

S E M I N A R A R B E I T

Rahmenthema des Wissenschaftspropädeutischen Seminars:

Forensik

Leitfach: *Chemie*

Thema der Arbeit:

Der Strahlentod - Radioaktive Vergiftung am Fallbeispiel Litwinenko

Verfasserin:

Pauline Kolbeck

Kursleiter:

StR Hans Oberender

Abgabetermin:

6. November 2012

Bewertung	Note	Notenstufe in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe:					
Gesamtleistung nach § 61 (7) GSO = Summe:2 (gerundet)					

Datum und Unterschrift des Kursleiters

Inhaltsverzeichnis

1. DER FALL LITWINENKO – EIN BEISPIELHAFTER MORD	3
2. RADIOAKTIVITÄT UND IHRE AUSWIRKUNGEN AUF DEN MENSCHLICHEN KÖRPER	5
2.1 Das Phänomen der Radioaktivität: physikalische Grundlagen	5
2.1.1 Der radioaktive Zerfall	5
2.1.2 Alpha-, Beta- und Gammastrahlen im Vergleich	7
2.2 Biologische Auswirkungen ionisierender Strahlung	8
2.2.1 Die Strahlenbiologische Wirkungskette	8
2.2.2 Unterscheidung der verschiedenen Strahlenschäden	11
2.2.3 Einflussfaktoren	14
2.3 Der Fall Litwinenko	15
2.3.1 Tathergang und allgemeine Informationen zum Mord	15
2.3.2 Vergiftung durch ^{210}Po - Eignung und Nachweismöglichkeiten	16
2.3.3 Radioaktive Spuren und Vermutungen zur Täterschaft	18
3. WISSENSCHAFT UND GESELLSCHAFT - DIE GEFÄHRLICHKEIT DER RADIOAKTIVITÄT	20
4. LITERATURVERZEICHNIS	21
4.1 Literaturquellen	21
4.2 Internetquellen	21
5. ANHANG FÜR WEITERE GRAFIKEN	24
6. EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	29

1. Der Fall Litwinenko – Ein beispielhafter Mord

Es ist mit Sicherheit nicht leicht, als russischer Geheimagent zu arbeiten, vor allem nicht am Ende des 20. Jahrhunderts. Die Sowjetunion ist auseinander gebrochen und infolgedessen kommt es zu politischer Instabilität, wirtschaftlichen Problemen und Unzufriedenheit in der Bevölkerung. Alexander Litwinenko arbeitete lange Zeit als Geheimagent, erst von 1988 bis 1991 für den sowjetischen Geheimdienst KGB, dann von 1991 bis 2000 für die russische Nachfolgeorganisation FSB. Schon in dieser Zeit äußerte Litwinenko öffentlich Kritik an der russischen Scheindemokratie und wurde sogar deswegen verhaftet. Im Jahr 2000 floh Litwinenko mit seiner Familie nach London und beantragte politisches Asyl. Er weigerte sich, weiter für den russischen Geheimdienst zu arbeiten, da die russische Regierung oft sehr harte und unmenschliche Strafen über Verbrecher oder politisch anders Orientierte ausspricht, die der Geheimdienst umzusetzen hat. Aber es ist nicht einfach, aus dem (russischen) Geheimdienst auszusteigen. Obwohl Litwinenko bis zu seinem Tod mit Rache für seine gefährlichen Taten rechnen musste, veröffentlichte er immer wieder bisher unbekannte Informationen über die Arbeit des russischen Geheimdienstes, über die Zusammenarbeit von Unternehmen mit dem Staat oder über terroristische Anschläge in Moskau, hinter denen laut Litwinenko auch die russische Regierung stecken sollte. Oft fehlten ihm die Beweise, um seine Thesen zu stützen, aber Litwinenko pflegte weiterhin die Kontakte zu seinen ehemaligen Kollegen und konnte so immer wieder brisantes Material veröffentlichen. (vgl. Internetquelle 2; vgl. Internetquelle 10; vgl. Internetquelle 22; vgl. Internetquelle 31; vgl. Internetquelle 38)

Doch letzten Endes zahlte Litwinenko einen hohen Preis dafür, der Welt seine Ansichten über die politische Situation in Russland mitzuteilen. Im Sterben liegend, beschuldigte Litwinenko Putin, und damit auch die gesamte russische Regierung, ihn ermordet haben zu lassen. Hier- von zeugt auch ein Abschiedsbrief, den Litwinenko wenige Tage vor seinem Tod seinem Vater schickte:

„Während ich hier liege, höre ich in aller Deutlichkeit die Flügel des Todesengels. Möglicherweise kann ich ihm noch einmal entkommen, aber ich muss sagen, meine Beine sind nicht so schnell, wie ich es gerne hätte. Ich denke deshalb, dass es an der Zeit ist, ein oder zwei Dinge dem Menschen zu sagen, der für meinen jetzigen Zustand verantwortlich ist. Sie [Putin] werden es vielleicht schaffen, mich zum Schweigen zu bringen, aber dieses Schweigen hat einen Preis. Sie haben sich als so barbarisch und rücksichtslos erwiesen, wie Ihre ärgsten Feinde es behauptet haben. Sie haben gezeigt, dass Sie keine Achtung vor dem Leben, vor der Freiheit oder irgendeinem Wert der Zivilisation haben. Sie haben sich als Ihres Amtes unwürdig erwiesen, als unwürdig des Vertrauens der zivilisierten Männer und Frauen. Sie werden es vielleicht schaffen, einen Mann zum Schweigen zu bringen. Aber der Protest aus aller Welt, Herr Putin, wird für den Rest des Lebens in Ihren Ohren nachhallen. Möge Gott Ihnen vergeben, was Sie getan haben, nicht nur mir angetan haben, sondern dem geliebten Russland und seinem Volk.“
(Internetquelle 36)

Man merkt, dass Litwinenko eine starke Persönlichkeit war, die auf ein spannendes Leben zurückblicken kann. Fällt aber heute der Name Litwinenko, wie z.B. im Rahmen einer Reportage der Süddeutschen Zeitung vom 27.02.2012 über eine junge Russin, die versehentlich in die Fänge des englischen Geheimdienstes MI5 geraten ist, steht dieser nicht für ein spannendes Agentenleben, sondern vor allem für seinen tragischen Tod, der bis heute Zeichen für die „gelenkte Demokratie“ in Russland und die verheerenden Auswirkungen radioaktiver Substanzen ist. (vgl. Giesen, 2012, S.3)

Der russische Geheimagent Alexander Litwinenko verstarb am 23. November 2006 in einem Londoner Krankenhaus. Wenige Wochen zuvor war er mit radioaktivem Polonium-210 vergiftet worden. Bis heute ist ungeklärt, wer den Geheimagenten ermorden ließ.

In meiner Seminararbeit möchte ich mir deshalb politische, allgemeine und vor allem forensische Fragen zu diesem Mord stellen und versuchen diese zu beantworten.

Der Fall Litwinenko ist bis heute ein sehr brisantes Thema, da er kein kurzfristig geplanter Raubmord oder ein zufälliges Missgeschick war. Dieser Mord verrät viel über die wirtschaftliche und politische Stellung Russlands, über die Verfahrensweisen des russischen Geheimdienstes (falls dieser hinter dem Mord steckt) und nicht zuletzt über den Mörder selbst, wer auch immer es gewesen sein mag. Somit ist verständlich, dass der russische Geheimdienst und die Regierung keine Pressemeldung mit allen Details zu seinem Mord herausgegeben haben, sondern vor allem spekulative Zeitungsartikel darüber existieren, und es sehr schwierig ist, an andere Quellen zu gelangen, die mehr über diesen Mord sagen können.

Deswegen möchte ich als Schwerpunkt meiner Seminararbeit den Fall Litwinenko aus biologischer Sicht betrachten. Da der Strahlentod ein sehr komplexes Thema ist, werde ich meine Seminararbeit wie eine Treppe aufbauen, über die ich mich schrittweise dem Fall Litwinenko annähere. Auf der ersten Stufe stehen hierbei die physikalischen Grundlagen über das Phänomen der Radioaktivität. Auf dieses Wissen baue ich anschließend den zweiten Teil der Arbeit auf: die biologischen Auswirkungen ionisierender Strahlung auf den Organismus. Auf der dritten Stufe werde ich in diesem Bereich weiter ins Detail gehen, indem ich den Tod durch Radioaktivität näher betrachte. Hier möchte ich wieder zu meiner Motivation für diese Arbeit, den Fall Litwinenko, zurückfinden, und diesen in Anbetracht der zuvor erarbeiteten Grundlagen detailliert betrachten.

2. Radioaktivität und ihre Auswirkungen auf den menschlichen Körper

2.1 Das Phänomen der Radioaktivität: physikalische Grundlagen

„Unter Radioaktivität versteht man die Eigenschaft bestimmter, instabiler Atomkerne, sich umzuwandeln und bei dieser Umwandlung Strahlung auszusenden. Die Umwandlung dieser Kerne erfolgt spontan und lässt sich von außen z.B. durch Druck oder Temperatur nicht beeinflussen.“ (Michel und Stosch, 1992, S. 18)

1896 entdeckte Henri Becquerel (1852-1908) dieses Naturphänomen als Erstes an dem Element Uran. Marie und Pierre Curie setzten seine Forschungen fort und entdeckten in den folgenden Jahren weitere radioaktive Elemente, wie Thorium, Polonium oder Radium. In der weiteren Geschichte spielt Radioaktivität fortlaufend eine wichtige Rolle in der Forschung, z. B. bei den Versuchen von Ernest Rutherford Anfang des 20. Jahrhunderts. (vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 96; vgl. Internetquelle 14; vgl. Internetquelle 17)

2.1.1 Der radioaktive Zerfall

Die Ursache des radioaktiven Zerfalls ist auf die Instabilität des Atomkerns aufgrund eines Protonen- bzw. Neutronenüberschusses zurückzuführen. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch auf der Nuklidkarte (Abb. 1). Man erkennt, dass es ab einer Protonenzahl von 83 (Bismut-209) kein stabiles Isotop mehr gibt.

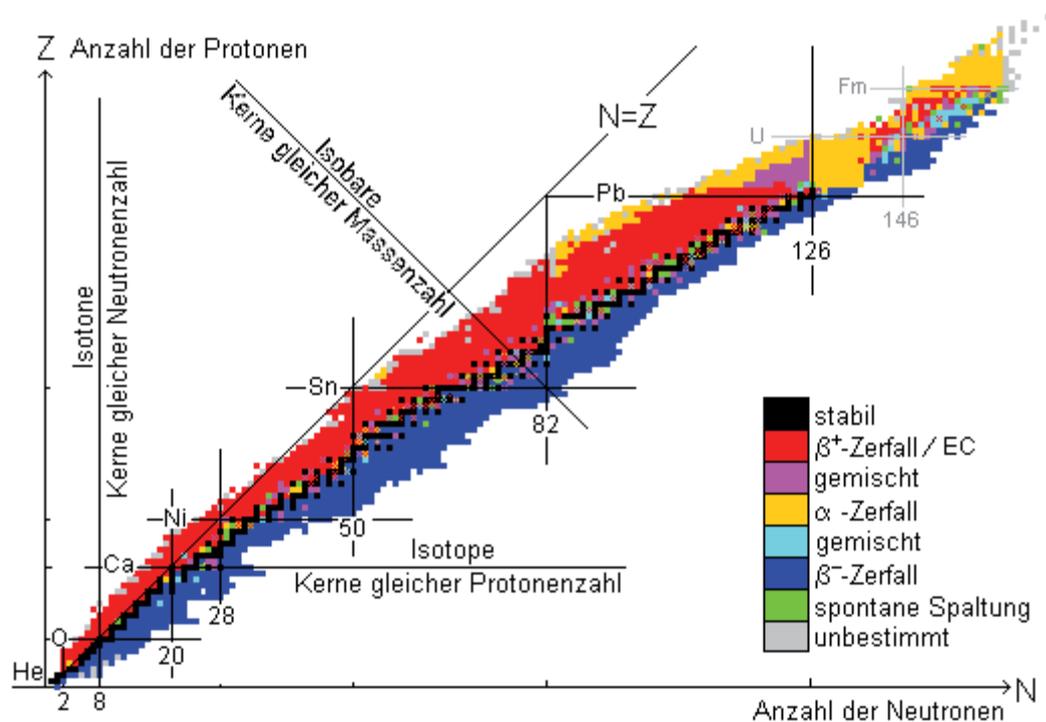


Abb. 1 (Internetquelle 23): vereinfachte Darstellung einer Nuklidkarte

Mit der Zeit wandeln sich die Atomkerne des radioaktiven Stoffes durch Kernumwandlungen in einen anderen Stoff um. Die Abnahme der Atomkerne des Ausgangsstoffes erfolgt gemäß dem Zerfallsgesetz. Es handelt sich hierbei um einen stochastischen Zusammenhang. Bei ei-

dem einzelnen radioaktiven Atom ist es somit unmöglich den Moment des Zerfalls vorherzusagen.

Geht man allerdings von einer großen Menge Atome aus, kann man die durchschnittliche Konzentration des Ausgangsnuklids zu einem bestimmten Zeitpunkt mittels des Zerfallsgesetzes vorhersagen.

Jeder radioaktive Stoff besitzt eine spezielle Zeitdauer, in der die Hälfte der vorhandenen Kerne zerfällt: die Halbwertszeit t_h (bzw. $T_{1/2}$).

Abbildung I (Anhang) zeigt, dass die Halbwertszeit verschiedener Stoffe sehr weit schwankt. So hat Po-212 eine Halbwertszeit von wenigen Sekundenbruchteilen, während Pb-204 eine Halbwertszeit von 140 Milliarden Jahren hat.

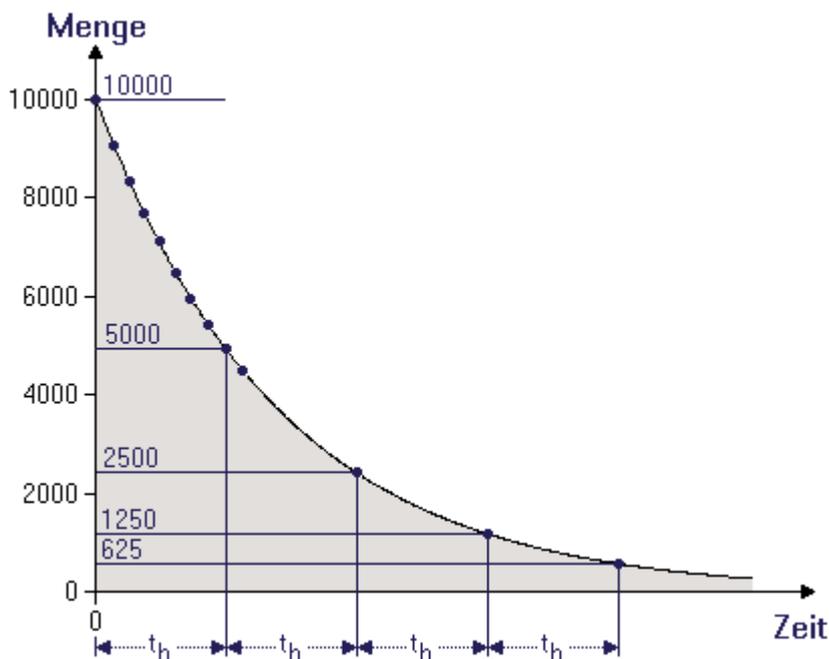


Abb. 2 (Internetquelle 1): Graph der Funktion des radioaktiven Zerfalls

Wie bereits am Graphen der Funktion (Abb. 2) ersichtlich, handelt es sich beim radioaktiven Zerfall um eine Exponentialfunktion, die durch den Term $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ beschrieben wird.

„Die Zahl $N(t)$ der zur Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne eines radioaktiven Stoffes nimmt exponentiell mit der Zeit ab: Dabei ist N_0 die Anzahl der Kerne zum Zeitpunkt $t = 0$ und λ die Zerfallskonstante.“ (Bolz et al., 1998, S.501)

Proportional zu der Anzahl der noch vorhandenen Atomkerne sinkt auch die Aktivität des Strahlers. Die Aktivität A beschreibt die Kernumwandlungen pro Sekunde und wird in Becquerel, abgekürzt Bq, angegeben: $A(t) = \lambda \cdot N(t)$ (vgl. Bolz et al., 1998, S.501; vgl. Bille und Schlegel, 2002, S.20; vgl. Meyer und Schmidt, 2001, S.314f.; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 131ff., vgl. Internetquelle 8)

Beim Zerfall eines radioaktiven Nuklids entsteht häufig ein anderes ebenfalls radioaktives Nuklid, das aufgrund seiner Instabilität erneut zerfällt. So entsteht eine Zerfallsreihe, die ihr

Ende in einem stabilen Isotop findet. Es existieren heute noch 3 natürliche Zerfallsreihen: die Uran-Radium-Reihe, die Uran-Actinium-Reihe und die Thorium-Reihe (siehe Abb. II bis IV im Anhang). Die Neptunium-Reihe (Abb. V im Anhang) ist aufgrund der vergleichsweise kurzen Halbwertszeiten heute nur noch künstlich erzeugbar. Ausschlaggebend für die Aktivität der Zerfallsreihe ist der Atomkern mit der längsten Halbwertszeit, da die Zerfälle in direkter Abhängigkeit zueinander stehen. Man spricht von einem radioaktiven Gleichgewicht. (vgl. Bredthauer et al, 2007, S. 298; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 37f.; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 100f.)

2.1.2 Alpha-, Beta- und Gammastrahlen im Vergleich

Auf der Nuklidkarte ist zu erkennen, dass es verschiedene Formen der Kernumwandlung gibt. In der Natur können am häufigsten α -, β^- -, und γ -Zerfälle beobachtet werden, es gibt aber noch andere, weniger häufige Zerfallsarten. (vgl. Jung et al., 1983, S. 223f.)

Der Alpha-Zerfall tritt vor allem bei schweren Atomkernen auf. Der instabile Kern zerfällt unter Aussendung von α -Teilchen (${}^4_2\text{He}$). Der entstehende Kern hat einen weniger instabilen Zustand, da er 2 Protonen und 2 Neutronen weniger besitzt.

Die Energie der α -Teilchen ist diskret, das heißt sie besitzt einen festen Wert, da die Kernzustände vor und nach dem α -Zerfall ebenso feste Energien besitzen.

Gleichung: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + \Delta E$ (vgl. Bille und Schlegel, 2002, S.22f.; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 93; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 34)

Der β^- -Zerfall ist im Gegensatz zum α -Zerfall auf einen Neutronenüberschuss im Kern zurückzuführen. Ein Neutron kann in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino zerfallen. Das Proton verbleibt im Atomkern, das Elektron und das Antineutrino werden mit sehr hoher Geschwindigkeit nach außen abgegeben.

Gleichung: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow e^- + {}^A_{Z+1}\text{Y} + \Delta E$ (vgl. Bille und Schlegel, 2002, S.23ff.; vgl. Jung et al., 1983, S. 233ff.; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 94; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 35)

Eine häufige Sekundärerrscheinung zum α - oder β -Zerfall ist die γ -Strahlung. Der angeregte Kern emittiert energiereiche elektromagnetische Strahlung (Gammaquanten) und geht dadurch in ein niedrigeres Energieniveau über. Die γ -Strahlen können zum Beispiel Elektronen aus den inneren Schalen anderer Atome oder Moleküle auslösen. Der γ -Zerfall kann zeitgleich zum α - bzw. β -Zerfall erfolgen, der Atomkern kann aber auch für eine gewisse Zeit in einem metastabilen Zustand verbleiben und dann erst Gammaquanten aussenden.

Bei der Aussendung von γ -Quanten verändert sich nur der Energiezustand des Atomkerns, die Massenzahl sowie die Position bleiben konstant.

Gleichung: ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_Z\text{X} + \Delta E$ (vgl. Harten, 2006, S. 310; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 94; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 35)

Bei allen diesen Zerfällen entstehen jeweils ionisierende und energiereiche Strahlungen, die in Wechselwirkung mit der Materie treten können.

- α -Teilchen bestehen aus relativ großen Heliumkernen. Deshalb ist das Durchdringungsvermögen dieser Strahlungsart sehr gering, die Strahlung kann bereits durch eine Papierschicht abgeschirmt werden. Die Reichweite in der Luft beträgt ca. 4 bis 6 cm.
- β -Strahlen bestehen aus Elektronen, diese sind wesentlich kleiner und leichter als Heliumkerne, somit haben β -Strahlen eine größere Durchdringungsfähigkeit als α -Strahlen. Eine wesentliche Abschirmung wird beispielsweise durch eine 1 mm dicke Aluminiumschicht gewährleistet. Die Reichweite in der Luft beträgt einige Meter.
- Das größte Durchdringungsvermögen besitzen γ -Strahlen, da sie aus masselosen Photonen bestehen. Eine 13 mm dicke Bleischicht bewirkt eine Reduzierung der Strahlung auf 50%, eine vollständige Abschirmung ist nicht möglich. Die Reichweite ist somit nahezu unbegrenzt.

Das Durchdringungsvermögen jeder ionisierenden Strahlung ist zusätzlich abhängig von der Intensität bzw. Energie der Strahlung. (vgl. Bredthauer et al, 2007, S. 289f.; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 113ff.; vgl. Meyer und Schmidt 2001, S.317f.)

2.2 Biologische Auswirkungen ionisierender Strahlung

Die Strahlung radioaktiver Stoffe ist sehr energiereich. In Wechselwirkung mit lebender Materie kann diese Energie an andere Atome oder Moleküle abgegeben werden, wodurch große Veränderungen hervorgerufen werden können. (vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 118; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 27f.)

2.2.1 Die Strahlenbiologische Wirkungskette

2.2.1.1 Primäre Strahlenreaktion

Trifft ionisierende Strahlung auf eine lebende Zelle, kann dadurch eine strahlenbiologische Wirkungskette ausgelöst werden, an deren Anfang physikalische Primärreaktionen stehen: Die energiereichen Strahlen können zur Anregung oder Ionisation der Elektronen der Moleküle der Zellorganelle führen:

- Anregung: Ein Elektron nimmt die Energie der Strahlen auf und erreicht dadurch eine energiereichere Schale. Springt das Elektron anschließend vom diesem angeregten Zustand in seinen Grundzustand zurück, wird die Energie wieder freigesetzt.
- Ionisation: Ist die Energie groß genug, verlässt das Elektron das Atom vollständig. Hierbei entstehen ein freies Elektron und ein Kation. Das losgelöste Elektron kann sich an ein anderes Molekül oder Atom anlagern, sodass ein Anion entsteht. Das positive und das negative Ion ergeben zusammen ein Ionenpaar.

(vgl. Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1986, S.36f.; vgl. Bille und Schlegel, 2002, S.80; vgl. Bolzet al., 1998, S.492; vgl. Wickert, 2012, S.190f.)

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 3) zeigt die Ionenpaarbildung von α -Strahlen pro cm Wegstrecke:

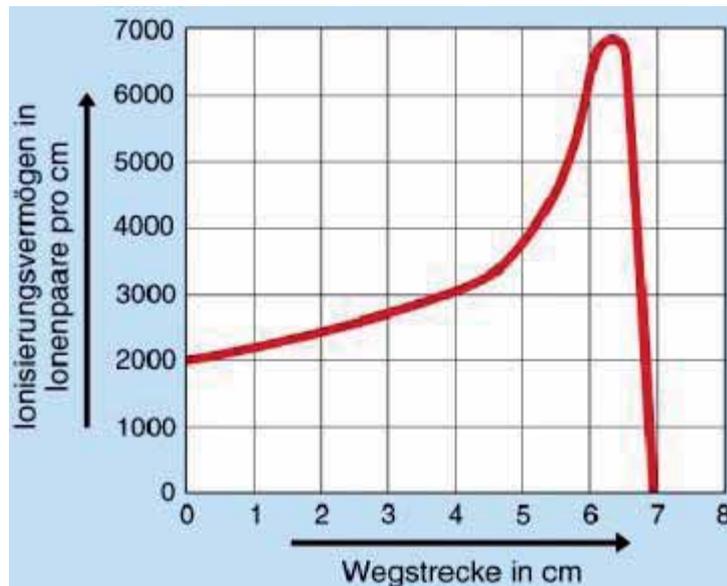


Abb. 3 (Internetquelle 40): Ionisierungsvermögen von α -Strahlen pro cm Wegstrecke

Daraus geht hervor, dass vor allem langsame α -Teilchen, also diese, die schon einen relativ weiten Weg zurückgelegt haben, zu Ionisationen führen. Zudem ist in der Grafik ersichtlich, dass α -Strahlen in Wechselwirkung mit Materie eine maximale Reichweite von circa 7 cm haben. Ist ein α -Teilchen zum Stillstand gekommen, bildet es häufig zusammen mit zwei Elektronen ein ungeladenes Heliumatom, sein Ionisationsvermögen ist damit erschöpft.

2.2.1.2 Sekundärreaktionen

Infolge dieser Primärreaktionen kommt es relativ schnell (der Ionisationsvorgang dauert nur 10^{-16} s) zum Zerfall von Molekülen oder zur Radikalbildung, was wiederum weitere chemische und biochemische Prozesse nach sich zieht. (vgl. Bille und Schlegel, 2002, S.126)

Ein Beispiel hierfür ist die Ionisation von Wasser, die besonders häufig auftritt, da eine Zelle zu 80-90% aus Wasser besteht. Im Zusammenspiel mit Sauerstoff, der ebenfalls in jeder lebenden Zelle ausreichend vorhanden ist, entstehen hierbei zum größten Teil reaktive Sauerstoffverbindungen, englisch „reactive oxygen species“, ROS. Auch in einer nicht-bestrahlten Zelle entstehen in den Mitochondrien als Nebenprodukte der Zellatmung endogene ROS, diese gelangen allerdings nur in bestimmte Zellbereiche, während radioaktiv erzeugte ROS überall auftreten können. ROS wirken in großer Menge zytotoxisch, da der Körper diese innerhalb der begrenzten Zeit nicht vollständig abbauen kann. Zu den ROS gehören unter anderem Superoxidanionen-Radikale ($O_2^{\bullet-}$), Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und Hydroxyl-Radikale (OH^{\bullet}). Abbildung VI (Anhang) zeigt Beispiele einiger ROS und mögliche Reaktionen.

Diese Verbindungen sind sehr reaktiv und können deswegen die Struktur anderer Moleküle verändern und dadurch deren Funktionsweise in der lebenden Zelle beeinflussen oder sogar gänzlich zum Stillstand bringen. (vgl. Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 30; vgl. Polit, 1992, S.88f.; vgl. Internetquelle 13)

2.2.1.3 Strahlenreaktion in der DNA

Zusätzlich zur Strahlung selbst können auch die entstandenen Radikale und Peroxide zu einer Veränderung der Molekülstrukturen führen. Besonders große Schäden können hierbei an der DNA entstehen, da diese nicht ersetzt werden kann.

Ungefähr 20% der DNA-Schäden werden direkt von ionisierenden Teilchen, also zum Beispiel von β^- -Teilchen hervorgerufen. Die restlichen 80% der DNA-Schäden werden durch hoch reaktive Moleküle verursacht. Da hierbei die ionisierende Strahlung nicht direkt auf die DNA trifft, bezeichnet man diese Schäden als indirekte Effekte.

Radioaktive Strahlung führt deshalb fast nur zu Genmutationen, nur selten zu Chromosomen- oder Genommutationen. (vgl. Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 32; vgl. Bünte und Bünte, 2004, S.428f.)

Basenverlust oder -veränderung, Doppel- oder Einzelstrangbrüche sowie Quervernetzungen bewirken eine Veränderung der DNA und damit des Erbguts. Von seltenen positiven Mutationen abgesehen, hat dies meist negative Folgen für den Organismus: Wird beispielsweise eine Base aus der DNA durch Strahlung entfernt, kann diese auch bei der Transkription und der darauffolgenden Translation nicht korrekt „übersetzt“ werden. Das anschließend bei der Proteinbiosynthese hergestellte Protein ist somit auch fehlerhaft und kann seine Funktion im Körper nur teilweise oder sogar gar nicht erfüllen. (vgl. Polit, 1992, S.90ff.; vgl. Internetquelle 35)

2.2.1.4 Reparaturmechanismen in der DNA

Da es auch in einer unbestrahlten Zelle zu etwa 1000 DNA-Schäden pro Minute kommt, gibt es in jeder Zelle Enzyme und Mechanismen, die eigens für die DNA-Reparatur zuständig sind.

Im Falle eines Basenverlusts kann die betroffene Stelle von dem Enzym Endonuklease erkannt und die DNA an dieser Stelle „aufgeschnitten“ werden. Die Exonuklease entfernt anschließend mehrere Basen, die die fehlende Base umgeben. Nun kann sich die DNA-Polymerase an der frei gewordenen Stelle anlagern und neue Basen in der richtigen Anordnung einsetzen, indem sie den unbeschädigten DNA-Strang als Matrize verwendet. Eine Grafik (Abb. VII) zum möglichen Ablauf findet sich im Anhang.

Wird einer der Holme der DNA beschädigt, verläuft der Reparaturmechanismus ähnlich. (vgl. Polit, 1992, S.92f.; vgl. Internetquelle 35)

Bei einer zu hohen Strahlenbelastung kann es dennoch zu irreversiblen Schäden kommen, wenn zum Beispiel auf beiden Einzelsträngen der DNA ein Basenverlust vorliegt, da der DNA-Polymerase in diesem Fall die Matrize fehlt.

Ein irreparabler Schaden kann auch durch einen Doppelstrangbruch hervorgerufen werden, da es hierbei zum Bruch der DNA kommen kann. Die beiden Enden treiben auseinander und können nur schwer wieder zusammengesetzt werden, vor allem wenn der Doppelstrangbruch glatt verläuft. Bei einem diagonalen Bruch werden die beiden Einzelstränge durch Wasserstoffbrückenbindungen für längere Zeit zusammengehalten, sodass eine Reparatur in diesem Fall möglich ist. (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 33f.; vgl. Polit, 1992, S.94f.)

Irreversible DNA-Schäden können zu subzellulären Defekten beispielsweise an der Zellmembran oder an anderen Zellorganellen führen und sogar ganze Zellprozesse, wie Mitose oder Zelldifferenzierung, beeinträchtigen. (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 32f.; vgl. Wickert, 2012, S. 191)

„Nicht reparierte Zellen sterben fast immer ab“ (Bille und Schlegel, 2002, S.128). Durch das Immunsystem können verstrahlte Zellen im Körper erkannt und eliminiert werden. Bei geringen Dosen ($>0,1$ Sv) kann es zur Apoptose, dem signalinduzierten Zelltod der verstrahlten Zellen kommen. (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 36f.; vgl. Bolzet al., 1998, S.492)

2.2.2 Unterscheidung der verschiedenen Strahlenschäden

Bei der Klassifizierung der Strahlenschäden unterscheidet man in erster Linie zwischen deterministischen und stochastischen Strahlenschäden.

- Deterministisch bedeutet in diesem Fall, dass die Schwere der Strahlenschäden von der Dosis abhängt. Unterhalb einer gewissen Dosis treten keine irreparablen Schäden auf, bei einer höheren steigt die biologische Wirkung proportional mit der Dosis.
- Stochastisch dagegen bedeutet dem Zufall unterworfen. Das heißt hier ist der berühmte Satz von Paracelsus (1493-1541) „dosis sola venenum facit“ (dritte defensio, 1538) nicht anwendbar. Dosisunabhängig werden gleich schlimme oder auch gar keine Schäden hervorgerufen. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Strahlenschäden überhaupt nimmt allerdings proportional zur Strahlendosis zu.

(vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 47ff.; vgl. Wickert, 2012, S. 191; vgl. Internetquelle 7)

2.2.2.1 Unterscheidung bezüglich des Bereichs der Schädigung

Strahlenschäden können in verschiedenen Bereichen auftreten. Bei Schädigung der Körperzellen spricht man von somatischen Schäden. Diese Schäden können nicht vererbt werden, sondern betreffen nur die der Strahlung exponierte Person.

Ionisierende Strahlung kann auch zu Defekten an den Keimzellen führen, wenn die DNA der Gameten beschädigt wurde. Die Folgen davon sind Unfruchtbarkeit oder Fehlbildungen bei der Nachkommenschaft. Man nennt diese Art der Schädigung genetische Schäden. (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1986, S. 36f.; vgl. Internetquelle 11)

Ist eine schwangere Frau einer Strahlenexposition ausgesetzt, kann nicht nur sie, sondern auch das Kind schwere Schäden davontragen. Diese teratogene Schädigung, also Schädigung des ungeborenen Kindes, ist besonders stark, da sich sehr viele Zellen sehr häufig teilen. Zu Beginn der Schwangerschaft sterben deshalb viele Föten bereits bei geringer Strahlenbelastung. (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 59f.; vgl. Kellerer, 2006, S. 27)

2.2.2.2 Unterscheidung bezüglich des zeitlichen Auftretens

Defekte, die innerhalb von Tagen und Monaten auftreten, nennt man Frühschäden oder auch akute Strahlenschäden. Die Strahlenkrankheit tritt auf, wenn der menschliche Körper kurzzeitig mit einer Energiedosis von mehr als 1 Gy bestrahlt wurde. Die Energiedosis D beschreibt die Energie, die ein Kilogramm eines Stoffes durch ionisierende Strahlung aufnimmt. Die Einheit ein Gray [Gy] bedeutet $1 \frac{J}{kg}$. (vgl. Bille und Schlegel, 2002, S.71ff.; vgl. Bredthauer et al, 2007, S. 293; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 23f.)

Die nebenstehende Grafik (Abb.4) zeigt häufige Symptome nach verschiedenen großen Strahlenbelastungen:

Strahlenkrankheit				
Dosis	1 bis 6 Gray*	5 bis 20 Gray	mehr als 20 Gray	
vor allem betroffenes Organ	Rotes Knochenmark	Magen-Darm-Schleimhaut	Zentrales Nervensystem, Herz	
Erste Symptome				
Zeit des Auftretens	30 Minuten bis sechs Stunden nach der Bestrahlung	15 Minuten bis zwei Stunden nach der Bestrahlung		nicht erkennbar
Dauer	24 bis 48 Stunden	bis 72 Stunden		
Symptome	Übelkeit, Erbrechen	Übelkeit, Erbrechen, Kopfschmerz, getrübbtes Bewusstsein		
Anschließend beschwerdefreie Zeit	zwei bis vier Wochen	drei bis fünf Tage		
Manifeste Erkrankung	Fieber, Schwäche, Infektionen, Blutungsneigung ab drei Gray: Haarausfall, Radiodermatitis (Hautentzündung) und Schleimhaut-Geschwüre	massiver, evtl. blutiger Durchfall, Schock, Infektionen, Blutungen	Krämpfe, Bewusstseinsverlust mit Herz-Kreislauf-Schock	
Erholungsphase	je nach Schwere unterschiedliche Dauer	nur im unteren Dosisbereich	Tod innerhalb von 2 Tagen	

*Maßeinheit für die vom Gewebe absorbierte Strahlungs-dosis
 Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz dpo-14348

Abb. 4 (Internetquelle 27): Zeitliches Auftreten unterschiedlicher Symptome nach verschiedenen großen Strahlenbelastungen

Die ersten Auswirkungen treten in Geweben auf, deren Zellen sich sehr häufig teilen.

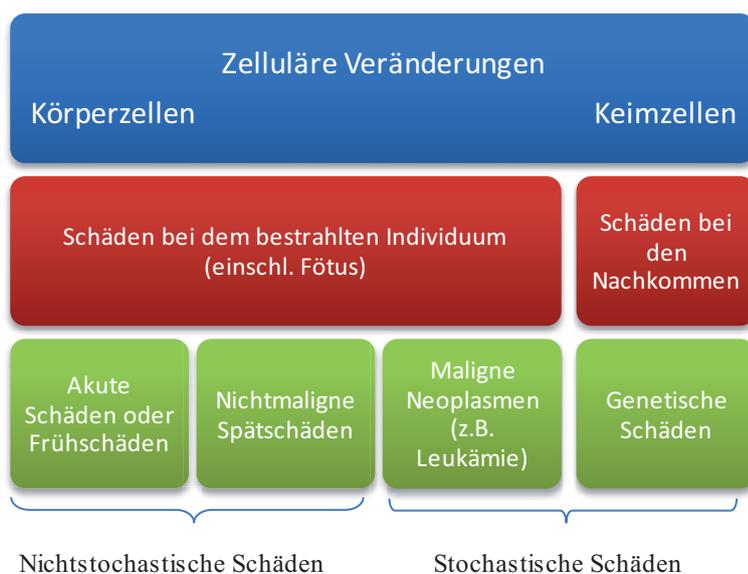
Übelkeit, Appetitlosigkeit und Erbrechen sind auf eine Funktionsstörung der Darmtätigkeit zurückzuführen. Die Darmschleimhaut erneuert sich relativ häufig (etwa alle sieben bis zehn Tage). Bei Verlust der Teilungsfähigkeit durch die Strahlenbelastung verschwindet die Darmauskleidung innerhalb kürzester Zeit und es kommt erst zu Diarrhö, später zu schweren gastrointestinalen Blutungen.

Lymphozyten werden etwa alle drei Wochen erneuert. Deswegen sinkt bei einer hohen Strahlenbelastung die Zahl der Lymphozyten recht schnell. Die Folge ist eine Schwächung des Immunsystems und damit einhergehend ein hohes Infektionsrisiko für andere Krankheiten. Auch die Zahl der Thrombozyten sinkt, wodurch lebensbedrohliche innere Blutungen entstehen können. Weitere Symptome sind eine erhöhte Temperatur und zunehmende Schwäche.

Der Verlust der Haare ist ebenfalls charakteristisch für Strahlengeschädigte, da auch Haarzellen einem sehr häufigen Teilungsprozess unterliegen. (vgl. Bolzet al., 1998, S.492; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 118; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 30)

Die Grafik zeigt nach anfangs schwachen Symptomen eine vorübergehende Stabilisierungsperiode von einigen Tagen bis zu wenigen Wochen (Walking-Ghost-Phase). Da die vorausgegangenen Symptome relativ unspezifisch sind, neigen viele Opfer dazu, einen Arztbesuch hinauszuschieben. So folgt nach fehlender Behandlung eine manifeste Erkrankung, da immer mehr Organe den Dienst versagen (Multiorganversagen), was häufig zum baldigen Tod der bestrahlten Person führt. (vgl. Internetquelle 37; vgl. Internetquelle 40)

Spätschäden dagegen sind Strahlenschäden, die erst nach einer Latenzzeit von Jahren oder Jahrzehnten auftreten.

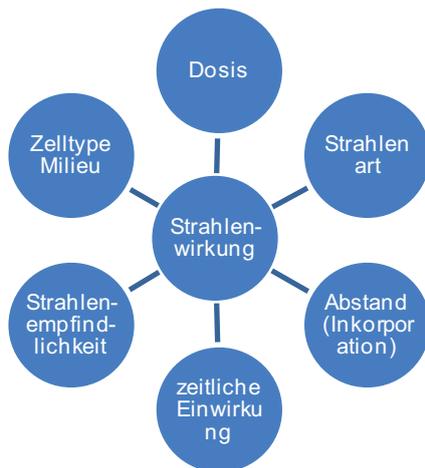


Deterministische Spätschäden, auch nichtmaligne Schäden genannt, treten meist einige Jahre nach der Strahlenexposition auf. Diese Schäden sind nicht bösartig. Hierzu gehören zum Beispiel Veränderungen des Bindegewebes, eine Trübung der Augenlinse oder eine Verringerung der Fortpflanzungsfähigkeit.

Abb. 5 (vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 32): Unterscheidung verschiedener Arten von Strahlenschäden

Stochastische Spätschäden werden auch bösartige oder maligne Schäden genannt. Hierzu gehören vor allem Krebserkrankungen. Die Latenzzeit kann hierbei sehr variieren. Leukämien haben beispielweise eine relativ kurze Latenzzeit (ca. zehn Jahre), verglichen mit anderen Tumorarten (bis zu 40 Jahre). (vgl. Bille und Schlegel, 2002, S.128; vgl. Kühnel und Schafbauer, 1998, S. 118; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 30f.)

2.2.3 Einflussfaktoren



Welche Art von Schäden eintritt, hängt von verschiedenen Faktoren ab, diese sollen in der nebenstehenden Grafik (Abb. 5) veranschaulicht werden:

Abb. 5(vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 35, S. 52f.): Einflussfaktoren auf die Strahlenwirkung

Vor allem bei deterministischen Strahlenschäden hat die Äquivalenzdosis der Strahlung einen besonders großen Einfluss auf die Strahlenwirkung. Abbildung VIII (Anhang) erläutert die Strahlenabhängigkeit von der Ganzkörper-Äquivalentdosis an einigen ausgewählten Beispielen genauer.

Die Äquivalentdosis D_q berücksichtigt zusätzlich zur Energiedosis den Qualitätsfaktor q , der für die verschiedenen Strahlungsarten unterschiedlich ist (siehe Abb. IX im Anhang, hier: Qualitätsfaktor q mit W_R beschrieben). Dadurch werden das Durchdringungsvermögen und damit die biologische Wirksamkeit mit berücksichtigt.

Äquivalentdosis = Energiedosis · Qualitätsfaktor

Die Äquivalentdosis wird in Sievert [Sv] angegeben: $1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ (da D_q keine Einheit besitzt)

Daraus ergibt sich die Grundregel zum Schutz vor Radioaktivität: Abstand, Abschirmung und Vermeidung von Inkorporation. (vgl. Harten, 2006, S. 324; vgl. Meyer und Schmidt, 2001, S.320f.; vgl. Michel und Stosch, 1992, S. 23f.)

Zudem ist der zeitliche Abstand der Teildosen ausschlaggebend: So ist eine mehrmalige kurzzeitige Bestrahlung ungefährlicher als eine einmalige, aber sehr lange. Auch sind nicht alle Körperregionen gleich strahlenempfindlich: Vor allem Lymphozyten, Stammzellen, Spermato gonien, blutbildendes Knochenmark und intestinale Epithelzellen sind besonders strahlengefährdet. (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2006, S. 35; vgl. Bunte und Bunte, 2004, S.429; vgl. Wickert, 2012, S. 192)

2.3 Der Fall Litwinenko

2.3.1 Tathergang und allgemeine Informationen zum Mord

Der Fall Litwinenko ist wohl das berühmteste Beispiel für einen Mord mittels Polonium-210.

Wie in der Einleitung bereits angesprochen, war Alexander Litwinenko 2000 nach England geflohen. Dort traf er sich am 1. November 2006 in London mit mehreren Bekannten, unter ihnen Andrej Lugovoi und Dimitri Kowtun, in der Hotelbar des Millennium Hotels zum Tee. Es wird angenommen, dass Litwinenko bei diesem Treffen das tödliche Polonium-210 verabreicht wurde. Die Inkorporation erfolgte wahrscheinlich über Litwinenkos Tee, weshalb man auch von Ingestion spricht, also einer Aufnahme der radioaktiven Strahlung über den Gastrointestinaltrakt.

Lugovoi ist, wie Litwinenko auch, ehemaliger Mitarbeiter des Geheimdiensts KGB. 2006 arbeitete er als Geschäftsmann und sagte auch bei anschließenden Befragungen aus, dass das Treffen mit Litwinenko rein geschäftlich gewesen sei. Kowtun ist ebenfalls russischer Geschäftsmann, er und Lugovoi kannten sich bereits vor diesem Treffen. Wie weit die beiden in den Mord verwickelt sind, soll später noch diskutiert werden.

Anschließend begab sich Litwinenko mit dem italienischen KGB-Experten Mario Scaramella zum Essen in eine Sushi-Bar in Piccadilly. (vgl. Internetquelle 22; vgl. Internetquelle 28; vgl. Internetquelle 33)

Kurze Zeit später erkrankte Litwinenko. Er wies sich selbst in ein Londoner Krankenhaus ein, sein Zustand verschlechterte sich allerdings zunehmend, sodass am 16. November die Londoner Polizei über den Zustand des ehemaligen Geheimagenten informiert wurde. Kurze Zeit später berichteten britische Zeitungen darüber, es wurde zunächst eine Thallium-Vergiftung vermutet. Thallium ist ein Schwermetall, das zum Beispiel als Rattengift Verwendung findet. Wie viele andere Schwermetalle auch ist es für den menschlichen Körper giftig, da es chemische Verbindungen verändert und dadurch biochemische Prozesse stoppen kann. Die Symptome sind ähnlich denen einer radioaktiven Vergiftung: abdominale Schmerzen, Müdigkeit, Kopfschmerzen, Depressionen, Appetitlosigkeit, Beinschmerzen, Haarausfall und Sehstörungen. (vgl. Internetquelle 26; vgl. Internetquelle 28; vgl. Internetquelle 31)

Am 23. November verstarb Alexander Litwinenko im Alter von 44 Jahren im Krankenhaus, seine Todesursache blieb weiterhin ungeklärt. Tags darauf wurde erstmals eine Vergiftung durch Polonium-210 vermutet, da sich Spuren der radioaktiven Substanz sowohl in dem Hotel und in der Sushi-Bar, die Litwinenko am Tag seiner Vergiftung besucht hatte, als auch in Litwinenkos Londoner Wohnung fanden. (vgl. Internetquelle 22; vgl. Internetquelle 28)

Die Mordermittlung wurde von Scotland Yard übernommen, nachdem die britische Polizei den Tod Litwinenkos am 1. Dezember offiziell als Mord eingestuft hatte. Trotz aufwendiger

Ermittlungen konnte bis heute niemand eindeutig als Litwinenkos Mörder identifiziert werden und das Verfahren wurde eingestellt. Nicht nur wegen der gesellschaftlichen und politischen Hintergründe des Mordes, sondern auch aufgrund des ungewöhnlichen Mordwerkzeugs lieferte das Thema noch mehrere Wochen Stoff für verschiedenste Verschwörungstheorien. (vgl. Internetquelle 22)

2.3.2 Vergiftung durch ^{210}Po - Eignung und Nachweismöglichkeiten

Dass Litwinenkos Todesursache erst nach seinem Tod festgestellt werden konnte, kann nicht allein den Londoner Ärzten zur Last gelegt werden. Ein Mord mittels Polonium-210 wurde im Fall Litwinenko erstmals dokumentiert.

Das radioaktive, silberfarbene Metall wurde 1897 von Marie Curie entdeckt und ist nach ihrem Heimatland Polen benannt. Von dem Element mit der Ordnungszahl 84 sind 29 verschiedene Isotope (Massenzahlen zwischen 190 und 218) bekannt. Im Besonderen soll hierbei auf das Isotop ^{210}Po eingegangen werden. (vgl. Internetquelle 21)

Polonium-210 ist in der Uran-Radium-Zerfallsreihe (siehe Anhang, Abb. II) zu finden. Es zerfällt über Alpha-Zerfall in das stabile Blei-Isotop 206 (Pb-206) mit einer Halbwertszeit von 138,4 Tagen. Aufgrund der relativ kurzen Halbwertszeit ist das Vorkommen in der Natur sehr gering, die Konzentration in der Erdkruste beträgt nur $0,2 \times 10^{-9} \text{ mg/kg}$. Größere Mengen können lediglich in Kernreaktoren unter Neutronenbeschuss von Bismut hergestellt werden:

$n + \text{Bi-209} \rightarrow \text{Bi-210} \rightarrow (\beta\text{-Zerfall}) \text{Po-210}$ (vgl. Internetquelle 9)

Somit scheint ^{210}Po auf den ersten Blick keine besonders gute Mordwaffe zu sein: Die Anschaffung ist schlichtweg zu teuer und zu aufwendig. Betrachtet man den Stoff aber näher, bemerkt man, dass Litwinenkos Mörder kaum ein besseres Mordinstrument hätte wählen können:

Polonium-210 ist ein fast ausschließlicher α -Strahler. Dies stellt einen gefahrlosen Transport für den Überbringer sicher, da das Nuklid sehr einfach abgeschirmt werden kann. Auch beispielsweise am Flughafen kann der Stoff nicht nachgewiesen werden. Zudem ist die Zerstörungskraft von α -Strahlen auf menschliche Zellen 20-mal größer als beispielsweise die von β - oder γ -Strahlen.

Auch die Halbwertszeit von ^{210}Po ist für einen Mord relativ ideal, da sie lange genug für den Transport ist aber gleichzeitig kurz genug, dass der Zerfall im Körper relativ schnell abläuft. Die spezifische Aktivität beträgt $1,67 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$, das heißt in 1 μg Po-210 finden pro Sekunde 167 Millionen Alpha-Zerfälle statt. Das entspricht einer Strahlenbelastung von circa 200 Sv. Zum Vergleich: Die natürliche Strahlenbelastung eines durchschnittlichen Deutschen liegt bei 24 mSv im Jahr (effektive Dosis). (vgl. Internetquelle 24)

Somit ist auch ersichtlich, dass für eine tödliche Vergiftung winzige Mengen des Stoffes benötigt werden, wodurch eine unbemerkte Zufuhr über Ingestion leicht möglich ist.

“When entering the human body (through inhalation, e. g. by cigarette smoking, food ingestion or absorbed through a skin wound) it constitutes a strong poison due to its radiotoxic characteristic. Its chemical toxicity is, by comparison, some orders of magnitude lower.” (Oeh et al., 2009, S. 198)

Das heißt, dass Polonium als ein Schwermetall, also chemisch, wie schon in Bezug auf Thallium angesprochen, erhebliche Schäden in der menschlichen Zelle hervorruft, diese aber im Vergleich zu den durch Radioaktivität erzeugten Schäden vernachlässigbar sind.

Gelangt das Polonium in den Körper, nimmt dieser etwa 10% des Strahlenmaterials auf. Dieses verteilt sich über den Körper, größere Mengen lagern sich vor allem in Leber und Nieren ab (siehe Abb. X im Anhang).

Der Körper baut das Polonium durch Stoffwechselforgänge teilweise ab, die Halbwertszeit hierfür (biologische HWZ) beträgt 50 Tage, zusammen mit der physikalischen Halbwertszeit ergibt sich daraus eine effektive Halbwertszeit von circa 37 Tagen.

Im Anhang findet sich zudem ein Diagramm (Abb. XI), das die tägliche ^{210}Po -Ausscheidungsrate im Urin nach einer Ingestion im Laufe einiger Wochen zeigt.

Hinzu kommt, dass ein Nachweis von Polonium-210 im Körper kaum möglich ist, da die α -Strahlen den Körper nicht verlassen und die Intensität der γ -Strahlen zu gering ist. Ein indirekter Nachweis ist zwar über alphaspektrometrische Analytik von Körperausscheidungen möglich, dies dauert allerdings relativ lang. (vgl. Internetquelle 9; vgl. Internetquelle 21)

Deshalb war den Ärzten des University College Hospitals in London bis zu Litwinenkos Tod nicht klar, mit welcher Art von Vergiftung sie es zu tun hatten, was eine Behandlung fast unmöglich machte. So verschlechterte sich sein Zustand fortlaufend: Er nahm ab, konnte sich kaum noch bewegen und seine Haare fielen aus. Im Anhang sind zwei Photographien (Abb. XII und XIII), die Litwinenko vor und nach seiner Vergiftung zeigen. (vgl. Internetquelle 38)

Zusammenfassend kann angenommen werden, dass Litwinenko am 23. November 2006 an Multiorganversagen kombiniert mit Knochenmarksschäden, verursacht durch die Ingestion von Polonium-210, starb. Die geschätzte tödliche Dosis von ^{210}Po liegt im Einnahmebereich von 27 bis 281 MBq oder 0,2 -1,7 $\mu\text{g } ^{210}\text{Po}$, je nach Körpergewicht der exponierten Person und vielen anderen Faktoren.

Konkret auf den Fall Litwinenko bezogen, geht Harrison et al. davon aus, dass eine Dosis von 200 bis 600 MBq ^{210}Po Litwinenko innerhalb von etwa einem Monat getötet hätte, ausgehend davon, dass 50% der Dosis in das Blut aufgenommen wird. (vgl. Harrison et al., 2007, S. 39; vgl. Oeh U. et al., 2009, S. 200)

Diesbezüglich unterschieden sich die Quellen allerdings sehr: So geht die Health Protection Agency aus London sogar von 6 $\mu\text{g } ^{210}\text{Po}$ als verwendete Dosis aus. (vgl. Bailey et al., 2010, S. 3)

2.3.3 Radioaktive Spuren und Vermutungen zur Täterschaft

Der Mordfall Litwinenko blieb in vielerlei Hinsicht nicht ohne Folgen:

Nach Litwinenkos Tod wurden in den beiden Krankenhäusern, in denen er behandelt worden war, und an weiteren Orten, wie zum Beispiel der Sushi-Bar, in der Wohnung des früheren russischen Agenten und in einem Hotel im Westend, radioaktive Spuren entdeckt.

Die britische Gesundheitsbehörde führte daraufhin bis August 2007 an insgesamt 753 Personen, die sich in dieser Zeit dort aufgehalten hatten, Urinalysen durch. Die meisten Werte waren nur minimal erhöht, der höchste festgestellte Wert lag bei 100 mSv, doch selbst dieser Wert ist nicht annähernd groß genug, um eine Strahlenkrankheit hervorzurufen. (vgl. Bailey et al., 2010, S. 3; vgl. Internetquelle 38)

Im Anhang befindet sich eine Tabelle (Abb. XIV) von der HPA, die die angenommenen Ursachen für verschiedene Strahlungsbelastungen im Fall Litwinenko, basierend auf der gemessenen ^{210}Po -Konzentrationen im Urin, zeigt.

Aber nicht nur in London, sondern auch in Russland und Deutschland sind ungewöhnliche Spuren von ^{210}Po gefunden worden:

Dimitri Kowtun war, wenige Tage nachdem er sich mit Litwinenko im Millennium Hotel getroffen hatte, über Hamburg zurück nach Moskau gereist. In der Hamburger Wohnung seiner Ex-Frau fanden sich Spuren der radioaktiven Substanz, weshalb das Bundeskriminalamt ein Ermittlungsverfahren einleitete. Entweder war Kowtun erst bei der Vergiftung Litwinenkos mit ^{210}Po in Kontakt gekommen oder er hatte sich bereits beim Transport der Substanz nach London selbst kontaminiert. Obwohl nicht eindeutig feststellbar war, ob Kowtun in diesem Fall Opfer oder Täter war, ging das BKA aufgrund der verdächtig hohen Messwerte von „unerlaubtem Umgang und Missbrauch von radioaktiven Stoffen“ aus und leitete ein Verfahren gegen den russischen Geschäftsmann ein.

Daraufhin ließ die russische Regierung Kowtun in ein Moskauer Krankenhaus einweisen. Von dort aus sagte dieser im Dezember 2006 der Süddeutschen Zeitung:

"Ich habe mit Polonium nie was zu tun gehabt. Ich habe nichts davon gehört und keiner hat es mir gegeben."(Internetquelle 34)

Aus Mangel an Beweisen musste die deutsche Justiz das Verfahren am 6. November 2009 einstellen. (vgl. Internetquelle 16; vgl. Internetquelle 20; vgl. Internetquelle 28; vgl. Internetquelle 39)

Auch Mario Scaramella und Andrej Lugovoi wurden mit Symptomen einer radioaktiven Vergiftung ins Krankenhaus eingeliefert, Lugovoi, wie Kowtun auch, in Moskau. Doch hat er auf seinem Weg dorthin ebenfalls eine radioaktive Spur hinterlassen: Ende November wurden in zwei Passagiermaschinen der Fluggesellschaft British Airways radioaktive Rückstände gefunden. In einer dieser Maschinen war Lugovoi zuvor nach Moskau geflogen. Bei den britischen Behörden galt Lugovoi lange als Hauptverdächtiger, am 22. Mai 2007 erhob die briti-

sche Staatsanwaltschaft Anklage wegen Mordes an Litwinenko. Dass Russland sich weigerte, den Geschäftsmann nach England auszuliefern, verstärkte die Spannungen zwischen den beiden Ländern. (vgl. Internetquelle 16; vgl. Internetquelle 19; vgl. Internetquelle 20)

Die Frage nach dem Täter lässt sich allerdings auch aus einer anderen Perspektive betrachten, indem man an den Anfang der Überlegungen die Frage „Cui boni?“, also „Wem nützt der Tod Litwinenkos?“ stellt. Zieht man bei der Beantwortung dieser Frage die Tatsache, dass sich Polonium nur mittels Kernreaktoren (und zwar teuer und aufwendig) oder auf dem Schwarzmarkt aneignen lässt, fällt der Verdacht in erster Linie auf den russischen Geheimdienst. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, war Alexander Litwinenko schon lange ein Dorn im Auge der russischen Regierung. Er galt als scharfer Kritiker des russischen Präsidenten Wladimir Putin, der früher selbst Offizier des KGB war. Doch selbst wenn Litwinenko keine provokativ kritischen Bücher veröffentlicht hätte, so wäre allein die Tatsache, dass er ein Überläufer, ein Verräter war, Grund genug den ehemaligen Agenten ermorden zu lassen.

Das Motiv seiner Ermordung könnte allerdings genauso gut persönliche Hintergründe haben: So könnte ein Bekannter Litwinenkos, der noch eine alte Rechnung zu begleichen hatte, dahinterstecken, der nur versuchte, den Verdacht auf den russischen Geheimdienst zu lenken. Hierfür spricht, dass ein erfahrener russischer Geheimagent keine so offensichtlichen Strahlenspuren hinterlassen hätte. Es hätte bereits ausgereicht, sich die Hände und die Kleidung zu waschen, schon wäre die Spur nicht mehr nachweisbar gewesen. Zudem müsste sich der Täter dabei selbst kontaminiert haben. Bei einem fast reinen α -Strahler bedeutet das, dass sich der Mörder entweder völlig unerfahren und zudem unvorsichtig bezüglich des radioaktiven Materials verhielt, oder die Spur wurde, wie viele Zeitungen vermuteten, absichtlich gelegt, um den Verdacht auf den russischen Geheimdienst zu lenken. (vgl. Internetquelle 32; vgl. Internetquelle 34; vgl. Internetquelle 37)

Dies sind allerdings nur Spekulationen ohne jegliche Beweisgrundlage. Eine Lösung des Falls ist jetzt, nach sechs Jahren, wohl recht unwahrscheinlich, solange keine neuen Hinweise auftauchen. Georg Büchner würde vielleicht sagen:

„Ein guter Mord, ein echter Mord, ein schöner Mord. So schön, dass man ihn nur verlangen zu tun kann. Wir haben schon lange so keinen gehabt.“ (Büchner, 1988, S. 28)

Ich denke, dass der Fall Litwinenko, aus rein forensischer Sicht betrachtet, mit Sicherheit sehr interessant und innovativ ist. Entfernt man sich aber vom Fall und geht zum Menschen Litwinenko, ist eine so objektive Betrachtung nicht mehr möglich.

3. Wissenschaft und Gesellschaft - Die Gefährlichkeit der Radioaktivität

Die Beschäftigung mit dem Fall Litwinenko hat mir gezeigt, dass Naturwissenschaften nicht wertfrei sind, sondern in Gesellschaft und Politik hineinreichen:

„Unsere Wissenschaft ist schrecklich geworden, unsere Forschung gefährlich, unsere Erkenntnis tödlich. Es gibt für uns Physiker nur noch die Kapitulation vor der Wirklichkeit. Sie ist uns nicht gewachsen, sie geht an uns zugrunde.“ (Dürrenmatt, 1980, S.74)

Das Thema Radioaktivität zeigt, dass Naturwissenschaften nicht immer nur einen glänzenden Fortschritt mit sich bringen, sondern dass es auch Schattenseiten gibt: Marie Curie (1867-1934) und ihre Tochter Irène Joliot-Curie (1897-1956) starben beide an Leukämie, höchstwahrscheinlich aufgrund ihrer langwierigen Arbeit mit radioaktiven Stoffen ohne ausreichende Protektion. (vgl. Internetquelle 12; vgl. Internetquelle 15)

Während sich unser Wissen über die Radioaktivität seitdem fortlaufend vergrößert, ist die Gefährlichkeit der Radioaktivität nach wie vor gegeben:

Die Politiker wissen nicht wohin mit ihren Atomabfällen, der Iran droht schon seit mehreren Jahren mit einer Atombombe, Tschernobyl und japanische Städte wie Hiroshima, Nagasaki oder Fukushima haben ganz eigene schreckliche Erfahrungen mit Radioaktivität gemacht. Es ist längst nicht mehr nur eine interessante wissenschaftliche Entdeckung, sondern sie betrifft mittlerweile Politik, Wirtschaft, Kultur und damit jeden Einzelnen von uns:

„Der Inhalt der Physiker geht nur die Physiker an, die Auswirkung alle Menschen. Was alle angeht, können nur alle lösen.“ (Dürrenmatt, 1980, S.92)

4. Literaturverzeichnis

4.1 Literaturquellen

- ❖ Bailey M. R. et al. 2010. Individual monitoring conducted by the health protection agency in the London polonium-210 incident. Chilton
- ❖ Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. 1986. Strahlenschutz Radioaktivität und Gesundheit (3. Auflage). München
- ❖ Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. 2006. Radioaktivität, Röntgenstrahlen und Gesundheit, München
- ❖ Bille J. und Schlegel W. (Hrsg.) 2002. Medizinische Physik, Band 2: Medizinische Strahlenphysik. Springer-Verlag, Heidelberg
- ❖ Bolz J. et al. 1998. Metzler Physik (3. Auflage). Schrödel Verlag GmbH, Hannover
- ❖ Bredthauer W. et al. 2007. Impulse Physik (1. Auflage). Ernst Klett Verlag GmbH, Stuttgart
- ❖ Büchner G. 1988. Woyzek. Reclam, Ditzingen
- ❖ Bünthe H. und Bünthe K. 2004. Das Spektrum der Medizin. Schattauer GmbH, Augsburg
- ❖ Christoph Giesen, 27.2.2012, Süddeutsche Zeitung Nr. 48, Seite 3
- ❖ Friedrich Dürrenmatt, 1980, Die Physiker (2. Ausgabe), Diogenes, Basel
- ❖ Harrison J. et al. 2007. Polonium-210 as a poison. Journal of Radiological Protection. 27: 17–40
- ❖ Harten U. 2006. Physik für Mediziner. Springer-Verlag, Sturz/Würzburg
- ❖ Jung W., Lanz G., Lorz R. und Zoubek W. 1983. Das Abiturwissen Physik. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main
- ❖ Kellerer A. 2006. Strahlenwirkung: Von der Dosis zum Risiko. Mensch und Umwelt (Hrsg.: GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH in der Helmholtz-gemeinschaft). Heft 18: 23-36
- ❖ Kühnel S. und Schafbauer H., 1998. Physik 13 (2. Auflage). Oldenburg Verlag, München
- ❖ Meyer. L. und Schmidt G. D. 2001. Basiswissen Schule Physik. Dudenverlag, Berlin/Mannheim
- ❖ Michel U. und Stosch R. 1992. Chemie für Fachoberschulen. Stam-Verlag, Malden
- ❖ Oeh U. et al. 2009. Background information about polonium 210 – consideration on its biokinetics and internal dosimetry. Kerntechnik. Heft 4: 196-200
- ❖ Polit W. 1992. Radioaktivität. Bibliographisches Institut und F. A. Brockhaus AG, Mannheim
- ❖ Wickert L. 2012. Radioaktivität – Wirkung auf die Zelle. Biologie in unserer Zeit. Heft 3: 188-195

4.2 Internetquellen

1. <http://anorganik.chemie.vias.org/halbwertszeit.html> (Halbwertszeit, Herausgeber: H. Lohninger, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
2. http://de.wikipedia.org/wiki/Alexander_Litwinenko (Alexander Walterowitsch Litwinenko, verschiedene Autoren, zuletzt aufgerufen am 27.10.2012)
3. <http://de.wikipedia.org/wiki/Neptunium-Reihe> (Neptunium-Reihe, verschiedene Autoren, zuletzt aufgerufen am 27.10.2012)
4. <http://de.wikipedia.org/wiki/Thorium-Reihe> (Thorium-Reihe, verschiedene Autoren, zuletzt aufgerufen am 27.10.2012)
5. <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Actinium-Reihe> (Uran-Actinium-Reihe, verschiedene Autoren, zuletzt aufgerufen am 27.10.2012)
6. <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Radium-Reihe> (Uran-Radium-Reihe, verschiedene Autoren, zuletzt aufgerufen am 27.10.2012)

7. http://de.wikiquote.org/wiki/Lateinische_Sprichw%C3%B6rter#D (Lateinische Sprichwörter, verschiedene Autoren, Herausgeber: unbekannt, zuletzt aufgerufen am 27.10.2012)
8. <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/4433> (Radioaktivität, hier verwendet: Abbildung 5106: Materialien zur Abschirmung von Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlen, Herausgeber: Universität Göttingen, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
9. <http://uwa.physik.uni-oldenburg.de/21920.html> (Daten zu Polonium-210, Autor: Heinz Helmers, Herausgeber: Universität Oldenburg, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
10. http://wurzelzieher.de/Alexander_Walterowitsch_Litwinnenko/Leben.aspx (Alexander Walterowitsch Litwinnenko, Autor: M. Darmer, zuletzt aufgerufen am 16.04.2012 (nicht mehr zugänglich, deswegen leider nicht auf der CD als pdf-Datei))
11. <http://www.biologie-online.eu/genetik/mutation.php#2> (Genetik, Mutationen, Autorin: Matei Miha, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
12. <http://www.dhm.de/lemo/html/biografien/CurieMarie/> (Marie Curie: Lebenslauf, Herausgeber: Deutsches Historisches Museum, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
13. http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS_derivate_000000002510/08_kap8.pdf?hosts= (Reaktive Sauerstoffspezies, Herausgeber: Freie Universität Berlin, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
14. <http://www.felixdeiters.de/Physik/Entdeckung.htm> (Henri Becquerel, Marie Curie und die Radioaktivität, Autor: unbekannt, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
15. http://www.fh-ebeck.de/Inhalt/05_Presse_und_BesucherInnen_Ch051/90_Services/04_Posterausstellung/Joliot_Curie/index.html (Irène Joliot-Curie, Herausgeber: Fachhochschule Lübeck, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
16. http://www.focus.de/politik/ausland/fall-litwinnenko-strahlengift-verfahren-eingestellt_aid_453403.html (Fall Litwinnenko: Strahlengift-Verfahren eingestellt, Autor: dpa, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
17. <http://www.gagfactory.com/misc/cotti/Radioaktivitaet.pdf> (Die Entdeckungsgeschichte der Radioaktivität, Autor: Prof. Dr. Piero Cotti, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
18. http://www.gorama.de/Wissen/Naturwissenschaft/StrahlungenUmwelt/Wirkung_hoher_strahlendosen.html (Wirkung hoher Strahlendosen auf den Menschen, Autor: Dr. Ramm, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
19. <http://www.guardian.co.uk/uk/2006/dec/08/russia.world1> (Profile: Andrei Lugovoi, Prime suspect - or key witness?, Autor: Ian Cobain, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
20. <http://www.helles-koepfchen.de/artikel/1929.html> (Der Fall Litwinnenko: Rätselhafter Giftmord, Familie in Hamburg ist nicht mit Polonium verseucht, Autor: Anna Schäfer, Herausgeber: Kiraka, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
21. <http://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/FLUGS/PDF/Themen/Strahlung/Polonium.pdf> (Hintergrundinformationen zu Polonium 210, Autor: Dr. Uwe Oeh, Herausgeber: Helmholtz Zentrum München, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
22. <http://www.independent.co.uk/news/uk/crime/who-killed-litwinnenko-425690.html> (Who killed Litwinnenko?, Autor: Cahal Milmo, Herausgeber: The independent, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
23. <http://www.j-schoenen.de/abc-manual/a/Radioaktivitaet-Dateien/radioactivity-Dateien/nuklidtabelle01.gif> (Radioaktivität, hier verwendet: Nuklidkarte, Autor: Dr. med. Jörg D. Schoenen, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
24. <http://www.kernenergie-wissen.de/strahlenbelastung.html> (Natürliche Strahlenbelastung, Autor: Dr. Andreas Kronenberg, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)

25. http://www.kernfragen.de/kernfragen/lexikon/s/strahlungs_wichtungsfaktoren.php (Strahlungs-Wichtungsfaktoren, Herausgeber: Informationskreis Kernenergie, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
26. <http://www.lenntech.de/pse/elemente/tl.htm> (Thallium (Tl), Herausgeber: lenntech, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
27. <http://www.mainpost.de/fotos/nationale-news/cme169206,3467913> (Grafik zum Thema Strahlenkrankheit, Autor: dpa-infografik GmbH, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
28. <http://www.multimedixaxis.de/threads/89808-Der-Fall-Litwinenko> (Der Fall Litwinenko, Forum mit Quellen verschiedener Autoren, zuletzt aufgerufen am 16.04.2012)
29. <http://www.physik.uni-kl.de/uploads/media/Strahlenbiologie.pdf> (Strahlenbiologie, Autor: Dr. Hans-Jochen Foth, zuletzt aufgerufen am 16.04.2012 (nicht mehr als zugänglich, deswegen leider nicht auf der CD als pdf-Datei))
30. http://www.physik.uni-muenchen.de/lehre/vorlesungen/wise_07_08/EP/vorlesung/vorlesung27.pdf (Strahlung, Atome, Kerne; Autoren: Prof. Dr. Wolfgang Dünnweber und Prof. Dr. Martin Fässler, Herausgeber: Ludwig Maximilian Universität München, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
31. <http://www.spiegel.de/politik/ausland/der-fall-litwinenko-die-bastarde-haben-mich-gekriegt-a-450434.html> (Der Fall Litwinenko "Die Bastarde haben mich gekriegt", Autor: dpa, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
32. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/litwinenko-mord-wurde-die-polonium-spur-absichtlich-gelegt-a-453823.html> (Litwinenko-Mord: Wurde die Polonium-Spur absichtlich gelegt?, Autor: Stefan Schmitt, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
33. <http://www.sueddeutsche.de/politik/bildstrecke-who-is-who-im-fall-litwinenko-1.756846-4> (Bildstrecke: Who is who im Fall Litwinenko, Herausgeber: Süddeutsche Zeitung, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
34. <http://www.sueddeutsche.de/politik/polonium-affaere-kowtun-bezichtigt-litwinenko-des-atom-schmuggels-1.870398> (Polonium-Affäre Kowtun bezichtigt Litwinenko des Atom-Schmuggels, Autor: dpa, Herausgeber: Süddeutsche Zeitung, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
35. <http://www.umingo.de/doku.php?id=politik:art02.2> (Evolution und Radioaktivität, Autor: unbekannt, zuletzt aufgerufen am 27.10.2012)
36. <http://www.webbwerb2010.de/2010/user0482010/5622/10201.html> (Alexander Litwinenko, hier verwendet: Abschiedsbrief an seinen Vater, Autoren: L.Scholz, S.Wippermann, J.Bäß, A.Lenzing, T.Naeschen, R.Borovnik, J.Winkels, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
37. <http://www.zeit.de/2006/50/Nebuloeser-Strahlentod> (Nebulöser Strahlentod, Autor: Ivo Maruszyk, Herausgeber: Zeit online, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
38. <http://www.zeit.de/online/2006/48/Litwinenko> (Giftige Grüße aus Moskau, Autor: Jürgen Krönig, Herausgeber: Zeit online, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
39. <http://www.zeit.de/online/2006/50/litwinenko-spur-hamburg> (Nebulöser Strahlentod, Herausgeber: Zeit online, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)
40. <http://www.zw-jena.de/energie/wechselwirkung.html> (Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie, hier verwendet: Grafik zur Wechselwirkung von α -Strahlen mit Materie; Herausgeber: Zukunftswerkstatt Jena, zuletzt aufgerufen am 09.09.2012)

5. Anhang für weitere Grafiken

Kern	$T_{1/2}$
Po ²¹²	$3 \cdot 10^{-7}$ s
Rn ²¹⁸	0,02 s
n (Neutron)	12 min
Bi ²⁰⁶	6,3 d
Co ⁶⁰	5,29 a
Ni ⁵⁹	$\approx 10^5$ a
Pt ¹⁹⁰	10^{12} a
Pb ²⁰⁴	$1,4 \cdot 10^{17}$ a

Abb. I (Internetquelle 30): Beispiele verschiedener Isotope mit Halbwertszeiten

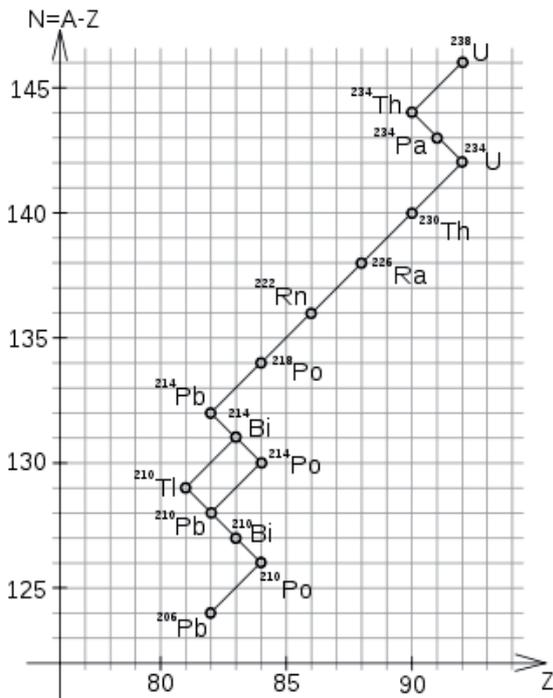


Abb. II (Internetquelle 6): Uran-Radium-Zerfallsreihe

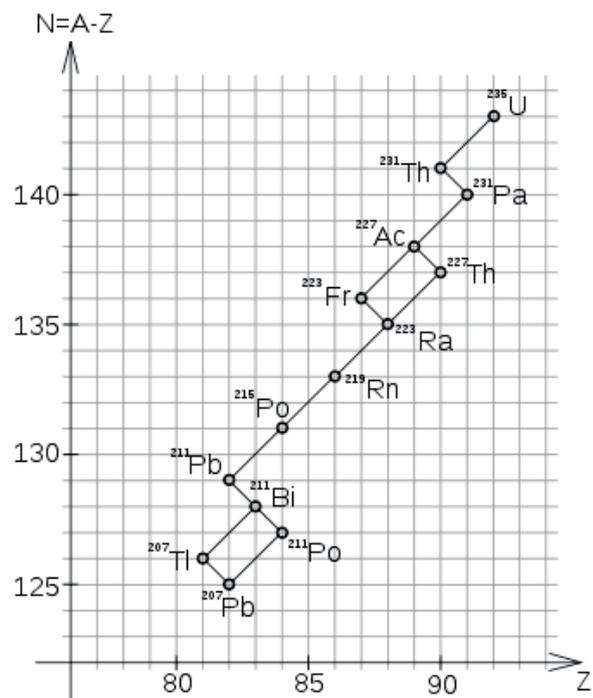


Abb. III (Internetquelle 5): Uran-Actinium-Zerfallsreihe

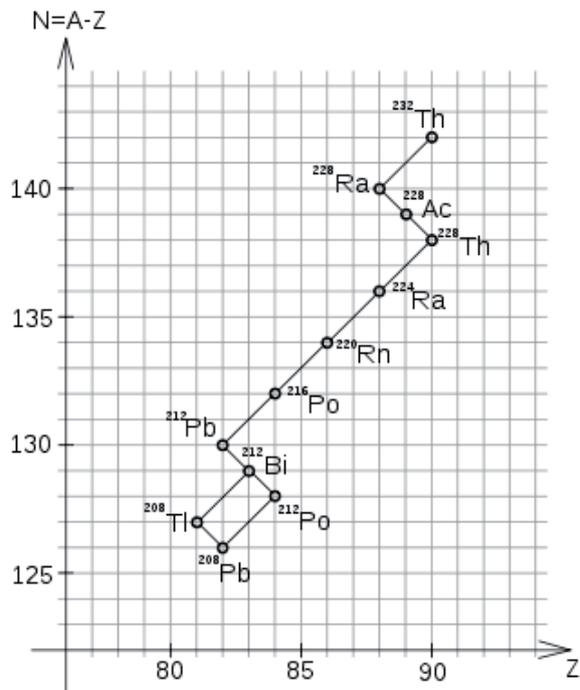


Abb. IV (Internetquelle 4): Thorium-Zerfallsreihe

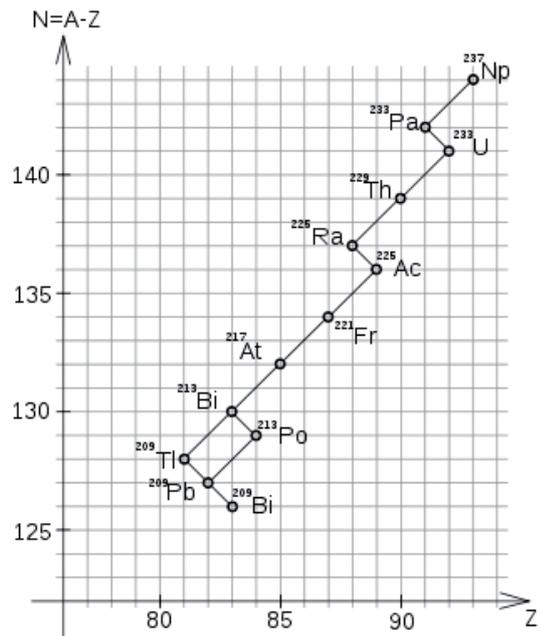


Abb. V (Internetquelle 3): Neptunium-Zerfallsreihe

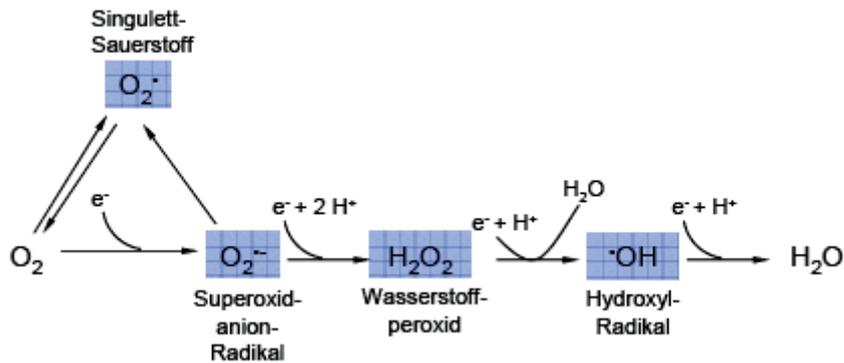
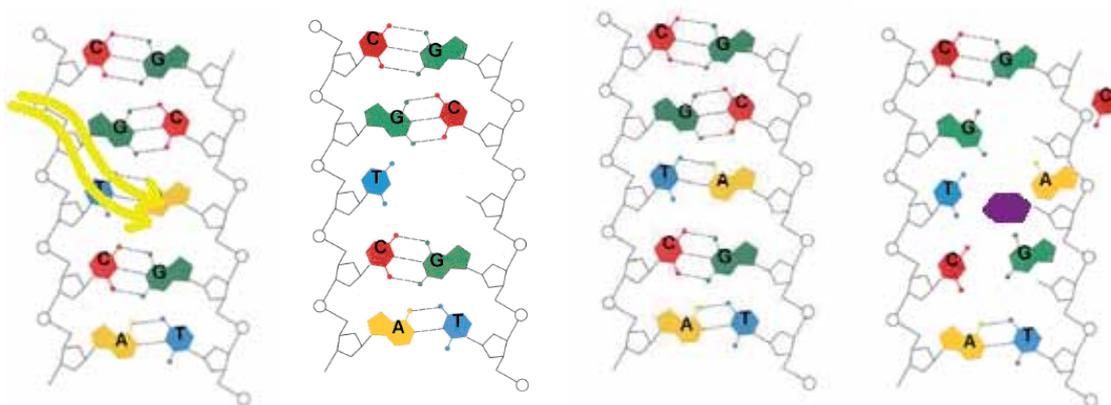


Abb.VI (Internetquelle 13): Beispiele einiger ROS und mögliche Reaktionen



Strahlung trifft auf die DNA → Basenverlust

Enzyme „reparieren die DNA“ → Ausgangszustand

Abb.VII (vgl. Internetquelle 29): Möglicher Ablauf eines Reparaturvorgangs an der DNA

Ganzkörper-Äquivalentdosis	Wirkungen auf den menschlichen Organismus
Bis ca. 1 Sievert	Eine Äquivalentdosis des ganzen Körpers bis etwa 1 Sv führt zu Müdigkeit, Unwohlsein und weiteren Beschwerden. Etwa 10% der Betroffenen versterben. Das Krebsrisiko ist um ca. 7,5% erhöht.
Von 1 bis 2 Sievert	Es gibt erhebliche Symptome wie Müdigkeit, Erbrechen und Durchfall (auch blutig). Für kranke und ältere Menschen besteht ein erhöhtes Risiko. Es käme zu einer Erhöhung der Letalität von ca. 10% bis 20% innerhalb von 4-6 Wochen. Man spricht von einem Strahlenkater. Das Krebsrisiko ist später über 10% erhöht.
Von 2 bis 3 Sievert	Schwere Strahlenkrankheit, mit erheblichen Symptomen. Die Blut bildenden Zellen im roten Knochenmark werden geschädigt, ebenso die Zellen des Magen-Darm-Traktes. Es käme zu einer Erhöhung der Letalität von ca. 40% nach 4-6 Wochen. Das Krebsrisiko ist später erheblich, über 15% erhöht.
Von 3 bis 4 Sievert	Sehr schwere Strahlenkrankheit. Symptome wie vorher, aber in verstärkter Form. Eine intensiv medizinische Versorgung wird erforderlich. Es käme zu einer Erhöhung der Letalität von ca. 50% nach 4-6 Wochen. Beim Überleben ist später das Krebsrisiko erheblich, möglicherweise bis zu 20%, erhöht.
Von 4 bis 6 Sievert	Extrem schwere Strahlenkrankheit mit schweren Blutungen und einem extrem schlechten Allgemeinbefinden. Bei 6 Sv ist trotz einer intensiv medizinischen Betreuung mit einer Letalität von fast 100% zu rechnen.
Von 6 bis 8 Sievert	Eine derartige Strahlenbelastung wird nicht überlebt. Die Zellen des Magen-Darm-Traktes sind zerstört, die Blut bildenden Zellen im roten Knochenmark sind zerstört und zahlreiche innere Organe stark in Mitleidenschaft gezogen. Die Betroffenen sterben innerhalb von etwa vier Wochen unter geradezu erbärmlichen Umständen.
Von 8 bis 10 Sievert	Der Tod tritt mit einer Sicherheit von 100% innerhalb von etwa vier Wochen ein.
Von 10 bis 20 Sievert	Der Tod tritt mit einer Sicherheit von 100% nach ein bis zwei Wochen ein.
Über 20 Sievert	Der Tod tritt mit einer Sicherheit von 100% nach ca. 7 Tagen ein.
Über 50 Sievert	Der Tod tritt innerhalb von Stunden ein, neben all den bereits geschilderten Schäden kommt es auch zu Schäden im zentralen Nervensystem, so dass die Betroffenen bereits sehr schnell nach der Bestrahlung das Bewusstsein verlieren.

Abb. VIII (Internetquelle 18): Auswirkungen verschiedener Ganzkörper-Äquivalentdosen auf den Menschen

Strahlenart und -energie	Strahlen-Wichtungsfaktor w_R
Photonen, aller Energien	1
Elektronen, Myonen, alle Energien	1
Neutronen	
< 10 keV	5
10 keV bis 100 keV	10
> 100 keV bis 2 MeV	20
> 2 MeV bis 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protonen > 2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne	20

Abb. IX (Internetquelle 25): Strahlungswichtungsfaktoren verschiedener Strahlungsarten

Zeitverlauf der Organdosen und Effektiven Folgedosis nach Ingestion von Po-210

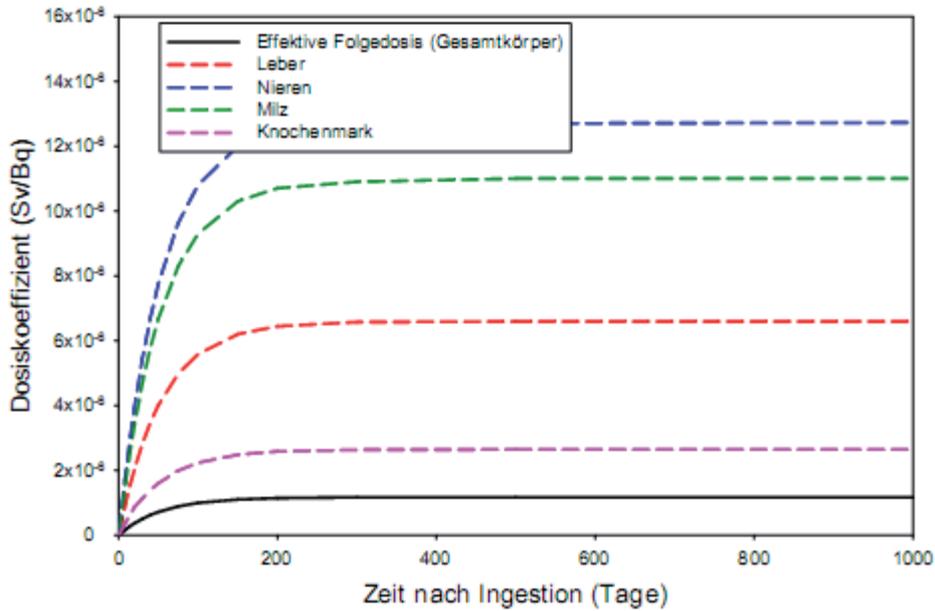


Abb. X (Internetquelle 21): Ablagerung des inkorporierten ²¹⁰Po in verschiedenen Körperbereichen in Abhängigkeit von der Zeit

Tägliche Po-210 Ausscheidungsrate im Urin (nach Ingestion)

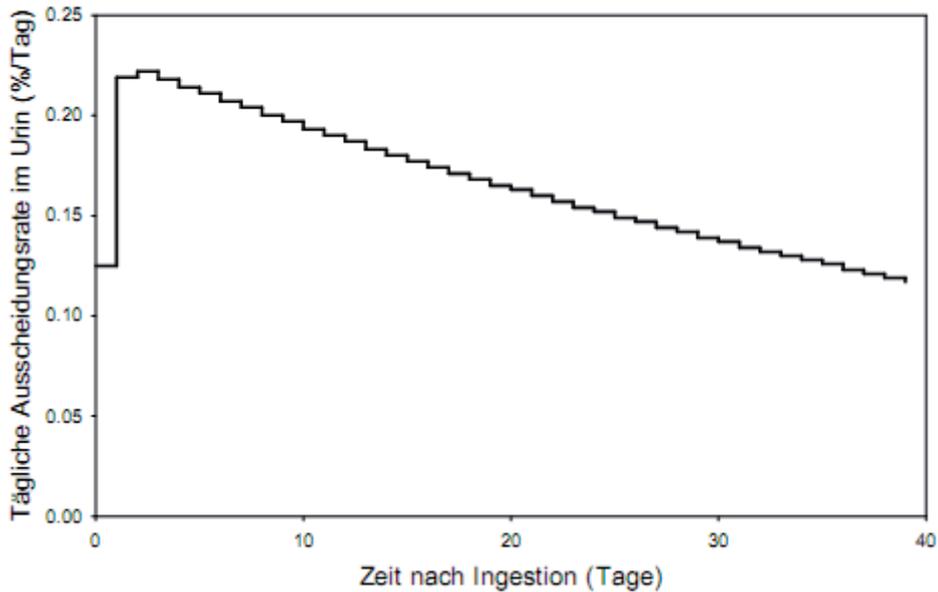


Abb. XI (Internetquelle 21): Tägliche ²¹⁰Po Ausscheidungsrate im Urin nach Ingestion



Abb. XII (Internetquelle 20): Alexander Litwinenko vor der Vergiftung



Abb. XIII (Internetquelle 39): Alexander Litwinenko im Krankenhaus, gezeichnet von den Folgen der Vergiftung

Table 8 Assumed routes of intake and dose conversion factors for Category 3 assessments of dose from urine concentration

Route of intake	Assumption	Examples	Dose (mSv) assessed from 1 Bq d ⁻¹ excreted in urine*
Very likely to be inhalation	100% inhalation	Nurses trained in hospital hygiene caring for Mr Litvinenko	26
More likely to be inhalation than ingestion	67% inhalation & 33% ingestion	Chambermaids making beds in contaminated rooms; room cleaners; people close to Mr Litvinenko after he was contaminated (e.g. in a bar or restaurant at same time as Mr Litvinenko)	12
No specific information	50% inhalation & 50% ingestion	Hotel guests; room service waiters; workers in contaminated offices	8
More likely to be ingestion than inhalation	33% inhalation & 67% ingestion	People working in or visiting a bar or restaurant; but not on the day that Mr Litvinenko visited	5

*at 20 days after acute intake, assuming inhalation of ambient aerosol.

Abb. XIV (Bailey et al., 2010, S. 34): Angenommene Ursachen für gemessene ²¹⁰Po-Konzentrationen im Urin bei verschiedenen Beispielen

6. Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum, Unterschrift:
