



5 2010

BWK

DAS ENERGIE-FACHMAGAZIN

Der Energiemarkt im Fokus

Kernenergie

Sonderdruck zur Jahresausgabe 2010

Überreicht durch die **Kerntechnische Gesellschaft**



Kernenergie

Mit einem guten Betriebsergebnis und somit einem sicheren sowie zuverlässigen Betrieb haben Kernkraftwerke im Jahr 2009 weltweit rund 13 % des gesamten Strombedarfs gedeckt und gleichzeitig klimawirksame Emissionen von etwa 2,5 Mrd. t CO₂ vermieden. Ökologie, Ökonomie und Versorgungssicherheit sind nicht nur wichtige Kriterien für den langfristigen Betrieb heutiger Anlagen, sondern auch der Maßstab für die bereits begonnenen Neubauprojekte und die darüber hinaus gehenden Planungen. In China wurde im Jahr 2009 die Anzahl der in Bau befindlichen Kernkraftwerke mit zehn zusätzlichen Neuanlagen verdoppelt. Der Planungsstand für Bauprojekte in den USA hat 26 Blöcke erreicht. Dort sind zudem inzwischen 54 von 104 Reaktoren für 60 Betriebsjahre lizenziert. In Belgien, Schweden und Italien haben Parlamente bzw. Regierungen die bisherigen Ausstiegspläne revidiert und beziehen langfristig auch eine Errichtung von neuen Ersatzkernkraftwerken ein.

Kernenergie bildet in vielen Ländern in einem ausgewogenen Energiemix weiterhin das Rückgrat der Stromversorgung. Als klimaschonende, preisgünstige und versorgungssichere Komponente und Option für die künftige Energieversorgung hat Kernenergie in den vergangenen Jahren wieder an Bedeutung gewonnen. Auf Seiten des Klimaschutzes sorgt Kernenergie Jahr für Jahr dafür, dass in etwa das 2,5-Fache des Treibhausgasausstoßes vermieden wird, der laut Kyoto-Protokoll

von den Industriestaaten im Zeitraum von 2008 bis 2012 hätte reduziert werden sollen. Im Hinblick auf Preisgünstigkeit spricht für Kernenergie vor allem der nur geringe Einfluss der Brennstoffkosten (d.h. des Uranpreises) auf die Stromerzeugungskosten. Bei der Versorgungssicherheit sind als positives Argument die auf allen Kontinenten verfügbaren Uranreserven zu nennen, die zum Beispiel die Abhängigkeiten von einzelnen Regionen oder Staaten bei der Kernbrennstoffversorgung vermeiden. Diese

Die Spitzenreiteranlage des Jahres 2009 nach Stromproduktion steht in den USA: Der Druckwasserreaktor Palo-Verde-1 ist für eine elektrische Bruttoleistung von rund 1428 MW ausgelegt und wird von der Arizona Public Service Company betrieben. Eigentümer des Reaktors sind sieben Unternehmen aus dem Südwesten der USA. Da am Standort keine großen Wasserreservoirs verfügbar sind, nutzt das Kernkraftwerk Brauchwasser aus der Umgebung: Jährlich werden dort mehr als 75 Mio. m³ Brauchwasser rezykliert.

Bild: APS

Aspekte spielen eine wichtige Rolle bei der seit etwa Anfang der 1990er Jahre, zuerst im technischen Bereich und dann in Politik und Gesellschaft, geführten Diskussion zur möglichen langfristigen Rolle der Kernenergie im Energiemix. Dabei wurden einerseits Möglichkeiten des Lebensdauermanagements für die in Betrieb befindlichen Anlagen untersucht und andererseits auch Perspektiven für Kernkraftwerksneubauten entwickelt. Abweichend von in Deutschland publizierten Ansichten werden erneuerbare Energien und Kernenergie dabei ohne politische Polarisierung als sich sinnvoll ergänzende Komponenten im Energiemix identifiziert und angesehen. Mit den wachsenden Betriebserfahrungen der Kernkraftwerke stellte sich weiter heraus, dass Anlagen ohne Sicherheits- und Verfügbarkeitseinbußen mit einem angepassten Lebensdauermanagement wesentlich länger betrieben werden können als ursprünglich zwischen Hersteller und Auftraggeber vereinbart und von den jeweils zuständigen Behörden genehmigt. Mit sehr konservativen Ansätzen bei der Bemessung der zu erwartenden Komponentenbelastungen im Betrieb waren Kernkraftwerke

Autoren

Dipl.-Ing. Christopher Weßelmann, atw, International Journal for Nuclear Power, Dr. Walter Tromm, Obmann des Fachausschusses Kerntechnik der VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, Dipl.-Ing. Thomas Linnemann, Energie-

Fachmagazin BWK, und Prof. Dr.-Ing. Marco K. Koch, Arbeitsgruppe Reaktorsimulation und -sicherheit am Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum.
koch@lee.rub.de

ursprünglich für 40 Betriebsjahre konzipiert worden. Internationale Programme, zum Beispiel unter der Ägide der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA¹⁾ und der Nuklearenergieagentur NEA²⁾ der Organisation für Entwicklung und Zusammenarbeit OECD³⁾ empfehlen entsprechende Maßnahmen zum Lebensdauermanagement und haben selbst für den Reaktordruckbehälter als derzeit entscheidende Komponente für die Bestimmung der Lebensdauer eines Kernkraftwerks mögliche Betriebszeiten deutlich über 60 Jahre bis zu 100 Jahren identifiziert. Die US-amerikanische Aufsichts- und Genehmigungsbehörde NRC⁴⁾ hat in zahlreichen aufwändigen Verfahren inzwischen die Betriebslizenzen für mehr als die Hälfte der Kernkraftwerke (54 von 104 Blöcken) von 40 auf 60 Jahre verlängert. Bei den Verfahren stellte sich heraus, dass durch das Lebensdauermanagement keine Verschlechterung der Sicherheit eintritt, sondern dass die kontinuierlichen Anpassungen der Kernkraftwerke an den wissenschaftlich-technischen Fortschritt und die im Laufe der Zeit zunehmenden Betriebserfahrungen sogar zu Sicherheitsverbesserungen führen.

Bei Neubauten von Kernkraftwerken sind es vorerst weiterhin die asiatischen Länder, die sich teilweise erheblich engagieren. Auch die US-Administration unter Präsident Barack Obama setzt in Kombination mit dem Ausbau bei den erneuerbaren Energien verstärkt auf die Kernenergie, und in Europa sind es unter anderem die neuen Mitgliedsländer, die mit ihren Betriebserfahrungen bei den laufenden Kernkraftwerken auch neue Anlagen planen. Dabei zeichnet sich auf der Herstellerseite eine deutliche Konzentration

der Anbieter auf einige quasi standardisierte Anlagentypen ab. Zu den wichtigsten Typen dieser als Kernkraftwerksgeneration III+ bezeichneten Baulinien gehören der europäische Druckwasserreaktor EPR⁵⁾ und der fortschrittliche Siedewasserreaktor Kerena⁶⁾ von Areva, der Druckwasserreaktor AP1000⁷⁾ von

Land	In Betrieb ¹⁾					In Bau		
	Anzahl	Leistung		Arbeit ³⁾	Anteil ⁴⁾	Anzahl	Leistung	
		in MW ²⁾	in MW ³⁾				in MW ²⁾	in MW ³⁾
Argentinien	2	1 005	935	7,6	7	1	745	692
Armenien	1	408	376	2,3	45	–	–	–
Belgien	7	6 174	5 893	45,0	52	–	–	–
Brasilien	2	2 007	1 901	12,2	3	–	–	–
Bulgarien	2	2 000	1 906	14,4	36	2	2 120	2 000
China	11	9 134	8 602	70,1	2	20	21 736	20 202
Deutschland	17	21 507	20 480	127,7	23	–	–	–
Finnland	4	2 800	2 696	22,7	33	1	1 600	1 510
Frankreich	59	66 130	63 363	390,0	75	1	1 600	1 510
Großbritannien	19	11 902	10 982	62,9	18	–	–	–
Indien	18	4 340	3 981	14,8	2	5	2 940	2 760
Iran	– ⁵⁾	–	–	–	–	1	1 000	953
Japan	54	49 160	47 188	260,1	29	1	1 375	1 325
Kanada	18	13 425	12 621	85,3	15	–	–	–
Südkorea	20	18 526	17 454	141,1	35	6	6 920	6 600
Litauen	– ⁵⁾	– ⁵⁾	– ⁵⁾	10,0	76	–	–	–
Mexiko	2	1 366	1 310	10,1	5	–	–	–
Niederlande	1	515	482	4,0	4	–	–	–
Pakistan	2	462	425	2,6	3	1	300	280
Rumänien	2	1 412	1 305	10,8	21	–	–	–
Russland	31	23 242	21 770	153,0	18	8	6 080	5 776
Schweden	10	9 494	9 095	50,0	37	–	–	–
Schweiz	5	3 390	3 238	26,3	39	–	–	–
Slowakei	4	1 760	1 632	13,1	53	2	880	816
Slowenien	1	727	696	5,5	38	–	–	–
Spanien	8	7 728	7 449	50,5	17	–	–	–
Südafrika	2	1 888	1 800	11,6	5	–	–	–
Taiwan	6	5 144	4 884	39,5	21	2	2 712	2 630
Tschechien	6	3 734	3 500	25,7	34	–	–	–
Ukraine	15	13 818	13 090	77,8	49	–	–	–
Ungarn	4	2 000	1 889	14,6	43	–	–	–
USA	104	106 353	100 388	796,8	20	1	1 240	1 180
Summe	437	391 551	371 331	2 557,8	...	52	51 248	48 243

¹⁾ Stand: 31. Dezember 2009, Berücksichtigungskriterium ist der nukleare Betrieb nach dem Erreichen der Erstkritikalität ²⁾ brutto elektrisch

³⁾ netto elektrisch ⁴⁾ der Nuklearstromerzeugung an der Gesamtstromerzeugung 2009 ⁵⁾ Der Reaktorblock Ignalina-2 russischer Bauart mit einer elektrischen Bruttouleistung von 1 300 MW wurde am 31. Dezember 2009 um 20:54 Uhr endgültig abgeschaltet.

Quelle: atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Abweichungen durch Rundungen möglich

Tabelle 1

Anzahl, Leistung und Stromproduktion der weltweit betriebenen sowie Anzahl und Leistung der in Bau befindlichen Kernkraftwerksblöcke nach Ländern.

¹⁾ IAEA: International Atomic Energy Agency

²⁾ NEA: Nuclear Energy Agency

³⁾ OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development

⁴⁾ NRC: Nuclear Regulatory Commission

⁵⁾ EPR: European Pressurized Water Reactor

⁶⁾ Kerena ist der neue Name für den Siedewasserreaktor deutscher Bauart

⁷⁾ SWR 1000, der über zahlreiche passive Sicherheitssysteme verfügt.

⁸⁾ Advanced Passive Plant

⁹⁾ Advanced Boiling Water Reactor

¹⁰⁾ Enhanced Simplified Boiling Water Reactor

¹¹⁾ Wasser-Wasser-Energie-Reaktor

¹²⁾ Advanced Power Reactor

Westinghouse, die von GE, Hitachi und Toshiba gemeinsam entwickelten Siedewasserreaktoren ABWR⁸⁾ und ESBWR⁹⁾, fortschrittliche Reaktoren der russischen WWER-Baulinie¹⁰⁾ von Atomstrojexport sowie der fortschrittliche Druckwasserreaktor APR1400¹¹⁾ südkoreanischer Bauart von Korea Hydro & Nuclear Power.

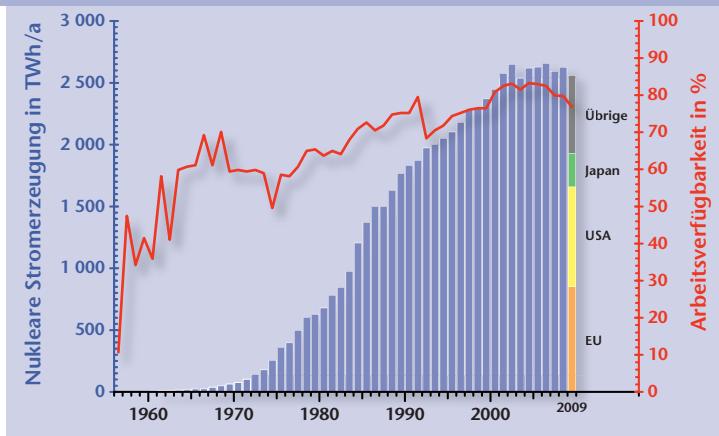


Bild 1

Entwicklung der weltweiten jährlichen nuklearen Nettostromerzeugung und der Arbeitsverfügbarkeit des globalen Kernkraftwerksparks seit Inbetriebnahme des ersten kommerziellen Kernkraftwerks, Calder-Hall, in Großbritannien, im Jahr 1956.

Status quo weltweit

Ende letzten Jahres waren weltweit in 30 Ländern insgesamt 437 Kernkraftwerksblöcke in Betrieb (**Tabelle 1**); das war ein Block weniger als im Vorjahr 2008, da im Verlauf des Jahres 2009 drei Anlagen, zwei in Japan und eine Litauen, ihren Leistungsbetrieb eingestellt haben und außerdem zwei Kernkraftwerke in Indien und Japan ihre Erstkritikalität¹²⁾ erreichten. Die Gesamtleistung des weltweiten Kernkraftwerksparks hat damit um rund 1 GW abgenommen und betrug Ende 2009 rund 391,6 GW brutto bzw. 371,3 GW netto.

In diesen Zahlen sind – wie schon in den Vorjahren – auch die im Berichtsjahr umgesetzten Leistungserhöhungen enthalten. So sind zum Beispiel seit 1977 in den USA rund 6 GW an zusätzlicher elektrischer Leistung hinzugekommen und bis 2014 weitere 4 GW genehmigt oder beantragt. In Summe entspricht dies etwa der Kapazität von sieben Kernkraftwerksblöcken der deutschen Konvoi-Baulinie (Emsland, Isar-2, Neckarwestheim-2) mit je 1,4 GW Leistung.

In Ungarn wurde 2009 ein Programm zur Leistungserhöhung abgeschlossen, das einen Kapazitätszuwachs der vier Reaktorblöcke am Standort Paks von je 15 % umfasst. Die elektrische Bruttolleistung der dortigen WWER-440-Blöcke russischer Bauart wurde so von 440 auf 500 MW angehoben.

Erstkritikalität erreichten 2009 die Kernkraftwerke Rajasthan-5 in Indien sowie Tomari-3 in Japan. Rajasthan-5 ist ein mit Schwerwasser moderierter und mit Leichtwasser gekühlter Druckröhrenreaktor mit einer Nennleistung von 500 MW. Anlagen dieses Typs werden seit den 1970er Jahren in Indien entwickelt. Die 500-MW-Generation ist eine kommerzielle Weiterentwicklung der bisherigen 220-MW-Anlagen. Die ersten zwei 500-MW-Blöcke wurden 2005 und 2006 am Standort Tarapur in Betrieb genommen. Am Standort Rajasthan ist ein weiterer Block in Bau befindlich, der 2010 in Betrieb genommen werden soll. Tomari-3 ist mit zwei weiteren Blöcken der einzige Kernkraftwerksstandort auf Hokkaido, der nördlichen Hauptinsel Japans. Der 912-MW-Druckwasserreaktor wurde von Mitsubishi Heavy Industries errichtet und ging nach knapp fünfjähriger Bauzeit 2009 in Betrieb.

Die Kernkraftwerksblöcke Hamaoka-1 und Hamaoka-2 in Japan sind 2009 endgültig vom Netz gegangen. Die Chubu Electric Power Company hatte als Betreiber der beiden Anlagen entschieden, dass eine Nachrüstung der seit langerem stillstehenden Anlagen aus den frü-

hen 1970er Jahren finanziell zu aufwändig erscheint. Ein Faktor, der zu dieser Entscheidung beitrug, waren besonders hohe Forderungen an die Erdbebenauslegung aufgrund des Standortes. Der Kraftwerksbetreiber sieht den Standort dennoch weiterhin als attraktiv für den Betrieb von Kernkraftwerken an und will bei gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit entsprechendem Strombedarf den Neubau von Kapazitäten prüfen.

Daneben hat der Kernkraftwerksblock Ignalina-2 in Litauen seinen Leistungsbetrieb eingestellt. Die Stilllegung war im Rahmen der Beitrittsverhandlungen des Landes zur EU vereinbart worden. Bei Ignalina-2 und dem Ende 2004 stillgelegten Block Ignalina-1 handelt es sich um grafitmoderierte und leichtwassergekühlte Druckröhrenreaktoren des russischen Typs RBMK¹³⁾. Durch den Unfall im RBMK-Reaktor der zweiten Baulinie, Tschernobyl-4, im Jahr 1986 waren diese Typen als problematisch eingestuft worden. Die zwei Blöcke der dritten Baulinie in Ignalina sind in den 1990er Jahren und danach mit EU-Mitteln im dreistelligen Millionenbereich nachgerüstet worden. Litauen wird mit der Stilllegung von Ignalina-2 vom Nettostromexporteur zum Nettostromimporteur. Das Land plant zur Vermeidung langfristiger Energieimporte auch den Bau von neuen Kernkraftwerkskapazitäten.

Weltweit haben Kernkraftwerke im letzten Jahr mit einer Nettostromproduktion von rund 2558 TWh ein gutes Betriebsergebnis erzielt (**Bild 1**). Dieses liegt rund 5 % unter dem Niveau des Vorjahrs 2008 von rund 2625 TWh. Der Rückgang ist von Stillständen leistungsstarker Anlagen in Japan und Deutschland maßgeblich beeinflusst. Zudem wurden aufgrund des durch die weltweite Finanz- und Wirtschaftskrise geringeren Strombedarfes in einer Reihe von Ländern Kernkraftwerksblöcke last- und wirtschaftlich optimiert gefahren und

Tabelle 2

Weltweiter Vergleich der Kernkraftwerke nach Stromproduktion: Top Ten 2009.

Land	Anlage	Betreiber	Hersteller	Leistung in MW ¹⁾	Arbeit in TWh/a ²⁾
USA	Palo-Verde-1	Arizona NPP	Comb. Eng. ³⁾	1 428	12,241
Deutschland	Isar-2	E.on Kernkraft	Siemens/KWU	1 485	12,127
Deutschland	Brokdorf	E.on Kernkraft	Siemens/KWU	1 480	12,050
USA	South-Texas-2	STP NOC	Westinghouse	1 413	11,868
Litauen	Ignalina-2	Lietuvos Energija	Minatom	1 300	11,598
Deutschland	Philipsburg-2	EnBW Kernkraft	Siemens/KWU	1 458	11,583
Deutschland	Neckarwestheim-2	EnBW Kernkraft	Siemens/KWU	1 400	11,516
Deutschland	Grohnde	E.on Kernkraft	Siemens/KWU	1 430	11,505
USA	Grand-Gulf-1	Entergy	General Electric	1 413	11,438
Deutschland	Emsland	KLE	Siemens/KWU	1 400	11,430

¹⁾ elektrisch, brutto ²⁾ elektrisch, brutto ³⁾ Combustion Engineering
Quellen: Platts Nucleonics Week, VGB PowerTech, Deutsches Atomforum

¹²⁾ Kettenreaktion, die sich erstmals selbst aufrecht erhält.

¹³⁾ Reaktor Bolschoi Moschtschnost Kanalny

Jahr	Top Ten der internationalen Jahresstromproduktion										
	Weltmeisteranlage		2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Nation	Produktion										
1980	Deutschland	9,81 TWh	USA	USA	Japan	Frankreich	-	-	-	-	-
1981	Deutschland	9,54 TWh	Germany	Japan	USA	UK	Germany	USA	Switzerland	USA	USA
1982	Deutschland	9,74 TWh	Germany	Germany	Japan	USA	Germany	USA	Japan	USA	USA
1983	Deutschland	9,96 TWh	Germany	Japan	Germany	UK	USA	Germany	Switzerland	USA	UK
1984	Deutschland	10,15 TWh	Germany	Germany	Japan	Japan	Germany	USA	USA	USA	USA
1985	Deutschland	11,48 TWh	Germany	Germany	Germany	Germany	Germany	USA	USA	Japan	USA
1986	Deutschland	10,79 TWh	Germany	Japan	Germany	Germany	Sweden	France	Germany	Sweden	USA
1987	Deutschland	10,21 TWh	Germany	Germany	Japan	Japan	France	Germany	USA	Germany	USA
1988	USA	10,86 TWh	Germany	Germany	USA	France	Germany	USA	USA	Germany	USA
1989	Deutschland	10,86 TWh	Germany	Japan	Germany	USA	Germany	USA	Germany	Germany	USA
1990	Deutschland	10,69 TWh	Germany	Germany	USA	Germany	Japan	Germany	USA	USA	USA
1991	Deutschland	10,83 TWh	Germany	USA	Germany	Germany	Germany	Germany	France	USA	USA
1992	Deutschland	11,33 TWh	Germany	Germany	USA	Germany	Germany	Japan	Germany	Germany	USA
1993	Deutschland	11,40 TWh	Germany	Germany	Germany	Germany	USA	Germany	France	Japan	USA
1994	Deutschland	11,13 TWh	Germany	Germany	Germany	Germany	USA	USA	USA	Germany	USA
1995	Deutschland	11,36 TWh	Germany	Germany	Germany	USA	Germany	USA	Germany	USA	USA
1996	Deutschland	11,47 TWh	USA	Germany	Germany	Germany	USA	Germany	USA	Germany	USA
1997	Deutschland	12,53 TWh	Germany	Germany	Germany	USA	USA	Germany	USA	Germany	USA
1998	Deutschland	11,76 TWh	USA	Germany	Germany	Germany	USA	Germany	Japan	UK	USA
1999	Deutschland	12,27 TWh	Germany	Germany	USA	Germany	Germany	USA	USA	France	USA
2000	Deutschland	11,94 TWh	Germany	Germany	Japan	USA	Germany	Germany	USA	USA	USA
2001	Deutschland	12,40 TWh	Germany	Germany	Germany	Germany	Germany	USA	Germany	USA	USA
2002	Deutschland	12,17 TWh	Germany	Japan	Germany	USA	Germany	USA	France	USA	USA
2003	Deutschland	12,32 TWh	France	Germany	Germany	France	USA	Germany	USA	Germany	USA
2004	Deutschland	12,24 TWh	France	France	Germany	USA	Germany	USA	France	Japan	USA
2005	Deutschland	11,98 TWh	Japan	Germany	Germany	Japan	Germany	Germany	France	Germany	USA
2006	Deutschland	12,40 TWh	Germany	USA	Germany	Germany	France	Germany	USA	Germany	USA
2007	USA	12,36 TWh	Germany	Germany	Germany	USA	Germany	France	France	Germany	USA
2008	France	12,84 TWh	Germany	Germany	France	France	Germany	Germany	USA	USA	USA
2009	USA	12,24 TWh	Germany	Germany	USA	Lithuania	Germany	Germany	USA	USA	USA

Fett: Weltrekord Quellen: atw, Deutsches Atomforum, Platts Nucleonics Week, VGB

daher auch mit einer niedrigeren Stromerzeugung. Die weltweite mittlere Arbeitsverfügbarkeit lag mit rund 78 % in etwa auf dem Niveau der Vorjahre. Kumuliert können die Kernkraftwerksbetreiber weltweit mit inzwischen rund 14 000 Jahren auf große Betriebserfahrungen mit ihren Reaktoren verweisen. Diese Jahr für Jahr kontinuierlich zunehmenden Erfahrungen bilden eine wichti-

ge Grundlage für weitere Optimierungen der Anlagenverfügbarkeit und -sicherheit. Die Ergebnisse der Auswertungen von Betriebserfahrungen fließen so zum Beispiel in den kontinuierlichen Prozess der Weiterentwicklung des Systems „Mensch – Technik – Organisation“ ein.

Mit einer Jahresstromproduktion von rund 12,24 TWh hat das Kernkraftwerk Palo-Verde-1 des US-amerikanischen Be-

Tabelle 3

Weltrangliste der Kernkraftwerke nach Jahresstromproduktion seit 1980.

treibers Arizona Public Service im Jahr 2009 die höchste Bruttostromerzeugung der weltweit betriebenen Reaktorblöcke erzielt (**Tabelle 2**). Der Reaktorblock ist seit 1985 im kommerziellen Betrieb. Am Standort Palo Verde in Arizona, USA, werden insgesamt drei Kernkraftwerksblöcke betrieben. Der Block Palo-Verde-1 verfügt heute über eine Bruttoleistung von 1412 MW. Im Jahr 1996 wurde von der US-amerikanischen Aufsichts- und Genehmigungsbehörde eine Erhöhung der elektrischen Leistung um 35 MW genehmigt und im Jahr 2005 eine weitere Erhöhung um 28 MW. In der Rangliste der weltweit zehn besten Kernreaktoren nach Jahresstromproduktion für 2009 belegten mit Isar-2, Brokdorf, Philippsburg-2, Neckarwestheim-2, Grohnde und Emsland sechs deutsche Kernkraftwerke vordere Plätze. Die internationale Spitzenposition der deutschen Kernkraftwerke mit Blick auf Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit hat damit nach wie vor Bestand, wie auch die Spitzenplatzierungen seit 1980 belegen (**Tabelle 3**).

Bauprojekte

Die bereits im letztjährigen Beitrag [1] konstatierte weltweite Neubewertung der Kernenergie als wichtige Komponente im zukünftigen Energiemix hat sich auch im Jahr 2009 weiter deutlich bei der Anzahl der aktiven Bauprojekte und Neubauprojekte niedergeschlagen. So waren zum Jahresende 2009 weltweit rund 25 % mehr Kernkraftwerksblöcke im Bau als ein Jahr zuvor. In 14 Ländern wurden 52 Anlagen mit einer Gesamtleistung von rund 51 GW aktiv verfolgt. Im Jahr 2008 waren es 43 Anlagen mit rund 39 GW; dies entspricht einem Plus von etwa 30 % bei der Gesamtleistung. Damit ist im Vergleich zur Mitte des Jahrzehnts quasi eine Verdopplung der Anzahl von Kernkraftwerksneubauten festzustellen. Bei der repräsentativeren Gesamtleistung der Neubauten ist mit 190 % eine ähnlich hohe Steigerung zu verzeichnen. Beachtlich ist die Zahl der neuen Projekte in China, wo sich die Anzahl der Neubauten von zehn im Jahr 2008 auf 20 im Jahr 2009 verdoppelt hat.

China verfolgt beim Neubauprogramm die Strategie, sowohl den Bau des nationalen Standardtyps CPR-1000¹⁴⁾ zu forcieren als auch in Kooperation mit ausländischen Partnern deren Reaktortypen zu etablieren. Dabei kann China auf die Aufnahme von Bautätigkeiten für den AP1000 von Westinghouse am Standort Sanmen (Ende 2009 zwei Blöcke in Bau) und den EPR von Areva am Standort Taishan verweisen.

Bauvorhaben

Weltweit sind neben diesen bereits in Bau befindlichen Kernkraftwerken rund 80 Projekte und 130 Projektvorhaben zu verzeichnen. Neben weiteren Planungen in China sind Südkorea, Indien und die USA als bedeutende Länder zu nennen, in denen die neuen Kernkraftwerke auch staatlich flankiert werden. In den USA wird die Kernenergie unter der Administration des US-Präsidenten Barack Obama als wirksame Komponente einer Strategie zur Vermeidung von klimawirksamen Emissionen und der Verringerung von Energieimporten gesehen und soll durch staatliche Bürgschaften im Umfang von 54 Mrd. US-\$ für Neu bauprojekte gestützt werden. Darüber hinaus zeigen aktuellere Vertragsunterzeichnungen wie die zwischen den Vereinigten Arabischen Emiraten und der Korean Electric Power Company das wachsende Interesse an der Kernenergie in Staaten mit bisher keinen oder nur kleineren Nuklearprogrammen.

Weltweite Akzeptanz zur Kernenergie

Das Beratungsunternehmen Accenture hat Ende 2008 weltweit 10508 Personen in 20 Industrie- und Schwellenländern nach ihrer Einstellung zur Kernenergie befragt und die Ergebnisse der Umfrage im April 2009 veröffentlicht [2]. Danach sprechen sich mehr als zwei Drittel aller Befragten für eine stärkere Nutzung der Kernenergie aus. In Indien und China wird die Kernenergie als besonders umweltfreundlich wahrgenommen. Dort sprechen sich 96 % (Indien) bzw. 91 % (China) der Befragten für mehr Kernenergie aus. Hohe Akzeptanz ist in den USA (81 %), Italien (70 %) und Frankreich (62 %) zu verzeichnen.

In Deutschland befürwortet die Hälfte der Befragten eine stärkere Nutzung der Kernenergie, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern. Der

Großteil der deutschen Verbraucher knüpft seine Zustimmung allerdings an Bedingungen: Ganz oben auf der Liste stehen sichere Kernkraftwerke, umweltverträgliche Lösungen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle, niedrige Energiepreise und eine transparente Kommunikation. Rund 56 % der Befragten sind dafür, die verkürzten Laufzeiten der deutschen Kernkraftwerke aufzuheben, um die CO₂-Bilanz weiter zu verbessern. International findet Kernenergie als Alternative zu fossilen Brennstoffen bei Verbrauchern immer mehr Akzeptanz, insbesondere um die CO₂-Emissionen zu reduzieren und unabhängiger von ausländischen Energielieferungen zu sein. Die Ergebnisse der Umfrage sind repräsentativ für die Industrieländer und die städtische Bevölkerung in Schwellenländern. Die Erhebung wurde in Australien, Belgien, Brasilien, China, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Indien, Italien, Japan, Kanada, Niederlande, Russland, Schweden, Slowakei, Spanien, Südafrika, Ungarn und USA durchgeführt.

Status quo in Europa

Europa gilt auch weiterhin als weltweit bedeutendste Region der Kernenergienutzung. 195 Kernkraftwerke liefern dort rund 31 % des Jahresstrombedarfs. Ende 2009 waren europaweit 14 Kernkraftwerksblöcke in Bau, davon sechs Blöcke in den vier EU-Mitgliedsländern Bulgarien, Finnland, Frankreich und Slowakei. Entsprechende Anträge bzw. erste Planungsanträge für Kernkraftwerksneubauten lagen den Behörden im Jahr 2009 unter anderem in Finnland (drei Anträge für drei Blöcke; die Regierung Finlands will über die grundsätzliche Zustimmung zu Neubauten und den Umfang im Jahr 2010 entscheiden), der Schweiz (drei Anträge), den Niederlanden (ein Antrag auf ein Vorverfahren für eine Umweltverträglichkeitsprüfung für Borssele-2) sowie der Tschechischen Republik (Temelín-3 und Temelín-4) vor. Bei der Bewertung der Kernenergie in den Mitgliedsländern der EU-27 spielen die ehrgeizigen Zielvorgaben der EU-Kommission in Sachen Klimaschutz und Energiepolitik eine wesentliche Rolle. Diese strebt im Zeithorizont bis 2020 Maßnahmen an, um den Ausstoß von Treibhausgasen um 20 % zu verringern und die Energieeffizienz um 20 % sowie den Anteil erneuerbarer Energien im Energiemix auf 20 % zu erhöhen. Das Langfristziel bis zum Jahr 2050 ist eine kohlenstoffarme Wirtschaft. Zusammen mit den erneuerbaren Energien ist die

Kernenergie eine der Energielösungen mit geringen CO₂-Emissionen. Insbesondere mit Blick auf eine kostengünstige Energieerzeugung ist Kernenergie eine wesentliche Komponente. Die Entscheidung über die Nutzung der Kernenergie bleibt jedem einzelnen EU-Mitgliedsland überlassen. Als Plattform zur breiten Diskussion sämtlicher Interessenvertreter über die Chancen, Risiken und Transparenzfragen im Zusammenhang mit der Kernenergie hatte die EU-Kommission bereits im Jahr 2007 das European Nuclear Energy Forum etabliert.

Für das Jahr 2009 ist bemerkenswert, dass die Regierungen Belgiens, Italiens und Schwedens nach ersten politischen Äußerungen in den Vorjahren konkrete Schritte eingeleitet haben, die eine klare Abkehr von der bisherigen Kernenergie-Ausstiegspolitik darstellen. In Belgien wurden etwa die Laufzeiten der ältesten Kernkraftwerksblöcke in einem ersten Schritt um zehn Jahre auf 50 Betriebsjahre verlängert. In Schweden wird die vorzeitige Stilllegung von Kernkraftwerken nicht weiterverfolgt, und der zukünftige Ersatzbau durch Kernkraftwerksneubauten soll wieder gesetzlich möglich sein. Das italienische Parlament hat den Weg für neue Kernkraftwerke durch entsprechende Gesetzesinitiativen geebnet.

Neben den Initiativen auf den regulatorischen Sektoren bauen die kerntechnischen Unternehmen in Europa mit dem Ziel einer mittel- und langfristigen weltweiten Präsenz ihren Personalstamm weiter aus. So wird insbesondere qualifiziertes Personal aus Technik und Administration für attraktive Projekte in Europa und anderen Regionen gesucht. Dabei setzen Hersteller wie Dienstleister und Betreiber auch auf langfristige Kooperationen mit Forschung und Wissenschaft, um die attraktiven Perspektiven vor Ort zu vermitteln. Neben zentralen und bilateralen Vereinbarungen zu Projektkooperationen und neuen Vorhaben zur Anlagen- und Sicherheitsforschung ist auch die Ausbildung und Förderung von qualifizierten Führungskräften eine wichtige Komponente. Dazu haben die Unternehmen Areva, Axpo, EnBW, E.on Kernkraft, Urenco und Vattenfall vor kurzem die European Nuclear Energy Leadership Academy (Enela) mit Standort Garching bei München gegründet.

Nach dem Wiedereinstieg Italiens in die Kernenergienutzung ist Deutschland das einzige G8-Land, das auf Kernenergie verzichten will. Innerhalb der EU gibt es – gespiegelt an der Sitzverteilung im europäischen Parlament – eine Mehrheit für den Einsatz von Kernkraftwerken.

¹⁴⁾ Chinese Pressurized Reactor mit 1000 MW Leistung

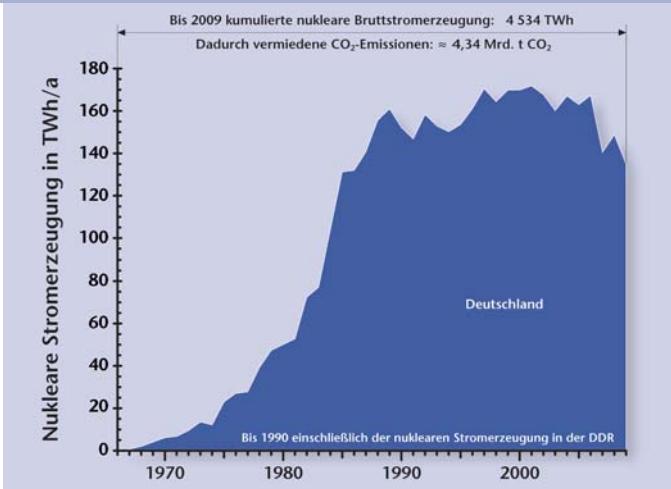


Bild 2

Entwicklung der jährlichen nuklearen Stromerzeugung und dadurch vermiedener äquivalenter CO₂-Emissionen in Deutschland.

zehn Jahre ausgesprochen. Und in Spanien begründet ein Moratorium aus dem Jahr 1983 den Kernenergieausstieg. Die Internationale Energieagentur IEA¹⁶⁾ bewertet diesen in ihrem neuesten Bericht zur spanischen Energiepolitik in Bezug auf die Einhaltung der dortigen Klima- und Energieziele als problematisch.

In den zwei verbleibenden EU-Mitgliedsländern Italien und Polen ohne derzeitige Kernenergienutzung hat sich die Haltung zur Kernenergie inzwischen deutlich verändert. So wurde in Italien ein Wiedereinstiegsplan der Regierung, nach durchaus kontroversen Diskussionen, im Juli 2009 von der Abgeordnetenkammer und außerdem auch vom Senat verabschiedet [3]. In Polen sollen, nach einer Entscheidung des Parlaments vom Januar 2009, bis zum Jahr 2025 zwei Kernkraftwerksblöcke errichtet werden. Auch in den EU-Mitgliedsländern, die Kernenergie nutzen, ist eine zunehmend positivere Bewertung der Kernenergie zu verzeichnen, zum Beispiel in Schweden. Dort wurde der fast 30 Jahre alte Ausstiegsbeschluss im Jahr 2009 rückgängig gemacht. In den Niederlanden wurde der Ausstiegsbeschluss bereits im Jahr 2006 zurückgenommen und der Betrieb des Kernkraftwerks Borssele bis zum Jahr 2033 verlängert. Darüber hinaus erfolgte im Juni 2009 der formale Anstoß zu einem künftigen Neubauantrag. In Großbritannien sind aktuell zehn neue Kernkraftwerke geplant, für die die britische Regierung bereits die Standorte abgesegnet hat. Diese hat angekündigt, auch die Gesetzgebung so zu verändern, dass diese Projekte schneller realisiert werden können. In Ungarn hat das Parlament am 30. März 2009 einem Antrag der Regierung zum Bau neuer Reaktoren zugestimmt.

Status quo in Deutschland

Im Jahr 2009 haben die 17 deutschen Kernkraftwerke ein Betriebsergebnis von 134,9 TWh brutto erzielt (**Bild 2**). Damit lag die Jahresstromproduktion um rund 13,9 TWh bzw. 9,4 % unter dem Niveau des Vorjahres (**Tabelle 4**). Die deutlich verringerte Produktion der deutschen Kernenergiwirtschaft ist wesentlich auf die nahezu ganzjährigen Stillstände der Kernkraftwerke Brunsbüttel und Krümmel sowie Stillstände der beiden Blöcke

Dies ist insbesondere mit Blick auf das erklärte Ziel der EU-Kommission von Bedeutung, einen integrierten und barrierefreien, gesamteuropäischen Wettbewerbsmarkt für Strom zu schaffen. Auch der Europäische Rat befürwortet unter anderem aus Gründen des Klimaschutzes und der Versorgungssicherheit den Einsatz der Kernenergie. Besonders in letzter Zeit ist die Neubewertung der Kernenergie als wichtige Komponente im künftigen Energiemix Europas deutlich geworden, da zahlreiche Länder wie Italien, Großbritannien, die Niederlande, Polen oder Schweden ihren Ausstieg aus der Kernenergienutzung zurückgenommen haben, erstmalig Kernkraftwerke einsetzen (wollen) oder den bestehenden Anteil des Kernenergiestroms am Erzeugungsmix stark ausweiten wollen. Rund 70 % der rund 500 Millionen Einwohner der EU-27 werden mit Strom versorgt, der auch aus Kernkraftwerken stammt [3]. Derzeit werden insgesamt 144 Kernkraftwerke in 15 EU-Mitgliedsländern eingesetzt – Belgien, Bulgarien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Litauen¹⁵⁾, Niederlande, Rumänien, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien und Ungarn. Die Kernkraftwerke haben im Jahr 2009 rund 31 % des Bruttostromverbrauchs der EU-27 gedeckt. In den meisten dieser 15 Länder leistet die Kernenergie einen erheblichen Teil der Stromproduktion, vor allem zur Deckung der Grundlast. Von den zwölf EU-Mitgliedsländern, die heute keine Kernkraftwerke betreiben, stellt sich bei sieben (Dänemark, Estland, Irland, Lettland, Luxemburg, Malta und Zypern) die Frage eines Einstiegs in die Kernenergienutzung schon aus ökonomischen Erwägungen nicht. In diesen Ländern ist der Stromverbrauch, auch aus Gründen der Versorgungssicherheit, für eine sinnvolle Investition in ein Kernkraftwerk zu niedrig; in Dänemark sind darüber hinaus die bestehenden und nicht miteinander verbundenen beiden Teilnetze ein weiteres Argument gegen einen Einstieg. Allerdings ist eine Nutzung der Kernenergie in Dänemark und Irland auch politisch nicht gewollt.

¹⁵⁾ bis 31. Dezember 2009

¹⁶⁾ IEA: International Energy Agency

Kernkraftwerk ¹⁾	Nennleistung in MW		Bruttostromerzeugung in TWh/a			Zeitverfügbarkeit ²⁾ in %			Arbeitsverfügbarkeit ³⁾ in %		
	Brutto	Netto	2007	2008	2009	2007	2008	2009	2007	2008	2009
Biblis A (DWR, 1974)	1 225	1 167	0,00	8,96	1,10	0,00	88,75	16,14	0,00	88,44	15,84
Biblis B (DWR, 1976)	1 300	1 240	0,94	10,98	1,61	8,35	99,86	17,26	8,19	99,67	16,77
Brokdorf KBR (DWR, 1986)	1 480	1 410	12,01	12,04	12,05	94,66	94,72	94,29	94,50	94,57	94,13
Brunsbüttel KKB (SWR, 1976)	806	771	2,60	0,00	0,00	38,38	0,00	0,00	37,36	0,00	0,00
Emsland KKE (DWR, 1988)	1 400	1 329	11,59	11,49	11,43	94,88	93,48	93,53	94,70	93,35	93,27
Grafenrheinfeld KKG (DWR, 1981)	1 345	1 275	10,90	10,33	11,06	94,01	89,12	94,55	93,57	88,85	94,38
Grohnde KWG (DWR, 1984)	1 430	1 360	11,46	11,17	11,51	94,40	91,62	94,61	94,07	91,32	94,36
Gundremmingen KRB-B (SWR, 1984)	1 344	1 284	11,06	10,16	10,94	94,73	86,16	92,60	94,09	85,10	92,03
Gundremmingen KRB-C (SWR, 1984)	1 344	1 288	10,35	10,42	10,77	88,23	88,08	91,74	87,40	87,49	91,13
Isar KKI-1 (SWR, 1977)	912	878	7,04	7,88	7,08	92,31	100,00	92,19	90,52	98,67	89,02
Isar KKI-2 (DWR, 1988)	1 485	1 410	12,01	12,09	12,13	93,57	93,55	94,49	93,43	93,33	94,32
Krümmel KKK (SWR, 1983)	1 402	1 346	5,69	0,00	0,35	47,38	0,00	3,24	47,01	0,00	2,89
Neckarwestheim GKN-I (DWR, 1976)	840	785	5,19	4,19	4,83	93,07	79,58	94,94	92,45	78,07	94,62
Neckarwestheim GKN-II (DWR, 1988)	1 400	1 310	11,11	11,43	11,52	91,34	93,87	94,83	91,13	93,47	94,75
Phillippsburg KKP-1 (SWR, 1979)	926	890	7,28	6,42	6,45	92,74	83,31	87,76	92,00	82,51	87,18
Phillippsburg KKP-2 (DWR, 1984)	1 458	1 392	11,78	11,43	11,58	94,23	90,54	92,52	94,13	90,32	92,26
Unterweser KKU (DWR, 1978)	1 410	1 345	9,53	9,78	10,54	79,73	87,23	89,82	79,25	82,83	89,51
Gesamt ⁴⁾	21 507	20 480	140,53	148,78	134,93	76,00	79,99	73,21	76,35	77,86	74,21

¹⁾ in Klammern Reaktortyp (Druck- oder Siedewasserreaktor) und Zeitpunkt der ersten Kritikalität bzw. Inbetriebnahme ²⁾ Maßstab für die zeitliche Einsatzfähigkeit eines Kraftwerks, der sich aus dem Bezugszeitraum – hier ein Jahr – und der Zeit in diesem Bezugszeitraum ergibt, in der das Kraftwerk verfügbar war. ³⁾ Maßstab für die Arbeit, die ein Kraftwerk in Relation zum theoretischen Maximalwert technisch und betrieblich erzeugen kann. ⁴⁾ Leistungsangaben mit Stand vom 31. Dezember 2009 Quelle: VGB Power Tech, März 2010

Biblis A und B zurückzuführen. Alle vier Kernkraftwerke befanden sich im Jahr 2009 in außerplanmäßigen Revisionen mit zeitaufwändigen Nachrüstungsmaßnahmen. Das Kernkraftwerk Brokdorf und das Kernkraftwerk Gundremmingen konnten indes Rekordergebnisse bei der Stromproduktion vermelden. Das Kernkraftwerk Brokdorf erzeugte im Jahr 2009 insgesamt 12,05 TWh Strom brutto, übertraf damit den Produktionsrekord des Vorjahres und erzielte das beste Ergebnis seit der Inbetriebnahme. Mit mehr als 21,7 TWh übertrafen die beiden Blöcke Gundremmingen B und C ihre bisherige Bestmarke aus dem Jahr 2006 von etwas weniger als 21,7 TWh. Nach den vorläufigen Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen lag der Anteil der Kernenergie am Primärenergieverbrauch in Deutschland weiterhin bei etwa 11 %. Durch den um etwa 6 % verringerten Verbrauch an Primärenergie wirkte sich das Betriebsergebnis der Kernkraftwerke nur geringfügig auf den Anteil der Kernenergie am Gesamtenergieaufkommen aus.

Meldepflichtige Ereignisse

In öffentlichen Diskussionen, insbesondere vor der Bundestagswahl 2009, wurde im Zusammenhang mit der Frage der Kernenergienutzung in Deutschland ins Feld geführt, bei Kernkraftwerken gehörten Störfälle und Sicherheitslücken zur Tagesordnung. Nun werden meldepflichtige Ereignisse in den kern-

technischen Einrichtungen der Bundesrepublik Deutschland seit 1975 nach bundeseinheitlichen Meldekriterien in der jeweils gültigen Fassung an die atomrechtlichen Aufsichtsbehörden gemeldet und in einer zentral geführten Liste erfasst. Unabhängig vom behördlichen Meldeverfahren nach Maßgabe der Atomrechtlichen Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung (AtSMV) werden sämtliche Ereignisse auf Grundlage der Ines-Skala¹⁷⁾ der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA bewertet und eingruppiert (**Bild 3**) [4].

Im Jahr 2008 wurden für sämtliche in Deutschland betriebenen und bereits stillgelegten Kernkraftwerke insgesamt 92 meldepflichtige Ereignisse erfasst. Davon hatten 91 keine oder eine sehr geringe unmittelbare sicherheitstechnische, bzw. keine radiologische Bedeutung und wurden deshalb in die Ines-Stufe 0 eingruppiert [5]. Ein Ereignis im Kernkraftwerk Philippsburg-1, bei dem zwischen dem Sicherheitsbehälter und der Dichthaut eine Leckage über eine Messleitung an der Nebenschleuse auftrat, wurde der Ines-Stufe 1 zugeordnet und somit als betriebliche Störung ohne radiologische Bedeutung bewertet. Im Jahr 2009 wurden für die in Deutschland betriebenen und bereits stillgelegten Kernkraftwerke insgesamt 103 meldepflichtige Ereignisse erfasst, die alle der Ines-Stufe 0 zugeordnet wurden [6 bis 9]. Ableitungen von radioaktiven Stoffen oberhalb genehmigter Höchstwerte für Fortluft und Abwasser traten nicht auf.

Tabelle 4

Betriebsergebnisse, Zeit- und Arbeitsverfügbarkeiten deutscher Kernkraftwerke in den Jahren 2007 bis 2009.

Diese liegen sogar seit Jahren um bis zu drei Größenordnungen unterhalb der Genehmigungswerte (kleiner als 0,1 %) bzw. zusätzlich unterhalb der Erkennungsgrenzen. Die behördlichen Zahlen belegen, dass bei deutschen Kernkraftwerken Störfälle nicht nur nicht zur Tagesordnung gehören, sondern im betrachteten Zeitraum auch kein einziges Mal aufgetreten sind.

Versorgungssicherheit – auch eine Frage von Leistung und Arbeit

Die Lehre aus den kalten Wintertagen Anfang 2009 ist erneut, dass Kernkraftwerke und mit fossilen Brennstoffen gefeuerte Kraftwerke für eine sichere Elektrizitätsversorgung erforderlich sind. Auch Windenergie- und Photovoltaikanlagen tragen durch die Lieferung elektrischer Arbeit in gewissem Umfang zur Einsparung fossiler Brennstoffe und CO₂-Minderung bei. Sicher kalkulierbare Beiträge an bedarfsoorientiert abrufbarer Leistung können Windenergie- und Photovoltaikanlagen bedingt liefern, da ihre

¹⁷⁾ Ines: International Nuclear Event Scale

Stufe	Kategorie	Charakterisierung
7	Katastrophaler Unfall	Schwerste Freisetzung außerhalb der Anlage • Weitreichende Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt
6	Schwerer Unfall	Erhebliche Freisetzung außerhalb der Anlage • Voller Einsatz der Katastrophenschutzmaßnahmen
5	Ernster Unfall	Begrenzte Freisetzung außerhalb der Anlage • Einsatz einzelner Katastrophenschutzmaßnahmen • Schwere Schäden am Reaktorkern bzw. an den radiologischen Barrieren
4	Unfall	Geringe Freisetzung außerhalb der Anlage • Strahlenexposition der Bevölkerung etwa in Höhe der natürlichen Strahlenexposition • Schwere Strahlenexposition des Personals in einer Größenordnung von 1 Sievert mit Todesfolge • Begrenzte Schäden am Reaktorkern bzw. an den radiologischen Barrieren
3	Ernster Störfall	Sehr geringe Freisetzung außerhalb der Anlage • Strahlenexposition der Bevölkerung in Höhe eines Bruchteils der natürlichen Strahlenexposition • Schwere Kontaminationen und/oder akute Gesundheitsschäden beim Personal • Weitgehender Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
2	Störfall	Keine Freisetzung außerhalb der Anlage • Erhebliche Kontamination und/oder unzulässig hohe Strahlenexposition beim Personal • Begrenzter Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen
1	Störung	Keine Freisetzung • Abweichung von den zulässigen Bereichen für einen sicheren Anlagenbetrieb
0	Ereignis unterhalb der Ines-Skala, keine sicherheitstechnische Bedeutung	

Leistung von externen Führungsgrößen wie dem Windangebot oder der Solar-einstrahlung bestimmt wird. Das Windangebot kann insbesondere an kalten Wintertagen über mehrere Tage gering sein, und ein stabiles Winterhoch mit tiefen Temperaturen ist nicht selten mit Schwachwind oder Windstille gekoppelt. Diese Situation kennzeichnete zum Beispiel den Jahresanfang 2009 [10], als die eingespeiste elektrische Leistung aus dem deutschlandweiten Windenergieanlagenkollektiv bei einer installierten Gesamtleistung von knapp 24 GW tagelang in einem Band von 0,5 bis 4,5 GW schwankte. Auf die deutschlandweite Netzlage bezogen war dies ein geringer Anteil, denn diese lag zeitgleich in einer Bandbreite von etwa 50 GW in den Morgenstunden bis 75 GW im Tagesverlauf und am Abend. Zeitgleich traten europaweite Verbrauchsspitzen auf. Die vornehmlich zur Deckung der Grundlast eingesetzten Kern- und Braunkohlekraftwerke waren zu diesen Zeiten überwiegend rund um die Uhr verfügbar. Auch Steinkohle- und Erdgaskraftwerke standen bereit, um den saisonal hohen Bedarf an Elektrizität zu decken. Für eine sichere und zuverlässige Elektrizitätsversorgung bedeutet mehr Windenergie auch ein Mehr an schnell verfügbarer Reserveleistung. Aus technischen und ökonomischen Erwägungen eignen sich Erdgasturbinen gut für diese Aufgabe und wurden daher in den letzten Jahren verstärkt in diesem Bereich eingesetzt, wie die hohe Korrelation der jährlichen Stromerzeugungsdaten aus Windenergie und Erdgas vermuten lässt (**Bild 4**). Allerdings zeigt sich hier ein weiterer Problempunkt: Im Winterhalbjahr ist der Wärmebedarf hoch, so dass das Erdgasnetz ohnehin bereits hoch ausgelastet ist. Müsste in dieser Jahreszeit zukünftig gleichzeitig in einem noch deutlich höheren Umfang Erdgas zur Stromerzeugung abgerufen werden, so wäre mit bisher nicht beobachteten Lastspitzen zu rechnen und in der Folge auch mit beträchtlichen Preissteigerungen. Hinzu kämen übergeordnete Einflüsse, etwa Auswirkungen eines Konflikts, wie er sich Anfang 2009 zwischen Russland und der Ukraine abgespielt hat, ebenfalls mit potenziellen Effekten auf den Erdgaspreis. Mit statistischen Analysen zum Risiko der Versorgung eines Landes mit Energierohstoffen lässt sich nachweisen, dass sich das Energieversorgungsrisiko in Deutschland seit Ende der 1970er Jahre signifikant erhöht hat [11]. Demnach weist Deutschland unter den G7-Staaten – nach Italien – zurzeit das höchste Ver-

sorgungsrisiko auf, während zum Beispiel Frankreich sein Energieversorgungsrisiko im gleichen Zeitraum durch einen entschlossenen Ausbau der Kernenergienutzung deutlich reduziert konnte und auf relativ niedrigem Niveau stabilisiert hat. Vor diesem Hintergrund erstaunt es wenig, dass das italienische Parlament Mitte 2009 den Wiedereinstieg in die Nutzung der Kernenergie beschlossen hat. Der wesentliche Grund für das hohe Energieversorgungsrisiko Deutschlands, das sich von 1980 bis 2007 insgesamt mehr als verdoppelt hat, sind die massiv gestiegenen Rohöl- und Erdgasimporte aus Russland. Bei Erdgas hat sich der Risikowert seit 1980 sogar fast verdreifacht, denn seine Bedeutung als Energierohstoff hat zugenommen: So hat sich der Erdgasanteil am deutschen Primärenergiemix seit 1980 von 14,2 % auf 22,5 % im Jahr 2007 erhöht bzw. der jährliche Erdgasverbrauch in Deutschland von nahezu 70 auf etwas mehr als 100 Mrd. m³/a [11]. Wird am Ausstieg aus der Kernenergie festgehalten, so dürfte sich das Energieversorgungsrisiko Deutschlands selbst dann weiter erhöhen, wenn das politische Ziel erreicht würde, den Anteil der erneuerbaren

Bild 3

Internationale Skala zur Bewertung von Nuklearereignissen.

Energien an der Stromversorgung bis zum Jahr 2020 auf 30 % zu erhöhen. Dieser Anstieg des Energieversorgungsrisikos wäre nicht zuletzt das Resultat einer zwangsläufig weiter zunehmenden Abhängigkeit von Erdgasimporten aus Russland bei gleichzeitig weiterem Rückgang der inländischen Erdgasförderung [11].

Ein weiterer Aspekt sind die volkswirtschaftlichen Kosten für die Versorgung Deutschlands mit Energie (**Bild 5**). Die Devisenrechnung für Nettoenergieimporte nach Deutschland verdeutlicht, dass auf Rohöl sowie Mineralölprodukte nach wie vor der Großteil der Kosten entfällt [12]. So lag der Anteil der Nettoeinfuhrkosten für Rohöl und Mineralölprodukte an den Nettoeinfuhrkosten für Deutschland im Jahr 2009 bei rund 61,9 %, gefolgt von Erdgas (32,6 %) und Kohle (6,3 %). Der Kostenanteil des Kernbrennstoffes Uran war im Vergleich dazu mit 0,7 % niedrig und ist schon seit

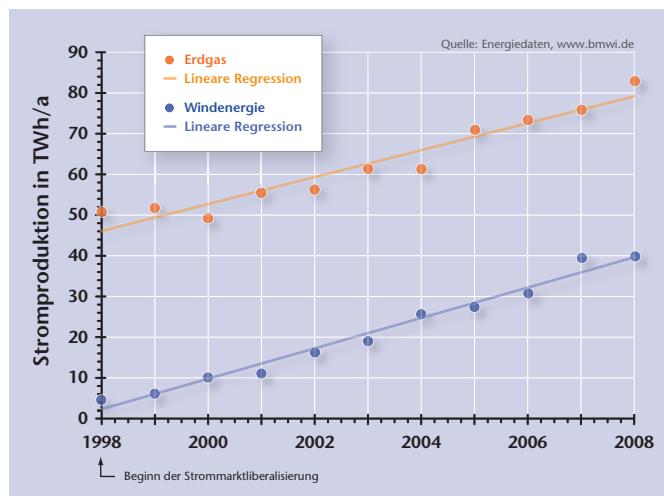


Bild 4

Stromproduktion aus Windenergie und Erdgas von 1998 bis 2008.

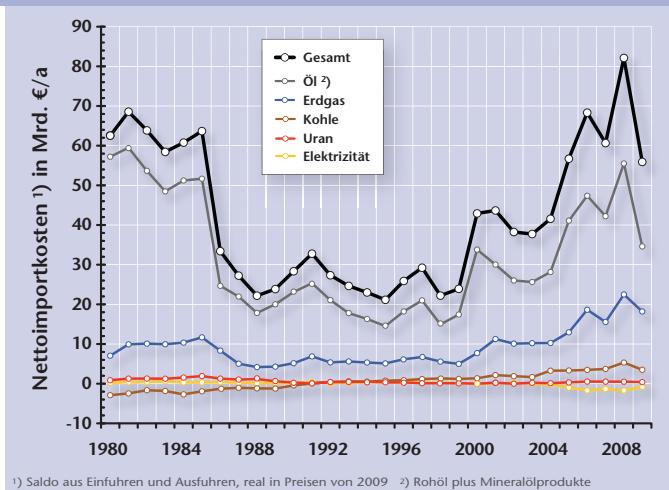


Bild 5
Import-Export-Saldo nach Energieträgern für Deutschland von 1980 bis 2009.

chen werden müssen. Bei der Analyse der einzelnen Szenarien wurde unter anderem auch ein Kraftwerkspark unterstellt, in dem Kernkraftwerke nach einer Aufhebung der Laufzeitverkürzung weiter in Betrieb sind. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass weder bei einem Festhalten am Kernenergieausstieg noch bei Laufzeitverlängerungen eine eindeutige Überlegenheit hinsichtlich der Betriebsflexibilität des thermischen Kraftwerksparks vorliegt. Die Aussage,

jehler gering. Bei der Kernenergie besteht aus statistischer Sicht zwar eine Einfuhrabhängigkeit von 100 %. Gleichwohl ist Uran angesichts seiner Energiedichte und inländisch vorholtbarer Vorräte mit mehrjähriger Reichweite unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit der gleiche Stellenwert beizumessen wie den heimischen Energieträgern Stein- und Braunkohle sowie Wasserkraft und den neuen erneuerbaren Energien Windenergie, Biomasse, Geothermie und Photovoltaik.

Laufzeitverlängerungen für Kernkraftwerke als Hemmschuh für erneuerbare Energien?

Auch wenn bisweilen behauptet wird, Kernkraftwerke seien für den Lastfolgebetrieb ungeeignet und zu behäbig, um auf plötzliche Schwankungen der Netzspannung schnell reagieren zu können, kann jedes Großkraftwerk technisch in seiner Leistungsabgabe geregelt werden. Diese Aussage gilt auch für Kernkraftwerke, die in Deutschland bisher aus ökonomischen Gründen bzw. wegen des geringen Brennstoffkostenanteils an den Stromgestehungskosten vorwiegend im Dauerbetrieb eingesetzt werden. Denn für Regelzwecke ist es aus ökonomischer Sicht sinnvoller, Erdgaskraftwerke mit ihren hohen Brennstoffkosten herunterzuregeln. Nur einzelne deutsche Reaktoren arbeiten im Lastfolgebetrieb. Da die Fähigkeit zur Lastfolge bei den hiesigen Kernkraftwerken ein Auslegungskriterium war, wurden die Kernüberwachung und die Regelung der Reaktoren von vornherein so konzipiert, dass im Bedarfsfall keine nachträgliche Ertüchtigung der Anlagen erforderlich ist. Der Begriff Lastfolgefähigkeit besagt, um wie viel Prozent die Leistung eines Kraftwerks in einer Zeitspanne erhöht oder gedrosselt werden kann. Bei Kernkraftwerken ist die Leistung in einem Bereich von $\pm 5\%$ bis $\pm 10\%$ der Nennleistung pro Minute regelbar. Das Regelband reicht von der im Normalbetrieb minimal fahrbaren Leistung bis zur Nennleistung. Für Kernkraftwerke ergibt sich ein Regelbereich von 45 bis 100 % der

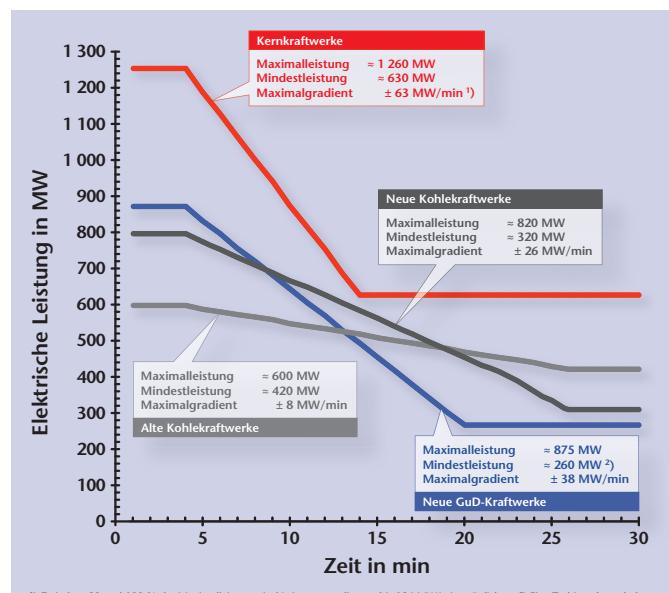
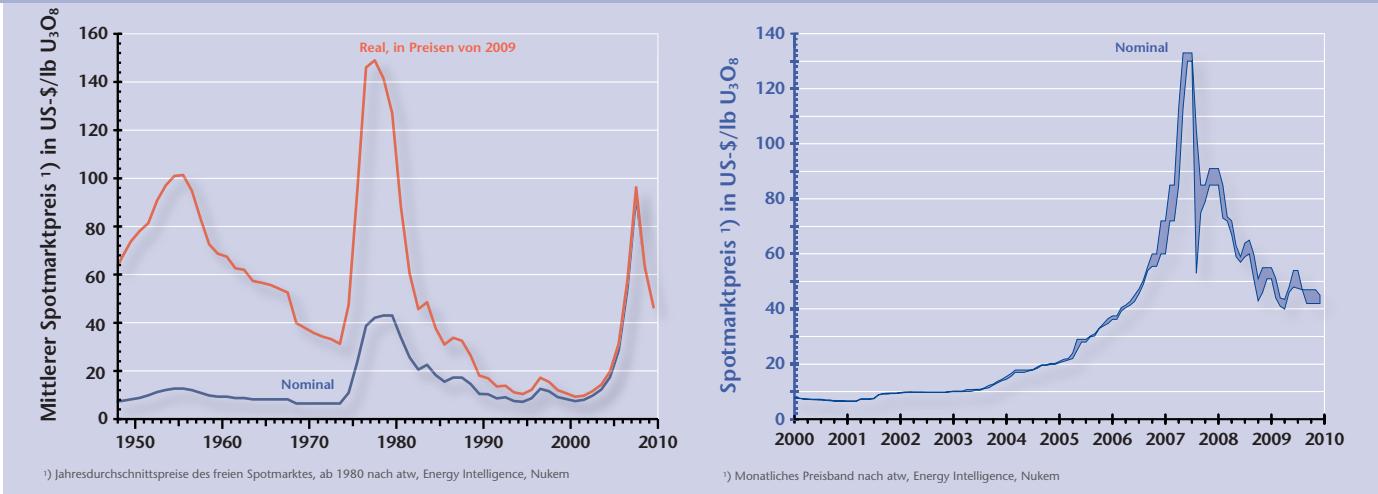


Bild 6
Vergleich der Zufahrtrampen von Großkraftwerken.

Nennleistung. Hierbei gilt: Je langsamer abgefahren wird, umso höher ist die mögliche Leistungsreduzierung in einer definierten Zeitspanne. Aus technischer Sicht können Kernkraftwerke Laständerungen sogar schneller folgen als Kohle- oder GuD-Kraftwerke (Bild 6). Die bestehenden deutschen Kernkraftwerke können ohne Einschränkung mit einer Gesamtleistung von fast 10 GW zum Lastfolgebetrieb genutzt und bei Bedarf flexibel eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund wurde in einer aktuellen Studie [13; 14] untersucht, inwieweit der Betrieb der deutschen Kernkraftwerke bei einer Laufzeitverlängerung und zukünftig weiter steigenden Anteilen der erneuerbaren Energien im Stromnetz beeinflusst wird. Dazu wurden für die Jahre 2020 und 2030 mehrere Szenarien untersucht. Nach den Plänen der Bundesregierung dürften erneuerbare Energien bis dahin einen Anteil an der Stromerzeugung von gut 31 % (2020) bzw. 42 % (2030) erreicht haben, maßgeblich durch einen Ausbau der Offshore-Windenergienutzung. Der verbleibende, nicht durch erneuerbare Energien gedeckte Anteil der Stromnachfrage wird auch dann nach wie vor durch die konventionellen Kraftwerke ausgegli-

die notwendige Betriebsflexibilität des Kraftwerksparks zur Deckung der Residuallast können bei einem hohen regenerativen Stromerzeugungsanteil nicht auch bei weiterer Nutzung von Kernkraftwerken sichergestellt werden, ist nach den Erkenntnissen der Studie nicht begründet [13; 14]. Bei einem weiter zunehmenden Anteil an fluktuierender Stromerzeugung und steilen Verläufen der Residuallast werden sich bei einer Laufzeitverlängerung auch die Kernkraftwerke am übergeordneten Lastfolgebetrieb beteiligen müssen. Extremen Gradienten und Niveaus der Residuallast kann in beiden Varianten begegnet werden. Bei einem noch höheren Stromerzeugungsanteil aus Windenergie und Photovoltaik als für das Jahr 2030 unterstellt, wird jedoch unabhängig davon, ob Kernkraftwerke zum Erzeugungsportfolio gehören oder nicht, eine Regelung der Einspeisung aus erneuerbaren Energien oder der Ausbau geeigneter Energiespeichersysteme erforderlich sein, um die Stromnachfrage mit der notwendigen Versorgungszuverlässigkeit decken zu können. Eine Laufzeitverlängerung führt unter den in der Studie getroffenen Annahmen zu deutlich reduzierten Systembetriebskosten. Im Falle eines Kern-



energieausstieg ist mit einem signifikant höheren Niveau des Großhandelspreises für Strom zu rechnen und mit einem Zusatzbedarf an Kraftwerksneubauten. Aus technisch-betrieblicher Sicht wird in der Studie zusammenfassend festgestellt, dass eine Laufzeitverlängerung kein Hemmschuh für den Ausbau erneuerbarer Energien ist. Aus ökonomischen Erwägungen und der Sicht der CO₂-Emissionsminderung wäre ein Kernenergieausstieg sogar als deutlich kontraproduktiv einzustufen.

Kernbrennstoffversorgung

Bei Kernbrennstoffen wird nach wie vor aus geologischer Sicht in absehbarer Zeit kein Engpass erwartet. Neben wachsenden Reserven aufgrund einer stark zunehmenden Explorationstätigkeit gibt es ausreichend Ressourcen, mit denen der weltweite Kernkraftwerkspark über die nächsten Jahrzehnte sicher versorgt werden kann [15; 16]. In der jüngsten BGR-Studie zu Energierohstoffen [15] werden die Weltreserven an Natururan, die sich einer Förderkostenkategorie von weniger als 40 US-\$ pro kg Natururan zuordnen lassen, auf nahezu 1,77 Mio. t beziffert, von denen mehr als 96 % auf folgende zehn Länder entfallen [15]:

■ Australien (40,1 %)	709 000 t
■ Kanada (15,3 %)	270 100 t
■ Kasachstan (13,3 %)	235 500 t
■ Brasilien (7,9 %)	139 600 t
■ Südafrika (6,5 %)	114 900 t
■ Namibia (3,2 %)	56 000 t
■ Usbekistan (3,1 %)	55 200 t
■ Russland (2,7 %)	47 500 t
■ Jordanien (2,5 %)	44 000 t
■ China (1,8 %)	31 800 t

Werden noch höhere Förderkosten bis 130 US-\$ pro kg Natururan zugelassen, so erhöhen sich die Weltvorräte in den konventionellen Lagerstätten auf mehr als 5,4 Mio. t. Diese können als planbare Größe für die zukünftige Versorgung der Kernkraftwerke angesehen werden [15]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Vorräte bei entsprechendem Bedarf tatsächlich in den Kreislauf gelangen, da die bergmännische Urangewinnung nur

mit 6 bis 10 % in die Stromerzeugungskosten einfließt. Bei der Uranversorgung decken nur wenige Länder den Hauptteil der Weltförderung. Im Jahr 2008 lieferte Kanada rund 20,5 % der Weltförderung von etwa 43 895 t. Kasachstan (19,4 %), Australien (19,2 %) und Namibia (9,9 %) sowie Russland (8,0 %), Niger (6,9 %), Usbekistan (5,3 %) und die USA (3,3 %) lieferten zusammen weitere 72,0 % [15]. Auf der Verbrauchsseite sind für 2008 rund 64 615 t Natururan zu verzeichnen, die weltweit von den Kernkraftwerken verbraucht wurden. Allerdings stammen nur 67,9 % davon aus der Bergwerksproduktion, denn anders als bei fossilen Energierohstoffen besteht beim Uran schon seit Jahren eine Lücke zwischen Förderung und Verbrauch, die nach wie vor aus sekundären Quellen gedeckt wird, das heißt, durch Uran aus militärischen und zivilen Lagerbeständen.

Entwicklungen am Spotmarkt

Der Uranmarkt erlebte nach seinem deutlichen Anstieg im Zeitraum von 2004 bis Juni 2007 mit einem Spotmarktpreis von 136 US-\$/lb U₃O₈ ein Allzeithoch. Bis zum Jahresende 2007 gab der Preis auf 90 US-\$/lb U₃O₈ nach. Diese Marktanpassung setzte sich auch im Folgejahr fort. Im Jahresverlauf 2008 sanken die Spotmarktpreise bis auf 47 US-\$/lb U₃O₈. Danach entwickelten sich die Preise zunächst seitwärts und sanken im April 2009 zwischenzeitlich auf einen Tiefwert von 42 US-\$/lb U₃O₈. Im Dezember 2009 notierte der Spotmarktpreis bei 44 US-\$/lb U₃O₈ (Bild 7). Der Durchschnittspreis für die Langzeitlieferung von 1 kg Natururan lag im Jahr 2008 bei 47,23 € und im Jahr 2007 bei 40,98 € [15]. Die hohen Preise haben zu einer deutlichen Marktbelebung geführt. Weltweit hat eine Vielzahl an Ländern (unter anderem China, Finnland, Indien, Japan und Russland) einen Zubau von neuen Kernkraftwerken angekündigt. Gleichzeitig steigt die Uranfördermenge nur langsam an. Vor diesem Hintergrund erwarten Experten über das Jahr 2009 hinaus eine Preiskonsolidierung

Bild 7

Entwicklung der Spotmarktpreise für Natururan (nominal und real).

deutlich oberhalb einer Kategorie von rund 80 US-\$ pro kg Natururan [15].

Kerntechnische Lehr- und Forschungsangebote

Die Sicherheit der Kernreaktoren auf dem jeweils neuesten Stand von Wissenschaft und Technik ist über ihre gesamte Laufzeit zu gewährleisten. Hierzu bedarf es kerntechnischer Kompetenz auf dem höchstem wissenschaftlich-technischen Niveau, basierend auf einer fundierten akademischen Ausbildung an Universitäten und Hochschulen [1]. Die Kerntechnik und Kernkraftwerke bieten für Absolventen technischer Studiengänge anspruchsvolle Herausforderungen in einem attraktiven Arbeitsumfeld, denn in der kerntechnischen Branche werden für die nächsten Jahrzehnte motivierte, engagierte Nachwuchskräfte benötigt. Diese tragen als Ingenieure und Naturwissenschaftler bei Kernkraftwerksherstellern und -betreibern sowie Gutachterinstitutionen zum Erfolg bei.

Auf der Grundlage einer vom VGB Power Tech e.V., Essen, durchgeföhrten Datenerhebung zu kerntechnischen Lehr- und Forschungsangeboten in Deutschland ist ein Fachgebietsregister eingerichtet worden, in dem Lehr- und Forschungseinrichtungen mit entsprechenden Fachkompetenzen spezifischen kerntechnischen Themenschwerpunkten zugeordnet wurden (Tabelle 5) [17]. Die deutschen Kernkraftwerksbetreiber fördern einige Lehr- und Forschungseinrichtungen mit einer koordinierten Initiative und leisten damit einen Beitrag zum Kompetenzerhalt und zur Nachwuchsgewinnung. Mit der Maßnahme sollen nicht nur die fachlichen und personellen Grundlagen für einen sicheren und zuverlässigen Weiterbetrieb der deutschen Kernkraftwerke, sondern auch für die gesicherte Entsorgung der

Einrichtungen	Themenschwerpunkt								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Hochschulen, Universitäten									
1. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	+	-	+	-	+	-	+	-	+
2. Technische Universität Berlin	-	-	-	-	-	+	-	-	-
3. Ruhr-Universität Bochum	+	-	+	+	-	-	+	+	-
4. Technische Universität Braunschweig	+	-	-	-	-	-	-	+	-
5. Technische Universität Clausthal	-	-	-	-	+	-	-	-	-
6. Technische Universität Dresden	+	+	+	-	-	+	-	-	+
7. Universität Duisburg-Essen	-	-	-	-	-	-	-	+	+
8. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen/Nürnberg	-	-	-	-	-	-	-	-	+
9. Technische Universität Bergakademie Freiberg	-	-	-	-	-	-	-	-	+
10. Universität Hannover	-	+	+	-	+	+	-	-	-
11. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg	-	+	-	-	+	-	-	-	-
12. Universität Karlsruhe (TH)	+	-	+	-	+	-	-	-	-
13. Universität Köln	-	-	-	-	-	-	-	+	-
14. Technische Universität München	+	+	+	-	-	-	-	-	-
15. Universität der Bundeswehr München	-	-	-	+	-	-	-	-	-
16. Technische Universität Saarbrücken	-	-	-	-	-	+	-	-	-
17. Johannes-Gutenberg-Universität Mainz	-	+	-	-	-	-	-	-	-
18. Philipps-Universität Marburg	-	+	-	-	-	-	-	-	-
19. Universität Rostock	-	-	-	+	-	-	-	-	-
20. Universität Stuttgart	+	+	+	-	+	+	-	+	-
21. Bauhaus-Universität Weimar	-	-	-	-	-	-	-	+	-
22. Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Fachhochschulen									
23. Fachhochschule Aachen	+	+	-	+	-	-	-	-	-
24. Fachhochschule Darmstadt	-	+	-	-	-	-	-	-	-
25. Fachhochschule für Technik Esslingen	-	+	-	-	-	-	-	-	-
26. Fachhochschule Gießen/Friedberg	-	+	-	-	-	-	-	-	-
27. Fachhochschule Kiel	-	+	-	-	-	-	-	-	-
28. Fachhochschule Hannover	-	+	-	-	-	-	-	-	-
29. Hochschule für Technik und Gestaltung Mannheim	-	+	-	-	-	-	-	-	-
30. Fachhochschule Münster/Steinfurt	-	-	-	-	-	-	-	-	+
31. Hochschule für Technik und Wirtschaft Saarbrücken	+	+	-	-	-	-	-	-	-
32. Hochschule Zittau/Görlitz	+	+	-	+	+	-	-	-	-
Forschungsinstitute									
33. Forschungszentrum Jülich	+	-	+	-	+	-	-	-	-
34. Forschungszentrum Karlsruhe	+	-	+	-	+	-	-	-	-
35. Forschungszentrum Dresden-Rossendorf	+	+	+	-	-	-	-	-	-
36. Institute for Safety and Reliability, Garching	-	-	+	-	-	-	-	-	-
37. Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, Berlin	-	-	-	-	-	+	-	-	-
38. Deutsches Geoforschungszentrum, Potsdam	-	-	-	-	-	-	-	+	-

+ = Themenschwerpunkt – = kein Themenschwerpunkt ■ = Förderung bzw. Beauftragung durch Kernkraftwerksbetreiber
A = Kerntechnik, Reaktortechnik B = Strahlenschutz, Radiochemie C = Sicherheit, schwere Störfälle, Thermohydraulik, probabilistische Sicherheitsanalyse D = Elektrotechnik, Leittechnik E = Entsorgung und Brennstoffkreislauf F = Werkstoffe, zerstörungsfreie Prüfung G = Bautechnik, Seismologie H = Energiesysteme I = Werkstoffe, Mechanik, Thermodynamik für Behälterbau

radioaktiven Abfallstoffe in Deutschland geschaffen werden [17].

Nukleare Energieforschung

Nukleare Energieforschung wird in Deutschland an Forschungszentren und außerdem an 32 Hochschulstandorten durchgeführt. Daneben wird industrielle

Forschung bei Herstellern sowie Forschung zur betrieblichen Sicherheit und zur Anlagensicherheit bei den laufenden Kernkraftwerken seitens der Betreiber und bei technisch-wissenschaftlichen Forschungs- und Sachverständigenorganisationen durchgeführt.

Im Folgenden wird ein Überblick über Highlights der aktuellen Aktivitäten der

Tabelle 5

Zuordnung von Lehr- und Forschungseinrichtungen zu kerntechnischen Themenschwerpunkten.

drei Forschungszentren in Karlsruhe (FZK, neuerdings KIT), Jülich (FZ) und Dresden-Rossendorf (FZD) gegeben.

KIT-Highlights

Am 1. Oktober 2009 wurde das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) als Zusammenschluss des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) und der Universität Karlsruhe gegründet. Grundlage war das KIT-Zusammenführungsgegesetz, das der Landtag des Landes Baden-Württemberg im Juli 2009 einstimmig verabschiedet hatte. Im KIT vereinen sich die Missionen der beiden Vorläufer-Institutionen: einer Universität in Landeshoheit mit Aufgaben in Lehre und Forschung sowie einer Großforschungseinrichtung der Helmholtz-Gemeinschaft mit programmorientierter Vorsorgeforschung im Auftrag des Staates. Innerhalb dieser Missionen positioniert sich das KIT entlang der strategischen Handlungsfelder Forschung, Lehre und Innovation. Die Sicherheit der kerntechnischen Anlagen hat unabhängig von der Entscheidung über die weitere Nutzung der Kernenergie in Deutschland oberste Priorität. Das KIT-Zentrum Energie bildet ein Exzellenzzentrum der Forschung, Innovation und Lehre auch auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit.

Innovative Nuklearsysteme

■ Experimentelle Untersuchungen an einem fensterlosen Target im Theades-Kreislauf: Im EU-Projekt Vella¹⁸⁾ geht es um die Weiterentwicklung der Flüssigmetalltechnologie, insbesondere auf Blei-Basis. In einer Kooperation mit dem belgischen Kernforschungszentrum SCK-CEN, Mol, wurde im Flüssigmetalllabor Kalla¹⁹⁾ ein fensterloses Target (Myrrha) mit freier Blei-Wismut-(PbBi-)Oberfläche für ein System mit externer Neutronenquelle untersucht, das von einem Beschleuniger, kurz ADS²⁰⁾, angetrieben wird. Bei einem Massenstrom von 375 t/h wurden Experimente zur Bestimmung des Pumpingeffekts (Gaszu- bzw. -abfuhr über die freie Oberfläche) sowie zur Abstandsmessung an spiegelnden Oberflächen mit einem nach dem Radarprinzip arbeitenden Laser, auch Lidar²¹⁾ genannt, durchgeführt. Das Flüssigmetalllabor Kalla besteht aus drei Kreisläufen:

¹⁸⁾ Vella: Virtual European Lead Laboratory

¹⁹⁾ Kalla: Karlsruhe Lead Laboratory

²⁰⁾ ADS: Accelerator Driven System

²¹⁾ Lidar: Light Detection And Ranging

- einem Technologiekreislauf (Thesys) zur Erprobung messtechnischer und basisphysikalischer Verfahren,
- einem Hydraulikkreislauf (Theades) für thermohydraulische Analysen von ADS-Komponenten und Anwenderexperimenten und
- einem Materialkreislauf (Corrida) zur Messung von Korrosion und Erosion an typischen Strukturmaterialien.

In Abstimmung mit internationalen Partnern werden im Zuge der EU-Forschungsrahmenprogramme umfangreich instrumentierte Benchmark-Experimente zum Strahlfenster, zum fensterlosen Target, zum Brennelement und zum Wärmeabfuhrsysteem eines Spallationtargets durchgeführt.

■ **Infrarot-Thermografie am Megapie-Target im Theades-Kreislauf.** In Zuge einer Kooperation mit dem Paul-Scherrer-Institut (PSI), Schweiz, wurde im Theades-Kreislauf ein 1:1-Modell des PbBi-Flüssigmetalltargets Megapie untersucht, das als Pilottarget für ein ADS am PSI bestrahlt worden war. Bei einem Massenstrom bis 150 t/h wurden Experimente zur Kühlbarkeit des Targetfensters (Durchtritt des Protonenstrahls) mittels einer Jetströmung durchgeführt. Dazu wurde ein neuer Hochleistungsschaltheizer ins Kalla-Modell eingebaut, der die Bestimmung lokaler Wärmeübertragungskoeffizienten über HHF-Sensor-Infrarot-Thermografie²²⁾ erlaubt. Bei Leistungsdichten von mehr als 140 W/cm² wurde nicht nur die Leistungsvorgabe durch den Protonenstrahl überschritten, sondern auch die weltweit höchste Belastung derartiger Sensoren erreicht.

Immobilisierung hochradioaktiver Flüssigkeitsabfälle durch Verglasung

Am Institut für Nukleare Entsorgung (INE) wurde ein Verfahren zur Immobilisierung hochradioaktiver Abfalllösungen entwickelt, das auf direkter Einspeisung der Abfalllösung in einen mit Hochtemperaturkeramik ausgekleideten elektrischen Schmelzofen beruht, in dem eine Glasschmelze bis 1200 °C aufgeheizt wird. Bei dieser Temperatur verdampft die Lösung. Der Verdampfungsrückstand wird zusammen mit seinen hochradioaktiven Komponenten in das Glas eingeschmolzen und dieses in Edelstahlkokillen abgefüllt. Das gleichzeitig entstehende Prozessabgas wird einer vielstufigen Reinigung unterzogen. Auf der Grundlage der INE-Verglasungstechnologie wurde vom Forschungszentrum Karlsruhe die Verglasungseinrichtung Karlsruhe erbaut und an die Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK) übergeben. Mit dieser Anlage soll der auf dem WAK-Gelände gelagerte hochradioaktive Flüssigabfall mit einem Volumen von rund 60 m³ und einem Radioaktivitätsinventar von $7,7 \cdot 10^{17}$ Bq in rund 50 t Borosilikatglas immobilisiert werden. Die Verglasungseinrichtung wurde unter maßgeblicher Beteiligung von INE-Personal in Betrieb genommen. Bereits 2007 wurde die Anlagenfunktion mit einem ersten 70-tägigen Langzeittest mit simulierter Abfalllösung erfolgreich demonstriert. Nach Erteilung der Genehmigung für den heißen Betrieb im Februar 2009 folgte ein zweiter Kalttestbetrieb unter dem Regelwerk und den Randbedingungen des heißen Betriebs. Die heiße Inbetriebsetzung fand Anfang September 2009 mit einem einwöchigen heißen Probebetrieb statt, bei dem auf der Basis einer stark verdünnten Abfalllösung die ersten drei radioaktiven Glaskokillen produziert wurden. Das Ziel des Probobetriebs war unter anderem die Überprüfung der Transfereinrichtungen zum Abfalllager und der radiometrischen Messtechnik, zum Beispiel für die Emissionsmessungen. Der auch von INE-Mitarbeitern betreute Verglasungsbetrieb startete am 16. September. Bis Ende 2009 wurde der Inhalt des ersten von zwei Lagertanks mit hochradioaktiven Abfalllösungen verglast. Hierbei wurden etwa 50 Glaskokillen erzeugt. Aufgrund der bisherigen durchweg positiven Betriebs erfahrungen, basierend auf der Zuverlässigkeit der Prozesstechnik, wird das Ende des Verglasungsbetriebs für Mitte 2010 erwartet. Dann werden die Abfälle in etwa 125 Glaskokillen immobilisiert sein. Die betriebsbegleitende Analytik, bei der in jeder aus den Lagertanks übernommen Charge sowie in den Waschlösungen aus der Abgasreinigung und in rezyklierten Konzentratoren die Elementzusammensetzung bestimmt wird, wird ebenfalls durch das INE durchgeführt.



Bild 8

**Ziegelphantom
Olga im Ganzkörperzähler.**

In der chinesischen Provinz Sechuan wird in den nächsten Jahren ebenfalls eine Verglasungsanlage für hochradioaktive nukleare Abfalllösungen errichtet. Die Anlage soll einen Beitrag zum Umweltschutz liefern, dem in China zunehmend Bedeutung beigemessen wird. Das zuständige Ministerium der Volksrepublik China hat sich inzwischen nach mehrjährigen Verhandlungen mit britischen, französischen, amerikanischen und deutschen Anbietern für deutsche Technologie entschieden. Das Verfahren basiert auf der im INE entwickelten Verglasungstechnologie und auf der zugehörigen Glas-Chemie. Im Juli 2009 wurde der Vertrag zur dortigen Errichtung einer Verglasungsanlage unterzeichnet.

In diesem gemeinsamen chino-deutschen Projekt liefert ein deutsches Konsortium Planungsleistungen und wesentliche Komponenten in Kernbereichen der Anlagentechnik. Die Nutzung der KIT-Technologie ist über ein Lizenzabkommen geregelt. KIT-INE ist als „Nominated Subcontractor“ in Planungsleistungen der Hauptprozesstechnik eingebunden.

Strahlenforschung

Die Leitstelle Inkorporationsüberwachung des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) unterstützt die behördlich bestimmten Messstellen bei der Qualitätssicherung durch jährlich angebotene Ringversuche. Nach § 41 (8) Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) sind die Messstellen verpflichtet, im Zuge ihrer Qualitätssicherung an diesen Ringversuchen teilzunehmen. Ringversuche sind Vergleichsmessungen, bei denen identische Proben definierter Aktivität von verschiedenen Messstellen gemessen und die Ergebnisse verglichen werden. Gleichzeitig bietet der Ringversuch den Messstellen die Möglichkeit, die Anlagen zu überprüfen. Das In-vivo-Messlabor des Instituts für Strahlenforschung nimmt regelmäßig an den BfS-Ringversuchen teil. Die Aufgabe des Ringversuches 2009 bestand aus drei Teilen:

■ **Messungen am Ziegelphantom Olga,** das aus quaderförmigen Polyethylen-Ziegeln besteht (Bild 8). Diese Ziegel haben Löcher, in die Stabquellen definierter Aktivität eingesetzt werden können. So ist es möglich, Probanden mit unterschiedlichem Körpergewicht und unterschiedlicher Größe zu simulieren. Auf diese Weise wurde eine aus Kunststoffziegeln zusammengesetzte „künstliche Person“ vermessen, die

²²⁾ HHF: High Heat Flux

mit einer nur dem BfS bekannten Aktivität dotiert wurde.

- Messung eines Schilddrüsenphantoms,
- Messung der Begleitperson.

Darüber hinaus wurde eine vergleichende Messung des Kalium-40-Gehaltes einer die Messungen begleitenden Person durchgeführt.

Die Ergebnisse des BfS-Ringversuches zeigen, dass das In-vivo-Messlabor mit seinen Messergebnissen, die je nach Nuklid nur Abweichungen von 1 bis 11 % aufweisen, hervorragend abschneidet. Der Akzeptanzbereich für die Ergebnisse der Messstellen darf Abweichungen von -25 bis +50 % der Aktivität der Proben nicht überschreiten.

FZJ-Highlights

Am Institut für Energieforschung des Forschungszentrums Jülich (FZJ) wird im Teilinstitut für Nukleare Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (IEF-6) an relevanten Aspekten zur Sicherheit der Entsorgung von Brennelementen und kerntechnischen Anlagen geforscht. Die Teilbereiche der nuklearen Entsorgung, des nuklearen Brennstoffkreislaufes und der Sicherheitsforschung für kerntechnische Anlagen sind nicht nur mit moderner experimenteller Ausrüstung, sondern auch mit Simulationswerkzeugen ausgestattet, um einzelne Prozesse und das Verhalten nuklearer Komponenten unter Endlagerbedingungen und bei Störfällen besser zu verstehen und zu beherrschen.

Simulation in der Kerntechnik

Unter Einsatz parallelisierter Monte-Carlo-Programme wurden am IEF-6 mit dem FZJ-High-Performance-Computer hochdimensionale Modelle für die komplexen Kernkonfigurationen heutiger und künftiger Leichtwasserreaktoren entwickelt (MC-Burn). Diese Modelle wurden im europäischen Vergleichstest „New-Fuel-LWR-Benchmark“ verifiziert und darüber hinaus zusätzlich anhand eines Bestrahlungsexperiments im Kernkraftwerk Obrigheim, an dem mehrere EU-Staaten unter Leitung der IEF-6-Abteilung Simulation beteiligt sind. Hierfür wurden Multiscale-Modelle erstellt und diese anschließend zur Untersuchung des Abbrand- und Transmutationsverhaltens sowie der Sicherheits-eigenschaften innovativer LWR-Technik beim Einsatz von Mischoxid-Brennstoffen²³⁾, neuartigen Inert-Matrix-Brennstoffen²⁴⁾ und Thorium-basierten



Bild 9

Korrodiert NBG-17-Block des Nacok-Experiments (24,3 Gew.-% Abbrand).

Brennstoffen eingesetzt. Darüber hinaus wurden auf Basis der Multi-Scale-Modelle auch erste Simulationen zum Transmutationsverhalten langlebiger Transurane in unterkritischen ADS-Systemen durchgeführt. Parallel dazu wurde auf der Grundlage eines Gesamtmodells des Fusionsreaktors Iter eine HPC-Plattform²⁵⁾ bzw. -Methode zur Simulation und Visualisierung des Neutronen- und Strahlenfeldes für die Strukturen dieser Anlage entwickelt und eingesetzt.

Containmentphänomene und -prozesse

Im Zuge des EU-Projekts Raphael²⁶⁾ wurde in den 1990er Jahren das Nacok-Experiment²⁷⁾ aufgebaut und seitdem erfolgreich genutzt. Das Experiment dient der Simulation des Ablaufes und der Folgen eines Lufteinbruchs in den Heliumkühlkreislauf eines Hochtemperaturreaktors (HTR). Im jüngsten Experiment wurden Graphitblöcke mit Hilfe des Kamineffekts oxidiert.

Bild 9 zeigt einen der NBG-17-Blöcke mit einem Abbrand von 24,3 Gew.-% in mehreren Ansichten. Die Strömung der eindringenden Luft war im Experiment wie bei einem Lufteinbruchstörfall von unten nach oben gerichtet. Daher ist die Blockunterseite am stärksten korrodiert. Die Strömungskanäle sind durch die Korrosionseffekte im unteren Bereich sehr erweitert und die Wanddicken beträchtlich verringert. Im rechten Bild ist zu erkennen, dass der Block auf zwei Seiten nur noch durch einen schmalen Rand gestützt wird. Dennoch ist die Struktur nicht in sich zusammengebrochen. Sie ist zwar geschwächt, aber noch tragfähig.

Endlagersicherheit

Im Hinblick auf die langen Zeiträume bei der Endlagerung nuklearer Abfälle in tiefen geologischen Formationen kann ein Kontakt zwischen dem Abfall und Formationswässern nicht ausgeschlossen werden. Schwerpunktmaßig wurde bisher das Verhalten von bestrahlten Forschungsreaktorkennstoffen aus metallischem Uran-Aluminium und Uransilizid-Aluminium als Dispersionsbrennstoff in diesen Wässern in Gegenwart von Eisen – also dem Material der Brennelementbehälter – in einer Heiß-

zellenanlage untersucht. Das Ziel dieser Aktivitäten besteht darin, einen Quellterm für das Nahfeld eines Endlagersystems zu finden. Das Korrosionsverhalten beider Brennstofftypen ist vergleichbar, und im Hinblick auf die zu betrachtenden Zeiträume der Endlagerung kann von einer spontanen Auflösung in allen untersuchten Formationswässern ausgegangen werden.

In Salzlauge ($MgCl_2$ -reiche Lauge) wurden mit $7,69 \cdot 10^{-3} g/m^2 \cdot d$ für eine Probe aus UAl_x -Al und mit $4,24 \cdot 10^{-3} g/m^2 \cdot d$ für eine Probe aus U_3Si_2 -Al die höchsten Korrosionsraten erreicht. Für schwächer mineralhaltige Lösungen, die für Opalinus-Tonporenwasser und Wasser aus kristallinem Gestein (Äspö) repräsentativ sind, wurden für diese Probentypen Korrosionsraten von $1,05 \cdot 10^{-3} g/m^2 \cdot d$ (UAl_x -Al) und $6,93 \cdot 10^{-3} g/m^2 \cdot d$ (U_3Si_2 -Al) ermittelt. Durch Brennelementkorrosion werden zwei Prozesse hervorgerufen. Zum einen werden die Radionuklide mobilisiert, und zum anderen kommt es zur Bildung von sekundären Phasen, die einen Teil der anfänglich mobilisierten Radionuklide wieder immobilisieren. Die Einteilung zwischen mobilen und immobilen Radionukliden nach vollständiger Korrosion der Brennelementprobe zeigte in allen Wässern und für beide Brennstofftypen eine bestimmte Tendenz: Das gesamte im Brennstoff enthaltene Inventar an Tritium, Cäsium-134/-137 und Strontium-90 liegt in der Lösung vor. Aluminium, Silizium und Uran sind quantitativ, Plutonium, Americium und Europium sind vorwiegend in den sekundären Phasen vorhanden. Um die molekularen Wechselwirkungen von Radionukliden mit den sekundären Phasen zu verstehen, wurde eine Korngrößenfraktionierung und Identifizierung mit-

²³⁾ Mox: Mischoxid-Brennelemente aus Uran und Plutonium

²⁴⁾ IMF: Inert Matrix Fuel

²⁵⁾ HPC: High Performance Computer

²⁶⁾ Raphael: Reactor for process heat, hydrogen and electricity generation

²⁷⁾ Nacok: Naturzug im Core mit Korrosion

tels Rasterelektronenmikroskop (REM) in Verbindung mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) und Röntgenbeugungsanalyse (XRD) von sekundären Phasen, die in Auslaugversuchen mit unbestrahlten Brennstoffproben in $MgCl_2$ -reicher Lauge entstanden sind, durchgeführt. In der Korngrößenfraktion kleiner 2 µm wurde als Hauptkomponente ein Lesuitk identifiziert. In der Korngrößenfraktion größer 2 µm lag als Hauptkomponente eine Mg-Al-Doppelhydroxidverbindung vor. Es ist nicht auszuschließen, dass in dieser Fraktion Uranit und eine Eisen-II/Eisen-III-Doppelhydroxidverbindung (Green Rust) vorhanden sind. Detaillierte Untersuchungen zur Identifizierung und Quantifizierung der Phasenbestandteile werden gegenwärtig zu Ende gebracht und die gewonnenen Erfahrungen auf oxidische Kernbrennstoffe aus Leistungsreaktoren angewandt.

FZD-Highlights

Am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD) stehen leistungsfähige personelle und materielle Potenziale zur Verfügung, die im Rahmen des Kompetenzzentrums Ost des Kompetenzverbundes Kerntechnik einen Beitrag zur nuklearen Sicherheits- und Entsorgungsforschung und zum Know-how-Erhalt in Deutschland leisten. In Dresden-Rossendorf werden gegenwärtig Arbeiten auf den Gebieten Material- und Komponentensicherheit, Thermo-hydraulik, Reaktordynamik und Störfallanalyse von Kernreaktoren durchgeführt. Einen breiten Raum nehmen auch radioökologische Arbeiten im Zusammenhang mit den Altlasten des Uranerzbergbaus in Ostdeutschland und die radiochemische Entsorgungsforschung ein. Der Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e.V. ist dafür zuständig, die am Standort Rossendorf ab 1957 errichteten kerntechnischen Anlagen stillzulegen, abzubauen und zu entsorgen, und ist darüber hinaus zunehmend als kerntechnisch/analytischer Dienstleister tätig.

Tomographie von Zweiphasenströmungen

Die experimentelle Untersuchung von Zweiphasenströmungen erfordert möglichst berührungslos arbeitende Bildgebungsverfahren, die in der Lage sind, Strömungsstrukturen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung abzubilden und Informationen über die Struktur der Phasengrenzflächen zu liefern, die maßgeblich den Wärme- und Stoffaustausch in der Strömung bestimmt.

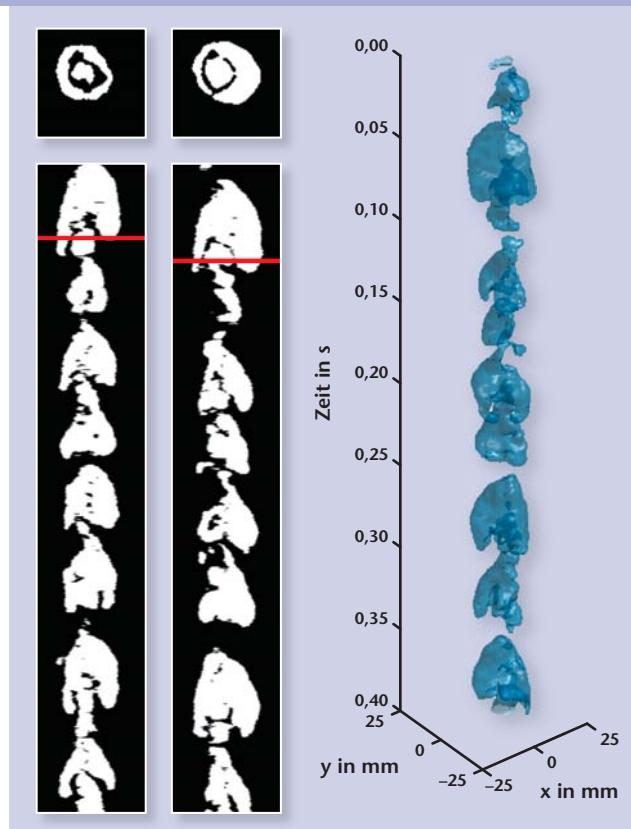


Bild 10

Rekonstruierte Phasenverteilung in einer aufwärts gerichteten Wasser-Luft-Strömung in einem Rohr. Quer- und Axialschnitte aus zwei Tomographie-Ebenen (links) und 3D-Darstellung der zeitlichen Änderung der Phasenverteilung in einer der Ebenen (rechts).

Dies ist mit der ultraschnellen Röntgen-Computertomographie auf der Basis eines Elektronenstrahls möglich. Mit dieser Technik wurden erstmals Phasenverteilungen in einer schnellen Wasser-Gas-Strömung mit Bildraten von bis zu 10000 s^{-1} und einer räumlichen Auflösung von rund 1 mm visualisiert. Die Methode konnte zur Zweiebenen-tomographie ausgebaut werden (Bild 10), bei der quasi gleichzeitig Schnittbilder der Strömung aus zwei übereinanderliegenden Abbildungsebenen gewonnen werden. Durch Anwendung von Kreuzkorrelationsalgorithmen auf diese Bilddaten kann die lokale Strömungsgeschwindigkeit der dispersen Phase bestimmt werden, deren Kenntnis für eine exakte Vermessung der Einzelblasenphasenvolumina erforderlich ist. In einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt wurden zur genauen Bestimmung der Phasengrenzflächen angepasste Bildrekonstruktionsverfahren auf Basis der Level-Set-Methode entwickelt, die eine Rekonstruktion der Phasengrenzflächen aus den Messdaten ermöglichen.

Transmutation langlebiger Radionuklide

Die Radiotoxizität abgebrannter Brennelemente wird von Plutonium und anderen langlebigen minoren Aktiniden dominiert. Reaktorsysteme der vierten Generation (Gen-IV) sollen die Menge endzulagernder langlebiger Abfälle durch geschlossene Brennstoffzyklen minimieren. Die Transmutationsfähigkeit hängt wesentlich vom verwendeten Neutronenspektrum ab. In einem schnellen

Spektrum können Plutonium und minore Aktinide gespalten und energetisch genutzt werden. Zur Entwicklung von Gen-IV-Systemen und ADS-basierten Transmutationsanlagen werden präzise Wirkungsquerschnitte von Reaktionen mit schnellen Neutronen benötigt. Dazu ist insbesondere die inelastische Streuung an Strukturmaterialien und die Spaltung minorer Aktiniden mit einer typischen Unsicherheit von 5 % zu untersuchen. Der Elektronenstrahl des supraleitenden Elektronen-Linear-Beschleunigers (Elbe) erzeugt in einem Radiator aus flüssigem Blei kurze, intensive Pulse schneller Neutronen. Der Energiebereich dieser Neutronen stimmt gut mit dem Spektrum schneller Neutronen aus der Kernspaltung überein. Die Photoneutronenquelle „NElbe“ ist Mitglied des Efudat-Konsortiums²⁸⁾ [18]. An ihr wird die inelastische Streuung von Neutronen an Reaktorstrukturmaterialien untersucht, zum Beispiel an Fe-56. Dazu wird im Experiment die Flugzeit der einlaufenden Neutronen sowie die Flugzeit der gestreuten Neutronen in Koinzidenz gemessen. Dadurch können verschiedene angeregte Kernzustände im Target experimentell aufgelöst werden. Messungen der neutroneninduzierten Spaltquerschnitte verschiedener Aktiniden sind in Vorbereitung. Das Forschungsvorhaben wird durch ein BMBF-Verbundprojekt im Zuge der Initiative „Grundlagenforschung Energieforschung 2020+“ unterstützt.

²⁸⁾ Efudat: European Facilities for Nuclear Data

Radioökologische Forschung

Ziel der Forschungen ist es, zum besseren Verständnis des Verhaltens von Aktiniden und langlebigen Radionukliden in der Umwelt beizutragen. Das Migrationsverhalten dieser radioaktiven Metalle in Geo- und Biosystemen wird wesentlich von der Bindungsform bestimmt. Mikroben, die in geologischen Formationen und im Grundwasser weltweit verbreitet vorkommen, können die Radionuklidmigration auch in Barrièresystemen nuklearer Endlager durch eine Vielzahl von Prozessen beeinflussen, zum Beispiel durch mikrobielle induzierte Biosorption, Bioakkumulation, Biotransformation oder Bioreduktion. Daraus sind Kenntnisse der mikrobiellen Diversität in geologischen Formationen und im Grundwasser notwendig. Nach dem derzeitigen Stand sind die Kenntnisse zur mikrobiellen Diversität in Endlagerformationen für nuklearen Abfall und besonders für Tone nur sehr begrenzt. Eine potentielle Formation für eine Lagerung nuklearer Abfälle ist der Opalinus-Ton, der im Mont Terri Rock Laboratory in der Schweiz auf seine Endlagereignung hin untersucht wird. Das Ziel der Arbeiten am FZD besteht darin,

Kenntnisse zur mikrobiellen Diversität im Opalinus-Tongestein durch direkte molekular-biologische Methoden zu erhalten und den Einfluss identifizierter dominierender Bakterienpopulationen nach der Kultivierung entsprechender Isolate auf das geochemische Verhalten der Aktiniden in diesem Tongestein zu untersuchen. Bisher konnten Bakterien der Klassen Clostridia und Bacilli isoliert werden. Um nähere Informationen zur mikrobiellen Diversität im Opalinus-Ton zu erhalten, sind aber noch weitere Untersuchungen notwendig. Im Anschluss daran sollen Wechselwirkungen der kultivierten Bakterien mit Aktiniden untersucht werden.

Fazit und Ausblick

Die Kernenergie wird nach Umsetzung und Abschluss der ersten Neubauprogramme der einzelnen Staaten in den 1980er- und 1990er-Jahren jetzt wieder als eine zukunftsfähige Komponente im Energiemix mit einem zusätzlichen Bedarf an neuen Kapazitäten gesehen. Verfügbarkeit und Planungssicherheit für den Einsatz der Anlagen, mittel- und langfristig absehbare Kosten, Stabilität bei der Brennstoffversorgung und die

nahezu CO₂-freie Produktion sind wichtige treibende Faktoren. Die aktuellen Turbulenzen auf den weltweiten Finanzmärkten mit ihren Folgen für die Weltwirtschaft haben sich nicht merklich auf die angestoßenen rund 200 Kernkraftwerksneubauplanungen ausgewirkt. In diesen Planungen spielen eher Langfristaspekte eine Rolle, die unter anderem von technisch möglichen Betriebszeiten sowohl bestehender, laufender Anlagen als auch von Neuanlagen getragen werden. 60 Jahre werden technisch und sicherheitstechnisch als aktueller Maßstab gesehen und sind inzwischen auch für mehrere Dutzend Kernkraftwerksblöcke weltweit durch Genehmigungsverfahren bestätigt; darüber hinaus sind technische Betriebszeiten von 80 Jahren in der Diskussion. Experten sehen die Kernenergie bei Rohölpreisen jenseits von 50 bis 60 US-\$ als bevorzugten wirtschaftlich konkurrenzfähigen und überlegenen Energieträger in der Stromerzeugung, und dies ohne jegliche Berücksichtigung von CO₂-Emissionsabgaben. International wird Kernenergie zusammen mit anderen CO₂-armen Energieträgern als Komponente für Maßnahmen zum Klimaschutz und einer nachhaltigen Energieversorgung gesehen.

Literatur

- [1] Weßelmann, C.; Tromm, W.; Linnemann, Th.; Koch, M. K.: *Kernenergie*. BWK 61 (2009), Nr. 4, S. 88-104.
- [2] Accenture Multinational Nuclear Power Pulse Survey 2009. www.accenture.com
- [3] Büdenbender, M.: Der Atomausstieg in Deutschland, ein zukunftsfähiger Sonderweg im europäischen Kontext? atw 54 (2009) Nr. 10, S. 616-627.
- [4] www.bfs.de
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Meldepflichtige Ereignisse in Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland, Atomkraftwerke und Forschungsreaktoren, deren Höchstleistung 50 kW thermische Dauerleistung überschreitet. Jahresbericht 2008. Bonn, 2009.
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Meldepflichtige Ereignisse in Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland, Atomkraftwerke und Forschungsreaktoren, deren Höchstleistung 50 kW thermische Dauerleistung überschreitet. Viertel-jahresbericht, erstes Quartal 2009. Bonn, 2009.
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Meldepflichtige Ereignisse in Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland, Atomkraftwerke und Forschungsreaktoren, deren Höchstleistung 50 kW thermische Dauerleistung überschreitet. Viertel-jahresbericht, zweites Quartal 2009. Bonn, 2009.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Meldepflichtige Ereignisse in Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland, Atomkraftwerke und Forschungsreaktoren, deren Höchstleistung 50 kW thermische Dauerleistung überschreitet. Viertel-jahresbericht, drittes Quartal 2009. Bonn, 2009.
- [9] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Meldepflichtige Ereignisse in Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen in der Bundesrepublik Deutschland, Atomkraftwerke und Forschungsreaktoren, deren Höchstleistung 50 kW thermische Dauerleistung überschreitet. Viertel-jahresbericht, vierter Quartal 2009. Bonn, 2009.
- [10] Versorgungssicherheit – Eine Frage von Leistung und Arbeit. BWK 61 (2009) Nr. 3, S. 19.
- [11] Frondel, M.; Ritter, N.; Schmidt, C. M.: Deutschlands Energieversorgungsrisiko gestern, heute, morgen. Zeitschrift für Energiewirtschaft 33(2009), Nr. 1, S. 42-48.
- [12] Schiffer, H.-W.: Deutscher Energiemarkt 2009. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 60 (2009) Nr. 3, S. 76-88, und entsprechende Veröffentlichungen des Autors in den Vorjahren.
- [13] Hundt, M.; Barth, R.; Sun, N.; Wissel, S.; Voß, A.: Verträglichkeit von erneuerbaren Energien und Kernenergie im Erzeugungsportfolio – technische und ökonomische Aspekte. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Stuttgart, 2009. www.ier.uni-stuttgart.de
- [14] Hundt, M.; Barth, R.; Sun, N.; Wissel, S.; Voß, A.: Hemmschuh für den Ausbau Erneuerbarer? Auswirkungen einer Laufzeitverlängerung für Kernkraftwerke. BWK 61 (2009) Nr. 11, S. 49-53.
- [15] Cramer, B.; Andrleit, H. et al.: Energierohstoffe 2009: Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit. Erdöl, Erdgas, Kohle, Kernbrennstoffe, Geothermische Energie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2009. www.bgr.bund.de
- [16] Red Book: Uranium 2007. Resources, Production and Demand 2007. Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency (NEA) and the International Atomic Energy Agency (IAEA), Paris, 2008.
- [17] Seidel, A.; Mohrbach, L.: Kompetenzerhaltung und Hochschulkopplung. Initiativen der deutschen Kernkraftwerksbetreiber für Know-how- und Kompetenzerhaltung. atw 54 (2009) Nr. 6, S. 373-378.
- [18] www.efrudat.eu

Titelseite: Blick in einen für Revisionsarbeiten geöffneten Reaktorkern eines der zwei Siedewasserreaktorblöcke am Kernkraftwerkstandort Gundremmingen. Mehr als 21,7 TWh elektrischer Energie haben die beiden 1344-MW-Blöcke Gundremmingen-B (10,9 TWh) und Gundremmingen-C (10,8 TWh) im Jubiläumsjahr 2009 erzeugt. Dies ist ein neuer Rekord in der 25-jährigen Betriebsgeschichte des Kernkraftwerkstandortes Gundremmingen. Im Jahr 2010 ging es gleich mit zwei Rekordmarken weiter. Block B überschritt am 18. Januar als erster Siedewasserreaktor der Welt die kumulierte Stromerzeugungsgröße von 250 TWh, und der Kernkraftwerkstandort hat im Januar 2010 mit einer Stromproduktion pro Block von jeweils mehr als 1 TWh das beste Monatsergebnis aller Zeiten erzielt.

Bild: RWE