

Wolfgang Liebert  
Christian Gepp  
David Reinberger (Hrsg.)

# Nukleare Katastrophen und ihre Folgen

---

30 Jahre nach Tschernobyl  
5 Jahre nach Fukushima



BWV • BERLINER WISSENSCHAFTS-VERLAG





**Universität für Bodenkultur Wien**





Wolfgang Liebert  
Christian Gepp  
David Reinberger (Hrsg.)

# **Nukleare Katastrophen und ihre Folgen**

30 Jahre nach Tschernobyl  
5 Jahre nach Fukushima



BWV • BERLINER WISSENSCHAFTS-VERLAG

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN (Print) 978-3-8305-3642-0

ISBN (E-Book) 978-3-8305-2120-4

## Zum Geleit

Am 11. März 2016 jährt sich der katastrophale Unfall von Fukushima Daiichi zum fünften Mal. Und am 26. April 2016 sind 30 Jahre seit dem katastrophalen Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl vergangen. Beide Unfälle wurden auf der internationalen Bewertungsskala INES mit der höchsten Stufe 7 bewertet. Die Artikel dieses Sammelbandes bieten eine eingehende Analyse der Unfallursachen, der Unfallhergänge sowie der schwerwiegenden und langfristigen Folgen. Die Konsequenzen, die aus diesen katastrophalen Unfällen gezogen wurden, werden ebenfalls behandelt.

Es darf auch nicht vergessen werden, dass die zivile Nutzung der Kernenergie zu weiteren schweren (INES Stufe 6) und ernsten (INES Stufe 5) Unfällen geführt hat.

All diese Vorfälle haben dazu geführt, dass erhebliche Anstrengungen zur Verbesserung der nuklearen Sicherheit unternommen wurden. Und als Folge des katastrophalen Unfalls in Fukushima werden einige Staaten in Europa sogar die Kernenergienutzung beenden.

Dennoch kann heute und in absehbarer Zukunft ein katastrophaler Unfall mit weitreichenden und schwerwiegenden Auswirkungen nicht ausgeschlossen werden. Darin sind sich alle zuständigen Aufsichtsbehörden Europas einig.

Vor allem aus diesem Grund hat Österreich bereits vor mehr als 25 Jahren eine explizite Nuklearpolitik formuliert und im Rahmen seiner Möglichkeiten konsequent umgesetzt. Ich selbst habe mich bereits als Student gegen die Inbetriebnahme des Kernkraftwerks Zwentendorf eingesetzt. Durch die zwischenzeitliche Entwicklung fühle ich mich in meiner Haltung mehr als bestätigt.

Vor diesem Hintergrund werden wir weiterhin auf die ständige Verbesserung der nuklearen Sicherheit drängen. Selbst wenn es uns gelingt, das Risiko zu verringern, müssen wir auch für den Ernstfall vorbereitet sein. Wir haben die Vorbereitung und Vorsorge für radiologische Notstandssituationen in den vergangenen Jahren Zug um Zug verbessert, um der österreichischen Bevölkerung im Fall der Fälle bestmöglichen Schutz zu bieten. Zu beiden Aspekten enthält dieser Sammelband Beiträge von Mitarbeitern meines Hauses.

Österreich wird weiterhin auf politischer Ebene mit guten Argumenten gegen die Kernenergienutzung auftreten. Die österreichische Nuklearpolitik basiert auch auf der Einsicht, dass die Kernenergie nicht mit den Prinzipien und Prioritäten einer nachhaltigen und aufrechterhaltbaren Entwicklung in Einklang zu bringen ist. Wir sind überzeugt, dass die Kernenergie keine kostengünstige und tragfähige Option zur Bekämpfung des Klimawandels ist. Die Dekarbonisierung unserer Energiesysteme ohne Kernenergie ist eine große Herausforderung. Dafür braucht es unter anderem klare rechtliche und institutionelle Rahmenbedingungen auf europäischer Ebene. Ich

habe daher einen „Energiewendevertrag“ ausarbeiten lassen, der einen europäischen Rechtsrahmen für erneuerbare Energieträger und Energieeffizienz schaffen soll.

Andrä Rupprechter

Bundesminister für Land-, Forst-, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich

## Zum Geleit

Wir alle werden den Tag nie vergessen: den 26. April 1986. Der katastrophale Unfall im Block 4 des Atomkraftwerks Tschernobyl hat ein großes Gebiet in einem Umkreis von über 100 Kilometern um den Standort unbewohnbar gemacht. Weite Teile Europas, darunter auch Österreich, wurden damals von der radioaktiven Wolke erreicht. Am stärksten betroffen war und ist die Umgebung der Anlage in der heutigen Ukraine, in Weißrussland und Russland. Auch in Skandinavien und Mitteleuropa werden heute noch in bestimmten Lebensmitteln immer wieder Grenzwertüberschreitungen festgestellt. Die schlimmsten Folgen der tragischen Ereignisse sind mehrere zehntausend Tote, Missbildungen bei Kindern, Krebserkrankungen und riesige, radioaktiv verseuchte und unbewohnbare Gebiete. Tschernobyl hat gezeigt, dass die größten Atomkatastrophen tatsächlich eintreten können. Fukushima Daiichi zeigte am 11. März 2011, dass die Bedrohung noch immer real ist.

Für die Stadt Wien stellen die grenznahen AKW in den Nachbarländern Tschechien (Temelín, Dukovany), Slowakei (Mochovce, Bohunice) und Ungarn (Paks) eine potentielle Gefahr dar. Schon vor meiner Zeit als Wiener Umweltstadträtin war es mir ein persönliches Anliegen, gegen Atomenergie aufzutreten. Als Umweltstadträtin setze ich mich seit 12 Jahren auf allen Ebenen für ein atomkraftfreies Mitteleuropa ein.

Spezielle Anstrengungen hat Wien 2009 gegen das nur 140 Kilometer von Wien entfernte AKW Mochovce unternommen, das sogar um zwei Blöcke erweitert werden soll. Bei einem grenzüberschreitenden UVP-Verfahren haben 204.162 Wienerinnen und Wiener eine Einwendung gegen den Weiterbau dieser nun 30 Jahre in Bau befindlichen Reaktoren deponiert.

Wien engagiert sich seit vielen Jahren auf politischer Ebene gegen Kernenergie. Beispiele dafür sind die einstimmigen Beschlüsse des Gemeinderates zu diesem Thema. Besonders hervorzuheben sind die Resolutionen für eine Änderung des EURATOM-Vertrags und die Verwendung dieser EU-Gelder für den Ausbau der Erneuerbaren und den Rückbau der Kernkraftwerke, das Vorgehen gegen die Fertigstellung von Mochovce 3 & 4 und die Resolution gegen den Import von Atomstrom. Mit der Gründung des Städtenetzwerks CNFE (Cities for a Nuclear Free Europe) im Jahr 2011 haben wir mittlerweile fast 30 Partnerstädte in weiten Teilen Europas gefunden, darunter Städte wie Dublin, München, Zagreb, Nicosia, Mailand und Korfu.

Die Stadt Wien zeigt aber nicht nur die Gefahren der Kernenergie auf und liefert, wie in diesem Sammelband – über den Beitrag der Wiener Umwelthanwaltschaft als Atomschutzbeauftragte der Stadt Wien – fachliche Argumente gegen die Kernenergie. Sie beweist, dass eine nachhaltige Energiezukunft möglich ist. So wird das Wiener Trinkwasser aus den Bergen auch zur Erzeugung von Ökostrom genutzt. Mit ins-

gesamt 14 Trinkwasserkraftwerken entlang der beiden Wiener Hochquellenleitungen werden jährlich rund 65 Millionen Kilowattstunden Strom erzeugt. Das entspricht in etwa dem Strombedarf einer Stadt mit 50.000 EinwohnerInnen. Die ebswien-Hauptkläranlage ist das jüngste Stück in einer langen Reihe von innovativen Ideen und intelligenter Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Wien. Durch die effiziente Nutzung der im Klärschlamm enthaltenen Energie kann ab dem Jahr 2020 die gesamte zur Abwasserreinigung benötigte Energie aus dem erneuerbaren Energieträger Klärgas erzeugt werden, die Anlage wird energieautark.

Die Zukunft muss den Erneuerbaren gehören, wir alle müssen und können aktiv dazu beitragen. In diesem Sinne wünsche ich dieser Publikation viel Erfolg!

Ulli Sima

Amtsführende Stadträtin für Umwelt und Stadtwerke, Wien

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung in die Themenstellung des Buches</b> <i>Wolfgang Liebert und Christian Gepp</i>	13
<b>Kernenergienutzung im historischen Überblick</b>	
<b>Es war einmal ein Bergwerk, ...</b> <i>Christian Gepp</i>	21
<b>Die Entwicklung von Leistungsreaktoren     von 1953 bis 2011</b> <i>Reinhard Müller</i>	35
<b>Der Einfluss kerntechnischer Unfälle     auf den Ausbau der Kernenergienutzung –     Die Beispiele Harrisburg (Three Mile Island), Tschernobyl     und Fukushima</b> <i>Klaus Gufler</i>	41
<b>Zwei Reaktorkatastrophen: Tschernobyl und Fukushima</b>	
<b>Die Unfallursachen von Tschernobyl –     menschliches Fehlverhalten und unzulängliches Reaktorkonzept?</b> <i>Nikolaus Müllner</i>	57
<b>Der Unfallablauf in Fukushima –     Chronologie und wesentliche Ursachen</b> <i>Christoph Pistner</i>	75
<b>Tschernobyl und Fukushima –     gemeinsame Unfallursachen jenseits der Technik</b> <i>Wolfgang Kromp und Helga Kromp-Kolb</i>	93
<b>Leben mit den Folgen der Atomkatastrophe     von Fukushima</b> <i>Judith Brandner</i>	107

## **Darstellung wesentlicher Erfahrungen der radiologischen Folgen der großen Unfälle**

- Von Tschernobyl nach Fukushima** 119  
*Peter Bossew*
- Atmosphärische Ausbreitung der Radioaktivität und Abschätzung  
des Quellterms** 137  
*Gerhard Wotawa*
- Kurz-, mittel- und langfristige Effekte der Radionukliddeposition  
nach einem Kernkraftwerksunfall – Erfahrungen in Österreich  
nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl** 153  
*Martin H. Gerzabek*
- Auswirkung erhöhter Tschernobyl-Fallout-Deposition  
in den Zentralalpen** 167  
*Friedrich Steinhäusler, Herbert Lettner und Alexander Hubmer*
- Radioaktivität in Lebensmitteln nach Reaktorunfällen  
am Beispiel Österreich** 185  
*Manfred Ditto*
- 30 Jahre nach Tschernobyl, 5 Jahre nach Fukushima:  
Eine umwelthygienische Bilanz über die Abschätzung  
der Gesundheitsfolgen** 201  
*Hans-Peter Hutter, Michael Kundi, Hanns Moshhammer und Peter Wallner*

## **Regulatorische Reaktionen auf Fukushima in Europa**

- EU-Stresstests für Kernkraftwerke** 217  
*Helmut Hirsch*
- Stresstest Follow-up** 229  
*Andreas Molin*
- Lessons learnt: Wie sich der Strahlenschutz nach Tschernobyl  
und Fukushima verändert hat** 245  
*Nina Cernohlawek, Peter Hofer, Viktor Karg und Katharina Stangl*

**Über Tschernobyl und Fukushima hinaus:  
Grundsätzliche Probleme der Kernenergie**

<b>Umweltauswirkungen des Uranbergbaus</b> <i>Peter Diehl</i>	255
<b>Eine Untersuchung des nuklearen Risikos in Europa infolge schwerer Unfälle in Kernkraftwerken</b> <i>Petra Seibert, Dèlia Arnold, Nikolaus Arnold, Klaus Gufler, Helga Kromp-Kolb und Gabriele Mraz</i>	275
<b>Kurzer Abriss der gegenwärtigen Europäischen Energiepolitik unter besonderer Berücksichtigung der Kernenergie</b> <i>David Reinberger</i>	291
<b>Sicherheitsrisiken der nuklearen Stromerzeugung und deren grundsätzliche Ursachen</b> <i>Emmerich Seidelberger</i>	303
<b>Technologische Sackgasse Kernenergie?</b> <i>Wolfgang Liebert</i>	325
<b>Autorenverzeichnis</b>	341



## Einführung in die Themenstellung des Buches

Im Frühjahr 2016 jähren sich zwei große nukleare Katastrophen. Vor dreißig Jahren, am 26. April 1986, ereignete sich die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl und vor fünf Jahren, ab dem 11. März 2011, geschah eine Serie von großen Reaktorunfällen in Fukushima. Seither konnte einiges an Fakten über die Ereignisse selbst und ihre Folgen zusammengetragen werden. Das Verständnis des Geschehenen hat Einfluss auf die Bewertung der Kerntechnologie und den gesellschaftlichen Umgang mit der Nutzung der Kernenergie. Zugleich gehen die Folgewirkungen der Katastrophen weiter. Daher ist es wichtig, die vergangenen nuklearen Katastrophen genauer zu betrachten und erneut ins öffentliche Bewusstsein zu bringen.

Damit stellen sich als zentrale Fragen: Welche Bedeutung haben große Reaktorunfälle? Wie geht es nach solchen Technikkatastrophen weiter? Was ziehen wir für Konsequenzen? Das Buch will Material für diese Reflexion zur Verfügung stellen, die uns alle angeht.

Dabei ist dieses Buch nicht so sehr der eigentlichen Erinnerungsarbeit gewidmet. Was die direkten menschlichen Folgen der dramatischen Ereignisse betrifft, sei an dieser Stelle auf andere Werke verwiesen, die berührende und bedenkenswerte Protokolle von „Gedanken, Gefühlen, Worten“ enthalten – so das von der weißrussischen Literaturnobelpreisträger Swetlana Alexijewitsch 1997 veröffentlichte Buch über Tschernobyl<sup>1</sup> oder ein entsprechendes Buch über Fukushima, wie etwa jenes von Judith Brandner<sup>2</sup>.

Demgegenüber versucht der vorliegende Sammelband, wesentliche Informationen über technisch und wissenschaftlich beschreibbare Zusammenhänge über Unfallabläufe und Unfallfolgen zu liefern. Damit ist stets auch eine Einschätzung und Interpretation des Vorgefundenen und des Berichteten verbunden, deren Darstellung der Leserschaft zur eigenen Urteilsbildung angeboten wird. Gleiches gilt für die Beleuchtung einiger sozio-technischer Faktoren im Umgang mit der Kernenergie, unter Einschluss der staatlichen Regulation der Kernenergie in Reaktion auf Fukushima. Es wird dabei der Blick nicht nur auf die beiden Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima gerichtet, sondern es werden auch einige sehr grundsätzliche Probleme der Kernenergienutzung angesprochen und analysiert.

Das *erste Kapitel* des vorliegenden Sammelbandes gibt einen kurzen Überblick über die historische Entwicklung der Kernenergienutzung seit der Entdeckung des Urans. *Gepp* betrachtet im ersten der drei Beiträge wegweisende naturwissenschaftli-

---

1 Swetlana Alexijewitsch: Tschernobyl. Eine Chronik der Zukunft. München/Berlin: Berlin Verlag/Piper, 1997.

2 Judith Brandner: Zuhause in Fukushima. Das Leben danach. Porträts. Wien: Kremayr & Scheriau, 2014.

che Erkenntnisse zur Erforschung der Radioaktivität und Kernspaltung und nimmt auf frühe Anwendungsformen radioaktiver Strahlung Bezug. Dabei werden einige grundlegende Begriffe erläutert, die das allgemeine Verständnis der nachfolgenden Kapitel erleichtern sollen. *Müller* skizziert in seinem Beitrag die Entwicklung von Leistungsreaktoren von 1953 bis zur nuklearen Katastrophe von Fukushima wesentliche Reaktortypen werden hierbei kurz vorgestellt. *Gufler* beschreibt vier Phasen des Ausbaus der weltweiten Kernenergienutzung (Euphorie, Ernüchterung, Renaissancediskussion und die Situation nach Fukushima). Der Beitrag zeigt auf, welchen Einfluss die bedeutenden bzw. großen Reaktorunfälle von Three Mile Island, Tschernobyl und Fukushima auf die nuklearen Ausbautrends hatten und derzeit haben.

Das *zweite Kapitel* widmet sich vorrangig den nuklearen Katastrophen von Tschernobyl und Fukushima. Die Beiträge von *Müllner* und von *Pistner* geben – in möglichst allgemein verständlicher Sprache – einen Einblick in die enorme technische Komplexität der betroffenen Kernreaktoren. Im Falle Fukushimas wird das Notkühlsystem des Reaktors eingehender beschrieben und auf dieser Basis die Ereigniskette bis zu seinem Versagen erklärt, das zur Kernschmelze und massiver Radioaktivitätsfreisetzung führte. Um die Tschernobyl-Katastrophe erklären zu können, werden die Mechanismen zur Kontrolle der im Reaktorkern ablaufenden nuklearen Kettenreaktion beschrieben und es wird analysiert, welche technischen und nicht direkt technischen Ursachen zum Versagen der Reaktivitätskontrolle führten, was letztlich die Katastrophe auslöste. Die Frage nach technischem oder menschlichem Versagen wird gestellt. Beide Beiträge legen den Schwerpunkt auf die Mängel der technischen Auslegung und auf Unfallabläufe, deren Möglichkeit bei der Auslegung der Reaktoren nicht genügend berücksichtigt wurde. Damit öffnet sich der Blick auf grundsätzliche Probleme der Kernreaktortechnik selbst. In Hinblick auf die Unfälle tritt ein weiterer Aspekt hinzu: gesellschaftliche Faktoren und der soziale Kontext, in dem die Technik strukturell ermöglicht wird. *Kromp* und *Kromp-Kolb* belegen, wie sehr Intransparenz, Vertuschung und die ausbleibende Behandlung erkannter Missstände das „nukleare Dorf“ – eine Begrifflichkeit, die das Geflecht von nuklearer Industrie, Wissenschaft und staatlicher Regulierung benennt – prägen und damit notwendige öffentliche Kontrolle aushebeln. In Verbindung mit einer fehlenden realistischen Risikowahrnehmung und dem Glauben an eine katastrophenfremde Technik werden so wesentliche Ursachen für Technikunfälle allgemein und nukleare Großkatastrophen im Besonderen benannt. Im folgenden Beitrag wird am Beispiel Fukushimas die soziale Dimension der Folgen von Reaktorkatastrophen angesprochen. *Brandner* macht deutlich, wie sich die Politik der Halb- und Nicht-Information und der intransparenten Entscheidungen der Politik auf die Menschen auswirkt, die mit den Folgen von Fukushima leben müssen. Überdies zeigt sich, dass die betroffenen Menschen keine rein rationale Urteilsfähigkeit gegenüber der beängstigenden, sinnlich nicht wahrnehmbaren Radioaktivität haben – ganz im Gegensatz zur (vorgeblichen) Rationalität der Behörden und deren Entscheidungen.

Auf die Beschreibung und Analyse der Tragfähigkeit der technischen Maßnahmen zur Bewältigung der Unfallfolgen, wie beispielsweise die Errichtung des Sarkophags für Reaktorblock 4 in Tschernobyl oder der Aufbau von technischer Infrastruktur zur Anlagensicherung, Dekommissionierung beziehungsweise Dekontamination in der Region um Fukushima, wurde bewusst in diesem Band kein Bezug genommen. Eine angemessene Behandlung dieser Themenkomplexe würde den Umfang eines eigenen Buches erfordern.

Erfahrungen mit radiologischen Folgen der Reaktorkatastrophen von Tschernobyl und Fukushima werden im *dritten Kapitel* dargestellt. *Bossew* gibt zunächst einen Überblick über die Radionuklide, die bei den beiden Reaktorkatastrophen freigesetzt wurden. Es folgen Vergleiche der Radioaktivität in der Luft nach Tschernobyl in Europa (und speziell in Österreich) mit derjenigen nach Fukushima in Japan. Ebenso wird der Radiocäsiumfallout für Österreich und die Fukushimaregion verglichen. Schließlich werden die Ortsdosisleistungen<sup>3</sup> in Wien nach Tschernobyl und Tokyo nach Fukushima gegenübergestellt. Der nachfolgende Beitrag von *Wotawa* beschreibt die Radioaktivitätsausbreitung nach den Reaktorunfällen von Fukushima, wobei die für die Begrenzung der Folgen im Vergleich zu Tschernobyl günstigeren meteorologischen und unfallbezogenen Bedingungen deutlich werden (vorrangige Westwinde und deutlich niedrige Freisetzungshöhe in der Atmosphäre). Anhand von meteorologischen Modellierungstools ist eine Bestimmung der Gesamtemissionen aus den nuklearen Anlagen durch Rückwärtssimulation aus vorliegenden weltweit gemessenen Radionuklidkonzentrationen möglich. Darauf basierend wird auch ein Vergleich der Radionukliddeposition in den Regionen um Tschernobyl und um Fukushima vorgenommen. Die gemachten Erfahrungen nach Tschernobyl und ihre wissenschaftliche Aufarbeitung ermöglichen Aussagen über kurz-, mittel- und langfristige Effekte von radiologischen Immissionen und Depositionen aufgrund von Reaktorunfällen. Am Beispiel Österreichs, das von Tschernobyl verhältnismäßig stark betroffen wurde, zeigt *Gerzabek*, wie Nahrungs- und Futtermittel durch Radionuklide kontaminiert wurden (insbesondere durch das kurzlebige Jod-131, das längerlebige Cäsium-137 und durch Cäsium-134, dessen Lebensdauer zwischen beiden liegt). Dabei ist zwischen einer eher kurzfristigen direkten und einer eher längerfristigen indirekten Kontamination, die sich aus der Aufnahme von Radionukliden aus den Böden über die Wurzeln ergibt, zu unterscheiden. Der Wissensstand zu Verhalten und Verbleib von Radionukliden im Boden, zum Boden-Pflanzen-Transfer von Radionukliden in verschiedenen relevanten Ökosystemen und je nach Bodenbeschaffenheit wird zusammengefasst. Der Beitrag von *Steinhäusler et al.* verfolgt die Transfer- und Wirkungskette der Radionuklide weiter bis zum Tier und zu tierischen Lebensmitteln (insbesondere Kuh-Milch-Pfad) und beschreibt die Erkenntnisse über Besonderheiten der Böden und Ökosysteme im

---

3 Gemeint ist hier die Dosisleistung aus der Luft und vom Boden durch Gammastrahlung aussendende Radionuklide.

österreichischen Alpenraum, die zu weit längerfristig beobachtbaren Folgen als in anderen Regionen führen. Anschließend berichtet *Ditto* über die nach Tschernobyl aufgetretene Radioaktivität in verschiedenen relevanten Lebensmitteln in Österreich und die daher zeitweise ergriffenen notwendigen Maßnahmen der Behörden. Die Gesamtstrahlenbelastung der Bevölkerung durch Tschernobyl wird eingeschätzt, wobei sehr deutlich wird, dass diese durch die Ingestion – also durch die Aufnahme radioaktiv kontaminierter Lebensmittel – dominiert wird. *Hutter et al.* geben einen Überblick über gesundheitliche Folgen von ionisierender Strahlung, die durch Radionuklide in der Umwelt bedingt sind. Schwerpunkte bilden beobachtete Folgen von Tschernobyl in der Region selbst und in Österreich sowie zu erwartende Folgen durch Fukushima, die weitestgehend auf Japan selbst begrenzt bleiben werden. Für Fukushima werden neben den direkten radiologischen auch die indirekten Gesundheitsfolgen angesprochen. Insgesamt wird deutlich, dass die Folgen der beiden Reaktorkatstrophen auch in der Wissenschaft nicht einheitlich eingeschätzt werden.

Ein ursprünglich geplanter Beitrag zur Ausbreitung radioaktiver Stoffe in maritimen Ökosystemen, wie im Zusammenhang mit den Reaktorunfällen von Fukushima massiv aufgetreten, kam leider nicht zustande. Der Großteil der atmosphärischen radiologischen Emissionen ging bekanntermaßen auf dem Pazifischen Ozean nieder (etwa 80%), was aber die Kontamination von Land glücklicherweise deutlich begrenzt hat. Es gab zusätzlich direkte Einleitungen von Radionukliden aus den Nuklearanlagen ins Meer, die in der Bucht von Fukushima über einige Monate gemessen wurden. Die Einleitungen waren insbesondere in der Zeit vom 26. März bis zum 8. April 2011 sehr hoch. Das französische Institut für Strahlenschutz und Nukleare Sicherheit (IRSN) hat daraus eine Cäsium-137 Fracht von 22 Petabecquerel (PBq)<sup>4</sup> bis Juli 2011 abgeschätzt.<sup>5</sup> Dies ist ein wesentlicher Beitrag zur Gesamtfreisetzung aus den Anlagen. Am Beispiel des Cäsium-137, als Leitisotop für die langfristigen Folgen, lassen sich nun vorläufige Antworten auf die Frage nach dem Quellterm von Fukushima, d. i. der Gesamtfreisetzung von Radioaktivität aus der Anlage, geben. Dazu müssen die atmosphärischen und maritimen Emissionen zusammengefasst werden. Legt man die Annahmen des UN Scientific Committee for the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) zugrunde<sup>6</sup>, so sind 9 bis 30 PBq abschätzbar, das wären etwa 10 % bis 40% des Cäsium-137-Quellterms von Tschernobyl. Werden die im Beitrag von

4 Die Maßeinheit 1 Petabecquerel (PBq) für die Radioaktivität entspricht  $10^{15} = 1.000.000.000.000.000$  radioaktiven Zerfällen pro Sekunde.

5 P. Bailly du Bois et al.: Estimation of marine source-term following Fukushima Daiichi accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 114 (2012), 2–9.

6 Der UNSCEAR Report 2013 an die UN Generalversammlung geht bei den atmosphärischen Freisetzungen von nur 9 PBq Cäsium-137 aus, der in japanischen Veröffentlichungen abgeschätzt wurde, gesteht aber ein, dass dieser Wert am unteren Ende der veröffentlichten Werte liegt. Die Gründe für das Heranziehen kleinstmöglicher Abschätzungen sind nicht nachvollziehbar, da Modellrechnungen vorliegen, die eine weit bessere Datengrundlage haben. Die direkten maritimen Einleitungen werden von UNSCEAR ebenfalls nach unten abgeschätzt.

Wotawa dargestellten Rückwärtsrechnungen auf Basis der weltweit gemessenen Daten der Atomteststopporganisation CTBTO und die oben genannten IRSN-Abschätzungen für die maritimen Einträge zugrunde gelegt, so erhält man 58 PBq, was etwa zwei Dritteln des Tschernobyl-Quellterms (für Cäsium-137) entspricht.

Das *vierte Kapitel* setzt sich mit Reaktionen der Regulierungsbehörden in Europa auf die Unfälle in Fukushima auseinander. Dabei geht es vorrangig um die sogenannten europäischen Stresstests für Kernkraftwerke, die von den EU-Gremien auf den Weg gebracht wurden. Die Autoren der ersten beiden Beiträge in diesem Kapitel waren von österreichischer Seite u. a. an der Vorgabenentwicklung beteiligt, beziehungsweise Mitglied des Boards der Stresstests für europäische Kernkraftwerke. *Hirsch* beschreibt die Vorgehensweise (Ablauf, Themenstellungen und Mitwirkende) der EU-Stresstests und bilanziert ihre im Frühjahr 2012 veröffentlichten Ergebnisse. Der Beitrag von *Molin* gibt einen detaillierten und differenzierten Bericht über die Folgeaktivitäten, die in einem Aktionsplan der European Nuclear Safety Regulators Group (ENSREG) vereinbart wurden. Unter mehreren Maßnahmen, wie die Erarbeitung von nationalen Aktionsplänen zur Verbesserung der nuklearen Sicherheit, wird auch die Rolle der Öffentlichkeit betont. Es zeigt sich, dass Ablauf und Ergebnis der Stresstests einerseits eine Fülle von Defiziten und Mängeln aufweisen, aber andererseits Schwachstellen der nuklearen Sicherheit in Europa und damit umfangreiche Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt wurden. Wichtige Entwicklungen sind so angestoßen worden, die konsequent – mit Unterstützung der Zivilgesellschaft – vorangetrieben werden können. Die direkten Auswirkungen der beiden nuklearen Katastrophen auf das Notfallmanagement werden von *Cernohlawek et al.* behandelt. Dabei wird auf die aus den Unfällen gewonnenen Erkenntnisse und daraus gezogene Lehren für den Strahlenschutz eingegangen.

Im abschließenden *fünften Kapitel* werden die Analysen, die direkt auf die beiden Reaktorkatastrophen Bezug nehmen, um einige exemplarisch ausgewählte sehr grundsätzliche Probleme der Kernenergie erweitert. Der erste Beitrag befasst sich mit einer der unverzichtbaren Voraussetzungen für Kernwaffenprogramme als auch jeglicher heutiger Kernenergieprogramme, der Urangewinnung. Ein häufig unterbelichtetes Thema sind deren Umweltauswirkungen. *Diehl* gibt einen Überblick über verschiedene Formen des Uranabbaus und die damit verbundenen Umweltauswirkungen und -risiken. Weiterhin wird auf die Risiken durch die Hinterlassenschaften des Uranabbaus und die Notwendigkeit ihrer aufwändigen und kostspieligen Bearbeitung bzw. Beseitigung eingegangen. Ergebnisse des Forschungsprojektes „flexRISK“ zum nuklearen Risiko in Europa in Folge schwerer Unfälle werden von *Seibert et al.* vorgestellt. Dabei wurden anhand einer Vielzahl von realen meteorologischen Situationen und aus der Literatur entnommenen Quelltermen der Transport und die Ausbreitung von Radionukliden modelliert. Durch diese Kombination von Freisetzungswahrscheinlichkeit und meteorologischer Wahrscheinlichkeit wird die Darstellung der Auswirkung von Reaktorunfällen als Wahrscheinlichkeit von Boden- und

Luftkontamination in Europa möglich. Aus der Aggregation der Einzeldaten lässt sich u. a. das Gesamtrisiko für die Überschreitung von Grenzwerten der Dosisleistung in Europa ableiten. Welchen Stellenwert die Kernenergie im Rahmen der zukünftigen europäischen Energiepolitik einnehmen wird, betrachtet *Reinberger* im daran anschließenden Beitrag. In Hinblick auf die Klima- und Energieziele der Europäischen Union für 2050, die eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95% gegenüber 1990 anstreben, wird die Rolle der Kernenergie im Vergleich mit alternativen, nicht-fossilen Energieformen diskutiert. Ein weiterer Beitrag geht auf grundlegende Fragen der Reaktorsicherheit – jenseits von Stresstests – ein. *Seidelberger* unterscheidet dabei zwischen hypothetischer Sicherheit (dies prägte die Reaktorauslegung der Vergangenheit), realer Sicherheit (dies berücksichtigt die gemachten Erfahrungen mit Störfällen und Reaktorunfällen) und grundlegenden Problemen der Reaktorsicherheit (dies folgt aus der Diskrepanz zwischen hypothetischer und realer Sicherheit). Aus dieser Analyse wird u. a. abgeleitet, dass Maßnahmen zur Anlagensicherheit über die Annahme des Größten Anzunehmenden Unfalls (GAU) hinaus auf den Schweren Auslegungsunfall (SAU) erweitert werden müssten – insbesondere in Hinblick auf die Nachrüstung der weltweit überall betriebenen „alten“ Reaktoren der 2. Generation. Abschließend analysiert *Liebert* eine Reihe unausweichlicher Ambivalenzen der Kern(energie)technologie, wobei positiv erscheinenden Aspekten negative gegenübergestellt werden. Dabei kommt nochmals die Sicherheitsproblematik sehr grundsätzlich in den Blick. Betrachtet werden weiterhin die zivil-militärische Ambivalenz, Langzeitfolgen versus kurzfristige Erträge, sozioökonomische Ambivalenzen und zentrale Versprechungen im Zusammenhang mit der Kernenergie-technologie. Die Frage stellt sich, ob sich die Kerntechnologie nicht aufgrund ihrer tiefgreifenden Ambivalenzen als technologische Sackgasse herausstellt, aus der sich die Welt wieder herausmanövrieren muss.

Wir danken der Wiener Umweltschutzkommission (WUA) der Landesregierung Wien, die auch Koordinatorin des Städtenetzwerkes „Cities for a Nuclear Free Europe“ (CNFE) ist, für finanzielle und ideelle Unterstützung für dieses Buchprojekt, ebenso dem österreichischen Ministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft (BMLFUW). Für Unterstützung bei der Erstellung des Buchmanuskripts ist den MitarbeiterInnen des Instituts für Sicherheits- und Risikowissenschaften (ISR) der BOKU Wien, insbesondere Reinhard Müller, zu danken.

Wolfgang Liebert und Christian Gepp

**Kernenergienutzung  
im historischen Überblick**



# Es war einmal ein Bergwerk, ...

Christian Gepp

Der Titel ist einem Aufsatz in der Österreichischen Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen<sup>1</sup> entlehnt und soll für den vorliegenden Beitrag den Ausgangspunkt des historischen Überblicks zu den Anfängen der Kernforschung markieren. Der Endpunkt wird mit dem Jahr 1953 gesetzt. An diesen knüpfen zwei weitere Beiträge an, die sich mit der Entwicklung der Kerntechnik von 1953 bis 2011, beziehungsweise mit dem Einfluss der Reaktorkatastrophen von Harrisburg, Tschernobyl und Fukushima auf den Ausbau von Leistungsreaktoren beschäftigen. Grundlegenden Begriffe zur Radioaktivität und Reaktortechnik werden hier kurz erläutert.

## Frühe Forschungsleistungen und die Entdeckung der Radioaktivität

*„[...] Bei der Analyse der Pechblende, einem Fossil, welches halb zu den Zinkerzen, halb zu den Eisenerzen gerechnet wurde, entdeckte Klaproth im Jahre 1789 ein neues Metall, welches er nach dem neuen von Herschel entdeckten Planeten, der von den deutschen Astronomen den Namen Uranus erhielt, Uranium nannte.“*  
(Klaproth & Wolff 1807, S. 259)

Der britische Astronom Wilhelm Herschel (1738–1822) hatte am 13. März 1781 den Planeten Uranus entdeckt, welcher für das von Martin H. Klaproth (1743–1817) isolierte Element namensgebend werden sollte. Das Ausgangsmaterial für seine Untersuchung stellte die aus den Gruben von St. Joachimsthal<sup>2</sup> stammende Pechblende<sup>3</sup> dar.

Der aus Wernigerode im Harz stammenden Apotheker, der ab 1757 seine ersten Lehrjahre in der Ratsapotheke von Quedlinburg absolvierte und danach als Geselle in der königlichen Hofapotheke in Hannover tätig war, kam 1768 nach Berlin, wo er ab 1771 die Apotheke *zum weißen Schwan* als Provisor leitete. 1780 wurde er privilegierter Apotheker und legte im selben Jahr die Verwaltung der Apotheke zurück. 1782 erschien seine erste wissenschaftliche Veröffentlichung und 1788 wurde er zum Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften gewählt. In deren Rahmen präsentierte

---

1 Österreichische Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen, Jg 60, No. 10 (1912), Der Radiumkurort St. Joachimsthal, 135–136.

2 Gemeint ist der Ort Jáchymov in der Region Karlsbad in der heutigen Tschechischen Republik; Ende des 19. Jahrhunderts lag er im böhmischen Teil der Österreichischen-Ungarischen Monarchie.

3 Auch bekannt als Uraninit oder Uranpecherz; dabei handelt es um ein Mineral aus der Gruppe der Oxide mit der chemischen Zusammensetzung  $UO_2$  und einer oft schwarzen oder bräunlichen Farbe.

er am 24. September 1789 erstmals das Ergebnis seiner Entdeckung. Zu seinen weiteren wissenschaftlichen Leistungen sind auch die Entdeckung und Beschreibung der Elemente Zirkon (1789), Titan (1792), Strontium (1793), Chrom (1797) und Cerium (1803) zu zählen. Die radioaktiven Eigenschaften des Uranoxids blieben ihm jedoch verborgen (Dann 1958, S. 15–88). Die Isolation von reinem Uran erfolgte erst 1841 durch den französischen Chemiker Eugène-Melchior Péligot (1811–1890).

Es sollte noch über ein Jahrhundert dauern, ehe die Erforschung der Radioaktivität in der Wissenschaft Platz fand. In den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts überschlugen sich dafür beinahe die Ereignisse.

Einer der Ersten, der neue Erkenntnisse auf diesem Gebiet gewann, war der an der Universität Würzburg lehrende Wilhelm C. Röntgen (1845–1923). Durch einen Zufall gelang es ihm, die von ihm so bezeichneten *X-Strahlen* nachzuweisen. Bei Experimenten mit einer Crookes'schen-Röhre bemerkte er bei deren Entladung eine deutliche Fluoreszenz (Röntgen 1896, S. 3). Nach der Durchführung weiterer Untersuchungen kam er zu dem Schluss:

*„Eine Art von Verwandtschaft zwischen den neuen Strahlen und den Lichtstrahlen scheint zu bestehen, wenigstens deutet die Schattenbildung, die Fluoreszenz und die chemische Wirkung, welche bei beiden Strahlenarten vorkommen, darauf hin. Nun weiss man schon seit langer Zeit, dass ausser den transversalen Lichtschwingungen auch longitudinale Schwingungen im Aether vorkommen können und nach Ansicht verschiedener Physiker vorkommen müssen. Freilich ist ihre Existenz bis jetzt noch nicht evident nachgewiesen, und sind deshalb ihre Eigenschaften noch nicht experimentell untersucht.“* (Röntgen 1896, S. 12)

Diese Entdeckung zum Anlass nehmend, von welcher er durch den Mathematiker und Physiker Henri Poincaré erfahren hatte, begann sich auch der in Paris lebende Antoine Henri Becquerel (1852–1908) noch im selben Jahr mit der Frage zu beschäftigen, ob andere phosphoreszierende Stoffe ebenfalls *X-Strahlen* emittieren. Dazu brachte er die besten Voraussetzungen mit, denn bereits sein Vater und Großvater, beide ebenfalls Physiker, hatten sich der Erforschung des Phänomens der Lumineszenz gewidmet und ihrem Nachfahren ein gut ausgestattet Laboratorium überlassen. Nach einigen erfolglosen Versuchen entschied er sich auf das von Klapproth entdeckte Uransalz zurückzugreifen, da dieses aus seiner Sicht auf Grund seiner Struktur die besseren Voraussetzungen bot. Seine ersten Ergebnisse konnte er am 24. Februar 1896 der Académie des Sciences in Paris vorstellen (Allisy 1996, S. 3–6). Neben einer fotografischen Methode, bei der er in qualitativer Weise die Wirkung der Strahlung auf eine Fotoplatte untersuchte, bediente er sich auch einer zweiten Methode, die deutlich bessere, quantitative Ergebnisse erzielte. Diese beruhte auf seiner Beobachtung, dass die vom Uran ausgehende Strahlung elektrisch geladene Objekte auch noch in einiger Entfernung entladen konnte, ähnlich den zuvor entdeckten Röntgenstrahlen (Becquerel 1903, S. 52–54). Gemeinsam mit der Erkenntnis, dass die von ihm beobachtete

Strahlung unabhängig vom Vorhandensein einer Phosphoreszenz auftritt, gelangte er zu der Erkenntnis, dass diese eine atomare Eigenschaft des Urans sein musste:

*“The two methods showed that all uranium salts, whatever their origin, emitted radiation of the same type, that this property was an atomic property connected with the element uranium, and that metallic uranium was about three and a half times as active as the salt used in the first experiments.”* (Becquerel 1903, S. 54)

Auf Grund der großen Ähnlichkeit mit der Röntgenstrahlung wurde für die neuentdeckten Strahlen anfangs der Begriff *Becquerelstrahlen* gebräuchlich.

In wie weit diese Strahlung auch von anderen Elementen emittiert wird, sollte in den nachfolgenden Jahren vermehrt untersucht werden. Dabei kamen Gerhard Carl Schmidt (1865–1949) und Marie Curie (1867–1934) unabhängig voneinander zu der Erkenntnis, dass Thorium ähnliche Eigenschaft wie Uran besitzt (Becquerel 1903, S. 55). Eine wesentliche Verbesserung der Nachweismethode gelang durch die Beschreibung der ionisierenden Wirkung<sup>4</sup> und die Klassifizierung der Strahlung nach drei Strahlenarten<sup>5</sup> durch Ernest Rutherford (1871–1937) (Rutherford & Allen 1902), der auch gemeinsam mit Frederick Soddy (1877–1956) feststellte, dass der radioaktive Zerfall stets in Verbindung mit einer Umwandlung des Ausgangselements steht (Rutherford & Soddy, 1902). Anhand von Streuexperimenten, bei denen er Heliumkerne auf eine Goldfolie schoss, erlangte er grundlegende Erkenntnisse über den Atomaufbau und widerlegte das bis dahin übliche Atommodell, welches von einer homogenen Massenverteilung ausging (Rutherford 1911).

Auf die frühen Rutherford'schen Erkenntnisse aufbauend, gelang es nun Marie und Pierre Curie nachzuweisen, dass der Urangehalt alleine für die Aktivität<sup>6</sup> des untersuchten Minerals nicht verantwortlich war, da diese deutlich höher sein konnte als der Urangehalt selbst (Becquerel 1903, S. 55). Bei der Suche nach dem noch aktiveren Mineral entdeckten sie 1898 durch chemische Trennung das bisher unbekannt Element Polonium (Curie 1898, S. 175–178), dem noch im selben Jahr die Entdeckung eines weiteren neuen Elements – des Radiums – folgte (Curie & Bémont 1898, S. 1215–1217). Um ihre Nachforschungen fortsetzen zu können, benötigten sie größere Mengen der in St. Joachimsthal als Nebenprodukt anfallenden Pechblende, von der ihnen durch das k.u.k. Ackerbauministerium 11 Tonnen überlassen wurden. Aus

---

4 Beim Prozess der Ionisation verliert das Atom negativ geladene Elektronen aus der Atomhülle und es bleibt ein positiver Ladungszustand (Ion) zurück.

5 Die auch heute noch verwendete Einteilung in  $\alpha$ -(Heliumkerne),  $\beta$ -(Elektronen),  $\gamma$ -(elektromagnetische) Strahlen resultiert aus Ablenkversuchen in einem Magnetfeld.

6 Der Begriff Aktivität beschreibt die Anzahl der Kernzerfälle pro Zeiteinheit und wird seit 1985 in der Einheit Becquerel (Bq) angegeben, wobei 1 Bq einem Zerfall pro Sekunde entspricht. Die alte Einheit Curie (Ci) wird noch gelegentlich verwendet und ist durch die Aktivität von 1 g Radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) mit  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq definiert.

dieser Menge konnten von den Curies 85 mg Radium extrahiert werden (vgl. Seidlerová & Seidler 2010, S. 21–60).

Während der Physik Nobelpreis des Jahres 1903 auf drei Personen, Henri Becquerel sowie Pierre und Marie Curie<sup>7</sup>, aufgeteilt wurde, ging 1911 der Nobelpreis in Chemie allein an Marie Curie, den sie für die Entdeckung der beiden Elemente erhielt.

### „... das gelobte Land ...“

Bereits vor der Entdeckung der Radioaktivität wurde eine Möglichkeit gefunden, wie das von Kalproth entdeckte Element ökonomisch nutzbar gemacht werden konnte. Schon der Entdecker hatte vorgeschlagen das Mineral zum Färben einzusetzen (Klaproth 1789, S. 392–403). Wesentlichen Anteil an der wirtschaftlichen Verwertung des Urans hatte anfangs der aus Wien stammende Chemiker und Mineraloge Adolf Patera (1819–1894). Er arbeitete 1849 an der Untersuchung schwefelhaltiger Uranverbindungen und entwickelte dabei ein Verfahren zur Herstellung von reinen Uranverbindungen, das 1852 unter seiner Aufsicht wesentlich zur Steigerung der Produktion von Urangelb<sup>8</sup> in St. Joachimsthal beitrug (Patera 1854, S. 3–4). 1853 berichtete Patera an die kaiserliche Akademie der Wissenschaften über die Herstellung:

*„Es wurden im Verlaufe dieses Jahres in Joachimsthal nach der beschriebenen Methode über 15 Centner Urangelb dargestellt. [...] Es ist wohl das erste Mal, dass dieser seltene Stoff in so grosser Quantität wirklich fabrikmässig dargestellt wurde, [...]“* (Patera 1854, S. 5)

Dies kann als Auftakt für die Errichtung der im selben Jahr gegründete k.u.k. Uranfarbenfabrik angesehen werden. Da der bis dato vorherrschende Silberbergbau, der den Ort seit dem frühen 16. Jahrhundert prägte, zusehends an Bedeutung verloren hatte, erschlossen sich dadurch neue wirtschaftliche Möglichkeiten.

Die hergestellten Farben konnten zwischen sechs gelben Schattierungen variieren oder als schwarze Glasur vorkommen. Je nach herrschender Mode fanden diese auch im Ausland regen Absatz (MföA 1911, S. 41). Im April 1908 wurden in den Mühlen der k.u.k. Uranfarbenfabrik 1.217 kg Urangelb in den Farben Gelb und Orange gemahlen.<sup>9</sup> Die Produktion blieb bis zum Beginn des Zweiten Weltkriegs aufrecht und

7 Dabei erhielt Henri Becquerel die Hälfte des Preises zugesprochen, während die andere Hälfte auf Pierre und Marie Curie zu gleichen Teilen aufgeteilt wurde.

8 Nach seiner chemischen Zusammensetzung handelt es sich dabei um Natriumdiuranat, das in Verbindung mit Kali-Kalk-Glas, etwa böhmische Kristallgläser, an seiner grünlichen Farbe zu erkennen ist; (Soukup 2007, S. 520).

9 Österreichisches Staatsarchiv (OESTA)/Allgemeines Verwaltungsarchiv (AVA)/Landwirtschaft/Ackerbauministerium/Montanwesen XI/302/Berg- und Hüttenverwaltung Joachimsthal/Werksberichte 1908.

lieferte im Zeitraum von 1921 bis 1930 rund 154 Tonnen Uranfarbe (Karlsch 2007, S. 10).

Für den Vertrieb der Uranfarben hatte, gemäß kaiserlicher Entschließung vom 26. März 1849, die dem *Ministerium für Landescultur und Bergwesen* unterstehende *Bergwerks-Produkten-Verschleiß-Direction* zu sorgen<sup>10</sup>, die später durch das k.u.k. Montanverkaufsamt abgelöst wurde.

Obwohl seit der Entdeckung des Urans bis zum Ende des 19. Jahrhunderts an rund 20 Standorten in Europa das Mineral nachgewiesen werden konnte, blieb St. Joachimsthal der einzige Ort, der zu diesem Zeitpunkt über abbauwürdige Vorkommen verfügte.

Dieser Umstand führte zu einer rasch anwachsenden Popularität des Bergbaustädtchens, in dem neben der k.u.k. Uranfarbenfabrik auch ein „Radium Laboratorium“ eingerichtet wurde. Dieses sollte dazu beitragen, die stetige Nachfrage in- und ausländischer Wissenschaftler nach Pechblenderückständen zu decken. Bis Ende Dezember 1908 wurden bereits 2.400 kg Rückstände, durch wiederholtes Aufkochen in einer Sodalösung und anschließende Filtrierung, verarbeitet.<sup>11</sup> Für die im selben Jahr stattfindende Jubiläumsausstellung für Kaiser Franz Josef I. (1830–1916) in Wien und Prag übersandte die Hüttenverwaltung St. Joachimsthal einige Exponate. Für den Ausstellungsort Wien wurden neben Gangstücken sowie rohen und gerösteten Erzen, auch radioaktive Rückstände und angefertigte Radiumpräparate zur Verfügung gestellt.<sup>12</sup>

Das erste Radiumpräparat war jedoch bereits 1899 in Wien eingetroffen. Pierre Curie hatte es als Dank für die überlassene Pechblende der kaiserlichen Akademie zur Verfügung gestellt. In den Jahren 1904 bis 1907 stieg die Menge, des sich im Besitz der Akademie befindliche Radiums, rasant an (Ceranski 2012, S. 51–52). Die intensive Forschungstätigkeit führte 1910 zur Eröffnung des Institutes für Radiumforschung in Wien – der europaweit ersten Einrichtungen zur alleinigen Erforschung der Radioaktivität. Dieses war durch eine großzügige Spende des Großindustriellen Karl Kupelwieser (1841–1925) in der Höhe von 500.000 Kronen ermöglicht und die Leitung war Professor Franz Exner (1849–1926) übertragen worden.<sup>13</sup> Zusätzlich wurde eine staatliche Verkaufsstelle für Radiumprodukte eingerichtet. Der betriebene Aufwand lässt sich nicht nur durch die starke internationale Nachfrage, sondern auch den

---

10 Erlass des Ministeriums für Landescultur und Bergwesen vom 21. April 1849, in: Österreichische Nationalbibliothek (ÖNB), Historische Rechts- und Gesetzestexte Online (ALEX), URL: <http://alex.onb.ac.at/cgi-content/alex?aid=rgb&datum=18490005&seite=00000270> (22.12.2015).

11 OESTA/AVA/Landwirtschaft/Ackerbauministerium/Montanwesen XI/302/Berg- und Hüttenverwaltung Joachimsthal/Werksberichte 1908.

12 Ebd./Montanwesen XI/304/Berg- und Hüttenverwaltung Joachimsthal.

13 Neues Wiener Tagblatt, Nr. 303 (05.11.1909), Die Radiumgewinnung in Joachimsthal. Errichtung einer staatlichen Verkaufsstelle, 6, in: Österreichische Nationalbibliothek (ÖNB), Historische österreichische Zeitungen und Zeitschriften (ANNO), URL: <http://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=nwg&datum=19091105&seite=6&zoom=33> (29.12.2015).

stolzen Preis des Radiums rechtfertigen. Dieser wurde für 1 Gramm reinem Radiumchlorid auf 850.000 Kronen geschätzt.<sup>14</sup>

All diese Umstände mögen dazu beigetragen haben, dass die Linzer Tages-Post in ihrer Ausgabe vom 18. November 1909 überschwänglich kundtat, dass

„Bekanntlich [...] Oesterreich das gelobte Land des Radiumvorkommens [ist].“<sup>15</sup>

## Medizinische Anwendung des Radiums

Wie positiv die Bezeichnung *radioaktiv* im Vergleich mit heute besetzt war, wird auch bei der Betrachtung der Anwendung des Radiums im medizinischen und kosmetischen Bereich deutlich. Dabei wurden die Patienten zum Teil erheblichen Mengen Strahlung ausgesetzt, ohne deren Wirkung genau zu kennen.

Auf Beschluss einer von der Bezirkshauptmannschaft Prag eingesetzten Kommission und nach Besuch durch Erzherzog Karl Franz Joseph, dem späteren Kaiser Karl I. (1887–1922), ging am 3. Juni 1908 mit dem *Arbeiter Heilbad* bei der Uranfarbenfabrik eine weitere Institution in Betrieb, die für St. Joachimsthal vor allem dessen Ruf als Kurort begründen sollte. Während in den ersten Tagen sechs Patienten in der Kureinrichtung behandelt wurden, stieg deren Zahl bis zum Ende des ersten Monats auf 14 Personen an.<sup>16</sup>

Die feierliche Eröffnung der im Auftrag des Ministeriums für öffentliche Arbeiten erbauten k.u.k. Kuranstalt für Radiumtherapie fand am 22. Oktober 1911 statt. In der bei den Feierlichkeiten gehaltenen Ansprache des Sektionschef Emil Homann (1862–1945) heißt es:

„Zur Förderung der Erforschung der Wirkungen des Radiums im Bereiche der praktischen Medizin hat der österreichische Staat die Anstalt errichtet [...] Hier steht das Institut, [...], bestimmt, die Radiumtherapie zu pflegen und die Wirkungen des Radiums durch Heilanwendungen der leidenden Menschheit nutzbar zu machen. [...] Denn den Hilfsbedürftigen Linderung zu verschaffen, sie von ihren Leiden zu befreien, soll der Zweck dieser Anstalt sein. Möge sie die großen Hoffnungen erfüllen, welche in sie gesetzt worden sind [...].“<sup>17</sup>

Damit lag die Österreichisch-Ungarische Monarchie im Trend der Zeit und folgte mit der Kuranstalt in St. Joachimsthal als dritte große Einrichtung dem 1906 in Paris

14 Prager Tagblatt, Nr. 308 (08.11.1909), Billiges Radium, 3, in: ÖNB, ANNO, URL: <http://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=ptb&datum=19091108&seite=3&zoom=33> (29.12.2015).

15 Tages-Post, Nr. 263 (18.11.1909), Eine staatliche Radiumverkaufsstelle, 2, ÖNB, ANNO, URL: <http://anno.onb.ac.at/cgi-content/anno?aid=tpt&datum=19091118&seite=2&zoom=33> (29.12.2015).

16 OESTA/AVA/Landwirtschaft/Ackerbauministerium/Montanwesen XI/302/Berg- und Hüttenverwaltung Joachimsthal/Werksberichte 1908.

17 Österreichische Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen, Jg, 59, No. 43 (1911), Die k. k. Kuranstalt für Radiumtherapie in St. Joachimsthal, 582.

gegründeten „Biologischen Radiumlaboratorium“ sowie dem 1911 in London eingerichteten „Radium-Institut“, zur Erforschung und Anwendung der Radiumtherapie. Diese wurde herkömmlicherweise für Erkrankungen der Haut bzw. von Geschwülsten angewandt und erfolgte einerseits durch Radium Emanation<sup>18</sup>, und andererseits durch Auflegen von Radiumsalzen, die mittels Lack auf einen Träger aufgetragen waren und somit auf den betroffenen Hautstellen aufgelegt werden konnten (vgl. Dautwitz 1915). Der Radiumgehalt der zur Anwendung kommenden Präparate lag zwischen 1,85 und 42,8 mg<sup>19</sup> (Dautwitz 1915, S. 28).

Die Anwendung der Radiumtherapie blieb in den kommenden Jahrzehnten keineswegs den Kuranstalten vorbehalten. Neben der Erzeugung von radiumhaltigen Produkten, die nicht nur kosmetischen Zwecken dienten, sondern beinahe alle Bereiche des täglichen Lebens beeinflussten, wurde Radium Emanation auch zu einem Gegenstand häuslicher Anwendung.

Die Weltwirtschaftskrise von 1929 und die Erschließung großer Uranerzvorkommen in Kanada<sup>20</sup> sorgten für einen Preisverfall und eine rückläufige Uran- und Radiumproduktion in Europa (vgl. Karlsch 2007, S. 18).

## Kernforschung in den Jahren 1938 bis 1953

Angestoßen von der Entdeckung des Neutrons<sup>21</sup> (Chadwick 1932, S. 312) 1932 durch James Chadwick (1891–1974) und des Deuteriums<sup>22</sup> (Urey et al. 1932, S. 164–165) durch Harald Clayton Urey (1893–1981) im selben Jahr erhielt die Kernphysik weitere Impulse, die bald darauf zur Gründung von drei voneinander unabhängigen, aber sich gegenseitig beeinflussenden Forschergruppen führten. Eine dieser Gruppen formierte sich in Paris um die Physikerin und Chemikerin Irène Joliot-Curie (1897–1956) – die Tochter von Pierre und Marie Curie – der 1933 erstmals der Nachweis künstlicher Radioaktivität (Guerra et al. 2012, S. 33–58) gelang. Ein weiteres Team formierte sich in Rom um den Kernphysiker Enrico Fermi (1901–1954), der die Bedeutung thermischer Neutronen<sup>23</sup> für Kernumwandlungen erkannte. In der Aus-

---

18 Unter Radium Emanation wird das Isotop <sup>222</sup>Rn (Radon), das als gasförmiges Zerfallsprodukt aus dem Radium entweicht, verstanden.

19 Die Aktivität der Präparate kann für das Radiumisotop <sup>226</sup>Ra grob abgeschätzt werden und liegt je nach enthaltener Menge Radium zwischen 68 MBq und 1,6 GBq.

20 Zur Geschichte des Uranbergbaus in Kanada siehe: World Nuclear Association, Brief History of Uranium Mining in Canada (2015), online unter: <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Appendices/Uranium-in-Canada-Appendix-1--Brief-History-of-Uranium-Mining-in-Canada/> (23.12.2015). Zu Uranbergbau und dessen Folgen siehe auch den Beitrag von Diehl S. 255–274 in diesem Band.

21 Bezeichnet ein elektrisch ungeladenes Teilchen, das neben dem Proton (elektrisch positiv geladen) den zweiten Kernbaustein darstellt. Diese Eigenschaft macht es für die Kernspaltung relevant.

22 Wird auch als „schwerer Wasserstoff“ bezeichnet und beschreibt ein natürliches Wasserstoffisotop bestehend aus einem Proton und einem Neutron (<sup>2</sup>H).

23 Beschreibt freie Neutronen mit geringerer Energie.

gabe vom 16. Juni 1934 des Wissenschaftsjournals *Nature* publizierte Fermi einen Aufsatz, in dem er mit einer geringen Wahrscheinlichkeit den möglichen Nachweis von Transuranen<sup>24</sup> beschrieb:

*“This negative evidence about the identity of the 13 min.-activity from a large number of heavy elements suggests the possibility that the atomic number of the element may be greater than 92. If it were an element 93, it would be chemically homologous with manganese and rhenium. [...] However, as several elements are easily precipitated in this form, this evidence cannot be considered as very strong.”* (Fermi 1934, S. 899)

Diese Art des Beweises für die Existenz von Elementen, die schwerer als das damals bekannteste schwerste Element – Uran – und durch Kernumwandlung hergestellt worden waren, sollte sich in den nächsten Jahre als Irrtum herausstellen.

Zur Aufklärung, worum es sich bei dem beobachteten Element mit einer Halbwertszeit<sup>25</sup> von 13 Minuten tatsächlich handelte, trug die dritte Forschergruppe mit Ihrem Sitz am Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin bei. Die Wissenschaftler Otto Hahn (1879–1968), Lise Meitner (1878–1968) und Fritz Strassmann (1902–1980) widerlegten Fermis Theorie und veröffentlichten dazu ihrerseits eine Reihe einschlägiger Publikationen (vgl. Krafft 1980, S. 88). Angeregt durch Vorarbeiten von Joliot-Curie entdeckten die Berliner Wissenschaftler, wobei Lise Meitner nach 1938 aus Deutschland emigrieren musste und mit Otto Hahn nur noch schriftlich korrespondieren konnte, künstliche Isotope<sup>26</sup>, die sie zuerst dem Radium zuordneten (Brix 1989, S. 3). Es sollte sich wenig später herausstellen, dass es sich bei den ermittelten Radiumisotopen in Wirklichkeit um Bariumisotope handelte.

*„Wir kommen zu dem Schluß: Unsere „Radiumisotope“ haben die Eigenschaft des Bariums; als Chemiker müßten wir eigentlich sagen, bei den neuen Körpern handelt es sich nicht um Radium, sondern um Barium; denn andere Elemente als Radium und Barium kommen nicht in Fragen.“* (Hahn & Strassmann 1939, S. 14–15)

Diese Erkenntnis wurde am 6. Januar 1939 in der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften* publiziert und gilt als erster Nachweis für eine gelungene Kernspaltung durch die

24 Als „Transurane“ wurden alle Elemente bezeichnet, die schwerer als <sup>92</sup>U sind.

25 Beschreibt die Zeitspanne nach der von der Ausgangsmenge eines radioaktiven Elements die Hälfte zerfallen ist. Die Abnahme verläuft exponentiell und variiert je nach Element. Für <sup>137</sup>Cs (Cäsium) beträgt sie 30 Jahre, für <sup>239</sup>Pu (Plutonium) 24.110 Jahre und für <sup>235</sup>U 703 Mio. Jahre.

26 Bezeichnet Nuklide (Atomkerne) des selben Elements, die sich anhand ihrer Neutronenzahlen unterscheiden.

Identifikation des Bariums als eines der Spaltprodukte des Uranisotops  $^{235}\text{U}$ .<sup>27</sup> In einem Brief an die Herausgeber von *Nature*, der am 11. Februar 1939 in der Zeitschrift veröffentlicht wurde, brachten Lise Meitner und Otto R. Frisch (1904–1979) eine erste physikalische Beschreibung des chemischen Befundes und berechneten eine bei diesem Prozess der Kernspaltung frei werdende Energie in der Höhe von  $200\text{ MeV}^{28}$  (Meitner & Frisch 1939, S. 239–240). Das Phänomen der Kernspaltung durch die bei der Spaltung entstehenden Neutronen und die darausfolgende Kettenreaktion<sup>29</sup> war von unterschiedlichen Wissenschaftlern nicht zufällig beobachtet worden. Das in dieser Kernreaktion steckende Potential weckte in dieser Zeit großes wissenschaftliches und politisches Interesse, dem auf der anderen Seite auch Warnungen von renommierten Wissenschaftlern, die auf die damit verbundene Gefahr hinwiesen, gegenüberstanden. (Liebert 2013, S. 55)

Mit der Unterzeichnung des Münchner Abkommens im September 1938 war das Sudetenland unter Zustimmung Großbritanniens und Frankreichs an das nationalsozialistisch beherrschte Deutschland abgetreten worden, womit dieses auch in den Besitz der Uranminen in St. Joachimsthal gelangte. Trotz Einrichtung einer eigenen Gesellschaft zur Fortführung des Betriebes, kam es zu keiner Steigerung der geförderten Uranmengen (Karlsch 2007, S. 24), obwohl die Kernforschung im Dritten Reich von einem steten Mangel an Uran und Deuterium geprägt war.

Dennoch war bereits im September 1939 das deutsche *Uranprojekt* auf Betreiben des Heereswaffenamtes, zur weiteren Erforschung der Kernspaltung für vorrangig militärische Zwecke, eingerichtet worden. Eine wesentliche Rolle spielten dabei die Physiker Werner Heisenberg (1901–1976), der die Möglichkeiten zur Verwendung  $^{235}\text{U}$  als Kernsprengstoff untersuchte sowie die Funktionsweise eines Kernreaktors (Heisenberg 1939) beschrieb, und Carl Friedrich v. Weizsäcker (1912–2007), welcher die Herstellung von Plutonium, die in einem Kernreaktor möglich ist, und dessen Anwendung als Sprengstoff (Weizsäcker 1940) erkannte (vgl. Walker 2005). Eine andere Forschergruppe bildete sich um den Physiker Kurt Diebner (1905–1964), der nach seiner Entlassung als geschäftsführender Direktor des Kaiser Wilhelm Instituts Berlin seine Arbeiten am Versuchszentrum Gottow fortsetzte. Da auf Grund des Kriegsverlaufes für Deutschland ab 1941 die Entwicklung einer *Wunderwaffe* immer dringlicher wurde, der Bau einer Atombombe aber noch mehr Ressourcen und jahrelange Entwicklung erfordern würde, wie ab 1942 auch die am *Uranprojekt* beteiligten Physiker einräumten, war dessen weitere Erforschung gegenüber der Raketenentwicklung und anderen Waffenprojekten nachrangig geworden (Tooze 2006, S. 587).

---

27 Bei der Kernspaltung kommt es zu einem Einfang eines freien Neutrons z.B. durch einen Kern des  $^{235}\text{U}$ , dadurch entsteht kurzfristig das Isotop  $^{236}\text{U}$ , welches anschließend in  $^{139}\text{Ba}$  (Barium) sowie ein  $^{95}\text{Kr}$  (Krypton) zerfällt und dabei weitere Neutronen freisetzt.

28 Abkürzung für Million Elektronvolt. Ist ein Maß für die kinetische Energie eines Elektrons.

29 Durch die bei der Kernspaltung entstehenden freien thermischen Neutronen kommt es zu weiteren Kernspaltungen, die wiederum Neutronen freisetzen.

Im selben Jahr machte das amerikanische *Manhattan-Projekt*<sup>30</sup>, welches von 1942 bis 1945 von Julius Robert Oppenheimer (1904–1967) wissenschaftlich geleitet wurde, während General Leslie Richard Groves (1896–1970) es militärisch befehligte, entscheidende Fortschritte. In Chicago war es einer Forschungsgruppe, welcher u.a. Enrico Fermi und Leó Szilárd angehörten, am 2. Dezember 1942 gelungen einen ersten, kritischen<sup>31</sup> Kernreaktor erfolgreich in Betrieb zu nehmen. Bis 1944 wurden weitere Anlagen zur Herstellung von angereichertem Uran und Reaktoren zur Erzeugung von Plutonium in Oak Ridge und Hanford errichtet. Es sollte aber noch bis Mai 1945 dauern, ehe man genug spaltbares Material für die Verwirklichung des Projektes erzeugt hatte. Am 16. Juli 1945 explodierte die erste Bombe in der Wüste von New Mexico (sog. Trinity-Test) und kurz darauf, am 6. und 9. August, zerstörten *Little Boy* und *Fat Man* die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki.

Diesen Abwürfen folgten rasch weitere Atombombentests, wie etwa die amerikanischen *Operation Crossroads* und *Operation Greenhouse*, die sowjetischen *RDS-1* und *RDS-6s* und die britischen *Operation Hurricane*. Andere Staaten verwirklichten erst in den 1960er Jahren nukleare Rüstungsprogramme, auch wenn eine entsprechende Euphorie schon früher deutlich wahrnehmbar ist.

*“On 16 July 1945, the United States set off the world’s biggest atomic explosion. Since that date in 1945, the United States of America has conducted forty-two test explosions. [...]*

*Today, the United States stockpile of atomic weapons, which, of course, increases daily, exceeds by many times the total equivalent of the total of all bombs and all shells that came from every plane and every gun in every theatre of war in all the years of the Second World War. [...]*

*The secret is also known by the Soviet Union. The Soviet Union has informed us that, over recent years, it has devoted extensive resources to atomic weapons. During this period the Soviet Union has exploded a series of atomic devices, [...].”* (Eisenhower 1953)

Mit diesen Worten skizziert der Präsident der Vereinigten Staaten Dwight D. Eisenhower (1890–1969) am 8. Dezember 1953 vor der Generalversammlung der Vereinten Nationen in New York in seiner Rede, die unter dem Namen *Atoms for Peace* bekannt werden sollte, den Stand der nuklearen Rüstung. In seiner Ansprache spricht er sich für die friedliche Nutzung der Kernenergie, durch die Erzeugung von Elektrizität sowie für zivile Anwendungen im Bereich der Medizin und Landwirtschaft sowie

30 Siehe hierzu u.a. Reed, Bruce C., *The history and science of the Manhattan Project* (Undergraduate lecture notes in physics, Berlin 2014).

31 Ein Reaktor gilt als kritisch, wenn die zur Kernspaltung notwendige Kettenreaktion von selbst fortgesetzt wird.

„[...] *other peaceful activities* [...]“ unter Aufsicht einer unabhängigen Organisation, getragen von den Vereinten Nationen, – der *International Atomic Energy Agency* (IAEA), zu deren Gründung es allerdings erst 1957 kam – aus. Bis zum Jahr 2006 wurden dennoch weltweit 2.053 Kernwaffentests durchgeführt (Fedchenko & Hellgren 2007, S. 553–557). Erst mit den 1992 stattgefundenen Moratorien nahm die Zahl der stattfindenden Tests signifikant ab, denen 1996 die Unterzeichnung des *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*<sup>32</sup> (CTBT) folgte.

*“To the making of these fateful decisions, [...] its determination to help solve the fearful atomic dilemma – to devote its entire heart and mind to finding the way by which the miraculous inventiveness of man shall not be dedicated to his death, but consecrated to his life.”* (Eisenhower 1953)

## Literaturverzeichnis

- Allisy A. (1996): Henri Becquerel: The Discovery of Radioactivity, in: *Radiat Prot Dosimetry* Vol 68 (1–2), S. 3–10.
- Becquerel H. (1903): On radioactivity, a new property of matter (Nobel Lecture, 1903) S. 52–70, URL: [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-lecture.pdf) (02.12.2015).
- Brix P. (1989): Die folgenreiche Entdeckung der Uranspaltung – und wie es dazu kam, in: *Physikalische Blätter* Vol. 45 No. 1, S2–5, DOI: 10.1002/phbl.19890450103 Januar 1989.
- Ceranski B. (2012): Vom Rohstofflieferanten zum Forschungsstandort: Die frühe österreichische Radioaktivitätsforschung. In: Fengler, Silke, Sachse, Carola (Hrsg.), *Kernforschung in Österreich. Wandlungen eines interdisziplinären Forschungsfeldes (Wissenschaft, Macht und Kultur in der modernen Geschichte Bd. 1, Wien/Köln/Weimar 2012)* S. 49–72.
- Chadwick J. (1932): Possible Existence of a Neutron, in: *Nature* 27. Februar 1932, Vol. 129 No. 3252, S. 312.
- Curie P., Curie M. (1898): Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende (1). Note de M.P. Curie et de Mme S. Curie, présentée par M. Becquerel. In: *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXXXVII, S.175–178 (18. Juli 1898), URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3083q/f5.item> (26.12.2015).
- Curie P., Curie M., Bémont G. (1898): Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende (2). Note de M. P. Curie, de Mme P. Curie et de M. G. Bémont, présentée par M. Becquerel. In: *Comptes rendus de l'Académie des*

---

32 Vertrag über das vollständige Verbot von Kernwaffentests.

- Sciences, CXXVII, S. 1215–1217 (26. Dezember 1898), URL: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3083q/f5.item> (26.12.2015).
- Dann G. E. (1958): Martin Heinrich Klaproth 1743–1817. Ein deutscher Apotheker und Chemiker. Sein Weg und seine Leistungen (Berlin 1958).
- Dautwitz F. (1915): Mitteilungen aus der k.k. Kuranstalt für Radiumtherapie in St. Joachimsthal 1. Heft (Wien/Leipzig 1915).
- Eisenhower D. D. (1953): Atoms for Peace Speech to the 470th Plenary Meeting of the United Nations General Assembly (08. Dezember 1953), URL: <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech> (03.01.2016).
- Fedchenko V., Hellgren R. F. (2007): Appendix 12B. Nuclear explosions, 1945–2006. In: Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) (Hg.), SIPRI Yearbook 2007. Armaments, Disarmament and International Security (Stockholm/Peking 2007), URL: <http://www.sipri.org/yearbook/2007/files/SIPRIYB0712B.pdf> (21.12.2015).
- Fermi E. (1934): Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92, in: Nature Vol 133 No. 3372, 16. Juni 1934, doi:10.1038/133898a0.
- Guerra F., Leone, Matteo, Robotti, Nadia (2012): The Discovery of Artificial Radioactivity. In: Physics in Perspective Vol 14 No. 1, März 2012, S. 33–58.
- Hahn O., Strassmann F. (1939): Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle. In: Die Naturwissenschaften Vol. 27 No. 1, 6. Januar 1939, S. 11–15.
- Heisenberg W. (1939): Die Möglichkeit der technischen Energiegewinnung aus der Uranspaltung (06.12.1939). Im Online Archiv des Deutschen Museums, URL: <http://www.deutsches-museum.de/archiv/archiv-online/geheimdokumente/forschungszentren/leipzig/energie-aus-uran/> (21.12.2015).
- Karlsch R. (2007): Uran für Moskau. Die Wismut – Eine populäre Geschichte (Berlin 2007).
- Klaproth M. H. (1789): Chemische Untersuchung des Uranits, einer neuentdeckten metallischen Substanz. In: Crells Annalen No. 2 (1789), S. 387–403, URL: <http://www.mdz-nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:bvb:12-bsb10072268-8> (05.12.2015).
- Klaproth M. H., Wolff F. (1807): Chemisches Wörterbuch, 5. Bd. (Berlin 1807), S. 259–270, URL: <http://urn:nbn:de:hbz:061:2-24685-p0269-1> (01.12.2015).
- Krafft F. (1980): Ein frühes Beispiel interdisziplinärer Teamarbeit (I). Zur Entdeckung der Kernspaltung durch Hahn, Meitner und Straßmann. In: Physikalische Blätter Vol. 36 No. 4, April 1980, S. 85–89, DOI: 10.1002/phbl.19800360403.
- Liebert W. (2013): Entwicklung und Einsatz der Atombombe. In: Grunwald A. (Hg.), Handbuch Technikethik, S. 55–60.

- Meitner L., Frisch O. R. (1939): Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. In: *Nature* Vol. 143 No. 3615, 11. Februar 1939, S. 239–240, doi:10.1038/143239a0.
- MföA (K.K. Ministerium für öffentliche Arbeiten) (Hrsg.) (1911): *St. Joachimsthal* (Wien 1911).
- Patera A. (1854): Über fabrikmässige Darstellung von Urangelb (Sonderabdruck aus dem Novemberhefte des Jahrganges 1853 der Sitzungsberichte der mathem.-naturw. Classe der kais. Akademie der Wissenschaften, Bd. XI) Wien 1854, URL: <http://www.mdz-nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:bvb:12-bsb10074274-2> (03.12.2015).
- Röntgen W. C. (1896): Eine neue Art von Strahlen (Würzburg, 1896), URL: [http://www.deutschestextarchiv.de/roentgen\\_strahlen\\_1896](http://www.deutschestextarchiv.de/roentgen_strahlen_1896) (02.12.2015).
- Rutherford E (1911): The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles and the Structure of the Atom. In: *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* 55, S. 18–20, URL: <http://www.biodiversitylibrary.org/page/10270241#page/380/mode/1up> (03.01.2016).
- Rutherford E., Allen S. J. (1902): Erregte Radioaktivität und in der Atmosphäre hervorgerufene Ionisation. In: *Physikalische Zeitschrift*. 3, S. 235–236.
- Rutherford E., Soddy F. (1902): The radioactivity of thorium compounds II. The cause and nature of radioactivity. In: *Journal of the Chemical Society* 81, S. 837–860.
- Seidlerová I., Seidler J. (2010): *Jáchymover Uranerz und Radioaktivitätsforschung um die Wende des 19./20. Jahrhunderts* (Chemnitz 2010).
- Soukup R. W. (2007): *Chemie in Österreich. Bergbau, Alchemie und frühe Chemie. Von den Anfängen bis zum Ende des 18. Jahrhunderts* (Wien/Köln/Weimar 2007).
- Tooze A. (2007): *Ökonomie der Zerstörung* (München 2007).
- Urey H. C., Brickwedde F. G., Murphy G. M. (1932): A Hydrogen Isotope of Mass 2. In: *Physical Review* Vol. 39 No. 1, 1 Januar 1932, S. 164–165.
- Walker M. (2005): Eine Waffenschmiede? Kernwaffen- und Reaktorforschung am Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik (Vorabdruck „Geschichte der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft im Nationalsozialismus, No. 26), URL: <http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/KWG/Ergebnisse/Ergebnisse26.pdf> (29.11.2015).
- Weizsäcker C. F. (1940): Eine Möglichkeit der Energiegewinnung aus Uran 238 (17.07.1940), im Online Archiv des Deutschen Museums, URL: <http://www.deutsches-museum.de/archiv/archiv-online/geheimdokumente/forschungszentren/wien-heidelberg-strassburg/weizsaecker-energie-aus-u238/> (21.12.2015).