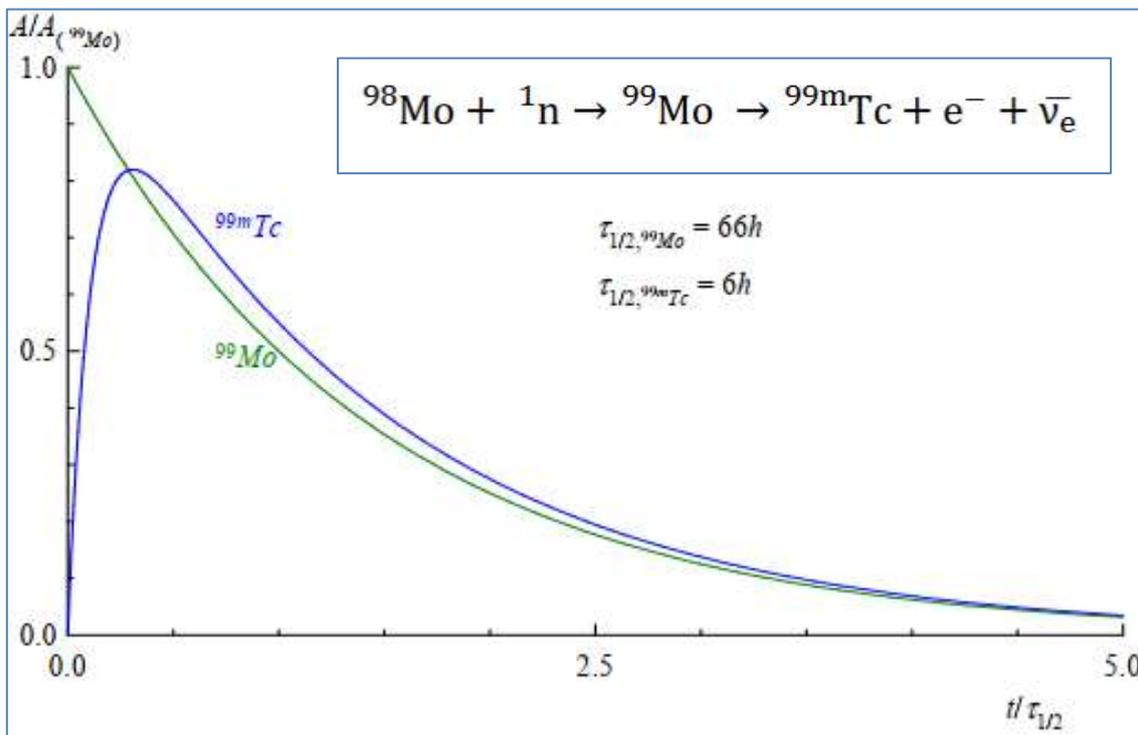


Abb. 100: „ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER AKTIVITÄT DER NUKLIDE ${}^{99}\text{Mo}$ UND ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ IM RADIOAKTIVEN GLEICHGEWICHT, WOBEI DIE AKTIVITÄT VON ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ ZU $t = 0$ WILLKÜRLICH GLEICH 0 EINGESETZT WURDE“ (JAGENBREIN 2009, 16)

BILD- UND TEXTQUELLE: JAGENBREIN, MARTIN

„PRÄPARATION UND QUALITÄTSKONTROLLE VON FLUOR-18-MARKIERTEN RADIOPHARMAKA FÜR DAS PET-IMAGING“

UNIVERSITÄT WIEN: DIPLOMARBEIT 2009



Abb. 102:
SEABORG

Im Jahr 1947 isolierten Emilio Segrè und Glenn Theodore Seaborg (1912 – 1999; Abb. 102)¹⁸⁴ das metastabile Isotop ^{99m}Tc , das heute im medizinischen Diagnoseverfahren **SPECT** eingesetzt wird (vgl. Wiegrebe 2015)¹⁸⁵.

Emilio Segrè erhielt (gemeinsam mit Owen Chamberlain 1920 – 2006; Abb. 101)¹⁸⁶ den Nobelpreis für Physik 1959. Allerdings „für ihre Entdeckung des Antiprotons“¹⁸⁷.



Abb. 101: CHAMBERLAIN

Seit der Entdeckung des Technetiumatoms in 1937 wurde in terrestrischen Materialien viel nach natürlichen Technetiumquellen gesucht. Allerdings ist Technetium ein zu seltenes Element! Deshalb wird es für medizinisch-diagnostischen Zweck *künstlich* hergestellt (also *technisch*: Daher der aus dem Altgriechischen Begriff *Technetium*, wie es vorher schon erwähnt wurde). Es folgt noch eine kurze Beschreibung des ^{99m}Tc -Generators und der ^{99m}Tc -Erzeugung:

„An einer mit Aluminiumoxid gefüllten Chromatographiesäule wird radioaktives $^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ (Molybdat-Ion) gebunden (Abb. 96 ff.). ^{99}Mo zerfällt zu ^{99m}Tc , und aus Molybdat entsteht Pertechnetat (Abb. 96 ff.), das durch isotonische NaCl-Lösung von der Trägersäule eluiert und dabei an Natrium gebunden wird ($\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$; vgl. KMnO_4). Bei der Kern-Umwandlung werden 87,6% des ^{99}Mo in ^{99m}Tc überführt, 12,4% direkt in ^{99}Tc , das wegen seiner sehr langen Halbwertszeit diagnostisch wertlos ist, aber auch nicht stört. Nachdem $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ unter Druck oder im Vakuum von der Säule eluiert wurde, wird aus dem darin verbliebenen ^{99}Mo weiterhin ^{99m}Tc gebildet, sodass der Generator nach 18 bis 24 h wieder Na-Pertechnetat abgeben kann. Wegen der β -Strahlung wird die Apparatur zum Schutz der Mitarbeiter mit Blei ummantelt (Abb. 103). Der Generator wird nach etwa einer Woche ausgetauscht, weil ^{99}Mo dann weitgehend verbraucht ist“ (Wiegrebe 2015)¹⁸⁸.

¹⁸⁴ Bildquelle online abrufbar unter:

<http://www.mysteryofmatter.net/Seaborg.html> (Zugang am 04.10.2020).

¹⁸⁵ Wiegrebe, W.: *Technetium in der Diagnostik*. In: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020).

¹⁸⁶ Bildquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁸⁷ Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).

¹⁸⁸ Wiegrebe, W.: *Technetium in der Diagnostik*. In: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020).

- 1937 L. Perrier und E. Segré erzeugen erstmalig das Element 43: ^{94}Mo (d, n) $^{95\text{m}}\text{Tc}$
- 1958 Erster ^{94}Mo / $^{95\text{m}}\text{Tc}$ Generator
- Ab 1960 Versuche zur Nuklearmedizinischen Verwendung (P. Richards)
- Ab 1970 Breite diagnostische Anwendung durch Einführung des Prinzips von "Instant"-Kits
- Ab 1980 Ausweitung des Kit-Prinzips auf unterschiedliche Organsysteme wie Skelett, Ausscheidungsorgane, Lunge...
- Stürmische Entwicklung der Produktion*
- Ab 1985 Nächster Schritt $^{95\text{m}}\text{Tc}$ -Pharmaka der 2. Generation
Diffusible Tracer
Neutrale Tc-Komplexe für Diagnostik von Myocard und Hirn
Diagnostika mit spezifischer Ausscheidung
Tc-MAG3 wird aktiv in den Nierentubuli sezerniert

Abb. 104: ERSTER $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -GENERATOR WURDE 1958 HERGESTELLT

TEXTQUELLE: <https://slideplayer.org/slide/8900104/>

AUTOR: PÉTER MARÓTI

(ZUGANG AM 14.10.2020)

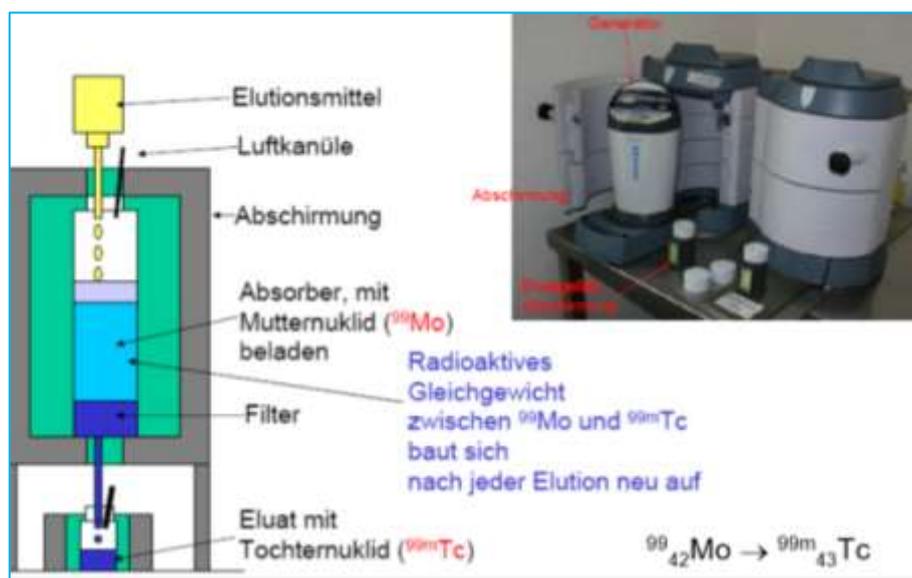


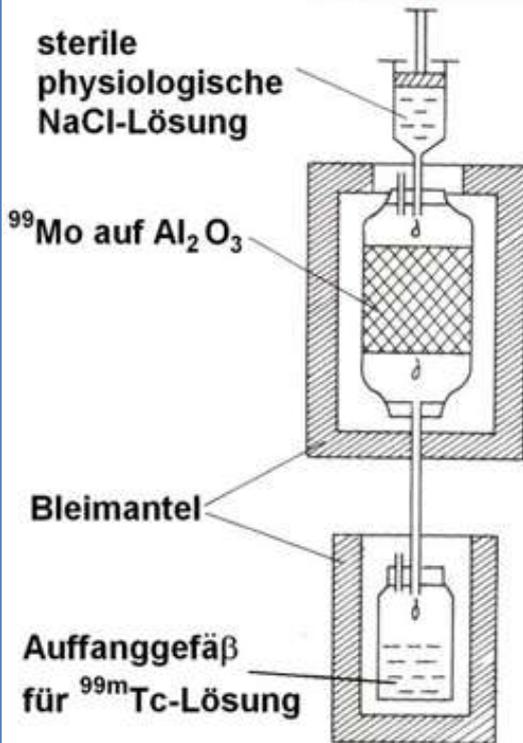
Abb. 103: DER $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -GENERATOR

BILDQUELLE: <https://slideplayer.org/slide/8900104/>

AUTOR: PÉTER MARÓTI

(ZUGANG AM 14.10.2020)

Generatorsystem zur Gewinnung von ^{99m}Tc durch Elution mit NaCl-Lösung



Im Radionuklidgenerator wird aus der radioaktiven Muttersubstanz ^{99}Mo , einem β -Strahler, das Technetium-Isomer ^{99m}Tc gewonnen.

Die langlebige Muttersubstanz, Molybdän (nicht wasserlösliches Ammoniummolybdänat, NH_4MoO_4) auf einem Ionenaustauscher (Al_2O_3) adsorbiert.

Die entstandene Tochtersubstanz (wasserlösliches Ammoniumpertechnetat, NH_4TcO_4) kann mit isotoner Kochsalzlösung eluiert und entnommen werden.

- Kurze, aber für nuklearmedizinische Untersuchungen ausreichende Halbwertzeit von 6,04 h
- Die Emission niederenergetischer γ -Strahlung von 140 keV. Diese Energie liegt im optimalen Bereich der Nachweisempfindlichkeit der Detektoren
- Keine Emission von β -Teilchen, dadurch werden lokale Strahlenbelastungen vermieden
- Hohe Verfügbarkeit, Durch die Benutzung von $^{99}\text{Mo} / ^{99m}\text{Tc}$ -Generatoren kann ^{99m}Tc periodisch am Ort seiner Verwendung erzeugt und weiterverarbeitet werden
- Die Markierbarkeit einer großen Anzahl von medizinisch relevanten Substanzen mit ^{99m}Tc

Abb. 105: GEWINNUNG VON ^{99m}Tc

NACH ABSPALTUNG VON DEM ^{99}Mo (MUTTERKERN) WIRD ^{99m}Tc (TOCHTERKERN) MIT NaCl (KOCHSALZLÖSUNG) FÜR DEN MEDIZINISCH-DIAGNOSTISCHEN ZWECK BENUTZT

BILDQUELLE: <https://slideplayer.org/slide/8900104/>

AUTOR: PÉTER MARÓTI

(ZUGANG AM 14.10.2020)

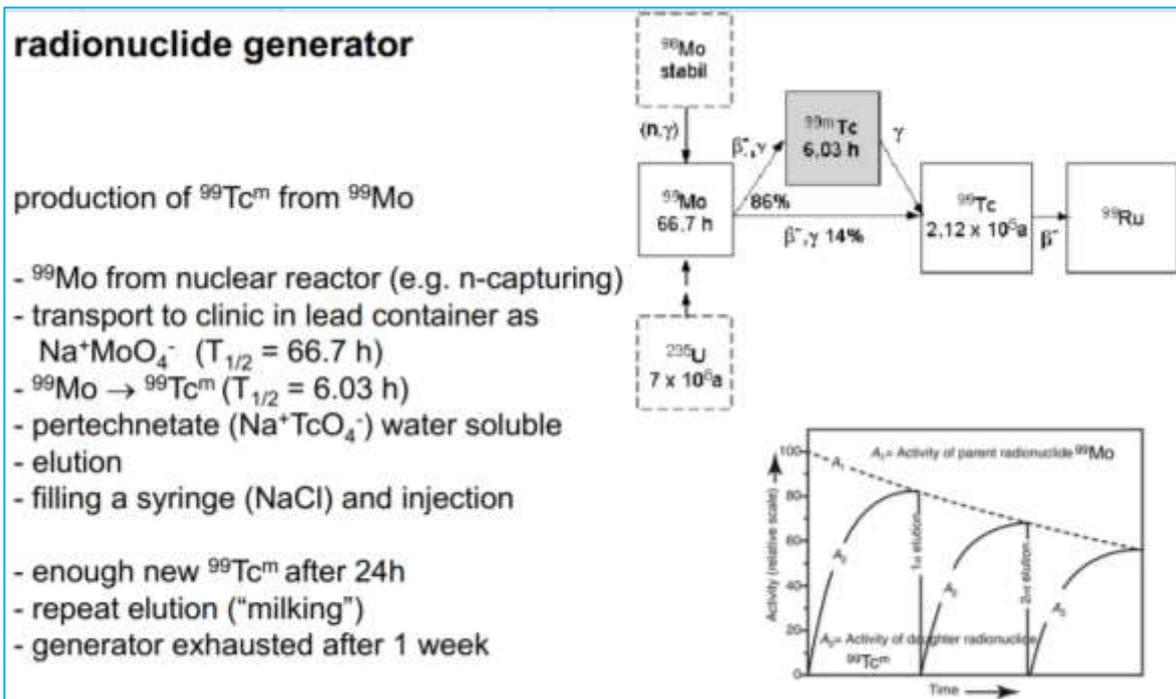
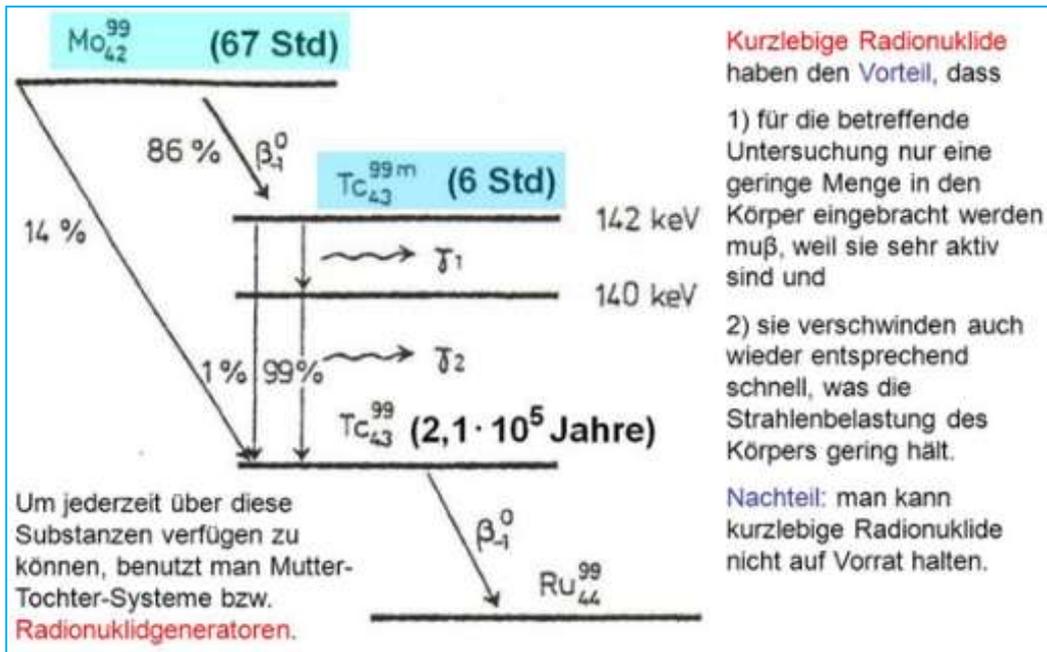


Abb. 106: RADIONUKLIDGENERATOR

PHYSIKALISCHE BESCHREIBUNG: BEIM ÜBERGANG EINES ATOMKERNES VON EINEM BESTIMMTEN ZUSTAND HÖHERER ENERGIE AUF EINEN ZUSTAND NIEDRIGERER ENERGIE WIRD EIN γ -QUANT (γ -STRAHLUNG) FREISETZT. DIE ABGEBEBENE FREIE ENERGIE (QUANTENENERGIE ODER FOTONENENERGIE) WIRD NACH DER FORMEL VON MAX PLANCK AUSGEDRÜCKT: $E = h \cdot f$

DAS WURDE BEREITS IN DIESER ARBEIT EINGEHEND ERKLÄRT (SIEHE ÜBERSCHRIFT „STRAHLUNG“)

BILDQUELLE: NUKLEARMEDIZINISCHE BILDGEBUNG. POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAPHIE ONLINE ABRUFBAR UNTER:

www.epileptologie-bonn.de/cms/upload/homepage/lehnerz/06-SPECT-PET.pdf

(ZUGANG AM 26.12.2020)



Abb. 107: WIEGREBE

Der em. O. Prof. Dr. Dr. Wolfgang Wiegrebe (Abb. 107)¹⁸⁹ für Pharmazie und medizinische Chemie aus der Universität Regensburg schrieb (Wiegrebe 2015)¹⁹⁰: „Technetium hat für den Radiologen – und damit für den Patienten – einen weiteren Vorteil: Es bildet mit organischen Reaktionspartnern Chelate, bei denen Tc das Zentralatom darstellt. Da seine Kernreaktion nicht von der chemischen Umgebung (Chelatbildner, Oxidationsstufe usw.) abhängt, wird seine γ -Strahlung im Chelat nicht verändert, aber wegen ihrer chemischen Eigenschaften werden die verschiedenen Chelate weitgehend selektiv in einzelnen Organen angereichert, ohne andere Organe nennenswert zu belasten. So gibt es spezielle Tc-

Chelate für Gehirn, Herz, Lunge, Leber, Niere und Skelett, die auch im Europäischen Arzneibuch monografiert sind. Die folgenden ^{99m}Tc-Injektionslösungen sind im Europäischen Arzneibuch monografiert:

- Technetium-Albumin-Injektionslösung
- Technetium-Bicisat-Injektionslösung
- Technetium-Etifenin-Injektionslösung
- Technetium-Exametazim-Injektionslösung
- Technetium-Gluconat-Injektionslösung
- Technetium-Macrosalb-Injektionslösung
- Technetium-Mebrofenin-Injektionslösung
- Technetium-Medronat-Injektionslösung
- Technetium-Mertiatid-Injektionslösung
- Technetium-Mikrosphären-Injektionslösung
- Technetium-Pentetat-Injektionslösung
- Technetium-Rheniumsulfid-Kolloid-Injektionslösung
- Technetium-Schwefel-Kolloid-Injektionslösung

¹⁸⁹ Bildquelle online abrufbar unter: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2018/daz-2-2018/mrt-und-kontrastmittel> (Zugang am 19.02.2021).

¹⁹⁰ Wiegrebe, W.: *Technetium in der Diagnostik*. Text online abrufbar unter: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020). Freisetzung von Technetium 99 (Tc-99) aus kerntechnischen Anlagen. Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/6354 vom 5. 2. 1990.

Perrier, Carlo; Segrè, Emilio (1947): *Technetium: The Element of Atomic Number 43*. Nature. 159 (4027): 24.

- Technetium-Sestamibi-Injektionslösung
- Technetium-Succimer-Injektionslösung
- Technetium-Zinndiphosphat-Injektionslösung
- Technetium-Zinn-Kolloid-Injektionslösung

Zur Brustkrebs-Diagnostik wird Technetium-Albumin-Injektionslösung, ein Humanalbumin-Nanokolloid des ^{99m}Tc , eingesetzt. Der Radiologe bezieht zur Herstellung der Injektionen Kits, sterile injektionsfertige Präparate, die außer Tc alle für die Diagnostik notwendigen Komponenten enthalten. Dem Kit wird die berechnete Menge Pertechetat zugefügt, und das fertige Präparat wird bei Brustkrebs nach Lokalanästhesie in den sonografisch lokalisierten Tumor oder in das umgebende Gewebe injiziert. Darauf verteilt sich $^{99m}\text{TcO}_4$ zusammen mit abgesonderten Tumorzellen über die Lymphbahnen. Die Wächterlymphknoten (Sentinel-Lymphknoten) werden durch eine Szintillationskamera überwacht. Die Computerauswertung zeigt dem Chirurgen, welche Lymphknoten befallen sind. Intraoperativ können die Knoten mit einer γ -Sonde erkannt werden.

Auch aus der Prostata fließt die Lymphe in regionale Wächterlymphknoten ab, die mithilfe von Technetium-Albumin-Injektionslösung diagnostiziert werden können. Im Jahr 2013 berichtete Lütcke über 151 Männer mit Prostatakarzinomen (PCA) verschiedener Stadien, die nach der radikalen Prostatektomie zwar einen wieder angestiegenen PSA-Wert („biochemisches Rezidiv“), aber einen negativen Lymphknotenstatus aufwiesen, d. h. dass die Lymphknoten (noch) nicht befallen waren. Créhange und Mitarbeiter dagegen beschrieben in einem Übersichtsartikel u. a. die Diagnose und Behandlung von PCA-Patienten, deren Lymphknoten schon metastasiert sind: Unter Ultraschallkontrolle wird ^{99m}Tc -Albumin-Injektionslösung in beide Seitenlappen der Prostata injiziert und die γ -Strahlung durch **SPECT** (single foton emission computed tomography, eine Weiterentwicklung der Szintigrafie) bestimmt. Intraoperativ werden die Knoten mit der γ -Sonde erfasst.

Die γ -Strahlungen des ^{99m}Tc werden als Szintillation durch einen Szintillationsdetektor (γ -Kamera) gezählt und zu einem Bild des emittierenden Lymphknotens verarbeitet. Der Injektionsort wird mit Bleiblech abgedeckt, um die dort sehr starke γ -Strahlung vom Detektor abzuhalten. Kernstück eines Szintillationsdetektors ist oft ein großer Natriumiodid-Kristall, dotiert mit ca. 0,2% Thallium (Tl). Die Vorgänge in diesem NaI(Tl)-Kristall können sehr vereinfacht, aber anschaulich mit dem sogenannten Bändermodell erklärt werden.

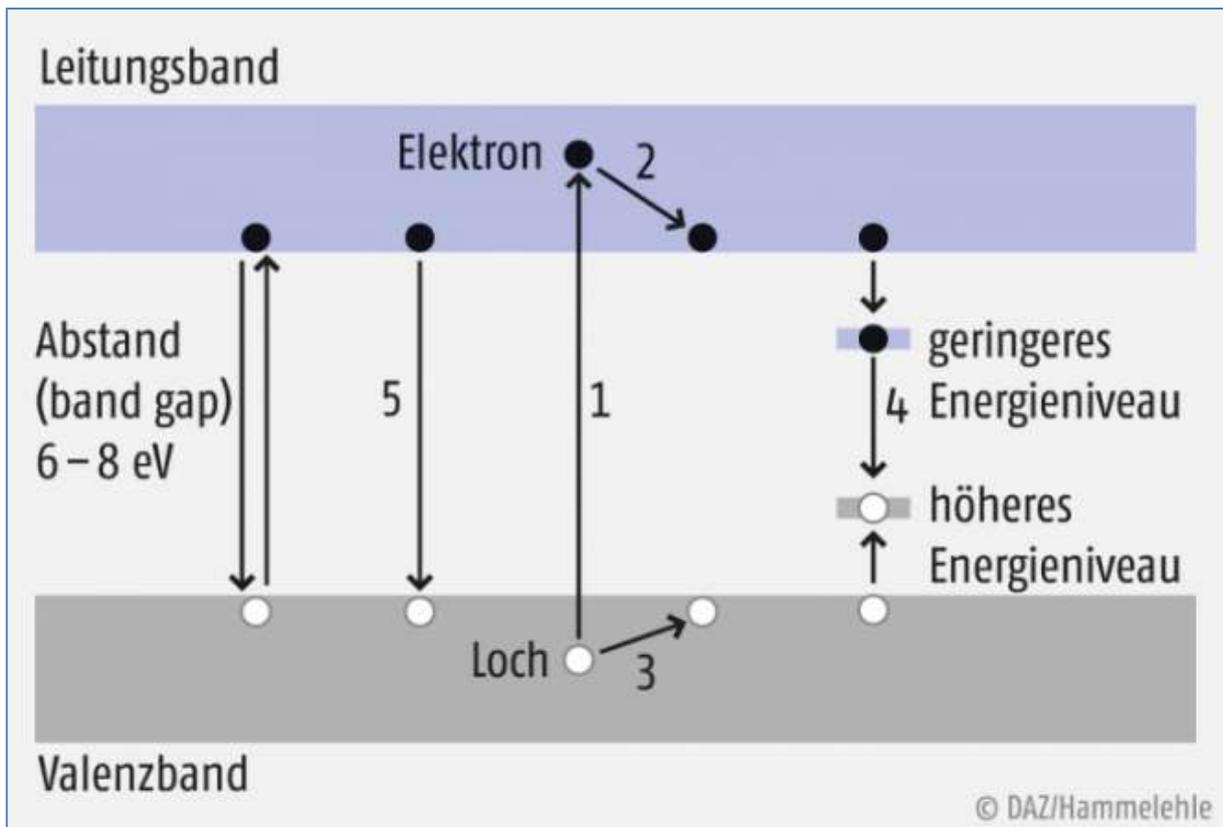


Abb. 108: BÄNDERMODELL: SZINTILLATION IN EINEM KRISTALL OHNE (LINKS) UND MIT AKTIVATOR, Z. B. THALLIUM (RECHTS)

ERLÄUTERUNGEN ZU DEN ZAHLEN 1 BIS 5 IM TEXT (NACH DORENBOS)

BILDQUELLE: WIEGREBE 2015 (SIEHE TEXT)

Der NaI(Tl)-Kristall besteht aus eng gepackten Bändern unterschiedlichen Energieniveaus im Abstand von 6 bis 8 eV (*band gap*). Das Valenzband ist mit Elektronen gefüllt und besitzt ein niedriges Energieniveau; d. h. die Elektronen sind im Grundzustand. Dagegen hat das Leitungsband ein hohes Energieniveau (gemessen in eV) und weist bei niedriger Temperatur bzw. im nicht-angeregten Zustand (fast) keine beweglichen Elektronen auf. Trifft ein γ -Quant (Foton) das Kristall, wird ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben. Das System ist angeregt, das Elektron kann sich als elektrische Ladung bewegen (daher „Leitungs“-Band). Im Valenzband bleibt eine Elektronenlücke, ein „Loch“, das ebenfalls beweglich ist. Wenn das angeregte Elektron in das Valenzband zurückfällt, wird das eingestrahelte γ -Quant wieder abgegeben, und es resultiert kein messbarer Effekt. Daher ist das Thallium im Kristall wichtig, denn es fungiert als Aktivator: Es verringert punktweise das Energieniveau des Leitungsbandes, sodass dieses wie in einer Ausbuchtung in die

Bandlücke hineinragt. Das angeregte Elektron im Leitungsband bewegt sich ein Stück auf das zugehörige „Loch“ im Valenzband zu, das gleichzeitig auf ein etwas höheres Energieniveau gehoben wird. Daraus folgt ein verringerter Abstand zwischen Elektron und Loch. Wenn das Elektron nun in das Loch zurückkehrt, wird sehr viel weniger Energie frei (ca. 3 eV) als beim direkten Fall aus dem Leitungs- in das Valenzband. Niedrigere Energie bedeutet größere Wellenlänge: Der NaI(Tl)-Kristall strahlt dunkelblaues Licht der Wellenlänge 410 nm aus (zum Vergleich: γ -Strahlungen $< 0,01$ nm). Die blauen Lichtblitze (lat. *scintilla*: „Funke“) dauern etwa 230 Nanosekunden; sie werden von Fotovervielfachern (engl. fotomultiplier) registriert, den Anregungsorten zugeordnet und elektronisch zu einem Bild gestaltet, das der Radiologe auswertet und dem Chirurgen übermittelt.

Gammasonden sind Halbleiterdetektoren, mit denen der Chirurg intraoperativ Lymphknoten auf ^{99m}Tc prüfen kann. Als Halbleiterschicht dienen oft Silicium- oder Germanium-Kristalle. Ge und Si haben vier Valenzelektronen. Die Schicht wird z. B. mit Phosphor (5 Valenzelektronen, daher negative oder n-Schicht) oder Bor (3 Valenzelektronen, daher positive oder p-Schicht) dotiert. Am dotierten Kristall liegt eine hohe Gleichspannung. Die p-Anteile der Halbleiterschicht wandern zur Kathode (-), die n-Anteile zur Anode (+). Dazwischen liegt die fast ladungsfreie, daher nichtleitende p,n-Grenzschicht, auf die die γ -Strahlung gelenkt wird. Durch die mit hoher Energie auf die Grenzschicht treffenden γ -Quanten entstehen Elektronen-Loch-Paare: Die Grenzschicht wird leitend, es fließt ein Strom, dessen Intensität der Energie des γ -Quants proportional ist. Die Elektronen-Loch-Paare neutralisieren sich durch Diffusion, und der nächste Messvorgang beginnt.

Röntgen- und γ -Strahlungen sind hochfrequente elektromagnetische Wellen. Röntgenstrahlen erzeugen wegen der unterschiedlichen Beschleunigungen der Elektronen in der Röntgenröhre ein kontinuierliches Bremsspektrum. Die ^{99m}Tc -Strahlung dagegen ist monochromatisch, d. h. von definierter Energie (143 keV). Röntgenstrahlung dringt von außen in den Patienten ein, wird im Körper von Knochen und Röntgenkontrastmitteln absorbiert und erzeugt ein Negativbild. Die Quelle der ^{99m}Tc -Strahlung liegt im Organismus und erzeugt folglich ein reales Bild.

Die Strahlungenbelastung des Patienten bei der Diagnostik mit Röntgen- oder γ -Strahlungen hängt wesentlich davon ab, welcher Körperteil untersucht wird; bei der

Szintigrafie der Lymphknoten ist sie sehr gering (0,2 mSv). Diese Dosis entspricht der Strahlungenbelastung während vier Transatlantikflügen“ (Wiegrebe 2015)¹⁹¹.

STRAHLUNGENBELASTUNG (gemessen in Millisievert) eines Patienten während der Diagnostik mit Röntgenstrahlen bzw. γ -Strahlungen (Szintigrafie, z. B. mit ^{99m}Tc).

Röntgendiagnostik	Dosis
Urogramm	5 mSv
Lendenwirbelsäule*	3 mSv
Becken	1 mSv
Schädel	0,3 mSv
Thorax	0,1 mSv
Szintigrafie	Dosis
Skelett	4 mSv
Lunge	2 mSv
Schilddrüse	0,8 mSv
Lymphknoten**	0,2 mSv
Transatlantikflug	0,05 mSv
* Zwei Ebenen ** zur Diagnose von Mamma- und Prostatakarzinomen“ (Wiegrebe 2015) ¹⁹² .	

^{99m}Tc wird hauptsächlich in **SPECT** als Radiopharmakon eingesetzt.¹⁹³

¹⁹¹ Wiegrebe, W.: *Technetium in der Diagnostik*. Text online abrufbar unter: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020). Freisetzung von Technetium 99 (Tc-99) aus kerntechnischen Anlagen. Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/6354 vom 5. 2. 1990.

Perrier, Carlo; Segrè, Emilio (1947): *Technetium: The Element of Atomic Number 43*. Nature. 159 (4027): 24.

¹⁹² Wiegrebe, W.: *Technetium in der Diagnostik*. Text online abrufbar unter: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020). Freisetzung von Technetium 99 (Tc-99) aus kerntechnischen Anlagen. Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/6354 vom 5. 2. 1990.

Perrier, Carlo; Segrè, Emilio (1947): *Technetium: The Element of Atomic Number 43*. Nature. 159 (4027): 24.

¹⁹³ *Pharmakon* (Altgriechisch φάρμακον) bedeutet nicht nur *Arzneimittel*, sondern auch *Droge* und *Giftstoff*.

6. BESCHREIBENDE FUNKTIONALITÄT DER POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAFIE (PET)



Abb. 109: VON HEVESY

Unter dieser Überschrift wird nun mehr die **PET**-Funktionalität und die Gewinnung von den Radionukliden sowie ihre Anwendung in der medizinischen Diagnostik auseinandergesetzt.

Im Jahr 1935 wendete der ungarische Chemiker Georg Karl von Hevesy (1885 – 1966) im menschlichen lebenden Körper ^{32}P als *Radiopharmakon* an, benutzte den Geiger-Müller-Zähler und beobachtete den Metabolismus im Körper. Dafür erhielt er den Nobelpreis für Chemie 1943 (verliehen 1944) „für seine Arbeiten über die Anwendung der Isotope als Indikatoren bei der Erforschung chemischer Prozesse“ (Abb. 109)¹⁹⁴.

In der Nuklearmedizin werden die Arzneimittel $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (in **PET**) und ^{18}F (in **SPECT**) als *Tracer* oder *Radiopharmakon* eingesetzt. „Ein *Tracer* ist eine künstliche, oft radioaktiv markierte körpereigene oder körperfremde Substanz, die nach Einbringung in den lebenden Körper am Stoffwechsel teilnimmt und darüber unterschiedlichste Untersuchungen ermöglicht oder erleichtert. Wegen der minimalen Stoffmenge werden dabei die Körperfunktionen nicht gestört. Erfinder der Methode war der Ungar George de Hevesy“¹⁹⁵ (Abb. 109).

¹⁹⁴ Bildquelle und Textquelle online abrufbar unter:

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 09.01.2021).

¹⁹⁵ Textquelle online abrufbar unter: [https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Tracer_\(Nuklearmedizin\)](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Tracer_(Nuklearmedizin)) (Zugang am 15.02.2021).

„Gemeinsam mit dem deutsch-österreichischen Chemiker Fritz Paneth entwickelte von Hevesy die Methode der radioaktiven Indikatoren. Sie entstand 1929 während einer Untersuchung der Diffusion von Flüssigkeiten in Festkörpern und entwickelte sich für viele Zweige der Naturwissenschaften zur wertvollen und vielseitigen Arbeitsmethode. Die Radioindikator-Methode, auch Tracer-Technik genannt, beruht darauf, dass natürliche oder künstliche radioaktive Atome, Isotope, in geringen Mengen durch die von ihnen ausgesandte Strahlung mit geeigneten Geräten gut nachzuweisen sind. Werden solche isotopenhaltigen Stoffe mit der gleichen, nichtstrahlenden Substanz vermischt oder bei chemischen Reaktionen zusammen mit nichtstrahlenden Atomen in neue Verbindungen eingebaut, so verraten die markierten Substanzen durch ihre Strahlung stets, wo sie sich befinden. Im Organismus lässt sich so der Weg chemischer Verbindungen, zum Beispiel von Medikamenten, gut verfolgen. Zu einem wichtigen Hilfsmittel wurde die Tracer-Technik auch bei diagnostischen Untersuchungen. Für die Entwicklung der Methode der radioaktiven Indikatoren wurde Georg von Hevesy 1943 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet“.

Textquelle online abrufbar unter:

https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Mitglieder/CV_Hevesy_von_Georg_Karl_D.pdf (Zugang am 15.02.2021).

Von Hevesy hatte bereits 1923 mit seinem Arbeitskollegen Dirk Coster in Kopenhagen das chemische Element Hafnium mittels Röntgenspektroskopie entdeckt.

Im Jahr 1949 erreichte der amerikanische Physiker und Arzt Benedict Cassen (1902 – 1972) die in menschlichen Körper erste Radionuklidbildung. Er verwendete das Isotop ^{131}I in der Schilddrüse. Das war der Anbruch der nuklearmedizinischen Bildgebung (vgl. Bland 1996)¹⁹⁶.

Anfang der 1950er Jahren wurde die Positronenemissionstomografie (**PET**) von David E. Kuhl (1929 – 2017) entworfen.¹⁹⁷

1953 beschrieben William H. Sweet (1910 – 2001) und Gordon L. Brownell (1922 – 2008) das erste Positronenbildungsgerät, gefolgt von seiner ersten Anwendung auf Menschen (auf ein siebenjähriges krebskrankes Mädchen – Gehirntumor).¹⁹⁸

In der Nuklearmedizin ist **PET** zu einem wichtigen Diagnoseinstrument unentbehrlich geworden. Dieses nuklearmedizinische, topofunktionelle Schnittbildverfahren dient dazu, Stoffwechselprozesse bei Patienten sichtbar zu machen. Dazu werden kurzlebige Radionuklide benutzt (vgl. Bender et al. 2004, 123 ff.).

„**LINEARER SCANNER**: Es wurde von B. Cassen und Ess gebaut. 1949, als die ersten Scintiscans gewonnen wurden. Technische Verbesserungen wurden 1950-1956 vorgenommen (B. Cassen und R. Newall und, P. Bell, D. Kuhl). Kurz nach dem Erscheinen des ersten Cassen-Scanners begann die kommerzielle Produktion.

GAMMA-KAMERA: Es wurde 1957 von H. Anger erfunden und gebaut, von 1958 bis 1963 wurden Verbesserungen vorgenommen. Gamma-Kameras werden seit 1962 kommerziell produziert und verkauft; etwa zehn Jahre später wurden sie weit verbreitet, und bald verdrängten sie den Scanner aus der visuellen Diagnostik.

COMPUTER: Seine Verwendung in der szintigrafischen Diagnostik begann 1964 (H. Shepers, D. Wincler, D. Brown). Von 1965 bis 1974 entwickelten verschiedene Zentren eigene Computerprogramme; nach 1974 wurden Computer mit eingebauten nuklearmedizinischen Softwarepaketen kommerziell verfügbar.

TOMOSCINTIGRAFIE (SPECT) und **POSITRONENTOMOGRAFIE (PET)**: Zwischen 1963 und 1973 wurden zahlreiche Versuche unternommen, tomografische Bilder von Organen mit Scannern und Gammakameras zu erhalten (D. Kuhl und R. Edwards, H. Anger, N. Charkes und R. Somburanasin et al.). Das Konzept der zeitgenössischen Einzelfotonen-Emissionstomografie (**SPECT**) wurde zwischen 1974 und 1977 entwickelt (J. Keyes und R. Jaszczak und Ess.), während die kommerzielle

¹⁹⁶ Bland, William H.: *Ben Cassen and the development of the rectilinear scanner*. In: *Seminars in Nuclear Medicine*, Elsevier Volume 26, Issue 3, July 1996, Pages 165 – 170. Text online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article> (Zugang am 14.02.2021).

¹⁹⁷ Bereits ausführlich behandelt in der vorliegenden Arbeit unter der Überschrift **Einleitung**.

¹⁹⁸ Ebd.

Produktion 1982 begann. Erste Zyklotrone für die Herstellung von Positronenstrahlern, eine Voraussetzung für die Positronenemissionstomografie (**PET**)-Diagnostik, entstanden 1955 in Krankenhäusern, und in den letzten zehn Jahren werden sie kommerziell für diese Zwecke hergestellt. H. Anger (1959), M. Phelps, E. Hoffman und M. Ter-Pogossian (1975) begründeten **PET**; die kommerzielle Produktion von **PET**-Systemen danach begann.

SCHLUßFOLGERUNG: Die visuelle Diagnostik in der Nuklearmedizin erreichte in den Jahren 1970-1980 ihren Höhepunkt in der klinischen Praxis. Es wird teilweise durch neue bildgebende Verfahren (US, **CT**, **MRT**) in den Hintergrund gedrängt, aber es hat nur weitere Verbesserungen eingeleitet (**SPECT**, **PET**)“ (Stefanovic 2016)¹⁹⁹.

„Der Entwicklung des geradlinigen Scanners durch Benedict Cassen ging seine erfolgreiche Herstellung einer Richtungszintillationsdetektorsonde voraus. 1950 baute Cassen das erste automatisierte Scansystem zusammen, das aus einem motorbetriebenen Szintillationsdetektor bestand, der an einen Relaisdrucker gekoppelt war. Der Scanner wurde verwendet, um Schilddrüsen nach der Verabreichung von Radiojod zu bilden. Erste Studien, die am West Los Angeles Veterans Administration Medical Center durchgeführt wurden, führten in den frühen 1950er Jahren zum umfangreichen Einsatz des Scansystems für die Schilddrüsenabbildung. Cassens Entwicklung des geradlinigen Scanners war ein prägendes Ereignis in der Entwicklung der klinischen Nuklearmedizin. 1956 entwickelten Kuhl und seine Kollegen einen fotografischen Anbau für den Cassen-Scanner, der seine Empfindlichkeit und Auflösung verbesserte. Mit der Entwicklung organspezifischer Radiopharmazeutika wurde in den späten 1950er Jahren bis in die frühen 1970er Jahre ein kommerzielles Modell dieses Systems verwendet, um die wichtigsten Körperorgane zu scannen. Der Niedergang des geradlinigen Fotoscanners begann 1973 mit dem Aufkommen der Computeraxialtomografie“ (Blahd 1996)²⁰⁰.

Bekannt sind wohl die **C**omputer**t**omografie (**CT**) und die Kernspintomografie, genannt auch **M**agnet**r**esonanz**t**omografie (**MRT**), die aber nur die Anatomie in der Nuklearmedizin abbilden können. **PET** hingegen ist ein szintigrafisches Verfahren, d. h. es können biochemische oder physiologische Prozesse sichtbar gemacht werden. Das hat einen großen Vorteil: Hier wirken sich Krankheiten oft schon früher aus, lange

¹⁹⁹ Stefanovic, L.: *Die Anfänge und die Entwicklung der diagnostischen Bildgebung in der Nuklearmedizin*. Text online abrufbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov> (Zugang am 15.02.2021).

²⁰⁰ Blaht, William H.: *Ben cassen and the development of the rectilinear scanner*. In: *Seminars in Nuclear Medicine*, Elsevier Volume 26, Issue 3, July 1996, Pages 165 – 170. Text online abrufbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article> (Zugang am 14.02.2021).

bevor strukturelle Veränderungen auftreten, die von **CT** oder **MRT** (Abb. 111) entdeckt werden können (vgl. Bender et al. 2004, 123 ff.).

- Wie funktioniert **PET**?

Wenn radioaktive Isotope zerfallen, werden γ -Strahlungen (Fotonen mit 511 keV) ausgesendet (Abb. 110)²⁰¹. Zu Bildern verarbeitet werden diese von Gammakameras, die um den Patienten rotieren, um das Geschehen aus allen Richtungen zu erfassen (vgl. Bender et al. 2004, 124 f.).

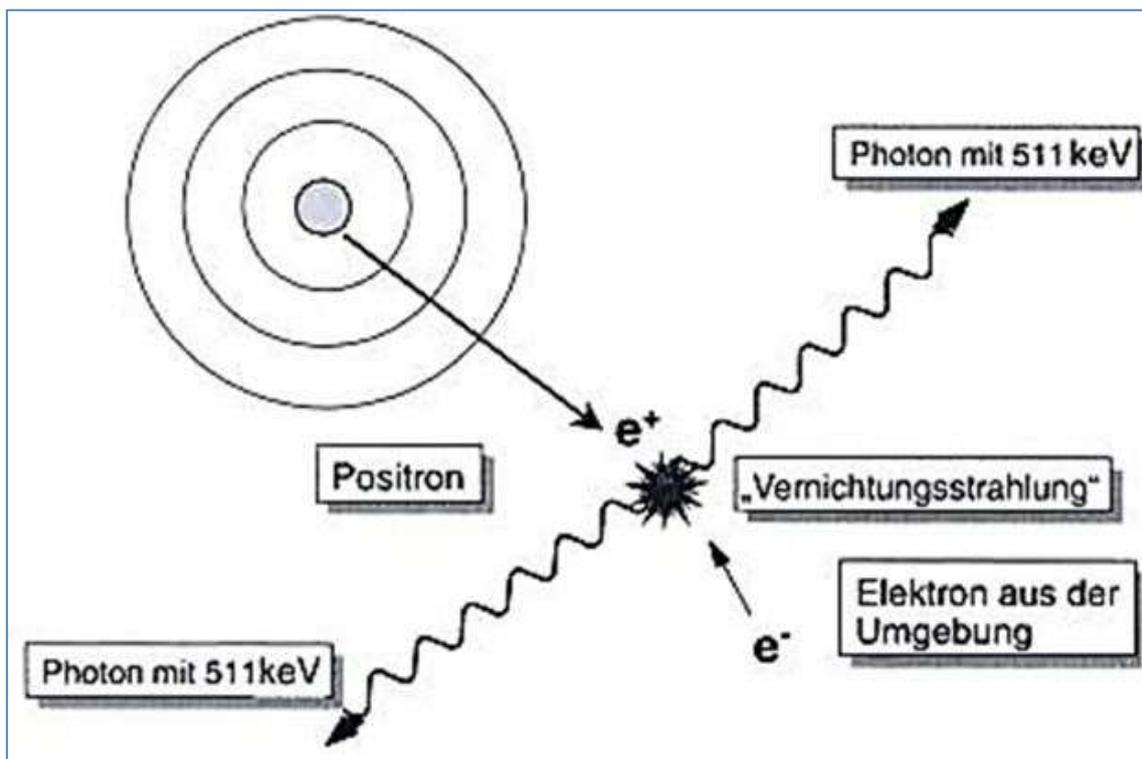


Abb. 110: „DIE EMITTIERTEN POSITRONEN TREFFEN AUF ELEKTRONEN IN DER UMGEBUNG. DAS ZUSAMMENTREFFEN EINES POSITRONS MIT EINEM ELEKTRON FÜHRT ZU EINER VERNICHTUNGSREAKTION. IN DIESER WANDELN SICH DIE BEIDEN TEILCHEN ZU GAMMASTRAHLUNG, DER SOGENANNTEN VERNICHTUNGSSTRAHLUNG UM. DIE VERNICHTUNGSSTRAHLUNG HAT JEWEILS EINE ENERGIE VON 511 KEV UND BREITET SICH AUF EINER LINIE IN ENTGEGENGESETZTER RICHTUNG IN EINEM WINKEL VON 180° AUS, UND ZWAR GENAU ZEITGLEICH“

TEXT UND BILDQUELLE: <https://www.mta-r.de/site/assets/files/9180/pet2.jpg>

(ZUGANG AM 07.11.2020)

²⁰¹ Bereits ausführlich behandelt in der vorliegenden Arbeit unter den Überschriften **POSITRON UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLARMEDIZIN**, sowie **STRAHLUNG UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLARMEDIZIN**.

Techniques	Advantages	Disadvantages
MRI	High spatial resolution, yields physiological and anatomical information	Time consuming, high cost
CT	High spatial resolution, fast	Radiation exposure, limited soft tissue contrast, no molecular probes available
PET	High sensitivity, yields physiological and molecular data	Radiation exposure, high cost, low spatial resolution
SPECT	High sensitivity, yields physiological and molecular data, less expensive than PET	Radiation exposure, low spatial resolution
OI	High temporal resolution, high sensitivity, yields physiological and molecular data, inexpensive	Low penetration depths, nonquantitative, no 3D
US	High spatial and temporal resolution, inexpensive	Limited contrast in lung and bone, no 3D
PET/CT	Combining high spatial resolution with high sensitivity, yields anatomical and molecular data	Radiation exposure, limited soft tissue contrast, high cost
PET/MRI	Combining high spatial resolution with high sensitivity, yields anatomical and molecular data	Radiation exposure, high cost

Das Besondere an **PET** ist, dass nicht Photonen verwendet werden, sondern Positronen, also positiv geladene Elektronen.²⁰² Wenn diese den menschlichen Körper durchqueren, treffen sie früher oder später auf ein Elektron, wodurch beide vernichtet werden. Dabei entstehen zwei γ -Strahlungen, die in entgegengesetzter Richtung ausgesendet werden. Werden diese fast gleichzeitig gemessen, wird das *Koinzidenz* genannt. Das Aufeinandertreffen von Positron und Elektron muss auf der Verbindungslinie zwischen den beiden Stellen liegen, an denen die γ -Strahlung gemessen wurden (Abb. 112). Diese Verbindungslinie wird *Aktivitätslinie* oder *Projektionslinie* (Abb. 103 ff.) genannt (vgl. Bender et al. 2004, 124 f.).

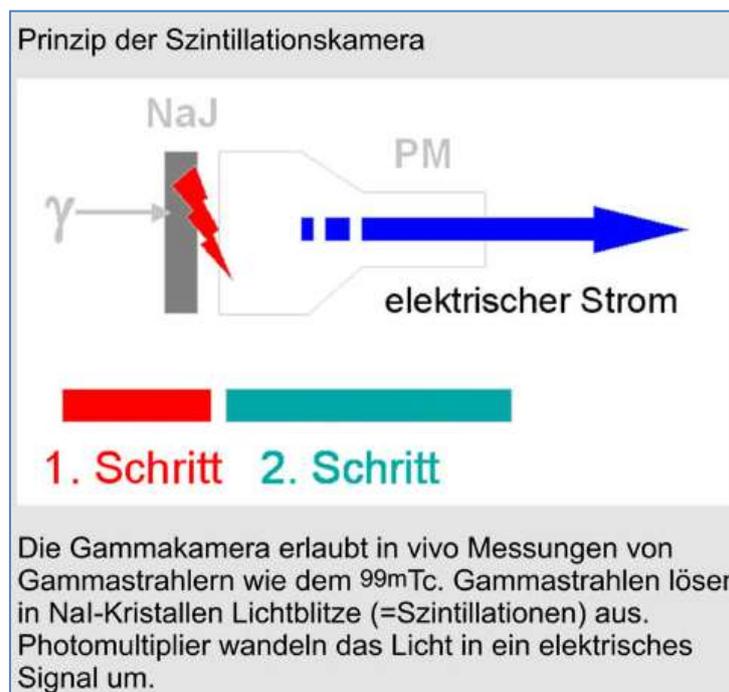


Abb. 112: „EIN SZINTILLATOR IST EIN KÖRPER, DER BEIM DURCHGANG VON HOCHENERGETISCHER STRAHLUNG (ENERGIEREICHEN PHOTONEN ODER GELADENEN TEILCHEN) ANGEREGT WIRD UND DIE ANREGUNGSENERGIE IN FORM VON LICHT (MEIST IM UV- ODER SICHTBAREN BEREICH) WIEDER ABGIBT. DIESEN VORGANG BEZEICHNET MAN ALS SZINTILLATION (VON LATEINISCH SCINTILLARE: "FUNKELN, FLACKERN"). ER BERUHT AUF DEM PRINZIP DER FLUORESZENZ

AUF DIESE WEISE WIRD DIE VOM RADIOAKTIVEN STOFF ABGEGEBENE STRAHLUNG IN PHOTONEN (LICHTQUANTEN) UMGEWANDELT

EINE GAMMAKAMERA BESITZT IN DER REGEL EINEN NATRIUMIODID-KRISTALL ($\text{NaI}(\text{TL})$) MIT GROßEM (25-40 CM) DURCHMESSER UND EINER DICKE VON ETWA 1 cm“

TEXT UND BILDQUELLE: <https://vetsuisse.com/vet->

[impl/lernmodule/htmls/slide.html?radiosurfvet|radgeneral|nuclearmed|nmsscinti|4](https://vetsuisse.com/vet-impl/lernmodule/htmls/slide.html?radiosurfvet|radgeneral|nuclearmed|nmsscinti|4)

(ZUGANG AM 07.11.2020)

²⁰² Bereits ausführlich behandelt in der vorliegenden Arbeit unter den Überschriften **POSITRON UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLARMEDIZIN**, sowie **STRAHLUNG UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLARMEDIZIN**.

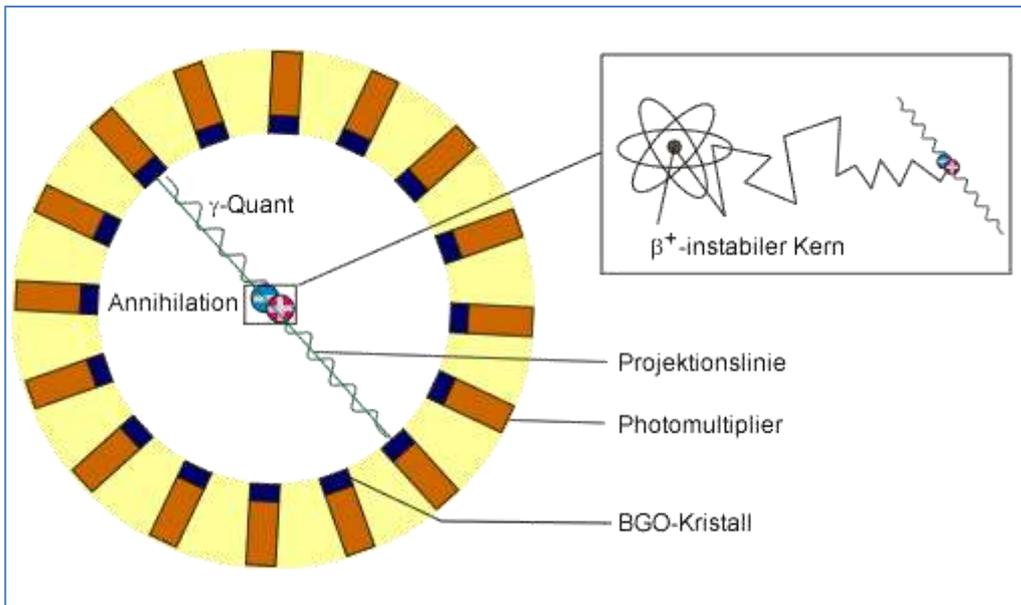


Abb. 114: AKTIVÄTSLINIE ODER PROJEKTIONS-LINIE

BILDQUELLE: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=11295&pLang=de&pNid=0>

(ZUGANG AM 07.11.2020)

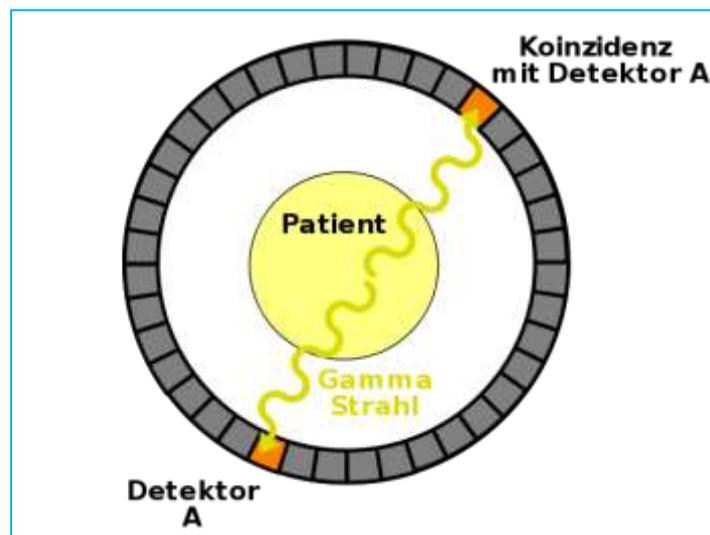


Abb. 113: „JEDER DETEKTOR IM RING WIRD IN KOINZIDENZ MIT EINER REIHE VON GEGENÜBERLIEGENDEN DETEKTOREN BETRIEBEN UND DIE DURCH DIE ANNIHILATION DER POSITRONEN ERZEUGTE GAMMASTRAHLUNG (SO GENANNT VERNICHTUNGSSTRAHLUNG) WIRD DETEKTIERT. MAN HAT AUCH FESTGESTELLT, DASS GAMMAKAMERAS MIT DICKEN KRISTALLEN UND SPEZIELLEN KOLLIMATOREN ALS PET SCANNER VERWENDET WERDEN KÖNNEN. ZU DEN IN DER POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAPHIE VERWENDETEN RADIOISOTOPEN GEHÖREN ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O UND ^{18}F . DIESE ISOTOPE WERDEN ÜBLICHERWEISE IN EINEM GERÄT NAMENS ZYKLOTRON HERGESTELLT. HINZU KOMMT, DASS DIESE ISOTOPE RELATIV KURZE HALBWERTSZEITEN HABEN. PET SCANNER BRAUCHEN EIN ZYKLOTRON UND ANGESCHLOSSENE EINRICHTUNGEN ZUR HERSTELLUNG DER RADIOPHARMAKA IN IHRER NÄHE“

TEXT UND BILDQUELLE:

https://de.wikibooks.org/wiki/Physikalische_Grundlagen_der_Nuklearmedizin/_Nuklearmedizinische_Abbildungssysteme (ZUGANG AM 07.11.2020)

Praktischerweise können von allen Medikamenten und allen Molekülen im menschlichen Körper radioaktive Varianten hergestellt werden, sodass man dann den Aufenthaltsort dieser Substanzen im lebenden Körper sichtbar machen kann (Abb.111). Zwar kennt man bereits seit 1930 Substanzen, die Positronen abgeben, aber auf die Idee, das für die Medizin zu nutzen, kam man erst 1950.²⁰³ Man scheiterte jedoch daran, dass die aufnehmenden Kameras in derselben Ebene angebracht waren. 1970 schließlich wurde in den USA die *Koinzidenzkamera* erfunden (Abb. 115 ff.)²⁰⁴. Zunächst wurde damit der Glukosestoffwechsel bei Tieren untersucht, ab 1978 der beim Menschen. Zu dieser Zeit wurde **PET** nur von wenigen Instituten genutzt, weil es dafür noch keine Software zu kaufen gab (Abb.115 ff.). Außerdem war der Scanbereich so klein, dass meist nur das Gehirn untersucht wurde. Erst ab 1980 wurde **PET** von zwei konkurrierenden Firmen weiterentwickelt, wodurch sich seither sowohl Anzahl als auch Qualität der Geräte immer weiter erhöht haben (vgl. Bender et al. 2004, 124 f.).

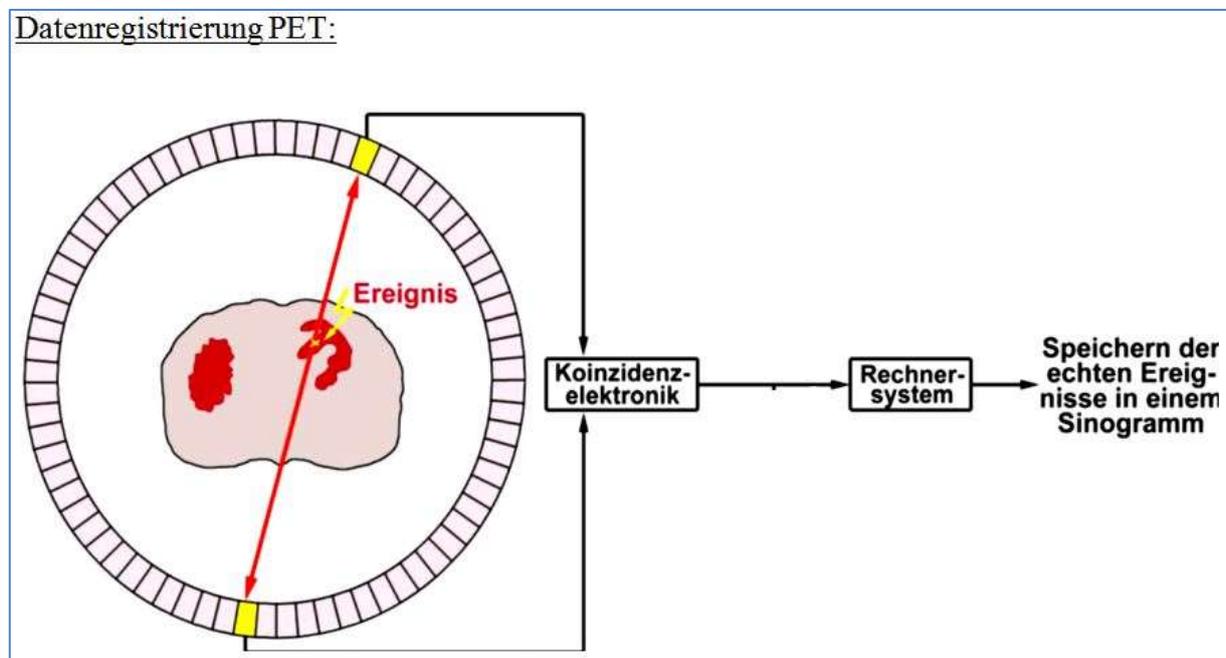


Abb. 115: KOINZIDENZELEKTRONIK- BZW. KAMERA

BILDQUELLE: <https://www.mta-r.de/blog/das-pet-ct/> (ZUGANG AM 07.11.2020)

²⁰³ Bereits ausführlich behandelt in der vorliegenden Arbeit unter den Überschriften **EINLEITUNG**, **POSITRON UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLARMEDIZIN**, sowie **STRAHLUNG UND SEINE ANWENDUNG IN DER NUKLARMEDIZIN**.

²⁰⁴ Ebd.

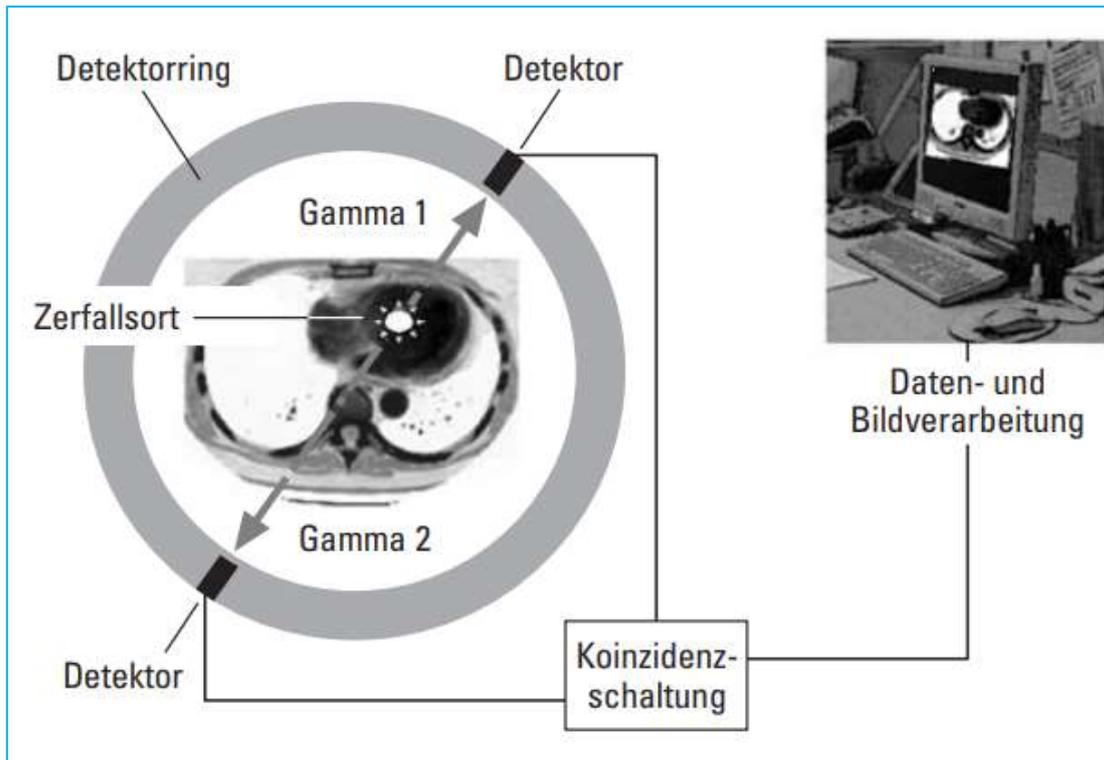


Abb. 116: SCHEMA EINES PET-SCANNERS (DETEKTORRING) UND DER KOINZIDENZSCHALTUNG MIT DATENVERARBEITUNG
BILDQUELLE: BENDER ET AL. 2004, 126

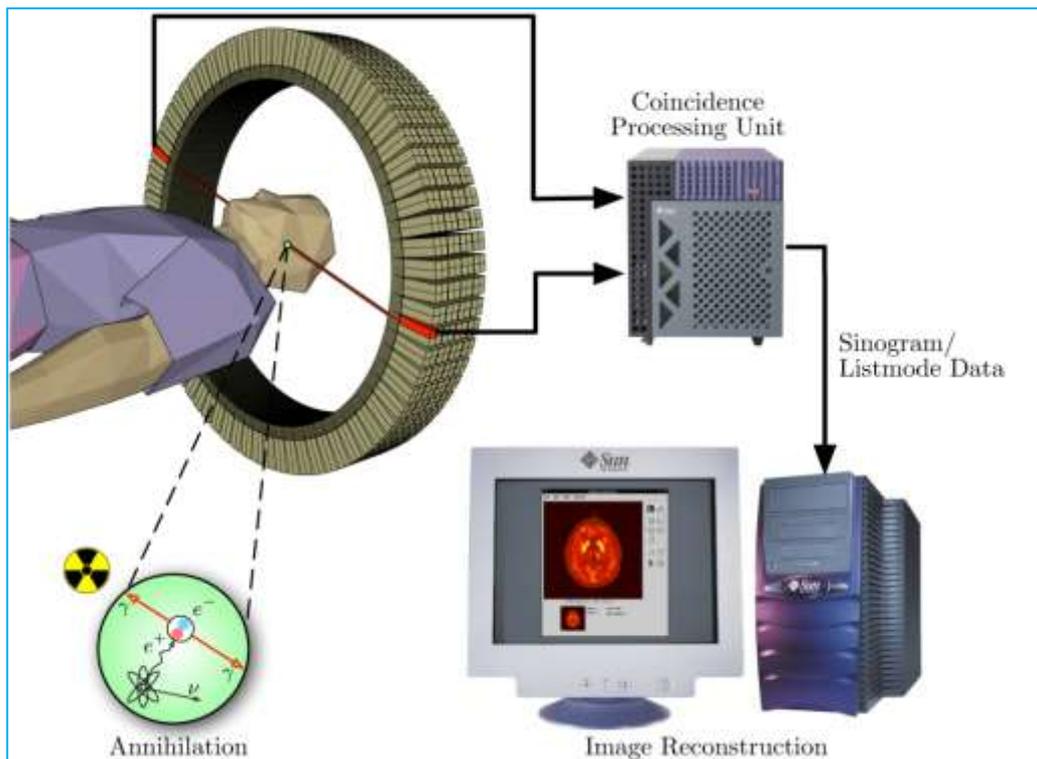


Abb. 117: PRINZIPIELLES VERARBEITUNGSSCHEMA DER PET
BILDQUELLE: http://jens-maus.de/ftp/langner_mscthesi.pdf http://jens-maus.de/ftp/langner_mscthesi.bib (ZUGANG AM 07.11.2020)

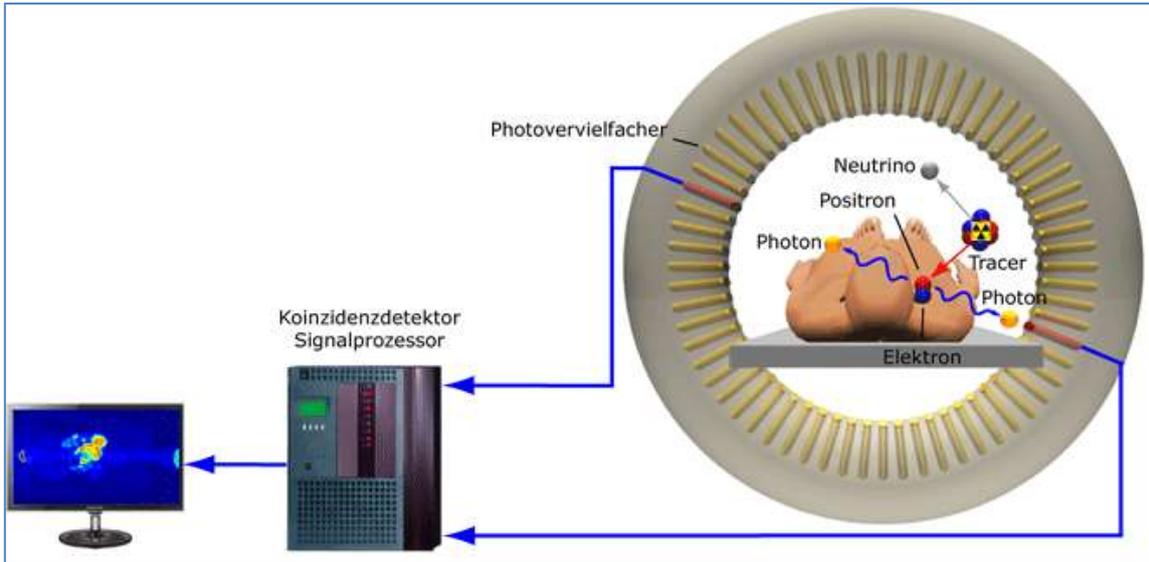


Abb. 118: PRINZIP EINER PET-UNTERSUCHUNG

BILDQUELLE: <https://kompodium.infotip.de/bildsensoren.html>

(ZUGANG AM 07.11.2020)



Abb. 119: PET MIT CT ODER MRT KANN KOMBINIERT WERDEN

BILDQUELLE: <https://www.mta-r.de/blog/das-pet-ct/> (ZUGANG AM 07.11.2020)

Der neueste Trend ist, **PET** mit **CT** (Abb. 76) oder **PET** mit **MRT** (Abb. 121 ff.) zu kombinieren. Entweder in demselben Gerät oder durch nachträgliches Zusammenfügen der Ergebnisse.

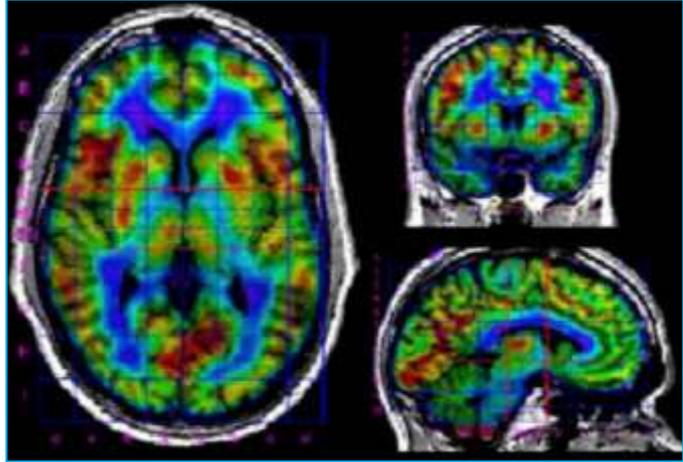


Abb. 120: KOMBINATION PET-MRT (GEHIRNBILDGEBUNG)

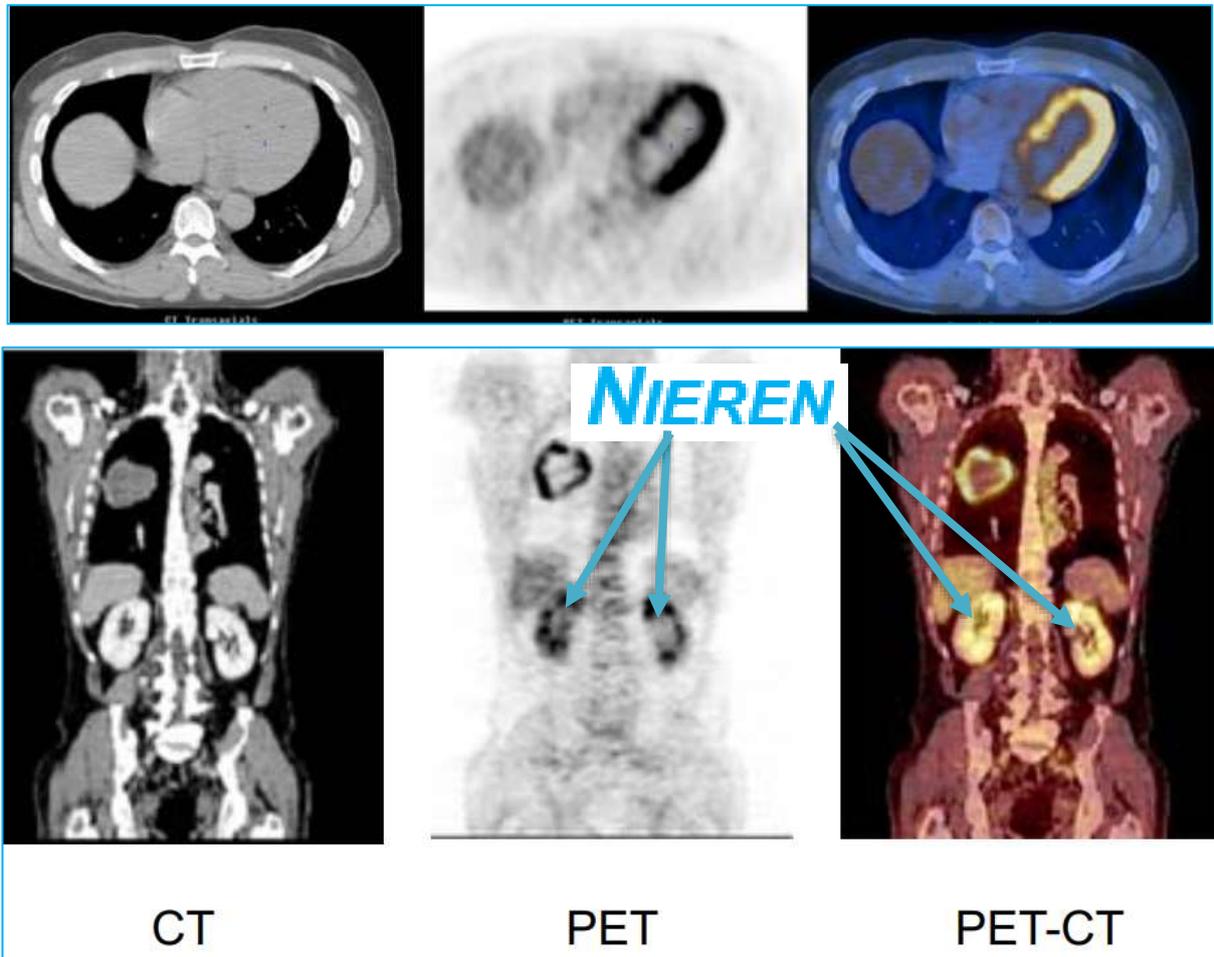


Abb. 121: BILDERVERGLEICH VON CT, PET UND KOMBINATION PET-CT

PET-CT WIRD BEI DER NUKLEARMEDIZINISCHEN DIAGNOSTIK BEVORZUGT

OBEN BILDGEBUNG: HERZ UND UNTEN BILDGEBUNG: NIEREN

BILDQUELLE: NUKLEARMEDIZINISCHE BILDGEBUNG UND POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAPHIE
ONLINE ABRUFBAR UNTER:

www.epileptologie-bonn.de/cms/upload/homepage/lehnertz/06-SPECT-PET.pdf

(ZUGANG AM 26.12.2020)

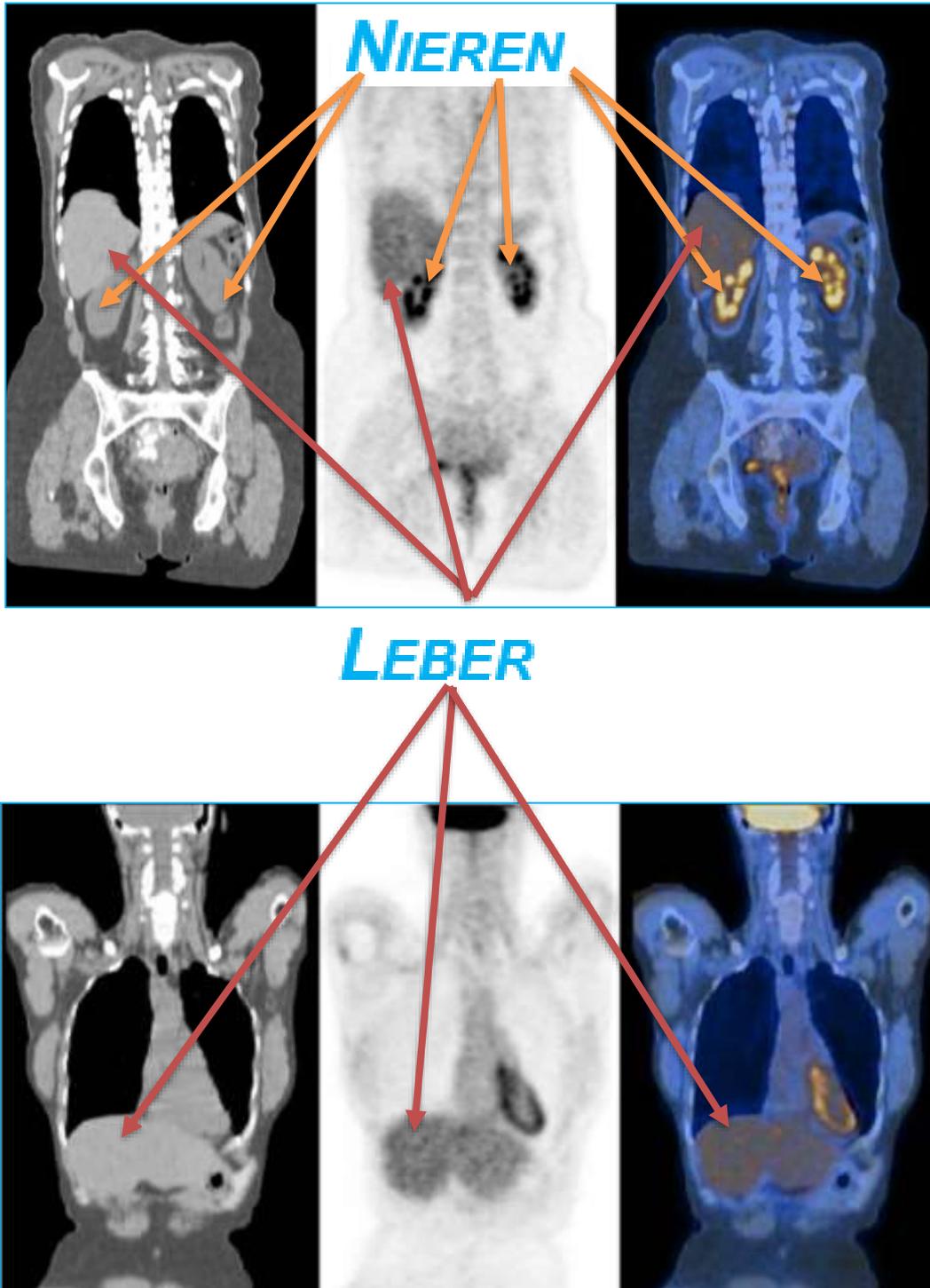


Abb. 122: VON LINKS NACH RECHTS

BILDERVERGLEICH VON CT, PET UND KOMBINATION PET-CT

PET-CT WIRD BEI DER NUKLEARMEDIZISCHEN DIAGNOSTIK BEVORZUGT

BILDGEBUNG: NIEREN UND LEBER

BILDQUELLE: NUKLEARMEDIZINISCHE BILDGEBUNG UND POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAPHIE

ONLINE ABRUFBAR UNTER:

www.epileptologie-bonn.de/cms/upload/homepage/lehnerzt/06-SPECT-PET.pdf

(ZUGANG am 26.12.2020)

Material	Cost	Light Output [*]	Effective Density [†]	Decay Time [‡]	Comments
Nal(Tl)	Cheap (relatively)	Highest	Lowest	Long	Hygroscopic, no longer used in PET
BGO	Expensive	Lowest	Highest	Long	Workhorse
LSO (or LYSO)	More expensive	High	High	Very short	Patented by CTI/Siemens
GSO	More expensive	Very high	Somewhat lower than LSO	Very short	

^{*} Determines energy and spatial resolution
[†] Determines scanner sensitivity
[‡] Determines dead time and random coincidences rate
Abbreviations: BGO, bismuth germanate; GSO, gadolinium orthosilicate; LSO, lutetium oxyorthosilicate; LYSO, lutetium yttrium orthosilicate; Nal(Tl), thallium-doped sodium iodide; PET, positron emission tomography.

Abb. 123: SZINTILLATOREN FÜR PET-SCANNER

<https://radiologykey.com/the-physics-of-petct-scanners/>

(ZUGANG am 26.12.2020)

Momentan gibt es drei Arten von **PET**-Scannern (vgl. Bender et al. 2004, 125):

1. Vollringsysteme: mindestens ein Vollring mit Kameras umkreist den Patienten (entweder nur **PET** oder **PET** und **CT**).
2. Koinzidenzfähige Gammakameras (*Anger camera*).
3. γ -Kameras mit Hoch-Energie-Kollimatoren.

Typ 3. ist zwar kostengünstiger, hat aber eine schlechtere Sensitivität und Auflösung, wodurch insbesondere winzige Verletzungen unerkannt bleiben könnten. Außerdem ist seine diagnostische Treffsicherheit noch nicht ausreichend untersucht worden.

Typ 1. besitzt Kristalldetektoren, für die es folgende Möglichkeiten gibt (Abb. 123):

- Natriumiodid (NaI).
- Wismuthgermenat (BGO).
- Lutetiumoxyorthosilicat (LSO).

Die Stärke von BGO ist die höhere Absorptionsfähigkeit, die von LSO die schnellere Untersuchung und bessere Bildqualität (vgl. Bender et al. 2004, 123 f.).

- Wie funktionieren diese Kristalldetektoren?

Fotonen mit hoher Energie (γ -Strahlungen) treffen auf das Kristall und bewirken, dass Fotonen mit viel niedrigerer Energie (sichtbares Licht) freigesetzt werden. Der dabei entstehende Lichtblitz wird dann von einem Fotodetektor registriert, woraufhin der Fotodetektor ein elektrisches Signal abgibt, das dann weiterverarbeitet werden kann.

Ein Nachteil von **PET** ist, dass keine Details der Anatomie geliefert werden. Daher muss eine *Schwächungskorrektur* durchgeführt werden, d. h. es muss festgestellt werden, in welchen Körperregionen die Strahlungen wie stark gedämpft werden, um das dann ausgleichen zu können. Das dauert bei jeder Untersuchung immerhin 20 Minuten (vgl. Bender et al. 2004, 126).

Deshalb ist die Kombination von **PET** und **CT** so reizvoll. **CT** steuert die Informationen über die Anatomie bei, wodurch aus den 20 Minuten weniger als eine Minute wird. Zwar sind die Kombinationsgeräte **PET/CT** in der Anschaffung und im Betrieb erheblich teurer, aber sie überzeugen durch (vgl. Bender et al. 2004, 126):

- Bildqualität.
- Läsionen, die **PET** entdeckt, **CT** aber nicht.
- Planung von Operationen und Strahlentherapie.
- Identifizierung von ödematösem oder narbigem Gewebe nach einer Therapie.
- Maximale Qualität bei minimaler Belastung der Patienten.
- Mehr Patienten in derselben Zeit.
- Genauere Diagnose bei Tumoren.

Trotzdem ist die Anschaffung dieser kostspieligen Geräte nicht unumstritten. Wie oft werden deren Stärken gebraucht? Sind sie unbedingt nötig? Außerdem sind Anweisungen wie tiefes Einatmen oder Arme über den Kopf bei **PET** problematisch.

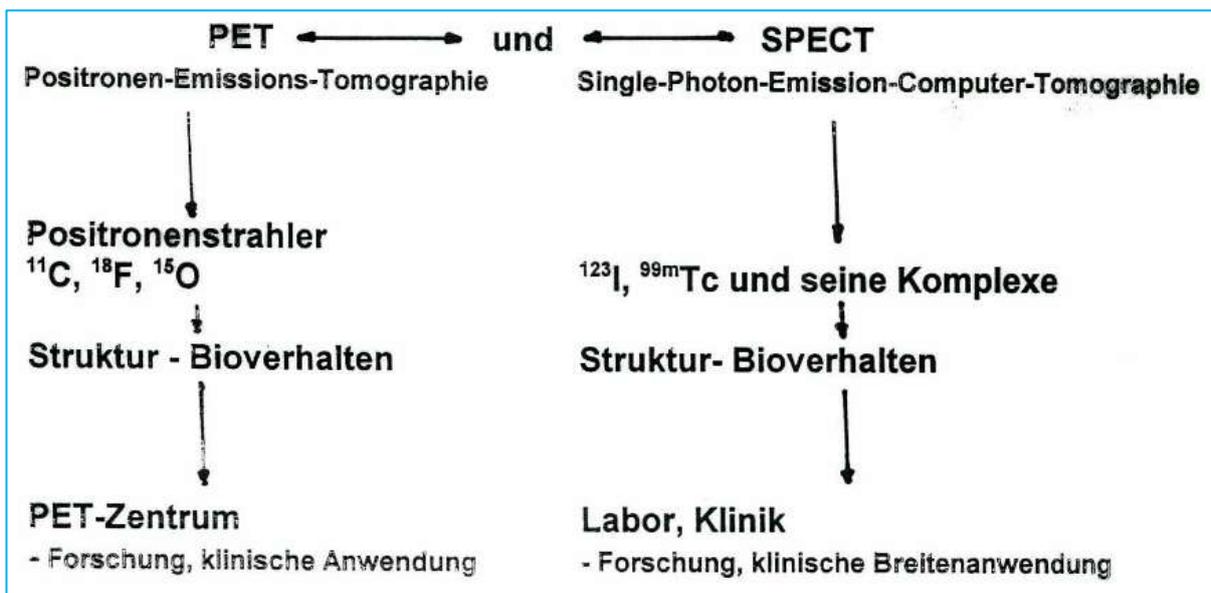


Abb. 124: **PET vs. SPECT**

Radioaktive Isotope				
Element	Isotop	Strahlung	Halbwertszeit $t_{1/2}$	Anwendung
Wasserstoff	^3_1H (Tritium)	β ($n \rightarrow p^+ + e^-$)	12.3 a	Radiomarker
Kohlenstoff	$^{11}_6\text{C}$	β^+ ($p^+ \rightarrow n + e^+$)	20.3 min	PET
	$^{14}_6\text{C}$	β	5730 a	Radiomarker
Fluor	$^{18}_9\text{F}$	β^+	110 min	PET
Phosphor	$^{32}_{15}\text{P}$	β	14.3	Radiomarker
Strontium	$^{90}_{38}\text{Sr}$	β	28 a	Strahlentherapie
Yttrium	$^{90}_{39}\text{Y}$	β	64.5 h	Strahlentherapie
Technetium	$^{99m}_{43}\text{Tc}$	γ	6.02 h	SPECT
Iod	$^{131}_{53}\text{I}$	β, γ	8 d	Strahlentherapie

Halbwertszeit $t_{1/2} \Rightarrow$ Zeit nach der die Hälfte einer zur Zeit $t = 0$ vorhandenen Zahl von Atomen eines Isotops zerfallen ist
1a = ein Jahr (lat. *annus*), 1 d = ein Tag (engl. *day*)
PET = Positronenemissionstomographie
SPECT = engl. *single photon emission computed tomography*

Abb. 125: RADIOAKTIVE ISOTOPE UND IHRE ANWENDUNGEN IN DER NUKLEARMEDIZINISCHEN DIAGNOSE

Zyklotron nennt man die Geräte, die die erwähnten Radionuklide erzeugen.²⁰⁵ Es handelt sich um Teilchenbeschleuniger, die chemische Elemente umwandeln können. Es gibt einerseits kleine Zyklotrone, die an Ort und Stelle Radionuklide für nur einen einzigen **PET**-Scanner herstellen. Andererseits gibt es aber auch riesige Zyklotrone, die größeren Mengen herstellen und diverse **PET**-Scanner damit beliefern. Wir unterscheiden drei Arten von Zyklotronen (vgl. Bender et al. 2004, 124 f.):

- Geräte mit 10 – 13 Megaelektronenvolt Leistung, die nur geringe Mengen von Fluor-18, Sauerstoff-15, Stickstoff-13 und Kohlenstoff-11 herstellen können.
- Geräte mit 16 – 18 Megaelektronenvolt Leistung, die obige Isotope in größeren Mengen herstellen können sowie kleinere Mengen von Iod-124, Brom-76, Gallium-68, Rubidium-82 und Kupfer-64.
- Geräte mit 30 – 32 Megaelektronenvolt Leistung, die obige Isotope in größeren Mengen herstellen können und zusätzlich Iod-123, Thallium-201 und Gallium-67.

Die Radionuklide der konventionellen Nuklearmedizin geben Photonen mit einer relativ niedrigen Energie von 80 – 400 Kiloelektronenvolt ab. Das führt dazu, dass die Photonen auf dem Weg durch den menschlichen Körper leicht absorbiert oder gestreut werden können, was im Bild dann zu Verzerrungen führt. Bei **PET** ist die Energie mit 511 keV höher, es gibt kaum Interaktion mit dem Gewebe und die Auflösung des Bildes ist besser. Die Physik erlaubt eine maximale Auflösung von 2 – 3 mm, was von den modernsten Geräten schon beinahe erreicht wird (vgl. Bender et al. 2004, 125).

²⁰⁵ Bereits ausführlich behandelt in der vorliegenden Arbeit auf den Seiten 38 ff.

Wie bereits erwähnt werden Photonen erstens gleichzeitig und zweitens in entgegengesetzter Richtung ausgesendet. Daher wird zwischen zwei Kristallen, die gegenüber liegen, jeweils eine Verbindung geschaffen. Werden nun beide fast gleichzeitig getroffen, liegt eine Koinzidenz vor. Millionen solcher Koinzidenzen verraten dann, wo gerade wie viele Radionuklide sind (vgl. Bender et al. 2004, 125). Die Verbindungslinie zwischen den beiden getroffenen Kristallen wird wie gesagt Aktivitätslinie genannt. Ihr Ort und Winkel werden gespeichert. Diese unzähligen Daten müssen dann noch korrigiert werden, weil die Detektoren unterschiedlich empfindlich sind und diverse Körperregionen die Strahlungen verschieden stark dämpfen (vgl. Bender et al. 2004, 125).

Danach weiß man, auf welcher Aktivitätslinie es wie viele Koinzidenzen gab. Schließlich müssen daraus noch Bilder angefertigt werden. Normalerweise wird dafür der dreidimensionale Bereich in zweidimensionale Scheiben zerlegt, die einen Abstand von 3 – 4 mm voneinander haben und jeweils 10 – 25 mm groß sind.

Als *echte Koinzidenzen* bezeichnet man solche, die wirklich auf die Auslöschung von Positronen zurückgehen. Nur an diesen ist man interessiert. Alle anderen sind lästiges Bildrauschen (vgl. Bender et al. 2004, 126).

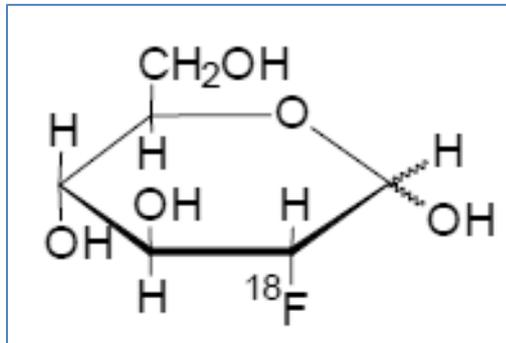
Wie bereits erwähnt müssen für eine Koinzidenz die beiden Photonen fast gleichzeitig gemessen werden. In der Praxis bedeutet fast gleichzeitig einen Abstand von 8 – 15 Nanosekunden. Leider kommt es vor, dass es sich um Photonen aus verschiedenen Ereignissen handelt. Hier spricht man von *zufälligen Koinzidenzen*. Sie verschlechtern unweigerlich die Bildqualität (vgl. Bender et al. 2004, 126).

Wenn in kurzer Zeit mehr als ein Positron zerfällt, können drei oder mehr Koinzidenzen gezählt werden. Hier spricht man von *mehrfachen Koinzidenzen*. Aufgrund ihrer zeitlichen Nähe ist dieses Problem leicht zu entdecken und zu beheben (vgl. Bender et al. 2004, 126).

Besonders viele falsche Koinzidenzen gibt es bei 3-D-Scannern und wenn in der Nähe des untersuchten Bereichs viel Aktivität herrscht (vgl. Bender et al. 2004, 129).

Eider kommen zu den echten Koinzidenzen noch eine viel größere Anzahl sonstiger Signale hinzu wie z. B. Einzelfotonen, die ausgesondert werden müssen. Daher müssen sowohl die Detektoren als auch die Elektronik dahinter mit einer enormen Anzahl von Ereignissen innerhalb kürzester Zeit fertig werden können (vgl. Bender et al. 2004, 126 f.).

Bei Fluor gibt es eine Halbwertszeit von beinahe 110 Minuten. Daher können *Tracer*, die Fluor enthalten, in einem großen Zyklotron hergestellt und an mehrere **PET**-Scanner der Umgebung geliefert werden. Der häufigste *Tracer* in **PET** ist ^{18}F -FDG. Das ist nach der Herstellung des Tracers vorgeschrieben. „**PET** benötigt ein nahe gelegenes **Zyklotron** um kurzlebige Radioisotope, wie ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O (und ^{18}F) zu erzeugen“²⁰⁶. Folgendes wird überprüft (vgl. Bender et al. 2004, 127):



- Identifikation des richtigen Radionuklids.
- Reinheit des Radionuklids.
- Reinheit des Endprodukts.
- Sterilität.
- Keine Giftstoffe.
- Keine Schwermetalle.
- pH-Wert.

^{18}F -FDG (**CHEMISCHE STRUKTURFORMEL OBEN**) verhält sich genau wie normale D-Glukose, weshalb man damit wunderbar den Glukosestoffwechsel veranschaulichen kann. In der Zelle wird es zu ^{18}F -FDG-6-P, das dann weder in den Embden-Meyerhoff-Zyklus gelangen, noch die Zelle wieder verlassen kann. Der Glukosestoffwechsel wird nicht beeinträchtigt, weil in der Injektion für den Patienten nur sehr geringe Mengen von ^{18}F -FDG enthalten sind (vgl. Bender et al. 2004, 127 f.).

Am meisten ^{18}F -FDG findet man dort, wo viel Glukose verbraucht wird. Für Nervenzellen zum Beispiel ist Glukose beinahe die einzige Energiequelle. Deshalb kann man in einem **PET**-Scan des Gehirns wunderbar beobachten, welche Hirnareale wie viel Glukose verbrauchen (vgl. Bender et al. 2004, 128).

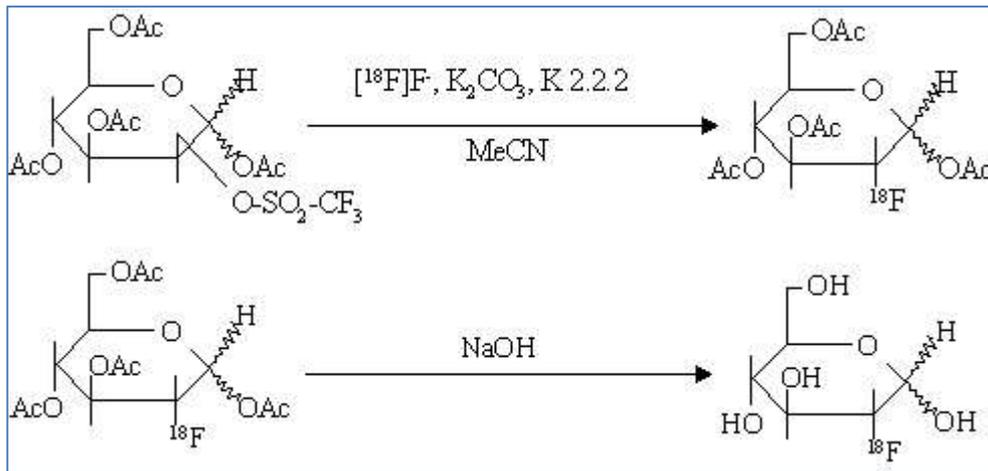
Bösartige Tumore und ihre Metastasen nehmen viel mehr Glukose auf als das gesunde Gewebe um sie herum. Je weiter die Tumore sich entwickeln, desto mehr steigt ihr Glukosebedarf. Auch die in Glukose enthaltenen Kohlenstoffketten werden gebraucht, weil die Zellteilungsraten in den Tumoren so hoch sind (vgl. Bender et al. 2004, 129).

Die **APPARATUR FÜR DIE SYNTHESE DER [^{18}F]-FLUORDESOXYGLUCOSE** sind auf nächsten Seiten veranschaulicht. Text- und Bilderquelle (Abb. 126):

<https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=10761&pNid=0> (Zugang am 08.12.2021).

²⁰⁶ Text online abrufbar unter:

https://de.wikibooks.org/wiki/Physikalische_Grundlagen_der_Nuklearmedizin/_Kapitelzusammenfassungen (Zugang am 08.10.2020).



CHEMISCHE SYNTHESE DER $[^{18}\text{F}]$ -FLUORDESOXYGLUCOSE

- **CHEMISCHE BEZEICHNUNG:** 2- $[^{18}\text{F}]$ -FLUOR-2-DESOXY-D-GLUCOPYRANOSE
- **VERFÜGBARKEIT:** SEIT 1995
- **ZULASSUNG IN DEUTSCHLAND 2000 UND 2005, MARKENNAME:** GLUCOROS[®]

SYNTHESE

- **HERSTELLUNGSDAUER CA. 25 MIN**
- **AUSBEUTE CA. 50 %**
- **AUSREICHEND FÜR BIS ZU 20 PATIENTEN PRO CHARGE**

INDIKATION

1. ONKOLOGIE:

- **Lokalisation von Primärtumoren und Metastasen**
- **Therapiemonitoring**

2. KARDIOLOGIE:

- **Vitalitätsnachweis des Herzmuskels**

3. NEUROLOGIE:

- **Lokalisation epileptischer Herde**

SYNTHESEAPPARATUR



SYNTHESESCHEMA

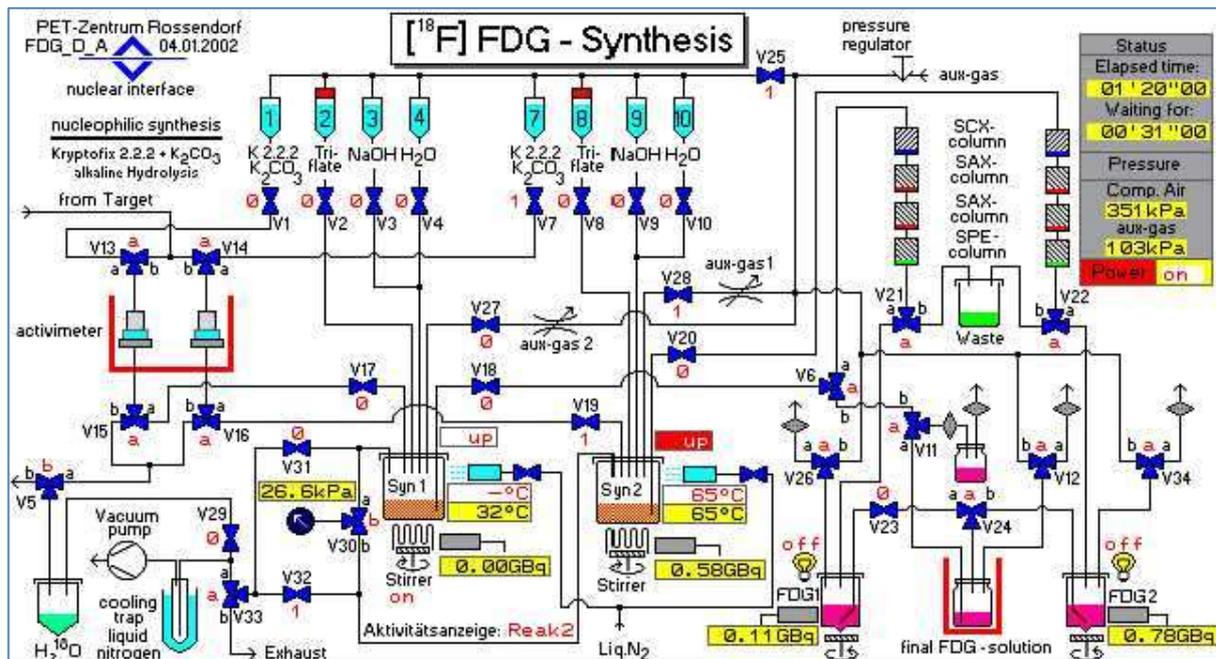


Abb. 126: Die APPARATUR FÜR DIE SYNTHESISCHEMA DER [¹⁸F]-FLUORDESOXYGLUCOSE. Text- und Bilderquelle: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=10761&pNid=0> (ZUGANG am 08.12.2021)

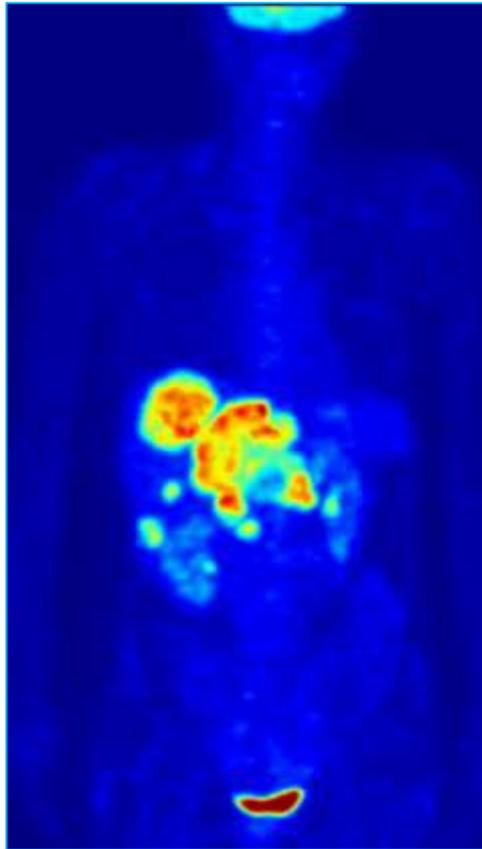
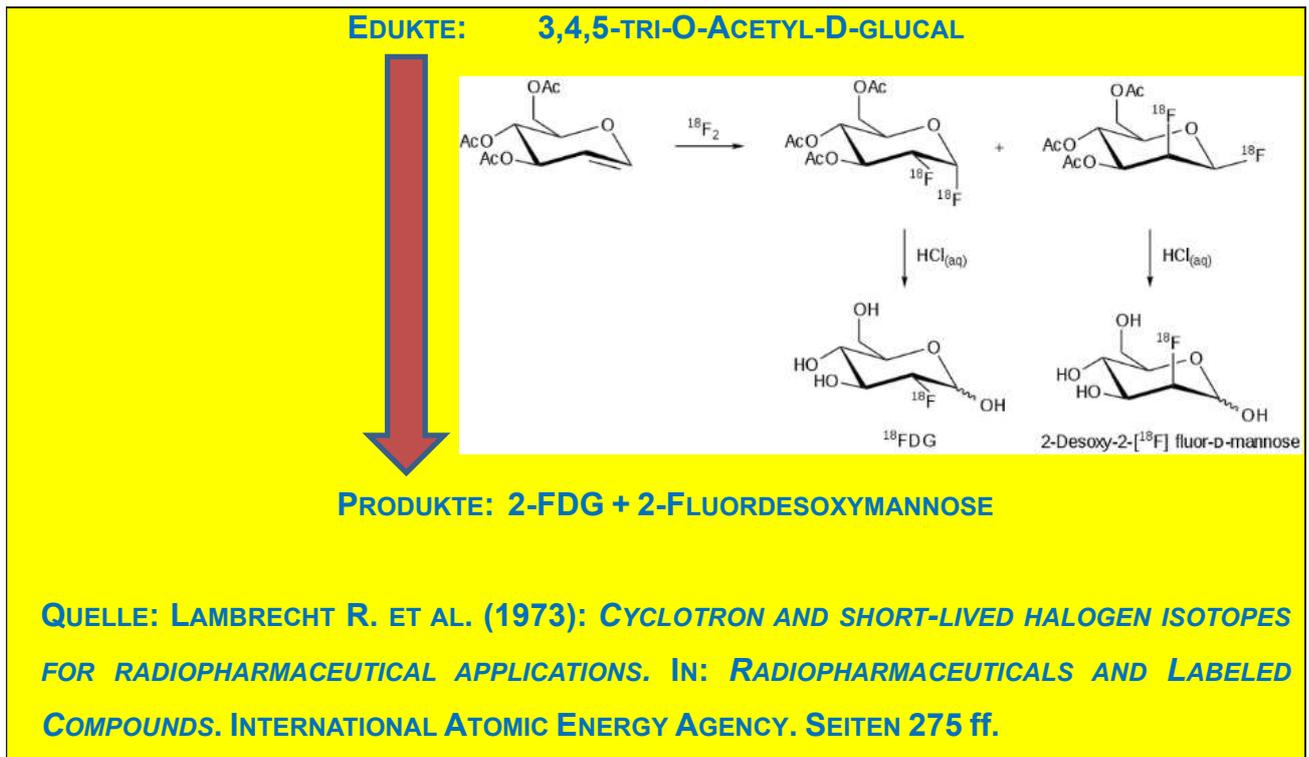


Abb. 127: „GANZKÖRPER PET-AUFNAHME MIT ¹⁸F-FLUOR-DESOXYGLUCOSE“

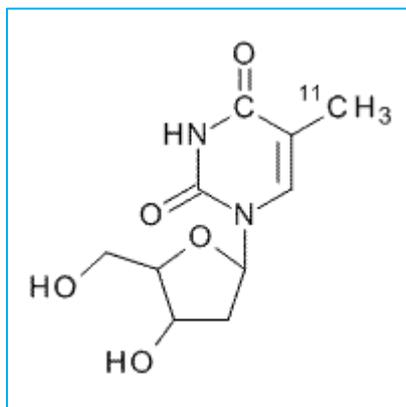
TEXT- UND BILDQUELLE: <https://www.biologie-seite.de/Biologie/Fluordesoxyglucose>

(ZUGANG am 18.12.2021)

Die Konzentration von ^{18}F -FDG ist ein hervorragender Indikator, welche Zellen zu Tumoren bzw. Metastasen gehören und welche nicht. Das hat PET zu einem effizienten Werkzeug gemacht, um Tumore nachzuweisen bzw. festzustellen, in welchem Entwicklungsstadium sie sich bereits befinden (Abb. 125 – 127). Das ist der Grund, warum 80% der Anwendungen von PET mit Krebs zu tun haben. Die übrigen 20% entfallen auf Kardiologie und Neurologie (vgl. Bender et al. 2004, 132).

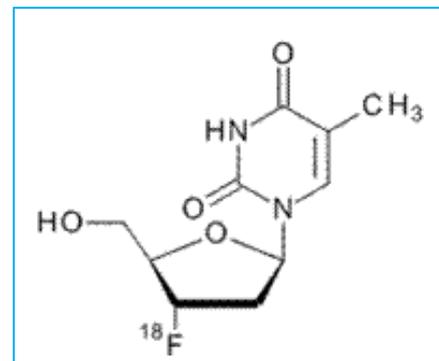
Da die Nieren ^{18}F -FDG nicht als Glukose einstufen, filtern sie innerhalb von 2 bis 2,5 Stunden bereits die Hälfte des verabreichten ^{18}F -FDG aus dem Blut, wonach es im Urin ausgeschieden wird (vgl. Bender et al. 2004, 132).

Außer ^{18}F -FDG gibt es noch einige andere *Tracer*, die aber erst in der Testphase sind (vgl. Bender et al. 2004, 133), wie u. a. ^{18}F -Metronidazol für den Hypoxienachweis in Tumoren, oder auch



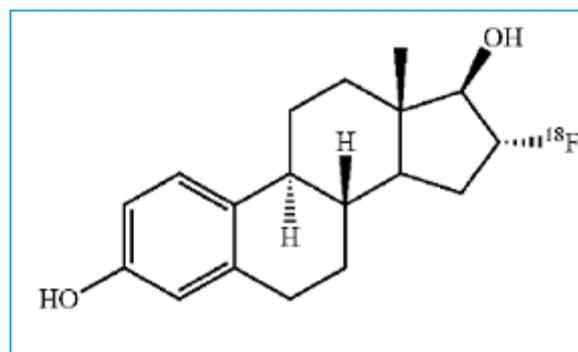
^{11}C -THYMIDIN

UND

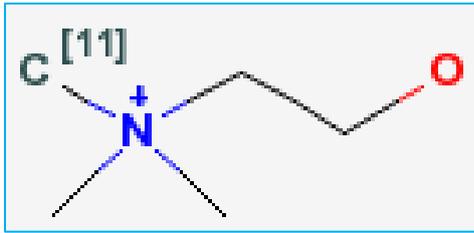


^{18}F -FLUORTHYMIDIN

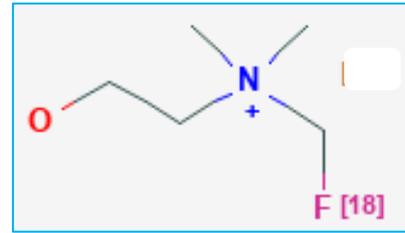
ZUR UNTERSUCHUNG DER ZELLEILUNG



^{18}F -ESTRADIOL FÜR DIE ER-VERTEILUNG BEI BRUSTKREBS



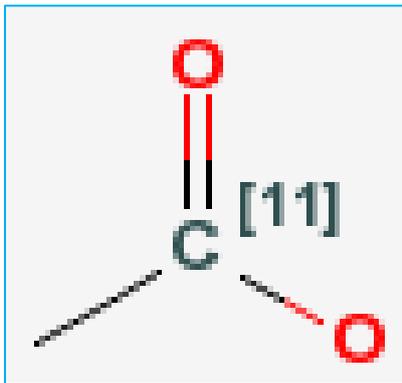
¹¹C-CHOLINE



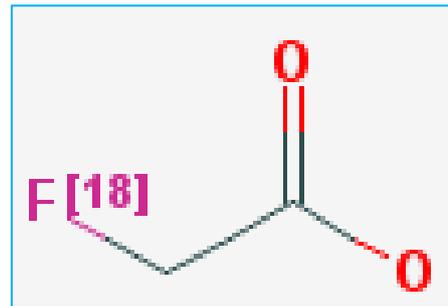
¹⁸F-CHOLINE

UND

ZUM NACHWEIS VON PROSTATATA-KREBS



¹¹C-ACETAT



¹⁸F-ACETAT

UND

ZUM NACHWEIS VON PROSTATATA-KREBS

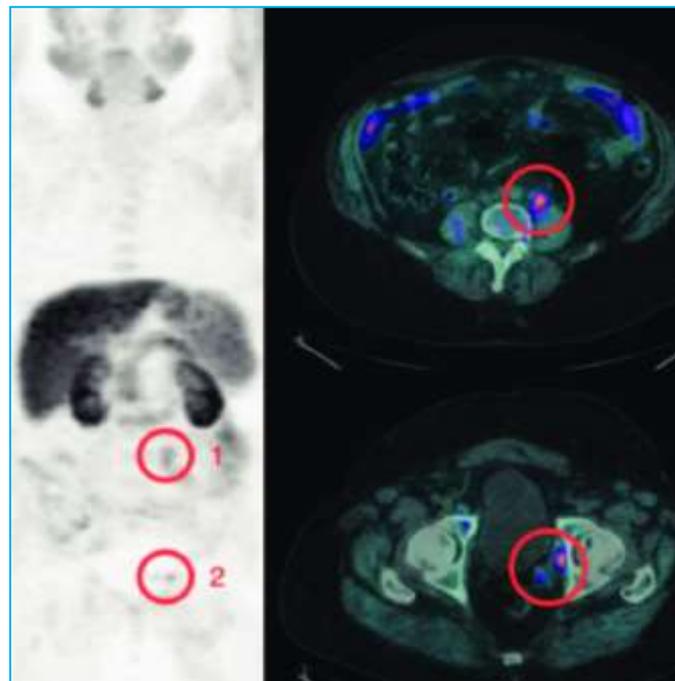


Abb. 128: Nachweis von Prostatata-Krebs mittels ¹¹C- Choline (PET/CT)

BILDQUELLE: https://www.researchgate.net/figure/11-C-Choline-PET-CT-in-a-patient-with-Gleason-8-prostate-cancer-presenting-with-a-rising_fig1_303793848 (ZUGANG am 18.12.2021)

Die Patienten dürfen mehr als 4 Stunden nichts zu sich genommen haben, damit Muskeln und Leber möglichst wenig Glukose aufnehmen. Der Blutzucker sollte niedriger als 120 mg [%] sein. Nach Insulin-Injektionen muss der Blutzucker mindestens eine halbe Stunde stabil bleiben (vgl. Bender et al. 2004, 134).

Wenn das alles erfüllt ist, kann ¹⁸F-FDG injiziert werden. Anschließend sollten die Patienten idealerweise in einem dunklen Raum liegen und sich möglichst wenig bewegen. Selbst für eine Ganzkörperuntersuchung wird meistens nur der Bereich vom Kopf bis zum Becken betrachtet (vgl. Bender et al. 2004, 134).

Bei der Auswertung werden Stellen gesucht, an denen sich ¹⁸F-FDG stärker angereichert hat, als es von der Anatomie her zu erwarten wäre. Eventuell kann man auch die Anreicherung in einem einzelnen Organ mit der im übrigen Körper zahlenmäßig vergleichen. Dass man allerdings nach der Untersuchung ausschließlich die Zahlenwerte vergleicht, hat sich im Spitalsalltag nicht durchgesetzt (vgl. Bender et al. 2004, 134).

Da bei **PET** keine Geräte in den Körper eindringen müssen, hat sie den Ruf, eine eher ungefährliche Methode zu sein. Die wenigen Studien, die sich mit Risiken befassen, haben hauptsächlich die Radiopharmaka im Auge und weniger die **PET** an sich (vgl. Bender et al. 2004, 135).

Die größte Studie mit über 80.000 Fällen konnte keinerlei Nebenwirkungen feststellen. Seither gilt **PET** als sicher. Das ist auch nicht wirklich überraschend, weil von den Tracern ja nur Mikrogramm in den Körper gelangen (vgl. Bender et al. 2004, 135).

Die Strahlungenbelastung beträgt 7,4 [mSv] und ist damit nicht signifikant höher als bei anderen nuklearmedizinischen Verfahren oder im Alltag. Das Risiko, zum untersuchten Tumor einen weiteren durch die Radiopharmaka zu bekommen, liegt unter 1:3000. Kinder und Schwangere sind wie bei anderen Strahlungsverfahren nicht zugelassen (vgl. Bender et al. 2004, 135).

Wenn ein Gerät ca. 1.200 Untersuchungen jährlich durchführt, dann kostet eine Untersuchung im Schnitt zwischen 1.000 und 1.200 Euro. Der große Vorteil neuerer Geräte ist, dass sie mehr Untersuchungen in derselben Zeit schaffen, was die Kosten pro Untersuchung verringert (vgl. Bender et al. 2004, 135).

PET verlangt hohe Investitionen. Nicht nur in den **PET**-Scanner selbst, sondern auch in eine entsprechende Rechenleistung zur Verarbeitung der Daten und eventuell auch noch in ein Zyklotron. Daher haben Behörden diverser Länder untersucht, in welchen Fällen **PET** nützlich und kosteneffizient ist.

Die meisten kamen zu dem Schluss, dass **PET** bei der Diagnose treffsicherer ist als traditionelle Verfahren, was sich dann positiv bei den nachfolgenden Therapien auswirkt (vgl. Bender et al. 2004, 135).

Unbestritten ist das bei der Strahlentherapie und dem Finden von Metastasen. Zweifel gibt es höchstens, ob **PET** auch für Routinediagnosen eingesetzt werden sollte. Dazu fehlen noch langfristige Studien. Solange es die nicht gibt, wird es in verschiedenen Ländern weiterhin verschieden strenge Kriterien geben, was mit **PET** untersucht werden soll und was nicht.

- Wie ist die Situation in Deutschland und Österreich?

Aufgrund fehlender Studien hat der Bundesausschuss für Ärzte und Krankenkassen die Kostenübernahme für **PET**-Untersuchungen durch gesetzliche Krankenkassen abgelehnt. Sehr wohl findet man **PET** jedoch bei privaten Krankenversicherungen und bei Diagnosen und Behandlungen vor oder nach Operationen (vgl. Bender et al. 2004, 136).

In der Krebstherapie spielt die Qualität der Diagnose eine entscheidende Rolle. Findet man beispielsweise Metastasen, spricht das gegen eine Operation. Ganz wichtig ist es auch, Rückfälle möglichst rasch zu entdecken (vgl. Bender et al. 2004, 137).

Während **MRT** und **CT** erst Veränderungen in der Anatomie aufzeigen können, sieht man mit **PET** schon lange vorher den gesteigerten Verbrauch von Glukose, der für Tumore und Metastasen typisch ist. Gutartige und bösartige Varianten können unterschieden werden. Leider funktioniert **PET** nur bei Krebsarten mit schnellem Wachstum wie z. B. Melanomen, bei langsamem Wachstum wie bei Prostata- und Schilddrüsenkrebs nicht (vgl. Bender et al. 2004, 137).

PET enthüllt, dass die meisten Patienten bei der Diagnose schon Metastasen haben, was früher oft unentdeckt blieb. Metastasen machen die Therapie komplizierter und teurer (vgl. Bender et al. 2004, 137).

Für folgende Aufgaben kann **PET** verwendet werden (vgl. Bender et al. 2004, 138):

- Für einen Tumor nachweisen und genau lokalisieren.
- Zu feststellen, in welchem Stadium er ist.
- Zu bewerten, ob und wie gut eine Chemotherapie funktionieren würde.
- Zu feststellen, wie gut eine Therapie gewirkt hat.
- Probleme finden, die eine Therapie erschweren.
- Zu überwachen, ob es einen Rückfall gibt.

In der Praxis wird **PET** hauptsächlich in folgenden Bereichen eingesetzt (vgl. Bender et al. 2004, 138 f.):

- Zu feststellen, welche Bereiche gutartig, welche bösartig sind.
- Metastasen finden.
- Zu bewerten, wie sehr eine Therapie den Tumor beeinträchtigt hat.
- Rückfälle bei Lungen-, Kopf-, Hals- und Brustkrebs entdecken.

Die folgenden Anwendungen von **PET** werden in manchen Ländern sogar von der Krankenkasse bezahlt:

1. Bronchial-Karzinome

Verwendet man **PET** zusätzlich zu konventionellen Methoden, können Metastasen präziser diagnostiziert werden. Außerdem ist **PET** hier kosteneffektiv (vgl. Bender et al. 2004, 140).

2. Solitäre Lungenherde

Alle Studien kommen zu dem Schluss, dass **PET** hier sehr treffsicher ist. Allerdings wurde der langfristige Effekt noch nicht untersucht (vgl. Bender et al. 2004, 140).

3. Kolorektale Karzinome

Rückfälle oder Metastasen in der Leber werden mit **PET** häufiger entdeckt als mit **CT**. So kann schon mit der Chemotherapie begonnen werden, bevor überhaupt Symptome auftreten. Das Finden von Metastasen durch **PET** verhindert sinnlose Operationen, die viel Geld kosten und den Patienten beeinträchtigen (vgl. Bender et al. 2004, 140).

4. Kopf-Hals-Tumore

Narbengewebe verhindert, dass **CT** oder **MRT** Rückfälle diagnostizieren können. Deshalb ist **PET** hier besonders nützlich (vgl. Bender et al. 2004, 140).

Auch Metastasen in Lymphknoten kann **PET** nachweisen. Zwar führt Strahlentherapie ohne **PET** oft ebenfalls zum Erfolg, allerdings müssen dann unnötig große Bereiche bestrahlt werden. Außerdem hilft **PET** dem Chirurgen beim Entfernen der richtigen Lymphknoten (vgl. Bender et al. 2004, 140).

5. Melanome

PET ist präziser beim Aufspüren von Metastasen und eine wichtige Entscheidungshilfe, ob eine Operation sinnvoll ist.

Am effizientesten ist **PET** bei Metastasen in Lymphknoten oder Organen, wodurch sinnlose Operationen verhindert werden, die den Patienten belasten und nur unnötig Geld kosten (vgl. Bender et al. 2004, 141).

6. Brustkrebs

Hier gibt es noch zu wenige Daten, aber insbesondere das Ausschließen von Metastasen in Lymphknoten sieht erfolgversprechend aus (vgl. Bender et al. 2004, 141).

7. Gliome

Bei der Untersuchung, ob die Überreste von Tumoren nach der Therapie auf einen Rückfall hindeuten, ist **PET** zweifellos besser als **MRT**, aber nicht unbedingt besser als **SPECT**. Bezüglich Grading und hypermetabolen Regionen ist **PET** allerdings stärker als **SPECT**, was vor Operationen wichtig ist (vgl. Bender et al. 2004, 141).

8. Lymphome

Hier ist **PET** wichtig für die Einstufung des Tumors bei der ersten Diagnose bzw. während oder nach Therapien. Sehr häufig geht es um einen möglichen Rückfall nach einer Chemotherapie, weil bei Lymphomen dann trotzdem noch Chance auf Heilung besteht (vgl. Bender et al. 2004, 142). **PET** schlägt **CT** dabei deutlich (Abb. 129 – 133).

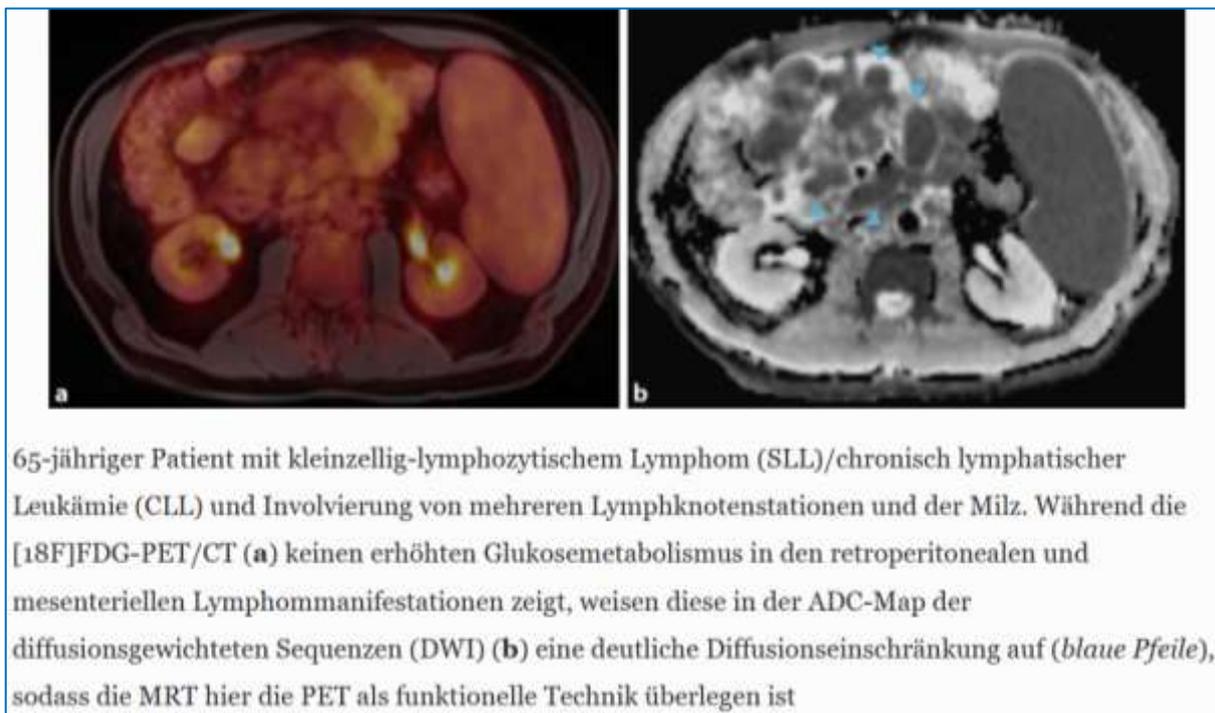


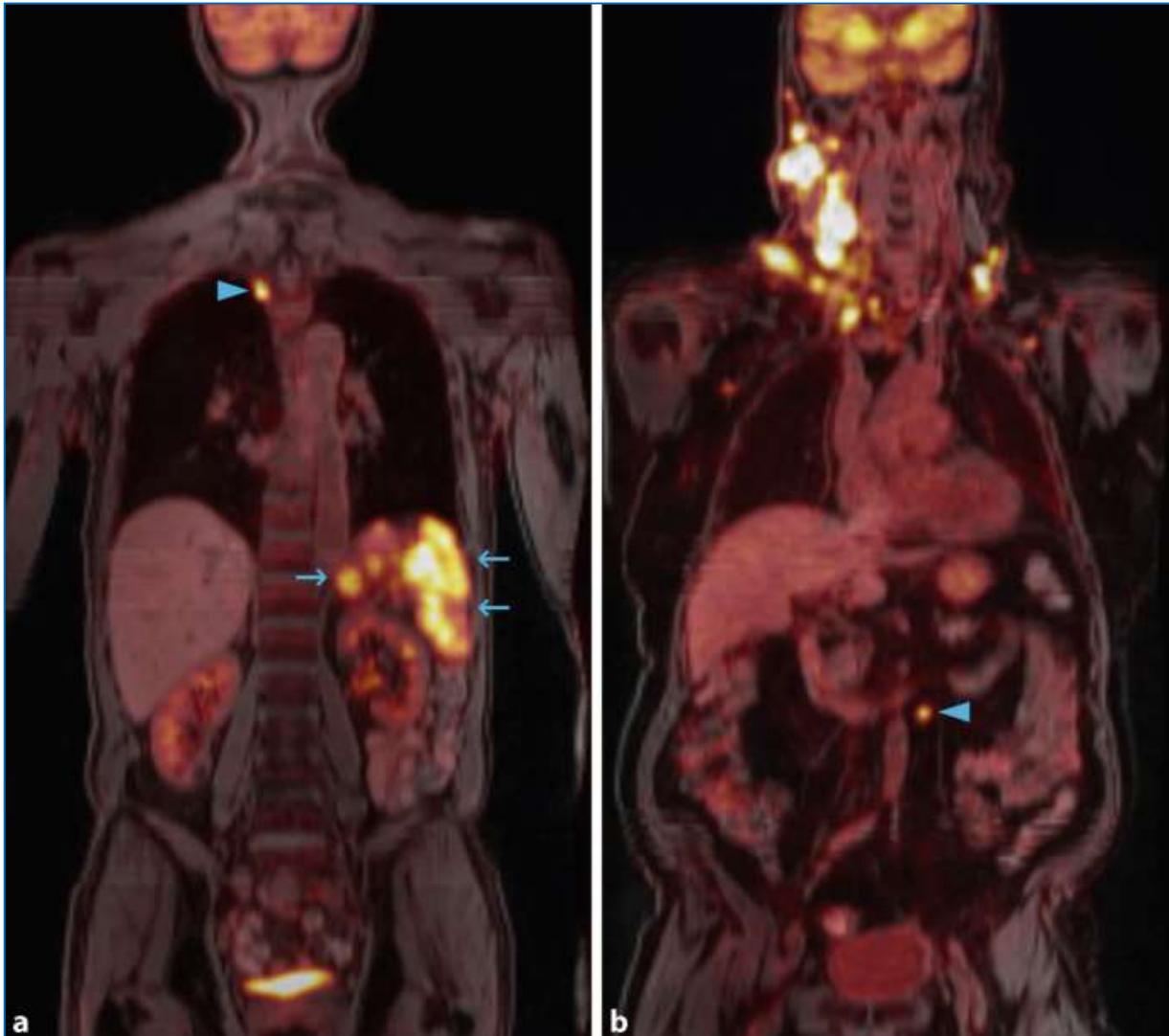
Abb. 129: HYBRIDBILDGEBUNG BEI LYMPHOM

TEXT- UND BILDQUELLE: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00117-020-00676-4>
(ZUGANG am 18.12.2021)

COMPUTERTOMOGRAFIE (CT)

Positronenemissionstomografie (PET)

KERNSPINTOMOGRAFIE WIRD AUCH MAGNETRESONANZTOMOGRAFIE (MRT) GENANNT

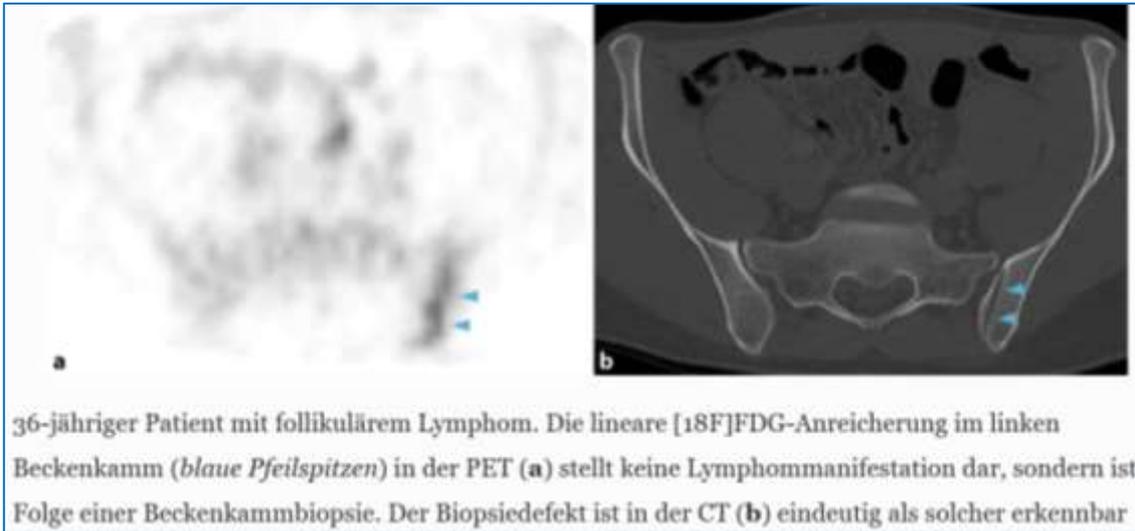


Zwei Patienten mit diffusem großzelligem B-Zell-Lymphom (DLBCL) zum Zeitpunkt des prätherapeutischen Stagings. Sowohl der 61-jährige Patient (**a**) mit Befall eines einzigen mediastinalen Lymphknotens (*blaue Pfeilspitze*) und multifokalem Milzbefall (*blaue Pfeile*) als auch der 73-jährige Patient (**b**) mit Befall mehrerer supradiaphragmaler Lymphknotenstationen und eines singulären mesenterischen Lymphknotens (*blaue Pfeilspitze*) erfüllen die Kriterien für Stadium III

Abb. 130: Vergleich zwischen zwei Patienten

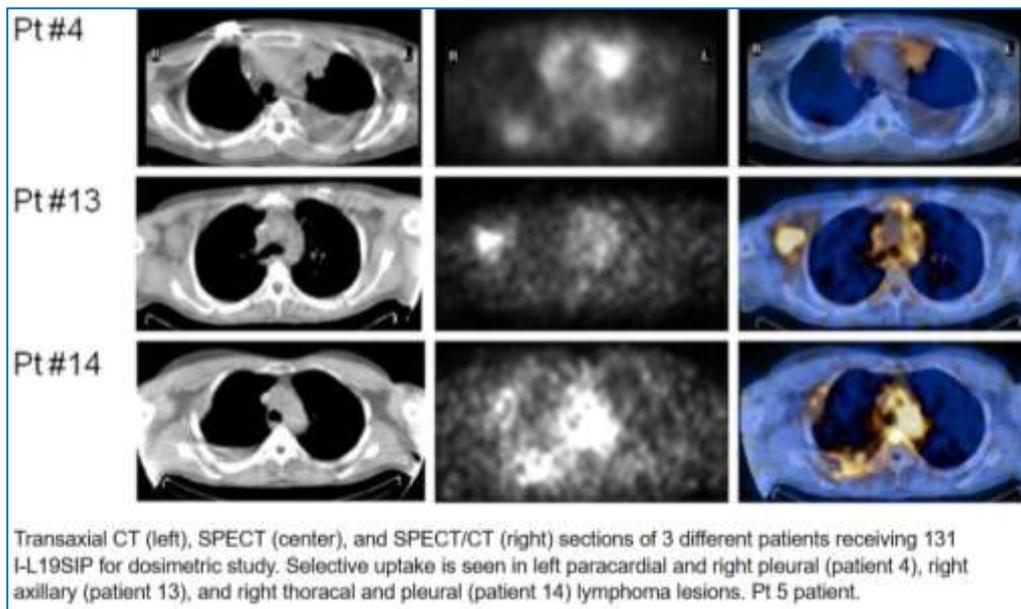
TEXT- UND BILDQUELLE: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00117-020-00676-4>

(ZUGANG am 18.12.2021)



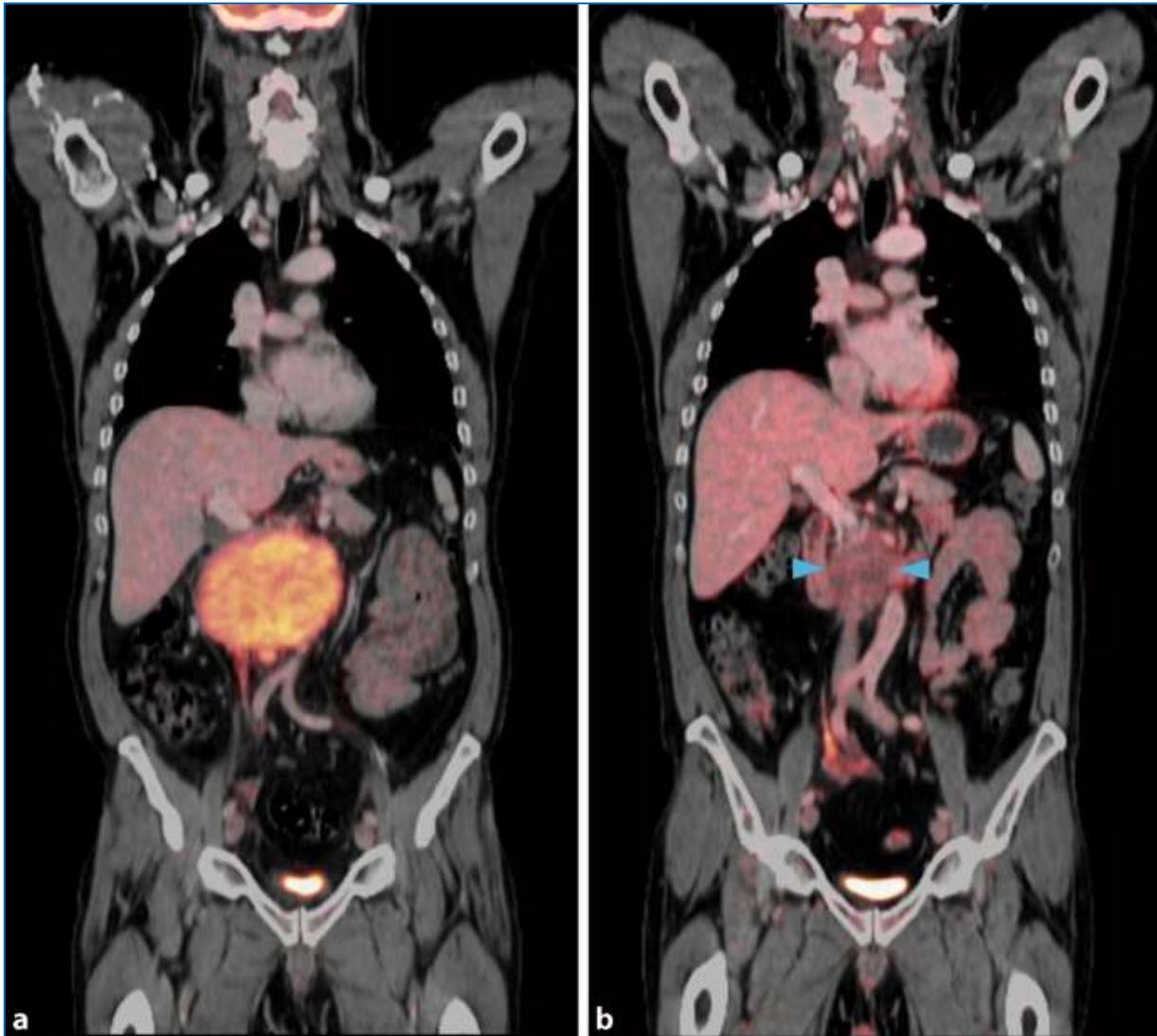
**Abb. 131: VERGLEICH ZWISCHEN
Positronenemissionstomografie (PET)
UND
COMPUTERTOMOGRAFIE (CT)**

TEXT- UND BILDQUELLE: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00117-020-00676-4>
(ZUGANG am 18.12.2021)



**Abb. 132: Bildgebungsverfahren mit CT (links), SPECT (Mitte) und PET/CT-Kombination
SPECT – genauso wie PET – wird seit Anfang des Jahrtausends ausschließlich als
Kombinationsverfahren mit der CT
Einzelfotonenemissionscomputertomografie, Abkürzung SPECT (aus dem Englischen:
Single Photon Emission Computed Tomography)**

TEXT- UND BILDQUELLE: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00117-020-00676-4>
(ZUGANG am 18.12.2021)



56-jähriger Patient mit follikulärem Lymphom. Die prätherapeutische [18F]FDG-PET/CT (a) zeigt einen FDG-aiden nodale Lymphombulk mit Ummauerung der Aorta und Vena cava inferior. Die PET/CT nach 3 Zyklen R-BENDA (b) zeigt eine deutliche Abnahme der [18F]FDG-Anreicherung, welche nun unter dem Niveau der Traceranreicherung in der Leber liegt (Deauville 2); somit besteht laut Lugano-Klassifikation eine komplette Remission. Da der Lymphombulk auch eine Größenabnahme von mehr als 30 % zeigt, liegt auch nach der Response Evaluation Criteria in Lymphoma(RECIL)-Klassifikation eine komplette Remission vor

Abb. 133: (PET/CT)-Kombination

„Die Positronenemissionstomografie (PET) ist eines der wichtigsten Bildgebungsverfahren in der Nuklearmedizin und wird seit Anfang des Jahrtausends ausschließlich als Kombinationsverfahren mit der Computertomografie (CT)“ (Textquelle: Mix 2018, 350)

TEXT- UND BILDQUELLE: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00117-020-00676-4>
(ZUGANG am 18.12.2021)

9. Hodgkin-Lymphome

PET kann besser als **CT** Narbengewebe von Tumorresten unterscheiden und dadurch Patienten die sehr ungesunde Strahlentherapie ersparen. **PET** steigert die Lebenserwartung der Patienten mehr als alle anderen Verfahren. Es spart zwar Geld, wenn man **PET** nicht auf alle Patienten anwendet. Dafür beschert **CT** ohne **PET** 36% der Patienten eine sinnlose Strahlentherapie, während es bei **CT** mit **PET** nur 4% sind. Falls die **PET**-Anwendung vom **CT**-Ergebnis abhängig gemacht wird, sind es 6%. Hier hilft **PET** zu entscheiden, bei welchen Patienten mit koronarer Herzkrankheit eine Bypass-Operation oder Herztransplantation sinnvoll ist. Dadurch können eventuell die enormen Kosten einer Herztransplantation eingespart werden (vgl. Bender et al. 2004, 142).

PET ist zwar etwas besser als **SPECT**, aber wohl zu wenig, als dass es sich durchsetzen wird (vgl. Bender et al. 2004, 143).

PET dient hier zur Einstufung von Hirntumoren und zur Unterscheidung, ob es sich um einen Rückfall oder Folgeschäden der Therapie handelt.

Relevant für **PET** sind Patienten, bei denen die Epilepsie nicht behandelbar ist, die also operiert werden sollten, bei denen aber das EEG den Fokus der Epilepsie nicht finden kann (vgl. Bender et al. 2004, 143).

Das Problem ist, dass es noch keine Studien gibt, die die Effizienz von **PET** und **SPECT** diesbezüglich verglichen haben.

Viele dieser Erkrankungen kann **PET** aufspüren und dabei kognitive von demenziellen Erkrankungen unterscheiden. **PET** ist hier treffsicherer als **SPECT** (vgl. Bender et al. 2004, 143).

Der Nutzen von **PET** für Alzheimer-Patienten müsste aber noch untersucht werden.

Bei Hirntumoren in der Nähe von Hirnregionen, die für die Wahrnehmung zuständig sind, kann **PET** Chirurgen helfen, den Schaden durch die Operation für den Patienten möglichst gering zu halten. Allerdings wird hier nicht wie sonst mit dem *Tracer* ^{18}F -FDG gearbeitet, sondern mit H_2^{15}O . Besonders nützlich ist das für Patienten, bei denen **MRT** nicht in Frage kommt (vgl. Bender et al. 2004, 143 f.).

Da die Halbwertszeit von ^{15}O jedoch nur 20 Sekunden beträgt, wird dieses Verfahren wohl nur an sehr wenigen Kliniken angeboten werden.

Es ist zu hoffen, dass in Zukunft viele neue *Tracer* zur Anwendung kommen. Da **PET** um den Faktor 1000 empfindlicher ist als **MRT** und eine Auflösung von Millimetern

ermöglicht, ist **PET** die Zukunftshoffnung im Bereich der Diagnose. Besonders interessant ist die Beurteilung von Therapieerfolgen, bevor die Therapie zu Ende ist. Es ist auch möglich, dass mit empfindlicheren Kristallen die Zeit für eine Untersuchung bald unter 20 Minuten gedrückt werden kann, wodurch mehr Untersuchungen möglich werden, was sich positiv auf die Kosten auswirkt (vgl. Bender et al. 2004, 144). Eine weitere Hoffnung ist die Zusammenarbeit von **PET** und **CT** entweder durch Kombinationsgeräte oder durch bessere Software (Abb. 129 – 133). Das könnte die Vorgangsweise von Kliniken bei Diagnosen und Therapien verändern. Außerdem bietet das die Möglichkeit, die Strahlentherapie präziser auszurichten, was zu besseren Heilungschancen bei weniger Nebenwirkungen führen könnte (vgl. Bender et al. 2004, 144).

Nuklid	Halbwertszeit (min)	maxim. Energie (MeV)	maxim. Reichweite (mm H ₂ O)	maxim. spez. Aktivität (GBq/mol)	Kernreaktionen
Kohlenstoff-11	20,4	0,97	4,1	$3,4 \times 10^{11}$	$^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ $^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$
Stickstoff-13	9,96	1,19	5,4	$7,0 \times 10^{11}$	$^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$ $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$
Sauerstoff-15	2,05	1,72	8,2	$3,4 \times 10^{12}$	$^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$
Fluor-18	109,7	0,64	2,4	$6,3 \times 10^{10}$	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}(d,\alpha)^{18}\text{O}$

Abb. 134: Einige Positronenstrahler mit ihren Eigenschaften

7. RADIOPHARMAKA UND LADME

Es wurde bereits über *Radiopharmaka* oder *Tracer* besprochen. Das sind *radioaktive Arzneimittel*, die in einen lebenden Organismus eingeführt werden, um eine nuklearmedizinische Diagnose zu erlangen. Sie haben kurze Halbwertszeiten und werden mittels Kernreaktionen hergestellt. ^{18}F (in **PET**) und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (in **SPECT**) haben Halbwertszeiten von etwa 109,77 Minuten bzw. 6,01 Stunden. Sie sind für die Diagnose in **PET** und **SPECT** sehr gut geeignet, da sie innerhalb von ein paar Tagen von dem Körper ausgeschieden werden und daher gesundheitlich nicht gefährlich oder schädlich sind. Man spricht von *Pharmakokinetik* (vgl. Bender et al. 2004, 130 f.).

Die *Pharmakokinetik* und die *Toxikokinetik* stellen die Frage:

- Was macht der Körper mit der Substanz (Fremdstoff)?

Nach dem Thema vorliegender Arbeit: Radioaktive Substanzen ^{18}F und $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Während die *Pharmakodynamik* und die *Toxikodynamik* die obige Frage umdrehen:

- Was macht der Fremdstoff oder die Substanz (^{18}F oder $^{99\text{m}}\text{Tc}$) mit dem Körper?

In diesem Zusammenhang werden fünf Phasen der Pharmako/Toxikokinetik, genannt (in Englisch) **LADME** Schema, hingewiesen:

1. **L**iberation (Befreiung, Entfernung, Entlastung)
2. **A**bsorption (Aufnahme, Resorption)
3. **D**istribution (Verteilung)
4. **M**etabolism (Metabolismus)
5. **E**xcretion (Ausscheidung)

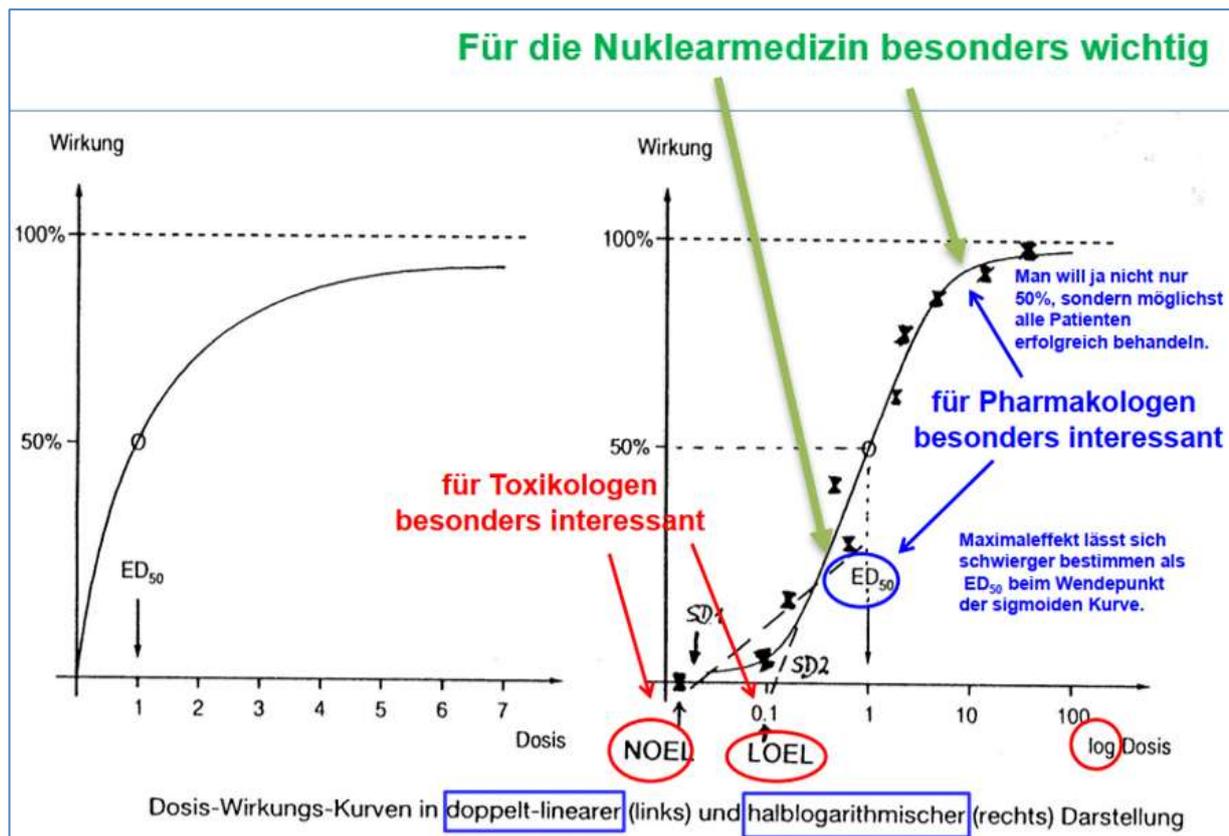


Abb. 135: DOSIS-WIRKUNG-BEZIEHUNG

„DOSIS-WIRKUNGS-KURVEN SOLLTEN HINSICHTLICH MÖGLICHSST VIELER WIRKUNGEN DEN BEREICH ZWISCHEN MAXIMALEFFEKT UND UNWIRKSAMKEIT ABDECKEN“

TEXTQUELLE UND BILDQUELLE: EUROPEAN REGISTERED TOXICOLOGIST (ERT) HUBER, WOLFGANG: VO TOXIKOLOGIE FÜR MEDIZINER UND NATURWISSENSCHAFTLER. SKRIPTUM 1 – TEIL 3 (CHARAKTERISTIK DER GIFTWIRKUNG). TOXIKOLOGIE – EINFÜHRUNG. WINTERSEMESTER 2019/2020. SEITEN 53 UND 55.

Nach dem Schweizer Arzt, Naturphilosoph und Alchemist Philippus Theophrastus Aureolus Bombast von Hohenheim (1493 – 1541), genannt *Paracelsus*: „Alle Dinge

sind Gift, und nichts ist ohne Gift. Allein die **Dosis** macht es, dass ein Ding kein Gift sei. Nur die **Dosis** macht das Gift“²⁰⁷. „Auch so genannten *Schutzstoffe* haben daher einen **Dosisbereich**, in dem sie giftig sind bzw. Nebenwirkungen erzeugen können“ (Huber 2019, 3)²⁰⁸. „Die Dosis bestimmt, ob ein Stoff giftig oder ungiftig wirkt“ (Huber 2019, 5)²⁰⁹.

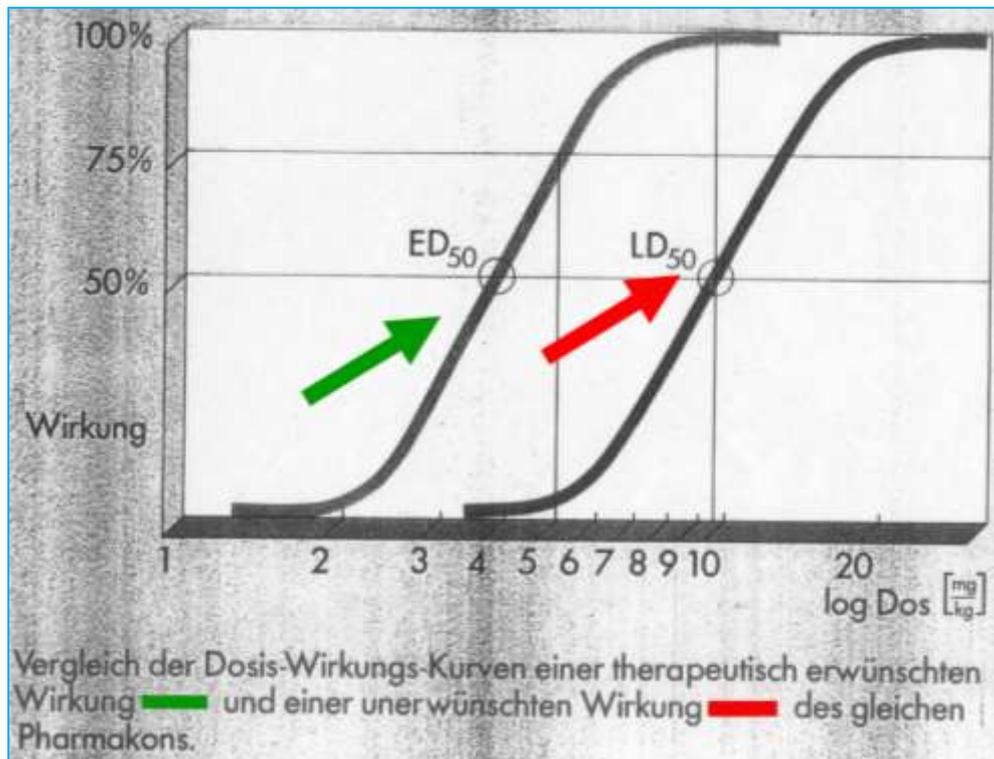


Abb. 136: DOSIS-WIRKUNG-BEZIEHUNG

„DOSIS-WIRKUNGS-KURVEN SOLLEN HINSICHTLICH MÖGLICHT VIELER WIRKUNGEN DEN BEREICH ZWISCHEN MAXIMALEFFEKT UND UNWIRKSAMKEIT ABDECKEN“

TEXTQUELLE UND BILDQUELLE: EUROPEAN REGISTERED TOXICOLOGIST (ERT) HUBER, WOLFGANG: VO TOXIKOLOGIE FÜR MEDIZINER UND NATURWISSENSCHAFTLER. SKRIPTUM 1 – TEIL 3 (CHARAKTERISTIK DER GIFTWIRKUNG). TOXIKOLOGIE – EINFÜHRUNG. WINTERSEMESTER 2019/2020. SEITEN 54 f.

LEGENDEN

L = LETHAL (TOD)

T = TOXIC (FÜR UNERWÜNSCHTE EFFEKTE)

E = EFFECTIVE (FÜR ALLE, MEIST ERWÜNSCHTE EFFEKTE)

D = DOSE

C = CONCENTRATION

²⁰⁷ Nachzitiert von dem *European Registered Toxicologist* (ERT) Huber, Wolfgang: *VO Toxikologie für Mediziner und Naturwissenschaftler*. Skriptum 1 – Teil 3 (Charakteristik der Giftwirkung). Toxikologie – Einführung. Wintersemester 2019/2020.

²⁰⁸ Ebd.

²⁰⁹ Ebd.

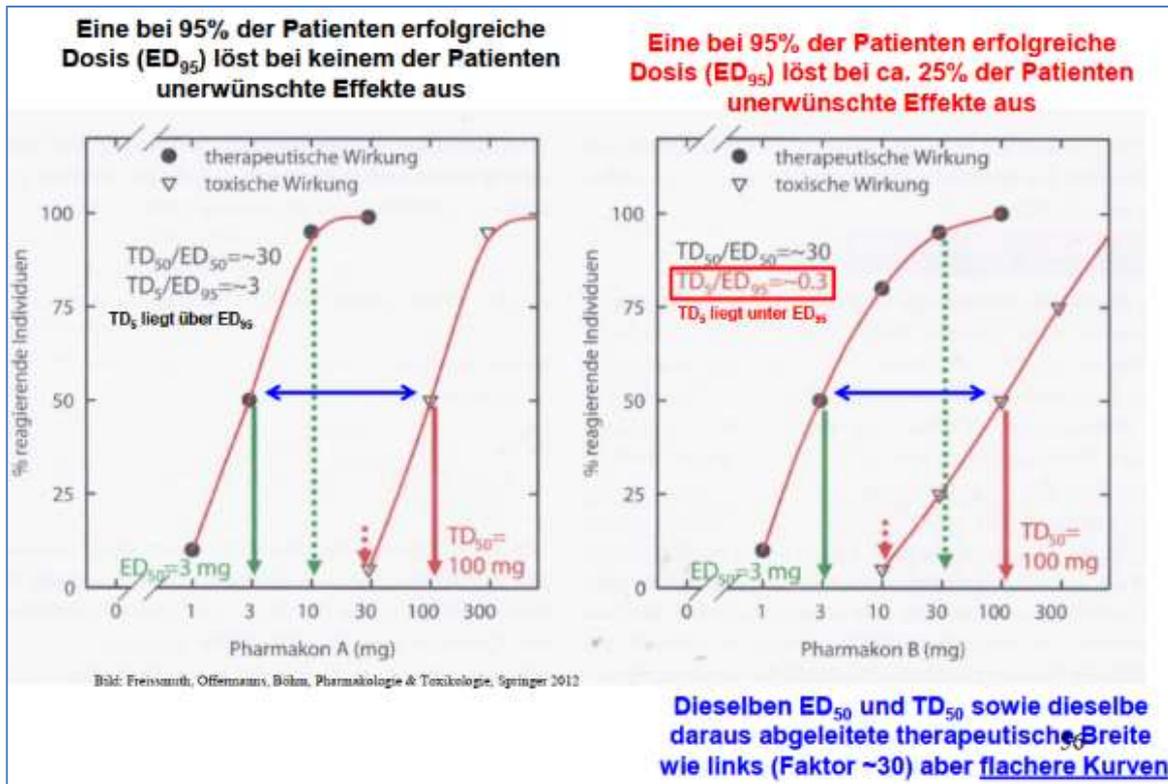


Abb. 137: WENN MAN (FAST) ALLE PATIENTEN ERFOLGREICH BEHADELN MÖCHTE, DARF MAN SICH NICHT NUR AUF DIE THERAPEUTISCHE BREITE BEI DER ED_{50} UND TD_{50} VERLASSEN

TEXTQUELLE UND BILDQUELLE: EUROPEAN REGISTERED TOXICOLOGIST (ERT) HUBER, WOLFGANG: VO TOXIKOLOGIE FÜR MEDIZINER UND NATURWISSENSCHAFTLER. SKRIPTUM 1 – TEIL 3 (CHARAKTERISTIK DER GIFTWIRKUNG). TOXIKOLOGIE – EINFÜHRUNG. WINTERSEMESTER 2019/2020. SEITEN 56

Die Dosisabhängigkeiten sind im Allgemeinen (vgl. Huber 2019, 7)²¹⁰:

- Die Wirksame Dosis (unterscheide: äußere und innere Dosis).
- Einwirkungsdauer.
- Wirkort.
- Expositionswahrscheinlichkeit.
- Individueller Empfindlichkeit.

Es soll darauf hingewiesen, dass **Dosis**²¹¹ nicht **Konzentration**²¹² ist!

„Die Bestimmung sogenannter Dosis-Wirkungs-Kurven ist wichtig für den eindeutigen Nachweis von Schutz oder Giftwirkungen eines Stoffes und für die praktische Abschätzung des Umgangs mit einem solchen Stoff“ (Huber 2019, 52)²¹³.

²¹⁰ Ebd.

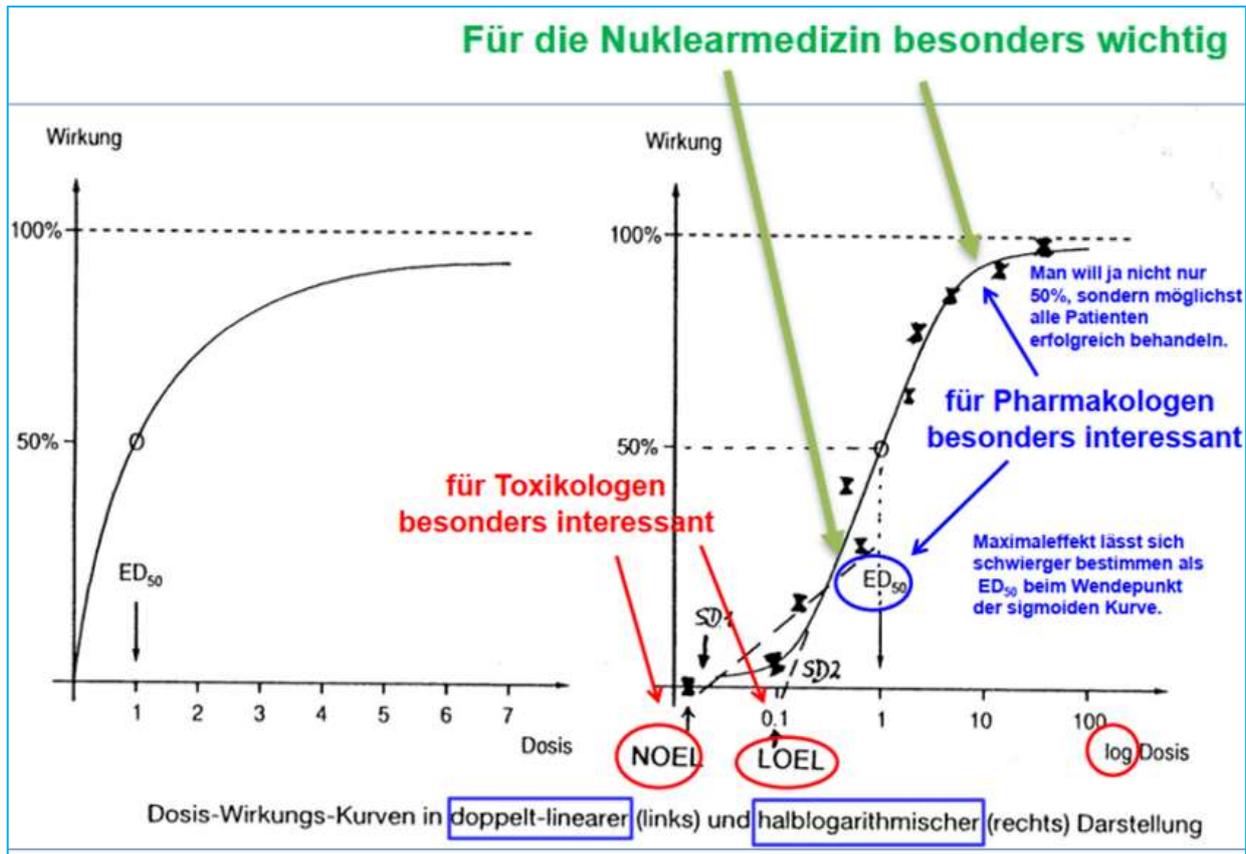
²¹¹ Wie zum Beispiel: Äquivalentdosis, Energiedosis, Ionendosis.

Das wurde bereits ausführlich in Überschrift **KURZZUSAMMENFASSENDE DEFINITIONEN ZUM THEMA PET UND SPECT** behandelt.

²¹² Wie zum Beispiel:

- Massenkonzentration oder Partialdichte: $\rho = m/V$ [kg/m³] oder [kg/l].
- Stoffmengenkonzentration (früher auch Molarität): $c = n/V$ [mol/m³] oder [mol/l].

²¹³ Ebd.



- Gibt es einen Schwellenwert für eine Wirkung bei der Erstellung von Dosis-Wirkungs-Kurven (Abb. 135 ff.) und wo liegt er?

LO(A)EL: LOWEST OBSERVED (ADVERSE) EFFECT LEVEL IST DIE NIEDRIGSTE DOSIS, BEI DER EIN BESTIMMTER EFFEKT NOCH BEOBACHTET WURDE (SIEHE ABBILDUNG OBEN).

NO(A)EL: NO-OBSERVED (ADVERSE) EFFECT LEVEL IST DIE HÖCHSTE DOSIS, BEI DER EIN BESTIMMTER EFFEKT NICHT BEOBACHTET WURDE (SIEHE ABBILDUNG OBEN).

„Ein etwaiger Schwellenwert, der nicht direkt bestimmbar ist, würde dabei zwischen **NOEL** und **LOEL** liegen. Bei geringer Verfügbarkeit von Daten können aber **NOEL** und **LOEL** sehr weit auseinander liegen“ (Huber 2019, 70)²¹⁴.

²¹⁴ Ebd.

BENCHMARK DOSE (BMD) APPROACH : KEY CONCEPT

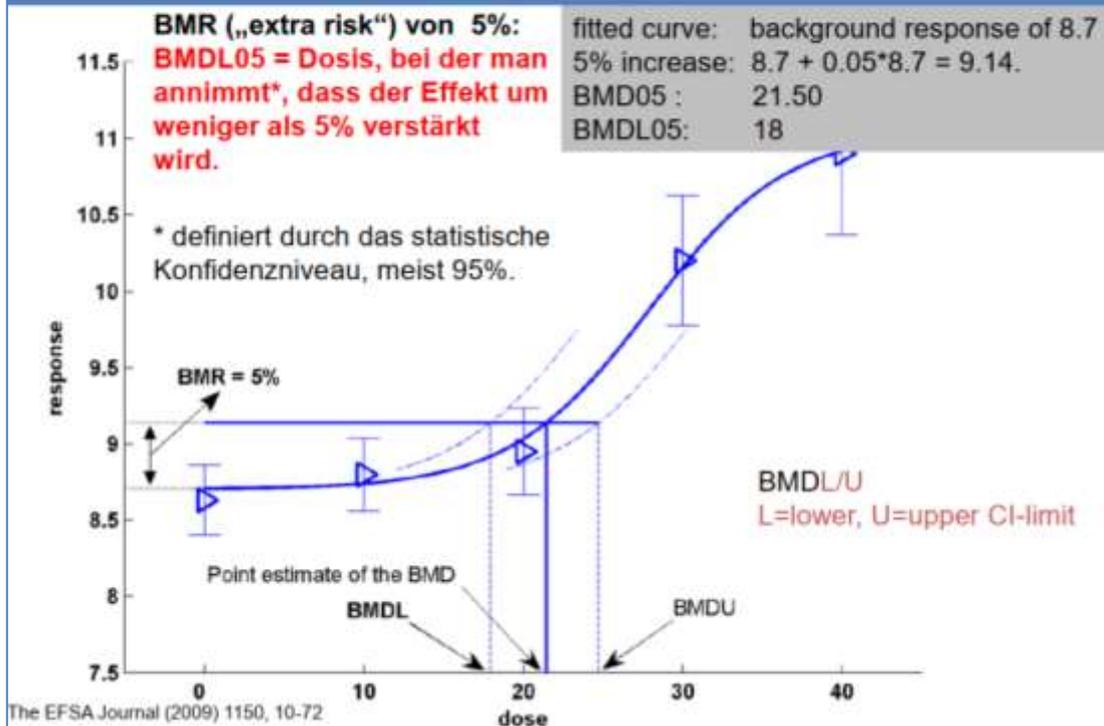


Abb. 139: BMD vs. NOAEL

BILDQUELLE: EUROPEAN REGISTERED TOXICOLOGIST (ERT) HUBER, WOLFGANG: VO TOXIKOLOGIE FÜR MEDIZINER UND NATURWISSENSCHAFTLER. SKRIPTUM 1 – TEIL 3 (CHARAKTERISTIK DER GIFTWIRKUNG) TOXIKOLOGIE – EINFÜHRUNG. WINTERSEMESTER 2019/2020. SEITE 81

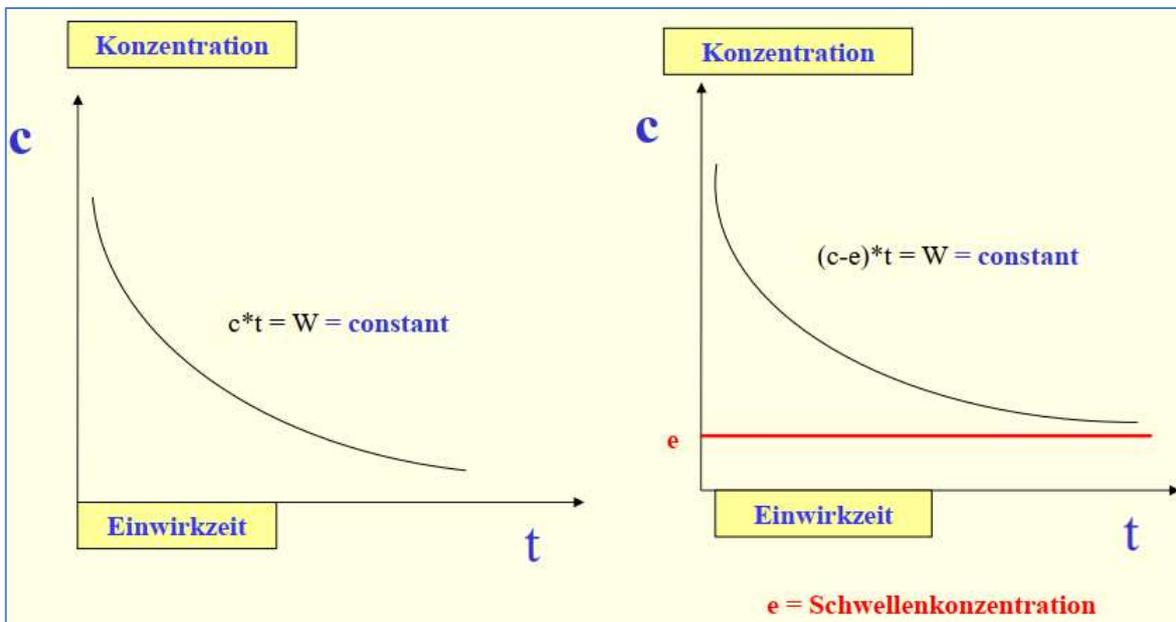
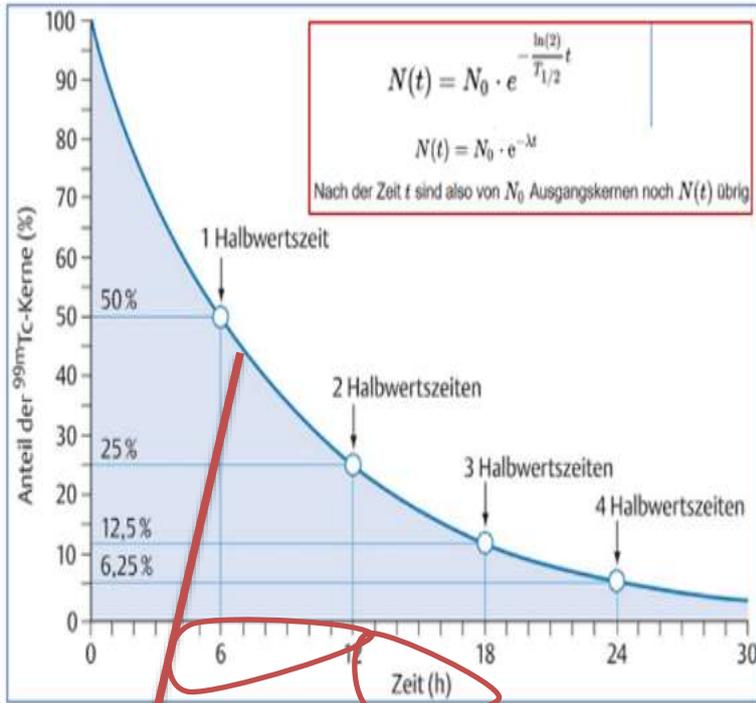


Abb. 138: DIE HABER'SCHE REGEL BERUHT AUF DIE EINWIRKUNGSZEIT T UND DIE KONZENTRATION C AM WIRKORT DER IN DEN KÖRPER INJIZIERTEN SUBSTANZ
 NACH DEM THEMA VORLIEGENDER ARBEIT: RADIOAKTIVE SUBSTANZEN ¹⁸F UND ^{99m}Tc
 (HUBER 2019, 84)

Nun zurück zu den Fragen der *Pharmakokinetik* und der *Pharmakodynamik*:

- Was macht der Körper mit der Substanz (Fremdstoff)? *Pharmakokinetik*!
- Was macht der Fremdstoff oder die Substanz mit dem Körper? *Pharmakodynamik*!



Nach dem Gegenstand dieser Abhandlung handelt es sich um die radioaktiven Fremdstoffe (Substanzen) ^{18}F und $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

In der *Pharmakokinetik* ist die Applikation (z. B. $^{99\text{m}}\text{Tc}$) der radioaktiven Substanzen für die nuklearmedizinischen Behandlung (Diagnostik) bewusst erwünscht. Die **Dosis** bei der intravenösen Applikation (Injektion) ist kontrolliert (Abb. 140).

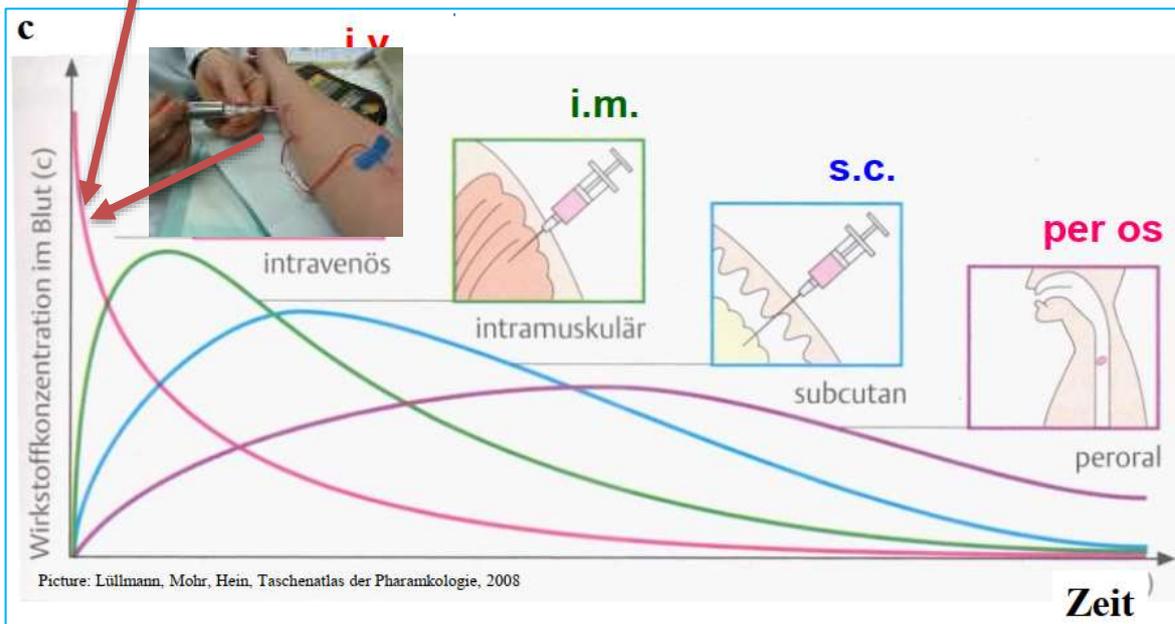


Abb. 140: BLUTSPIEGEL BEI DER INTRAVENÖSEN INJEKTION (i. v.) VON RADIOAKTIVER SUBSTANZ IM VERGLEICH MIT ANDEREN TYPEN PARENTERALER (i. m. UND s. c.) UND ENTERALER GABE (PERORAL). DER KURVENVERLAUF ENTSPRICHT DEM ZERFALLGESETZ DER RADIOAKTIVEN SUBSTANZEN. BILDQUELLE: EUROPEAN REGISTERED TOXICOLOGIST (ERT) HUBER, WOLFGANG: VO TOXIKOLOGIE FÜR MEDIZINER UND NATURWISSENSCHAFTLER. SKRIPTUM 2 – TEIL TOXIKOKINETIK (CHARAKTERISTIK DER GIFTWIRKUNG) TOXIKOLOGIE – EINFÜHRUNG. WINTERSEMESTER 2019/2020 (HUBER 2019, 56).

Folgende individuelle Faktoren müssen berücksichtigt werden, die die Toxikokinetik beeinflussen:

- Krankheiten (v. a. Ausscheidungsorgane).
- Höheres Alter (Exkretionsfähigkeit und Gesamtkörperwasser nehmen ab).
- Schwangerschaft.
- Säuglingsalter.

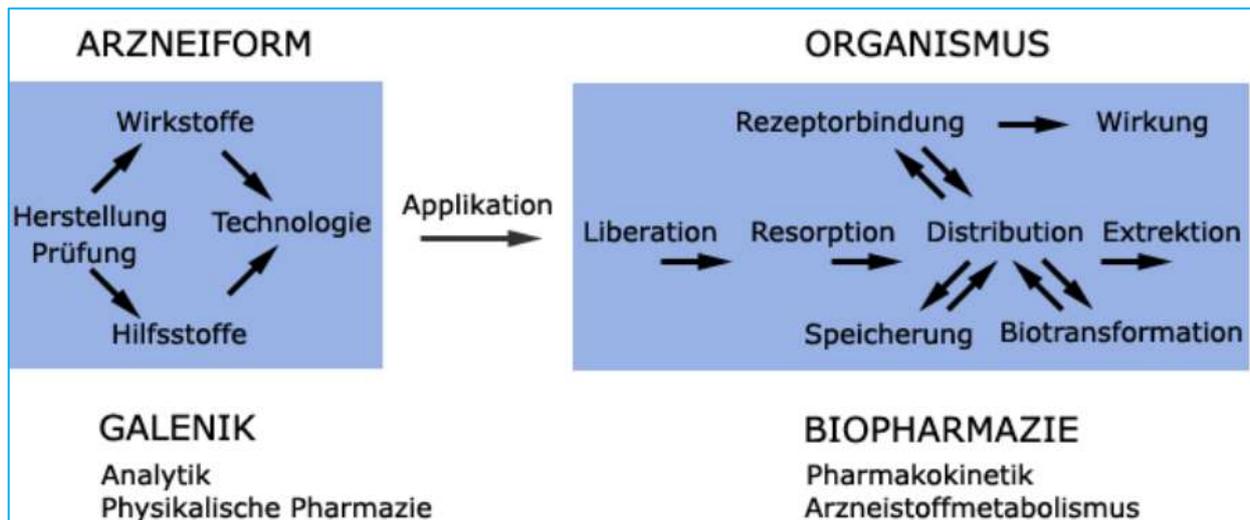


Abb. 141: APPLIKATION VON SUBSTANZ IN DEN ORGANISMUS
BILDQUELLE:

WWW.CHEMGAPEDIA.DE/VSENGINE/VLU/VSC/DE/CH/13/VLU/KINETIK/PHARMAKOKINETIK/PHARMAKO_GRUNDLAGEN.VLU/PAGE/VSC/DE/CH/13/PC/KINETIK/PHARMAKOKINETIK/GRUNDLAGEN/LADME.VSCML.HTML
ZUGANG AM 16.02.2021

Die fünf Phasen der Pharmakokinetik, **LADME** Schema, werden kurz dargestellt:

1. **Liberation** (Befreiung, Freisetzung, Entfernung, Entlastung): In englischem Sprachraum wird *Liberation* auch *drug release* genannt (Abb. 135 – 141). Das ist die Freisetzung von festen oder flüssigen durchgreifenden arzneischen Medikamenten, die die Geschwindigkeit und die Ausbreitung der Resorption sowie die Disponibilität und die Konzentration des Arzneistoffes erheblich steuern (vgl. Gauglitz et al.)²¹⁵.
2. **Absorption** (Aufnahme, Resorption): Radiopharmaka (Abb. 140) werden intravenös (direkt ins Blutkreislaufsystem), intramuskulär (direkt in den Muskeln), subkutan (unter der Haut) oder peroral (Aufnahme der Arzneistoffe

²¹⁵ Gauglitz, Guenter und Reichert, Manuela: *Pharmakokinetik. Begriffe und Grundlagen*.

Textquelle online abrufbar unter:

www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/kinetik/pharmakokinetik/pharmako_grundlagen.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/kinetik/pharmakokinetik/grundlagen/ladme.vscml.html
(Zugang am 16.02.2021).

durch Mund-Ösophagus-Magen-Verdauungstrakt) verabreicht (vgl. Steiner 2015, 1)²¹⁶.

3. **Distribution (Verteilung):** „Die Verteilung im Organismus erfolgt durch Bindung an Erythrozyten und Serumproteine, Diffusion oder aktive biochemische Transportvorgänge. Durch gezieltes Koppeln an eine geeignete Trägersubstanz erhöht sich dessen Selektivität. Man nützt bei der nuklearmedizinischen Anwendung die Affinität oder Anreicherungsneigung des Radiopharmakons zu bestimmten Organen oder Krankheitsprozessen ... Als stellvertretendes Beispiel für eine Diagnose mit einem **PET** Radiopharmakon eignet sich das weitaus am Häufigsten verwendete [18-F]FDG (2-[18-F]Fluor-2-desoxy-D-glucose). Es verteilt sich nach der i. v. Verabreichung vorerst homogen im Körper und reichert sich v. a. im Gewebe mit einem erhöhten Glucosebedarf an. Schnell wachsende Zellen, wie Tumorzellen haben einen erhöhten Glucosebedarf und somit dient dieser Mechanismus als Tumormarker. Eine vielversprechende Rolle der FDG-Positronen-Emissions-Tomografie (**PET**) konnte bereits bei verschiedenen Tumoren nachgewiesen werden. Für die Herstellung eines Radiotherapeutikums wird, nicht nur für die Diagnose, sondern auch für die Therapie, ein geeignetes Radionuklid an eine Trägersubstanz gekoppelt und in die Blutbahn injiziert. Durch seine spezifische biologische Affinität zum Rezeptor, auf der Tumeroberfläche, gelangt das mitgeführte Radionuklid direkt zum Tumorgewebe, welches mittels direkter Bestrahlung zerstört wird“ (Steiner 2015, 1)²¹⁷.
4. **Metabolism (Metabolismus):** körpereigener und körperfremder Stoffwechsel im Organismus. Radiopharmaka werden nach der Verabreichung und der Verteilung im menschlichen Körper (Absorption) durch biochemisch-metabolische Prozesse umgewandelt, wie u. a. in der Leber und im Verdauungstrakt (vgl. Steiner 2015, 1)²¹⁸. „Dieser Prozess wird auch als Biotransformation bezeichnet. Beim ersten Durchgang durch die Leber werden viele Arzneistoffe so tiefgreifend in ihrer Struktur verändert, dass sie ihre Wirksamkeit teilweise total einbüßen. Die Produkte dieser Biotransformation,

²¹⁶ Steiner, Britta: *Transfer und Etablierung verschiedener Analysemethoden zur Qualitätskontrolle von PET-Tracern nach Radiosynthese mittels Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC)*. Diplomarbeit, Universität Wien. Fakultät für Lebenswissenschaften 2015.

²¹⁷ Ebd.

²¹⁸ Ebd.

die Metabolite, können unter Umständen noch wirksamer und/oder toxischer als die Ausgangsverbindungen sein“ (Gauglitz et al.)²¹⁹.

5. **Excretion** (Ausscheidung): Abbau, Absonderung und Entfernung von Radiopharmaka aus dem Körper als metabolischen Abfallprodukte entstehen über Darm, Lungen, Speicheldrüsen, Hautdrüsen,

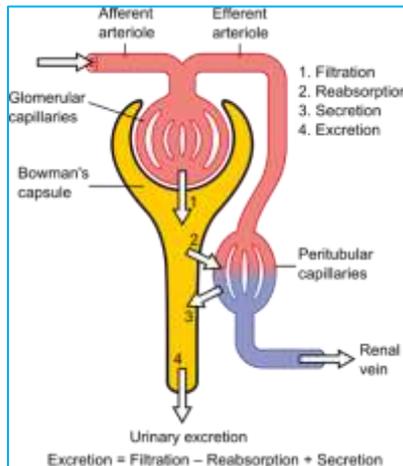


Abb. 143: AUSSCHIEDUNGSFUNKTION DER NIERE

²¹⁹ Gauglitz, Guenter und Reichert, Manuela: *Pharmakokinetik. Begriffe und Grundlagen*.

Textquelle online abrufbar unter:

www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/kinetik/pharmakokinetik/pharmako_grundlagen.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/kinetik/pharmakokinetik/grundlagen/ladme.vscml.html (Zugang am 16.02.2021).

²²⁰ Bildquelle: <https://www.wissen.de/medizin/verdauungstrakt> (Zugang am 16.02.2021).

²²¹ Gauglitz, Guenter und Reichert, Manuela: *Pharmakokinetik. Begriffe und Grundlagen*.

Textquelle online abrufbar unter:

www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/kinetik/pharmakokinetik/pharmako_grundlagen.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/kinetik/pharmakokinetik/grundlagen/ladme.vscml.html (Zugang am 16.02.2021).

²²² Steiner, Britta: *Transfer und Etablierung verschiedener Analysemethoden zur Qualitätskontrolle von PET-Tracern nach Radiosynthese mittels Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC)*. Diplomarbeit, Universität Wien. Fakultät für Lebenswissenschaften 2015.

²²³ Bildquelle:

https://www.wikiwand.com/de/Glomerul%C3%A4re_Filtrationsrate (Zugang am 16.02.2021).

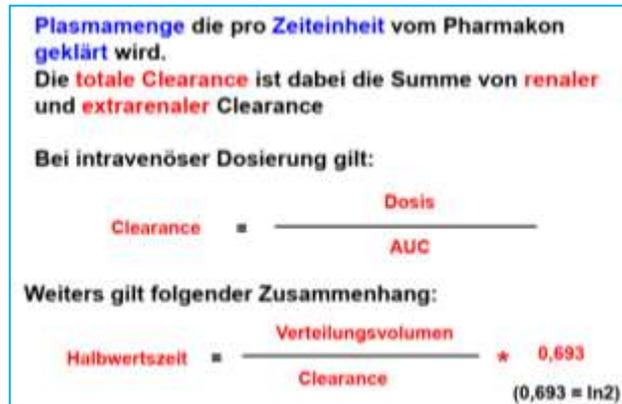


Abb. 142: CLEARANCE

BILDQUELLE: HUBER 2019, 159

Brustdrüsen, Galle und Nieren (Abb. 143 – 144)²²⁰ (vgl. Steiner 2015, 1 und Gauglitz et al.)^{221 222}.

Ausscheidungsfunktion der Niere (Abb. 143)²²³:

- Glomeruläre Filtration
- Tubuläre Rückresorption
- Tubuläre Sekretion

Die Ausscheidung einer Substanz aus dem Körpersystem wird *Clearance* (aus dem Englischen: *Freigabe*) genannt (Abb. 142).

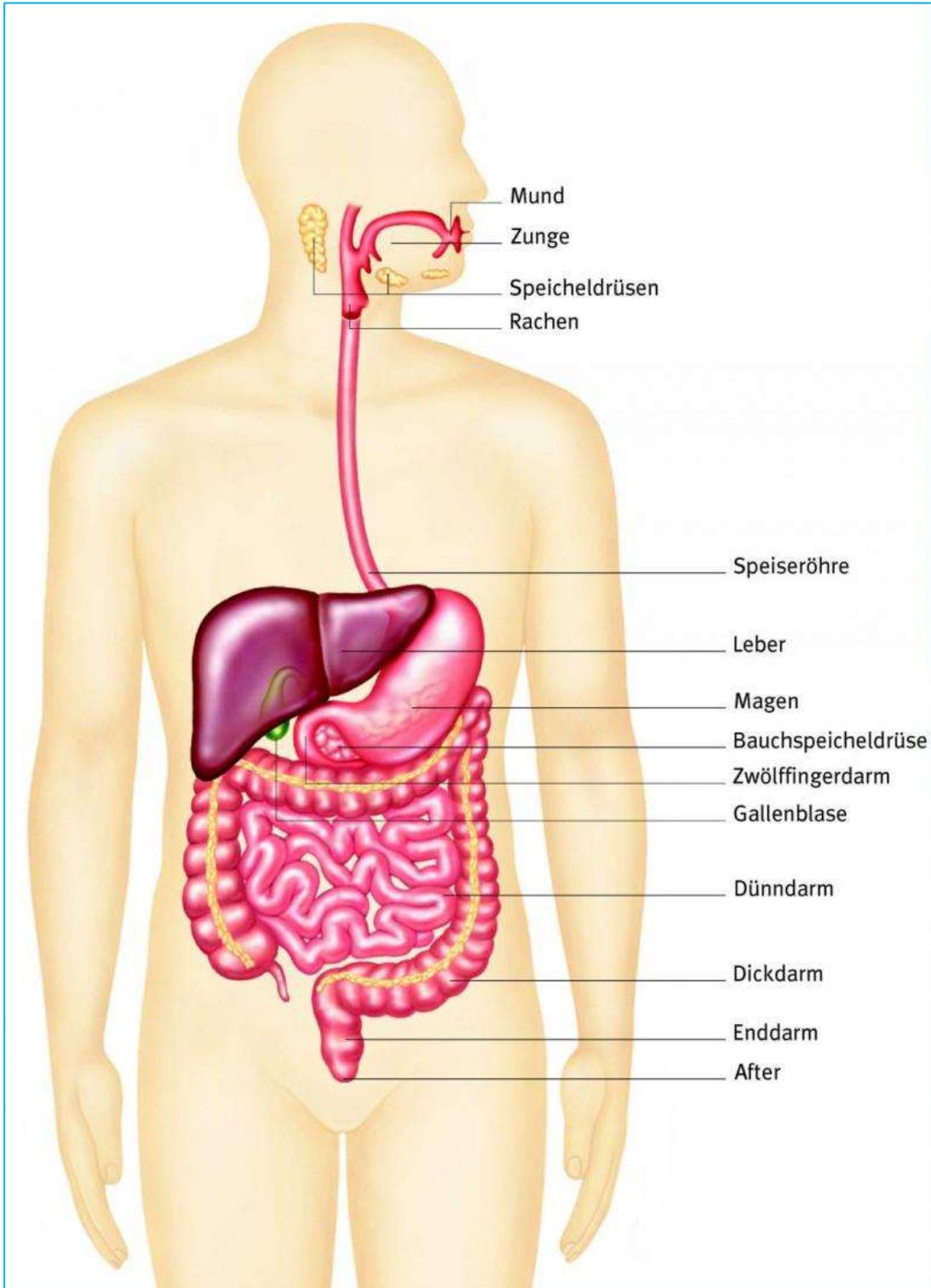


Abb. 144: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VERDAUUNGSTRAKTES

BILDQUELLE: <https://www.wissen.de/medizin/verdauungstrakt> (Zugang am 12.02.2021)

Geschätzte absorbierte Strahlungsdosen nach intravenöser Verabreichung von 2-Desoxy-2- [18F] fluor-D-Glucose, [18F] FDG an einen 70 kg schweren Patienten

Quelle: <https://orthopaedie-innsbruck.at/fludeoxyglucose-3607> (Zugang am 10.02.2022)

Organ	MgY / 185 MBq	Rads/5mCi	mGy / 370 MBq	rads/10mCi
Blasenwand	31.45	3.15	62,90	6.29
Blase*	11.00 Uhr	1.10	22.00 Uhr	2.20
Blase**	22.00 Uhr	2.20	44.00	4.40
Herz	12.03	1,20	24.05	2.41
Gehirn	4.81	.48	9.62	0,96
Nieren	3,88	0,39	7.77	0,78
Gebärmutter	3,70	3.7	7.40	0,74
Eierstöcke	2,78	0,28	5.55	0,56
Testis	2.78	0,28	5.55	0,56
Nebennieren	2.59	0,26	5.18	0,52
Sm Darm	2.40	0,24	4.81	0,48
ULI Wand	2.40	0,24	4.81	0,48
LLI Wand	2,96	0,30	5.92	0,59
Magenwand	2.22	0,22	4.44	0,44
Leber	2.22	0,22	4.44	0,44
Pankreas	2.22	0,22	4.44	0,44
Milz	2.22	0,22	4.44	0,44
Brust	2,04	0,20	4.07	0,41
Lunge	2,04	0,20	4.07	0,41
Rotes Mark	2,04	0,20	4.07	0,41
Anderes Gewebe	2,04	0,20	4.07	0,41
Knochenoberflächen	1,85	0,18	3,70	0,37
Schilddrüse	1,70	0,18	3.59	0,36

* Mit Leere 1 Stunde nach der Verabreichung ** Mit Leere 2 Stunden nach der Verabreichung.

Das effektive Dosisäquivalent [18F] FDG (Erwachsener) 2 beträgt 0,027 mSv / MBq.

¹Jones, S. C., Alavi, A., Christman, D., Montanez, I., Wolf, A. P. und Reivich, M. (1982). Die Strahlendosismetrie von 2-F-18-Fluor-2-desoxy-Dglucose beim Menschen. J. Nucl. Med. 23, 613 & ndash; 617.

²ICRP Publication 53, Band 18, Nr. 1-4, 1987, Seite 76.

Äquivalentdosis Sievert

- Rolf Sievert, schwed. Mediziner und Physiker
- Maßeinheit für **biologisch gewichtete** Strahlungsdosen.
- Einheitszeichen: Sv
- Häufige Angaben in Sv, mSv, µSv, nSv
- In SI Einheiten 1 Sv = 1 J/kg
- 100 Rem (roentgen equivalent in man) = 1 Sv

Grenz- und Leitwerte

- durchschnittliche Belastung für Bundesbürger ~4 mSv
- Jahresgrenzwert für Bundesbürger (gesetzl.) 1 mSv
- Jahresgrenzwert für strahlenexponierte Personen (Europa) 20 mSv
- Schwellenwert für akute Strahlenschäden ~100 mSv
- Jahresdosis Strand Guarapari, Brasilien (höchste natürliche Strahlenbelastung) max. Deutschland (im Freien) 1,58 mSv
- Max. Berufslebenszeitdosis strahlenexponierte Personen (Europa) 400 mSv
- LD₅₀ binnen 30 Tagen 5 Sv
- tödliche Dosis 7 Sv



Radioaktivität Strahlenschutz Grenzwerte



Quelle: https://archiv.bge.de/archiv/www.endlager-morsleben.de/SharedDocs/Downloads/Morsleben/DE/fachinfo/150915-vortrag-brauer-radioaktivitaet-strahlenschutzcf13.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Zugang am 10.02.2022)

LITERATUR

- Beckert, Kerstin: PET und SPECT. Diagnose in der Nuklearmedizin. Textquelle online verfügbar unter:
<s://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/radiopharmaka/pet-und-spect/>
(Zugang am 12.02.2021).
- Becquerel, Henri Antoine: Becquerelstrahlen. In: Brockhaus' Kleines Konversations-Lexikon. 5. Auflage. Band 1, F. A. Brockhaus, Leipzig 1911, S. 171. Text online abrufbar unter:
<http://images.zeno.org/Brockhaus-1911/K/big/brockh-1911-011-0171.png>
(Zugang am 05.01.2021).
- Becquerel, Henri Antoine: Becquerelstrahlen. In: Meyers Großes Konversations-Lexikon. 6. Auflage. Band 2, Bibliographisches Institut, Leipzig/Wien 1905, S. 541 – 542.
Text online abrufbar unter: <http://www.zeno.org/Meyers-1905/K/meyers-1905-002-0541> (Zugang am 05.01.2021).
- Becquerel, Henri Antoine: Émission de radiation nouvelles par l'uranium métallique. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 1086 – 1088.
- Becquerel, Henri Antoine: Influence d'un champ magnétique sur le rayonnement des corps radio-actifs. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 129, 1899, S. 996 – 1001.
- Becquerel, Henri Antoine: Recherches sur les rayons uraniques. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 124, 1897, S. 438 – 444.
- Becquerel, Henri Antoine: Recherches sur une Propriété Nouvelle de la Matière. Mémoires de l'Académie des Sciences. Band 46, Fermin-Didot, Paris 1903.
- Becquerel, Henri Antoine: Sur diverses propriétés des rayons uraniques. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 123, 1896, S. 1086 – 1088.
- Becquerel, Henri Antoine: Sur la loi de la décharge dans l'air de l'uranium électrisé. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 124, 1897, S. 800 – 803.
- Becquerel, Henri Antoine: Sur le rayonnement de l'uranium et sur diverses propriétés physiques du rayonnement des corps radio-actifs. In: Rapports présentés au Congrès international de physique réuni à Paris en 1900 sous les

- auspices de la Société française de physique. Band 3, Gauthier-Villars, Paris 1900, S. 47 – 78.
- Becquerel, Henri Antoine: Sur les propriétés différentes des radiations invisibles émises par les sels d'uranium, et du rayonnement de la paroi anticathodique d'un tube de Crookes. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 762 – 767.
 - Becquerel, Henri Antoine: Sur les radiations émises par phosphorescence. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 420 – 421.
 - Becquerel, Henri Antoine: Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 501 – 503.
 - Becquerel, Henri Antoine: Sur les radiations invisibles émises par les sels d'uranium. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 689 – 694.
 - Becquerel, Henri Antoine: Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles émises par divers corps phosphorescents. In: Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Band 122, 1896, S. 559 – 564.
 - Bland, William H.: Ben Cassen and the development of the rectilinear scanner. In: Seminars in Nuclear Medicine, Elsevier Volume 26, Issue 3, July 1996, Pages 165 – 170. Text online abrufbar unter:
<https://www.sciencedirect.com/science/article> (Zugang am 14.02.2021).
 - Bohr, Niels: On the constitution of atoms and molecules I. In: Philosophical Magazine 26, 1 (1913). S. 1 – 24.
 - Bohr, Niels: On the constitution of atoms and molecules II. Philosophical Magazine 26 (1913). S. 476 – 502.
 - Chadwick J.: Possible Existence of a Neutron. In: Nature, Ausgabe Februar 27, 1932. Text online abrufbar unter:
<http://web.mit.edu/22.54/resources/Chadwick.pdf> (Zugang am 07.10.2020).
 - Compton, Arthur H.: *A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements*. In: Physical Review. Band 21, Nr. 5, 1923, S. 483 – 502.
 - Compton, Arthur H.: *Secondary Radiations produced by X-rays and some of their applications to physical problems*. In: Bulletin of the National Research Council. Band 20, 1922, S. 10.

- Curie, Pierre; Curie, Marie; Bémont, Gérard: Sur une nouvelle substance fortement radio-active contenue dans la pechblende. In: Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Band 127, 1898, S. 1215 – 1217. Text online abrufbar unter:
<https://archive.org/stream/surunesubstances127curi#page/1214/mode/2up/search/curie> (Zugang am 05.01.2021).
- Diehl, Johannes Friedrich: Radioaktivität in Lebensmitteln. John Wiley und Sons, 2008.
- Einstein, Albert: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung von Licht betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. In: Annalen der Physik 17 (1905), 132–148.
- Fajans, Kasimir: Die radioaktiven Umwandlungen und das periodische System der Elemente. In: Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft. Nr. 46, 1913, S. 422 – 439.
- Gauglitz, Guenter und Reichert, Manuela: Pharmakokinetik. Begriffe und Grundlagen. Textquelle online abrufbar unter:
www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/kinetik/pharmakokinetik/pharmako_grundlagen.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/kinetik/pharmakokinetik/grundlagen/ladme.vscml.html (Zugang am 16.02.2021).
- Huber, Wolfgang: VO Toxikologie für Mediziner und Naturwissenschaftler. Skriptum, Wintersemester 2019/2020.
- Krieger, Hanno: Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes. Heidelberg: Springer 2019.
- Krieger, Hanno: Strahlungsquellen für Technik und Medizin. Berlin und Heidelberg: Springer 2017.
- Lenard, Philipp Eduard Anton von: Ueber Katodenstrahlen in Gasen von atmosphärischem Druck und im äussersten Vacuum. In: Annalen der Physik und Chemie, Hrsg. G. u. E. Wiedemann, gegr. v. Poggendorf, Bd. 51, Heft 2, S. 225 – 267, Leipzig 1894.
- Marsden, Ernest and Geiger, Hans: On a Diffuse Reflection of the α -Particles. Proceedings of the Royal Society 82A (1909). S. 495 – 500.
- Marsden, Ernest and Geiger, Hans: The Laws of Deflexion of a Particles through Large Angles. Philosophical Magazine 25 (1913). S. 604 – 623.

- Masson, David Orme: The Constitution of Atoms. In: The Philosophical Magazine, Vol 41 (1921), S. 281 – 285.
- McClain, Demetrius: Positronenemission. In: LEXIKON DER PHYSIK. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1998. Online abrufbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/positronenemission/11552> (Zugang am 22.12.2020).
- Meyer, Stefan; Schweidler, Egon; Giesel, Friedrich Oskar: Ueber die Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen im magnetischen Felde. in: Annalen der Physik und Chemie. 1899, 69: S. 834 – 836.
- Perrier, Carlo; Segrè, Emilio (1947): Technetium: The Element of Atomic Number 43. Nature. 159 (4027): 24.
- Peter, Jörg: Single Photon Emission Computer Tomography. In: Schlegel, Wolfgang; Karger, Christian und Jäkel, Oliver (Herausgeber): Medizinische Physik. Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik. Heidelberg: Springer 2018.
- Pire, Bernard: Découverte de la radioactivité naturelle. Text online abrufbar unter: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/decouverte-de-la-radioactivite-naturelle/> (Zugang am 26.09.2020).
- Planck, Max Karl Ernst Ludwig: *Über irreversible Strahlungsvorgänge*. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. 1899 - Erster Halbband (Verl. d. Kgl. Akad. d. Wiss., Berlin 1899). Seiten 479 – 480. Text online abrufbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19003060105> (Zugang am 30.11.2020).
- Planck, Max Karl Ernst Ludwig: *Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung*. In: *Verhandl. Dtsch. Phys. Ges.* Band 2, 1900, S. 202 – 204. Text online abrufbar unter: http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/historic-papers/1896_294_662-669.pdf (Zugang am 30.11.2020).
- Planck, Max Karl Ernst Ludwig: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*. In: *Verhandl. Dtsch. Phys. Ges.* Band 2, 1900, S. 237 – 245. Text online abrufbar unter:

<https://archive.org/stream/verhandlungende01goog#page/n246/mode/2up>
(Zugang am 30.11.2020).

Text online abrufbar unter:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19013090310>

(Zugang am 30.11.2020).

- Planck, Max Karl Ernst Ludwig: *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*. In: *Ann. Phys.* Band 4, Nr. 3, 1901, S. 553 – 563.

Text online abrufbar unter:

<https://archive.org/stream/verhandlungende01goog#page/n212/mode/2up>

(Zugang am 30.11.2020).

Text online abrufbar unter:

<https://ia802605.us.archive.org/11/items/verhandlungende01goog/verhandlungen.pdf> (Zugang am 30.11.2020).

Text online abrufbar unter:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19013090310>

(Zugang am 30.11.2020).

- Poljanc, Karin: Skriptum Strahlenphysik, Strahlenschutz, Dosimetrie und nukleare Sicherheit. Lehrveranstaltung an der TU Wien 2019.
- Prout, William: Correction of a Mistake in the Essay on the Relation between the Specific Gravities of Bodies in their Gaseous State and the Weights of their Atoms. *Annals of Philosophy* 7 (1816). S. 111 – 113.
- Prout, William: On the Relation between the Specific Gravities of Bodies in their Gaseous State and the Weights of their Atoms. *Annals of Philosophy* 6 (1815). S. 321 – 330.
- Rose, H. J.; Jones, G. A.: A new kind of natural radioactivity. In: *Nature*. Band 307, Nummer 5948, 19. Januar 1984, S. 245 – 247.
- Rutherford, Ernest and Brooks, Harriet: Comparison of the Radiations from Radioactive Substances. In: *Philosophical Magazine*. 6. Folge, Band 4, Nummer 19, 1902, S. 1 – 23.
- Rutherford, Ernest and Geiger, Hans: The probability variations in the distribution of α -particles. In: *Philosophical Magazine*. Band 20, Nummer 118, 1910. S. 698 – 707.

- Rutherford, Ernest and Royds, Thomas: The Nature of the Alpha Particle from Radioactive Substances. In: Philosophical Magazine. ser 6, Band 17, 1909, S. 281 – 286.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: A Comparative Study of the Radioactivity of Radium and Thorium. In: Philosophical Magazine. 6. Folge, Band 5, Nummer 28, 1903, S. 445 – 457.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: Condensation of the Radioactive Emanations. In: Philosophical Magazine. 6. Folge, Band 5, Nummer 29, 1903, S. 561 – 576.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: The Cause and Nature of Radioactivity. – Part I. In: Philosophical Magazine. 6. Folge, Band 4, Nummer 21, 1902, S. 370–396.
- Rutherford, Ernest and Soddy, Frederick: The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium. In: Philosophical Magazine. 6. Folge, Band 5, Nummer 25, 1903, S. 177–187.
- Rutherford, Ernest: A Radio-active Substance emitted from Thorium Compounds. In: Philosophical Magazine. 5. Folge, Band 49, Nummer 296, 1900, S. 1 – 14.
- Rutherford, Ernest: Bakerian Lecture. Nuclear Constitution of Atoms. In: Proceedings of the Royal Society of London / A. 97, Nummer 686, 1920, S. 374 – 400.
- Rutherford, Ernest: Radioactivity produced in Substances by the Action of Thorium Compounds. In: Philosophical Magazine. 5. Folge, Band 49, Nummer 297, 1900, S. 161 – 192.
- Rutherford, Ernest: The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium. In: Philosophical Magazine. 6. Folge, Band 5, Nummer 25, 1903, S. 177.
- Rutherford, Ernest: The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. Philosophical Magazine. Series 6, 21 (May 1911). S. 669 – 688.
- Rutherford, Ernest: Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It. In: Philosophical Magazine. 5. Folge, Band 47, Nummer 284, 1899, S. 116.
- Rutherford, Ernest; Marsden, Ernest and Geiger, Hans: On a Diffuse Reflection of the α -Particles. Proceedings of the Royal Society 82A (1909). S. 495 – 500.

- Rutherford, Ernest; Marsden, Ernest and Geiger, Hans: The Laws of Deflexion of a Particles through Large Angles. Philosophical Magazine 25 (1913). S. 604 – 623.
- Săndulescu, Aureliu; Poenaru, Dorin N.; Walter Greiner: New type of decay of heavy nuclei intermediate between fission and α decay. In: Soviet Journal of Particles and Nuclei. Band 11, Nummer 6, 1980, S. 528 (= Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnoya Yadra. Band 11, 1980, S. 1334).
- Schwaiger, Markus: Professor David E. Kuhl verstorben. In: Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. am 20. Juni 2017. Text online abrufbar unter: www.nuklearmedizin.de/leistungen/news/newsdetail.php?newsId=229 (Zugang am 22.12.2020).
- Soddy, Frederick: The Radio Elements and the Periodic Law. In: Chem. News. Nr. 107, 1913, S. 97 – 99.
- Soddy, Frederick: The Radio Elements and the Periodic Law. In: Nature. Band 91, Nr. 2264, 20. März 1913, S. 57 – 58.
- Stefanovic, L.: Die Anfänge und die Entwicklung der diagnostischen Bildgebung in der Nuklearmedizin. Text online abrufbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov> (Zugang am 15.02.2021).
- Steiner, Britta: Transfer und Etablierung verschiedener Analysemethoden zur Qualitätskontrolle von PET-Tracern nach Radiosynthese mittels Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC). Diplomarbeit, Universität Wien. Fakultät für Lebenswissenschaften 2015.
- Stöcker, Horst: Taschenbuch der Physik Formeln, Tabellen, Übersichten herausgegeben. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer 2018.
- Sweet, William H.: The use of nuclear disintegration in the diagnosis and treatment of brain tumor. In: New England Journal of Medicine (1951). 245: 875 – 878.
- Sweet, William H.; Brownell, Gordon L.: Localization of brain tumors with positron emitter. In: Nucleonics XI (1953). S. 40 – 45.
Text online abrufbar unter: [techtalk53-9.pdf\(mit.edu\)](http://techtalk53-9.pdf(mit.edu)) (Zugang am 22.12.2020).
- Ter-Pogossian, Michael M. et al. (Michael E. Phelps, Edward J. Hoffman, Nizar A. Mullani): A Positron-Emission Transaxial Tomograph for Nuclear Imaging (PETT). In: Radiology. Band 114, Nr. 1, 1975, S. 89 – 98.

- Ter-Pogossian, Michael M. et al. (Michael E. Phelps, Edward J. Hoffman, Nizar A. Mullani): Application of Annihilation Coincidence Detection to Transaxial Reconstruction Tomography. In: J Nucl Med. Band 16, Nr. 3, 1. Februar 1975, S. 210 – 224.
- Trenn, Thaddeus J.: Rutherford on the Alpha-Beta-Gamma Classification of Radioactive Rays. Isis Bd. 67 (1976) S. 61ff. Online abrufbar unter: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/351545> (Zugang am 02.10.2020).
- Villard, Paul: On the chemical action of the X-rays. In: Philosophical Magazine. 5. Folge, Band 49, Nummer 297, 1900, S. 244.
- Villard, Paul: Sur la décharge des corps électrisés et la formation de l'ozone. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 125 – 127.
- Villard, Paul: Sur la discontinuité de l'émission cathodique. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 1750 – 1772.
- Villard, Paul: Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviés du radium. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 1010 – 1012.
- Villard, Paul: Sur le rayonnement du radium. In: Comptes rendus de l'Académie des sciences. Band 130, 1900, S. 1178 – 1179.
- Wiegrebe, W.: Technetium in der Diagnostik. Freisetzung von Technetium 99 (Tc-99) aus kerntechnischen Anlagen. Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/6354 vom 5.2.1990. In: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020).
- Wien, Wilhelm: Über positive Elektronen und die Existenz hoher Atomgewichte. In: Annalen der Physik. Band 318 (4), 1904, S. 669 – 677.

INTERNETZUGANG

- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19003060105> (Zugang am 30.11.2020).
- http://myweb.rz.uni-augsburg.de/~eckern/adp/history/historic-papers/1896_294_662-669.pdf (Zugang am 30.11.2020).
- <https://archive.org/stream/verhandlungende01goog#page/n246/mode/2up> (Zugang am 30.11.2020).

- https://de.m.wikibooks.org/wiki/Datei:DBP_1979_1019_Albert_Einstein_Lichtelektrischer_Effekt.jpg (Zugang am 20.02.2021).
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19013090310> (Zugang am 30.11.2020).
- <https://archive.org/stream/verhandlungende01goog#page/n212/mode/2up> (Zugang am 30.11.2020).
- <https://www.sciencephoto.com/media/222838/view/max-planck-and-albert-einstein> (Zugang am 21.02.2021).
- <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/planck/11303> (Zugang am 21.02.2021).
- <https://ia802605.us.archive.org/11/items/verhandlungende01goog/verhandlungen.pdf> (Zugang am 30.11.2020).
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19013090310> (Zugang am 30.11.2020).
- <https://www.frustfrei-lernen.de/chemie/das-periodensystem-der-elemente-chemie.html> (Zugang am 20.02.2021).
- <https://learnattack.de/schuelerlexikon/physik/compton-effekt> (Zugang am 19.02.2021).
- <https://www.weltderphysik.de/gebiet/materie/analyse-von-materialien/positronenspektroskopie/> (Zugang am 19.02.2021).
- <http://archive.org/stream/surunesubstancen127curi#page/n9/mode/2up> (Zugang am 26.09.2020).
- <http://display-magazin.net/thema/science/klassische-und-moderne-physik> (Zugang am 30.09.2020).
- <http://docplayer.org/27835688-Radiokaktivitaet-und-kernreaktionen.html> (Zugang am 07.10.2020).
- <http://images.zeno.org/Brockhaus-1911/K/big/brockh-1911-011-0171.png> (Zugang am 05.01.2021).
- <http://newlandsproject.com/Biographies/perrier.htm> (Zugang am 04.10.2020).
- <http://nuk.med.uni-rostock.de/>
- <http://prints.iiap.res.in/bitstream/handle/2248/1038/Royds.pdfweb.lemoyne.edu/~giunta/royds.html> (Zugang am 23.10.2020).
- <http://www.zeno.org/Meyers-1905/K/meyers-1905-002-0541> (Zugang am 05.01.2021).

- <https://archive.org/stream/surunesubstancen127curi#page/1214/mode/2up/search/curie> (Zugang am 05.01.2021).
- <https://beckerarchives.wustl.edu/VC265-S354-B16-i02> (Zugang am 26.09.2020).
- https://de.wikibooks.org/wiki/Physikalische_Grundlagen_der_Nuklearmedizin/_Kapitelzusammenfassungen (Zugang am 08.10.2020).
- https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Chemie (Zugang am 09.01.2021).
- https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Nobelpreisträger_für_Physik (Zugang am 07.10.2020).
- <https://deacademic.com/pictures/dewiki/80/Pichblende.jpg> (Zugang am 09.01.2021).
- <https://medizinphysik.wiki/physikalische-grundlagen/> (Zugang am 26.09.2020).
- <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Proton> (Zugang am 24.10.2020).
- https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Proton#cite_ref-15 (Zugang am 23.10.2020).
- <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Radioaktivität> (Zugang am 05.01.2021).
- https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Thomas_Royds (Zugang am 23.10.2020).
- <https://theconversation.com/the-science-of-medical-imaging-spect-and-pet-14086> (Zugang am 12.02.2021).
- <https://vanderbiltnuclearmedicine.com/era-2/path-a-nuclear-instrumentation-developments/> (Zugang am 22.12.2020).
- https://vetsuisse.com/vet-impl/lernmodule/htmls/print_all.html?radiosurfvet|radgeneral|radbi (Zugang am 30.09.2020).
- <https://web.physik.rwth-aachen.de/~stahl/Seminar/Behrens.pdf> (Zugang am 07.10.2020).
- https://wiki.fh-muenster.de/fb3/boesche/doku.php?id=public:mt_licht (Zugang am 30.09.2020).
- <https://www.bfs.de/SharedDocs/Glossareintraege/DE/M/millisievert.html> (Zugang am 12.02.2021).

- <https://www.br.de/service/programm/br-magazin/marie-curie-dokumentation-2016-13-100.html> (Zugang am 07.10.2020).
- https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegemedia/arbeitsgruppe+chemiedidaktik/radioaktivität_tc.pdf (Zugang am 10.10.2020).
- https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Antoine_Henri_Becquerel (Zugang am 26.09.2020).
- [https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Tracer_\(Nuklearmedizin\)](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Tracer_(Nuklearmedizin)) (Zugang am 15.02.2021).
- <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/chimie-radioactivite-pionniers-784/> (Zugang am 26.09.2020).
- <https://www.hanisauland.de/kalender/marie-curie-geburtstag/> (Zugang am 26.09.2020).
- <https://www.klinikum-kulmbach.de/leistungsspektrum/spalte-2/klinikum-kulmbach-2/institut-fuer-nuklearmedizin/leistungsspektrum/pet/ct-untersuchung> (Zugang am 26.09.2020).
- <https://www.lampe.de/magazin/das-elektromagnetische-spektrum/> (Zugang am 02.10.2020).
- <https://www.lecturio.de/magazin/ionisierende-strahlung-radioaktivitaet/> (Zugang am 30.09.2020).
- https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Mitglieder/CV_Hevesy_von_Georg_Karl_D.pdf. Zugang am 15.02.2021).
- <https://www.museum.chemistry.unimelb.edu.au/people/view/35> (Zugang am 23.10.2020).
- <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1921/soddy/biographical/> (Zugang am 23.10.2020).
- https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/countdown_new_si/Lesezeichen_zum_neuen_SI.pdf
- <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/positronenemission/11552> (Zugang am 22.12.2020).
- <https://www.sutori.com/item/1935-james-chadwick-sir-james-chadwick-was-a-british-physicist-who-discovered> (Zugang am 09.01.2021).
- <https://www.trtworld.com/art-culture/culturally-dosed-how-the-atomic-era-shaped-our-stories> (Zugang am 07.10.2020).

- <https://www.universalis.fr/encyclopedie/decouverte-de-la-radioactivite-naturelle/> (Zugang am 26.09.2020).
- <https://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/radiopharmaka/pet-und-spect/> (Zugang am 12.02.2021).
- https://www.wikiwand.com/de/Ionisierende_Strahlung (Zugang am 07.10.2020).
- www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/kinetik/pharmakokinetik/pharmako_grundlagen.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/kinetik/pharmakokinetik/grundlagen/ladme.vscml.html (Zugang am 16.02.2021).
- www.epileptologie-bonn.de/cms/upload/homepage/lehnerz/06-SPECT-PET.pdf (Zugang am 22.12.2020).
- www.minicles.de/physik/radioaktivitaet/strahlung.htm (Zugang am 24.12.2020).
- www.nuklearmedizin.de/leistungen/news/newsdetail.php?newsId=229 (Zugang am 22.12.2020).
- <https://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/164738> (Zugang am 01.10.2020).
- <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/351545> (Zugang am 02.10.2020).
- <https://www.up.ac.za/media/shared/Legacy/sitefiles/file/45/1335/809/2010pretoriatpetprinciples.pdf> (Zugang am 07.10.2020).
- http://archive.boston.com/news/education/higher/articles/2008/11/23/gordon_I_brownell_invention_evolved_into_the_pet_scan_at_86/ (Zugang am 22.12.2020).
- <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020).
- <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2015/daz-11-2015/technetium-in-der-diagnostik> (Zugang am 04.10.2020).
- <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2018/daz-2-2018/mrt-und-kontrastmittel> (Zugang am 19.02.2021).
- <https://www.sciencedirect.com/science/article> (Zugang am 14.02.2021).
- <https://eref.thieme.de/ebook> (Zugang am 26.09.2020).
- <https://flexikon.doccheck.com/de/Technetium> (Zugang am 26.09.2020).
- <http://www.mysteryofmatter.net/Seaborg.html> (Zugang am 04.10.2020).
- <https://de.linkfang.org/Positron> (Zugang am 07.10.2020).
- <https://en.ppt-online.org/414955> (Zugang am 07.10.2020).
- <https://slideplayer.org/slide/12679554> (Zugang am 07.10.2020).

- <https://www.wilhelmexner.org/medalists/> (Zugang am 23.10.2020).
- <https://time.graphics/period/494486> (Zugang am 24.10.2020).
- www.biologie-schule.de/niels-bohr.php (Zugang am 24.10.2020).
- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov> (Zugang am 15.02.2021).
- <https://www.pinterest.com/pin> (Zugang am 18.02.2021).
- <http://web.mit.edu/22.54/resources/Chadwick.pdf> (Zugang am 07.10.2020).
- <https://www.wissen.de/medizin/verdauungstrakt> (Zugang am 12.02.2021).

BILDERVERZEICHNIS

Abb. 1: SEHR VEREINFACHTE SCHEMATISCHE AUFBAUWEISE EINES PET-SCANNERS (DETEKTORRING) UND EINER MIT DATENVERARBEITUNG KOINZIDENZSCHALTUNG	10
Abb. 2: SEHR VEREINFACHTE SCHEMATISCHE AUFBAUWEISE EINER SPECT	13
Abb. 3: PATIENT ZWISCHEN ZWEI ROTIERENDEN SPECT-γ-KAMERAS	14
Abb. 4: PATIENT UND ROTIERENDE SPECT-γ-KAMERAS	15
Abb. 5: ANWENDUNGSBEREICH DER ^{99m}Tc-MARKIERTEN RADIOPHARMAKA	16
Abb. 6: BECQUEREL IM JAHR 1908 (OBEN) UND MIT EHEPAAR CURIE IM LABOR (LINKS) 1899	22
Abb. 7: DIE ERSTEN RADIOAKTIVITÄTSPIONIERE	23
Abb. 8: PIERRE UND MARIE MIT DER 5-JÄHRIGEN TOCHTER IRÈNE 1902	25
Abb. 9: MARIE CURIE (MITTE) MIT TÖCHTERN IRÈNE (RECHTS) UND ÈVE DENISE (LINKS) 1908	26
Abb. 10: ÈVE DENISE (4 JAHRE ALT) AUF DEM SCHOß IHRER SCHWESTER IRÈNE (14 JAHRE ALT) 1911	27
Abb. 11: IRÈNE JOLIOT-CURIE (LINKS) MIT EHEMANN FRÉDÉRIC JOLIOT (RECHTS) IM LABOR 1935 (OBEN)	28
Abb. 12: WIE DIE MUTTER, SO DIE TOCHTER	29
Abb. 13: YUKAWA	30
Abb. 14: ALVAREZ	30
Abb. 15: RÖNTGEN	35
Abb. 16: „Uraninit“	37
Abb. 17: CHADWICK	38
Abb. 18: FRÉDÉRIC JOLIOT UND IRÈNE CURIE-JOLIOT	38
Abb. 19: ABLENKUNG DER α- UND β-STRAHLUNGEN IM MAGNETISCHEN FELD	39
Abb. 20: VILLARD	39
Abb. 21: SODDY	40
Abb. 22: LAWRENCE	42
Abb. 23: ZYKLOTRON	43
Abb. 24: „IN EINEM ZYKLOTRON WERDEN GELADENE TEILCHEN WIE ETWA WASSERSTOFFIONEN IN EINEM MAGNETFELD BIS AUF NAHEZU LICHTGESCHWINDIGKEIT BESCHLEUNIGT UND AUF EIN ZIELOBJEKT (TARGET) GESCHOSSEN. BEI DEM TARGET KANN ES SICH ZUM BEISPIEL UM EINE FOLIE AUS MOLYBDÄN HANDELN, ODER AUCH UM WASSER, DAS MIT RADIOAKTIVEN SAUERSTOFF-18-ISOTOPEN ANGEREICHERT IST.	45
Abb. 25: ¹⁸F-FLUORDESOXYGLUCOSE	49
Abb. 26: ZERFALL UND HERRSTELLUNG VON ¹⁸F	50
Abb. 27: DETEKTION MITTELS γ-KAMERA (GAMMAKAMERA)	51
Abb. 28: TETRA-O-ACETYL-2-O-TRIFLUORMETHANSULFONYLMANNOPYRANOSE	52
Abb. 29: KUHL	53
Abb. 30: SWEET	54
Abb. 31: BROWNELL	54
Abb. 32: HAL OSCAR ANGER (OBEN) UNTERSUCHT EINE PATIENTIN MIT SEINER γ-KAMERA (UNTEN)	55
Abb. 33: BROWNELL UND SWEET BEI DER ENTWICKLUNG DER PET 1953 (LINKS)	55
Abb. 34: VON LINKS NACH RECHTS	56
Abb. 35: TER-POGOSSIAN POSIERTE NEBEN EINEM DER ERSTEN PET-SCANNER IM JAHR 1975	56
Abb. 36: „FÜR DIE ABSORPTION DER ENERGIE SIND VOR ALLEM DIE BEI DER WECHSELWIRKUNG ENTSTEHENDEN SEKUNDÄRELEKTRONEN VERANTWORTLICH. UM DIESE AUS DEN ATOMEN FREIZUSETZEN, BENÖTIGT MAN FÜR VERSCHIEDENE ATOME AUCH VERSCHIEDENE ENERGIEN (BINDUNGSENERGIEN). DAS BEDEUTET, DASS DIE ENERGIEDOSIS BEI GLEICHER STRAHLUNGSINTENSITÄT IN JEDER MATERIEUNTERSCHIEDLICH IST“ (Poljanc 2019, 3)	57

Abb. 37: GRAFISCHE FUNKTIONSDARSTELLUNG DES	57
Abb. 38: EIN POSITRON β^+ BEI SEINER ANNIHILATION MIT EINEM ELEKTRON β^- UND DIE ENTSTEHUNG ANTIPARALLELER ABGESTRAHLTEN γ-QUANTEN γ_1 UND γ_2.	58
Abb. 39: ANDERSON	59
Abb. 40: DIRAC	59
Abb. 41: KOLLISION POSITRON-ELEKTRON UND ENTSTEHUNG ZWEIER PHOTONEN (γ-STRAHLUNGEN)	60
Abb. 42: PET-SCANNER (KOMBINATIONSGERÄT PET/CT)	61
Abb. 43: STRAHLUNGSART, QUELLE UND MEDIZINISCHE ANWENDUNG	63
Abb. 44: DE BROGLIE	64
Abb. 45: PLANCK	64
Abb. 46: SPEKTRUM DER ELEKTROMAGNETISCHEN STRAHLUNG (FOTONENSPEKTRUM)	65
Abb. 47: „ELEKTRONEN AUS IHRER BINDUNG ZU LÖSEN BEDARF ES ENERGIEZUFUHR VON AUßEN. DIESE KANN U. A. DURCH EXTERNE FOTONEN WELCHE DIE ELEKTRONEN AUS IHRER BINDUNG REIßEN – FOTOEFFEKT. DIE LOSGELÖSTEN ELEKTRONEN NENNT MAN FOTOLEKTRONEN. ALBERT EINSTEIN WAR DER ERSTE DER MIT HILFE DER QUANTENTHEORIE DIESES PHÄNOMEN ERKLÄREN KONNTE“	65
Abb. 48: EINSTEIN	66
Abb. 49: „EINFALLENDEN FOTON LÖST ELEKTRON AUS SEINER BINDUNG – PHOTOELEKTRON. DER PHOTOEFFEKT, AUCH PHOTOELEKTRISCHER EFFEKT, IST ALLGEMEINER BEGRIFF FÜR DIE BILDUNG UND FREISETZUNG VON ELEKTRISCH GELADENEN TEILCHEN AUS MATERIE, WENN DIESE MIT LICHT ODER ANDERER ELEKTROMAGNETISCHER STRAHLUNG BESTRAHLT WIRD“	66
Abb. 50: α-STRAHLUNG UND β-STRAHLUNG SIND GELADENE TEILCHEN UND SOMIT DIREKT IONISIEREND.. 68	68
Abb. 51: RUTHERFORD	69
Abb. 52: ATOMKERNZERFALL DES RADIUMS	70
Abb. 53: DIE VIER FUNDAMENTALEN WECHSELWIRKUNGEN: GRAVITATION, ELEKTROMAGNETISMUS, SCHWACHE WECHSELWIRKUNG UND STARKE WECHSELWIRKUNG.	70
Abb. 54: ERNEST MARSDEN (OBEN RECHTS) NEBEN DER VERSUCHSAPPARATUR („BEWEIS VOM POSITIVEN HELIUMKERN“)	71
Abb. 55: ROYDS	72
Abb. 56: SODDY	72
Abb. 57: IM JAHR 1906 VERÖFFENTLICHTE RUTHERFORD (WÄHREND SEINES AUFENTHALTES IN KANADA) WIEDER EINEN ARTIKEL IN PHILOSOPHICAL MAGAZINE, BAND 12, S. 134 FF. (1906) ÜBER DIE „VERZÖGERUNG DES α-PARTIKELS VON RADIUM BEIM DURCHGANG DURCH MATERIE“. ER WAR DAMALS NOCH UNSICHER (1906), OB ES SICH TATSÄCHLICH UM „HELIUMKERN“ HANDLE. DESHALB SCHRIEB ER STATTDEN „α-PARTIKEL“.	73
Abb. 58: IM JAHR 1908 VERÖFFENTLICHTE RUTHERFORD GEMEINSAM MIT GEIGER EINEN ARTIKEL IN	73
Abb. 59: MASSON	74
Abb. 60: WIEN	75
Abb. 61: BOHR	75
Abb. 62: THOMSON	75
Abb. 63: PROUT	77
Abb. 64: DAS EXPERIMENT VON CHADWICK	78
Abb. 65: DARSTELLUNG VON DEN DREI STRAHLUNGEN, DIE VON ERNEST RUTHERFORD	79
Abb. 66: RADIOAKTIVER ZERFALL DES HELIUMKERNS ODER α-STRAHLUNG (AUCH α-ZERFALL GENANT) 79	79
Abb. 67: EINDRINGSREICHWEITE UND MATERIALDÄMPFUNG DER STRAHLUNGEN	80
Abb. 68: NEUTRINOS SIND ELEMENTARTEILCHEN UND GEHÖREN DER GRUPPE DER LEPTONEN (WIE DIE ELEKTRONEN, MUONEN UND TAUONEN). SIE SIND FERMIONEN MIT SPIN = $\frac{1}{2}$. ELEKTRON-(ANTI)NEUTRINOS UNTERLIEGEN DER SCHWACHEN UND DER GRAVITATIVEN WECHSELWIRKUNGEN. DIE MUON- UND DIE TAU-(ANTI)NEUTRINOS UNTERLIEGEN DER ELEKTROMAGNETISCHEN, DER SCHWACHEN SOWIE DER GRAVITATIVEN WECHSELWIRKUNGEN.	81
Abb. 69: PAULI	82
Abb. 70: BOHR	82
Abb. 71: CHADWICK	82
Abb. 72: FERMI	83
Abb. 73: ÜBER NEUTRINOS	83
Abb. 74: DAS POSITRON VERNICHTET EIN ELEKTRON UND SETZT DABEI ZWEI γ-STRAHLUNGEN MIT 511 KEV FREI. AUF DIESEM PHYSIKALISCHEN PHÄNOMEN BERUHT EINE POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAFIE (PET). 84	84
Abb. 75: VILLARD	85
Abb. 76: DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM	85
Abb. 77: EINE HOHE γ-STRAHLUNGSDOSIS VERURSACHT GESUNDHEITLICHE GENETISCHE SCHÄDEN (SCHWERE UND AKUTE GEWEBESCHÄDIGUNG WIE KREBS) IM LEBENDEN KÖRPERORGANISMUS. FÜR DIE	

ÜBERLEBENDEN DER ATOMBOMBENANSCHLÄGE AUF HIROSHIMA UND NAGASAKI (1945) STARBEN DANACH ETWA 90% AN KREBS.....	86
Abb. 78: DAS EHEPAAR MARIE UND PIERRE CURIE IN IHREM LABOR IN PARIS.....	86
Abb. 79: VON LINKS NACH RECHTS	87
Abb. 80: BEIM RADIOAKTIVEN KERNZERFALL EINES RADIUMATOMS ENTSTEHEN EIN RADONATOM UND EIN HELIUMATOMKERN (α-ZERFALL ODER α-STRAHLUNG). DIE α-STRAHLUNG „FLIEGT“ AUS DEM RADIUMATOMKERN MIT EINER GESCHWINDIGKEIT BIS ETWA 2×10^7 m/s (RUND 10% DER LICHTGESCHWINDIGKEIT IM VAKUUM).....	88
Abb. 81: BEIM RADIOAKTIVEN KERNZERFALL EINES KOBALTATOMS ENTSTEHEN EIN NICKELATOM UND EIN ELEKTRON (β^--ZERFALL ODER β^--STRAHLUNG): DABEI ZERFÄLLT EIN NEUTRON n UNTER AUSSENDUNG EINES ELEKTRONS e^- UND EINES ELEKTRON-ANTINEUTRINOS IN EIN PROTON p, DAS IM KOBALTATOMKERN BLEIBT. DABEI WIRD AUCH EINE IONISIERENDE γ-STRAHLUNG ENTSTEHEN. DIE γ-STRAHLUNG IST EINE ELEKTROMAGNETISCHE WELLE UND SIE „FLIEGT“ AUS DEM KOBALTATOMKERN MIT LICHTGESCHWINDIGKEIT IM VAKUUM: $c = 299.792.458$ m/s.....	88
Abb. 82: BEIM RADIOAKTIVEN KERNZERFALL EINES NATRIUMATOMS ENTSTEHEN EIN NEONATOM UND EIN POSITRON (β^+-ZERFALL ODER β^+-STRAHLUNG): DABEI ZERFÄLLT EIN PROTON p UNTER AUSSENDUNG EINES POSITRONS e^+ (ODER β^+) UND EINES ELEKTRON-NEUTRINOS IN EIN NEUTRON n, DAS IM NATRIUMATOMKERN BLEIBT. DAS POSITRON e^+ ODER DIE β^+-STRAHLUNG „FLIEGT“ AUS DEM NATRIUMKERN MIT EINER GESCHWINDIGKEIT BIS ETWA $2,7 \times 10^8$ m/s (ANNÄHERND 90% DER LICHTGESCHWINDIGKEIT IM VAKUUM)....	88
Abb. 83: ZERFALL VON MOLYBDÄN UND TECHNETIUM.....	89
Abb. 84: „DAS ZERFALLSGESETZ AM BEISPIEL VON ^{99m}Tc. NACH JEWEILS EINER HALBWERTSZEIT (ETWA 6,01 STUNDEN) IST DIE HÄLFTE DER ZUVOR NOCH VORHANDENEN KERNE ZERFALLEN. DADURCH HALBIERT SICH AUCH DIE AKTIVITÄT.....	90
Abb. 85: BECQUEREL	91
Abb. 86: EHEPAAR CURIE.....	91
Abb. 87: POINCARÉ	92
Abb. 88: DIE URANSALZE.....	92
Abb. 89: NOTIZEN VON BECQUEREL AUF DER FOTOGRAFISCHE PLATTE.....	94
Abb. 90: BECQUEREL (RECHTS) ERWECKTE DIE „RADIOAKTIVE“ NEUGIER VOM EHEPAAR CURIE (LINKS)....	95
Abb. 91: EINIGE EIGENSCHAFTEN VON ^{99m}Tc.....	96
Abb. 92: ZERFALL DES METASTABILEN ISOTOPS TECHNETIUMATOM ^{99m}Tc	96
Abb. 93: TECHNETIUM	97
Abb. 94: ERZEUGUNG VON MOLYBDÄN UND TECHNETIUM	98
Abb. 95: ERZEUGUNG VON MOLYBDÄN UND TECHNETIUM	98
Abb. 96: PERTECHNETATE.....	100
Abb. 97: NATRIUMPERTECHNETAT	100
Abb. 98: SEGRÉ.....	101
Abb. 99: PERRIER.....	101
Abb. 100: „ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER AKTIVITÄT DER NUKLIDE ^{99}Mo UND ^{99m}Tc IM RADIOAKTIVEN GLEICHGEWICHT, WOBEI DIE AKTIVITÄT VON ^{99m}Tc ZU $t = 0$ WILLKÜRLICH GLEICH 0 EINGESETZT WURDE“ (JAGENBREIN 2009, 16).....	102
Abb. 101: CHAMBERLAIN	103
Abb. 102: SEABORG.....	103
Abb. 103: DER ^{99m}Tc-GENERATOR.....	104
Abb. 104: ERSTER ^{99m}Tc-GENERATOR WURDE 1958 HERGESTELLT	104
Abb. 105: GEWINNUNG VON ^{99m}Tc	105
Abb. 106: RADIONUKLIDGENERATOR.....	106
Abb. 107: WIEGREBE.....	107
Abb. 108: BÄNDERMODELL: SZINTILLATION IN EINEM KRISTALL OHNE (LINKS) UND MIT AKTIVATOR,	109
Abb. 109: VON HEVESY	112
Abb. 110: „DIE EMITTIERTEN POSITRONEN TREFFEN AUF ELEKTRONEN IN DER UMGEBUNG. DAS ZUSAMMENTREFFEN EINES POSITRONS MIT EINEM ELEKTRON FÜHRT ZU EINER VERNICHTUNGSREAKTION. IN DIESER WANDELN SICH DIE BEIDEN TEILCHEN ZU GAMMASTRAHLUNG, DER SOGENANNTEN VERNICHTUNGSSTRAHLUNG UM. DIE VERNICHTUNGSSTRAHLUNG HAT JEWEILS EINE ENERGIE VON 511 KEV UND BREITET SICH AUF EINER LINIE IN ENTGEGENGESETZTER RICHTUNG IN EINEM WINKEL VON 180° AUS, UND ZWAR GENAU ZEITGLEICH“	115
Abb. 111: VORTEILE UND NACHTEILE VERSCHIEDENER MOLEKULARER BILDGEBUNGSTECHNIKEN.....	116
Abb. 112: „EIN SZINTILLATOR IST EIN KÖRPER, DER BEIM DURCHGANG VON HOCHENERGETISCHER STRAHLUNG (ENERGIEREICHEN PHOTONEN ODER GELADENEN TEILCHEN) ANGEREGT WIRD UND DIE ANREGUNGSENERGIE IN FORM VON LICHT (MEIST IM UV- ODER SICHTBAREN BEREICH) WIEDER ABGIBT.	

DIESEN VORGANG BEZEICHNET MAN ALS SZINTILLATION (VON LATEINISCH SCINTILLARE: "FUNKELN, FLACKERN"). ER BERUHT AUF DEM PRINZIP DER FLUORESZENZ	117
Abb. 113: „JEDER DETEKTOR IM RING WIRD IN KOINZIDENZ MIT EINER REIHE VON GEGENÜBERLIEGENDEN DETEKTOREN BETRIEBEN UND DIE DURCH DIE ANNIHILATION DER POSITRONEN ERZEUGTE GAMMASTRAHLUNG (SO GENANNT VERNICHTUNGSSTRAHLUNG) WIRD DETEKTIERT. MAN HAT AUCH FESTGESTELLT, DASS GAMMAKAMERAS MIT DICKEN KRISTALLEN UND SPEZIELLEN KOLLIMATOREN ALS PET SCANNER VERWENDET WERDEN KÖNNEN. ZU DEN IN DER POSITRONENEMISSIONSTOMOGRAPHIE VERWENDETEN RADIOISOTOPEN GEHÖREN ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O UND ¹⁸F. DIESE ISOTOPE WERDEN ÜBLICHERWEISE IN EINEM GERÄT NAMENS ZYKLOTRON HERGESTELLT. HINZU KOMMT, DASS DIESE ISOTOPE RELATIV KURZE HALBWERTSZEITEN HABEN. PET SCANNER BRAUCHEN EIN ZYKLOTRON UND ANGESCHLOSSENE EINRICHTUNGEN ZUR HERSTELLUNG DER RADIOPHARMAKA IN IHRER NÄHE“	118
Abb. 114: AKTIVITÄTSLINIE ODER PROJEKTIONSLINIE	118
Abb. 115: KOINZIDENZELEKTRONIK- BZW. KAMERA	119
Abb. 116: SCHEMA EINES PET-SCANNERS (DETEKTORRING) UND DER KOINZIDENZSCHALTUNG MIT DATENVERARBEITUNG	120
Abb. 117: PRINZIPIELLES VERARBEITUNGSSCHEMA DER PET	120
Abb. 118: PRINZIP EINER PET-UNTERSUCHUNG	121
Abb. 119: PET MIT CT ODER MRT KANN KOMBINIERT WERDEN	121
Abb. 120: KOMBINATION PET-MRT (GEHIRNBILDGEBUNG)	122
Abb. 121: BILDERVERGLEICH VON CT, PET UND KOMBINATION PET-CT	122
Abb. 122: VON LINKS NACH RECHTS	123
Abb. 123: SZINTILLATOREN FÜR PET-SCANNER	124
Abb. 124: PET vs. SPECT	125
Abb. 125: RADIOAKTIVE ISOTOPE UND IHRE ANWENDUNGEN IN DER NUKLEARMEDIZINISCHEN DIAGNOSE ..	126
Abb. 126: Die APPARATUR FÜR DIE SYNTHESE DER [¹⁸F]-FLUORDESOROXYGLUCOSE. Text- und Bilderquelle:	130
Abb. 127: „GANZKÖRPER PET-AUFNAHME MIT ¹⁸F-FLUOR-DESOROXYGLUCOSE“	131
Abb. 128: Nachweis von Prostatata-Krebs mittels ¹¹C- Choline (PET/CT)	133
Abb. 129: HYBRIDBILDGEBUNG BEI LYMPHOM	137
Abb. 130: Vergleich zwischen zwei Patienten	138
Abb. 131: VERGLEICH ZWISCHEN	139
Abb. 132: Bildgebungsverfahren mit CT (links), SPECT (Mitte) und PET/CT-Kombination	139
Abb. 133: (PET/CT)-Kombination	140
Abb. 134: Einige Positronenstrahler mit ihren Eigenschaften	142
Abb. 135: DOSIS-WIRKUNG-BEZIEHUNG	143
Abb. 136: DOSIS-WIRKUNG-BEZIEHUNG	144
Abb. 137: WENN MAN (FAST) ALLE PATIENTEN ERFOLGREICH BEHANDELN MÖCHTE, DARF MAN SICH NICHT NUR AUF DIE THERAPEUTISCHE BREITE BEI DER ED₅₀ UND TD₅₀ VERLASSEN	145
Abb. 138: DIE HABER'SCHE REGEL BERUHT AUF DIE EINWIRKUNGSZEIT T UND DIE KONZENTRATION C AM WIRKORT DER IN DEN KÖRPER INJIZIERTEN SUBSTANZ	147
Abb. 139: BMD vs. NOAEL	147
Abb. 140: BLUTSPIEGEL BEI DER INTRAVENÖSEN INJEKTION (i. v.) VON RADIOAKTIVER SUBSTANZ IM VERGLEICH MIT ANDEREN TYPEN PARENTERALER (i. m. UND s. c.) UND ENTERALER GABE (PERORAL)	148
Abb. 141: APPLIKATION VON SUBSTANZ IN DEN ORGANISMUS	149
Abb. 142: CLEARANCE	151
Abb. 143: AUSSCHIEDUNGSFUNKTION DER NIERE	151
Abb. 144: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VERDAUUNGSTRAKTES	152