

Wie Fukushima die Energiepolitik und Energieforschung in Deutschland und international verändert¹

Joachim Knebel, Karlsruher Institut für Technologie

Zusammenfassung

Dieser Artikel beschreibt die augenblickliche Situation am Standort Fukushima und behandelt die Energiepolitik und Energieforschung in Deutschland nach den Ereignissen in Japan vom 11. März 2011. Die Situation sowie die Entwicklungen in Deutschland werden mit der Entwicklung der Kernenergie weltweit verglichen. Die Diskussion schließt die Themen Partitioning und Transmutation sowie nukleare Entsorgung mit ein.

1. Fukushima: Ereignisse, KIT²-Aktivitäten, Status und Medien

Die gewaltige Naturkatastrophe, die das japanische Volk am Freitag, 11. März 2011 getroffen hat, zerstörte durch eine verheerende Kombination von Erdbeben und Flutwelle große Landstriche im Nordosten der japanischen Hauptinsel Honshu und brachte unvorstellbares Leid über die Menschen. Die stolze Technologienation Japan ist schwer getroffen. Gelähmt und fassungslos stehen die Überlebenden in den Trümmern und betrauern ihre Toten. Aus dem fernen Europa können wir uns nur schwer eine Vorstellung von dem menschlichen Leid und den Zerstörungen machen.

Diese Naturkatastrophe beschädigte auch die Kernkraftwerke am Standort Fukushima Dai-ichi. Der Ausfall der Notstrom-Diesgeneratoren sowie der Spannungs- und Stromversorgung der Notkühlsysteme führte zu einem katastrophalen Nuklearunfall, der für uns in den internationalen Medien hautnah erlebbar wurde. Die von der Wissenschaft vorhersagbaren Szenarien wurden Realität: Kernaufheizung bis zur partiellen Kernschmelze mit begleitender Wasserstoff-Produktion, Druckentlastung des Sicherheitsbehälters, Wasserstoffexplosionen mit Zerstörung von Reaktorgebäudestrukturen sowie unkontrollierte Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung. Die Ereignisabläufe in den Reaktorblöcken 1, 2 und 3 sind auf der INES-Skala der IAEA in die höchste Kategorie 7, also einem katastrophalen Unfall, eingestuft.

Fazit heute: Durch den Tsunami sind mehr als 15.800 Todesopfer und mehr als 3.000 vermisste Menschen zu beklagen. Etwa 115.000 Gebäude sind zerstört, 340.000 Menschen mussten ihre Heimat verlassen. Als Folge des Nuklearunfalls flohen 87.000 Menschen vor freigesetzter Radioaktivität. Noch heute wohnen 53.000 Menschen in Containerwohnungen.

¹ Dieser Vortrag wurde im Rahmen des Symposiums „Fukushima und die Konsequenzen“ gehalten. Der Text entspricht in weiten Teilen dem gesprochenen Wort. Die Folien des diesem Beitrag zugrundeliegenden Vortrags sind unter http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2012-AKE_Berlin/Links_DPG2012.htm abzurufen.

² Karlsruher Institut für Technologie

Wann die stark kontaminierten Gebiete wieder sicher bewohnbar sein werden kann heute nicht gesagt werden.

In der Umgebung des Kraftwerkstandortes Fukushima wurde mit der Dekontamination von Gebäuden sowie von mehreren Hundert Quadratkilometern Boden begonnen. Durch das Abtragen einer rund fünf Zentimeter starken Schicht Erde soll die radioaktive Belastung unter den Schwellenwert von fünf Millisievert gesenkt werden. Diese Maßnahmen werden zuerst an Kindergärten, Schulen, Krankenhäusern und ähnlichen Einrichtungen vorgenommen. Für die Lagerung der abgetragenen Erde zeichnet sich noch keine langfristige Lösung ab.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) stellte das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich (FZJ), dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) sowie der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) aktuelle technische Hintergrundinformationen zu den Ereignissen in Fukushima zusammen³: Bisher erschienen 31 wissenschaftlich-technische Informationen sowie tägliche Updates der Dosisabschätzung für potentielle radioaktive Freisetzungen aus Fukushima I auf dem japanischen Festland (Vorausrechnungen für 24 Stunden). Die Informationen und Daten entstehen in enger Kooperation und Wechselwirkung mit den japanischen Behörden, dem Betreiber TEPCO und den japanischen Forschungseinrichtungen sowie den Kooperationspartnern GRS, AREVA NP und VGB PowerTec.

Wesentlicher Teil der öffentlich verfügbaren und von japanischen Bürgern abgerufenen Informationen war die tägliche Veröffentlichung der Ausbreitungsrechnungen der Jod 131 Luftkonzentration mit dem KIT-Rechenprogramm JRODOS [1]. Die grafisch animierten Ausbreitungsrechnungen zeigen, wo aktuell für die nächsten 24 Stunden luftgetragene Radioaktivität erwartet werden kann. Ein Beispiel zeigt Abbildung 1. Die Rechnungen wurden bis zum 21. April 2011 aktualisiert. Das Notfallschutz- und Entscheidungshilfesystem RODOS ist heute in mehr als zehn europäischen Ländern installiert.

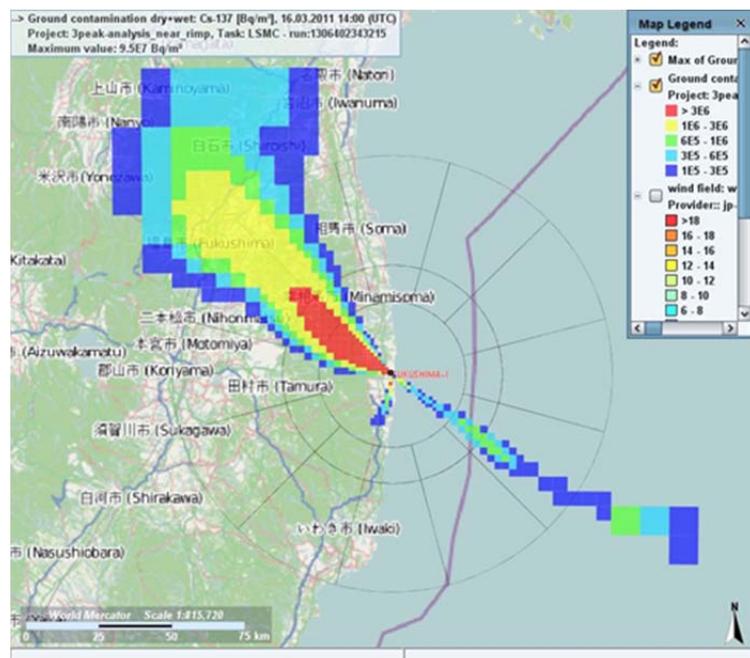


Abbildung 1:
Bodenkontamination mit
Cäsium-137 in Bq/m²,
berechnet mit dem KIT-
Programm JRODOS (Java
Real-time On-line DecisiOn
Support) vom 16.3.2011.

³ Diese Informationen sind abrufbar auf der Internetseite <http://www.kit.edu/besuchen/6042.php>

Ein Vergleich der mit RODOS abgeschätzten Kontaminationswerte mit den gemessenen Werten stimmt innerhalb eines Faktors von etwa fünf sehr gut überein. Die für die Rechnung verwendeten Quellterme sind der Kooperation mit der GRS entnommen.

Die Regierung Japans hat gemeinsam mit TEPCO eine international ausgewählte Gruppe von Nuklearexperten zu dem Seminar „International Experts’ Workshop and International Symposium on the Decommissioning of TEPCO’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 1-4“ im März 2012 nach Tokyo eingeladen. Die Teilnehmer, auch von KIT, konnten die Kernkraftwerks-Anlagen in Fukushima besichtigen und sich ein genaues Bild vor Ort verschaffen, siehe Abbildung 2.



Abbildung 2: Blick auf die mobilen Pumpen des Notkühlsystems (links) sowie in die provisorische Schaltwarte (rechts), [2].

Der Besuch verdeutlichte: Die ursprüngliche Höhe des Geländes wurde für den Bau der Kernkraftwerke in Fukushima I um etwa 25m abgetragen. Die Schutzvorrichtungen für Flutwellen waren nur für Wellenhöhen von 5,7m ausgelegt, welche von dem Tsunami vom 11. März deutlich überschritten wurde. Die nicht gebunkerten Notstromdiesel sowie die Notkühlssysteme versagten schlussendlich.

Heute, ein Jahr nach der Katastrophe, müssen aus dem Kraftwerksblock 1 etwa 2,9MWth sowie aus den Blöcken 2 und 3 etwa 5MWth abgeführt werden. Diese Kühlung muss noch über mehrere Jahre sicher und zuverlässig aufrecht erhalten bleiben. Die zurzeit installierten aktiven Kühlsysteme erfüllen diese Aufgabe: Allerdings erfordert dies die fortwährende Reinigung und Dekontamination des Kühlwassers sowie des kontinuierlich über Risse im Fundament der Kraftwerke in die Anlage eindringenden Grundwassers. Die Dokumentationen von TEPCO [3] zeigen ausführlich die provisorischen Arbeiten am Standort bezüglich der Entfernung des Schutts vom Gelände der zerstörten Reaktorgebäude und der Bergung der Großkomponenten, welche oftmals nur fernhantiert möglich ist. Ferner ist die neu installierte Technik zur Kühlung der Reaktorkerne und der Brennelementlagerbecken sowie zur Reinigung und teilweisen Zwischenlagerung der hochkontaminierten Kühlwässer dokumentiert.

Ein wesentlicher Teil der Arbeiten konzentriert sich auf die Errichtung einer Grundwasser-Schutzwand zwischen den Reaktorblöcken 1 bis 4 und dem Ozean, der bis zu 23m in den Grund betrieben wird, um die direkte Verbindung zwischen Reaktorgebäuden und Ozean und

somit den Eintrag von Radioaktivität in den Ozean bestmöglich zu vermindern, siehe Abbildung 3.

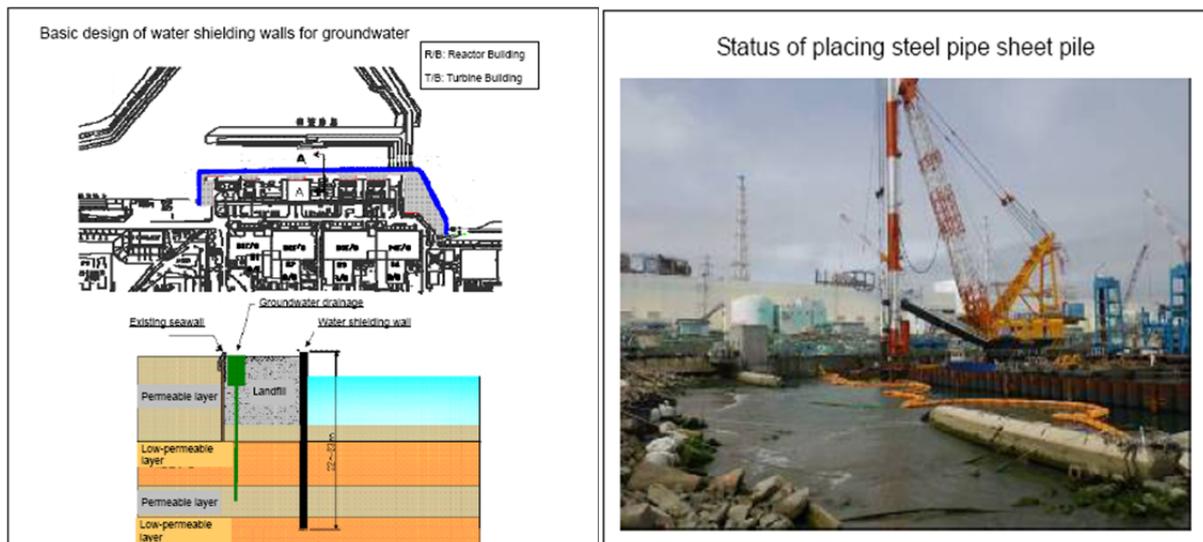


Abbildung 3: Maßnahmen zur Errichtung einer Grundwasser-Schutzwand zwischen Reaktorgebäuden und Ozean (blaue Linie im linken Bild) [3].

An der Anlage Fukushima I werden derzeit Schutzhüllen aus Stahlgerüsten und Polyesterplatten errichtet, um die Reaktoren 1 bis 4 gasdicht abzuschließen, siehe Abbildung 4. Eine entsprechende Umschließung ist für Block 1 vollendet, für die Blöcke 2 bis 4 in Vorbereitung. Die Errichtung von stabilen Stahlbetonumschließungen, die massiven inneren und äußeren Einwirkungen standhalten können, ist für alle vier Blöcke in der Planung. Ein vollständiger Rückbau der zerstörten Reaktoranlagen ist für einen Zeitraum von 30 bis 40 Jahren vorgesehen.



Abbildung 4: Errichtung eines Stahlgerüsts mit Umhausung für Reaktorblock 1 [3].

Fazit: In Japan wurden Tsunami-Warnsteine errichtet, die das Eindringen von früheren Flutwellen in das Land dokumentieren. Sie sagen: „Baue keine Gebäude zwischen Meer und diesem Warnstein. Achte auf Tsunamis, wenn ein starkes Erdbeben eintritt!“ Warum wurden diese Zeitzeugen nicht beachtet und entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen?

Die Presse in Deutschland reagierte sofort und energisch auf die Ereignisse in Fukushima: Mit Stand vom 14. April 2011 wurden sämtliche Presseartikel in Europa, die das Stichwort ‚Fukushima‘ beinhalteten gezählt. Von den insgesamt knapp 53.000 Presseartikeln wurden 43.640 in Deutschland veröffentlicht, [4]. Die Folgen dieser medialen Aufmerksamkeit führten zu tiefgreifenden Veränderungen der Energiepolitik in Deutschland.

2. Energiepolitik und Energieforschung nach Fukushima in Deutschland

In Deutschland waren die Bilder und Reportagen der Katastrophe in Japan allgegenwärtig in den Medien. Es war nicht nur eine japanische Katastrophe, es war unsere eigene Katastrophe, die sehr emotional und politisch behandelt wurde. Und eigentlich waren es nicht das Erdbeben und der Tsunami, sondern es waren hauptsächlich die Nuklearkatastrophe in Fukushima und die nicht absehbaren Folgen für die Menschen, über die ausführlich berichtet wurden.

Die Reaktionen der in Deutschland politisch Verantwortlichen war so einfach wie konsequent: Sofortige Abschaltung der sieben ältesten deutschen Kernkraftwerke (Atom-Moratorium vom 14. März 2011), Durchführung von Stresstests für die deutschen Kernkraftwerke, Novellierung des Atomgesetzes am 6. August 2011 sowie die Entscheidung, die verbleibenden neun Kernkraftwerke bis spätestens Ende 2022 abzuschalten und somit endgültig aus der Kernenergie auszusteigen.

Begleitet wurden diese Entscheidungen von der ‚Ethikkommission für eine sichere Energieversorgung‘, die am 22. März 2011 von der deutschen Bundeskanzlerin Angela Merkel mit dem Ziel eingesetzt wurde, sowohl technische als auch ethische Aspekte der Kernenergie zu prüfen, einen gesellschaftlichen Konsens zum Ausstieg aus der Kernenergie vorzubereiten und Vorschläge für den Übergang in das Zeitalter der erneuerbaren Energien zu erarbeiten, ohne dabei neue Risiken einzugehen [5].

Allerdings: Eine koordinierte Absprache mit den europäischen Nachbarn erfolgte nicht.

Als Folge von Fukushima treibt Deutschland noch energischer die Energiewende voran und damit die Realisierung des Zeitalters der erneuerbaren Energien. Das Ziel ist einfach: Bis zum Jahr 2050 soll der Stromverbrauch in Deutschland bezogen auf das Jahr 2008 fast halbiert und dann zu etwa 80% regenerativ erzeugt werden. Die Halbierung soll zu gleichen Teilen durch Energieeinsparungen und Energieeffizienz sowie durch Energieimporte erreicht werden, siehe Abbildung 5. Diese Entwicklung steht einem kontinuierlichen Anstieg des Stromverbrauchs in Deutschland gegenüber: Von 2009 auf 2010 betrug der Zuwachs im Stromverbrauch in Deutschland über alle Sektoren etwa 3.6%.

Die Energiepolitik der deutschen Bundesregierung lautet: Deutschland strebt an, eine der energieeffizientesten und umweltschonendsten Volkswirtschaften der Welt zu werden [6]. Von 2009 bis 2011 soll der Stromanteil aus Erneuerbaren Energien von 17 auf 20 Prozent steigen. Das Ziel für 2020 ist ein Anteil von 35%, für 2050 von 80%. Ende 2022 geht das letzte deutsche Kernkraftwerk vom Netz. Übergangsweise soll mehr Strom aus Kohle und Gas erzeugt werden, damit die Stromversorgung für Deutschland zuverlässig und bezahlbar bleibt. Es gilt, die Modernisierung vorhandener Kraftwerke sowie die schnelle Fertigstellung neuer Kraftwerke sicherzustellen. Vorrangig ist ebenfalls der Bau großer Windkraftanlagen onshore wie offshore sowie die Förderung der Biomasse. Weitere wesentliche Punkte sind die Speicherung von Strom aus erneuerbaren Energien und die Förderung von innovativen Speichertechnologien sowie der Bau von weiteren Pumpspeicherkraftwerken. Ein

wesentlicher Aspekt der zukünftigen Energiepolitik ist der zügige Ausbau des Stromnetzes, um den Strom aus Windkraft von den Orten der Erzeugung an die Orte des Verbrauchs zu verteilen. Wichtig ist hierbei die Anhörung und Berücksichtigung betroffener Bürger bei der Konzeptionierung der neuen Trassen. Schlussendlich ist die energetische Sanierung von Gebäuden und die Aufstockung des Programms zur CO₂-Gebäudesanierung ein wichtiges Element.

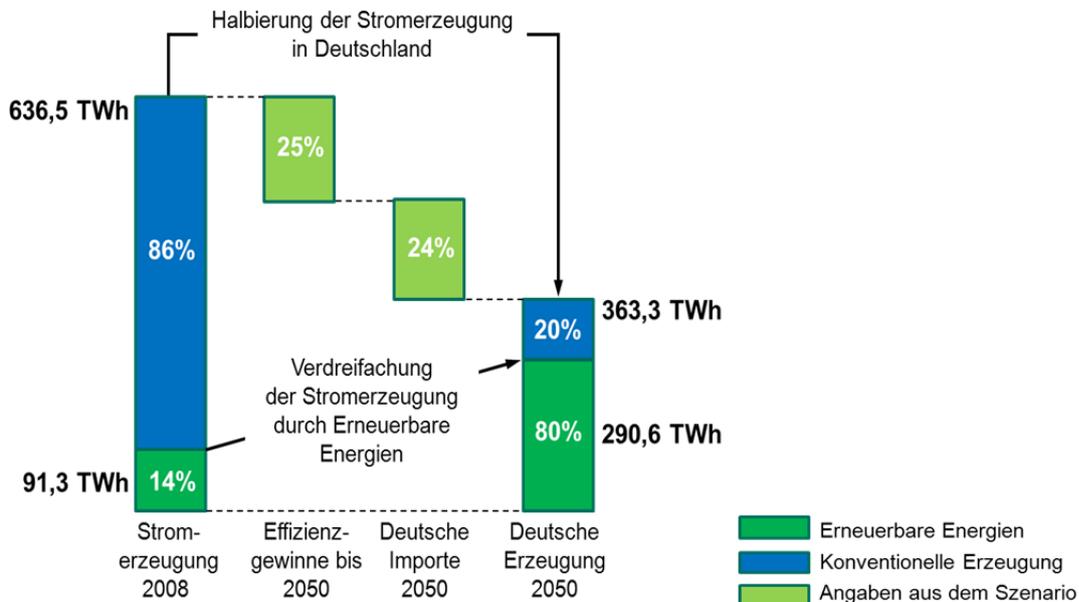


Abbildung 5: Reduzierung der Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 entsprechend dem Energiekonzept der Bundesregierung.

Diese neue Energiepolitik der Bundesregierung spiegelt sich an den Forschungspolitischen Vorgaben für den Forschungsbereich Energie der Helmholtz-Gemeinschaft wieder. Basierend auf dem 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung [7] werden für die nationale Vorsorgeforschung im Forschungsbereich Energie insgesamt sechs strategisch wichtige Themen festgelegt. Diese sind:

1. Erneuerbare Energien für eine zukunftsorientierte Energieversorgung,
2. Speicher und vernetzte Infrastrukturen,
3. Energieeffizienz, Materialien, Ressourcen für den Umbau der Energieversorgung,
4. Technologie, Innovation und Gesellschaft,
5. Nukleare Entsorgung und Sicherheit, Strahlenforschung, unter der Vorgabe eines Verzichts Deutschlands auf die Stromerzeugung aus Kernenergie, und
6. Kernfusion als Langfristoption.

Für den Umbau des Energiesystems in Deutschland ergeben sich somit folgende grundsätzliche neue Herausforderungen: Umbau der Energieerzeugung vom Punkt zur Fläche sowie von zentral zu dezentral, Umbau vom direkten Verbrauch zur (Zwischen-)Speicherung, Änderung des Nutzerverhaltens in Folge des fluktuierenden Energieangebots durch verstärkte

Nutzung erneuerbarer Energien sowie verstärkter Teilnahme der Energieverbraucher an der Steuerung und Erstellung von Energiedienstleistungen.

Für das Bundesland Baden-Württemberg bedeutet die Energiewende zum Beispiel Folgendes [8]: Der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2020 soll auf 38% gesteigert werden. Das bedeutet, dass vor allem auf kommunaler Ebene Wege zur effizienten Ausschöpfung der Potenziale von Wasserkraft, Bioenergie und geothermischer Stromerzeugung gefunden werden müssen. Das 10%-Windkraft-Ziel und 12%-Photovoltaik-Ziels sind nur unter erheblicher Wachsdynamik erreichbar. Insbesondere ist hier auf die stark fluktuierende Charakteristik der Wind- und PV-Energie zu achten. Größere Zeiträume von Starkwind oder Windflaute sind durch Speicherung oder Rückspeicherung der Windenergie (gegebenenfalls bis zu GWd) mithilfe von neuen Speichertechnologien zu überbrücken. Auch ist zu berücksichtigen, dass der Windertrag im zeitlichen Mittel bis zu 25% schwanken kann.

Speicher wie Pumpspeicherkraftwerke sind eine gute Lösung. Allerdings ist ihre Kapazität begrenzt: Das in Atdorf im Schwarzwald projektierte Pumpspeicherkraftwerk hat eine Kapazität von 12,5GWh bei einer Leistung von maximal 1400MW. Die Speicherkapazität aller Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland beträgt 40GWh. Im Vergleich tragen die für Deutschland und das Jahr 2020 anvisierten 1 Million Elektrofahrzeuge bei 20kWh Speicherkapazität, 70% Verfügbarkeit zur Speicherung sowie 50% mittlerer freier Speicherkapazität etwa 7GWh bei. Das entspricht gut der halben Kapazität des Pumpspeicherkraftwerks Atdorf.

3. Kernenergie International

Weltweit waren im Dezember 2011 in 31 Ländern 437 Kernkraftwerke zur elektrischen Stromerzeugung in Betrieb (installierte elektrische Bruttoleistung: 389GWe), 63 Kernkraftwerke waren in 14 Ländern im Bau (elektrische Bruttoleistung: etwa 65GWe) und etwa 160 Kernkraftwerke sind in Planung. Einen aktuellen Überblick über den Stand und die Entwicklung der Kernenergie weltweit gibt [9]. Hier nur einige Beispiele.

In Europa verfolgen Länder wie Frankreich, Finnland oder Russland ehrgeizige Pläne zum Ausbau der zivilen Nutzung der Kernenergie. Speziell Frankreich setzt auf eine Laufzeitverlängerung der bestehenden Kernkraftwerke, den Bau des Europäischen Druckwasserreaktors (EPR) als Kernreaktor der Generation III+ in Flamenville und Penly sowie der Entwicklung von Reaktoren der Generation IV, die auch hochradioaktiven Abfall energetisch umsetzen können. Nichtsdestotrotz setzt Frankreich auf den verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung.

Die Errichtung zweier EPR in der VR China ist am Standort Taishan weit fortgeschritten. Die Reaktorkuppel bei Block 1 wurde Ende 2011 montiert. Als weiteres Beispiel dient die VR China: Aufgrund des enormen Energiebedarfs werden jede Woche etwa ein Kohlekraftwerk in Betrieb genommen. 16 Kernkraftwerke sind heute in Betrieb, etwa 26 Kernkraftwerke sind im Bau. Deren projektierte Leistung übersteigt die Leistung der vor der Energiewende in Deutschland betriebenen Kernkraftwerke deutlich. Trotzdem beträgt die durch Kernkraftwerke in der VR China erzeugte Strommenge nur etwa 2% der insgesamt in China verbrauchten Strommenge. Dies verdeutlicht die enorme Energie in Form von Strom, die ein Volk von 1,3 Milliarden Menschen benötigt.

In den USA haben etwa 60% der Kernkraftwerke eine Laufzeitverlängerung auf 60 Jahre erhalten. Als Neubauprojekte sind Vogtle 3 und 4 zu nennen, für welche im März 2012 die

letzten Armierungsarbeiten vor der Vergießung des ersten Betons erfolgten. Auch die Forschung wird forciert vorangetrieben: Das Idaho National Lab (INL) ist die national führende kerntechnische Forschungseinrichtung in den USA.

4. Partitioning & Transmutation

Im Rahmen der internationalen Strategien zur Weiterentwicklung der Kernenergie stellt die Forschung zu Partitioning & Transmutation (P&T) eine technologische Option dar [10].

Ein wesentlicher Aspekt der Nutzung der Kernenergie ist die sichere Behandlung und Entsorgung der langlebigen hochradioaktiven Abfälle, die in Kernkraftwerken anfallen. Eine Entsorgungsstrategie ist die direkte Endlagerung der abgebrannten Brennelemente in tiefen geologischen Formationen. Als Möglichkeit für eine wesentliche Ergänzung und technologische Alternative wird die Abtrennung und Umwandlung (P&T) der langlebigen Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen betrachtet. Diese Technologie zielt auf die Verringerung der endzulagernden langlebigen radioaktiven Stoffe (insbesondere Plutonium und die Minoren Actiniden) durch Abtrennung (Partitioning) und anschließende Umwandlung (Transmutation). Die Option P&T kann somit einen wertvollen Beitrag zu Lösungsstrategien, zum Beispiel im Rahmen der Euratom Forschungs-Rahmenprogramme, für die Entsorgung der langlebigen hochradioaktiven Abfälle liefern. Diese Option wird in der öffentlichen Debatte zu bestehenden Alternativen und Problemen des nuklearen Abfallmanagements allerdings bislang nur unzureichend wahrgenommen.

Im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung ist es von entscheidender Bedeutung, internationale Entwicklungen aktiv mitzugestalten und an den wesentlichen Ergebnissen zu partizipieren. Im Energiesektor gilt dies insbesondere dann, wenn Abfallmengen entscheidend verringert oder grundsätzlich vermieden werden können. Durch derartige Technologien entsteht ein wichtiger Beitrag zur Generationengerechtigkeit bei der Nutzung unserer energetischen Ressourcen.

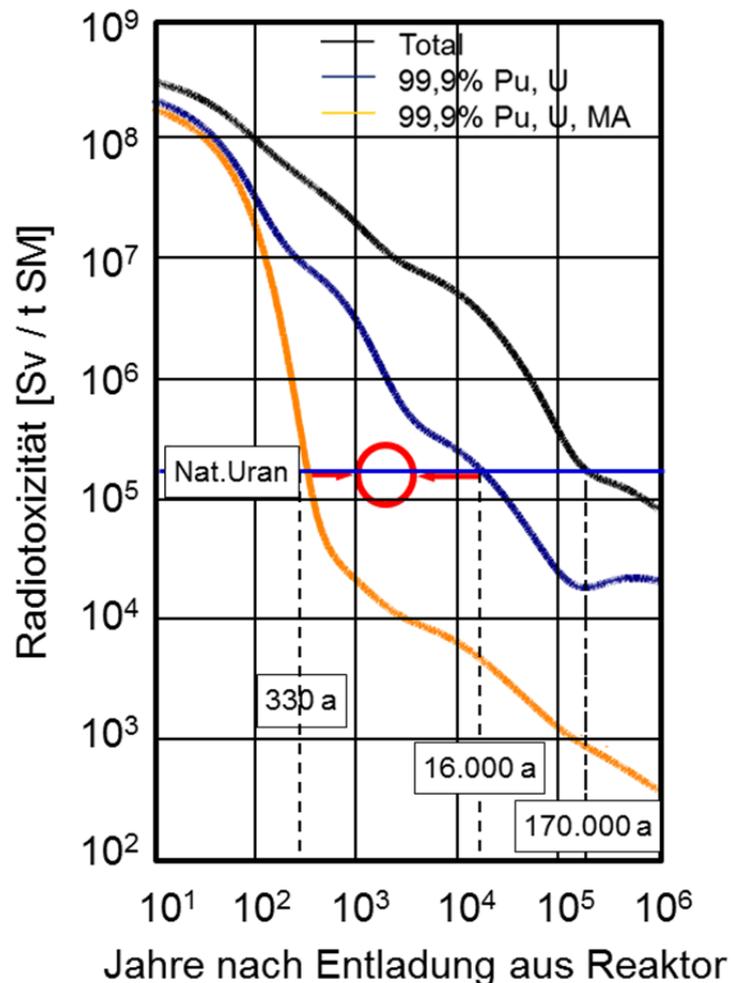
Die Technologieoption Partitioning & Transmutation (P&T) ist insbesondere deswegen attraktiv, weil sie neue Lösungsansätze für ein entscheidendes gesellschaftspolitisches Thema bietet, das gerade in Deutschland sehr kontrovers diskutiert wird. Die Vermeidung und Minimierung der langlebigen radioaktiven Abfälle ist zunächst für das nationale Entsorgungskonzept, aber auch als Option zur Lösung der Entsorgungsfrage europa- und weltweit bedeutsam. Deutschland kann als Hochtechnologiestandort relevante und umfangreiche Beiträge zu europäischen und internationalen Projekten liefern. Deshalb wird dem Thema P&T im Rahmen der nationalen Vorsorgeforschung grundsätzlich Aufmerksamkeit gewidmet.

Das Ziel von P&T ist es, die Radiotoxizität der langlebigen Abfälle so zu verringern, dass das Gefährdungspotential nach einigen hundert bis tausend Jahren um einen Faktor von bis zu 1000 reduziert wird (Abbildung 6). Dies könnte den Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers erleichtern und die öffentliche Akzeptanz signifikant erhöhen. Letztlich bedeutet P&T, das Volumen, die Masse und die langfristige Wärmemenge der verbleibenden Abfälle zu reduzieren und damit die Endlagerbelastung zu verringern.

Nach der Abtrennung der langlebigen Radionuklide, speziell des Plutoniums und der Minoren Actiniden, können diese in einer Transmutationsmaschine in kurzlebige oder stabile Nuklide umgewandelt werden. Entsprechende internationale Studien und Projekte haben gezeigt [11], dass eine ADS-basierte Transmutation grundsätzlich möglich ist und keine unüberwindbaren

technischen Hindernisse vorhanden sind. Auch der schwierigste Schritt beim Partitioning, das heisst die selektive chemische Abtrennung der Actiniden von den Lanthaniden, wurde in mehreren europäischen Verbundprojekten [12] untersucht und konnte prinzipiell im Labormaßstab demonstriert werden. Auch die Entwicklung und Fertigung von Transmutationsbrennstoffen, die vor allem in Frankreich, Japan und den USA vorangetrieben wird, macht signifikante Fortschritte.

Abbildung 6: Radiotoxizität in Sievert pro Tonne Schwermetall (SM) des abgebrannten Kernbrennstoffes über der Zeit in Abhängigkeit der gewählten Strategie:
Schwarze Kurve: Direkte Endlagerung;
Blaue Kurve: Abtrennung und vollständige Verbrennung von Plutonium (Pu) und Uran (U);
Orangene Kurve: Abtrennung und vollständige Verbrennung von Pu, Uran und Minoren Actiniden (MA).
Roter Punkt: Betriebszustand aufgrund von Prozessverlusten und einer nicht vollständigen Verbrennung.



Im Rahmen des European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) soll eine Mehrzweck-Forschungsanlage, genannt MYRRHA, am belgischen Forschungszentrum SCK-CEN in Mol errichtet werden [13]. Unter anderem dient MYRRHA der technologischen Demonstration einer Transmutationsmaschine vom Typ ADS (engl. Accelerator Driven System, Beschleuniger getriebene Anlage) [14].

5. Endlagerung radioaktiver Abfälle

In Deutschland steht für schwach- und mittelaktive Abfälle das genehmigte Endlager Konrad zur Verfügung, in welches ab etwa 2020 mit der Einlagerung begonnen werden soll. Für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, also abgebrannte Kernbrennstoffe aus

Leistungs- und Forschungsreaktoren, in Glas verfestigte Abfalllösungen aus der Wiederaufarbeitung sowie technologische Abfälle aus der Zerlegung der Brennelemente, gibt es in Deutschland noch keinen Standort. Der Salzstock Gorleben wird seit vielen Jahren auf seine Eignung als Endlager für hochradioaktive Abfällen untersucht. Neben Salz werden die Wirtsgesteine Ton und Granit betrachtet, wobei Letzterer in Deutschland weniger geeignet erscheint [15].

Grundsätzlich gilt: Auch der Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland entbindet uns nicht von der Pflicht, ein Endlager für die bestehenden und bis zum Abschalten des letzten Kernkraftwerks entstehenden (einschließlich der letzten Kernbeladungen) hochradioaktiven Abfalls zu finden, zu errichten, zu betreiben und nach Verfüllung aller Abfälle auch wieder zu verschließen.

Die wesentlichen technischen Fragen zur Errichtung und zum Betrieb eines Endlagers sind heute weitgehend geklärt. Da die Langzeitsicherheit eines Endlagers allein durch technische Maßnahmen nicht nachgewiesen werden kann, sind belastbare Aussagen zur Langzeitsicherheit nur mit Hilfe des Verständnisses aller grundlegenden Prozesse möglich, die in einem Endlagersystem relevant sind und denen die eingelagerten Radionuklide in einem Endlagersystem ausgesetzt sein können.

Die anspruchsvollste wissenschaftlich-technische Herausforderung an ein Endlager stellt die Zeitspanne von bis zu einer Million Jahre dar [16], für welche der Nachweis geführt werden muss, dass weder Mensch noch Umwelt durch das Endlager unzulässigen radiologischen Belastungen ausgesetzt sind. Ein umfassender Sicherheitsnachweis für ein Endlager, auch Safety Case genannt, erfordert ein fundiertes Verständnis der möglichen chemischen Vorgänge im Endlagersystem sowie die Kenntnis der radiochemischen und geochemischen Daten, mit deren Hilfe sich die mögliche Mobilisierung und Rückhaltung der radioaktiven Abfallbestandteile quantifizieren lässt. In der Vergangenheit stützten sich die Arbeiten zur Langzeitsicherheit auf phänomenologische Untersuchungen des Radionuklidverhaltens; der zukünftige Forschungsansatz muss sich auf die Aufklärung und Quantifizierung der grundlegenden Reaktionen auf molekularer Ebene konzentrieren, die für Mobilisierung oder Rückhaltung der relevanten Radionuklide in einem Endlager verantwortlich sind. Dies erfordert die Entwicklung und Anwendung von analytischen, spektroskopischen und theoretischen Methoden. Mit deren Hilfe lassen sich belastbare thermodynamische und kinetische Daten für die Sicherheitsanalyse herleiten, die nicht nur für einen spezifischen Standort mit seinen spezifischen Eigenheiten Gültigkeit besitzen, sondern grundlegenden thermodynamischen Charakter haben und so auch auf andere Endlagerformationen übertragen werden können. Diese grundlegenden Daten finden in Modellen und Rechenprogrammen Eingang, mit welchen eine mögliche Radionuklid Ausbreitung für verschiedene Endlagerkonzepte und Szenarien der jeweiligen Endlagerentwicklung berechnet und bewertet werden können. Somit ist ein wissenschaftlich fundierter Sicherheitsnachweis über die geforderten sehr langen Zeiträume möglich.

Die Auswahl eines Endlagerstandorts, die Errichtung und der Betrieb eines Endlagers bis in die Nachbetriebsphase muss kontinuierlich durch Forschungsarbeiten begleitet werden. Die Thematik der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle stellt zum einen eine wissenschaftlich-technische Herausforderung dar, zum anderen müssen soziale und politische Fragen rechtzeitig berücksichtigt und beantwortet werden. Insofern ist eine Begleitforschung im Hinblick auf die Information und Beratung von Politik und Gesellschaft in Bezug auf die anstehenden Entscheidungen, zum Beispiel Standortauswahl oder Rückholbarkeit, von entscheidender Bedeutung [17].

6. Fazit

Nach der Reaktorkatastrophe im Kernkraftwerk Fukushima I in Japan am 11. März 2011 haben sich die Energiepolitik sowie die Energieforschung in Deutschland grundlegend geändert. Der Umbau von Deutschland zu einer der energieeffizientesten und umweltschonendsten Volkswirtschaften der Welt ohne die Nutzung der Kernenergie ist beschlossene Sache. Die direkten und indirekten Auswirkungen auf die Industrie, die Bürger und die Umwelt sind heute nicht gesichert absehbar und schwer zu quantifizieren. Der anvisierte Zeitplan für die Umsetzung der Energiewende ist äußerst ambitioniert. Die damit verbundenen Kosten für Deutschland und seine Bürger, die Auswirkungen auf die übrigen Volkswirtschaften in Europa sind ungewiss. Aber eine Tatsache ist sicher: Deutschland steht vor einer ungeheuren Herausforderung und zugleich Chance, die es mit wohl überlegten und sachlichen Ansätzen zu meistern gilt. Deutschland kann hier eine internationale Vorbildfunktion einnehmen, sofern dieses engagierte Großexperiment gelingt. Die hierfür erforderlichen Technologien müssen aber zu einem Großteil noch entwickelt und qualifiziert werden, bevor diese zuverlässig und im Einklang mit der Gesellschaft eingesetzt werden können.

Von Seiten der nationalen Helmholtz-Forschung wird die zukünftige Energieforschung auf die Themen (a) erneuerbare Energien, (b) Speicher und vernetzte Infrastrukturen, (c) Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen sowie die Verbindung von (d) Technologie, Innovation und Gesellschaft konzentriert, ohne die Themen (e) Nukleare Entsorgung und Sicherheit sowie (f) Kernfusion zu vernachlässigen. Es ist wichtig, dass das Hochtechnologieland Deutschland in Bildung und Forschung investiert und dadurch Wissen, Kreativität und neue Lösungen und Erkenntnisse schafft.

Die grundsätzliche Zielrichtung einer Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an unserem Energiemix sowie die Steigerung der Energieeffizienz ist sicher unstrittig. Dass wir Bürger unsere Lebensgewohnheiten anpassen und gegebenenfalls Einschränkungen und höhere Kosten hinnehmen müssen ist wahrscheinlich. Bei all diesen Überlegungen, Wünschen und Anstrengungen wird aber immer gelten:

Politische Entscheidungen werden die physikalischen Grundgesetze und Zusammenhänge nicht außer Kraft setzen können.

Danksagung

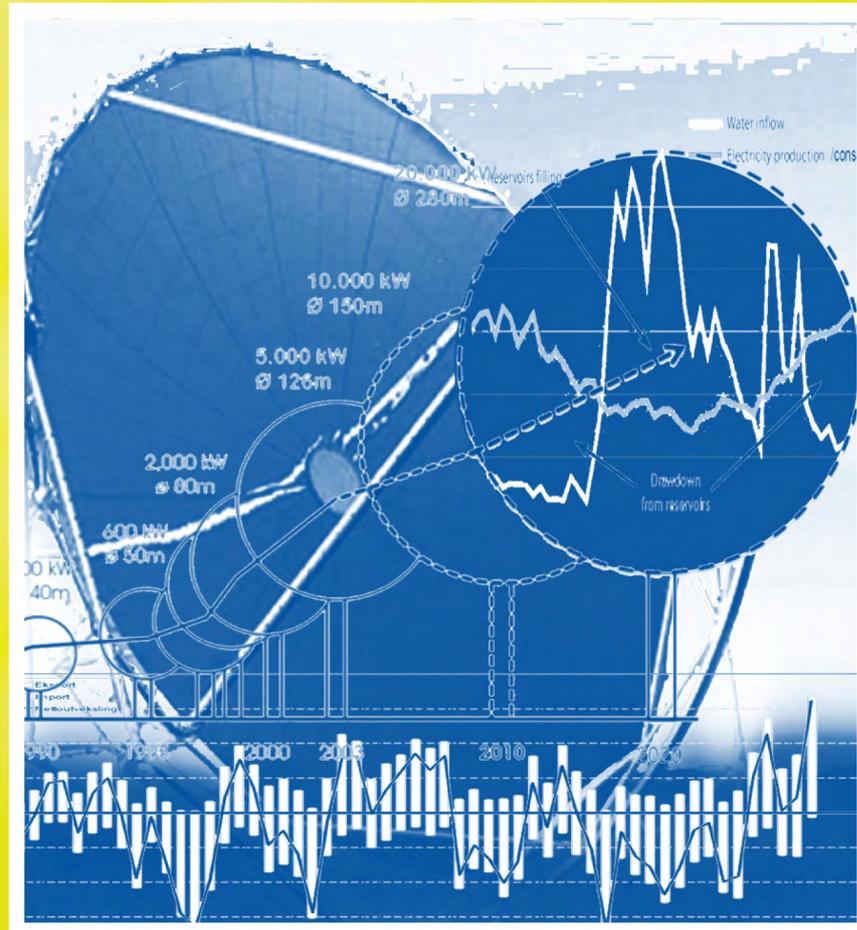
Der Autor bedankt sich bei allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe ‚Fukushima‘ am KIT, speziell Angelika Bohnstedt, Concetta Fazio, Gerhard Frank, Horst Geckeis, Klaus Gompper, Annette Heinzl, Volker Heinzl, Volker List, Alexei Miassoedov, Wolfgang Raskob, Victor Sanchez-Espinoza, Thomas Schulenberg, Martin Steinbrück, Robert Stieglitz, Walter Tromm und Friedemann Wenzel, die wesentliche wissenschaftlich-technische Beiträge für den Vortrag und dieses Papier erarbeitet haben.

Referenzen

[1] Ievdin, I., Trybushnyi, D., Zheleznyak, M., Raskob, W., „RODOS re-engineering: aims and implementation details, in: Raskob W, Hugon M (editors), Enhancing nuclear and radiological emergency management and rehabilitation: Key results of the EURANOS European project”, Radioprotection, Volume 45, No. 5, Supplément 2010, pp181-189.

- [2] Walter Tromm, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Persönliche Mitteilung.
- [3] Tokyo Electric Power Company (TEPCO), „Status of Fukushima Daiichi and Fukushima Daini Nuclear Power Stations after Great East Japan Earthquake”, <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/index-e.html>.
- [4] AREVA and Meltwater News, Persönliche Mitteilung.
- [5] Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung, „Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft“, Berlin, 30.5.2011.
- [6] Die Bundesregierung, „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“, 28.09.2010.
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung: Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“, Juli 2011.
- [8] Frithjof Staiß, Maike Schmidt, „Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg“, ZSW, Pressekonferenz im Haus des Landtags Stuttgart, 9.1.2012.
- [9] IAEA, „Nuclear Power Reactors in the World 2012 Edition“, IAEA-RDS-2/31, Vienna, 2012, ISBN 978-92-0-132310-1.
- [10] Joachim Knebel, Massimo Salvatores, „Partitioning & Transmutation (P&T)”, Energie-Fakten.de, <http://www.energie-fakten.de/pdf/p-und-t.pdf>, 24.2.2011.
- [11] OECD Nuclear Energy Agency „Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation”, Nuclear Science 2011, ISBN 978-92-64-99165-1.
- [12] European Commission, „Euratom Research Projects and Training Activities”, Volume II, EUR 21229, pp. 20-21, 2006.
- [13] Didier De Bruyn, Hamid Ait Abderrahim, Peter Baeten, Rafaël Fernandez, „MYRRHA, the Multi-purpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications”, In: ICAPP'11 "Performance & flexibility:the power of innovation", Nice, France, 2-6 May 2011, France, Omnipress, 2011, p. 472-478.
- [14] Alex C. Mueller und Hamid Ait Abderrahim, „Transmutation von radioaktivem Abfall. Reaktor- und Beschleuniger-Technologie gehen gemeinsam das Hauptproblem der Kernenergie an“, Physik Journal 9 (2010) Nr. 11, 2010 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [15] Horst Geckeis, Walter Tromm, Klaus Gompper, „Einstieg in die Energiewende – Ausstieg aus der nuklearen Sicherheitsforschung?“, Jahrestagung des KIT-Zentrum Energie, Karlsruher Institut für Technologie, 19.06.2012.
- [16] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“, Endfassung, 30.09.2010.
- [17] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften acatech (Hrsg.), „Den Ausstieg aus der Kernkraft sicher gestalten“, acatech POSITION, September 2011.

Dr. Joachim Knebel
 Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Chief Science Officer Bereich 4 (CSO-4)
 Hermann von Helmholtz Platz 1
 D-76344 Eggenstein-Leopoldshafen



Energiewende

Aspekte, Optionen, Herausforderungen

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Berlin 2012

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energiewende

Aspekte, Optionen, Herausforderungen

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Berlin, 26. bis 28. März 2012

Programmgestaltung und Herausgeber: Hardo Bruhns

September 2012

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Berlin, 26. bis 28. März 2012

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Einleitung | 7 |
| Übersicht über die Fachsitzungen | 8 |
| Abstracts aller Vorträge | 9 |
| Hauptvorträge: | |
| <i>Wieviel Kohlenstoff braucht der Mensch?</i> , vorgetragen von H. Pütter | 24 |
| <i>Virtuelle Großanlagen – ein Ansatz zur systemkompatiblen Integration erneuerbarer Energiequellen in die Energieversorgung</i> , vorgetragen von R. Bitsch | 36 |
| <i>Hydro Electricity and Storage Capabilities in Norway – can they be useful for Europe?</i> , presented by W. Rondeel | 49 |
| <i>Die Nutzung der Windenergie und erwartete technologische Entwicklungen der nächsten Jahre</i> , vorgetragen von A. Reuter | 60 |
| <i>Enhanced Geothermal Systems (EGS) - Potential and Stimulation Treatments</i> , presented by G. Zimmermann | 67 |
| <i>Schiefergas: eine unkonventionelle Ressource für den Energiemix der Zukunft?</i> , vorgetragen von A. Hübner | 75 |
| <i>Perspektiven für Solarthermische Kraftwerke im Sonnengürtel</i> , vorgetragen von B. Hoffschmidt | 81 |
| <i>Windstrom und Wasserstoff – Eine Alternative</i> , vorgetragen von D. Stolten | 94 |

| | |
|---|-----|
| <i>Die Kosten und Risiken der Energiewende</i> , vorgetragen von M. Frondel..... | 112 |
| <i>Challenge Energy Transition: Managing Volatility and Integrating Renewables into the Energy System</i> , presented by H. Gassner | 124 |
| <i>Energieszenarien für Deutschland: Stand der Literatur und methodische Auswertung</i> , vorgetragen von J. Hake | 132 |
| <i>Wie Fukushima die Energiepolitik und Energieforschung in Deutschland und international verändert</i> , vorgetragen von J. Knebel..... | 167 |
| <i>Entscheidungszwänge in der Weltenergieversorgung und Klimapolitik bei hoher Unsicherheit</i> , vorgetragen von C. Ch. von Weizsäcker | 179 |
| <i>Future Mobility in Europe</i> , presented by F. X. Söldner | 183 |

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2012 -Berlin:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2012-AKE_Berlin/Links_DPG2012.htm

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen von Hauptvorträgen der DPG-AKE Tagung des Jahres 2012 in Berlin zusammen. Die Präsentationsfolien der Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen Autoren, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im September 2012

Hardo Bruhns