



Einleitung

Plutonium wird als eines der gefährlichsten Elemente der Welt angesehen. [1]

Dies basiert zum einen auf dessen direkter Wirkung auf den Menschen. Plutonium ist wie viele Schwermetalle hochgiftig. Dabei reichen bereits Mengen im zweistelligen Milligrammbereich für eine tödliche Dosis. Neben der chemischen Wirkung stellt vor allem die Radioaktivität eine ernstzunehmende Gefahrenquelle im Umgang mit Plutonium dar. Die α -Strahlung, die durch das häufigste Plutonium-Isotop ^{239}Pu ausgestrahlt wird, kann bereits durch die oberste Hautschicht abgeschirmt werden. Wird das Isotop allerdings durch kontaminierte Nahrung oder eingeatmeten Feinstaub aufgenommen, dann werden die Gewebe ungeschützt und über lange Zeit mit Strahlung belastet, was zu unkontrolliertem Zellwachstum und Tumoren, vor allem in der Lunge und im Verdauungstrakt, führen kann. [2]

Neben dem direkten Gefährdungspotential von Plutonium, bezieht sich die Gefahr von Plutonium zum anderen vor allem auf dessen indirekte Wirkung auf die Menschheit in Vergangenheit und Zukunft. Plutonium war beispielsweise Bestandteil der Atombombe „Fat Man“, welche 1945 über Nagasaki abgeworfen wurde. [1] Heute sind weltweit knapp 14.500 Atomsprenköpfe u.a. mit Plutonium vorhanden, deren Sprengkraft, Effektivität und damit auch die Anzahl potentieller Opfer mit der Weiterentwicklung der letzten Jahre gesteigert wurde. [3]

Plutonium stellt aus naturwissenschaftlicher, aber auch aus politischer Perspektive, ein bedeutendes chemisches Element dar, weshalb es im Folgenden, bezogen auf diese Bereiche, vorgestellt werden soll.

Allgemeines zum Element Plutonium

Plutonium ist ein chemisches Element, welches mit einer Kernladungszahl von 94 zur Gruppe der Actinoide gezählt wird. Das silberglänzende Schwermetall hat eine hohe Dichte von $19,86 \text{ g/cm}^3$ und weist verglichen mit anderen Metallen eine schlechte elektrische und thermische Leitfähigkeit auf. [4]. Das Schwermetall ist unedel und sehr reaktiv, es bildet nach längerer Lagerung an der Luft durch Oxidation eine dicke, pulvrige, dunkelgrüne Oxidschicht. [5] Neben dem dabei entstandenen Pu(VII) kann Plutonium in weiteren Oxidationsstufen zwischen -3 und +7 existieren, wobei die stabilste Form das braune Pu(IV) darstellt. [4]



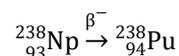
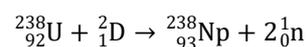
Abbildung 1: Ring aus elementarem Plutonium [27]



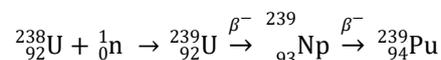
Wie für Actinoide typisch bildet Plutonium radioaktive Isotope. Neben dem am häufigsten vorkommenden, anthropogen hergestellten ^{239}Pu , ist dabei auch das ^{244}Pu zu nennen, welches das einzige natürlich vorkommende Plutonium-Isotop darstellt und mit 80 Mio. Jahren auch die längste Halbwertszeit besitzt. Allgemein sind Plutonium-Isotope relativ langlebig und zerfallen unter Aussendung von α -Strahlung (^4_2He -Kern) in Uran. Eine Ausnahme stellt dabei ^{241}Pu dar, welches sich durch β -Zerfall in ^{241}Am (Americium) umwandelt. [6] Die hohen Halbwertszeiten der Plutonium-Isotope erhöhen das Gefahrenpotential für den Menschen: Einmal in den Körper aufgenommen, senden sie kontinuierlich, bis zum Lebensende und sogar bis darüber hinaus radioaktive Strahlung aus, weshalb ein dadurch hervorgerufenes, entartetes Zellwachstum nicht mehr aufgehalten werden kann. [1]

Plutonium ist eines der seltensten natürlich vorkommenden Elemente des Periodensystems. Schätzungsweise 300 Milliarden Tonnen natürliches Plutonium sind im Erdboden zu finden. Verteilt über die gesamte Erdoberfläche ist das Element damit kaum nachweisbar. [7] 1971 entdeckte Darlene Hoffmann vom Los Alamos National Laboratory geringste Mengen des langlebigen ^{244}Pu in einem kalifornischen Erz. Aufgrund der langen Halbwertszeit dieses Isotops gehen Wissenschaftler davon aus, dass es bei der Entstehung der Erde vor ca. 4,5 Mrd. Jahren existierte. [8]

Bereits 1941 entdeckte der Nobelpreisträger Glenn T. Seaborg Plutonium als zweites transuranes Element nach Neptunium. Transuran bedeutet dabei, dass das Element eine höhere Ordnungszahl als Uran aufweist. Die Forschungsgruppe beschloss dafür ^{238}U mit einem Deuteron. Das dadurch entstandene ^{238}Np (Neptunium) zerfiel innerhalb weniger Tage zu ^{238}Pu .



In der heute noch angewendeten Methode zur künstlichen Erzeugung von Plutonium-Isotopen absorbiert ^{238}U ein Neutron. Das dabei entstehende ^{239}U wandelt sich unter Aussendung von β -Strahlung über ^{239}Np in ^{239}Pu um.



Dieser Prozess wird großtechnisch zur Herstellung von Plutonium in Kernkraftwerken verwendet und bildet unter anderem die Grundlage für die Verwendung von Plutonium in Kernwaffen. [8]



Das Manhattan-Projekt

Als das Manhattan Engineer District (MED), später Manhattan-Projekt genannt, wird ein Programm der USA in den 40er Jahren bezeichnet, welches der Kernwaffenforschung diente. Ab 1942, also unmittelbar nach dem Eintritt der USA in den zweiten Weltkrieg, übernahm die militärische Leitung des Projektes der General Leslie Groves. Unter ihm leitete die Forschungsarbeiten der Kernphysiker Robert Oppenheimer. Mit der erfolgreichen Durchführung des Trinity-Tests konnte in Amerika 1945 die erste Kernwaffenexplosion vollzogen werden. [9]

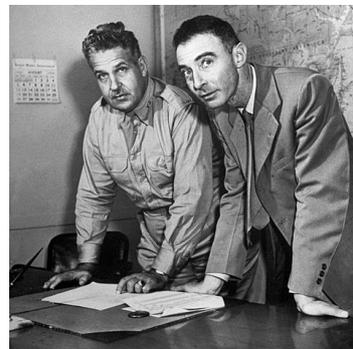


Abbildung 2: Leslie Groves und Robert Oppenheimer [11]

Voraussetzung für ein solches Projekt stellten verschiedene Entwicklungen im Bereich der Kernphysik dar. Nachdem zu Beginn des 20. Jahrhunderts erste Untersuchungen zur Radioaktivität angestellt worden waren, wurde nach dem ersten Weltkrieg weiter intensiv auf diesem Feld geforscht. Im Dezember 1938 gelang es Otto Hahn in wissenschaftlichem Austausch mit Lise Meitner in Berlin die erste erfolgreiche Kernspaltung durchzuführen. Damit wurde der Grundstein für die technische Nutzung von Kernenergie gelegt. Ein weiterer Meilenstein in der Kernforschung war die Durchführung der ersten nuklearen Kettenreaktion, die 1942 dem Italiener Enrico Fermi in Chicago gelang. Es war nun also möglich, in kontrollierter Weise beispielsweise Plutonium mit Neutronen zu beschießen und dadurch eine Kernspaltung hervorzurufen, bei der wiederum Neutronen emittiert wurden, die selbst in der Lage waren, neue Kerne zu spalten. [10]

Im August 1939 schrieb der Physiker Albert Einstein an den damaligen Präsidenten der USA Franklin Roosevelt einen Brief, in dem er vor der Möglichkeit warnte, dass Hitler-Deutschland die Entwicklungen in der Atomforschung dazu nutzen könnte, eine Bombe mit enormer Kraft zu konstruieren. Als im Sommer 1941 neue Forschungsergebnisse von britischen Wissenschaftlern (MAUD-Committee) diese Vermutungen verstärkten, beauftragte Roosevelt Leslie Groves 1942 damit, die Leitung des Manhattan-Projekts zu übernehmen und es wissenschaftlich und wirtschaftlich mit allen Mitteln voranzutreiben. Der General hatte kurz zuvor den Bau des Pentagons geleitet und war als herausragender Organisator bekannt. [11] Er machte den Atomphysiker Robert Oppenheimer zum wissenschaftlichen Leiter des Projekts und ließ in Los Alamos, New Mexico, weit abgeschieden von der Außenwelt eine große Forschungseinrichtung errichten. In dieser arbeiteten zwischen 1942 und 1946 zirka 3000 Menschen. Darunter waren die führenden Wissenschaftler des Landes in den Bereichen Physik, Chemie, Mathematik, Metallurgie, Waffen- und Sprengstofftechnik, so z.B. Ernest Lawrence, Enrico Fermi oder Isidor Rabi. Ziel war es, eine Kernwaffe zu entwickeln, die, wenn nötig, im 2. Weltkrieg zum Einsatz kommen konnte. [9]

Neben der Mobilisierung von geistigen Ressourcen betrieb General Groves auch massive Umwälzungen in der Industrie. Im Rahmen des Projektes wurden im umfassenden Maße Grundstücke erworben, Arbeitskräfte eingestellt, Subunternehmer engagiert, Fabrikanlagen und Unterkünfte errichtet sowie Materialien beschafft. Für das gesamte Unternehmen einschließlich der Unterhaltung der Forschungskräfte fielen Ausgaben im Wert von 2 Milliarden US-Dollar an, was der heutigen Kaufkraft von 26 Milliarden Dollar entspricht. [9] Für die Produktion von Plutonium



Abbildung 3: Der erste nukleare Atomtest der Testbombe Trinity am 16.07.1945 [14]

wurde beispielsweise 1943 im Bundesstaat Washington der riesige Nuklearkomplex Hanford Site errichtet (rund 1520 m²). Nachdem die Konstruktion des Gebäudes im Oktober 1943 fertiggestellt wurde, begann man sofort mit dem Bau eines Reaktors. Als dieser ein Jahr später in Betrieb genommen werden konnte, gelang es, Plutonium großtechnisch aus Uran herzustellen. [12] Im Februar 1945 transportierte man das erste Plutonium nach Los Alamos, wo es in den nächsten Monaten für den Bau einer Testbombe verwendet wurde. Diese Plutonium-Implosionsbombe mit dem Namen Trinity wurde am 16.07.1945 um 05:29 Uhr auf einem Testgelände in der Wüste New Mexicos gezündet. Der „nukleare Urknall“ fand statt. Bei diesem Test detonierte die auf einem 30 m hohem Stahlgerüst befestigte Bombe mit einer Sprengkraft, die 20.000 Tonnen Trinitrotoluol (TNT) entspricht. Der dabei entstandene Blitz war fast 300 km weit zu sehen, ein Atompilz reichte 12 km hoch in den Himmel. Durch die Explosion bildete sich ein 3 m tiefer und 330 m breiter Krater. Im Umkreis von 1,5 km wurde alles Leben ausgelöscht. Außerdem wurde eine so große Hitzewelle freigesetzt, dass der sandige Boden schmolz und sich ein schwach radioaktives, künstliches Glas mit olivbrauner Kruste bildete, welches man Trinitit nannte. [13]

Nach erfolgreicher Durchführung des Trinity-Tests, wurden im Rahmen des Manhattan-Projekts zwei weitere Atombomben für militärische Zwecke fertiggestellt. Diese setzte die USA zum Ende des 2. Weltkriegs gegen Japan ein. Die erste dieser Bomben, „Little Boy“ genannt, wurde am 5. bzw. 6. August 1945 über Hiroshima abgeworfen. Bei „Little Boy“ handelte sich um eine einfach konstruierte Uranbombe, die mit einer Stärke, die 15.000 Tonnen TNT entsprach, detonierte und 320.000 Personen sofort tötete. Drei Tage später wurde die zweite Bombe, „Fat Man“ genannt, über Nagasaki abgeworfen. Bei „Fat Man“ handelte es sich wie bei Trinity um eine Plutonium-Implosionsbombe, die 22.000 Tonnen TNT entsprach, und durch die 70.000 Personen ums Leben kamen. Während in Los Alamos der Erfolg des Forschungsprojekts mit großen Festen gefeiert wurde, starben in Japan an den Nachfolgen der militärischen Operation bis Ende 1945 210.000 und bis Ende 1950 340.000 Menschen. [14]



Funktionsweise der Plutonium-Atombombe „Fat Man“

Massenvernichtungswaffen lassen sich in biologische Waffen, chemische Waffen und Kernwaffen unterteilen. Chemische Waffen ziehen dabei ihre Energie aus chemischen Reaktionen, wobei Kernwaffen durch kernphysikalische Reaktionen, genauer gesagt Kernspaltungen oder Kernfusionen, Energie produzieren.

Sowohl bei Kernspaltungs-, als auch bei Kernfusionsbomben beruht der Energieumsatz auf der Differenz der Bindungsenergien zwischen den Nukleonen (Protonen und Neutronen) vor und nach der Kernreaktion. Dabei werden bei Kernfusionen bis zu 14 MeV und bei Kernspaltungen bis zu 200 MeV frei. Mit dem Hintergrund, dass bei chemischen Reaktionen Energiemengen im eV-Bereich entstehen, sind dies vergleichsweise hohe Energiemengen, die bei Kernwaffen entsprechende Wirkung zeigen. [15]

Wasserstoffbomben, bei denen die Kerne der Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium verschmelzen, werden zu den Kernfusionsbomben gezählt. Kernwaffen, deren Energiegewinnung auf die Kernspaltung von ^{239}Pu oder ^{235}U beruht, sind Kernspaltungsbomben. Aufgrund der vielfältigen Entwicklung und Funktionsweise von Atombomben, soll im Folgenden auf die Plutonium-Atombombe „Fat Man“ eingegangen werden. [16]

Neben der zivilen Anwendung als Brennstoff zur Energiegewinnung in Kernreaktoren wird Plutonium militärisch in nuklearen Sprengköpfen eingesetzt. Der Hauptunterschied liegt dabei in der Reinheit des Elements. In Kernkraftwerken werden Brennelemente eingesetzt, die eine Mischform aus Uranoxid und Plutoniumoxid darstellen, wobei der Anteil des Plutoniumoxids zwischen 7 und 8 % liegt. Für militärische Zwecke hingegen wird hochreines ^{239}Pu , sogenanntes waffenfähiges Plutonium, verwendet.

Atombomben, die Plutonium als spaltbares Material beinhalten, werden, anders als beispielsweise Uranbomben, als Implosionsbomben gebaut. Dabei ordnen sich die einzelnen Komponenten, wie in Abbildung 3 dargestellt, schalenförmig umeinander an. Den äußersten Kern bilden mehrere Schichten hochexplosiver Sprengstoff, wobei dabei vor allem TNT eingesetzt wird. Der Sprengstoff umschließt eine Kugel mit dem spaltbaren Material Plutonium, in dessen Kern sich ein Initiator als Neutronenquelle befindet. Bei „Fat Man“ war dieser Initiator ein Gemisch aus Be und ^{210}Po . [16]

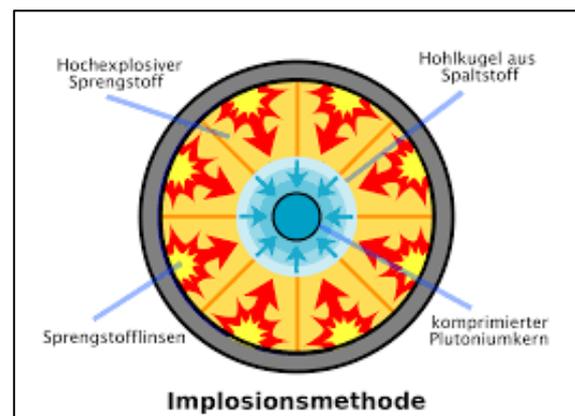
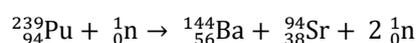
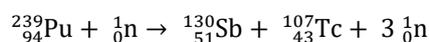


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Implosionsbombe [26]



Die Zündung der Bombe erfolgt über 32 Sprengstofflinsen, die durch elektrische Zünder gesteuert werden und eine gleichgerichtete Druckwelle in das Innere der Bombe erzeugen. Durch die Stoßwelle wird die Plutonium-Kugel und der Initiator Kern komprimiert. Dadurch wird ein Kontakt zwischen dem spaltbaren Material und dem Beryllium-Kern hergestellt. Erst dann treffen die ausgesendeten α -Teilchen der Plutonium-Isotope auf die Atomkerne des Berylliums und schlagen alle 5 ns bis 10 ns ein Neutron aus einem Beryllium-Kern frei. Diese Neutronen setzen die Kettenreaktion der Kernspaltung in Gang, indem sie die Spaltung der ersten Plutonium-Kerne initiieren.

Bei der neutroneninduzierten Kernspaltung von ^{239}Pu können zahlreiche Produkte entstehen. Im Folgenden sind zwei mögliche Kernspaltungsprozesse dargestellt.



Die Komprimierung der Kugel erhöht außerdem die Dichte des Plutoniums, wodurch die sogenannte kritische Masse überschritten wird. Das bedeutet, dass ab diesem Zeitpunkt ein durch Kernspaltung entstandenes Neutron mehr als eine weitere Kernspaltung hervorruft. Dies löst eine Kettenreaktion aus, in der immer mehr Kernspaltungen erfolgen und immer mehr Energie frei wird. Die enorme Energie heizt die Luft in der unmittelbaren Umgebung der Bombe auf Temperaturen im Millionen-Kelvin-Bereich auf, wodurch sich jeder Feststoff in ein heißes Gas verwandelt. Die daraus resultierenden Volumenexpansionen erzeugen eine Druckwelle, die über mehrere Kilometer alle Lebewesen tötet. Die ionisierende Strahlung des Plutoniums sorgt noch Jahre nach der Explosion für Erbgutveränderungen und unkontrolliertes Zellwachstum bei Organismen. [16] [17]

Weitere Anwendungsgebiete von Plutonium

Neben der militärischen Nutzung von Plutonium in Kernwaffen, wird die Substanz beispielsweise auch in Kernkraftwerken verwendet. Weltweit werden schätzungsweise 20 t pro Jahr aus Uran gebildet und anschließend sofort wieder gespalten. Die dabei entstehende Energie wird in Strom umgewandelt und in das Verbrauchernetz eingespeist. [18] Weiterhin findet Plutonium auch in Nuklidbatterien in der Raumfahrt Verwendung. Dort liegt ^{238}Pu in Form von Plutoniumoxid vor. Durch eine Kernspaltung des Stoffs entsteht thermische Energie, die mithilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt wird und zur Stromversorgung von Raumsonden dient. So wurde Plutonium beispielsweise bei Missionen zum Jupiter oder zum Mars, aber auch in Satelliten eingesetzt. In den 70er Jahren wurde Plutonium außerdem in Herzschrittmachern eingebaut. Vorteil von Plutonium war seine sehr hohe Halbwertszeit, die eine lange Lebensdauer der Geräte garantieren sollte. [19]



Neben positiven Charakteristika bezüglich der Verwendung müssen bei Plutonium jedoch auch negative Aspekte berücksichtigt werden. Bei der Nutzung von radioaktiven Stoffen in Kernkraftwerken hat ein Versagen der Technik verheerende Folgen. Ein aktuelles Beispiel ist hier die Nuklearkatastrophe von Fukushima 2011, bei der u.a. Plutonium sowohl durch dessen ungeheure Sprengkraft, als auch durch dessen gesundheitsgefährdenden Eigenschaften großen Schaden anrichtete. [18] Auch in der Raumfahrt kann die Substanz nicht bedenkenlos eingesetzt werden. 1964 verglühte der mit 1 kg Plutonium bestückte Satellit Transit 5BN-3 nach einem Fehlstart ungefähr einem Kilometer über dem Pazifik. Die radioaktive Strahlung der Substanz war auf der gesamten Nordhalbkugel messbar. 1996 stürzte die mit 270 g Plutonium bestückte Sonde Mars 96 ab. Der Verbleib der nicht verglühten Teile des Flugkörpers ist bis heute ungeklärt. [20] Auch den Einsatz von Plutonium in Herzschrittmachern stellte man schnell wieder ein, da keine vollkommene Abschirmung der Strahlung des Stoffes gewährleistet werden konnte und eine Entsorgung der Geräte sehr aufwendig war. [19]

Fazit

Mit dem Manhattan-Projekt und dem Bau von Atombomben wie „Fat Man“ begann eine zunehmende Integration der Naturwissenschaft in die Politik. Die Wissenschaftler beschränkten sich nicht mehr allein auf die Analyse von klar erfassbaren empirischen Sachverhalten, sondern nutzten diese Forschungen auch, um auf gesellschaftliche Probleme Einfluss zu nehmen. [21] Das Interesse an Plutonium zeigt diesen Wandel. Im Rahmen des Manhattan-Projekts setzte man sich verstärkt mit dem Element auseinander und zog aus dessen radioaktiven Eigenschaften einen Nutzen für militärische Zwecke. Diese Verbindung von Wissenschaft und Politik besteht bis heute. Ob nukleare Sprengköpfe oder Raumsonden, das Forschungsinteresse an Plutonium und seinen für die Gesellschaft vorteilhaften Eigenschaften bleibt ungehemmt. Damit einher geht jedoch andererseits auch stets die Debatte, um die Gefahr der Substanz. Nach Vorfällen wie in Nagasaki oder Fukushima ist eine kritische Auseinandersetzung mit dem Einsatz von Plutonium angebracht und notwendig, da seine toxischen Eigenschaften und sein Potential als Sprengstoff ihn zu einem der gefährlichsten Stoffe der Welt machen.

Im tagespolitischen Geschehen tauchen immer neue Nachrichten auf, die vom atomaren Kräfte messen verschiedener Nationen berichten. Aktuell gibt es 9 Nationen, die im Besitz von Atomwaffen sind: die USA, Russland, Frankreich, Großbritannien, China, Nordkorea, Israel, Indien und Pakistan. [22] Dies birgt verschiedene Konfliktpotentiale. Aktuellstes Beispiel ist das militärische Kräfte messen zwischen Indien und Pakistan. Beide Länder sind seit Jahrzehnten verfeindet. Ein Konfliktpunkt ist das von beiden Seiten beanspruchte Gebiet Kaschmir. In diesem Gebiet kam es im Februar 2019 sowohl von pakistanischer Seite, als auch von indischer Seite zu Luftschlägen. [23] Hier zeigt sich eine politische und militärische Gradwanderung zweier Atommächte, die, sollte sie eskalieren, fatale Folge haben könnte. Einen anderen



Konfliktherd, der 2017 zu eskalieren drohte, stellt Nordkorea dar. Zwischen 2002 und 2017 führte Nordkorea sechs Atomtests durch, die vom UN-Sicherheitsrat scharf verurteilt wurden und Sanktionen gegen das Land zur Folge hatten. Während der ersten Monate der US-amerikanischen Regierung Donald Trumps kam es immer wieder zu verbalen Drohungen zwischen diesem und dem nordkoreanischen Machthaber dem nordkoreanischen Machthaber Kim Jong Un. Im April 2017 drohten beide Seiten, im Falle eines Krieges Atomwaffen einzusetzen. Die aktuelle Entspannungspolitik wurde vom südkoreanischen Präsidenten Moon eingeleitet. Ihm gelang es zwischen Kim Jong Un und US-Präsident Donald Trump erfolgreich zu vermitteln. So kam es am 12. Juni 2018 erstmals zu einem Treffen zwischen einem amtierenden Präsidenten der USA und einem nordkoreanischen Staatsoberhaupt. In einer gemeinsamen Erklärung sagte Kim zu, Atom- und Raketentests vorläufig zu stoppen. [24] Ein weiterer Gipfel zwischen beiden Regierungschefs am 28.02.2019 verlief jedoch ergebnislos. [25] Hier wird deutlich, wie schmal der Grat zwischen Eskalation und Entspannung sein kann. Im Fall von Nordkorea ist, wie bei vielen anderen von Atompolitik beeinflussten Konflikten, der Ausgang ungewiss.



Literaturverzeichnis

- [1] J. Bernstein, Plutonium: A History of the World's Most Dangerous Element, Washington D.C.: Joseph Henry Press, 2007.
- [2] Universität Oldenburg Carl von Ossietzky, „Gefährlichkeit von Uran-238 und Plutonium-239 im Vergleich,“ 10 September 2018. [Online]. Available: https://uol.de/physik/forschung/ehemalige/uwa/rad/du/#_3.5.2.2. [Zugriff am 14 Januar 2019].
- [3] H. M. Kristensen und R. S. Norris, „Federation of American Scientists - Status of world nuclear forces,“ [Online]. Available: <https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces/>. [Zugriff am 14 Januar 2019].
- [4] A. Hollemann, E. Wiberg und N. Wiberg, Lehrbuch der Anorganischen Chemie, Berlin: de Gruyter, 2007.
- [5] G. Brauer, Handbuch der Präparativen Anorganischen Chemie, Stuttgart: Band II. Enke, 1978.
- [6] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot und A. H. Wapstra, „The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties,“ *Nuclear Physics A*, Nr. 729, pp. 105-110, 2003.
- [7] D. F. Peppard, M. H. Studier, M. V. Gergel, G. W. Mason, J. C. Sullivan und J. F. Mech, „Isolation of Microgram Quantities of Naturally-occurring Plutonium and Examination of its Isotopic Composition,“ *J. Am. Chem. Soc.*, Bd. VI, Nr. 73, pp. 2529-2531, 1951.
- [8] Unbekannt, „Do transuranic elements such as plutonium ever occur naturally?,“ *Scientific America*, [Online]. Available: <https://www.scientificamerican.com/article/do-transuranic-elements-s/>. [Zugriff am 19 Januar 2019].
- [9] K. von Hammerstein, „Das Manhattan-Projekt. Wir Hundesöhne.,“ *Der Spiegel Geschichte*, pp. 13-19, 4 2015.
- [10] T. Verlag, „Was ist was?,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.wasistwas.de/archiv-geschichte-details/das-manhattan-projekt.html>. [Zugriff am 11 Januar 2019].
- [11] W. D. Miscamble, *The Most Controversial Decision. Truman, the Atomic Bombs, and the Defeat of Japan*, Cambridge/ New York/ u.a., 2011.
- [12] B. C. F. L. B. Michele S. Gerber, „National Historic Landmark Nomination: B Reactor/ 105-B. The 105-B Building in the 100-B/C Area at Hanford,“ Richland, 2012.
- [13] B. Osterath, „Deutsche Welle,“ 16 Juli 2015. [Online]. Available: <https://www.dw.com/de/trinity-test-der-nukleare-urknall/a-18574705>. [Zugriff am 12 Januar 2019].
- [14] J. Hughes, *The Manhattan Project. Big Science and the Atom Bomb*, Cambridge/ u.a., 2012.



- [15] S. Glasstone und P. J. Dolan, „The Effects of Nuclear Weapons,“ United States Government Printed Office, 1977.
- [16] J. Baggott, Atomic - The first war of physics and the secret history of the atom bomb - 1939-1949, UK: Icon Books, 2009.
- [17] n. w. archive, „The first nuclear weapons,“ [Online]. Available: nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Mfaq8.html. [Zugriff am 20 Januar 2019].
- [18] H. Schuh, „Zeit,“ 2011 April 2011. [Online]. Available: <https://www.zeit.de/2011/15/Plutonium-Fukushima>. [Zugriff am 21 Januar 2019].
- [19] R. Paschotta, „RP-Energie-Lexikon,“ 11 März 2018. [Online]. Available: <https://www.energie-lexikon.info/radionuklidbatterie.html>. [Zugriff am 21 Januar 2019].
- [20] W. Blum, „Zeit,“ 19 September 1997. [Online]. Available: <https://www.zeit.de/1997/39/cas-sini.txt.19970919.xml>. [Zugriff am 21 Januar 2019].
- [21] G. F. Gotthard Bechmann, „Problemorientierte Forschung: Zwischen Politik und Wirtschaft,“ 10 Jahr ITAS. ITAS Jahrbuch-2003/2004, pp. 44-68, Juli 2005.
- [22] R. S. N. Hans M. Kristensen, „Federation of American Scientists,“ November 2018. [Online]. Available: <https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces/>. [Zugriff am 29 März 2019].
- [23] H. Kazim, „Spiegel online,“ 27 Februar 2019. [Online]. Available: <http://www.spiegel.de/politik/ausland/pakistan-und-indien-was-die-luftschlaege-zwischen-den-atommaechten-bedeuten-a-1255312.html>. [Zugriff am 29 März 2019].
- [24] A. A-Z, „Atomwaffen A-Z,“ Februar 2019. [Online]. Available: <https://www.atomwaffenaz.info/heute/atomwaffenstaaten/nordkorea.html>. [Zugriff am 29 März 2019].
- [25] Tagesschau, „tagesschau.de,“ 28 Februar 2019. [Online]. Available: <https://www.tagesschau.de/ausland/trump-kim-gipfel-123.html>. [Zugriff am 29 März 2019].
- [26] Fastfission (Wikipedia Author), „Wikipedia,“ 16 Juli 2015. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernwaffentechnik#/media/File:Implosionsdesign.svg>. [Zugriff am 20 Januar 2019].
- [27] D. Christensen, „The future of plutonium technology,“ *Los Alamos Science*, Bd. 23, Nr. 170, 1995.