

Renaissance der Kernenergie?

Analyse der Bedingungen für den weltweiten Ausbau der Kernenergie gemäß den Plänen der Nuklearindustrie und den verschiedenen Szenarien der Nuklearenergieagentur der OECD

Im Auftrag des
Bundesamts für
Strahlenschutz

Matthias Deutsch, PhD
Jens Hobohm
Leonard Krampe
Stefan Mellahn
Vincent Rits
Christian Seidel

Berlin/Basel
im September 2009
23-26888

Das Unternehmen im Überblick

Geschäftsführender Gesellschafter

Christian Böllhoff

Präsident des Verwaltungsrates

Gunter Blickle

Basel Stadt Hauptregister CH – 270.3.003.262-6

Rechtsform

Aktiengesellschaft nach schweizerischem Recht

Gründungsjahr

1959

Tätigkeit

Prognos berät europaweit Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik. Auf Basis neutraler Analysen und fundierter Prognosen werden praxisnahe Entscheidungsgrundlagen und Zukunftsstrategien für Unternehmen, öffentliche Auftraggeber und internationale Organisationen entwickelt.

Arbeitssprachen

Deutsch, Englisch, Französisch

Hauptsitz

Prognos AG
Henric Petri-Strasse 9
CH - 4010 Basel
Telefon +41 61 32 73-200
Telefax +41 61 32 73-300
info@prognos.com

Weitere Standorte

Prognos AG
Goethestraße 85
D - 10623 Berlin
Telefon +49 (0)30 520059-200
Telefax +49 (0)30 520059-201

Prognos AG
Wilhelm-Herbst-Straße 5
D - 28359 Bremen
Telefon +49 (0)421 2015-784
Telefax +49 (0)421 2015-789

Prognos AG
Schwanenmarkt 21
D - 40213 Düsseldorf
Telefon +49 (0)211 887-3131
Telefax +49 (0)211 887-3141

Prognos AG
Sonnenstraße 14
D - 80331 München
Telefon +49 (0)89 515146-170
Telefax +49 (0)89 515146-171

Prognos AG
Friedrichstraße 15
D - 70174 Stuttgart
Telefon +49 (0)711 2194-245
Telefax +49 (0)711 2194-219

Prognos AG
Avenue des Arts, 39
B - 1040 Brüssel
Telefon +32 2 51322-27
Telefax +32 2 50277-03

Internet

www.prognos.com

Kurzfassung

Ziel:

In vielen Staaten der Welt wächst derzeit das Interesse an der Kernenergie. Die vorliegende Studie verfolgt das Ziel, eine realistische Einschätzung der künftigen weltweiten Nutzung der Kernenergie bis zum Jahr 2030 vorzunehmen. Dabei wird die Frage beantwortet, ob es voraussichtlich zu einer Renaissance ihrer Nutzung kommen wird.

Vorgehensweise:

Nach einem Überblick über den gegenwärtigen Status und die Historie der weltweiten Kernenergienutzung stellen wir internationale Szenarien der Kernenergienutzung einander gegenüber und betrachten die Ankündigungen weltweiter Reaktorneubauten. Die derzeit von der IAEA als „in Bau“ genannten Kraftwerksprojekte werden hinsichtlich ihrer Fertigstellungswahrscheinlichkeit im Betrachtungszeitraum bewertet. Kern der Untersuchung ist die Bewertung der Ankündigungen von Kernkraftwerks-Neubauten vor dem Hintergrund dargestellter Herausforderungen u. a. in den Bereichen Infrastruktur, Brennstoffversorgung und Finanzierung. Wir bewerten die jeweiligen Ankündigungen eines Landes mit Hilfe eines indikatorgestützten Verfahrens, welches die politische Stabilität und die Erfahrungen dieses Landes mit Reaktorneubauten, seine Kreditwürdigkeit, die Umsetzungschancen im Umfeld des jeweiligen Energiemarkts sowie das begrenzte globale Angebot an Reaktordruckgefäßen und die gegenwärtige Weltwirtschaftskrise berücksichtigt.

Ergebnisse:

Wir erwarten bis zum Jahr 2030 keine Renaissance der Kernenergienutzung. Vielmehr werden die altersbedingten Abschaltungen dazu führen, dass die Zahl der Reaktoren, die installierte Leistung und die Stromerzeugung in Kernkraftwerken deutlich zurückgeht. Bis zum Jahr 2020 reduziert sich die Zahl der weltweit betriebenen Kernkraftwerke voraussichtlich um 22 %, bis zum Jahr 2030 um ca. 29 % gegenüber dem Ausgangsniveau im März 2009. Trotz einer Zunahme der Neubauaktivität von Kernkraftwerken verglichen mit den letzten 10 Jahren wird das Niveau des Baubooms der 1970er/80er-Jahre nicht erreicht. Es gibt eine Zunahme der Ankündigungen von Kernkraftwerken. Allerdings existierten in der Vergangenheit vor allem in den USA, aber auch in anderen Ländern bereits ambitionierte Ausbaupläne, die später nicht realisiert wurden. Wir erwarten, dass etwa 23 % der von der in Deutschland erscheinenden Internationalen Zeitschrift für Kernenergie ATW für die Zeit bis 2020 angekündigten Neubauprojekte und rund 35 % der vom Internationalen Verband der Kernenergie (WNA) für die Zeit bis 2030 angekündigten Neubauprojekte realisiert werden. Unsere Bewertung wird besonders von den gewählten Annahmen zur erreichbaren Laufzeit der bestehenden Kernkraftwerke und zu den Realisierungsgraden der Planungen von China, Russland, den USA, Indien und Japan beeinflusst.

Abstract

Objective: Many countries have recently expressed a growing interest in nuclear energy. This study aims at providing a realistic outlook of the probable worldwide future use of nuclear energy until the year 2030. We answer the question whether nuclear energy is likely to undergo a renaissance in the future.

Methodic approach:

After briefly surveying the current status and the history of the worldwide use of nuclear energy, we present international scenarios of nuclear energy use, as well as announcements of new nuclear reactors. The list of reactors officially rated as "under construction" by IAEA is critically evaluated. At the core of our analysis is the evaluation of announcements of new reactors in view of challenges with regard to infrastructure, fuel supply, financing and other possible barriers. We assess each country's announcements by means of an indicator-based method that considers a country's political stability and its practical experience with reactor-building, its credit rating, the chances of realization in the context of the respective energy market, the limited global supply of reactor pressure vessels, and the current world economic crisis.

Results:

We do not expect a renaissance of the use of nuclear energy until the year 2030. Instead, shutdowns of aged plants will lead to a decrease in the total number of plants, installed capacity and electricity generation from nuclear power plants. Until the year 2020, the number of reactors in operation worldwide is likely to decrease by 22 %; until the year 2030 by about 29 % relative to the reference level of March 2009.

In spite of an increase in construction activity compared to construction in the last 10 years, the building boom of the 1970s/80s will not be reached again. Announcements for new reactor are currently increasing. However, ambitious announcements of the past – in particular in the USA, but in other countries as well – have subsequently not materialized. We expect that about 23 % of all the projects announced by the German "International Journal for Nuclear Power" ATW for the time until 2020 will be realized, and that about 35 % of the projects announced by the World Nuclear Association (WNA) for the time until 2030 will be realized. The development path we consider to be realistic specifically depends on the chosen assumptions regarding the remaining lifetime of existing nuclear reactors and the extent to which the announcements of China, Russia, the USA, India and Japan will materialize.

Inhalt

Zusammenfassung	9
1 Aufgabenstellung und Vorgehen	13
2 Status-quo und Historie der Kernenergienutzung	16
2.1 Entwicklung und Status quo der Nutzung	16
2.2 Historische Erfahrungen aus Laufzeiten stillgelegter Kernkraftwerke	21
2.3 Historische Pläne zum Kernenergieausbau und was daraus wurde	24
2.4 Erfahrungen aus Bauprojekten der Vergangenheit	27
3 Ausbauszenarien und Ankündigungen für Kernkraftwerke im Vergleich	31
3.1 Ausbauszenarien der Kernenergie im Vergleich	31
3.2 Planungen und Vorschläge weltweit laut WNA	32
3.3 Planungen und Vorplanungen weltweit laut ATW	34
3.4 Analyse der IAEA-Baustatistik	36
4 Herausforderungen für die Kernenergienutzung	38
4.1 Industrielle Infrastruktur	38
4.2 Brennstoffversorgung	47
4.3 Entwicklungen in den Energiemärkten	50
4.4 Finanzierungsfragen	52
4.5 Sonstige Herausforderungen	60
4.6 Zwischenfazit	61
5 Diskussion eines realistischen Entwicklungspfads der Kernenergie und Fazit	63
5.1 Realisierung von Ankündigungen	64
5.2 Entwicklungspfad	71
5.3 Fazit	77
6 Literaturverzeichnis	78
7 Anhang	90
7.1 Fallstudien zum Kernenergie-Ausbau	90
7.1.1 China	90
7.1.2 USA	91
7.1.3 Indien	94
7.1.4 Russland	96
7.1.5 Frankreich	98
7.2 Analyse der möglichen Neueinsteiger	101
7.3 Tabellenanhang	107
7.4 Methodik	113
7.4.1 Ausgangsdaten	113
7.4.2 Überprüfung von Daten	114
7.4.3 Datenabgleich	114
7.4.4 Annahmen	115
7.5 Abkürzungsverzeichnis	118

Abbildungen

Abbildung 1:	Anzahl der Reaktoren in Betrieb weltweit von 1950 bis 2009	16
Abbildung 2:	Anzahl der Reaktor-Inbetriebnahmen pro Jahr weltweit von 1950 bis 2009	17
Abbildung 3:	Anzahl der Reaktoren in Betrieb weltweit im Jahr 2009	18
Abbildung 4:	Anzahl der Reaktoren in Betrieb nach Reaktortypen weltweit im Jahr 2009	20
Abbildung 5:	Altersverteilung der Reaktoren in Betrieb weltweit im Jahr 2009	21
Abbildung 6:	Betriebsdauer-Verteilung der stillgelegten Reaktoren weltweit	23
Abbildung 7:	Anzahl der in den 1980er-Jahren geplanten Reaktoren in ausgewählten Ländern	25
Abbildung 8:	Anzahl der Reaktoren in Bau weltweit von 1950 bis 2009	28
Abbildung 9:	Baubeginn und Bauzeit von Reaktoren in Betrieb in Amerika und Europa	29
Abbildung 10:	Baubeginn und Bauzeit von Reaktoren in Betrieb in Asien	30
Abbildung 11:	Vergleich der Ausbauszenarien von OECD-NEA, EIA, IAEA und IEA bis zum Jahr 2030	32
Abbildung 12:	Anzahl der Reaktor-Neubauten bis zum Jahr 2030 nach IAEA und WNA	33
Abbildung 13:	Bruttoleistung der Reaktor-Neubauten bis zum Jahr 2030 nach IAEA und WNA in GW	34
Abbildung 14:	Anzahl der Reaktoren in Betrieb bis zum Jahr 2020 nach IAEA und ATW	35
Abbildung 15:	Bruttoleistung der Reaktoren in Betrieb bis zum Jahr 2020 nach IAEA und ATW in GW	36
Abbildung 16:	Entwicklung der Marktstruktur im Bereich der Hersteller von Kernkraftwerken, Stand: 2007	39
Abbildung 17:	Merit Order des deutschen Kraftwerkparks	51
Abbildung 18:	Zusammenfassung der Herausforderungen beim Neubau von Kernkraftwerken	62
Abbildung 19:	Ableitung des realistischen Entwicklungspfades der Kernenergienutzung	71

Abbildung 20:	Realistischer Entwicklungspfad der Kernenergienutzung weltweit bis 2030 – Anzahl der Reaktoren	72
Abbildung 21:	Realistischer Entwicklungspfad der Kernenergienutzung weltweit bis 2030 – Bruttoleistung	73
Abbildung 22:	Realistischer Entwicklungspfad der Kernenergienutzung weltweit bis 2030 – Reaktoren in Bau	74
Abbildung 23:	Vergleich der Ausbauszenarien 2020/2030 und Prognos' Entwicklungspfad	76
Abbildung 24:	Indische Kraftwerksplanung bis zum Jahr 2014	96
Abbildung 25:	Methode des Datenabgleichs zwischen IAEA und WNA	114

Tabellen

Tabelle 1:	Bruttoleistung der Reaktoren in Betrieb weltweit im Jahr 2009	19
Tabelle 2:	Baustatistik der IAEA und Klassifizierung des Baufortschritts im Jahr 2009	37
Tabelle 3:	Angestrebte Kapazitäten ausgewählter Hersteller von Kernkraftwerken	40
Tabelle 4:	Personalbedarf für Bau, Inbetriebnahme und Betrieb eines Kernkraftwerkes	44
Tabelle 5:	Baukosten von Kernkraftwerken	53
Tabelle 6:	Indikatoren-Bewertung der Ausbauplanungen der Länder	70
Tabelle 7:	Mögliche Neueinsteiger in die Kernenergienutzung	102
Tabelle 8:	Anzahl der Reaktoren in Betrieb weltweit nach Ländern und Reaktortypen im Jahr 2009	107
Tabelle 9:	Bruttoleistung der Reaktoren in Betrieb weltweit nach Ländern und Reaktortypen im Jahr 2009 in MW	108
Tabelle 10:	Betriebsdauer der Reaktoren in Betrieb weltweit	109
Tabelle 11:	Bauzeiten der Reaktoren in Betrieb weltweit	110
Tabelle 12:	Betriebsdauer der bisher stillgelegten Reaktoren weltweit	111
Tabelle 13:	In Bau befindliche Reaktoren, deren Bau stagniert im Jahr 2009	112
Tabelle 14:	Annahmen zur Gesamtlaufzeit der gegenwärtig betriebenen Reaktoren	115
Tabelle 15:	Annahmen zur Bauzeit nach Ländern	116
Tabelle 16:	Bereinigung der aggregierten Länderdaten der WNA um blockscharfe WNA-Daten	117

Zusammenfassung

(1) In der öffentlichen Debatte um die Nutzung der Kernenergie wird von einigen Seiten in zunehmendem Maße argumentiert, die Bundesrepublik befinde sich mit ihrer Entscheidung, aus der Nutzung der Kernenergie auszusteigen, auf einem "Sonderweg". Begründet wird dies damit, dass weltweit die Nutzung der Kernenergie wieder zunehme. Tatsächlich wächst ähnlich wie in den 60er-Jahren gegenwärtig in vielen Staaten der Welt das Interesse an der Kernenergie. Ein erheblicher Teil der in der Vergangenheit angekündigten Reaktorneubauten wurde allerdings später nie realisiert. Es stellt sich die Frage, ob es in den nächsten 20 Jahren zu einer **Renaissance** der Kernenergienutzung kommen könnte. Das Bundesamt für Strahlenschutz beauftragte im März 2009 die Prognos AG mit der vorliegenden Studie, in der diese Frage beantwortet wird.

(2) Weltweit waren im März des Jahres 2009 insgesamt 436 Kernkraftwerke mit einer installierten Bruttoleistung von 390 GW in **Betrieb** und damit 8 weniger als die 444 Reaktoren im Jahr 2002, dem bisherigen Höhepunkt der Kernenergienutzung. Diese 436 Kernkraftwerke wiesen ein **Durchschnittsalter** von 24 Jahren auf. Bereits stillgelegt wurden weltweit 123 Reaktoren mit einem Durchschnittsalter von rund 22 Jahren.

- 45 Kernkraftwerke werden von der IAEA im März 2009 als **im Bau** genannt, voraussichtlich 9 davon werden in den nächsten 2 Jahren fertiggestellt, bei 8 stagniert der Bau. Demnach ist die tatsächliche Bauaktivität auf 37 Projekte beschränkt. Rund 75 % dieser Projekte werden in Asien durchgeführt.
- Je nach Quelle schwankt die Zahl der darüber hinaus **angekündigten Kernkraftwerke** zwischen rund 210 bis zum Jahr 2020 (Internationale Zeitschrift für Kernenergie/ATW) bzw. etwa 380 bis 2030 (World Nuclear Association/WNA).
- Wir gehen davon aus, dass bis 2020 voraussichtlich 181 und bis 2030 weitere 119 Kernkraftwerke altersbedingt **außer Betrieb** genommen werden, also insgesamt 300 Reaktoren.

(3) Der **Neubau von Kernkraftwerken** steht vor folgenden **Herausforderungen**:

- Kernkraftwerke benötigen wegen ihrer langen Genehmigungs-, Bau- und Refinanzierungszeiten langfristig **stabile Rahmenbedingungen**. Längst nicht alle Staaten der Welt bieten eine Stabilität, die für eine kommerzielle Entwicklung der Kernenergie ausreicht.

- Kernkraftwerke sind komplexe technische Systeme, die maximale Anforderungen an die **Zuverlässigkeit von Herstellern, Betreibern und Aufsichtsbehörden** stellen. Der Aufbau von funktionsfähigen Strukturen und Prozessen kostet Zeit – insbesondere in Ländern, die neu in die Kernenergienutzung einsteigen wollen.
- Kernkraftwerke sind eine kapitalintensive Art der Stromerzeugung. Durch die globale **Finanzkrise** dürfte die **Finanzierung** von Kraftwerksprojekten erschwert sein.
- Sowohl bei den Herstellern von Kernkraftwerken als auch bei den Lieferanten für Komponenten existieren **begrenzte technische und personelle Kapazitäten**. Ein zentraler Engpass ist die Herstellung von sehr schweren Druckwassergefäßen, die z. B. für den Europäischen Druckwasserreaktor benötigt werden.
- Kernkraftwerke bekommen in Systemen mit schnell wachsenden Anteilen **erneuerbarer Energieträger** in der Stromerzeugung Konkurrenz. Hierdurch dürfte die Refinanzierung von Neubau-Kernkraftwerken erschwert werden.
- Die **Endlagerung** von hochradioaktiven Abfällen ist weltweit ungelöst.

All dies spricht dafür, dass deutlich **weniger** Kernkraftwerke neu gebaut werden und dass der Neubau **langsamer** verläuft als angekündigt.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Ankündigungen von Kernkraftwerks-Neubauten den relevanten Herausforderungen gegenübergestellt. Wir bewerten die jeweiligen Ankündigungen eines Landes mit Hilfe eines indikatorgestützten Verfahrens, welches die politische Stabilität und die Erfahrungen eines Landes mit Reaktorneubauten, seine Kreditwürdigkeit, die Umsetzungschancen im Umfeld des jeweiligen Energiemarkts sowie das begrenzte globale Angebot an Reaktordruckgefäßen und die Weltwirtschaftskrise berücksichtigt.

Der hieraus abgeleitete Entwicklungspfad steht unter der Voraussetzung, dass die von uns nicht quantifizierten Herausforderungen sich nicht zusätzlich negativ auf das Ergebnis auswirken.

(4) Vor diesem Hintergrund hält Prognos folgenden **Entwicklungspfad** der weltweiten Nutzung der Kernenergie für **realistisch**:

- Wir erwarten bis zum Jahr **2020** 86 Inbetriebnahmen neuer Kernkraftwerke, darunter die 37 im März 2009 schon im Bau befindlichen Reaktoren. Zwischen **2020 und 2030** könnten weitere 87 Kernkraftwerke ans Netz gehen, d. h. zwischen 2009 und 2030 insgesamt 173 neue Anlagen.
- Aufgrund der hohen altersbedingten Abgänge dürfte die **Zahl der Kernkraftwerke** somit von 436 (Stand: März 2009) auf 341 im Jahr 2020 (-22 %) zurückgehen. Nach einem leichten Zwischenanstieg sinkt sie dann voraussichtlich weiter und erreicht im Jahr 2030 ca. 309 Reaktoren, d. h. etwa 29 % weniger als im März 2009.
- Die **Gesamtleistung** der 2020 in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke liegt demnach voraussichtlich um etwa 15 % unter der heutigen (Stand: März 2009). Bis 2030 wird die installierte Leistung weiter sinken und liegt dann etwa 21 % unter dem Niveau von 2009. Allerdings ist die zukünftige Entwicklung der Leistung mit einer höheren Unsicherheit behaftet als die der Reaktoranzahl, weil die konkrete Dimensionierung eines angekündigten Reaktors in der Regel erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt und weil wir leistungsverändernde Maßnahmen im Reaktorbestand nicht berücksichtigen.
- Der von uns als realistisch eingeschätzte Entwicklungspfad wird besonders von den gewählten **Annahmen** zur **Gesamtlaufzeit** der bestehenden Kernkraftwerke und zu den Realisierungsgraden der Planungen von China, Russland, den USA, Indien und Japan beeinflusst. Die Ankündigungen dieser Länder repräsentieren in Summe bereits mehr als die Hälfte aller bekannten Ankündigungen.

(5) Für die künftige Entwicklung der Kernenergie ziehen wir folgendes **Fazit**:

- Wir erwarten **bis zum Jahr 2030 keine Renaissance** der Kernenergienutzung. Vielmehr werden die altersbedingten Abschaltungen dazu führen, dass die Zahl der Reaktoren, die installierte Leistung und die Stromerzeugung in Kernkraftwerken deutlich zurückgeht. Bis zum Jahr 2020 reduziert sich die Zahl der weltweit betriebenen Kernkraftwerke voraussichtlich um 22 %, bis zum Jahr 2030 um ca. 29 % gegenüber dem Ausgangsniveau im März 2009.
- Trotz einer **Zunahme der Neubauaktivität** von Kernkraftwerken verglichen mit den letzten 10 Jahren wird das **Niveau des Baubooms der 1970er/80er-Jahre** nicht erreicht.

- Es gibt eine **Zunahme der Ankündigungen** von Kernkraftwerksneubauten. Allerdings existierten in der Vergangenheit vor allem in den USA, aber auch in anderen Ländern bereits ambitionierte Ausbaupläne, die nicht realisiert wurden. Wir erwarten, dass etwa 23 % der von ATW für die Zeit bis 2020 angekündigten Neubauprojekte und rund 35 % der von der WNA für die Zeit bis 2030 angekündigten Neubauprojekte realisiert werden.
- Würden alle Ankündigungen realisiert, so müsste es eine Zunahme der Bauaktivitäten geben, die den starken Anstieg der Bautätigkeit Anfang der 70er-Jahre des letzten Jahrhunderts in den Schatten stellt. Dies erscheint im hohen Maße **unrealistisch**.
- Auch im Vergleich mit dem starken erwarteten Wachstum des weltweiten **Strombedarfs** verliert die Kernenergie bis 2030 deutlich an Bedeutung. Der Anteil der Kernenergie an der weltweiten **Stromerzeugung** sinkt von 14,8 % im Jahr 2006 voraussichtlich auf 9,1 % im Jahr 2020 bzw. auf 7,1 % im Jahr 2030.
- Aus **anderen Szenarien**, z. B. dem "low"- Szenario der OECD/Nuclear Energy Agency (NEA) und dem Referenzszenario des World Energy Outlook 2008 der Internationalen Energieagentur lassen sich ebenfalls rückläufige Anteile der Kernenergie an der weltweiten Stromerzeugung ableiten.
- Die von uns erwartete Entwicklung der **Leistung** kommt dem Ergebnis des aktuellen Szenarios der OECD-NEA "phase out Life Extension" am nächsten.

1 Aufgabenstellung und Vorgehen

(1) Das Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, beauftragte die Prognos AG, Berlin/Basel, im März 2009 mit einer **Studie** zur weltweiten Entwicklung der Kernenergienutzung bis zum Jahr 2030.

(2) Das Interesse an der Nutzung der **Kernenergie** zur Stromerzeugung hat in den letzten Jahren in einer Reihe von Ländern zugenommen. Das weltweite Klimaproblem, die stark volatilen und tendenziell steigenden Energiepreise und die zunehmende Abhängigkeit von wenigen Weltregionen im Hinblick auf Energielieferungen von Kohle, Öl und Erdgas veranlassten einige Akteure, die Kernenergienutzung neu zu bewerten bzw. eine „Renaissance der friedlichen Nutzung der Kernenergie“ auszurufen.

(3) Den Vorteilen der Kernenergie steht eine Reihe von **Nachteilen** bzw. **Herausforderungen** gegenüber, die einer massiven Ausweitung der Stromerzeugung aus Kernenergie entgegenstehen, so z. B. ihre Kapitalintensität, der Bedarf an hochspezialisierten Fachkräften, der notwendige Aufbau zuverlässiger Behördenstrukturen und die nach wie vor ungeklärte Endlagerfrage, um nur einige zu nennen. Es steht zu erwarten, dass diese Schwierigkeiten nicht von allen Interessenten und nicht bei allen Bauvorhaben überwunden werden können. Somit dürfte ein hier nun zu prüfender Teil der Ankündigungen für neue Kernkraftwerke nicht zu einer entsprechenden Bautätigkeit bzw. Inbetriebnahme führen, wie dies auch schon in der Vergangenheit zu beobachten war. Zwei Beispiele hierzu kommen aus den USA und von der Internationalen Energieagentur.

Die US-amerikanische Atomic Energy Commission erwartete Anfang der 1970er-Jahre für die USA den Bau von bis zu **1.000 Kernkraftwerken bis zum Jahr 2000** (CRS 2007). Tatsächlich wurden dann insgesamt nur 132 Kraftwerke in den USA realisiert, d. h. rund 13 % der ursprünglich erwarteten Zahl (IAEA/PRIS 2009a). Die Internationale Energieagentur ging im Jahr 1980 – also kurz nach dem Unfall von Harrisburg – davon aus, dass in ihren Mitgliedsländern im Jahr 2000 Kernkraftwerke mit einer Leistung von rund 485 GW installiert sein würden (Lantzke 1980). Die tatsächliche Nettoleistung der Reaktoren in den IEA-Mitgliedsländern betrug im Jahr 2000 dann etwa 283 GW, also knapp 60 % der 20 Jahre zuvor prognostizierten Leistung (IAEA/PRIS 2009a). Diese Beispiele verdeutlichen, dass oft eine erhebliche Lücke zwischen den Erwartungen bzw. Ankündigungen der Vergangenheit und dem tatsächlichen Bau von Reaktoren klafft.

(4) Die vorliegende Studie verfolgt das **Ziel**, eine realistische Einschätzung der wahrscheinlichen künftigen weltweiten Nutzung

der Kernenergie vorzunehmen. Es wird die **Frage** beantwortet, ob es voraussichtlich zu einer **Renaissance** der Kernenergie kommen wird.

(5) Die **Vorgehensweise** der Studie ist nachfolgend beschrieben:

- Zunächst gibt die Studie einen kurzen Überblick über den gegenwärtigen **Status** und die **Historie** der weltweiten Kernenergienutzung. Hierbei gehen wir unter anderem der Frage nach, was aus der Vergangenheit für die Zukunft der Reaktor-Neubautätigkeit gelernt werden kann. So gab es schon mehrfach Ankündigungen von Bauprojekten, die nicht realisiert wurden (**Kapitel 2**).
- **In Kapitel 3** stellen wir internationale **Szenarien** der Kernenergienutzung im Vergleich dar, ohne diese zu bewerten. Anschließend nehmen wir eine Bestandsaufnahme der **Ankündigungen** weltweiter Reaktor Neubauten vor. Schließlich untersuchen wir die **in Bau** befindlichen Kernkraftwerksneubauten im Hinblick auf die Frage, ob ihre Realisierung wahrscheinlich ist.
- **Kapitel 4** beschreibt die in Absatz (3) bereits angesprochenen verschiedenen **Herausforderungen** der Kernenergienutzung vor allem im Hinblick auf den Neubau von Kraftwerken. Diese Herausforderungen haben teilweise den Stellenwert von handfesten **Engpässen**, etwa wenn es um die Herstellungskapazitäten von bestimmten Komponenten von Kernkraftwerken geht.
- Schließlich fassen wir in **Kapitel 5** die Ergebnisse der Analysen zusammen und ziehen ein **Fazit** im Hinblick auf die mögliche **künftige Entwicklung der Kernenergienutzung** bis zum Jahr 2030. Das Fazit beruht auf umfangreichen **modellgestützten Analysen** aller in Betrieb befindlichen und insbesondere der bekannten geplanten Kernkraftwerke der Welt.
- Im **Anhang** finden sich neben detaillierten Länder-**Fallstudien** zur Kernenergienutzung auch eine Analyse der möglichen **Neueinsteiger-Länder**. Außerdem enthält der Anhang ergänzende **Tabellen** sowie eine Beschreibung unserer **Methodik** zur Modellierung des Kernenergie-Entwicklungspfads.

(6) Mit einem **Kernkraftwerk** ist in diesem Bericht, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben, immer ein einzelner Reaktorblock gemeint. Das gleiche gilt für den Begriff „Reaktor“. Soweit nicht anders gekennzeichnet, beziehen sich alle Angaben zu Kernkraft-

werken wie deren Anzahl, Leistung, etc. auf die Abfrage der **PRIS-Datenbank** der IAEA vom 18.03.2009 (IAEA/PRIS 2009a). Die Angaben zur Reaktor-Anzahl und -Leistung in unserer Modellierung des Entwicklungspfades der Kernenergienutzung sind jeweils als Jahres-Endwerte der entsprechenden Größe zu verstehen.

Die Leistung der bestehenden Kernkraftwerke wird im Bericht als unverändert angenommen. Eine Leistungsveränderung im Bestand durch **Retrofits** oder andere leistungsverändernde Maßnahmen wurde somit nicht berücksichtigt. Dies ist einer der Gründe, warum der von uns in Kapitel 5 beschriebene Entwicklungspfad der weltweiten Leistung von Kernkraftwerken insgesamt mit einer höheren Unsicherheit behaftet ist als der Entwicklungspfad der Reaktoranzahl. Ein weiterer Grund ist darin zu sehen, dass die konkrete Dimensionierung eines angekündigten Reaktors in der Regel erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt.

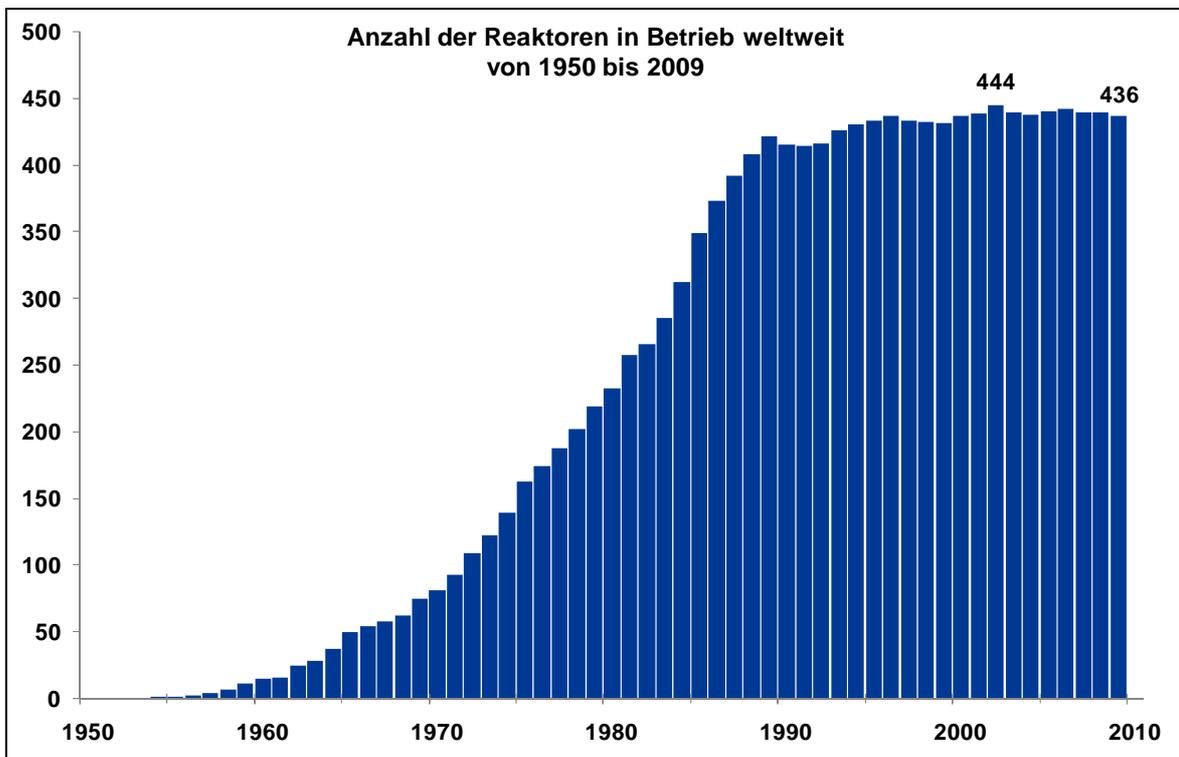
2 Status-quo und Historie der Kernenergienutzung

In diesem Kapitel erfolgt eine **Bestandsaufnahme** der heutigen Kernenergienutzung. Es wird dazu auf aktuelle Statistiken über betriebene (2.1) bzw. bereits stillgelegte (2.2) Reaktoren zurückgegriffen. Ebenso erfolgt eine kurze Analyse historischer Pläne zum Kernenergieausbau (2.3) und von Erfahrungen aus Bauprojekten der Vergangenheit (2.4). Dabei geht es im Wesentlichen darum, eine Basis zu schaffen, auf deren Grundlage die zukünftige Entwicklung der Kernenergie bewertet werden kann.

2.1 Entwicklung und Status quo der Nutzung

(1) Im historischen Rückblick ist die Anzahl der Kernkraftwerke, die weltweit in Betrieb sind, von 1956 bis 1989 kontinuierlich gestiegen. Nach schwankenden Zahlen in den 90er-Jahren wurde das **Maximum im Jahr 2002 mit 444 Reaktoren** erreicht. Infolge von Abschaltungen und geringeren Inbetriebnahmen ging die Zahl nach 2002 zurück und lag im März 2009 weltweit bei insgesamt **436 Reaktoren**.

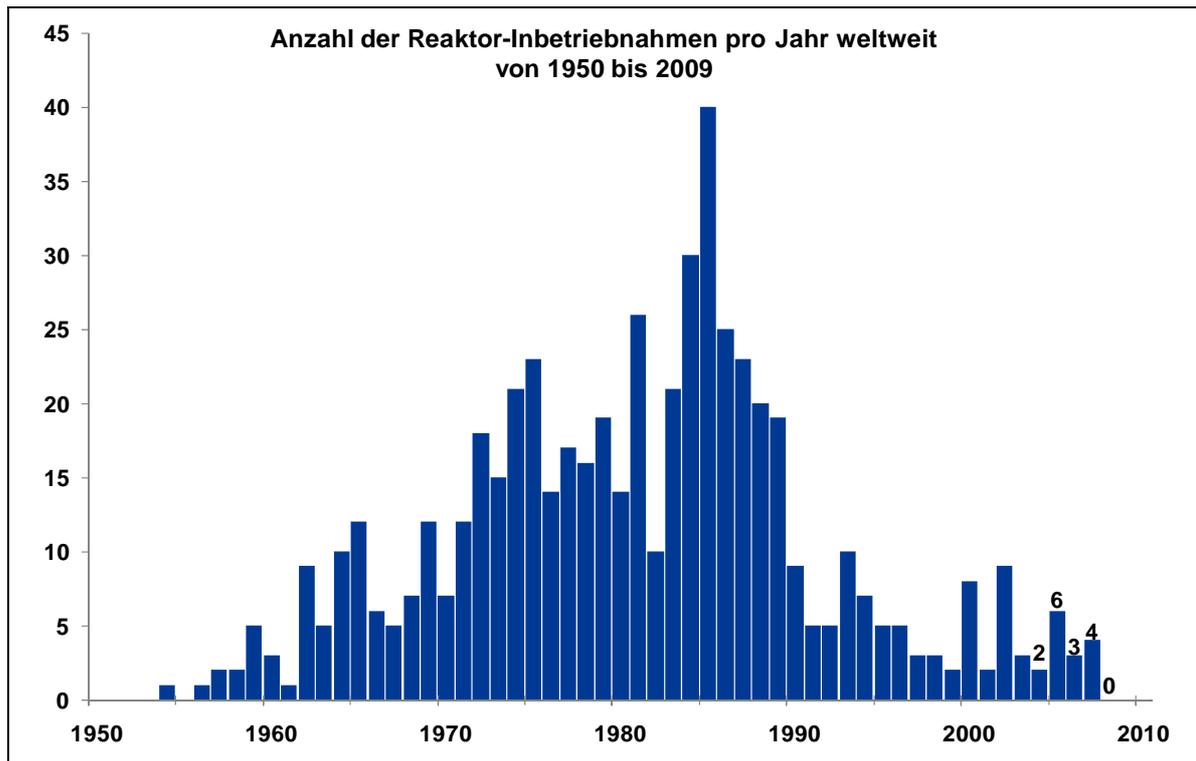
Abbildung 1: Anzahl der Reaktoren in Betrieb weltweit von 1950 bis 2009



Quelle: IAEA/PRIS 2009a

Während in der Vergangenheit bis zu 40 Kernkraftwerke pro Jahr ans Netz gegangen sind, so waren es seit 1990 jährlich 10 Reaktoren oder weniger. In den letzten fünf Jahren wurden insgesamt nur noch 15 Reaktoren in Betrieb genommen, und 2008 gar keiner.

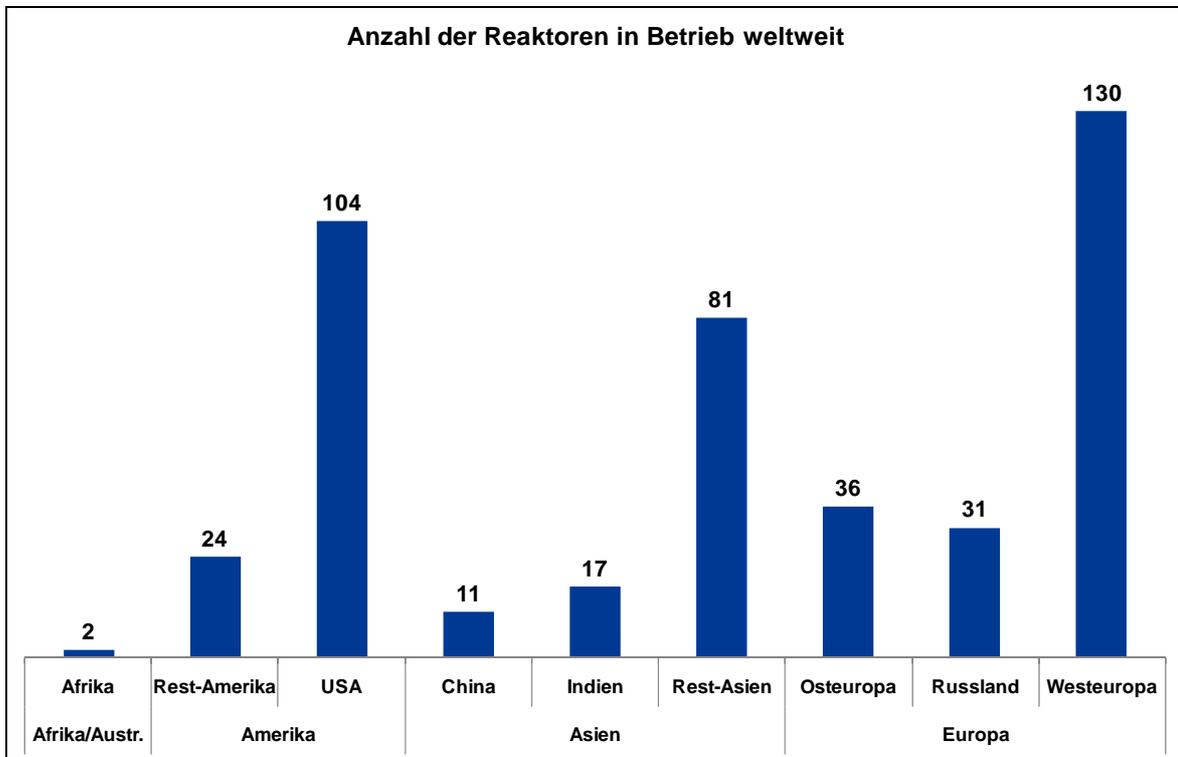
Abbildung 2: Anzahl der Reaktor-Inbetriebnahmen pro Jahr weltweit von 1950 bis 2009



Quelle: IAEA/PRIS 2009a

(2) Abbildung 3 zeigt die **Verteilung** der derzeit betriebenen 436 Reaktoren **nach Weltregionen**. Die meisten Reaktoren befinden sich derzeit in Europa (197). Auf dem amerikanischen Kontinent sind momentan 128 Reaktoren am Netz, in Asien werden aktuell 109 Kernreaktoren betrieben. In der Region Afrika/ Australien sind lediglich in Südafrika zwei Reaktoren im Einsatz.

Abbildung 3: Anzahl der Reaktoren in Betrieb weltweit im Jahr 2009



Quelle: IAEA/PRIS 2009a

(3) Derzeit werden in insgesamt **31 Ländern** Kernreaktoren betrieben. Die meisten aktiven Reaktoren befinden sich in den USA (104). Danach folgen Frankreich (59) und Japan (53). Somit liegt fast die Hälfte aller aktiven Reaktoren (49,5 %) in diesen drei Ländern. Eine detaillierte Aufstellung der momentan betriebenen Reaktoren nach Ländern und Reaktortypen zeigt Tabelle 8 im Anhang.

(4) Die derzeit weltweit betriebenen 436 Reaktoren verfügen zusammen über eine installierte **Bruttoleistung von rund 390 GW** (netto ca. 370 GW). Hinsichtlich der Verteilung der installierten Bruttoleistung nach Weltregionen (vgl. Tabelle 1) zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Anzahl der Anlagen. Mit insgesamt 179 GW stehen die meisten Kernkraftwerkskapazitäten in Europa, gefolgt vom amerikanischen Kontinent (124 GW) und Asien (85 GW). Die durchschnittlich installierte Bruttoleistung je Reaktor liegt – entsprechend den ausgewerteten Statistiken – weltweit bei rund 894 MW. In Asien ist die durchschnittlich installierte Bruttoleistung (780 MW) deutlich geringer als in den anderen Weltregionen. Die Reaktoren in Amerika (969 MW) und Europa (909 MW) liegen über dem weltweiten Durchschnitt.

Tabelle 1: Bruttoleistung der Reaktoren in Betrieb weltweit im Jahr 2009

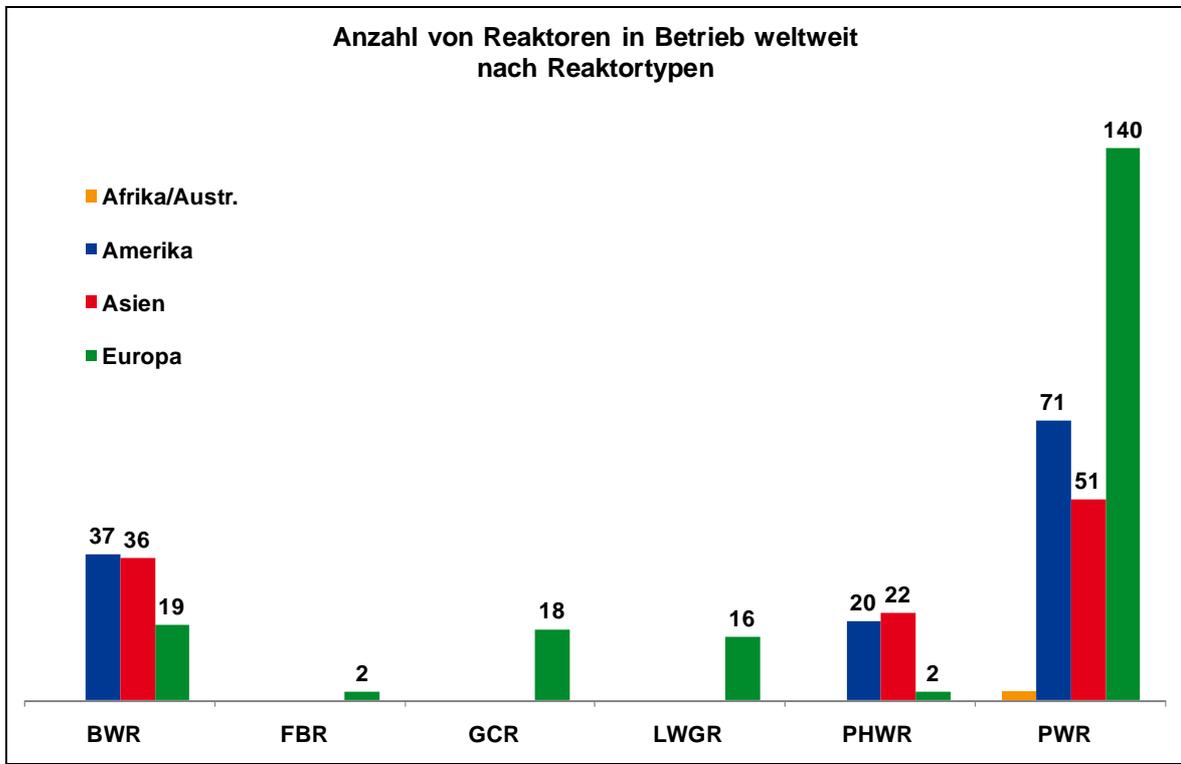
Region	Bruttoleistung (GW)
Afrika/Australien	
Afrika	2
Amerika	
Rest-Amerika	18
USA	106
Asien	
China	9
Indien	4
Rest-Asien	72
Europa	
Osteuropa	27
Russland	23
Westeuropa	129
Summe	390

Quelle: IAEA/PRIS 2009a

(5) In den **Ländern** mit der höchsten Anzahl an momentan betriebenen Kernreaktoren befinden sich auch die höchsten installierten Bruttoleistungen. So verfügen die USA über rund 106 GW installierte Kernenergiekapazität. Danach folgen Frankreich (66 GW) und Japan (48 GW). Der Anteil dieser drei Länder an der installierten Kapazität liegt damit bei rund 56,3 %. Eine detaillierte Aufstellung der momentan installierten Bruttoleistung der Reaktoren nach Ländern und Reaktortypen zeigt Tabelle 9 im Anhang.

(6) Hinsichtlich der verwendeten **Reaktortypen** zeigt Abbildung 4, dass der Druckwasserreaktor am häufigsten im Einsatz ist. Gasgekühlte Reaktoren finden sich ausschließlich in Großbritannien. Der graphitmoderierte Leichtwasserreaktor ist eine russische Konstruktion.

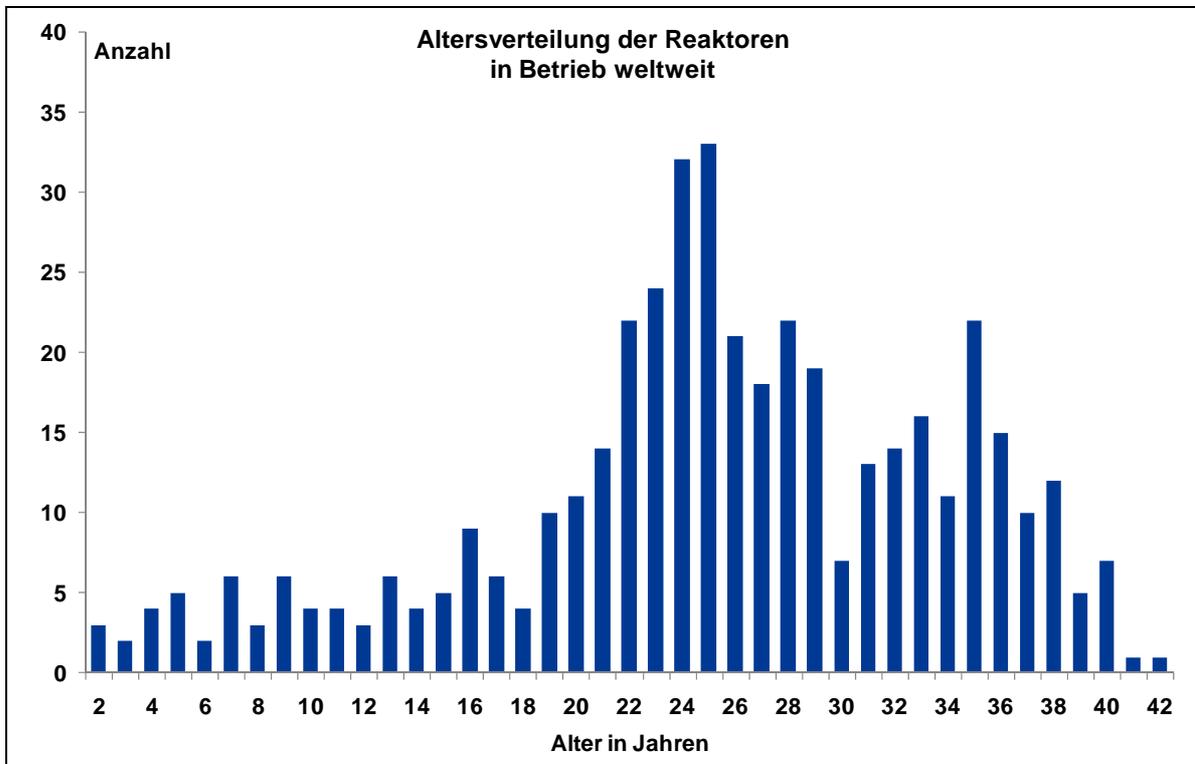
Abbildung 4: Anzahl der Reaktoren in Betrieb nach Reaktortypen weltweit im Jahr 2009



BWR Boiling Water Reactor – Siedewasserreaktor
FBR Fast Breeder Reactor – Schneller Brutreaktor
GCR Gas Cooled Reactor – Gasgekühlter Reaktor
LWGR Light Water-cooled Graphite-mod. Reactor – Leichtwasserreaktor, graphitmoderiert
PHWR Pressurised Heavy Water Reactor – Schwerwasserdruckreaktor
PWR Pressurised Water Reactor (PWR) – Druckwasserreaktor
 Quelle: IAEA/PRIS 2009a

(7) Abbildung 5 zeigt das **Alter der derzeit betriebenen Kernreaktoren**. Es wird deutlich, dass der Neubau von Reaktoren seit 1990 auf einem relativ niedrigen Niveau stagniert (vgl. Abbildung 2). Die Mehrheit der Reaktoranlagen ist bereits älter als 20 Jahre. Das Durchschnittsalter aller Anlagen beträgt etwa 24 Jahre.

Abbildung 5: Altersverteilung der Reaktoren in Betrieb weltweit im Jahr 2009



Quelle: IAEA/PRIS 2009b

2.2 Historische Erfahrungen aus Laufzeiten stillgelegter Kernkraftwerke

(1) In vielen Ländern sind die **Laufzeiten** von Kernkraftwerken staatlich begrenzt, sie werden jedoch wegen zahlreicher wirtschaftlicher und technischer Faktoren nicht zwangsläufig voll ausgeschöpft. Beim Design eines Kernkraftwerks wird dieses vom Hersteller für eine bestimmte Laufzeit ausgelegt („design life“). Diese geplante Laufzeit fiel bei älteren Kraftwerken geringer aus als bei den moderneren, die erst in den letzten Jahren in Betrieb genommen wurden.

Hansen (1983) geht in einer Analyse der erwarteten Stromkosten gebauter und geplanter Kraftwerke 1983 von einer technischen Nutzungsdauer von 40 Jahren aus. Eine Prognose des Reaktorherstellers Siemens unterstellt dagegen eine mittlere technische Lebensdauer von 30 bis 35 Jahren (Frewer et al 1989). 1993 rechnet die IAEA wiederum für die meisten Reaktor-Designs mit einer ursprünglich geplanten Laufzeit von 25 bis 30 Jahren (IAEA 1993).

In den späteren **1990er-Jahren** findet sich dann häufiger die Annahme von 40 Betriebsjahren: „Im allgemeinen sind Kernkraftwerke für eine Betriebszeit von 40 Jahren ausgelegt.“ (Liebholz 1996) Reaktoren mit dieser Auslegung finden sich zum Beispiel in Schweden und Korea (Lundgren und Tirén 1996; Kim 1998).

Für die **zukünftigen Kraftwerke** wird von Seiten der Hersteller von Laufzeiten von bis zu 60 Jahren ausgegangen. So werden beispielsweise koreanische Reaktoren der nächsten Generation, von denen die ersten bis 2015 in Betrieb gehen sollen, für eine Laufzeit von 60 Jahren ausgelegt (Kim 1998, IAEA/PRIS 2009a). Das Gleiche gilt für den Europäischen Druckwasserreaktor EPR (Areva 2005).

(2) Neben dieser Frage der ursprünglichen Auslegung eines Kraftwerkes ist aber auch die **mögliche Laufzeit-Verlängerung** von Bedeutung. Im Allgemeinen unterliegen alle Kernkraftwerks-Komponenten der Alterung und damit einer Verschlechterung ihres Zustandes über die Zeit. Diese Verschlechterung kann die Zuverlässigkeit der gesamten Anlage verringern, sofern die betreffende technische Komponente nicht rechtzeitig gewartet, repariert oder ausgetauscht wird. Daher muss der Alterungsprozess eines Kernkraftwerkes genau überwacht werden. Grundsätzlich hält es die IAEA für technisch möglich, die tatsächliche Laufzeit zu verlängern, wenn die kontinuierliche Wartung und die gründliche Überprüfung der Anlagen gewährleistet wird. Im Jahr 1993 geht die IAEA daher für die meisten Reaktor-Designs – deren ursprünglich geplante Laufzeit sie mit 25 bis 30 Jahren veranschlagt – von einer möglichen Verlängerung der Laufzeit auf 30 bis 40 Jahre aus (IAEA 1993). Eine Evaluation dieser IAEA-Prognosen zur möglichen Laufzeitverlängerung lag bei der Erstellung unserer Studie allerdings nicht vor.

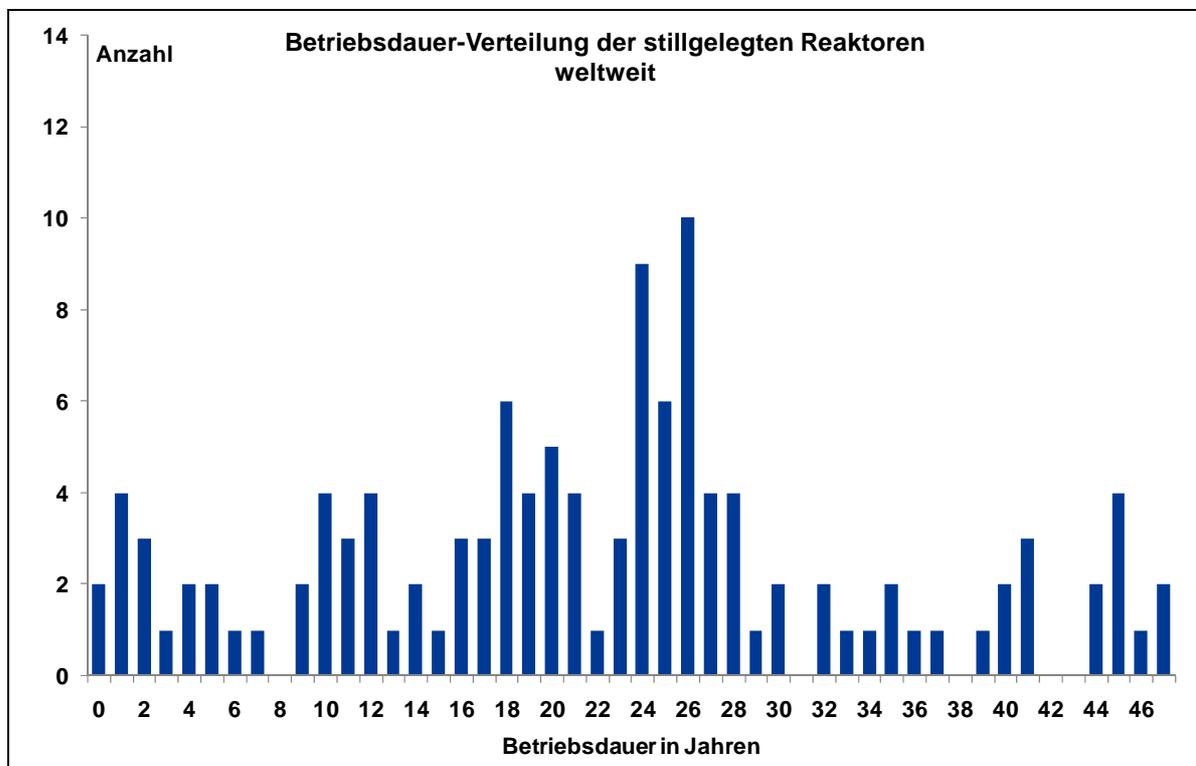
Aus den bisher genannten Daten zu Laufzeiten ergibt sich für die heute betriebenen Kernkraftwerke eine **Spannweite** der Einschätzungen zur ursprünglichen Auslegung, die von ca. 25 Jahren bis 40 Jahren reicht. Wie oben dargestellt, muss dabei berücksichtigt werden, dass heute (Stand: März 2009) viele Reaktoren älter als 25 Jahre sind, zwei sogar älter als 40 (vgl. Abbildung 5). Mithin sind in einzelnen Fällen schon Laufzeiten über das ursprüngliche Design hinaus verlängert worden. Eine Laufzeit-Verlängerung halten wir grundsätzlich auch für solche Reaktoren für möglich, die ursprünglich für 40 Jahre ausgelegt waren.

(3) Die Diskussion um eine Laufzeit-Verlängerung über 40 Jahre hinaus ist allerdings insofern schwierig zu führen, als dass sie sich für die Mehrheit der Reaktoren bisher kaum durch empirische

Beobachtungen stützen lässt. Betriebsdauern von mehr als 40 Jahren finden sich weltweit nur selten.

Während die gegenwärtig betriebenen Reaktoren im Durchschnitt 24 Jahre alt sind (s. 2.1), kommen die bereits stillgelegten 127 Reaktoren lediglich auf eine mittlere Laufzeit von rund 22 Jahren. Die folgende Abbildung 6 zeigt die Betriebsdauer-Verteilung der stillgelegten Reaktoren. Deutlich wird insbesondere die breite Streuung der Betriebsdauern. Rund ein Viertel der Reaktoren war weniger als 15 Jahre in Betrieb.

Abbildung 6: *Betriebsdauer-Verteilung der stillgelegten Reaktoren weltweit*



Quelle: IAEA/PRIS 2009a. 121 Reaktoren; für 6 Reaktoren lagen keine genauen Daten vor

Am längsten waren Kernreaktoren bisher in Großbritannien bzw. Russland am Netz (maximal 47 Jahre). Hierbei handelte es sich allerdings zumeist um sehr kleine Reaktoren mit einer Bruttoleistung von jeweils 60 MW. Dagegen gibt es in verschiedenen Ländern Reaktorblöcke, die nur sehr kurz am Netz waren oder überhaupt keinen Strom produzierten. Eine detaillierte Aufstellung der Betriebsdauern der stillgelegten und noch betriebenen Reaktoren auf Länderebene findet sich in Tabelle 10 und Tabelle 12 im Anhang.

Insgesamt haben von den 436 noch betriebenen und den 127 stillgelegten Reaktoren bisher lediglich 14 eine Betriebsdauer von mehr als 40 Jahren erreicht, d. h. weniger als 3 % aller 563 Reaktoren. Damit zeigt sich, dass Diskussionen um Laufzeit-Verlängerungen über 40 Jahre hinaus in gewissem Maße spekulativ sind, weil die Datenlage in diesem Bereich sehr dünn ist. Im Übrigen erwartet die IEA in ihrem World Energy Outlook 2008 als Durchschnitt für den heutigen Gesamtbestand eine mittlere Laufzeit von 45 Jahren (IEA 2008).

In unserer Modellierung des Entwicklungspfad (vgl. Kapitel 5) nehmen wir unterschiedliche Kategorien mit Staffelung nach Inbetriebnahme an. Wir gehen davon aus, dass ältere Kraftwerke im Mittel geringere Laufzeiten erreichen als jüngere. Für Kernkraftwerke, die vor 1980 in Betrieb genommen wurden, gehen wir von 40 Jahren aus, für solche zwischen 1980 und 1985 von 45 Jahren und für die ab 1986 in Betrieb genommenen von 45 oder mehr Jahren.

Die Diskussion, ob und in welchem Umfang es zu einer Verlängerung der Laufzeiten über 45 Jahre hinaus kommen wird, ist im Kontext dieser Untersuchung irrelevant, da der Zeithorizont vor der entscheidenden Schwelle – im Jahr 2030 – endet. Ein Kraftwerk welches 1985 in Betrieb gegangen ist, erreicht nach 45 Jahren also gerade das Ende unseres Betrachtungszeitraums.

Ausnahmen von diesen nach Altersklassen festgesetzten Laufzeiten wurden nur bei solchen Reaktoren gemacht, für die laut WNA-Liste bereits kürzere Laufzeiten geplant bzw. beschlossen sind, wie z. B. in Deutschland.

2.3 Historische Pläne zum Kernenergieausbau und was daraus wurde

(1) Bezogen auf den Kreis ihrer Mitgliedsländer ging die **Internationale Energieagentur** 1980 davon aus, dass im Jahr 2000 Kernkraftwerke mit einer Leistung von rund 485 GW installiert sein würden (Lantzke 1980). Tatsächlich betrug die Nettoleistung im Jahr 2000 in den IEA-Mitgliedsländern dann rund 283 GW, also knapp 60 % der 20 Jahre zuvor prognostizierten Leistung (IAEA/PRIS 2009a).

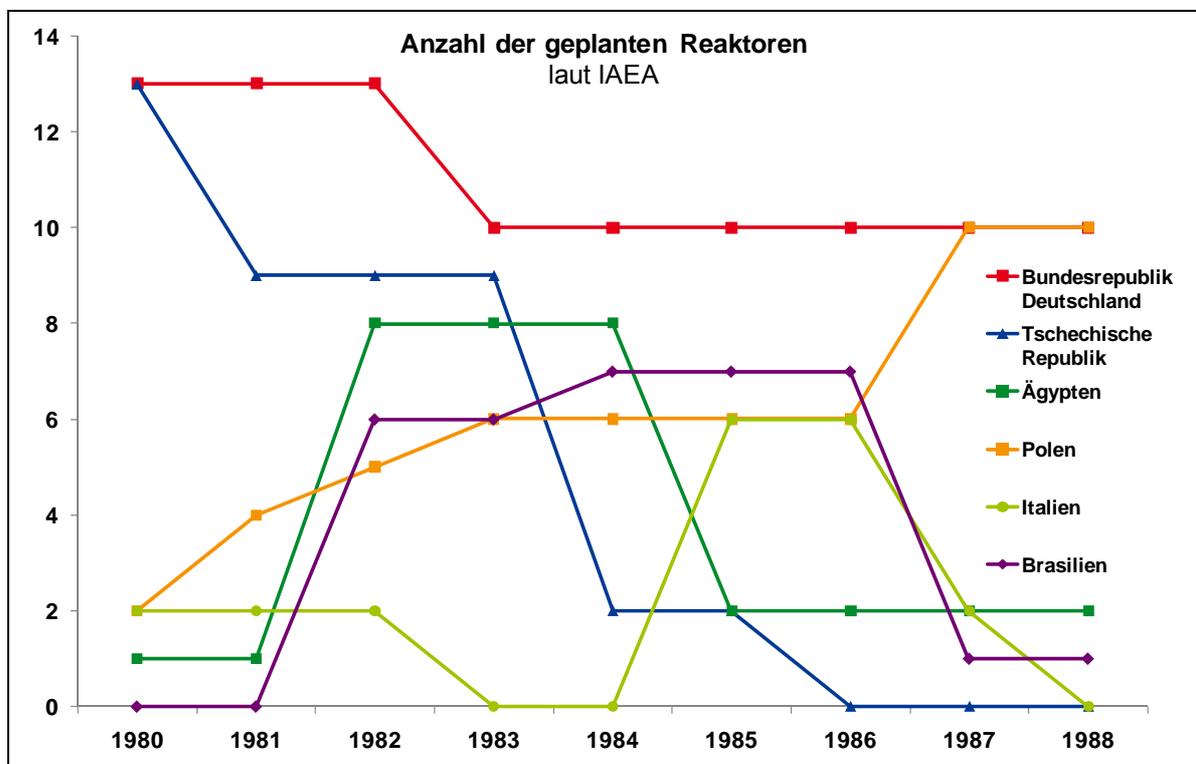
(2) Die folgende Abbildung 7 zeigt die **Pläne für Reaktor Neubauten** in den 1980er-Jahren in einzelnen Ländern. Diese Ergebnisse basieren auf Auswertungen von IAEA-Berichten. In den jährlich erscheinenden IAEA-Berichten finden sich nach 1988 keine Angaben mehr über Reaktor-Planungen.

Aus Abbildung 7 geht hervor, dass manche Reaktor-Planungen sich nicht oder nur sehr langfristig verwirklichen lassen. So waren in der Bundesrepublik Deutschland 1983 noch 10 Kernkraftwerke in Planung, von denen dann keines mehr gebaut wurde und – nach geltender Gesetzeslage – auch zukünftig keines mehr gebaut wird.

Für weniger industriell entwickelte Länder zeigt sich, dass von der Ankündigung bzw. Planung eines Kernreaktors bis zum Bau oder der Inbetriebnahme zum Teil erhebliche Hürden zu überwinden sind. Beispielsweise ist in Polen und Ägypten bis zum heutigen Tag kein Reaktor in Betrieb, obwohl dort in den 80er-Jahren bis zu zehn Reaktoren in Polen bzw. bis zu acht in Ägypten geplant waren.

Schließlich wird aus der Abbildung deutlich, dass es in den einzelnen Ländern sehr schnell zu Änderungen hinsichtlich der geplanten Reaktorneubauten kam. Nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl im April 1986 haben einige Staaten die Zahl ihrer geplanten Reaktoren deutlich reduziert. In Italien wurden die Planungen für neue Reaktoren zu diesem Zeitpunkt sogar vollständig eingestellt.

Abbildung 7: Anzahl der in den 1980er-Jahren geplanten Reaktoren in ausgewählten Ländern



Quelle: IAEA – Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No. 2 (1981 – 1988) sowie eigene Auswertungen

(3) Die **Geschichte der Kernkraftwerks-Ankündigungen in den USA** ist im Besonderen lehrreich für die Einschätzung der künftigen Entwicklung – vor allem für die USA selbst.

Die USA betreiben gegenwärtig nach IAEA-Angaben insgesamt 104 Kernkraftwerke. Hinter dieser Zahl verbirgt sich einerseits eine Geschichte des Kraftwerk-Zubaus und andererseits eine Geschichte von Ankündigungen, Bestellungen und Stornierungen. Während in den 1970er-Jahren noch 59 neue Reaktoren ihren Betrieb aufnahmen, waren es in den 80er-Jahren nur noch 46 und in den 90er-Jahren fünf Reaktoren. Zum letzten Mal wurde in den USA im Jahr 1996 ein Kernkraftwerk fertiggestellt (IAEA/PRIS 2009a). Damit wurde bereits im Jahr 1990 der höchste Bestand von insgesamt 112 Reaktoren in Betrieb gezählt; seitdem sinkt die Zahl der US-Reaktoren in Betrieb (DOE/EIA 2008).

Nachdem zwischen 1966 und 1974 sehr viele neue Kraftwerke geordert wurden, gingen die **Bestellungen** in den Folgejahren merklich zurück. Noch Anfang der siebziger Jahre erwartete die US-amerikanische Atomic Energy Commission wie berichtet (vgl. Kap. 1) den Bau von bis zu 1.000 Kernkraftwerken bis zum Jahr 2000 (CRS 2007). Seit 1978 ist in den USA allerdings kein Kraftwerk mehr bestellt worden, was dem Department of Energy (DOE) zufolge zum größten Teil auf steigende Kosten zurückgeführt werden kann: Aufwändige Design-Änderungen nach dem Unfall in Harrisburg (1979), erhoffte, aber nicht eintreffende Skaleneffekte in der Produktion sowie die Konkurrenz anderer Energieträger machten Kernkraftwerke weniger wettbewerbsfähig als erwartet. In Folge dieser enttäuschten Erwartungen bei Betreibern und Investoren wurden von den insgesamt seit Beginn der Kernenergienutzung in den USA bestellten 259 Kraftwerken 124 Bestellungen (d. h. knapp 48 %) wieder storniert (DOE/EIA o. J.). Von den ursprünglich 1.000 erwarteten Reaktoren (s. o.) wurden insgesamt nur 132 Kraftwerke in den USA realisiert, d. h. rund 13 % der ursprünglich erwarteten Zahl (IAEA/PRIS 2009a).

Eine für das DOE arbeitende Arbeitsgruppe kam 2001 in einer „**Roadmap 2010**“ zu dem Ergebnis, dass der Neubau von Kernkraftwerken in den USA grundsätzlich bis zum Jahr 2010 möglich sei. Die Realisierung dieser Möglichkeit sei allerdings abhängig von hinreichenden Investitionen aus dem privaten Sektor. Eine der größten Unsicherheiten im deregulierten Elektrizitätsmarkt sei die Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie (NTDG 2001). Entgegen dieser positiven Einschätzung der Neubau-Bedingungen wurde in den USA seit 2001 kein Reaktorneubauprojekt begonnen (IAEA/PRIS 2009a).

(4) Die **russischen Reaktor-Ausbaupläne** im Jahr 2000 sahen vor, bis 2010 pro Jahr insgesamt mehr als 200 TWh Strom aus Kernkraftwerken zu erzeugen (Schneider & Froggatt 2007). Im Jahr 2000 wurden ca. 123 TWh Strom nuklear erzeugt (CIA 2002), 2007 dann 160 TWh (WNA 2009h). Würde der Zuwachs im selben Tempo bis 2010 weitergehen, so würde er damit insgesamt rund 30 % unter dem anvisierten Ausbauziel bleiben.

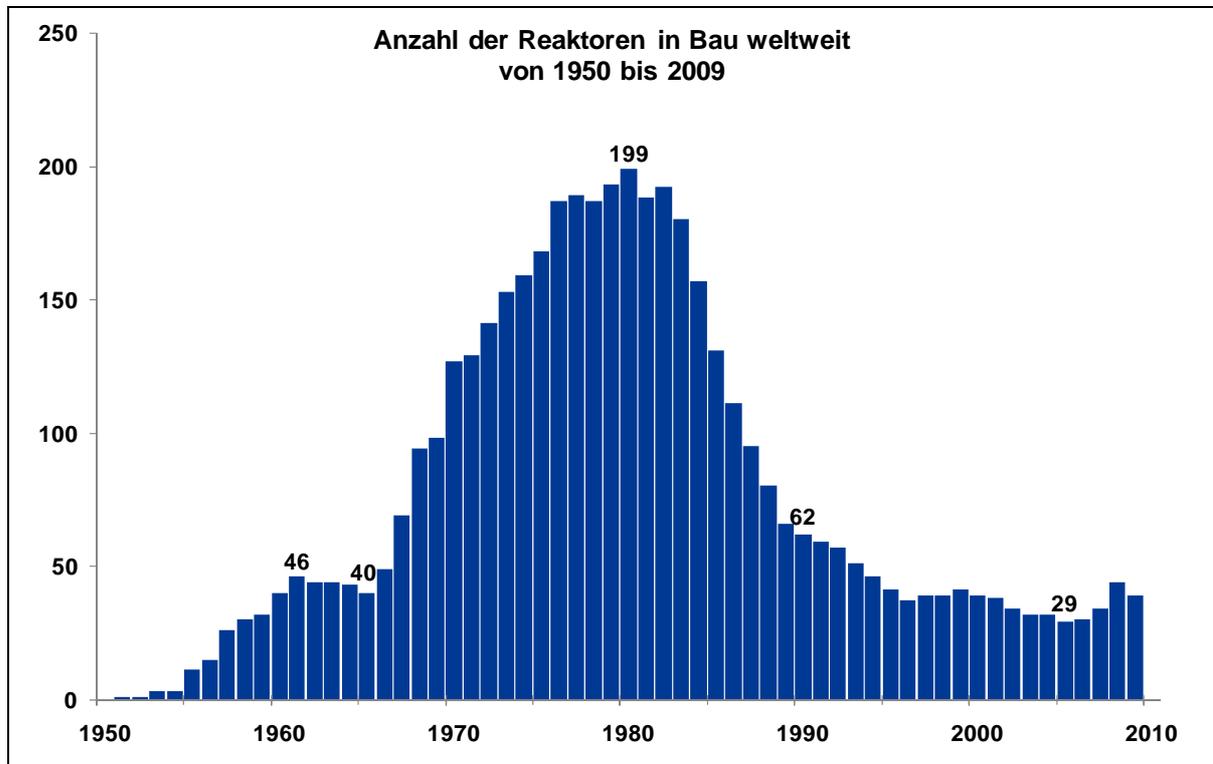
(5) Es zeigt sich, dass Pläne zum Neubau von Kernkraftwerken in der Vergangenheit häufig geändert oder wieder aufgegeben wurden und dass ursprünglich formulierte große Erwartungen hinsichtlich der Zukunft der Kernkraft später enttäuscht wurden.

2.4 Erfahrungen aus Bauprojekten der Vergangenheit

(1) Im Folgenden betrachten wir die Bauprojekte der Vergangenheit einerseits aggregiert für die ganze Welt und andererseits nach Regionen differenziert. Anhand dieser Auswertungen treffen wir dann später Annahmen zur Umsetzung heutiger Reaktorplanungen.

(2) Die Anzahl der jeweils gerade **im Bau befindlichen Kernreaktoren** zeigt Abbildung 8. Seit Mitte der 1990er-Jahre hat sich diese Zahl auf einem relativ geringen Niveau (ca. 50) stabilisiert. Von den 45 momentan offiziell als „in Bau“ angegebenen Projekten stagnieren acht (vgl. Kapitel 3.4). Das heutige Niveau entspricht in etwa dem Wert der 1960er-Jahre. Die Zahl der gleichzeitig im Bau befindlichen Reaktoren stieg von 40 Anlagen 1965 in 15 Jahren bis Anfang der 1980er-Jahre deutlich auf 199 Anlagen.

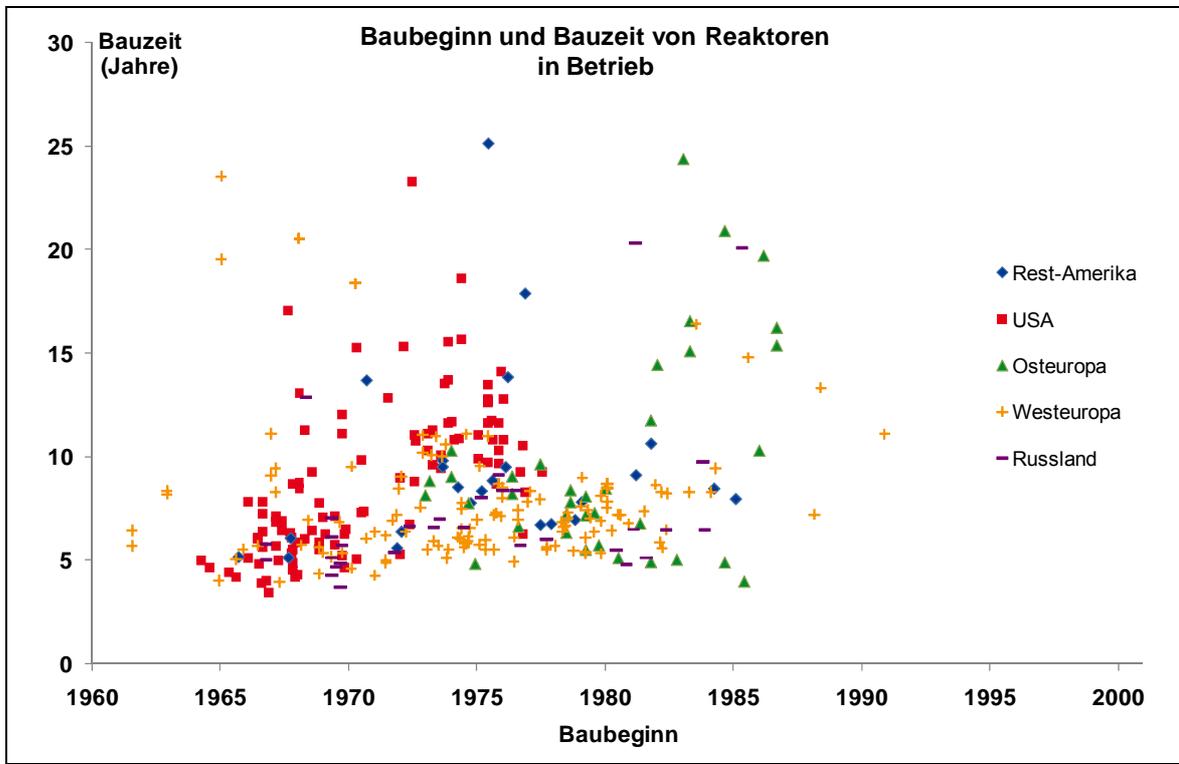
Abbildung 8: Anzahl der Reaktoren in Bau weltweit von 1950 bis 2009



Quelle: IAEA/PRIS 2009a. Berücksichtigt sind 436 Reaktoren in Betrieb und 127 stillgelegten Reaktoren. Nicht enthalten sind solche Reaktoren in Bau, die nie fertiggestellt wurden.

(3) Die **durchschnittliche Bauzeit** der 436 momentan betriebenen Reaktoren betrug im globalen Mittel rund acht Jahre. Dabei variiert die Bauzeit zwischen den Weltregionen. Eine detaillierte Aufstellung der Bauzeiten in den einzelnen Ländern findet sich in Tabelle 11 im Anhang. Die folgenden Grafiken zeigen die Bauzeiten aller momentan in Betrieb befindlichen Reaktoren in Europa und Amerika (Abbildung 9) sowie in Asien (Abbildung 10).

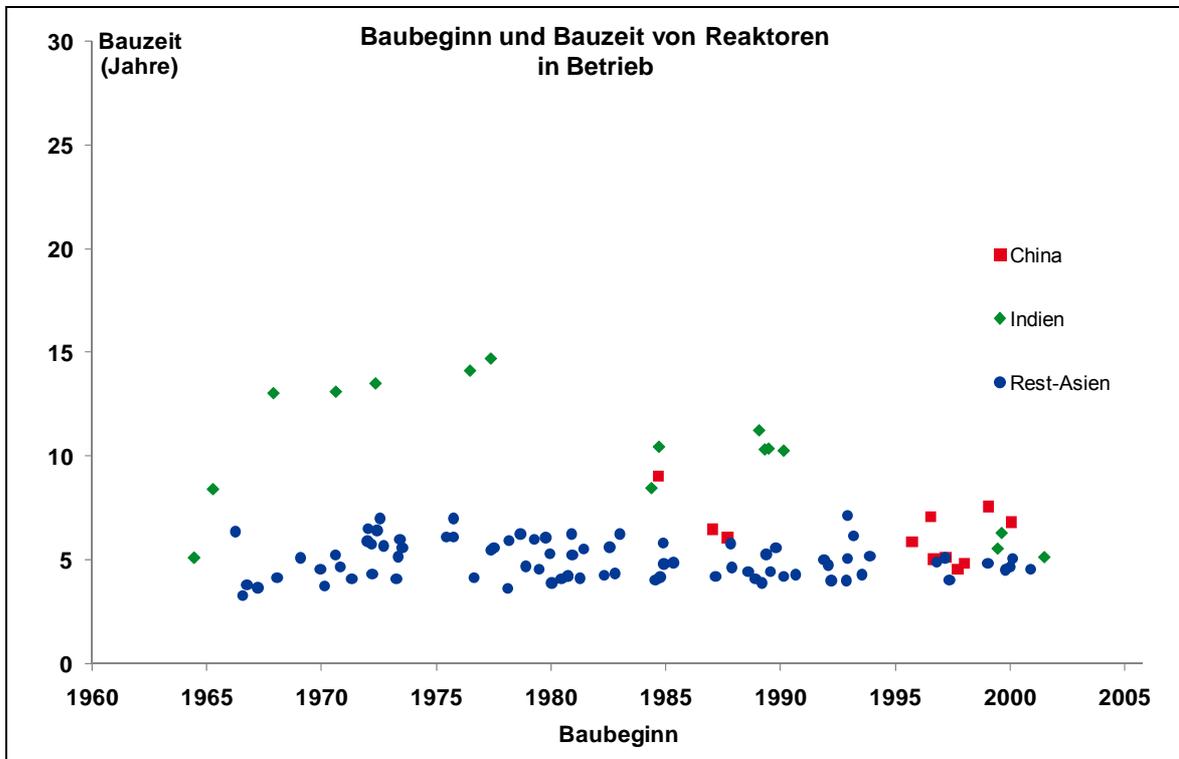
Abbildung 9: Baubeginn und Bauzeit von Reaktoren in Betrieb in Amerika und Europa



Quelle: IAEA/PRIS 2009a

(4) Abbildung 9 zeigt, dass sich insbesondere in den USA und in Osteuropa die **Bauzeit** der Reaktoren über die Jahre **verlängert** hat und dass die Spreizung zwischen minimaler und maximaler Bauzeit zugenommen hat. Dagegen ist in Asien kein Trend zur Verlängerung der Bauzeiten der Kernreaktoren zu verzeichnen (Abbildung 10). In „Rest-Asien“ bleibt die Bauzeit über den gesamten Zeitraum relativ stabil. In Indien kann seit den 80er-Jahren sogar eine deutliche Abnahme der Bauzeit beobachtet werden.

Abbildung 10: Baubeginn und Bauzeit von Reaktoren in Betrieb in Asien



Quelle: IAEA/PRIS 2009a

Beim Vergleich der beiden Abbildungen fällt auf, dass die Bauzeiten in Asien im Mittel deutlich kürzer ausfallen als in Europa oder den USA (vgl. Tabelle 11 im Anhang).

In unserer Modellierung des Entwicklungspfad (vgl. Kapitel 5) nehmen wir daher an, dass die Bauzeiten in Asien unter dem weltweiten langfristigen Durchschnitt liegen werden. Abgeleitet aus den Bauerfahrungen der Vergangenheit unterstellen wir für Japan und Südkorea fünf Jahre, für China und Indien sechs Jahre. Für alle anderen Länder ziehen wir den weltweiten Durchschnittswert von acht Jahren heran.

3 Ausbauszenarien und Ankündigungen für Kernkraftwerke im Vergleich

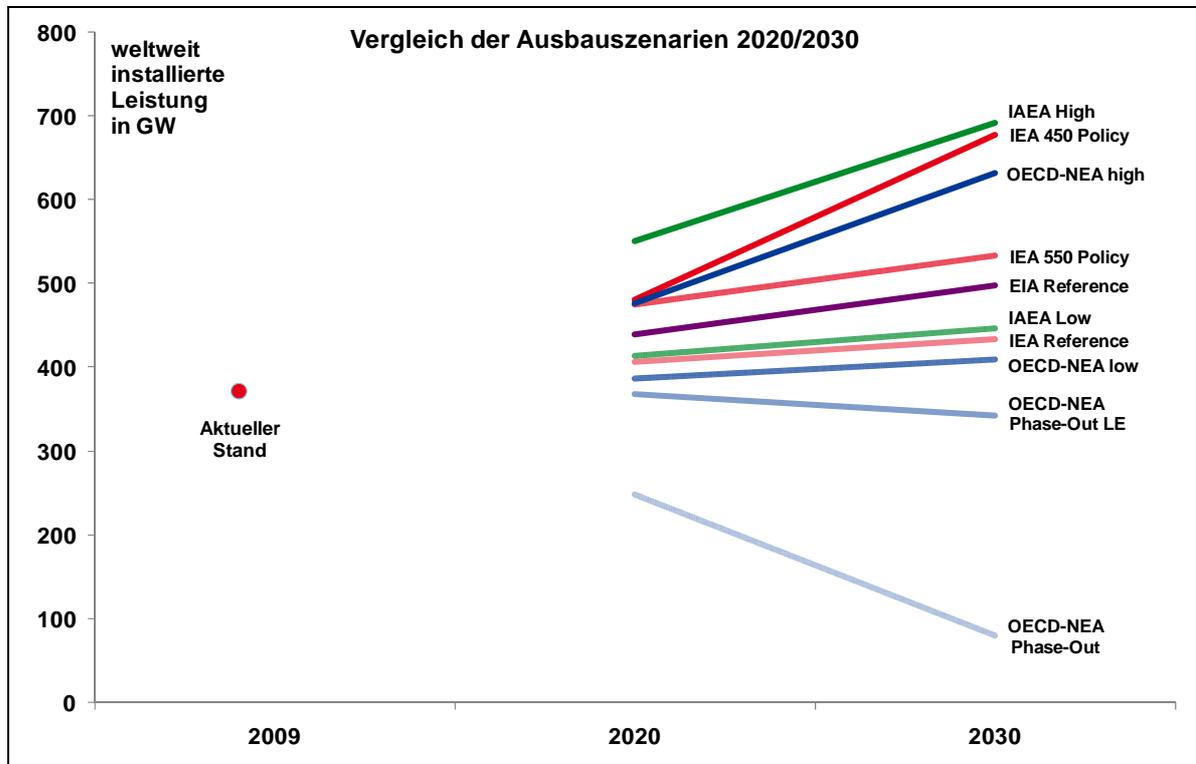
Die Zukunft der Kernenergienutzung hängt wesentlich davon ab, wie viele Reaktoren neu errichtet werden können. Einige Kraftwerke befinden sich bereits in Bau oder zumindest in Planung. Für andere existieren lediglich Ankündigungen. In diesem Kapitel geben wir zunächst eine Übersicht zu den aggregierten, globalen Kernenergie-Ausbauszenarien (3.1) der OECD-NEA und anderer Institutionen. Diese können allerdings für unsere spätere Modellierung eines zukünftigen Entwicklungspfades nicht weiter verwendet werden, da sie keine hinreichend detaillierten Daten auf der Ebene einzelner Reaktoren enthalten. Nach dieser Übersicht wenden wir uns den Planungen und Ankündigungen zu. Diese lassen sich anhand von Veröffentlichungen der World Nuclear Association (3.2) und ATW (3.3) nachvollziehen. Anschließend setzen wir uns mit der IAEA-Baustatistik auseinander und korrigieren diese, wo notwendig (3.4).

3.1 Ausbauszenarien der Kernenergie im Vergleich

(1) Entwicklungspfade der Kernenergienutzung liegen von Seiten verschiedener Institutionen vor, die diese Nutzung zumeist in den Kontext des weltweiten Energiebedarfs stellen. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um die **OECD-NEA** (Nuclear Energy Agency), **EIA** (Energy Information Administration, US Department of Energy), die **IAEA** (International Atomic Energy Agency) und die **IEA** (International Energy Agency).

(2) Während von der EIA nur ein Referenz-Szenario vorliegt, stellen die anderen Organisationen mehrere Szenarien bereit. Abbildung 11 stellt die verschiedenen Szenarien zur zukünftigen installierten Leistung der Kernkraftwerke weltweit im **Überblick** dar. Ausgehend vom aktuellen Stand mit einer Nettoleistung von etwa 370 GW ergibt sich bis zum Jahr 2020 eine Spannweite der Szenarien zwischen 550 GW (IAEA High) und rund 250 GW (NEA Phase-Out). Bis zum Jahr 2030 vergrößert sich der Abstand weiter. Das Maximum liegt dann bei rund 700 GW (IAEA High) und das Minimum bei 80 GW (NEA Phase-Out). Insgesamt wird in beinahe allen Szenarien davon ausgegangen, dass die **ausscheidenden Kraftwerke** durch die zu erwartenden Neubauten bis zum Jahr 2020 **kompensiert** werden können.

Abbildung 11: Vergleich der Ausbauszenarien von OECD-NEA, EIA, IAEA und IEA bis zum Jahr 2030



2020-2030: interpoliert. Phase-Out LE : Life Extension.
 Quelle: IAEA/PRIS 2009, EIA/DOE 2008, IAEA 2008f, NEA 2008, IEA 2008

3.2 Planungen und Vorschläge weltweit laut WNA

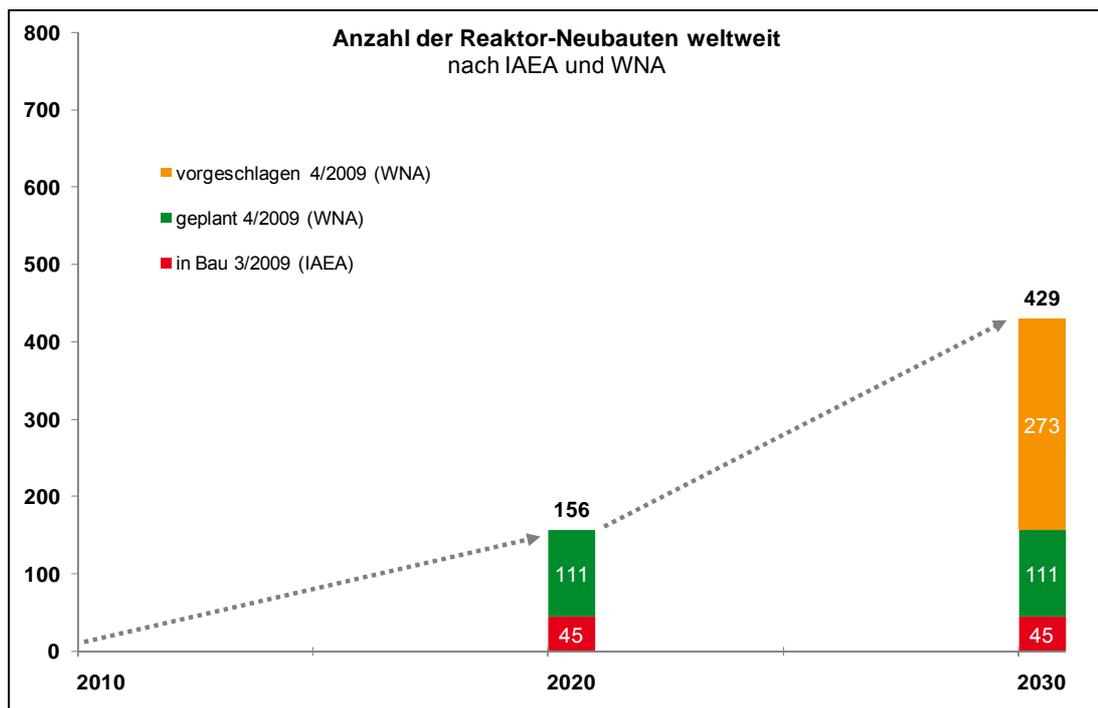
(1) Die **World Nuclear Association (WNA)** ist ein globaler Verband der Kernenergie-Industrie, der sich nach eigener Aussage zum Ziel gesetzt hat, die friedliche Nutzung der Kernenergie als nachhaltige Energiequelle für die kommenden Jahrhunderte zu fördern. Die WNA führt Listen mit weltweit **geplanten** und **vorgeschlagenen** Reaktoren. Diese Listen werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten – zum Teil mehrmals pro Monat – aktualisiert.¹

(2) Die folgende Abbildung 12 zeigt die Anzahl der Reaktoren, die bis zum Jahr 2020 bzw. bis 2030 **neu gebaut** sein soll, wenn

¹ Zur Unterscheidung der „geplanten“ von den „vorgeschlagenen“ Reaktoren benutzt die WNA die folgende Definition. **Geplant** sind solche Reaktoren, für die bereits weitgehende Zusagen oder eine Finanzierung vorhanden sind und deren Inbetriebnahme größtenteils innerhalb der nächsten 8 Jahre zu erwarten ist oder solche, deren Bau bereits fortgeschritten ist, aber dessen Fertigstellung auf unbestimmte Zeit verschoben wurde. **Vorgeschlagen** sind solche Reaktoren, für die ein spezifisches Programm oder ein Standort vorgeschlagen wurde und deren Inbetriebnahme innerhalb von 20 Jahren zu erwarten ist (WNA 2009g).

sämtliche laut WNA geplanten und vorgeschlagenen Reaktoren realisiert werden. Hinzu kommt die Zahl der momentan laut IAEA in Bau befindlichen Reaktoren. Hier wird vorläufig unterstellt, dass diese bis zum Jahr 2020 alle fertiggebaut werden. Später hinterfragen wir diese Annahme kritisch und korrigieren sie (vgl. 3.4).

Abbildung 12: Anzahl der Reaktor-Neubauten bis zum Jahr 2030 nach IAEA und WNA

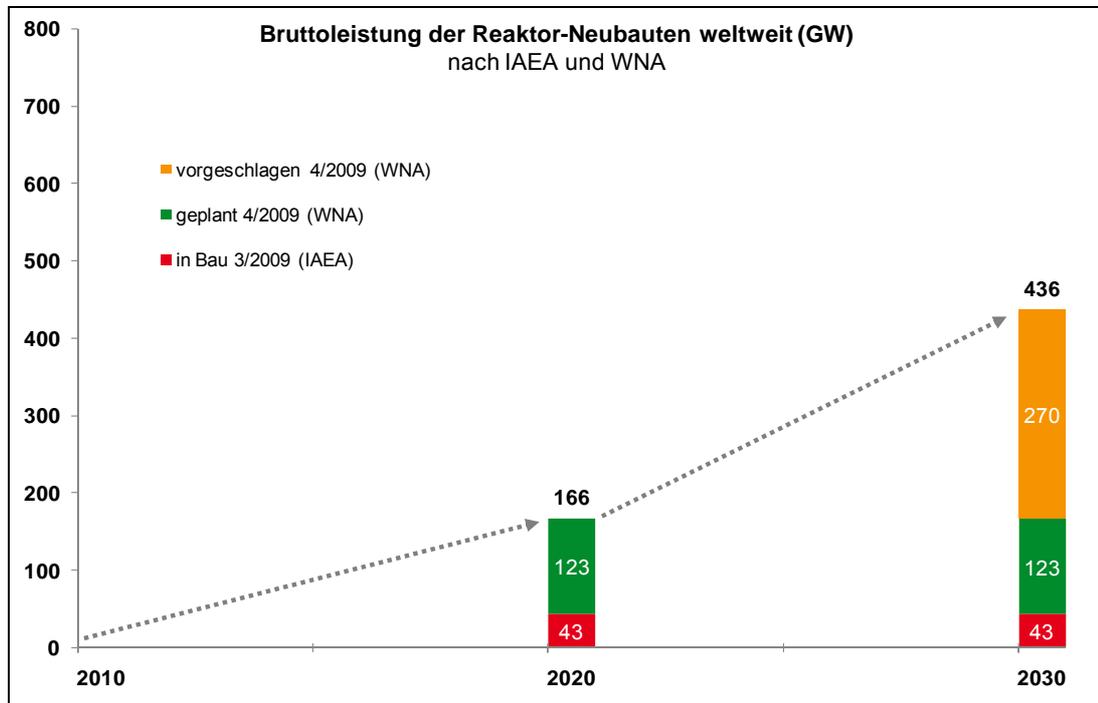


Quelle: IAEA/PRIS 2009a, WNA 2009g. Wir unterstellen hier, dass alle momentan von der IAEA als „in Bau“ eingestuft Reaktoren bis zum Jahr 2020 fertiggestellt werden.

Bis zum Jahr 2020 würden demnach 156 **Kernkraftwerke** neu gebaut, wenn alle Bauten fertiggestellt und alle Pläne und Vorschläge realisiert werden. Bis zum Jahr 2030 wären es 429 Reaktoren.

Abbildung 13 zeigt analog die zu erwartende installierte **Bruttoleistung**. Bis 2020 sollen 166 GW installiert sein, bis 2030 dann 436 GW.

Abbildung 13: Bruttoleistung der Reaktor-Neubauten bis zum Jahr 2030 nach IAEA und WNA in GW



Quelle: IAEA/PRIS 2009a, WNA 2009g. Wir unterstellen hier, dass alle momentan von der IAEA als „in Bau“ eingestufteten Reaktoren bis zum Jahr 2020 fertiggestellt werden.

3.3 Planungen und Vorplanungen weltweit laut ATW

(1) ATW, die „Internationale Zeitschrift für Kernenergie“, ist institutionell eng mit der deutschen Kernenergie-Industrie verbunden. ATW veröffentlicht mehrmals pro Jahr eine auf Länderebene aggregierte Liste der Reaktoren, die sich weltweit in **Planung** und **Vorplanung** befinden (ATW 2009b)².

² **Beantragt oder geplant** ist ein Reaktor im Sinne von ATW dann, wenn ein „hoher Grad der Verlässlichkeit der Information“ besteht und „evtl. schon Bau vorbereitende Arbeiten (z. B. Aushub der Baugrube)“ begonnen wurden. Zur Validierung dieser Information müssen „mindestens 3 unabhängige Quellenangaben“ sowie „mindestens eine vom potenziellen Investor“ vorliegen.

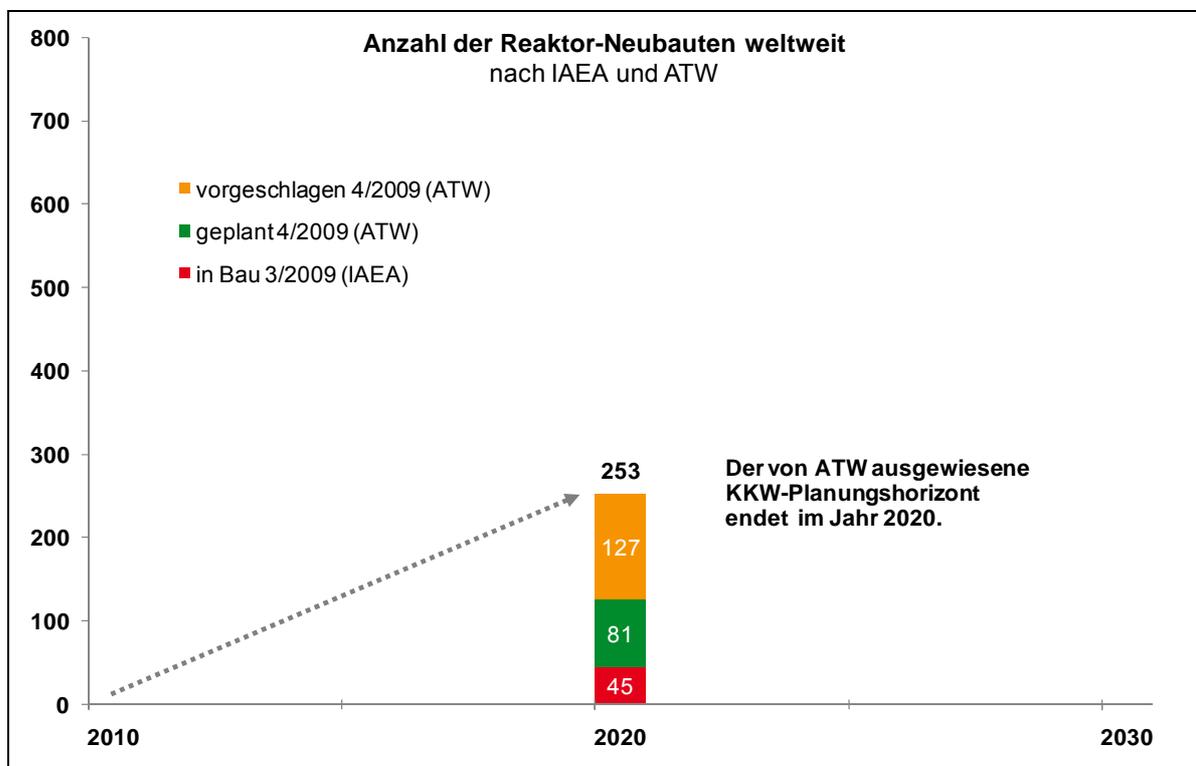
Vorplanungen (bis 2020) zeichnen sich dadurch aus, dass „Informationen zu Planungen verfügbar“ sind und „mindestens 2 unabhängige Aussagen“ vorliegen müssen.

Anders als die Liste der WNA (vgl. 3.2) wird die ATW-Liste der Planungen und Vorplanungen nicht ständig aktualisiert, um die Aufnahme von zuweilen nur kurzlebigen, politisch motivierten Ankündigungen soweit wie möglich zu vermeiden. Die im Rahmen dieser Studie verwendete ATW-Liste vom 02.03.2009 gibt daher als Datenstand den 31.12.2008 an. Darüber hinaus endet der von ATW ausgewiesene Planungshorizont für Kernkraftwerke bereits im Jahr 2020.

(2) Summiert man die ATW-Planungsliste und die laut IAEA in Bau befindlichen Reaktoren, würden bis zum Jahr 2020 weltweit 253 **Reaktoren** neu gebaut (Abbildung 14). Dies entspräche einer zusätzlichen installierten **Bruttoleistung** von 274 GW (Abbildung 15).

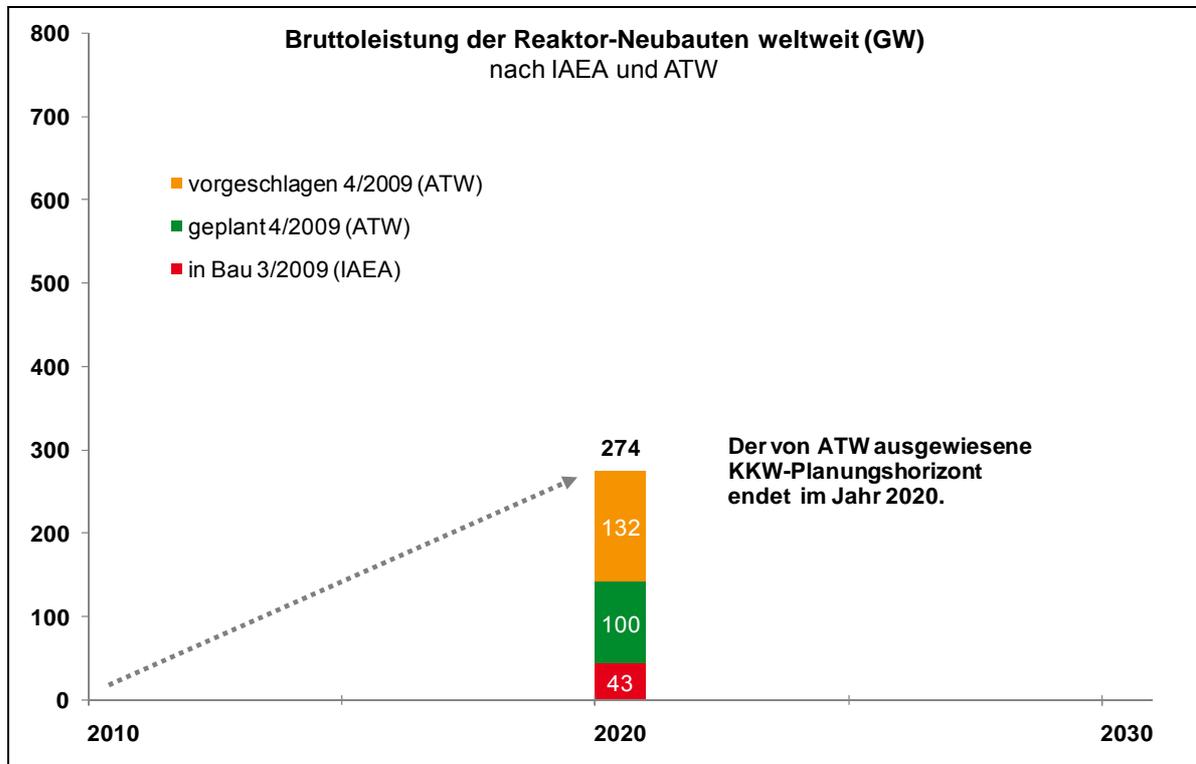
Die ATW-Zahlen liegen damit für das Jahr 2020 über denen der WNA (vgl. 3.2), aus denen sich 156 Neubauten mit einer Bruttoleistung von 166 GW ergeben.

Abbildung 14: Anzahl der Reaktoren in Betrieb bis zum Jahr 2020 nach IAEA und ATW



Quelle: IAEA/PRIS 2009a, ATW 2009b. „Vorgeschlagen“ bedeutet „Vorplanung“ im Sinne von ATW. Wir unterstellen hier, dass alle momentan von der IAEA als „in Bau“ eingestuft Reaktoren bis zum Jahr 2020 fertiggestellt werden.

Abbildung 15: Bruttoleistung der Reaktoren in Betrieb bis zum Jahr 2020 nach IAEA und ATW in GW



Quelle: IAEA/PRIS 2009a, ATW 2009b. „Vorgeschlagen“ bedeutet „Vorplanung“ im Sinne von ATW. Wir unterstellen hier, dass alle momentan von der IAEA als „in Bau“ eingestuft Reaktoren bis zum Jahr 2020 fertiggestellt werden.

3.4 Analyse der IAEA-Baustatistik

(1) Die IAEA führt eine Liste der in Bau befindlichen Kernkraftwerke, die allerdings keine detailliertere Auskunft über den tatsächlichen Stand der Bauaktivitäten liefert. Daher wurde die Baustatistik mit anderen Quellen abgeglichen, um die Reaktoren in jeweils eine von drei **Kategorien** einzuordnen:

- „Bau begonnen“ (d. h. Fertigstellung dauert länger als 2 Jahre),
- „Bau stagniert“ oder
- „Vollendung in den nächsten 2 Jahren“.

Insbesondere die zweite Kategorie ist von Bedeutung für die Zukunft, da ein Reaktor, dessen Bau momentan stagniert, unter Umständen gar nicht, oder nicht so schnell fertiggestellt werden kann, wie dies ansonsten im Mittel zu erwarten wäre.

(2) Im **Ergebnis** konnten die 45 von der IAEA als „in Bau“ befindlich aufgelisteten Reaktoren folgendermaßen kategorisiert werden (Tabelle 2): Insgesamt wurde der Bau von 27 Reaktoren

erst vor kurzem begonnen; weitere neun werden voraussichtlich in den nächsten zwei Jahren vollendet werden. Bei den verbleibenden acht Reaktoren stagniert der Bau. Auffällig hieran ist, dass sieben von ihnen in Europa zu finden sind.

Bereinigt man die 45 laut IAEA als „in Bau“ gekennzeichneten Reaktoren um die stagnierenden acht Projekte, ist die tatsächliche Bauaktivität auf 37 Projekte beschränkt; und mehr als drei Viertel dieser Projekte werden in Asien durchgeführt.

In unserer Modellierung des Entwicklungspfads (vgl. Kap. 5) nehmen wir daher an, dass bis 2030 nur 37 Reaktoren fertiggestellt werden.

Tabelle 2: Baustatistik der IAEA und Klassifizierung des Baufortschritts im Jahr 2009

	insgesamt in Bau laut IAEA	davon		
		Bau begonnen	Bau stagniert	Vollendung in den nächsten 2 Jahren
Amerika				
Rest-Amerika				
Argentinien	1	1		
USA*	1	1		
Asien				
China	12	11		1
Indien	6		1	5
Rest-Asien				
Iran	1			1
Japan	2	1		1
Südkorea	5	4		1
Pakistan	1	1		
Taiwan, China	2	2		
Europa				
Osteuropa				
Bulgarien	2		2	
Ukraine	2		2	
Russland	8	5	3	
Westeuropa				
Finnland	1	1		
Frankreich	1	1		
Summe	45	28	8	9

*Quelle: IAEA/PRIS 2009a, WNA, WNN, u. a. * Wiederaufnahme eines bereits 1972 begonnenen Projektes. Eine detaillierte Auflistung der Reaktoren, deren Bau stagniert, findet sich im Anhang in Tabelle 13.*

4 Herausforderungen für die Kernenergienutzung

Bei der Entwicklung der weltweiten Kernenergienutzung und insbesondere hinsichtlich des Neubaus von Kernkraftwerken müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Erstens sollten die personellen und maschinellen Kapazitäten der Kraftwerkshersteller und ihrer Zulieferer für die gleichzeitigen weltweiten Bauvorhaben ausreichen. Zweitens sollten die Brennstoff- und insbesondere die Uranversorgung für die geplante Laufzeit der Neubauten gewährleistet sein. Drittens kann auch die technologische und gesetzgeberische Entwicklung auf den Energiemärkten für den Ausbau hinderlich oder förderlich sein, denn diese beeinflusst die Wirtschaftlichkeitsrechnung für den Bau und Betrieb eines Kernkraftwerkes. Schließlich sollten viertens ökonomisch attraktive Investitions- und Finanzierungsbedingungen für den kapitalintensiven Bau von Kernkraftwerken vorliegen. Ein Neubau von Kernkraftwerken steht somit vor Herausforderungen in den Bereichen **industrielle Infrastruktur** (4.1), **Brennstoffversorgung** (4.2), **Energiemarktentwicklung** (4.3), **Finanzierung** (4.4) und **sonstige Herausforderungen** (4.5).

4.1 Industrielle Infrastruktur

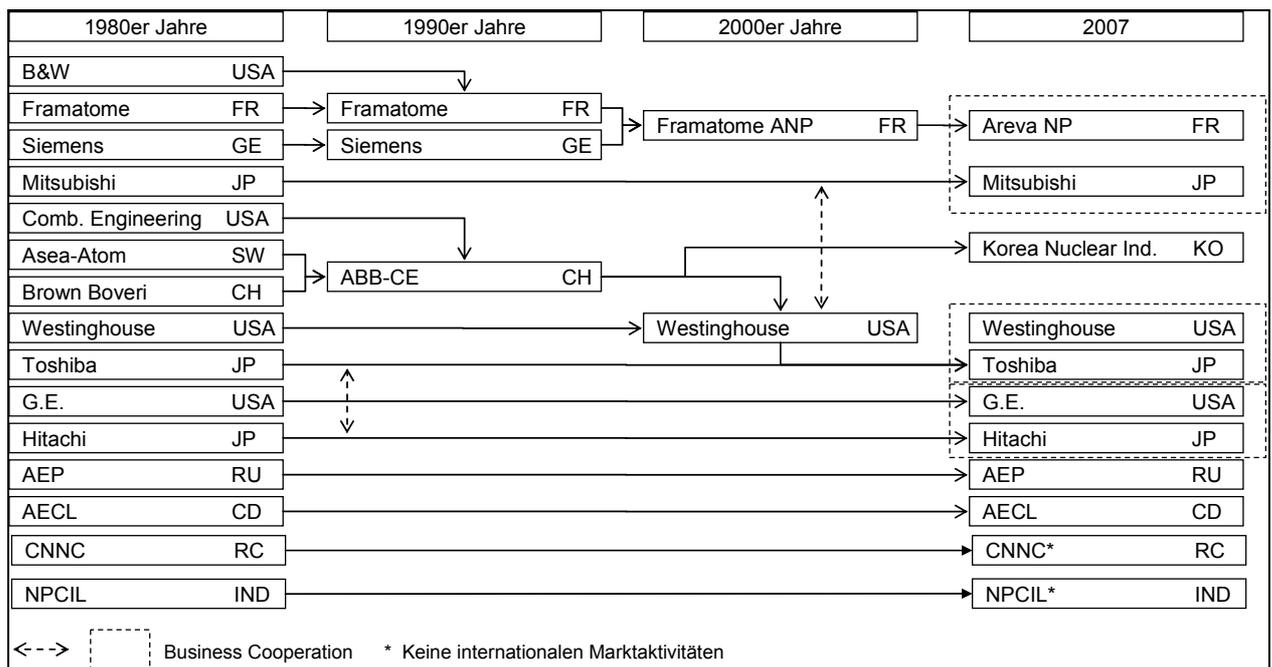
(1) Für den Bau eines Kernkraftwerkes ist eine komplexe industrielle Infrastruktur mit – zunehmend internationaler – Arbeitsteilung zwischen Herstellern und Zulieferern nötig. Eine solche Infrastruktur existiert zwar, allerdings wurden in den letzten zwanzig Jahren, verglichen mit dem Höchststand 1979, weltweit nur wenig neue Kernkraftwerke gebaut und in Betrieb genommen. Daher ist diese Infrastruktur gegenüber den 1970/1980er-Jahren deutlich zurückgebaut worden (IAEA 2008j, S. 17; Freeman 2006). Es ist zu prüfen, in welchem Maße die bestehende Infrastruktur Kernkraftwerksneubauten tragen kann und welche Möglichkeiten zum Ausbau der Infrastruktur bestehen. Potenzielle Hindernisse zeigen sich vor allem bei den **Hersteller- und Zuliefererkapazitäten**, den **Rohstoff- und Baupreisen**, den Fertigungsanforderungen (insbesondere den **Sicherheitsbedingungen**) sowie der **personellen Situation**.

Kapazitäten der Hersteller und Zulieferer

(2) Der Markt für **Kernkraftwerke** ist oligopolartig strukturiert. Derzeit gibt es weltweit elf Hersteller, von denen zwei (die chinesische CNNC und die indische NPCIL) nicht international tätig sind. Sechs weitere haben sich zu insgesamt drei Firmenkooperationen zusammengeschlossen (vgl. Abbildung 16). International konkurrieren derzeit also lediglich sechs Unternehmen. Allerdings

ist zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Hersteller nicht dieselben Produkte anbieten, sondern sich auf verschiedene Kraftwerkstypen spezialisiert haben. Das heißt, dass nicht jeder Hersteller jeden Bauauftrag auch bedienen kann, weil in den einzelnen Ländern verschiedene Kraftwerkstypen bevorzugt werden.

Abbildung 16: Entwicklung der Marktstruktur im Bereich der Hersteller von Kernkraftwerken, Stand: 2007



Quelle: IAEA 2008k, Thomas et al. 2007, eigene Darstellung

(3) Über die **Kapazitäten der Hersteller** ist nur wenig bekannt (vgl. Tabelle 3). Nach eigenen Angaben kann Areva NP derzeit jährlich zwei bis drei Reaktoreinheiten bauen, allerdings wird die (Fertigungs-)Kapazität derzeit auf fünf bis sechs Einheiten pro Jahr ausgebaut (WNA 2009f; Areva 2009a)³. Mitsubishi strebt nach den jüngsten Investitionen in die beiden Fertigungsstätten eine Produktion von bis zu vier Reaktoreinheiten pro Jahr an (Areva 2009b, JAIF 2008, WNN 2008, Suga 2008). Die Kapazität der russischen Herstellergruppe scheint bei zwei bis drei Reaktoreinheiten pro Jahr zu liegen (Areva 2009b). Für die übrigen Hersteller liegen keine Kapazitätsangaben vor.

³ Aus der vorliegenden Literatur ist leider nicht klar ersichtlich, ob Areva damit im Maximalfall jedes Jahr zwei bis drei bzw. fünf bis sechs Reaktoreinheiten gleichzeitig *fertigstellen* oder lediglich *bearbeiten* kann.

Tabelle 3: Angestrebte Kapazitäten ausgewählter Hersteller von Kernkraftwerken

Hersteller	maximale Produktionskapazität (Reaktoreinheiten / Jahr)
Areva	6
Mitsubishi	4
AEP	3

Quelle: Areva 2009a, Areva 2009b, JAIF 2008, WNA 2009f

(4) Die genannten Zahlen berücksichtigen bereits die jüngsten Investitionen und Erweiterungen der Hersteller, die voraussichtlich erst 2011 abgeschlossen sein werden. Dabei ist zu beachten, dass die Schätzungen auf Herstellerangaben beruhen und möglicherweise aus eigenem Interesse tendenziell zu hoch angesetzt sind. Nicht berücksichtigt ist hingegen eine mögliche dynamische Anpassungsreaktion der Hersteller auf Nachfrageveränderungen, d. h. eine Ausweitung der Kapazitäten im Falle erhöhter Nachfrage. Die genannten Zahlen sind daher als **angestrebte Obergrenzen der Produktionskapazität seitens der Hersteller** zu verstehen.

(5) Dabei sind Engpässe auf Seiten der **Zulieferer** noch nicht berücksichtigt. Jede Reaktoreinheit des Typs Siedewasserreaktor und Druckwasserreaktor benötigt einen sehr großen Reaktordruckbehälter. Derzeit ist weltweit lediglich ein Zulieferer – Japan Steel Works – in der Lage, Reaktordruckbehälter der erforderlichen Größe und Masse von mehr als 500 Tonnen aus einem Guss herzustellen (Areva 2009a, Morris et al. 2007). Japan Steel Works maximale jährliche Produktionskapazität beträgt derzeit vier Reaktordruckbehälter. Bis 2012 ist eine Erweiterung auf bis zu zwölf Reaktordruckbehälter pro Jahr geplant (WNA 2009f).

Das bedeutet, dass die weltweite **jährliche Produktionskapazität für Kernkraftwerke** vom Typ Siedewasserreaktor und Druckwasserreaktor **seitens der Zulieferer** in der näheren Zukunft auf zwölf Reaktoreinheiten pro Jahr begrenzt ist. Zwar wäre es prinzipiell möglich, Reaktordruckbehälter der erforderlichen Größe aus mehreren verschweißten Teilen herzustellen, allerdings haben sich Reaktordruckbehälter aus einem Guss als Sicherheitsstandard etabliert, da Schweißnähte Schwachstellen darstellen und Aufwand, Kosten und Zeit für Kontrolle und Wartung erhöhen. Da zudem der Reaktordruckbehälter in einer relativ frühzeitigen Bauphase in den Rohbau integriert werden muss, ist Japan Steel Works daher vorerst für große Reaktoren vom Typ Siedewasserreaktor und Druckwasserreaktor ein Engpass. Die Warteliste dieses Zulieferers beträgt (ebenso wie bei Le Creusot, dem zweitgrößten Hersteller von schweren Gusserzeugnissen) derzeit drei

Jahre (Areva 2009a, Frogatt 2008). Die Hersteller haben darauf reagiert und lassen bereits jetzt Reaktordruckbehälter für erwartete, noch nicht eingegangene Bestellungen bei Japan Steel Works herstellen; dass sie bereit sind, dafür eine Anzahlung von 100 Millionen \$ zu leisten, unterstreicht die Marktmacht dieses Zulieferers (Takemoto & Katz 2008).

Reaktordruckbehälter für **Reaktoren kleineren Typs** können auch von anderen Herstellern – China First Heavy Industries (China), OMZ Izhora (Russland), Doosan (Südkorea) und Le Creusot (Frankreich) – gegossen werden. OMZ Izhora kann derzeit zwei, bis 2011 vier Reaktordruckbehälter pro Jahr herstellen (WNA 2009f). Die Kapazitäten der übrigen Hersteller sind unbekannt. Zwar sind auch bei diesen teilweise Ausweitungen sowohl hinsichtlich der Kapazitäten als auch hinsichtlich der maximalen Größe der hergestellten Produkte geplant (Areva 2009b), allerdings wird es einige Zeit dauern, bis andere Zulieferer die Maschinen und die Expertise entwickelt haben werden, um zertifizierte Reaktordruckbehälter der Größe und Qualität von Japan Steel Works herstellen zu können (Oden 2009, Takemoto & Katz 2008, Morris et al. 2007).

Erschwerend kommt hinzu, dass die Hersteller von Kernkraftwerken mit **anderen Sektoren** (insbesondere der Petrochemie) um Produktionskapazitäten bei den Herstellern für ultraschwere Erzeugnisse konkurrieren (Harding 2007). Das bedeutet, dass sich die Produktionsengpässe – preislich und/ oder mengenmäßig – weiter verschärfen können, wenn es auch in anderen Sektoren zu Nachfragesteigerungen kommt.

(6) Abgesehen von Reaktordruckbehältern sind auch bei **anderen Komponenten** Produktionsengpässe absehbar. Dazu zählen:

- Dampferzeuger,
- Verdichter,
- Reaktorkühlungspumpen,
- Wärmetauscher,
- Dieselgeneratoren,
- Ventile,
- reaktortaugliche Nickellegierungen,
- spezielle Rohrsysteme und
- Kontrollinstrumente.

Teilweise müssen diese Komponenten für jedes neu gebaute Kernkraftwerk spezifisch hergestellt werden (Bubb et al 2005, NEI

2007a, Frogatt 2008, Harding 2007, Morris et al. 2007). So kann beispielsweise lediglich Creusot Forge derzeit reaktortaugliche Rohrleitungssysteme für Reaktoren der Generation III+ herstellen (Areva 2009a). Allerdings lassen sich die Kapazitäten der Zulieferer für diese Vorleistungen schneller anpassen als dies bei den ultraschweren Gusserzeugnissen der Fall ist. Auch bei diesen Komponenten konkurrieren die Hersteller von Kernkraftwerken aber mit anderen Sektoren.

(7) Es bleibt festzuhalten, dass auf Seiten der Zulieferer – insbesondere im Bereich der ultraschweren Erzeugnisse für Reaktordruckbehälter – **Engpässe** bestehen, die einem schnellen Ausbau der weltweiten Kernenergienutzung im Weg stehen könnten (Bubb et al. 2005; Schlissel & Biewald 2008; NEA 2008, 316, Moody's 2007, 9). Eine Anpassung der Produktionskapazitäten auf Seiten der Hersteller und insbesondere der Zulieferer ist grundsätzlich möglich, allerdings ist in diesem Fall mit Verzögerungen im weltweiten Neubau von Kernkraftwerken zu rechnen.

Rohstoff- bzw. Konstruktionspreise (z. B. Stahl)

(8) In den letzten Jahren sind die **Preise für Rohstoffe** und für daraus unmittelbar hergestellte Produkte (wie Stahl) **stark gestiegen**. Im Allgemeinen sind hier die grundsätzlichen **Treiber**

- die stark wachsende Nachfrage, insbesondere durch das Wachstum in den asiatischen Ländern wie China und Indien,
- (geo-)politische Instabilitäten,
- Engpässe bei der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen sowie
- Monopol- und Oligopol-Märkte in verschiedenen Sektoren.

(9) Der **schwache Dollarkurs** treibt die in US-Dollar ausgedrückten Preise zusätzlich in die Höhe. In Euro gemessen fielen die Preissteigerungen weniger stark aus.

(10) Die Erzeugung von Stahlprodukten stieg in den letzten Jahren erheblich. Wurden 2001 ca. 800 Mio. t Stahl produziert, so betrug dieser Wert 2007 ca. 1.300 Mio. t (Deutsche Industriebank 2008). Die **Nachfrage** lässt sich durch den Ausbau der Infrastruktur insbesondere in den asiatischen Schwellenländern, aber auch durch große Verkehrsinfrastruktur- und Logistikprojekte in Europa und in den USA erklären. Hinzu kommt die Sonderkonjunktur in der westeuropäischen Maschinenbau- und Automobilindustrie (Deutsche Industriebank 2007).

(11) Die Preise für Stahl wurden durch den höheren **Erzpreis** getrieben. Dieser stieg von etwa 30 \$/t in 2003 bis auf 140 \$/t in 2008 (Deutsche Industriebank 2008). Grund für diesen Anstieg waren die hohe Nachfrage, knappe Gewinnungskapazitäten und die oligopolistische Angebotsstruktur im Erzmarkt (Hennes 2006a).

Eine leichte Entspannung hat sich im Rahmen der **Finanzkrise** ergeben. Allerdings bewegen sich die Preise noch auf dem Niveau von 2006/2007. Eine strukturelle Entspannung bei den Preisen ist langfristig nicht oder nur in wenigen Märkten zu erwarten (Deutsche Industriebank 2007, 2008).

Die Entwicklung der Stahlpreise hat sich auf die Baukosten eines neuen Kernkraftwerkes ausgewirkt, wie sich beispielsweise in Finnland zeigt (Sailer 2007). Aber auch die Kosten für **Konkurrenztechnologien** sind gestiegen. So betragen die Kosten für Steinkohlekraftwerke derzeit ca. 1.800 €/kW, statt wie noch vor einigen Jahren 1.100 €/kW. Die Investitionskosten eines Gas- und Dampf-Turbinenkraftwerkes sind von ca. 500 auf 800-900 €/kW gestiegen (Prognos 2008a). Die Kostensteigerung der Konkurrenztechnologien ist zum Teil auch auf die Kapazitätsengpässe der Kraftwerkshersteller zurückzuführen.

Sicherheitsaspekte

(12) Sicherheitsvorkehrungen in einem Kernkraftwerk können aktiver oder passiver Art sein. **Passive Sicherheitsvorkehrungen** basieren auf Mechanismen, die im Falle einer Fehlfunktion zur Verhinderung von schweren Unfällen keine aktiven Steuerelemente oder menschliche Betriebseingriffe benötigen, sondern auf Schwerkraft, natürlicher Konvektion, elektrischem oder physischem Widerstand oder physikalischen Temperaturgrenzen basieren (PSI 2005). Kernkraftwerke der Generation III und III+ setzen vermehrt auf passive Sicherheitselemente.

(13) Es kann unterstellt werden, dass die Sicherheit eines neuen Kernkraftwerks – auf jeden Fall in Europa und in den USA – auf einem hohen Stand liegen wird. Neue Kraftwerke müssen die Standards der IAEA erfüllen und Genehmigungen in den einzelnen Ländern erhalten. Ein **hoher Sicherheitsstandard** ist mit hohen spezifischen Investitionskosten verbunden. Dies ist beispielsweise anhand der Kosten für Kernkraftwerke in Japan ableitbar, da dort die Kernkraftwerke stärker gegen mögliche Erdbeben geschützt werden müssen. Die Investitionskosten für ein neues Kernkraftwerk in Japan wurden in einer IEA-Studie im Jahr 2005 mit 2.500 \$/kW abgeschätzt, wobei der Durchschnitt von 13 ausgewählten Ländern bei 1.700 \$/kW lag (IEA 2005).

Aus diesem Zusammenhang zwischen Sicherheitsstandards und Kosten ergibt sich allerdings in liberalisierten Energiemärkten, in denen Kernenergie mit anderen Kraftwerken konkurriert (vgl. 4.3), auch ein **Spannungsfeld**: Je größer für die Kernenergie-Betreiber der Druck ist, gegenüber anderen Energieträgern im Wettbewerb zu bestehen, desto höher ist der Anreiz, Kosten auch im Bereich der Sicherheitsstandards zu senken. Darüber, inwieweit sich dieser prinzipiell bestehende Anreiz in der Realität bemerkbar macht, liegt allerdings keine Literatur vor.

(14) Für die (Betriebs-)Bewilligungen eines Kernkraftwerkes ist die erforderliche Sicherheit zu gewährleisten. Hierzu werden u. a. Sicherheitsstandards und qualifizierte (nationale und internationale) Kontrollbehörden benötigt. Trotz hoher Sicherheitsstandards können schwere Unfälle (Kernschmelzen) bei der hier betrachteten Reaktorgeneration III / III+ nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Vielmehr kann durch neue Sicherheitssysteme lediglich deren Eintrittswahrscheinlichkeit weiter verringert werden (Sailer 2007; Streffer et al. 2005).

(Qualifiziertes) Personal

(15) Die Anzahl der Arbeitskräfte, die für den Bau, die Inbetriebnahme und den dauerhaften Betrieb eines Kernkraftwerkes benötigt werden, variiert je nach Reaktortyp, Reaktorgröße und Standort. In den USA werden für den Bau einer Reaktoreinheit der Generation III+ etwa 1.600 Arbeitskräfte benötigt (Bubb et al. 2005, 3-6f., 6-21ff., vgl. Tabelle 4). Dabei handelt es sich auch im Bereich des Baus der Anlage um hochqualifiziertes und spezialisiertes Personal mit teils langen Ausbildungszeiten.

Tabelle 4: Personalbedarf für Bau, Inbetriebnahme und Betrieb eines Kernkraftwerkes

Arbeitsbereich	Anzahl der benötigten Arbeitskräfte pro Reaktoreinheit
Bau	1.600
Aufsicht, Kontrolle, Inbetriebnahme	600
dauerhafter Betrieb, davon:	200
- medizinische Physiker*	33
- Leitstandfahrer	17
- Erfahrene Leitstandfahrer	25
- Wartungstechniker	125
Gesamt	2.400

*Quelle: Bubb et al. 2005, 3-6f, 6-21ff. * „Health Physicist“ – ein Berufsbild, das in Deutschland so nicht existiert, aber dem Strahlenschutzbeauftragten am nächsten kommt.*

(16) Bei einem weltweiten simultanen Neubau von zahlreichen Kernkraftwerken müsste ein Vielfaches dieser Arbeitskräfte mobilisiert werden können. Die 1.600 baubezogenen Arbeitskräfte sind für die Dauer des Baus (etwa fünf Jahre) gebunden (The Watt Committee 1984). Der Spitzenbedarf beim gleichzeitigen Bau von n Reaktoreinheiten liegt – bei zeitlich leicht versetzten Baubeginn – bei rund $0,675 \cdot 1.600 \cdot n$ (Bubb et al. 2005, 3-5). Diverse Studien weisen darauf hin, dass das weltweite und regionale Arbeitskraftpotenzial nicht ausreichen könnte (Morris et al. 2007, 35; Hawkins 2008, 30; Bubb et al. 2005, V, 2-3, 2-5, 6-2; House of Commons 2009, 18; NEI 2007b).

(17) Insgesamt führen fünf Faktoren zu einer **angespannten Personalsituation**. Da in den vergangenen zwanzig Jahren nur wenige neue Kernkraftwerke gebaut wurden und die bestehenden Kraftwerke zudem immer effizienter betrieben werden mussten, haben die Hersteller und Betreiber erstens ihren Personalbestand reduziert. In vielen Ländern mit Nukleartechnologie fehlen für den Kernkraftwerksbau qualifizierte Bauarbeiter, insbesondere Kesselbauer, Rohrinstallateure, Elektriker und Stahlbaumonteur. Auf dem internationalen Markt sind hochqualifizierte Fachkräfte für die Aufsicht, die Inbetriebnahme und den Betrieb knapp. Dies gilt insbesondere für Ingenieure, Nuklear-Ingenieure, Inspektoren, Leitstandfahrer und Wartungstechniker. Der **derzeitige Bestand an nötigem Fachpersonal** ist also für einen weltweiten Neubau von Kernkraftwerken nicht ausreichend.

Zweitens ist ein Großteil der Arbeitskräfte, die heute weltweit Kernkraftwerke betreiben und warten, in den Bauboomphasen der 1970er-Jahre angestellt worden und wird bald aus dem Dienst ausscheiden. Im Vereinigten Königreich betrifft dies in den kommenden zehn Jahren zwischen 18 % und 40 % aller Beschäftigten im Nuklearbereich (Pagnamenta 2007, 1; House of Commons 2009, 19). Auch in den USA und in Frankreich wird sich der zukünftige Personalbestand deutlich verringern (Morris et al. 2007, 50; Schneider & Froggatt 2007). Daraus ergibt sich ein **altersbedingter personeller Ersatzbedarf**, um lediglich die derzeitige Anzahl von Kernkraftwerken im Betrieb zu halten. Dies verschärft die personelle Situation zusätzlich.

Drittens ist zu beachten, dass die Hersteller von Kernkraftwerken **mit anderen Bereichen** um dieselben Fachkräfte **konkurrieren**. Ingenieure mit der nötigen Ausbildung sind auch im Militärwesen, dem zivilen Infrastrukturbau und der nuklearen Entsorgung gefragt (House of Commons 2009, 19). Bau-Facharbeiter werden auch bei Infrastrukturprojekten ähnlicher Größenordnungen benötigt.

Viertens haben sich im Zuge der schwachen Nachfrage und der schlechten Arbeitsmarktaussichten in den letzten Jahren auch die Ausbildungskapazitäten für entsprechend qualifiziertes Betriebs-

personal verringert (Schneider & Froggatt 2007). So ist zum Beispiel die Zahl der Ausbildungsprogramme in den USA seit 1980 von 65 auf 29 gefallen. In Deutschland werden von den 22 Ausbildungsprogrammen, die es im Jahr 2000 gab, 2010 noch fünf übrig bleiben (Schneider & Froggatt 2007). Eine solche Entwicklung war für Deutschland schon Mitte der 90er-Jahre absehbar gewesen (Knorr 1995). Kraftwerkssimulatoren für die Ausbildung von Leitstandsfahrern sind knapp. Da diese für jedes Kraftwerk spezifisch angepasst werden müssen, rechnet das US-amerikanische Energieministerium auch hier mit Engpässen (Bubb et al. 2005, 4-2). Für eine weltweite Renaissance der Kernenergie müssten diese **fehlenden Ausbildungskapazitäten** zunächst wieder aufgebaut und auf den neuesten Stand des Wissens gebracht werden – sowohl an den Universitäten als auch innerhalb der Firmen, die die Kernkraftwerke betreiben. Dabei wird der Wissenstransfer in der Ausbildung insbesondere durch das bereits genannte altersbedingte Ausscheiden der erfahrenen Beschäftigten erschwert.

Fünftens schließlich ist es aufgrund **langer Ausbildungszeiten** schwierig, die personellen Kapazitäten unverzüglich auszuweiten. Die Mindestausbildungszeit für einen Kernenergieingenieur mit minimaler Erfahrung betrug beispielsweise 1984 fünf Jahre (The Watt Committee 1984, 34). Auch Wartungstechniker, die den überwiegenden Teil des Betriebspersonals ausmachen (vgl. Tabelle 4), durchlaufen wegen der hohen Sicherheitsanforderungen ein spezielles, längeres Ausbildungsprogramm (Bubb et al. 2005, 6-23).

(18) Obwohl sich die genauen **Auswirkungen dieser fünf Faktoren** nicht quantifizieren lassen, ist davon auszugehen, dass die personelle Situation im Bereich der Kernenergie(bau)technik einen simultanen weltweiten Neubau von Kernkraftwerken verzögern kann. Dies deckt sich mit vielen Einschätzungen der Literatur (IAEA 2008j, 31f.; IEA 2006, 360f.; NEA 2008, 316; Harding 2007, 5; Squassoni 2008; Bruzzano et al. 2008, 89). Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass dasselbe hochqualifizierte Personal während der weltweiten Bauphase gleichzeitig auch für die Stilllegung von älteren Kernkraftwerken und die Entsorgung nuklearer Abfälle benötigt wird. Es ergibt sich hier eine Konkurrenzsituation innerhalb der Nuklearbranche.

Allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass die personellen Engpässe nicht in allen Ländern gleich sein müssen. Sie entstehen durch die hohen Qualifikationsanforderungen und die damit verbundene lange Ausbildungszeit.

In **China** führt der schnelle Ausbau beispielsweise bereits zu einem Mangel an passend ausgebildeten Ingenieuren und Naturwissenschaftlern, was zu einem Sicherheitsproblem werden könnte. Um Forschungsinstitute angemessen personell

auszustatten und um den Betrieb und die Überwachung von geplanten Kernkraftwerken gewährleisten zu können, müssten daher in naher Zukunft mindestens 13.000 entsprechende Spezialisten ausgebildet werden (Sternfeld 2009).

4.2 Brennstoffversorgung

(1) Bei der Herstellung von Brennelementen für den Einsatz in einem Reaktor werden folgende vier Schritte durchlaufen: Uranabbau, Konversion, Anreicherung und Brennelementherstellung. Nach dem Einsatz besteht die Möglichkeit zur Wiederaufbereitung der Brennelemente, die jedoch weltweit wegen der technisch-wirtschaftlichen Schwierigkeiten nur wenig genutzt wird. Diese Prozesskette wird hier auf **mögliche Engpässe** hin untersucht.

(2) Die **Reichweite der Uranressourcen** lässt sich bestimmen, indem man die Reserven und sonstigen konventionellen Ressourcen der Nachfrage von 66.500 Tonnen im Jahr 2006 gegenüberstellt. Hieraus ergibt sich eine statische Reichweite der Uranreserven von 50 Jahren, der identifizierten Uranvorkommen von 82 Jahren und der konventionellen Uranressourcen von 240 Jahren (BGR 2008).⁴ Beim Ausbau der Kernkraftwerkskapazitäten würde sich – unter ansonsten gleichen Bedingungen – die Reichweite entsprechend reduzieren. Ein **Engpass** im Hinblick auf die Reserven bzw. Ressourcen von Uran ist zumindest kurz- bis mittelfristig **nicht zu erwarten**.

(3) Die Uranvorkommen und damit die **Gewinnung von Uran** sind auf wenige Länder begrenzt (oligopolistischer Markt). Zudem reichen mit einer Förderung von etwa 40.000 t Uran pro Jahr die Gewinnungskapazitäten derzeit nicht aus, um die Nachfrage von etwa 65.000 t zu decken. Die überschüssige Nachfrage wird durch sekundäre Quellen gedeckt. Diese bestehen aus früher angelegten zivilen Lagerbeständen und aus strategischen (militärischen) Lagerbeständen insbesondere Russlands und der USA (BGR 2008). Zudem wird die Nachfrage zu einem geringen Teil durch die Wiederaufbereitung von Brennelementen gedeckt. Die sekundären Vorräte werden derzeit sukzessive ausgeschöpft. Ab etwa 2010-2015 sind **zusätzliche Gewinnungskapazitäten erforderlich**, um die Urannachfrage decken zu können. Hierzu können neue Minen

⁴ „Identifizierte Uranvorkommen“ werden abgeleitet aus Machbarkeitsstudien für Minen sowie weniger gut erkundeten Vorkommen, „Konventionelle Ressourcen“ sind Ressourcen, auf die aufgrund der Kenntnis der Geologie von Uranvorkommen und der bekannten regionalen geologischen Strukturen geschlossen werden kann sowie Ressourcen, die in Gegenden vermutet werden, die uranhaltige geologische Formationen aufweisen können (Prasser 2009).

erschlossen werden (Dauer: ca. 10 Jahre), die Kapazitäten bestehender Minen erweitert werden oder geschlossene Minen, die durch die geringen Uranpreise in den letzten zwei Jahrzehnten unrentabel geworden waren, bei steigenden Preisen wieder in Betrieb genommen werden. Bis zum Jahr 2020 ist hier voraussichtlich mit einem **Engpass** zu rechnen.

(4) Die **Konversion von Uran** ist nötig, um aus dem abgebauten Uran weiterverarbeitbare Uran-Verbindungen herzustellen. Über 90 % der weltweiten Konversionskapazitäten befinden sich in den Ländern Kanada, Frankreich, Russland, USA und Großbritannien (IAEA 2009). Ein wesentlicher Teil der bestehenden Konversionsanlagen muss in absehbarer Zeit ersetzt werden (IAEA 2008j). Kapazitätsneu- und -ausbauten solcher chemischen Anlagen sind allerdings verhältnismäßig schnell zu realisieren und sind deswegen **kein bedeutsamer Engpass**.

(5) Im Anschluss an die Konversion erfolgt die **Anreicherung** des Urans durch Anbieter in nur wenigen Ländern (Frankreich, Russland, Deutschland, Großbritannien, Niederlande, USA, China, Japan). Die derzeitigen Kapazitäten für die Anreicherung sind wie die Urangewinnungskapazitäten begrenzt (Combs 2006; Neff 2006b). Obwohl Gaszentrifugen zur Anreicherung verhältnismäßig schnell zu errichten sind und Areva und Urenco bereits neue Kapazitäten unter anderem in den USA planen, sind etwa um das Jahr 2015 in Europa und den USA **Engpässe** bei den Anreicherungskapazitäten zu erwarten (Combs 2006; Neff 2006b).

(6) Die **Herstellung von Brennelementen** für den Einsatz im Kraftwerk erfordert einen enormen technischen Aufwand. Die größten Herstellungskapazitäten befinden sich in Frankreich, Deutschland, Russland und den USA. In mindestens sieben anderen Ländern werden zudem Brennelemente hergestellt, meistens unter Lizenz eines Kraftwerksherstellers (IAEA 2008f). Es bestehen momentan **keine Kapazitätsengpässe** bei der Herstellung der Brennelemente. Angaben zu Engpässen in der näheren Zukunft wurden nicht gefunden.

(7) Die **Brennstoffkosten** von Kernkraftwerken werden von zwei Komponenten dominiert (vgl. Prognos 2008), den Kosten der Versorgung (inklusive Nutzung) und denen der Entsorgung. Letztere werden in Abschnitt 4.4 behandelt. Die Preise von Uran machen im Allgemeinen weniger als 25 % der **gesamten Brennstoffkosten** aus. Auf die Brennstoffkosten wiederum entfallen ca. 20 % der Stromgestehungskosten (PSI 2005; Prognos 2008; NEA & IEA 2005). Bei einer Verdopplung der Uranpreise steigen die Gestehungskosten somit um rund 5 %.

Änderungen des Uranpreises haben also einen geringen (jedoch nicht vernachlässigbaren) Einfluss auf die Brennstoffkosten. Im Gegensatz hierzu steht die Brennstoffabhängigkeit der Stromgestehungskosten bei Gas- und Dampf-Kraftwerken von über 70 % und bei Stein- und Braunkohlekraftwerken von etwa 50 % bzw. 25 % (ohne Einberechnung der CO₂-Zertifikatspreise).

Auf der Versorgungsseite spielen die Uranpreise eine bedeutende Rolle. Die Preise von Uran lagen zwischen 1990 und 2003 durch das Angebot aus sekundären Quellen (s. o.) auf einem niedrigen Niveau. Wegen der niedrigen Preise wurden unrentable Minen geschlossen. Da die sekundären Vorräte schnell ausgeschöpft werden, sind ab etwa 2015 **zusätzliche Gewinnungskapazitäten** erforderlich. Jedoch werden die Minen erst wieder rentabel, wenn die Uranpreise steigen. Aus diesem Grund könnten Engpässe entstehen. Bevor neue Minen für die Gewinnung bereit sind, könnte die Nachfrage das Angebot weit überschritten haben, mit entsprechenden Konsequenzen für die Preise – d. h. Volatilität und mögliche Peak-Preise (siehe Neff 2004, 2006a/b, 2007; Combs 2004, 2006).

In jüngster Zeit stiegen die Preise für Uran, und auch die Bandbreite der genannten Preise hat zugenommen; die Angaben liegen zwischen 20 \$ und 250 \$ pro kg Uran (MIT 2003; IEA 2004; Morris et al 2007). Angebotsengpässe und damit volatile Preise dürften bis etwa 2020 die Situation auf dem Uranmarkt bestimmen (Neff 2006a). Den Studien von Combs (2006) und Neff (2006a) zufolge dürfte sich ab etwa 2030 der Uranpreis wieder in der Höhe der tatsächlichen Gewinnungskosten bewegen. Die Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen ist im Vergleich zur Nutzung von Natururan kostenintensiver und spielt deshalb nur eine vergleichsweise geringe Rolle.

Im **Ergebnis** zeigt sich, dass Engpässe bei der Brennstoffversorgung zu höheren und volatileren Preisen im Zeitraum 2015 bis 2030 führen könnten. Da die Uranpreise jedoch eine vergleichsweise kleine Rolle bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Kernkraftwerken spielen, beeinflussen sie unserer Einschätzung nach die Entscheidung für oder gegen ein neues Kernkraftwerk nur in geringem Maße.

4.3 Entwicklungen in den Energiemärkten

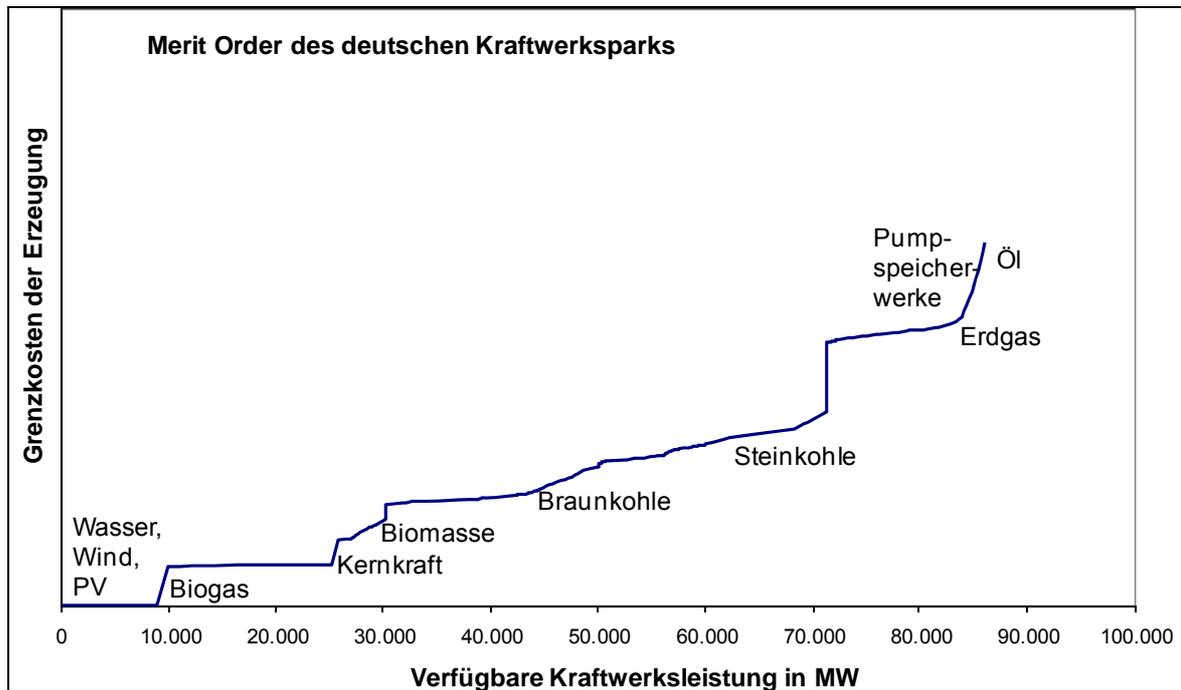
(1) In **regulierten Märkten** wird der Preis durch die Vollkosten eines Kraftwerkes (ggf. die Beschaffungskosten von Strom) bestimmt. Hier können höhere Gestehungskosten in der Regel auf die Endkunden umgewälzt werden. Die Endkunden können diesen Preiserhöhungen nicht entgehen, weil sie den Anbieter nicht wechseln können.

(2) In vielen westlichen Ländern wurden die Energiemärkte im letzten Jahrzehnt allerdings dereguliert, so dass das Angebot von und die Nachfrage nach Elektrizität den Preis bestimmen. Stromerzeugungsanlagen stehen im Wettbewerb.

In vielen **deregulierten Märkten** erfolgt der Kraftwerkseinsatz entsprechend der Grenzkostenlogik (Merit Order). Das Kraftwerk mit den niedrigsten Grenzkosten läuft am häufigsten; alle weiteren Kraftwerke sortieren sich gemäß ihrer Grenzkosten ein, bis die Last über das ganze Jahr gedeckt ist. Dabei bestimmt das jeweils letzte eingesetzte Kraftwerk (mit den höchsten Grenzkosten) den Preis, der für Strom aus allen Erzeugungsarten bezahlt wird – auch wenn diese teils niedrigere Erzeugungskosten haben. Dieser Preis wiederum bestimmt die Jahreserlöse eines Kraftwerks im jeweiligen regionalen Markt.

Abbildung 17 stellt beispielhaft die Merit Order des deutschen Kraftwerksparks dar. Je weiter links ein Kraftwerk steht, desto niedriger sind seine Grenzkosten und desto mehr Stunden pro Jahr wird es dementsprechend zur Stromerzeugung eingesetzt.

Abbildung 17: Merit Order des deutschen Kraftwerksparks



Quelle: Prognos AG. PV = Photovoltaik

(3) Im **Grundlastbereich** stehen Kernkraftwerke mit anderen Grundlastkraftwerken wie z. B. Braunkohlekraftwerken in Konkurrenz. Der CO₂-Zertifikatspreis dürfte die Kernenergie in diesem Fall begünstigen. Betreiber von Kohlekraftwerken werden die Kosten für CO₂ mit einpreisen. (Zukünftige) Kohlekraftwerke mit CCS (Carbon Capture and Storage) müssen diese Kosten zwar nicht (oder kaum) bezahlen bzw. einpreisen, dafür entstehen solchen Kraftwerken aber wegen der geringeren Wirkungsgrade höhere Brennstoffkosten.

Durch die relativ geringen Grenzkosten eines Kernkraftwerkes werden hohe jährliche Volllaststunden erreicht. So lange der Anteil der Kernenergie an der benötigten Grundlastkapazität gering ist, werden Kernkraftwerke keine Preisbestimmer, sondern Preisnehmer sein. Die **Rentabilität des Kernkraftwerkes** hängt somit mit den Grenzkosten des zuletzt eingesetzten Kraftwerkes zusammen, da dies bestimmt, in welchem Maße die Fixkosten (Kapital- und fixe Betriebskosten) gedeckt werden können. Anders gesagt: Die Rentabilität des Kernkraftwerkes hängt zum Teil vom Kraftwerksportfolio eines Landes ab. Da ein Kernkraftwerk besonders kapitalintensiv ist, muss ein Erlös über lange Zeit gegeben sein.

(4) Die Stromerzeugung aus **erneuerbaren Energien** (wie Windenergie) hat nahezu keine Grenzkosten, so dass die erneuerbaren weit vorne in der Merit Order auftreten und somit in Konkurrenz zur Kernenergie treten. Hinzu kommt, dass die er-

erneuerbaren Energien teilweise gesetzlichen Vorrang im Stromnetz genießen („must run“). Bei einem starken (forcierten) **Ausbau der erneuerbaren Energien** werden die Kernkraftwerke zunehmend in der Merit Order nach rechts verschoben und seltener eingesetzt. Dies kann auch dazu führen, dass in Zeiten hoher regenerativer Stromeinspeisung Kernkraftwerke heruntergeregelt werden müssen, da ihr Strom nicht mehr benötigt wird. Für eine häufige und kurzfristige Leistungsänderung sind Kernkraftwerke jedoch aus Sicherheits- bzw. technischen Gründen nicht geeignet.

Ein solcher Zielkonflikt zwischen erneuerbaren Energien und Kernkraft dürfte auch Eon bewusst sein. Im März 2009 war bekannt geworden, dass Eon in einem britischen Anhörungsverfahren davor gewarnt hatte, erneuerbare Energien unbegrenzt zu fördern, da Eon sich ansonsten gezwungen sehen könne, seine Neubaupläne für Kernkraftwerke in Großbritannien aufzugeben (Macalister 2009).

(5) Preisrisiken auf dem **freien Markt** können durch den Abschluss (langfristiger) Terminverträge vermindert werden. Die Investitionsrisiken einer Erzeugungsfirma sowie die Preisrisiken eines Abnehmers werden in diesem Fall geteilt. Für Kernkraftwerke mit hohen Investitionskosten können solche **Langfristverträge** die benötigte langfristige Sicherheit garantieren (vgl. die Finanzierung des im Bau befindlichen Kernkraftwerkes in Finnland).

4.4 Finanzierungsfragen

(1) Der Bau eines Kernkraftwerkes ist sehr kapitalintensiv (Gawlicki 2008, 23). Dabei machen die für den Bau aufzubringenden **Kapitalkosten** typischerweise gut 60 % der Gesamtgestehungskosten von Kernenergie aus (IAEA 2008j, 27; NEA & IEA 2005). Die Wirtschaftlichkeit eines Kernkraftwerkes hängt daher entscheidend von den Bedingungen ab, unter denen Betreiber den Bau ihres Kernkraftwerkes finanzieren können.

Die Investitionskosten bzw. Kapitalkosten eines Kernkraftwerks weisen in der Literatur eine **große Spannweite** auf. Wie man am Beispiel ausgewählter Kernkraftwerke in Tabelle 5 erkennen kann, schwanken die Angaben je nach Land sehr deutlich. Die spezifischen Kosten, also die Kosten pro Kilowatt installierter Leistung, liegen zwischen 670 €/kW und 5.500 €/kW.

Tabelle 5: Erwartete Baukosten derzeit geplanter oder in Bau befindlicher Kernkraftwerke

Region	Land	Kraftwerk	Spez. Kosten min. (€/kW)	Spez. Kosten max. (€/kW)	Gesamtkosten min. (Mrd. €)	Gesamtkosten max. (Mrd. €)	Kommentar
Amerika	USA	Turkey Point	1.660	5.500	k.A.	k.A.	Minimum entspricht den reinen Baukosten. Maximum beinhaltet zusätzlich Finanzierungs- und Infrastrukturkosten.
		"green field"-Standort	2.350	4.300	5,20	9,52	Minimum entspricht den Entwicklungs- und Baukosten. Maximum beinhaltet zusätzlich Grundstücks-, Erschließungs- und Finanzierungskosten.
		Bellefonte 3 & 4	1.700	5.300	3,81	11,90	Minimum entspricht den kombinierten Baukosten. Maximum entspricht laut Betreiberinformationen den "total cost of ownership".
Asien	China	Yangjiang 1	1.000	1.380	6,87	9,00	Die Gesamtkosten beziehen sich auf alle 6 Blöcke, die am Standort Yangjiang gebaut werden.
		Hongyanhe 1	1.100	1.200	4,80	5,10	Die Gesamtkosten beziehen sich auf alle 4 Blöcke, die am Standort Hongyanhe gebaut werden.
	Indien	Kudankulam	1.000	2.400	2,00	4,76	Die Gesamtkosten beziehen sich auf beide Blöcke, die am Standort Kudankulam gebaut werden.
	Japan	Shimane 3 Tomari 3	k.A. 2.200	3.300 k.A.	k.A. 2,00	4,50 k.A.	
Europa	Russland	Leningrad 2-1	670	1.900	1,56	4,50	Die Gesamtkosten beziehen sich auf beide Blöcke, die am Standort Leningrad 2 gebaut werden.
		Severodvinsk 1 & 2	3.500	3.800	0,25	0,27	Die Leistung der jeweiligen Blöcke beträgt 35 MW. Daher sind die spez. Kosten im Vergleich zu anderen russischen Kernkraftwerken entscheidend.
	Finnland	Olkiluoto-3	1.740	3.080	3,00	5,30	Fraglich, ob die Kosten weiter ansteigen oder nicht.
	Frankreich	Flamanville 3	2.000	2.400	3,30	4,00	Fraglich, ob die Kosten weiter ansteigen oder nicht.

Quelle: ATW 2000, ATW 2007b, ATW 2009a, WNA 2008, WNA 2009b, WNA 2009h, HB 2008, Thomas et al. 2007, Verivox 2009b, Asia Times 2002, NPCIL 2008, PowerTech 2009, Rosatom 2008, Spiegel 2006, FT 2009. Die Kostenangaben sind gerundet.

Problematisch bei Kostenangaben zu Kernkraftwerken ist oftmals die schwache Informationslage und die Unklarheit darüber, welche entstandenen Kosten überhaupt mit einbezogen werden. Dies verdeutlichen vor allem die Kostenangaben zu **US-amerikanischen Kernkraftwerken**. Die Angaben zu den spezifischen Kosten bewegen sich hier zwischen 1.600 €/kW und 5.500 €/kW. Das liegt u. a. an den unterschiedlichen Berechnungsarten. Die Kraftwerksbetreiber geben teilweise lediglich die Entwicklungs- und Baukosten an bzw. schließen die Infrastruktur- und Finanzierungskosten mit ein. Letztere hängen auch stark vom Zinssatz und der Bauzeit ab. Verzögerungen beim Bau führen, wie die Beispiele in Finnland

und Frankreich zeigen, zu erhöhten Investitions- und Finanzierungskosten.⁵

Zudem beruhen manche Informationen auf Herstellerangaben und Vertragssummen (Beispiel China). Oder die Angaben beziehen sich, wie im Fall von Indien, auf die geplanten Kosten. Diese geplanten Kosten wurden in Indien bei vergangenen Kernkraftwerksprojekten jedoch häufig überschritten und beliefen sich am Ende auf etwa 170 % bis hin zu fast 400 % der ursprünglich veranschlagten Budgets (Thomas et al. 2007).

Auch die Leistung einer Anlage spielt grundsätzlich eine Rolle bei der Höhe der spezifischen Kosten. So sind die „schwimmenden“ Kernkraftwerke (Severodvinsk 1 & 2) mit je 35 MW Leistung spezifisch teurer als die Großanlagen mit über 1.000 MW. Aus Kostengründen werden deshalb in der Regel größere Anlagen bevorzugt. Außerdem bleibt in vielen Fällen unklar, inwieweit schon Stilllegungs- und Entsorgungskosten in den Angaben enthalten sind.

Diese hier dargestellten Kostenangaben für den Bau von Kernkraftwerken müssen mit den Kosten der **Konkurrenztechnologien** verglichen werden. So betragen die spezifischen Investitionskosten für Steinkohlekraftwerke derzeit ca. 1.800 €/kW, die eines Gas-und-Dampf-Turbinenkraftwerks ca. 800 bis 900 €/kW (Prognos 2008a). Der Vergleich zeigt, dass vor allem Gas-und-Dampf-Turbinenkraftwerke weit geringere spezifische Kosten haben als Kernkraftwerke. Aber auch Steinkohlekraftwerke liegen üblicherweise unterhalb der spezifischen Kosten von Kernkraftwerken.

(2) Die **Finanzierungsbedingungen** zum Bau von Kernkraftwerken haben sich seit den 1980er-Jahren grundlegend verändert (IAEA 2008i). Der überwiegende Teil der heute weltweit betriebenen Kernkraftwerke wurde in regulierten Elektrizitätsmärkten gebaut. Dies bedeutete gesicherte Kundenstämme und ausreichende Strompreise, um kostendeckend zu operieren. Die Investitionen wurden politisch durch staatliche Darlehen und/ oder staatliche Bürgschaften gefördert. Durch Bauverzögerungen entstandene Mehrkosten konnten auf den Strompreis umgelegt werden und wurden somit letztlich vom Kunden getragen. Den Betreibern war damit die Profitabilität ihrer Investition garantiert.

⁵ So mussten die von Areva veranschlagten Kosten für den europäischen Druckwasserreaktor (EPR) in Flamanville bereits nach einem Jahr Bauzeit von 3,3 Mrd. € auf 4 Mrd. € erhöht werden (Verivox 2009b). Bei dem finnischen EPR, ebenfalls von Areva gebaut, beträgt die derzeitige Kostenerhöhung nach knapp 4 Jahren Bauzeit bereits 2,3 Mrd. €. Damit erhöht sich die ursprünglich veranschlagte Investitionssumme von 3 auf 5,3 Mrd. € (FT 2009).

(3) Heute hingegen setzen Staaten vermehrt auf **deregulierte Strommärkte**. Außerdem hat sich im Zuge der Globalisierung ein **internationaler Kapitalmarkt** herausgebildet. Das hat zwei Konsequenzen: Erstens werden den Kernkraftwerksbetreibern Strompreis und Kundenstamm nicht mehr langfristig garantiert, vielmehr müssen sich Kernkraftwerke im Preiswettbewerb mit anderen Technologien zur Energieumwandlung behaupten.

Zweitens müssen Betreiber den Bau ihrer Anlage nun verstärkt durch **Eigenkapital** oder über den (weltweiten) Kapitalmarkt bereitgestelltes Fremdkapital finanzieren, weil der Staat die Rolle des Geldgebers immer seltener übernimmt (Geusau 2006, 6). Private Investoren hingegen vergleichen die zu erwartende Rendite verschiedener Energieumwandlungstechnologien. In Volkswirtschaften, deren Energiesektor nicht mehr planwirtschaftlich organisiert ist, konkurrieren Betreiber von Kernkraftwerken daher nicht nur beim Stromabsatz, sondern auch bei der Finanzierung ihrer Investitionen mit anderen Energieumwandlungstechnologien.

(4) Die Reaktoreinheit **Olkiluoto 3** in Finnland, an der Areva NP momentan baut, wird beispielsweise zu 80 % durch **Fremdkapital** finanziert (Gesau 2006, 20f.). Moody's schätzt die Fremdkapitalquote bei zukünftigen Bauprojekten auf 50 % (Moody's 2007, 20). Betrachtet man diesen Anteil als prototypisch für zukünftige Bauprojekte in deregulierten Strommärkten, so ergibt sich unter Berücksichtigung der hohen Kapitalintensität eines Kernkraftwerkes ein Fremdkapitalbedarf von mehreren Milliarden US-Dollar pro Reaktoreinheit. Die wirtschaftliche **Amortisationszeit** hängt vom jeweiligen Projekt ab und hat sich in den letzten Jahren durch steigende Rohstoffpreise verlängert (vgl. 4.1). Aus Prognos' Erfahrung mit regelmäßiger Beratung von Energieversorgern zu Kraftwerksinvestitionen im europäischen Kontext kann die aktuelle Erlössituation abgeschätzt werden. Unserer Einschätzung nach liegt die wirtschaftliche Amortisationszeit in Westeuropa derzeit für Gas-und-Dampf-Turbinenkraftwerke zumeist bei 10 bis 15 Jahren und für Kohlekraftwerke bei 15 bis 20 Jahren. Bei Kernkraftwerken reicht sie noch darüber hinaus. Aus Investorensicht haben Kernkraftwerke also den Nachteil, dass sie erst zu einem relativ späten Zeitpunkt eine echte Rendite realisieren.

Die hohe Kapitalintensität eines Kernkraftwerkes stellt Kraftwerksbetreiber zudem sowohl hinsichtlich des Eigen- als auch des Fremdkapitals vor Herausforderungen. Einerseits ist ein hoher Eigenkapitalanteil in der Finanzierung nötig, um die Glaubwürdigkeit des Bauprojektes zu unterstreichen und Fremdkapital anzuziehen (IAEA 2008i, 2f.). Andererseits machen die durch das Eigenkapital finanzierten Baukosten einen erheblichen Teil der Marktkapitalisierung der Betreibergesellschaften aus (Gawlicki 2008, 23). Das bedeutet, dass unvorhergesehene Kostensteigerungen beim Bau des Kraftwerkes oder gar ein gänzlich fehlgeschlagenes Bauprojekt für

den Betreiber ggf. existenzbedrohend sind, weil die Eigenkapitaldecke schnell aufgebraucht ist.

Aus Sicht der Fremdkapitalgeber bedeutet dies umgekehrt ein **Kreditausfallrisiko**. Dieses wird durch erhebliche Unsicherheiten bei der Kalkulation von **Baukosten** und **Bauzeit** verschärft (IAEA 2008i, 6f.). So überstiegen die tatsächlichen Kosten für die erste Generation von Kernkraftwerken in den USA die ursprünglich geplanten Kosten um 219 % (Aston 2006). Ein Lerneffekt bei der Kosteneinschätzung war in den USA über die Zeit nicht zu erkennen, und selbst in relativ weit fortgeschrittenen Bauprojekten wurden die endgültigen Gesamtkosten häufig massiv unterschätzt (Gielecki & Hewlett 1994). In jüngerer Zeit verdeutlicht der Bau der EPR-Anlage (Europäischer Druckwasserreaktor) Olkiluoto 3 in Finnland die Unsicherheiten, mit denen Investoren konfrontiert sind. Die Kosten liegen bereits jetzt 2,3 Milliarden € (bzw. 76 %) über dem ursprünglich veranschlagten Budget (FT 2009). Mit der Inbetriebnahme wird nicht vor 2012 gerechnet – drei Jahre später als vorgesehen (WNN 2009c).⁶ Verzögerungen während der Planung, der Genehmigung und des Baus sind mit erheblichen Kosten verbunden, da während dieser Zeit Kreditzinsen gezahlt werden müssen und das Kraftwerk erst zu einem späteren Zeitpunkt profitabel wird. Auch durch verschärfte Sicherheitsanforderungen, die oben erläuterten personellen Engpässe oder durch Stahlpreiserhöhungen können die Kapitalkosten erheblich nach oben getrieben werden (CBO 2008; Hultman et al. 2007). Dies verschlechtert die Rentabilität und Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie.

(5) Kernkraftwerke benötigen **gesicherte lange Laufzeiten** und gesicherte **hohe Volllaststunden**, d. h. eine gesicherte Abnahme der Leistung, die sie bereitstellen, um die hohen Kapitalkosten refinanzieren zu können. Der Nachweis dieser langfristig garantierten Nachfrage ist eine wesentliche Voraussetzung für stabile Finanzierungsbedingungen. Hier lassen sich **weitere Risiken** für die Betreiber von Kernkraftwerken identifizieren.

(6) Neben den Investitionskosten entstehen den Betreibern auch **laufende Kosten** für Betrieb und Wartung der Anlage sowie den Brennstoff Uran (Chernoff & Friedman 1990, S. 3). Die **Brennstoffkosten** für den gesamten Brennstoffzyklus machen rund 15 % der Gesamtgestehungskosten der Kernenergie aus (NEA & IEA 2005). Eine Verdoppelung des Uranpreises erhöht die Gestehungskosten um 5 % bis 10 % (IAEA 2008i, S. 1). Vor dem Hinter-

⁶ Im Fall von Olkiluoto 3 fordert das Käuferkonsortium, welches vom finnischen Kraftwerksbetreiber TVO geführt wird, von Areva und seinem bisherigen Partner Siemens angeblich eine Entschädigung und Strafe in Höhe von 2,4 Mrd. €. Demgegenüber fordern die Hersteller eine Kompensation in Höhe von 1 Mrd. € und haben im Dezember 2008 ein Schiedsverfahren vor der Internationalen Handelskammer (ICC) in Paris beantragt (Welt 2009).

grund eines möglichen weltweiten Ausbaus der Kernenergienutzung und Engpässen bei der Urangewinnung sind höhere und volatilere Preise keineswegs unrealistisch (vgl. Abschnitt 4.2). Allerdings hängt der Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie auch maßgeblich von der weiteren Entwicklung der Preise für die Konkurrenzenergieträger Kohle und Erdgas ab (vgl. 4.3).

(7) Andererseits wird die Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie auch stark von den **politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen** beeinflusst. Ein steigender Preis für CO₂ dürfte unter einem weltweiten Emissionshandelssystem die Kernenergie relativ begünstigen. Alle staatlichen Maßnahmen, die die Planungssicherheit der Investoren erhöhen und Risiken minimieren, wirken sich förderlich auf den Neubau von Kernkraftwerken aus. Dazu gehören gesetzlich garantierte Mindestpreise für eingespeiste Kernenergie ebenso wie Stabilität in der verfolgten Energiepolitik. Um die Investitionskosten zu mindern, kann der Staat auch im deregulierten Markt durch Eigenkapitalbeteiligungen (wie in Frankreich, wo der Staat den Großteil der Anteile am Marktführer EdF hält), Fonds zur Förderung CO₂-armer Technologien, staatliche Bürgschaften, staatliche Ausfallversicherungen oder Steuervergünstigungen als direkter oder indirekter Geldgeber fungieren (Moody's 2007, 18; Gawlicki 2008; IAEA 2008i, 4f.).

Gemäß Gawlicki (2008) wären die derzeitigen Neubauten in den USA ohne solche staatliche Unterstützung kaum realisierbar (Gawlicki 2008) (vgl. 7.1.2). Eine wichtige Rolle kommt auch der jeweiligen Gesetzgebung in Bezug auf die Frage zu, ob es dem Betreiber im Fall von Baubudgetüberschreitungen möglich ist, einen Teil der ungeplanten Baukosten durch den Strompreis auf den Verbraucher zu übertragen. Ohne diese Möglichkeit können die effektiv vom Betreiber zu tragenden Baukosten erheblich höher liegen. In den USA ist deswegen bereits ein geplantes Kernkraftwerk gestoppt worden (Platts 2009).

(8) Auf der anderen Seite könnte der Gesetzgeber durch einen Ausstieg aus der Kernenergie oder durch Erhöhung der gesetzlichen minimalen Haftpflichtversicherungssumme die **Bedingungen** für den Neubau von Kernkraftwerken **verschlechtern**. Auch das Risiko der fehlenden gesellschaftlichen Akzeptanz der Kernenergie ist zu beachten. Ein schwerer Störfall an einem beliebigen Ort kann das Vertrauen in die Kernenergienutzung weltweit schnell zerstören. Eine dann mögliche Verkürzung der Kraftwerkslaufzeiten würde viele Investitionen unrentabel machen. Dies ist bereits nach dem Unfall in Tschernobyl geschehen (IAEA 2008j, 17).

(9) Schließlich muss die Betreibergesellschaft auch noch mit Kosten für die **Stilllegung** der Anlage und die **Entsorgung** der nuklearen Abfälle rechnen. Die Entsorgung von hochradioaktiven

Abfällen ist weltweit ungelöst. Die IAEA geht davon aus, dass die Stilllegungs- und Entsorgungskosten jeweils 10 % bis 15 % der Kapitalkosten einer Anlage ausmachen (IAEA 2008j, S. 30). Diesen Zahlen stehen allerdings zum Teil höhere Einschätzungen gegenüber.

Bezüglich der **Stilllegung von Reaktoren** variieren die Kostenschätzungen zwischen 200 Millionen und 2 Milliarden € pro 1.000 MW-Anlage (Geusau 2006, S. 9; Prognos 2008). Die Kosten für den noch andauernden Rückbau der beiden stillgelegten deutschen Kernkraftwerke Stade und Obrigheim werden auf jeweils rund 500 Mio. geschätzt, was umgerechnet 0,7 bis 1,4 Mrd. € pro 1.000 MW entspricht (SZ 2003, Reuters 2008, IAEA/PRIS 2009a). Diese Zahlen deuten an, dass die Kosten der Stilllegung bis an die Größenordnung der Investitionskosten heranreichen können.

Die Kosten der **Endlagerung** sind schwer einzuschätzen. Hierbei ist zwischen schwach- und mittelradioaktiven Abfällen einerseits sowie hochradioaktiven Abfällen andererseits zu unterscheiden. Erstere entstehen z. B. beim Rückbau von Kernkraftwerken, letztere fallen als zu entsorgende Brennelemente an oder als Rückstand aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente. Für kurzlebige schwach- und mittelradioaktive Abfälle haben sich international oberflächennahe Endlager durchgesetzt (BfS 2009b). Die für das deutsche Endlager für schwach- und mittelradioaktiven Abfall im Schacht Konrad veranschlagten Baukosten bis zur geplanten Fertigstellung im Jahr 2013 belaufen sich auf 1,8 Mrd. €. (Kleemann 2007). Für die Gesamtkosten bis zum Ende der Betriebsdauer zwischen den Jahren 2040 und 2080 wird ein Betrag von ca. 5 Mrd. € angesetzt (BfS 2009a). Zum Vergleich: In einem US-amerikanischen Pilotprojekt zur Endlagerung langlebiger mittelradioaktiver Abfälle, die nur wenig Wärme produzieren, werden die Gesamtkosten bis zum Jahr 2070 auf mehr als 10 Mrd. US\$ geschätzt (Rempe 2007).

Für die **Endlagerung hochradioaktiver Abfälle** liegen keine vergleichbaren Zahlen vor. Die Herausforderung bei diesen Abfällen besteht darin, dass sie langlebige Radionuklide beinhalten und Wärme entwickeln. Für ihre Endlagerung gilt international die Einlagerung in tiefe geologische Formationen der Erdkruste als am sichersten. Obwohl seit etwa 50 Jahren wissenschaftliche Arbeiten zu dieser Problematik durchgeführt werden, existiert weltweit noch kein betriebsbereites Endlager für solche ausgedienten Brennelemente, die nicht wiederaufgearbeitet, sondern direkt endgelagert werden sollen. Die international bisher vorhandenen Planungsansätze für Endlager reichen von konzeptionellen Überlegungen bis hin zu konkreten Planungen (BfS 2009b).

Nicht abschließend geklärt ist, wer mögliche **Mehrkosten** für die Erneuerung und Instandhaltung der Endlagerstätten zahlt. Das bisherige Finanzierungsmodell in Deutschland sieht für künftige

Endlager Rückstellungen der Kernkraftwerksbetreiber vor. In anderen Ländern bestehen andere oder teils gar keine Regelungen. Es ist unklar, ob seitens des Staates Nachforderungen gestellt werden, wenn die Rückstellungen die tatsächlichen Kosten der Entsorgung nicht decken (und ob die Betreibergesellschaft diese Nachforderungen überhaupt noch bedienen kann) – oder ob die Gesellschaft die Mehrkosten tragen muss. Insofern besteht aus Sicht der Betreiber und der Investoren ein **finanzielles Risiko** hinsichtlich der Höhe der anfallenden Kosten und der Zahlungspflichten nicht nur vor und während des Betriebs der Anlage, sondern auch nach Ende des Betriebs.

(10) Angesichts dieser schwer kalkulierbaren Risiken sind **Investoren zurückhaltend** in der Finanzierung von Kernkraftwerken (Aston 2006; Macalister 2008). Die Ratingagentur Moody's (2007) kommt zu der Einschätzung, dass das Investorenrisiko beim Bau zukünftiger Anlagen sogar noch steigt. Die ohnehin bereits hohen Risikoaufschläge an den Kapitalmärkten (3 bis 5 %-Punkte gegenüber anderen Stromerzeugungstechnologien, IAEA 2008i) werden daher in Zukunft vermutlich nicht fallen. Nach Aussage der IAEA besteht die größte Herausforderung für den weltweiten Neubau von Kernkraftwerken deshalb darin, Investoren mit ausreichendem Fremdkapital zu angemessenen Konditionen zu gewinnen (IAEA 2008i; IAEA 2008i). Diese Einschätzung wird von vielen Experten geteilt (Aston 2006; Moody's 2007; Geusau 2006; Macalister 2008).

(11) Die **aktuelle konjunkturelle Lage** der Weltwirtschaft erschwert zumindest vorübergehend die Finanzierungsbedingungen für den Bau neuer Kernkraftwerke zusätzlich. Erstens zeichnet sich für das Jahr 2009 zum ersten Mal seit dem Ende des Zweiten Weltkriegs ein Rückgang des globalen **Strombedarfs** ab. Dieser Rückgang deutet sich sowohl für die OECD als auch für Nicht-OECD-Länder wie China an. Mit dem Rückgang des Strombedarfs verringert sich der direkte Druck, neue Kraftwerke zu bauen (IEA 2009). Zweitens hat die **Finanzkrise** die Risikoneigung von Investoren verringert. Aufgrund des dargestellten Risikoprofils eines Kernkraftwerkbaus dürfte es Betreibern unter den derzeit herrschenden Marktbedingungen eher schwerer fallen, Fremdkapital anzuziehen. Drittens haben sich die **Prioritäten** mancher Regierungen verändert. Die politischen Bemühungen richten sich vorrangig auf die Bewältigung der Wirtschaftskrise, und der Klimaschutz als Thema hat es zurzeit schwer, sich gegen die (mediale) Dominanz der Wirtschaftskrise durchzusetzen. Andererseits haben sich im Zuge der abkühlenden Weltkonjunktur auch die Rohstoff- und Stahlpreise von ihren Höchstständen Mitte 2008 erholt, was sich positiv auf die Höhe der Baukosten auswirkt.

4.5 Sonstige Herausforderungen

(1) Die **Einbindung von Kernkraftwerken in das Hochspannungsnetz** stellt für manche Länder ebenfalls eine Herausforderung dar. Die Integration eines Kernkraftwerkes in den Kraftwerkspark muss unter Berücksichtigung der Netzkapazität, -qualität und -stabilität erfolgen. Insgesamt sollte ein Kernkraftwerk nicht mehr als 10 % der gesamten Netzkapazität auf sich vereinen, um bei Ausfällen des Kraftwerks die Netzstabilität weiter gewährleisten zu können (IAEA 2008i).

In verschiedenen Ländern, die angedeutet haben, zukünftig Kernkraftwerke in Betrieb nehmen zu wollen, beträgt die Netzkapazität weniger als 10 GW. Die meisten kommerziell angebotenen Kernkraftwerkstypen haben eine Leistung von mindestens 1 GW. Dies würde bedeuten, dass der 10 %-Standard nicht eingehalten werden kann (IAEA 2008i). Netzausbau oder kleinere Kernkraftwerke wären deshalb erforderlich. Dieser Aspekt konnte jedoch im Rahmen der vorliegenden Studie nicht weiter vertieft werden.

(2) Der Bau eines Kernkraftwerkes stellt zudem hohe **logistische Anforderungen**. Bei Leistungen von über 1.000 MW sind entsprechend große und schwere Teile eines Kraftwerkes an den Standort heranzubringen. Dazu müssen die Straßen **schwertransporttauglich** sein und Hindernisse wie beispielsweise Brücken oder Steigungen vermieden werden.

(3) Eine weitere Herausforderung der Kernenergienutzung besteht darin, das **Risiko der Proliferation**, d. h. der Weiterverbreitung von Nuklearwaffen, zu minimieren. Zur Gewährleistung der internationalen Sicherheit ist die Verbreitung von nuklearer Technologie, von nuklearem Material oder von diesbezüglichen Kenntnissen für militärische Zwecke zu minimieren.

Der **Neubau von Kernkraftwerken** kann verschiedene Proliferationsrisiken vergrößern, weil das Vorhandensein von mehr Kraftwerken in mehr Ländern prinzipiell die Zugriffsmöglichkeiten auf nukleares Material vergrößert. Im Einzelnen handelt es sich dabei um drei Risiken: Erstens benötigt ein Land mit zivilen Kernkraftwerken immer auch Wissenschaftler und Techniker mit **nuklearem Grundlagenwissen**, welches später grundsätzlich auch für die Entwicklung eines Atomwaffenprogramms genutzt werden kann. Allerdings bedarf es für letzteres ein erhebliches zusätzliches Spezialwissen. Zweitens kann ein Land zur Versorgung seiner zivilen Kernkraftwerke mit Brennstoffen **Urananreicherungs- oder Wiederaufbereitungsanlagen** installieren. Diese sind prinzipiell auch zur Herstellung von waffenfähigem Material einsetzbar. Der Bau solcher Anlagen ist

nicht durch den Atomwaffensperrvertrag reglementiert. Gegenwärtig wird allerdings nur in wenigen Ländern Uran angereichert (vgl. 4.2). Aus Sicht der Betreiber von Kernkraftwerken kann es daher lohnend sein, die benötigten Brennstoffe selbst herzustellen, um sich von anderen Ländern unabhängiger zu machen. Am aktuellen Beispiel Iran wird ersichtlich, wie der vorgetragene Wunsch, die Kernkraft zivil zu nutzen, mit der Forderung nach eigenen Urananreicherungsanlagen verbunden wird. Drittens können Terroristen nukleares Material an sich bringen und für den Bau sogenannter „**schmutziger Bomben**“ benutzen – d. h. für Bomben mit konventionellem Sprengstoff, die mit radioaktiven Substanzen gemischt sind, so dass es bei einer Explosion zur Freisetzung von Radioaktivität kommt (Kerzel & Thränert 2009).

Die vier wichtigsten politischen Instrumente gegen Proliferation sind der Atomwaffensperrvertrag und das Zusatzprotokoll zum Atomwaffensperrvertrag, das Statut der Internationalen Atomenergie-Organisation sowie der Vertrag zur Gründung der Europäischen Atomgemeinschaft, (ECN 2008). Zudem wurden mehrere Initiativen, u. a. die „Proliferation Security Initiative“, zur Verstärkung dieser Instrumente initiiert (ECN 2007).

Angesichts des Proliferationsrisikos ist der Aufbau einer Infrastruktur zur zivilen Nutzung der Kernenergie mit sicherheitspolitischen Risiken verbunden. Allerdings ist schwer zu beurteilen, wie mögliche Neueinsteiger-Länder diese Herausforderungen im Kontext ihrer eigenen nuklearen Ambitionen bewerten und ob sich hieraus ein ernsthaftes Hindernis ergibt, oder ob – ganz im Gegenteil – die Möglichkeit der Proliferation für einige dieser Länder sogar einen Anreiz zum Einstieg in die Nutzung der Kernenergie darstellt.

4.6 Zwischenfazit

(1) Die in diesem Kapitel behandelten infrastrukturellen und sonstigen Herausforderungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (Abbildung 18).

Abbildung 18: Zusammenfassung der Herausforderungen beim Neubau von Kernkraftwerken

- Infrastruktur
 - Kernkraftwerk-Herstellungs-Kapazitäten
 - Kapazitäten der Zulieferer
 - Qualifiziertes Personal
- Brennstoffversorgung
 - Urangewinnungskapazitäten
 - Anreicherungskapazitäten
- Deregulierte Märkte
 - Kundenstamm
 - Strompreise
 - Überwälzung von Kostensteigerungen
 - Konkurrenz durch erneuerbare Energien und andere Energieträger
- Finanzierung
 - Amortisationszeiten
 - Fremdkapitalbeschaffung (Menge und Konditionen)
 - Risiko, dass scheiterndes Projekt Eigenkapital aufbraucht
 - Bauzeit
 - Teures Fremdkapital
 - Staatliche Regulierung/Rahmenbedingungen (Sicherheit)
 - Stilllegung und Entsorgung
 - Öffentliche Akzeptanz (mögliches Unfallrisiko)
 - Weltwirtschaftskrise:
 - Verzögerung des Strombedarf-Zuwachses
- Sonstige Herausforderungen
 - Einbindung in Hochspannungsnetze
 - Logistik (z. B. Schwertransport)
 - Proliferationsrisiken

Quelle: Prognos AG

(2) Unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel beschriebenen Aspekte ist zu prüfen, wie realistisch die Neubau-Ankündigungen der WNA sind (vgl. 3.2).

5 Diskussion eines realistischen Entwicklungspfads der Kernenergie und Fazit

(1) Die **Erfahrungen** der Vergangenheit zeigen, dass die Zahl der Ankündigungen oft weit größer ist als die Zahl der letztendlich realisierten Projekte (vgl. 2.3).

Neben diesen empirischen Befund tritt die Tatsache, dass insbesondere bei den bis 2020 angekündigten Reaktoren heute schon sehr konkrete **Planungs- bzw. Genehmigungsfortschritte** erreicht sein müssten, um die Anlage bei einer etwa 5- bis 8-jährigen Bauzeit bis 2020 fertigstellen zu können.

Von vielen der heute angekündigten Reaktoren ist aber gegenwärtig noch nicht einmal der Standort bekannt, geschweige denn, dass eine Bestellung vorläge.

Schließlich bedeutet eine große Zahl an angekündigten Fertigstellungen auch, dass die **Kapazitäten der Hersteller**, die in den letzten 15 Jahren kaum mehr als 50 Kernkraftwerke weltweit gleichzeitig gebaut haben, sprunghaft steigen müssten. Es dauerte aber 15 Jahre (von 1966 bis 1980), bis die Bautätigkeit während der Boomphase der Kernenergie ihren Höhepunkt erreichte.

Vor diesem Hintergrund erscheint es angemessen, heutige Ankündigungen einer **kritischen Bewertung** zu unterziehen und auf diesem Weg zu einer realistischeren Zukunftseinschätzung der möglichen Inbetriebnahmen neuer Kernkraftwerke zu gelangen. Als Datengrundlage für eine solche Bewertung scheiden verschiedene existierende Szenarien der OECD-NEA und anderer Institutionen aus, da sie keine hinreichend detaillierten Daten auf der Ebene einzelner Reaktoren enthalten.

(2) Die **Planungen** bzw. **Vorschläge** für neue Reaktoren haben wir im Rahmen dieser Studie anhand von Planungs- und Ankündigungslisten der World Nuclear Association (WNA) und der internationalen Zeitschrift für Kernenergie (ATW) beschrieben. Da der Zeithorizont der ATW-Listen nur bis zum Jahr 2020 reicht, beschränken wir uns für den Rest der folgenden Diskussion auf die WNA-Zahlen. Laut WNA geht es um rund 110 neu zu bauende Reaktoren bis 2020 und um insgesamt mehr als 380 Neubauten bis zum Jahr 2030. Diese Daten geben einen umfassenden Überblick über die mögliche **Nachfrage** nach Reaktoren. Dem steht die wahrscheinliche Entwicklung des **Angebots** an Reaktoren und insbesondere an Reaktordruckgefäßen gegenüber sowie die Bewältigung weiterer Herausforderungen, die in Kapitel 4 beschrieben wurden.

5.1 Realisierung von Ankündigungen

(1) Angesichts der Herausforderungen in den Bereichen Infrastruktur, Brennstoffversorgung, Energiemärkte, Finanzierung etc. ermitteln wir im folgenden Abschnitt, welcher Teil der von der WNA aufgelisteten Projekte tatsächlich begonnen bzw. vollendet wird. Wir **bewerten** die Ankündigungen eines Landes, indem wir die jeweiligen Ausbauplanungen in einem mehrstufigen Verfahren mit einem indikatorgestützten **Abschlagsfaktor** versehen. Der hieraus abgeleitet realistische Entwicklungspfad steht unter der Voraussetzung, dass die von uns nicht quantifizierten Herausforderungen (vgl. 4.6) sich nicht zusätzlich negativ auf das Ergebnis auswirken.

(2) Es werden zunächst drei **Indikatoren** verwendet, die jeweils mit einem individuellen Gewicht in die Gesamtbewertung einfließen. Die Indikatoren, die hierbei verwendet werden, sind nachfolgend aufgelistet, in Klammern das jeweilige Gewicht des Indikators:

- Die **Erfahrung** mit Reaktorneubauten im Vergleich zur Größe der Pläne für neue Kraftwerke (40 %),
- die **politische Stabilität** (20 %) und
- die **Kreditwürdigkeit** eines Landes (40 %).

(3) Das gewichtete Mittel dieser drei Werte gibt das **Ergebnis der Indikatorbewertung** wieder. Angesichts der großen Bedeutung liberalisierter Energiemärkte für das Verhalten potenzieller Kraftwerksinvestoren (vgl. 4.3) messen wir diesem vierten Einflussfaktor eine besondere Bedeutung bei und weisen ihn und seinen Einfluss auf das Gesamtergebnis gesondert aus, nämlich als

- **Chance der Umsetzung** von Reaktorneubauten unter den Rahmenbedingungen und im Wettbewerbsumfeld des jeweiligen Energiemarktes.

Aus dem Ergebnis der Indikatorbewertung und der Umsetzungschance ergibt sich der **Realisierungsgrad**. Weiter gehen wir davon aus, dass es aufgrund der Weltwirtschaftskrise und eines Engpasses beim Angebot von Reaktordruckgefäßen zu einer **zeitlichen Verzögerung** bei der Realisierung von Reaktorprojekten kommen wird. Aus dieser zeitlichen Verzögerung und dem oben beschriebenen Realisierungsgrad leiten wir das **Endergebnis** ab.

Im Folgenden wird das **Verfahren** beschrieben, mit dem wir diese Indikatoren operationalisiert und zu einer Gesamtbewertung der Ankündigungen verdichtet haben.

1. Indikator: Neubau-Erfahrung

(4) Die **Neubau-Aktivität** der letzten Jahre lässt sich aus der Reaktordatenbank der IAEA ersehen (IAEA/PRIS 2009a). Als Zeitraum bietet sich die Zeit nach 1990 an, da so der Zeitraum, auf den wir zurückblicken, etwa so lang ist wie der Prognosehorizont. Mit diesem Ansatz blenden wir einen möglichen überhöhten Anreiz zum Neubau aufgrund der Systemkonkurrenz von Ost und West bis Ende der 1980er-Jahre aus. Die Zahl der Neubauten seit 1990 kann als Hinweis darauf gedeutet werden, in welchem Maß ein Land im Wechselspiel von (Energie-)wirtschaft, Politik, Administration und Zivilgesellschaft dazu in der Lage ist, Reaktorprojekte erfolgreich zu beginnen und abzuschließen. Umgekehrt ist es schwer vorstellbar, dass ein Land mit wenig Neubauerfahrung kurzfristig umfangreiche Planungen umsetzen wird. Die Bandbreite der Neubauerfahrung seit 1990 reicht von überhaupt keiner Erfahrung⁷ bis hin zum Bau von 19 Reaktoren in Japan. Die meiste Erfahrung nach Japan haben Frankreich und einige asiatische Staaten (s. Tabelle 6, Spalte 1).

Zur **Bewertung der Neubau-Erfahrung** stellen wir den Projekten der Vergangenheit die Projektplanungen der Zukunft gegenüber (Spalte 2). Je größer die Erfahrung im Verhältnis zu den Planungen ist, desto höher fällt der Punktwert aus, den das Land erreicht. Der Punktwert errechnet sich nach folgender Formel:

$$\text{Punktwert} = (\text{Anzahl fertiggestellt}) / (\text{Anzahl geplant}) * 100$$

Dabei gilt allerdings: Auch wenn ein Land noch so viel Bauerfahrung hat, mehr als 100 Punkte kann es nicht erhalten (Spalte 3). Das Maximum von 100 Punkten wird zum Beispiel von Japan erreicht, wo 19 Kernkraftwerke seit 1990 gebaut wurden und wo laut WNA 14 neue Kraftwerke geplant sind ($19/14 * 100$).⁸ Der Indikator Neubau-Erfahrung erhält ein Gewicht von 40%.

2. Indikator: Politische Stabilität eines Landes

(5) Der zweite Indikator, die **politische Stabilität** eines Landes (Spalte 4), stammt aus einem Indikatorenset der Weltbank (World-

⁷ Die Erfahrung zeigt, dass ein Land für den Bau des ersten Reaktors mindestens 10 bis 15 Jahre braucht (IAEA 2007e; Kerzel & Thränert 2009). Eine detailliertere Analyse der möglichen Neueinsteiger-Länder findet sich im Anhang (7.2).

⁸ In Fall von China führt diese Bewertung zu einem sehr geringen Punktwert (11), weil China bis 2030 knapp zehnmal so viele Kraftwerke bauen will, wie es in den letzten 20 Jahren gebaut hat. Einerseits ließe sich hier einwenden, dass China in den letzten Jahren in vielen Bereichen enorme Wachstumsraten aufwies und dass damit das von uns gewählte Verfahren der chinesischen Wirtschaftsdynamik nicht gerecht wird. Andererseits können die positiven Erfahrungen der letzten Jahre auch zu übergroßen Neubauambitionen und Ankündigungen auf Seiten der chinesischen Planer führen. Die sehr hohe Zahl von 103 geplanten Reaktoren in China bis zum Jahr 2030 scheint Ausdruck solcher Erwartungen zu sein. Angesichts dieser Überlegung lassen wir China keine Sonderrolle zukommen und behandeln es in dem von uns gewählten Verfahren konsistent mit allen anderen Ländern.

wide Governance Indicators). Er misst die Gewalt innerhalb eines Landes und die Gefahr einer möglichen Destabilisierung der Regierung durch verfassungswidrige, politische motivierte Gewalt und Terrorismus. Die positive Bewertung durch die Weltbank entspricht auch hier 100 Punkten. Hinsichtlich des Neubaus von Reaktoren ist unsere Annahme, dass insbesondere für Kernenergie-Neueinsteiger der Aufbau einer hinreichenden Infrastruktur eine erhebliche politische Stabilität voraussetzt. Da allerdings auch einige als wenig stabil eingeschätzte Staaten wie Russland (23 Punkte) und China (32 Punkte) erhebliche Erfahrung mit Kernenergienutzung haben, geht dieser Indikator mit 20 % weniger stark in die Gesamtbewertung ein als die beiden anderen.

3. Indikator: Kreditwürdigkeit

(6) Die **Kreditwürdigkeit** eines Landes als dritter Indikator besitzt ebenfalls eine große Bedeutung für Neueinsteiger, aber auch allgemein für wirtschaftlich weniger entwickelte Länder. Die hier herangezogenen Daten stammen von der OECD (Country Risk Classification). Die beste Bewertung entspricht auch hier 100 Punkten.

Da der Neubau eines Kraftwerks mit erheblichen Investitionen und damit einer hohen Kapitalnachfrage verbunden ist, wird die Kreditwürdigkeit eines Landes die Finanzierung maßgeblich beeinflussen. Je geringer die Kreditwürdigkeit eines Landes ist, desto höher ist statistisch gesehen die Wahrscheinlichkeit, dass ein Investor in diesem Land einen Verlust erleiden wird. Damit steigen die Kosten der Kapitalaufnahme, und die Finanzierung von Großprojekten wie z. B. von Kernkraftwerken wird schwieriger.

Wie aus Tabelle 6 in Spalte 5 ersichtlich wird, ist die Kreditwürdigkeit der meisten wirtschaftlich entwickelten Staaten sehr hoch (=100). In den weniger entwickelten Ländern muss allerdings mit unterschiedlich hohen Zuschlägen wegen möglicher Risiken bei Investitionen gerechnet werden. Der Indikator Kreditwürdigkeit erhält ein **Gewicht** von 40 %.

Ergebnis der Indikatorbewertung

(7) Das Ergebnis der Indikatorbewertung ergibt sich als gewichteter Mittelwert der drei Indikatoren Neubauerfahrung (40 %), politische Stabilität (20 %) und Kreditwürdigkeit (40 %) und ist in der nachfolgenden Tabelle in Spalte 6 ausgewiesen. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$\begin{aligned}
 & (Punkte_{\text{Neubauerfahrung}} * 40 \% \\
 + & Punkte_{\text{politische Stabilität}} * 20 \% \\
 + & Punkte_{\text{Kreditwürdigkeit}} * 40 \%) / 100
 \end{aligned}$$

Das höchste Ergebnis der Indikatorbewertung erreicht Japan mit 97 %, das niedrigste Bangladesch mit 8 %. Die gesamten Planungen bzw. Ankündigungen eines Landes bis zum Jahr 2030 (Spalte 2) werden mit dem so ermittelten Ergebnis bewertet und infolgedessen reduziert.

4. Indikator: Umsetzungschancen im jeweiligen Energiemarkt

(8) Mit den bisherigen drei Indikatoren ist allerdings die besondere Rolle des jeweiligen Wettbewerbsumfelds noch nicht hinreichend berücksichtigt.

Grundsätzlich haben es Kraftwerksbetreiber in einem liberalisierten Energiemarkt schwerer, anfallende Kosten an ihre Kunden weiterzugeben (vgl. 4.3). Damit steigt die Unsicherheit. Je größer diese Unsicherheit, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein potenzieller Kraftwerksbauer sich zwischen mehreren Alternativen für ein schwer zu finanzierendes Kernkraftwerk entscheidet. Diese Unsicherheit muss in unsere Bewertung einbezogen werden.

Wir unterscheiden hier solche Strommärkte, die bereits weitgehend liberalisiert sind bzw. sich in einem Liberalisierungsprozess befinden von denen, die nach unserer Einschätzung nicht liberalisiert sind. Erfahrungen mit der Liberalisierung in Deutschland zeigen, dass die Unsicherheiten für Kraftwerksbauer bzw. -Betreiber gerade in der Anfangsphase eines Liberalisierungsprozesses besonders groß sind.

Hieraus leiten wir folgende Bewertung ab: Sofern sich aus der Literatur (s. Tabelle 6) für ein Land ergibt, dass sein Strommarkt weitgehend liberalisiert ist oder dass es sich in einem Liberalisierungsprozess befindet, gehen wir von einer Umsetzungsquote von drei Viertel (75 %) aller Projekte aus. Für alle anderen Länder unterstellen wir eine vollständige Umsetzung der Projekte aus dem Zwischenergebnis (100 %). Die Umsetzungschancen sind in Spalte 7 zu sehen. Der resultierende Realisierungsgrad findet sich in Spalte 8.

Zeitliche Verzögerung

(9) Nach dieser Einschätzung der Anzahl von Reaktoren stellt sich die Frage der **möglichen Verzögerung** von Neubauprojekten. Auch wenn sich aus den Daten der WNA in vielen Fällen bestimmte Planungen für Bauzeiträume ergeben, gehen wir von einer Verzögerung des Baus aufgrund der **Weltwirtschaftskrise** aus. Die IEA erwartet in diesem Zusammenhang einen Rückgang des globalen Strombedarfs und – daraus resultierend – eine Abschwächung des Drucks, neue Kraftwerke bauen zu müssen

(IEA 2009). Um dieses konjunkturelle Problem angemessen zu berücksichtigen, verschieben wir in unserer Modellierung des Entwicklungspfads der Kernenergie den Baubeginn aller geplanten und vorgeschlagenen Projekte um durchschnittlich 2 Jahre in die Zukunft.

(10) Neben den länderspezifischen Realisierungsgraden und einer möglichen Verzögerung durch die Wirtschaftskrise, die vor allem die Nachfrage nach Reaktoren betreffen, fließt in unsere Betrachtung teils auch die Angebotsseite ein. Das **Angebot** an Reaktoren wird vor allem durch eine Komponente begrenzt: Druckgefäße. Damit stellt sich die Frage, wie viele **Reaktordruckgefäße** gleichzeitig pro Jahr und im betrachteten Zeitraum insgesamt produziert werden können. Wir gehen hier davon aus, dass die Kapazitäten von Japan Steel Works in den nächsten Jahren weiterhin eine wichtige Restriktion darstellen (vgl. Kapitel 4.1). Hinzugezählt werden müssten Kapazitäten in China und Russland, deren Höhe allerdings nicht genauer quantifiziert werden kann. Im Ergebnis erwarten wir, dass bis zum Jahr 2020 insgesamt ca. 130 Druckgefäße produziert werden können. Ein Teil dieser Gefäße wird allerdings in Reaktoren eingebaut, die erst nach dem Jahr 2020 in Betrieb gehen werden.

Mit den bisher angenommenen Realisierungsgraden und Bauverzögerungen (s. o.) ergäbe sich gerade für die ersten Jahre ein zu hoher Bedarf an Reaktordruckgefäßen, der nach unserer Einschätzung nicht sofort gedeckt werden könnte. Um diese Restriktion einhalten zu können, verschieben wir den Bau der geplanten Reaktoren in unserem Modell im Durchschnitt um ein weiteres Jahr in die Zukunft.

(11) Die hier angenommenen durchschnittlichen zeitlichen Verschiebungen aufgrund der Weltwirtschaftskrise und der Reaktordruckgefäße machen sich in den betrachteten Ländern unterschiedlich stark bemerkbar. Je näher die erwartete Inbetriebnahme eines Reaktors am Jahr 2030 liegt, desto eher wird sie durch die unterstellte Verzögerung aus dem Betrachtungszeitraum hinausgeschoben und damit nicht mehr im Ergebnis erfasst (vgl. 7.4.4).

Endergebnis

(12) Damit ergibt sich hinsichtlich der im März 2009 noch nicht begonnenen Bauprojekte folgendes **Endergebnis**: Bis zum Jahr 2020 werden insgesamt 49 Reaktoren neu gebaut (Spalte 9), bis zum Jahr 2030 weltweit 136 Reaktoren (Spalte 10). Diese

Summen stellen das wesentliche Ergebnis unserer Einschätzung dar. Wir erheben nicht den Anspruch, die Zahl der Reaktoren in einzelnen Ländern für die Jahre 2020 oder 2030 punktgenau anzugeben. Stattdessen sehen wir auf Länderebene eine bestimmte Wahrscheinlichkeit der Realisierung von Projekten. Daher können sich **auf Ebene einzelner Länder** Reaktorzahlen mit Nachkommastellen ergeben, die zum Teil kleiner als eins sind. Damit ist nicht gemeint, dass z. B. ein Land mit dem Wert 0,5 ein halbes Kernkraftwerk baut. Vielmehr sehen wir für einen Reaktorneubau in diesem Land eine Wahrscheinlichkeit von etwa 50 %. Mit anderen Worten: Haben zwei Länder jeweils einen Wert von 0,5, so erwarten wir, dass in der zusammenfassenden Betrachtung beider Länder in Summe nur ein Reaktor gebaut wird. Diese Logik gilt analog für die Summe aller Länder.

Tabelle 6: Indikatoren-Bewertung der Ausbauplanungen der Länder

Indikatoren-Bewertung der Ausbauplanung	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)		(8)		(9)		(10)		
	Zahl der seit 1990 in Betrieb genommenen Reaktoren	Zahl der bis 2030 geplanten/vorgeschlagenen Reaktoren laut WNA	Neubau-Erfahrung seit 1990 im Verhältnis zur Bauplanung (0 = gering, 100 = hoch)	Politische Stabilität 2007 (0 = gering, 100 = hoch)	Kreditwürdigkeit 2006-2009, transformiert (0 = schlecht, 100 = sehr gut)	Indikatorbewertung aus Spalten (3) bis (5)	Umsetzungschancen im jeweiligen Energiemarkt (%)	Realisierungsgrad aus Spalten (6) und (7)	Zahl der Reaktoren im Jahr	Zahl der Reaktoren im Jahr	inkl. zeitlicher Verschiebung *	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Afrika/ Afr. Ausstr.		27	0	51	57	33	100	33	2,0	8,6											
Amerika																					
Sudafrika		2	0	22	43	22	100	22	0,2	0,2											
Ägypten																					
Argentinien		2	0	50	0	10	75	10	0,1	0,1											
Brasilien	1	5	20	31	48	34	100	34	0,3	1,3											
Kanada	4	9	44	85	100	75	100	75	0,7	6,7											
Mexiko	2	2	100	25	71	74	100	74	0,0	0,7											
USA	5	31	16	56	100	58	75	58	7,8	13,0											
Asien																					
China	11	103	11	32	71	39	100	39	18,4	39,6											
Indien	11	25	44	18	57	44	100	44	3,5	10,6											
Bangladesch		2	0	9	14	8	100	8	0,0	0,1											
Rest-Asien		6	0	15	29	14	100	14	0,3	0,7											
Indonesien		3	0	11	22	11	100	11	0,1	0,3											
Iran		1	0	13	57	25	100	25	0,0	0,3											
Israel		14	100	85	100	97	75	97	5,1	9,5											
Japan	19	4	0	58	43	29	100	29	0,6	0,9											
Kasachstan		1	0	57	0	11	100	11	0,1	0,1											
Nordkorea		1	0	62	100	92	100	92	2,8	6,5											
Südkorea	11	7	100	62	100	16	100	16	0,3	0,5											
Pakistan		4	25	1	13	26	100	26	0,5	1,3											
Thailand	1	6	0	17	57	18	100	18	0,3	0,3											
Türkei		3	0	21	34	18	75	18	0,3	0,3											
VAE		14	0	73	71	43	100	43	1,3	5,6											
Vietnam		10	0	56	37	26	100	26	0,5	2,3											
Europa																					
Ost-Europa		1	0	42	13	14	100	14	0,0	0,1											
Armenien		4	0	53	0	11	100	11	0,2	0,3											
Weißrussland		2	50	61	51	53	75	53	0,8	0,8											
Bulgarien	1	2	100	77	90	92	75	92	0,0	0,7											
Tschechische Republik	2	2	0	68	60	38	75	38	0,0	0,3											
Ungarn		2	0	75	70	43	75	43	0,0	0,3											
Litauen		2	0	67	71	42	75	42	0,0	1,3											
Polen		5	0	67	71	42	75	42	0,0	1,3											
Rumänien	2	3	67	51	52	58	75	58	0,9	0,9											
Slowakische Republik	2	1	100	80	87	91	75	91	0,0	0,7											
Slowakei		1	0	84	94	55	75	55	0,0	0,4											
Slowenien		1	0	50	21	29	100	29	0,6	2,0											
Ukraine	3	12	25	50	21	30	100	30	0,9	10,5											
Russland	4	36	11	23	52	60	75	60	0,0	0,4											
West-Europa		1	0	99	100	60	75	60	0,0	0,7											
Finland	10	2	100	65	100	93	75	93	0,0	0,7											
Frankreich		10	0	62	100	52	75	52	0,0	3,5											
Italien		3	0	99	100	60	100	60	0,0	1,2											
Schweiz		6	17	66	100	60	75	60	0,9	2,7											
Großbritannien	1	6	17	66	100	60	75	60	0,9	2,7											
Summe		90																			
Gewichtung		374 **																			
			40%	20%	40%																

Quelle: IAEA 2007i, von Hirschhausen 2007, CEER 2008, Weltbank 2008, IAEA/PRIS 2009a, OECD 2009a, Oshima 2009, WNA 2009g
 * Zeitliche Verschiebung wegen Weltwirtschaftskrise und Reaktordruckgefäß-Engpass, deren Auswirkung sich nach Ländern unterscheidet. Je näher die erwartete Inbetriebnahme eines Reaktors am Jahr 2030 liegt, desto eher wird sie aus dem Betrachtungszeitraum hinausgeschoben (vgl. 7.4.4). Die Zahl der Reaktoren ist als Wahrscheinlichkeit zu interpretieren. Sie hat in einigen Ländern Nachkommastellen und ist zum Teil kleiner eins, z.B. 0.5. In diesem Land sehen wir für einen Reaktor-Neubau eine Wahrscheinlichkeit von 50 %. Haben zwei Länder jeweils einen Wert von 0,5, so erwarten wir, dass in Summe nur ein Reaktor gebaut wird.
 ** Abweichung von den aggregierten WNA-Ausgangsdaten (384 Reaktoren; vgl. Kap. 3.2) wegen zehn Reaktoren, die laut detaillierter WNA-Einzelblockliste erst für die Zeit nach 2030 angekündigt sind (vgl. 7.4.4)

5.2 Entwicklungspfad

(1) Aus den Planungs- und Ankündigungsdaten der WNA, den länderspezifischen Realisierungsgraden, der zeitlichen Verschiebung durch die Weltwirtschaftskrise, den Druckgefäß-Beschränkungen und Annahmen zu Lauf- und Bauzeiten (s. u.) leiten wir einen **Entwicklungspfad der Kernenergienutzung** ab, den wir als realistisch erachten (Abbildung 19).

Abbildung 19: *Ableitung des realistischen Entwicklungspfad*es der Kernenergienutzung



Quelle: Prognos AG

(2) Für den derzeitigen **Bestand** an Reaktoren wurden nach Altersklassen differenzierte mittlere Laufzeiten unterstellt. Für Kernkraftwerke, die vor 1980 in Betrieb genommen wurden, gehen wir von 40 Jahren aus, für solche zwischen 1980 und 1985 von 45 Jahren und für die ab 1986 in Betrieb genommenen von 45 oder mehr Jahren. Die Diskussion, ob und in welchem Umfang es zu einer Verlängerung der Laufzeiten über 45 Jahre hinaus kommen wird, ist im Kontext dieser Untersuchung irrelevant, da der Zeithorizont vor der entscheidenden Schwelle – im Jahr 2030 – endet (vgl. 2.1). Ausnahmen von diesen Laufzeiten wurden nur bei solchen Reaktoren gemacht, für die laut WNA-Liste bereits kürzere Laufzeiten geplant bzw. beschlossen sind, wie z. B. in Deutschland.

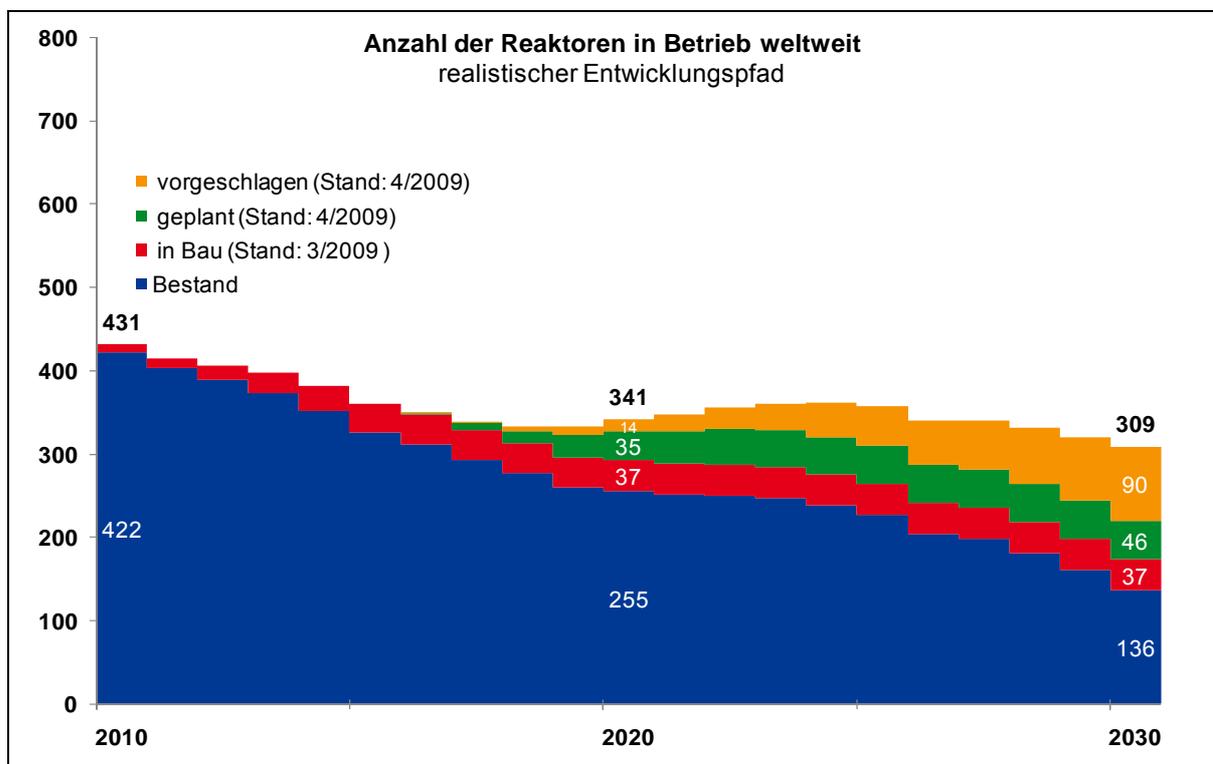
Neben dem Bestand ist auch die Entwicklung derjenigen Reaktoren relevant, die sich momentan **in Bau** befinden. Die offizielle IAEA-Baustatistik wurde dabei um die stagnierenden Bauvorhaben korrigiert (vgl. 3.4). Natürlich können einige der momentan stagnierenden Bauprojekte zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgenommen werden. Andererseits können einige der jetzt aktiv betriebenen Projekte zu einem späteren Zeitpunkt stagnieren. In einer Abwägung dieser beiden Faktoren erwarten wir, dass bis zum Jahr

2020 etwa 37 der momentanen Bauprojekte auch vollendet werden.

Hinsichtlich der Bauzeiten für die **geplanten** und **angekündigten** Reaktoren müssen zwei Fälle unterschieden werden. Sofern die in den WNA-Ausgangsdaten ausgewiesene Bauzeit länger ist als der länderspezifische Durchschnitt, wird diese direkt herangezogen. Anderfalls – oder falls überhaupt keine Bauzeit angegeben ist – machen wir eigene Annahmen zu den Bauzeiten. Abgeleitet aus den Bauerfahrungen der Vergangenheit (vgl. 2.4) unterstellen wir für Japan und Südkorea fünf Jahre, für China und Indien sechs Jahre und für alle anderen Länder acht Jahre durchschnittliche Bauzeit.

(3) Abbildung 20 zeigt die Anzahl der Reaktoren, die gemäß dem realistischen Entwicklungspfad zu erwarten sind. Abbildung 21 zeigt den Entwicklungspfad der Bruttoleistung.

Abbildung 20: Realistischer Entwicklungspfad der Kernenergienutzung weltweit bis 2030 – Anzahl der Reaktoren



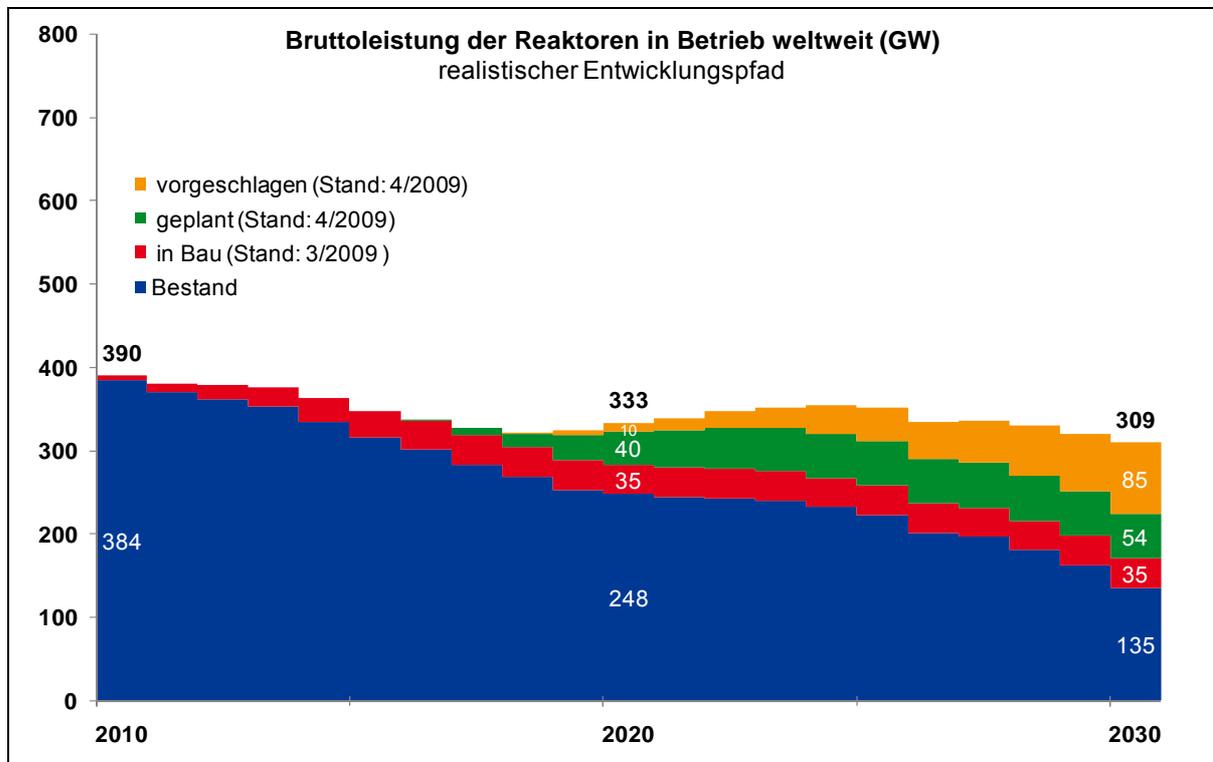
Quelle: Prognos AG. Im März 2009 gab es insgesamt 436 Reaktoren. Für die zukünftigen Jahre ist die Abbildung folgendermaßen zu lesen: Von den im April 2009 vorgeschlagenen Reaktoren (orange) werden 2020 etwa 14 in Betrieb sein, im Jahr 2030 dann etwa 90. Die Zahlen zu den Reaktoren in Planung und in Bau sind ähnlich zu interpretieren.

(4) Bis zum Jahr 2020 fällt die **Zahl** der Kernkraftwerke insgesamt zunächst auf 341. Nach einem leichten Zwischenanstieg sinkt sie dann voraussichtlich wieder und erreicht im Jahr 2030 309 Reaktoren. Sie liegt damit deutlich unter dem Niveau von 2009 (436 Reaktoren). Der Rückgang bis 2020 beträgt also rund 22 % und bis zum Jahr 2030 ca. 29 %.

Aus der hier dargestellten Anzahl der Reaktoren leiten wir den Entwicklungspfad der Bruttoleistung ab (s. a. Kap. 7.4). Dieser ist insgesamt mit einer höheren Unsicherheit behaftet, weil die konkrete Dimensionierung eines angekündigten Reaktors in der Regel erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt und weil wir leistungsverändernde Maßnahmen im Reaktorbestand nicht berücksichtigen (vgl. Kap. 1).

Auch die **Bruttoleistung** geht bis 2020 zurück und nimmt nach einem kurzen Zwischenanstieg bis zum Jahr 2030 weiter ab. Im Jahr 2030 erreicht sie 309 GW und liegt deutlich unter der Bruttoleistung von 2009 (390 GW). Damit geht die Bruttoleistung bis 2020 um ca. 15 % und bis 2030 um etwa 21 % zurück.

Abbildung 21: *Realistischer Entwicklungspfad der Kernenergienutzung weltweit bis 2030 – Bruttoleistung*

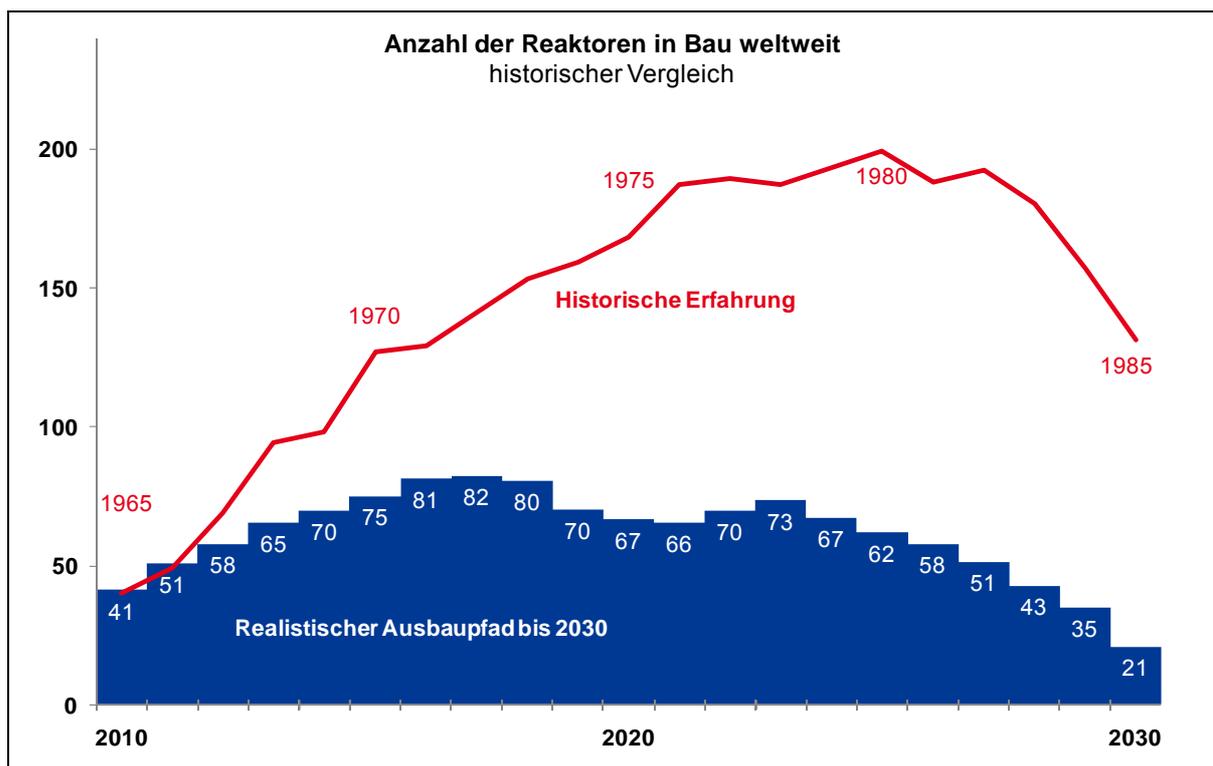


Quelle: Prognos AG. 2009 betrug die Bruttoleistung insgesamt 390 GW. Für die zukünftigen Jahre ist die Abbildung folgendermaßen zu lesen: Von den im April 2009 vorgeschlagenen Reaktoren (orange) werden im Jahr 2020 neue Anlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 10 GW in Betrieb sein, im Jahr 2030 dann mit einer Leistung von etwa 85 GW. Die Zahlen zu den Reaktoren in Planung und in Bau sind ähnlich zu interpretieren.

Der hier dargestellte Entwicklungspfad ist mit einer **Bauaktivität** verbunden, die sich zumindest in den ersten zwei bis drei Jahren mit der Phase des Reaktorbaus in den 60er-Jahren vergleichen lässt (s. Abbildung 22). Damals wurden von einem ähnlichen Startniveau aus sehr schnell neue Bauprojekte begonnen. Die absolute Zahl der weltweit in Bau befindlichen Reaktoren erreichte dann um 1980 mit rund 200 Projekten ihren Höhepunkt. Ein Wiedererreichen dieser Bautätigkeit wie in den 70er- und 80er-Jahren erwarten wir jedoch für die Zeit bis zum Jahr 2030 nicht.

Die in Kapitel 3.2 dargestellte (unbewertete) Liste mit Ankündigungen von WNA und ATW würde hingegen zu einem Ausbau der Kernkraft führen, der vor allem im Hinblick auf die ersten Jahre weit über das Ausbautempo in den 70er-Jahren hinausginge.

Abbildung 22: *Realistischer Entwicklungspfad der Kernenergienutzung weltweit bis 2030 – Reaktoren in Bau*



Quelle: Prognos AG. Die historische Erfahrung beinhaltet 436 Reaktoren in Betrieb und 127 stillgelegten Reaktoren. Nicht enthalten sind solche Reaktoren in Bau, die nie fertiggestellt wurden.

(5) Der von uns als realistisch eingeschätzte Entwicklungspfad steht unter der Voraussetzung, dass die verwendeten Indikatoren die wesentlichen Herausforderungen adäquat erfassen und dass die hier nicht quantifizierten Herausforderungen sich nicht zusätzlich negativ auf das Ergebnis auswirken (vgl. 4.6).

Sensitivität des Ergebnisses

(6) Der hier beschriebene Entwicklungspfad wird besonders von zwei Annahmen beeinflusst. Erstens wurden für die **Laufzeiten** der momentan in Betrieb befindlichen Reaktoren pauschale Annahmen nach Altersklassen getroffen (vgl. Kapitel 3.2). Würde man beispielsweise für alle US-amerikanischen Kernkraftwerke eine durchschnittliche Laufzeit von 60 Jahren unterstellen, so läge die Zahl der Reaktoren in den Jahren 2020 und 2030 weitaus höher, aber noch unter dem Ausgangsniveau von 436 Reaktoren (Stand 2009).

Es ist jedoch zu bewerten, wie plausibel diese Annahme ist: Die bisher in den USA stillgelegten Kernkraftwerke hatten ein Durchschnittsalter von 16 Jahren und waren maximal 34 Jahre im Einsatz. Und obgleich die USA die Kernenergie seit 49 Jahren nutzen, hat bisher kein Kraftwerk die Schwelle von 40 Betriebsjahren überschritten – das Maximum liegt momentan bei 39 Jahren. Die durchschnittliche Betriebsdauer der gegenwärtig betriebenen US-Reaktoren beträgt etwa 29 Jahre (s. Tabelle 10 im Anhang). Ein Durchschnittsalter von 60 Jahren entspräche also einer angenommenen Verdoppelung der bisherigen mittleren Laufzeit. Auch wenn die genehmigte Laufzeit einiger Kernkraftwerke derzeit von auf 40 auf 60 Jahre erhöht wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt wissenschaftlich nicht zu beurteilen, ob der Durchschnitt der heute betriebenen Kraftwerke ein Alter von 60 Jahren technisch und betriebswirtschaftlich erreichen kann.

Zweitens ist der Entwicklungspfad erheblich von den hier angenommenen **Realisierungsgraden** der Neubaupläne **einiger weniger Länder** abhängig, die zusammen einen Großteil der bekannten Planungen repräsentieren. Hierbei handelt es sich insbesondere um die USA, China, Russland, Indien und Japan. Eine Veränderung der Faktoren hätte bei diesen Ländern einen wesentlich größeren Einfluss als bei solchen mit weniger Ankündigungen.

Bedeutung der Kernenergie für die weltweite Stromversorgung und Vergleich mit OECD-NEA

(7) Die Internationale Energie Agentur erwartet im Referenzszenario des World Energy Outlook 2008 einen Anstieg der weltweiten **Stromerzeugungskapazitäten** aller Kraftwerkstypen von 4.344 GW (2006) um etwa 72 % auf 7.484 GW im Jahr 2030. Gemessen an dieser Entwicklung sinkt der Anteil der Kernenergie in unserem Entwicklungspfad **von 9 % auf etwa 4 %** im Jahr 2030.

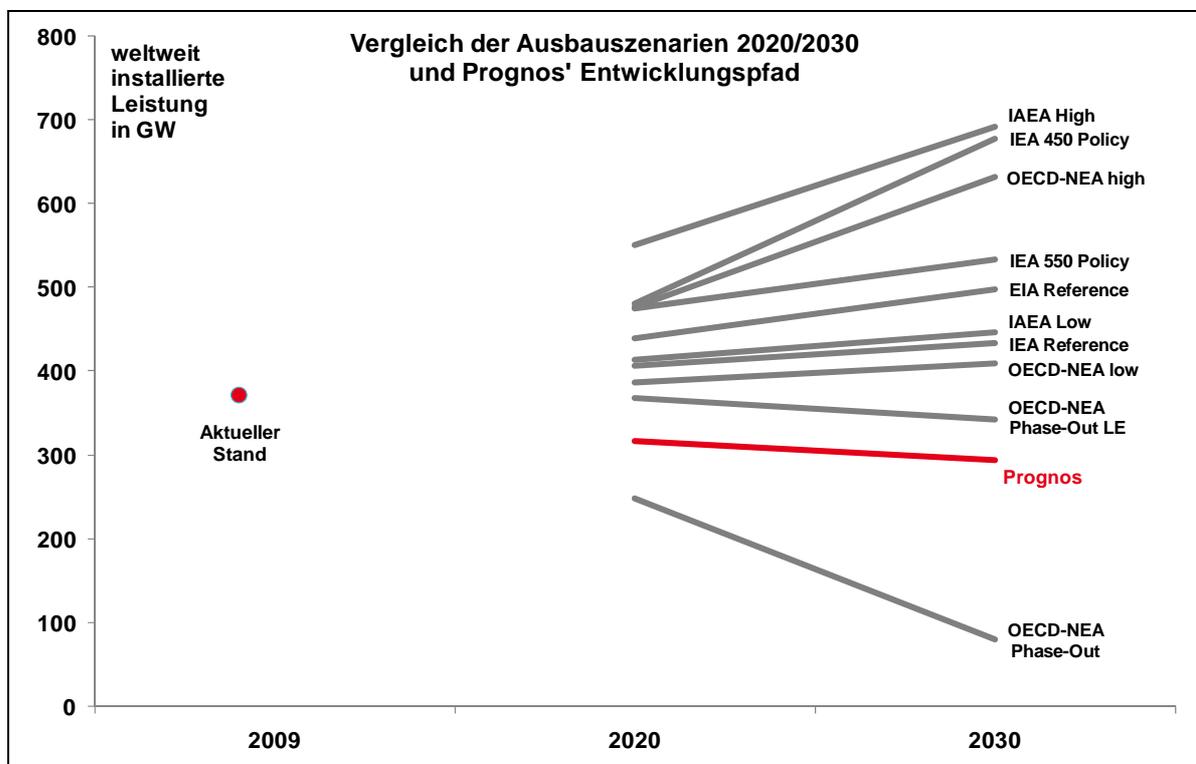
(8) Bezogen auf die weltweite **Stromerzeugung** sinkt der Anteil der Kernenergie gemäß unserem Entwicklungspfad **von 14,8 %** im

Jahr 2006 auf 9,1 % im Jahr 2020 bzw. **7,1 % im Jahr 2030**.
 Dabei wurde von denselben Volllaststunden für Kernkraftwerke
 ausgegangen, die sich im World Energy Outlook 2008 ergeben.

(9) Im Vergleich mit den aktuellen **OECD-NEA**-Szenarien kommt die von uns erwartete Entwicklung der **Leistung** dem Ergebnis des Szenarios "OECD-NEA phase out LE" am nächsten. Dieses sieht einen langfristigen weltweiten Kernenergie-Ausstieg (d.h. keine Neubauten) mit gleichzeitiger Laufzeitverlängerungen für *alle* Reaktoren bis hin zu maximal 60 Jahren vor (s. Abbildung 22). Aufgrund dieser Verlängerungen verringert sich der Bestand im OECD-NEA-Szenario nicht so schnell wie in unserem Entwicklungspfad.

Unseres und das Szenario der OECD-NEA kommen dennoch zu einem ähnlichen Ergebnis, da von uns eine gewisse Zahl von Neubauten erwartet wird, deren Leistung in einem ähnlichen Bereich liegt wie die von der OECD-NEA angenommenen Laufzeitverlängerungen von Bestandsanlagen.

Abbildung 23: Vergleich der Ausbauszenarien 2020/2030 und Prognos' Entwicklungspfad



Quelle: Prognos AG. LE: Life Extension. Zur Ableitung der Nettoleistung aus dem Entwicklungspfad der Bruttoleistung (s. Abbildung 21) unterstellen wir einen pauschalen Abschlagsfaktor von 5 %.

5.3 Fazit

Für die künftige Entwicklung der Kernenergie ziehen wir folgendes **Fazit**:

- Wir erwarten **bis zum Jahr 2030 keine Renaissance** der Kernenergienutzung. Vielmehr werden die altersbedingten Abschaltungen dazu führen, dass die Zahl der Reaktoren, die installierte Leistung und die Stromerzeugung in Kernkraftwerken deutlich zurückgeht. Bis zum Jahr 2020 reduziert sich die Zahl der weltweit betriebenen Kernkraftwerke voraussichtlich um 22 %, bis zum Jahr 2030 um ca. 29 % gegenüber dem Ausgangsniveau im März 2009.
- Trotz der **Zunahme der Neubauaktivität** von Kernkraftwerken gegenüber den letzten 10 Jahren wird das **Niveau des Baubooms der 1970er/80er-Jahre** nicht erreicht.
- Es gibt eine **Zunahme der Ankündigungen** von Kernkraftwerken. Allerdings existierten in der Vergangenheit vor allem in den USA, aber auch in anderen Ländern bereits ambitionierte Ausbaupläne, die nicht realisiert wurden. Wir erwarten, dass etwa 23 % der von ATW für die Zeit bis 2020 angekündigten rund 35 % der von der WNA bis zum Jahr 2030 angekündigten Reaktorprojekte realisiert werden.
- Würden alle Ankündigungen realisiert, so müsste es eine Zunahme der Bauaktivitäten geben, die den starken Anstieg der Bautätigkeit Anfang der 70er-Jahre des letzten Jahrhunderts in den Schatten stellt. Dies erscheint im hohen Maße **unrealistisch**.
- Auch im Vergleich mit dem starken erwarteten Wachstum des weltweiten **Strombedarfs** verliert die Kernenergie bis 2030 deutlich an Bedeutung. Der Anteil der Kernenergie an der weltweiten **Stromerzeugung** sinkt von 14,8 % im Jahr 2006 voraussichtlich auf 9,1 % im Jahr 2020 bzw. 7,1 % im Jahr 2030.
- Aus **anderen Szenarien**, z. B. dem "low"-Szenario der OECD/Nuclear Energy Agency und dem Referenzszenario des World Energy Outlook 2008 der Internationalen Energieagentur lassen sich ebenfalls rückläufige Anteile der Kernenergie an der weltweiten Stromerzeugung ableiten.
- Die von uns erwartete Entwicklung der **Leistung** kommt dem Ergebnis des aktuellen Szenarios der OECD-NEA "phase out Life Extension" am nächsten.

6 Literaturverzeichnis

- 4ecotips (2006), *France upholds a nuclear energy-powered tomorrow*. In: 4ecotips vom 29.9.2006, http://www.4ecotips.com/eco/article_show.php?aid=938&id=280 [Stand 13.5.2009]
- Accenture (2009), *Accenture Multinational Nuclear Power Pulse Survey 2009 Key Findings*, Accenture.
- AREVA (2005), EPR. http://www.avea-np.com/common/liblocal/docs/Brochure/BROCHURE_EPR_US_2.pdf
- AREVA (2009a), *Analyst day - Equipment business unit*, AREVA 9.4.2009, http://www.avea.com/servlet/BlobProvider?blobcol=urloploadedfile&blobheader=application%2Fpdf&blobkey=id&blobtable=Downloads&blobwhere=1238499710847&filename=Investor_Day_Equipment_BU_090409%2C0.pdf [Stand 23.4.2009]
- AREVA (2009b), *Nuclear Equipments – Is there enough production capacity for major components?* Präsentation, April 2009.
- Aston, A. (2006), *Nuclear Power's Missing Fuel. Why Wall Stree is skeptical of backing a new round of proposed nuke plants*, BusinessWeek vom 29. Juni 2006.
- ATW (2000), *Shimane-3: EPDCC Zustimmung*, In: atw 45. Jg. (2000) Heft 10 – Oktober, S.633
- ATW (2003), *China – Kernenergie, Kernkraftwerke*. In: atw 48. Jg. (2003) Heft 4 – April, S.273
- ATW (2007a), *China: Weiterer Ausbau des Kraftwerksparks bis 2030*. In: atw 52. Jg. (2007) Heft 7 – Juli, S.509
- ATW (2007b), *China-Baustart für neues Kernkraftwerk*, In: atw 52. Jg. (2007) Heft 8/9 – August/September, S.597
- ATW (2008), *Frankreich – EDF und Enel: Beteiligungsvertrag für Flamanville 3*. In: atw 53. Jg (2008) Heft 1 – Januar, S.56
- ATW (2009a), *China – Yangjiang: Baubeginn*. In: atw 54 Jg. (2009) Heft 1 – Januar, S.55
- ATW (2009b), *Kernenergie und Kernkraftwerke - Planungen und Vorplanungen weltweit*, Stand: 2008-12-31 - Erhebung: 02.03.2009, http://www.kernenergie.de/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/2008-12-kkw-beantragt-geplant.pdf [Stand: 22.05.2009].
- Asia Times (2002), *Indian activists want plug pulled on nuke plant*, in: Asia Times vom 20.4.2002, <http://www.atimes.com/ind-pak/DD20Df02.html> [Stand 8.6.2009].

- Barent Observer (2008), *Sevmash loses yet another prestige contract*, In: Barent Observer vom 12.8.2009, <http://www.barentsobserver.com/sevmash-loses-yet-another-prestige-contract.4500893-16175.html> [Stand 24.4.2009].
- Barent Observer (2009), *Floating nuclear power plant ready in 2012*, In: Barent Observer vom 21.4.2009, <http://www.barentsobserver.com/floating-nuclear-power-plant-ready-in-2012.4582216-16334.html> [Stand 24.4.2009]
- BfS (2009a), *Kosten und Kostenverteilung des Endlagerprojekts Schacht Konrad*, Bundesamt für Strahlenschutz, 05.05.2009, http://www.endlager-konrad.de/cln_115/nn_1072854/DE/Themen/Kosten/artikel.html?_nnn=true [Stand: 15.6.2009].
- BfS (2009b), *Internationaler Stand der Endlagerung*, Bundesamt für Strahlenschutz, 04.02.2009, http://www.bfs.de/de/endlager/Standortfindung.html/intern_endlagerung.html [Stand: 15.6.2009].
- BGR (2008), *Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2007*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Bruzzano, M.; Flaherty, T. & Hendrickson, J. (2008), *Navigating Nuclear Risks. New Approaches to Contracting in a Post-Turnkey World*, In: booz & co.(Hg.): *Reshaping the Future of Power & Gas. Essential Viewpoints 2006—2008*, booz & co., S. 88—98.
- Bubb, J.; Carroll, D.; D'Olier, R.; Elwell, L. & Markel, A. (2005), *DOE NP2010 Nuclear Power Plant Construction Infrastructure Assessment*, Technical report, U. S. Department of Energy.
- CBO (2008), *Nuclear Power's Role in Generating Electricity*, Congressional Budget Office, Congress of the United States.
- CEER (2008), *2008 Annual Report of the European Energy Regulators, Council of European Energy Regulators, Brussels*.
- Chernoff, H. & Friedman, D. (1990), *Perspectives on the Future of Nuclear Power*, Public Utilities Fortnightly, Ausgabe vom 22. November 1990, S. 28—31.
- CIA (2002): *The World Factbook 2002. Russia* <http://permanent.access.gpo.gov/lps35389/2002/print/rs.html>
- Combs, J. (2004), *Fueling the Future: A New Paradigm Assuring Uranium Supplies in an Abnormal Market*, Presentation to "The World Nuclear Association", Annual Symposium, London, September 2004.
- Combs, J. (2006), *Fueling the Future: An Update*, Combs, J., Ux Consulting, USA. In: WNA Symposium Proceedings: *Building the Nuclear Future: Challenges and Opportunities*, 7.-9.9.2006, London.

- CRS (2007), *Nuclear Power: Outlook for New U.S. Reactors*, CRS Report for the Congress (9.3.2007), Congressional Research Service, <http://www.fas.org/sqp/crs/misc/RL33442.pdf> [26.5.2009].
- DAE (2001), *Long Term Vision of the Department of Atomic Energy*, Department of Atomic Energy, <http://www.dae.gov.in/publ/vision.pdf> [Stand 4.5.2009]
- Deutsche Industriebank (2007/2008), *Rohstoffmärkte; IKB Branchenbericht*, Büchner, H.-J., Deutsche Industriebank, Düsseldorf.
- DOE/EIA (o.J.): *History of Energy in the United States: 1635-2000*, <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/eh/nuclear.html> [Stand: 11.5.2009]
- DOE/EIA (2008): *Annual Energy Review 2007*. DOE/EIA-0384(2007). June 2008
- ECN (2007), *Fact Finding Kernenergie*, Energy Research Centre of the Netherlands, Amsterdam, in Zusammenarbeit mit Nuclear Research and consultancy Group NRG. Im Auftrag des Sociaal-Economische Raad, Commissie Toekomstige Energievoorziening.
- Economic Research Council (2008), *New Nuclear Build in the UK – The Criteria für Delivery*, Hawkins, N., Economic Research Council, London, ISBN 978-0903499-29-3.
- EDF (2009), *The future of nuclear power*, Electricité de France (2009), <http://energy.edf.com/edf-fr-accueil/edf-and-power-generation/nuclear-power/the-future-of-nuclear-power-122266.html> [Stand 13.5.2009].
- EIA/DOE (2008), *International Energy Outlook 2008*, Energy Information Administration - U.S. Department of Energy, [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2008\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2008).pdf) [Stand 18.5.2009].
- Energy Watch Group (2006), *Uranium Resources and Nuclear Energy*, EWG-Series No 1/2006, Ottenbrunn/Aachen.
- FT (2009), *Finnish reactor provisions hit Areva profits*, in: Financial Times, 31.08.2009
- Freeman, M. (2006), *Industry Is Rebuilding Its Nuclear Manufacturing Capacity*, Executive Intelligence Review, Ausgabe vom 11. August 2006, S. 33—37.
- Frewer, H., Gattinger, M. & Halbritter, J. (1989), *Ist der Ausbau der Kernenergie in der EG abgeschlossen?*, In: atomwirtschaft, August/September 1989, S. 394—401
- Froggatt, A. (2008), *The World Nuclear Industry Status Report and Future Trends*, Präsentation, Workshop on Energy Scenarios, Hamburg, 11./12. September 2008.
- Gadekar, S. (2009), *Nuclear Power in India*. In: Mez, L.; Schneider, M.; Thomas, S. (Hrsg) (2009); *International Perspectives on Energy Policy and the Role of Nuclear Power*.
- Gawlicki, S. M. (2008), *Financing New Nukes*, Federal loan guarantees raise hope for new reactors planned by affiliates of Constellation and NRG, Public Utilities Fortnightly 146(2), S. 19—22.

- German Trade & Invest (2008), *Energiewirtschaft VR China 2007*, <https://www.gtai.de/ext/Export-Liste?type=pdf&fld=597544> [Stand 28.4.2009].
- Gielecki, M. und Hewlett, J. G. (1994), *Commercial Nuclear Electric Power in the United States: Problems and Prospects*, Energy Information Administration/Monthly Energy Review August 1994.
- Geusau, A. A. von (2006), *Pre-conditions for Financing Nuclear Power*, Präsentation.
- Greenpeace (2008), *Baustopp für Flamanville 3*. In: Greenpeace vom 27.5.2008, http://www.greenpeace.de/themen/atomkraft/nachrichten/artikel/baustopp_fuer_emflamanville_3em/ [13.5.2009].
- Hansen, U. (1983), *Kernenergie und Wirtschaftlichkeit. Eine Analyse der erwarteten Stromkosten gebauter und geplanter Kraftwerke*, Verlag TÜV Rheinland, Köln
- Harding, J. (2007), *Economics of Nuclear Power and Proliferation Risks in a Carbon-Constrained World*, The Electricity Journal 20(10), S. 65—76.
- Hassel, S. (2009), *Atom-Allianz mit zweifelhaften Aussichten*, In: Welt am Sonntag vom 10.5.2009.
- HB (2008), *Druckwasserreaktor in Finnland verzögert sich angeblich noch länger*, in: Handelsblatt Nr. 203, von Montag, 20.10.2008.
- Heinrich-Böll-Stiftung (2006), *Mythos Atomkraft – Ein Wegweiser*, Heinrich-Böll- Stiftung, Berlin.
- Hennes, M. (2006a), *Teures Eisenerz treibt Stahlpreis*, in: Handelsblatt Nr. 95 vom Mittwoch, dem 17.05.2006.
- House of Commons (2009), *Engineering: turning ideas into reality*, Fourth Report of Session 2008—09, Volume I, Bericht; Innovation, Universities, Science and Skills Committee.
- Hultman, N. E.; Koomey, J. G. & Kammen, D. M. (2007), *What History Can Teach Us about the Future Cost of U. S. Nuclear Power. Past experience suggests that high-cost surprises should be included in the planning process*, Environmental Science & Technology 41(7), 2088—2093.
- IAEA (1993), *IAEA Yearbook 1993*, International Atomic Energy Agency, Vienna
- IAEA (2006), *Uranium Resources: Plenty to Sustain Growth of Nuclear Power*, Echaverri, L., Sokolov, Y., International Atomic Energy Agency, France.
- IAEA (2007a), *Convention on Nuclear Safety- Fourth Italian National Report*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2007b), *Indonesia - National Report on Compliance to Convention on Nuclear Safety*, International Atomic Energy Agency.

- IAEA (2007c), *National Report of Poland on Compliance with the Obligations of the Convention on Nuclear Safety*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2007d), *Republic of Turkey - National Report for the Convention on Nuclear Safety Supplementary Report No: 3*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2007e), *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power*, International Atomic Energy Agency, IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807; no. NG-G-3.
- IAEA (2007f), *Country Nuclear Power Profiles. 2007 Edition*, International Atomic Energy Agency, <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/cnpp2007/pages/countryprofiles.htm> [Stand 15.5.2009].
- IAEA (2007g), *Bangladesh - Second National Report under the Convention on Nuclear Safety*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2007h), *The Fourth National Report of the Republic of Belarus under the Convention on Nuclear Safety*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008a), *Bangladesh - Convention on Nuclear Safety – Questions and Answers posted to Bangladesh*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008b), *Belarus - Convention on Nuclear Safety – Questions and Answers posted to Belarus*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008c), *Convention on Nuclear Safety – Contracting Parties (24.12.2008)*, International Atomic Energy Agency, http://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/nukesafety_status.pdf [Stand 18.5.2009].
- IAEA (2008d), *Indonesia - Convention on Nuclear Safety – Questions and Answers posted to Indonesia*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008e), *Italy - Convention on Nuclear Safety – Questions and Answers posted to Italy*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008f), *Nuclear Technology Review 2008*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008g), *Poland - Convention on Nuclear Safety – Questions and Answers posted to Poland*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008h), *Turkey - Convention on Nuclear Safety – Questions and Answers posted to Turkey*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008i), *Financing of New Nuclear Power Plants*, Bericht, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008j), *International Status and Prospects of Nuclear Power*, International Atomic Energy Agency, Wien.

- IAEA (2008k), *Nuclear Technology Review*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2008l), *Restarting Delayed Nuclear Power Plant Projects*, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2009a), *Nuclear fuel cycle information system: a directory of nuclear fuel cycle facilities: 2009 Edition*, International Atomic Energy Agency, ISBN 978-92-0-102109-0, ISSN 1011-4289.
- IAEA (2009), International Atomic Energy Agency [Stand: 16.06.2009].
- IAEA/PRIS (2009a), *Power Reactor Information System (PRIS)*, International Atomic Energy Agency, Datenlieferung vom 18.03.2009 nach persönlicher Kommunikation.
- IAEA/PRIS (2009b), *Power Reactor Information System (PRIS)*, <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris.reaopag.htm> [Stand 06.05.2009].
- IEA (2004), *World Energy Investments Outlook 2003*, International Energy Agency, Paris. ISBN 92-64-01906-5.
- IEA (2005), *Projected Costs of Generating Electricity*, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2006), *World Energy Outlook 2006*, OECD/IEA, Paris.
- IEA (2007a), *Nuclear Power*, IEA Energy Technology Essentials, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2007b), *World Energy Outlook 2006*, International Energy Agency, Paris. ISBN 92-64-10989-7-2006.
- IEA (2008), *World Energy Outlook 2008*, International Energy Agency, Paris.
- IEA (2009), *The impact of the financial and economic crisis on global energy investment*, International Energy Agency, May 2009.
- JAIF (2008), *MHI Announces Plans for Nuclear Business*, Japan Atomic Industrial Forum, www.jaif.or.jp/english/aij/member/2008/2008-06-09c.pdf [Stand 22.5.2009].
- Jurewitz, J.L. (2009), *The Current Outlook for the Nuclear Power Industry in the United States*. In: Mez, L.; Schneider, M.; Thomas, S. (Hrsg) (2009); *International Perspectives on Energy Policy and the Role of Nuclear Power*.
- Kaufmann, D.; Kraay, A.; Mastruzzi, M. (2008). *Governance Matters VII: Aggregate and Individual Governance Indicators, 1996-2007*. World Bank Policy Research Working Paper No. 4654, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1148386 [Stand 18.5.2009].
- Kerzel, M. & Thränert, O. (2009), *Von der friedlichen Nutzung der Kernenergie zum Bau der Atombombe?*, Diskussionspapier FG3-DP 03, Januar 2009, Forschungsgruppe Sicherheitspolitik, Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin.

- Kim, D.-I. (1998), *The Korean Next Generation Reactor*, In: atw, 43.Jg (1998) Heft 6 – Juni, S. 366-368
- Kleemann, U. (2007), *Status of Radioactive Waste Disposal in Germany*, Conference Proceedings, Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, Braunschweig, November 6-9, 2007, Session 1, S. 60-67.
- Knorr, J. (1995), *Die Ausbildung von Kerntechnikern an deutschen Hochschulen*, In: atw, 40.Jg (1995) Heft 5 – Mai, S.300
- Konstantin, P. (2007), *Praxisbuch Energiewirtschaft; Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN-10 3-540-35377-1.
- Lantzke, U. (1980), *Prolog*, In: atomwirtschaft, Oktober 1980, S. 508
- Liebholz, W.-M. (1996), *Zehn, zwanzig, dreißig, ... Betriebsjahre*, In: atw, 41.Jg (1996) Heft 1 – Januar, S.3
- Lundgren, J. und Tirén, I. (1996), *Development of new BWRs*, In: atw, 41.Jg (1996) Heft 4 – April, S.248-250
- Macalister, Terry (2009), *Green lobby and nuclear groups clash over role of renewable energy*, In: Guardian vom 16.03.2009
- MIT (2003), *The Future of Nuclear Power; An interdisciplinary MIT Study*, Massachusetts Institute of Technology, ISBN 0-615-12420-8, <http://web.mit.edu/nuclearpower/> [Stand 22.5.2009].
- Moody's (2007), *New Nuclear Generation in the United States: Keeping Options Open vs Addressing An Inevitable Necessity*, Bericht, Moody's Corporate Finance.
- Moody's (2008), *New Nuclear Generating Capacity: Potential Credit Implications for U.S. Investor Owned Utilities*, Bericht, Moody's Corporate Finance.
- Morris, C.; Kranowitz, J.; Kelly, M.; Fascitelli, B. & Hughes, M. (2007), *Nuclear Power Joint Fact-Finding*, The Keystone Center, Keystone, CO.
- NEA & IEA (2005), *Projected Costs of Generating Electricity*, Bericht, OECD.
- NEA (2008), *Nuclear Energy Outlook 2008*, Nuclear Energy Agency NEA/OECD.
- NEA / OECD (2006), *Uranium 2005: Resources, Production and Demand*, NEA/OECD.
- NEA / OECD (2008), *Uranium 2007: Resources, Production and Demand*, NEA/OECD.
- Neff, T.L. (2004), *Insights into the future: Uranium prices and price formation 1947 – 2004*, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Center for International Studies, Presentation to "The World Nuclear Association", September 2004.

- Neff, T.L. (2006a), *Dynamic Relationships Between Uranium and SWU Prices: A New Equilibrium*, MIT's Center for International Studies, USA, in: WNA Symposium Proceedings: Building the Nuclear Future: Challenges and Opportunities, 7.-9.9.2006, London.
- Neff, T.L. (2006b), *Uranium and Enrichment – Fuel for the Nuclear Renaissance*, MIT's Center for International Studies, USA, in: Nuclear Energy Review 2006.
- Neff, T.L. (2007), *Uranium and Enrichment: Boom or Bubble*, BMO Capital Markets, 2nd Annual European Investor Roadshow, October 15-18, 2007, Switzerland.
- NEI (2001), *Vision 2020 – Nuclear Energy and the Nation's Future Prosperity*, Nuclear Energy Institute.
- NEI (2007a), *Expanded Manufacturing Capacity Needed to Support New Nuclear Plant Construction*, Bericht, Nuclear Energy Institute.
- NEI (2007b), *Nuclear Energy Industry Initiatives Target Looming Shortage of Skilled Workers*, Bericht, Nuclear Energy Institute.
- NPCIL (2008), *The budget allocated to each of its agency, indicating the particulars of all plans, proposed expenditures and reports on disbursements made*, Nuclear Power Corporation of India Limited, http://www.npcil.nic.in/xls/11_Budget.xls [Stand 8.6.2009].
- NRC (2009a), *Expected New Nuclear Power Plant Applications*, Nuclear Regulatory Commission, <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/new-licensing-files/expected-new-rx-applications.pdf> [Stand 12.3.2009].
- NRC (2009b), *New Reactor Licensing Applications – 11.2.2009*, Nuclear Regulatory Commission, <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/new-licensing-files/new-rx-licensing-app-legend.pdf> [Stand 15.5.2009].
- NRC (2009c), *Status of License Renewal Applications and Industry Activities*, Nuclear Regulatory Commission, <http://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/applications.html> [Stand 16.5.2009].
- NRC (2009d), *Approved Applications for Power Uprates*, Nuclear Regulatory Commission, <http://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/power-uprates/status-power-apps/approved-applications.html> [Stand 22.5.2009].
- NTDG (2001). *A Roadmap to Deploy New Nuclear Power Plants in the United States by 2010 Volume II. Main Report*, Near Term Deployment Group, im Auftrag des United States Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology.
- Oden, M. (2009), *600 Tonnen schweres Nadelöhr*, Financial Times Deutschland, Ausgabe vom 31.03.2009.
- OECD (2006), *Uranium 2005 – Resources, Production and Demand; Summary*, ISBN 92-64-024263.

- OECD (2009a), *Country Risk Classifications of the Participants to the Arrangement on Officially Supported Export Credits*, <http://www.oecd.org/dataoecd/9/12/35483246.pdf> [Stand 18.5.2009].
- OECD (2009b), *Country statistical profiles 2009 – China*, <http://stats.oecd.org/wbos/viewhtml.aspx?queryname=18182&querytype=view&lang=en> [Stand 12.5.2009].
- OECD (2009c), *Country Statistical profiles 2009 – USA*, <http://stats.oecd.org/wbos/viewhtml.aspx?queryname=18175&querytype=view&lang=en> [Stand 12.5.2009].
- OECD (2009d), *Country Statistical Profile – India*, <http://stats.oecd.org/wbos/viewhtml.aspx?queryname=18185&querytype=view&lang=en> [Stand 12.5.2009].
- Oshima, K. (2009), *Nuclear Power in Japan – Top Priority of National Energy Policy*, In: Mez, L.; Schneider, M.; Thomas, S. (Hrsg) (2009); *International Perspectives on Energy Policy and the Role of Nuclear Power*.
- Pagnamenta, R. (2007), *Skills crisis looming in UK nuclear industry*, The Times, Ausgabe vom 5. November 2007.
- Parker, L. & Holt, M. (2007), *Nuclear Power: Outlook for New U.S. Reactors*, CRS Report for Congress.
- Platts (2009), *Ameren drops plan to build 1,600-MW nuclear unit in Missouri*, <http://www.platts.com/Nuclear/News/6278766.xml?S=printer&p=Nuclear/News&sub=Nuclear> [Stand 22.5.2009].
- Popova, L.V. (2009), *Russian Energy Policy – Twenty Years After Chernobyl: No Lessons Learned?* In: Mez, L.; Schneider, M.; Thomas, S. (Hrsg) (2009); *International Perspectives on Energy Policy and the Role of Nuclear Power*.
- PowerTech (2009), *Tomari 3*, Power-Technology.com, <http://www.power-technology.com/projects/tomari-3/> [Stand 8.6.2009].
- Prasser, H.M (2009). *Gibt es genug Uran*. Prasser, H.M., Institut für Energietechnik, ETH Zürich. SGK Frühjahrsseminar, 02. April 2009, Olten, Schweiz.
- Prognos AG (2007a), *Energieperspektiven Schweiz 2035, Band 4, Exkurs 10: Sensitivitätsanalyse der Kosten der zentralen Stromproduktionsanlagen*, Rits, V. & Kirchner, A., Prognos AG, Basel. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern.
- Prognos AG (2007b), *Energieperspektiven Schweiz 2035, Band 5: Analyse und Bewertung des Elektrizitätsangebots*. Rits, V. & Kirchner, A., Prognos AG, Basel. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern.
- Prognos AG (2008), *Angaben zu Investitionskosten von GuD- und Kohlekraftwerken*, Prognos, Basel/Berlin (intern).

- PSI (2005), *Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen*, Hirschberg, S. et al., Paul Scherrer Institut, Villigen PSI. Im Auftrag des Bundesamts für Energie, Bern.
- Rempe, N. (2007), *Eight Years WIPP Progress*, Conference Proceedings, Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, Braunschweig, November 6-9, 2007, Session 1, S.81-87.
- Reuters (2008), *EnBW: Abbau von Atomkraftwerk Obrigheim kostet 500 Mio Euro*, Meldung vom 10.10.2008
<http://de.reuters.com/article/companiesNews/idDEBEE4990FW20081010> [Stand 12.06.2009].
- Rosatom (2008), *Head of Rosatom visits Leningrad NPP and Leningrad NPP-2*, Pressemeldung vom 9.6.2008, http://www.minatom.ru/en/news/10446_09.06.2008 [Stand 8.6.2009].
- Sailer, M. (2007), *Renaissance der Kernenergie?* Bericht, Öko-Institut, Überarbeitung eines auf der Fachtagung "Mythos Stromlücke" der Schweizerischen Energie-Stiftung am 31. August 2007 gehaltenen Vortrags.
- Schindler, J. und Zittel, W. (2007), *Einfluss der Urankosten auf die Stromerzeugungskosten in Atomkraftwerken*, EnergyWatchGroup / Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Ottobrunn.
- Schlüssel, D. & Biewald, B. (2008), *Nuclear Power Plant Construction Costs*, Bericht, Synapse Energy Economics, Inc..
- Schneider, M. with Froggatt, A. (2007), *The World Nuclear Industry Status Report 2007*, Comissioned by the Greens-EFA Group in the European Parliament.
- Science & Technology Policy Research (SPRU, University of Sussex) and NERA Economic Consulting (2006), *The Role of Nuclear Power in a low carbon economy; Paper 4: The economics of nuclear power*. Im Auftrag der Sustainable Development Commission.
- Spiegel (2006), *Russland baut schwimmendes Kernkraftwerk*, erschienen am 15.6.2006, <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,421436,00.html> [Stand 8.6.2009].
- Squassoni, S. (2008), *Nuclear Renaissance: Is It Coming? Should It?* Bericht, Carnegie Endowment for International Peace, Washington, DC.
- Sternfeld, E. (2009), *Development of Civil Nuclear Power Industry in China*. In: Mez, L.; Schneider, M.; Thomas, S. (Hrsg) (2009); *International Perspectives on Energy Policy and the Role of Nuclear Power*.
- Streffer, C.; Gethmann, C.F.; Heinloth, K.; Rumpff, K. und Witt, A. (2005), *Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung*, Walter de Gruyter, Berlin/New York, ISBN 978-3-11-018431-0.
- Suga, M. (2008), *Mitsubishi Heavy May Add Nuclear-Equipment Factory in Japan*, Bloomberg Meldung vom 26. Mai 2008.

- SZ (2003), *Ein strahlendes Ende*, In: Süddeutsche Zeitung vom 14.11.2003, <http://www.sueddeutsche.de/politik/409/394198/text/print.html> [Stand 12.06.2009].
- Takemoto, Y. & Katz, A. (2008), *Samurai-Sword Maker's Reactor Monopoly May Cool Nuclear Revival*, Bloomberg Meldung vom 13. März 2008.
- The Royal Academy of Engineering (2004), *The Cost of Generating Electricity*, A study carried out by PB Power for The Royal Academy of Engineering, London. ISBN 1-903496-11-X.
- The Watt Committee on Energy (1984), *Nuclear Energy: A Professional Assessment*, The Watt Committee on Energy, London.
- Thomas, S.; Bradford, P.; Froggatt, A.; Milborrow, D. (2007), *The economics of nuclear Power, Research Report 2007*. Im Auftrag von Greenpeace. <http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/the-economics-of-nuclear-power.pdf> [23.3.2009].
- USEC (2006), *The Nuclear Fuel Cycle*, United States Enrichment Corporation.
- Vance, R. (2007), *Powering the Nuclear Renaissance*, Präsentation auf dem Swiss Nuclear Forum Symposium, 2007.
- Verivox (2009a), *Sarkozy verkündet Bau von EPR-Atommeiler in Frankreich*, In: Verivox (2009) vom 30.1.2009, <http://www.verivox.de/nachrichten/sarkozy-verkuendet-bau-von-epr-atommeiler-in-frankreich-39996.aspx> [Stand 9.4.2009].
- Verivox (2009b), *Erster EPR in Frankreich wird um ein Fünftel teurer als geplant*. In: Verivox vom 4.12.2008, <http://www.verivox.de/nachrichten/erster-epr-in-frankreich-wird-um-ein-fuenftel-teurer-als-geplant-38450.aspx> [Stand 1.4.2009].
- Von Hirschhausen, C. & Weigt, H. (2007), *Aktive Wettbewerbspolitik für effiziente Elektrizitätserzeugungsmärkte – Instrumente, internationale Erfahrungen und wirtschaftspolitische Schlussfolgerungen*, Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung 76 (2007), 1, S. 65–86, DIW Berlin.
- Welt (2009), *Renaissance mit Hindernissen*, Welt Online, 12.07.2009 http://www.welt.de/wams_print/article4104625/Renaissance-mit-Hindernissen.html
- WNA (2008), *The Economics of Nuclear Power*, World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/info/pdf/EconomicsNP.pdf> [Stand 1.4.2009].
- WNA (2009a), *Emerging Nuclear Energy Countries*, World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf102.html> [Stand 15.5.2009]
- WNA (2009b), *Nuclear Power in China*, World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf63.html> [Stand 17.4.2009].
- WNA (2009c), *Nuclear Power in France*, World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf40.html> [Stand 24.4.2009]

- WNA (2009d), *Nuclear Power in India*, World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf53.html> [Stand 24.4.2009].
- WNA (2009e), *World Nuclear Power Reactors 2007-09 and Uranium Requirement*, <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html> [Stand 1.5.2009].
- WNA (2009f), *Heavy Manufacturing of Power Plants*, World Nuclear Association, http://www.world-nuclear.org/info/inf122_heavy_manufacturing_of_power_plants.htm [Stand 22.5.2009].
- WNA (2009g), *World Nuclear Power Reactors 2007-09 and Uranium Requirement*, <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html> [Stand 1.4.2009].
- WNA (2009h), *Nuclear Power in Russia*, World Nuclear Association, <http://www.world-nuclear.org/info/inf45.html> [Stand 7.5.09].
- WNN (2007), *AREVA lands world's biggest ever nuclear power order*. In: World Nuclear News vom 26.11.2007, <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=14454&LangType=2057&terms=areva+taishan> [Stand 13.5.2009].
- WNN (2008), *MHI tools up for surge in construction*, World Nuclear News, <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=18170> [Stand 22.5.2009].
- WNN (2009a), *Money no object for Indian reactor plans*, In: World Nuclear News (2009) vom 25.3.2009, <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=24924&terms=money+no+object> [12.5.2009].
- WNN (2009b), *Yucca Mountain 'terminated'*. In: World Nuclear News (2009) vom 8.5.2009, <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=25183&terms=yucca+mountain+terminated> [Stand 12.5.2009].
- WNN (2009c), *Olkiluoto 3 losses to reach €1.7 billion*, World Nuclear News, <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=24732> [Stand 22.5.2009].
- World Bank (2008), *Aggregate Governance Indicators 1996-2007*, The World Bank Group, <http://info.worldbank.org/governance/wqi/pdf/wgidataset.xls> [Stand 18.5.2009].

7 Anhang

7.1 Fallstudien zum Kernenergie-Ausbau

7.1.1 China

(1) Das mit 1,328 Mrd. Einwohnern bevölkerungsreichste Land der Erde treibt wie kaum ein anderer Staat die Nutzung der Kernenergie voran. Zwar besitzen die elf zurzeit am Netz befindlichen Kernkraftwerke mit knapp **9 GW installierter Leistung** nur einen Anteil von 1,9 % an der gesamten Stromproduktion, allerdings befinden sich elf weitere Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 11 GW im Bau (OECD 2009b). Des Weiteren sind 24 Kernkraftwerke mit einer Gesamtleistung von mehr als **26 GW geplant** und mindestens 70 Kernkraftwerke mit einer Leistung von über 70 GW angekündigt (WNA 2009b). Insgesamt wären damit 116 GW erreicht.

Ursprünglich hatte die chinesische Regierung im elften **5-Jahres-Plan** (2006-2011) das Ziel formuliert, bis 2020 insgesamt 40 GW nukleare Erzeugungskapazität bereit zu stellen. Nach Angaben der „National Development and Reform Commission“ soll bis 2030 die installierte Leistung auf 120-160 GW erhöht werden (ATW 2007a; German Trade & Invest 2008). Es ist fraglich, ob diese Leistungssteigerung aufgrund knapper Herstellerkapazitäten in diesem Maße realisiert werden kann, zumal laut WNA China im Jahr 2008 Planungen im Umfang von ca. 10 GW zurückgezogen hat.

(2) Um ein Kernkraftwerk in China bauen und betreiben zu können bedarf es, wie auch in anderen Ländern, mehrerer **Genehmigungen**. Laut IAEA gehören dazu Lizenzen für den Standort, den Bau, die Inbetriebnahme, den Betrieb und die Außerbetriebnahme.

Diese werden durch die “National Nuclear Safety Administration” (NNSA) und die “State Environment Protection Administration” (SEPA) genehmigt. Über die Dauer eines solchen Genehmigungsprozesses können aufgrund fehlender Informationen keine genauen Angaben gemacht werden. Es ist denkbar, dass dieser Prozess durch die zentralen Entscheidungsorgane der Regierung schneller abläuft als in anderen Staaten.

(3) Die bislang veröffentlichten Angaben zu **Investitionskosten** chinesischer Kernkraftwerke legen nahe, dass ein durchschnittliches Kraftwerk mit 1.000 MW Leistung günstiger gebaut wird als beispielsweise in Westeuropa oder den Vereinigten Staaten von Amerika. Laut eigenen Berechnungen liegen die spezifischen Investitionskosten üblicherweise zwischen ca. 1.000 €/kW und 1.400 €/kW.

(4) Wurden die ersten Kraftwerke in China noch schlüsselfertig von Anbietern aus Frankreich, Japan und den USA gebaut, wächst die **Eigenfertigungsrate** für die neueren Kraftwerke durch den vorangegangenen Technologietransfer. Die Entwicklung lässt vermuten, dass viele der in Planung befindlichen Reaktorblöcke fast vollständig in China gebaut werden. Dabei wird zunehmend der Reaktortyp CPR-1000, ein auf einem französischen Design basierender 1.000 MW-Druckwasserreaktor, eingesetzt.

Bereits Anfang des neuen Jahrtausends war es möglich, innerhalb von etwas mehr als 5 Jahren den zweiten Block des **Kraftwerks Ling Ao** zu errichten. Dieser hat am 8.1.2003, zwei Monate früher als geplant, den kommerziellen Betrieb aufgenommen (ATW 2003).

Die neuen Kraftwerke weisen eine ähnlich **kurze geplante Bauzeit** auf. Es ist davon auszugehen, dass diese ebenfalls innerhalb von sechs Jahren fertiggestellt werden können.

Eines der größten Bauvorhaben Chinas ist zurzeit das **Kraftwerk Yangjiang**. Mit sechs 1.000 MW Reaktorblöcken und geschätzten 9 Mrd. € Gesamtinvestitionskosten soll das Kraftwerk mit allen sechs Blöcken spätestens im Jahr 2017 einsatzbereit sein (ATW 2009a). Die Bauarbeiten für den ersten Block haben Ende des Jahres 2008 begonnen und im Frühjahr 2009 wird mit dem zweiten Block begonnen.

(5) Zu den Stärken der chinesischen Nuklearindustrie zählen die kurzen Bauzeiten und die **meist plangenaue Einhaltung** der bisher geplanten Projekte. Kaum ein anderes Land hat innerhalb so kurzer Zeit Kraftwerke geplant und ans Netz angeschlossen. Es bleibt dabei allerdings unklar, inwiefern kritische Standortprüfungen und Bürgerbeteiligungen durchgeführt werden und ob bei der Planung auf Umweltschutzaspekte eingegangen wird. Die Informationslage lässt diesbezüglich keine genaueren Betrachtungen zu.

7.1.2 USA

(1) Die Vereinigten Staaten von Amerika besitzen mit den 104 in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken die weltweit größte nukleare Stromerzeugungskapazität. Insgesamt liegt die installierte Leistung bei rund 101 GW. Dies entspricht einem Anteil von 19,2 % der in den USA installierten Kraftwerkskapazitäten (OECD 2009c).

Trotz des zukünftig steigenden Strombedarfs in den nächsten Jahrzehnten befindet sich derzeit laut IAEA nur ein Kernkraftwerk im Bau und das schon seit 1972. Es gibt auch noch kein genaues Fertigstellungsdatum. Zum letzten Mal wurde im Jahre 1996 ein

Reaktor ans Netz angeschlossen. Des Weiteren gibt es **keine konkreten Planungen** für zusätzliche Kraftwerke. Allerdings haben die amerikanischen Energiekonzerne insgesamt 17 kombinierte Bau- und Betriebsgenehmigungen (sog. „Combined License“) für insgesamt 26 Reaktoren bei der zuständigen Behörde (Nuclear Regulatory Commission kurz NRC) beantragt; in den nächsten zwei Jahren werden noch fünf weitere Anträge für insgesamt sieben Reaktoren erwartet (NRC 2009a). Die geplante Dauer des Genehmigungsprozesses beträgt laut NRC mindestens drei Jahre (NRC 2009b).

(2) Es bleibt zunächst völlig unklar, wie viele dieser Genehmigungen erteilt bzw. verwendet werden. Hierfür sind mehrere Gründe ursächlich:

Zum einen gibt es keine Lösung für das Endlagerungsproblem von hochradioaktivem Müll. Die Pläne für das seit mehreren Jahrzehnten geplante Endlager „**Yucca Mountain**“ wurden Anfang des Jahres von der amerikanischen Regierung eingefroren (WNN 2009b). Anlass dafür gab eine Debatte über die evtl. nicht ausreichende Lagerkapazität. Einige Experten sind der Meinung, dass der schon existierende radioaktive Abfall, der zwischenzeitlich in Kühlbecken innerhalb der Kraftwerke sowie in Abfallbehältern zwischengelagert wird, bereits einen Großteil der Kapazität auslasten wird. Darüber hinaus besteht Unklarheit, ob die Sicherheit über den langen Lagerungszeitraum gewährleistet werden kann (Jurewitz 2009).

Eine zweite große Hürde bilden die **hohen Investitionskosten** und die Frage, wer diese finanzieren wird. Die Analysten von Moody's haben in den letzten Jahren die Kostenprognosen für Kernkraftwerke stetig angehoben. So prognostizieren sie spezifische Investitionskosten für amerikanische Kernkraftwerke von bis zu 7.000 US\$/kW (Moody's 2008). Diese Annahme wird durch mehrere Pressemeldungen der Energieunternehmen unterstützt, wonach die geplanten Kosten sich teilweise verdoppelt haben (WNA 2008).

(3) Die hohe Anzahl an beantragten Genehmigungen führt nicht zwangsläufig zu einem großen Anstieg an Neubauten. In den 60er- und 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts gab es mehr als 200 Vorbestellungen für neue Kernkraftwerke, davon wurden allerdings nur 13 Projekte realisiert (Jurewitz 2009).

(4) Trotz der hohen Investitionskosten konnte die Mehrheit der amerikanischen Kernkraftwerke wirtschaftlich betrieben werden. In den letzten 25 Jahren wurden 13 Kernkraftwerke vom Netz genommen. Deren durchschnittliche Laufzeit betrug 23 Jahre. Einige Experten sind der Meinung, dass es sich dabei nur um eine **Be-**

reinigung der ineffizienten Kraftwerke gehandelt hat (Jurewitz 2009). In den letzten zehn Jahren wurde kein Reaktor abgeschaltet. Vielmehr wurden für 52 Reaktoren bei der NRC Laufzeitverlängerungen von bis zu 20 Jahren genehmigt. Allerdings bedeutet die Lizenzverlängerung noch nicht, dass die Kernkraftwerke tatsächlich so lange betrieben werden. Hierfür sind ausschließlich sicherheitstechnische und ökonomische Optimierungen maßgeblich. Weitere 18 Anträge auf eine längere Laufzeit werden zurzeit bearbeitet und bis zu 20 Anträge werden laut NRC noch erwartet (NRC 2009c). Die in Betrieb befindlichen Kraftwerke besitzen ein Durchschnittsalter von 29 Jahren.

(5) Zwischen 1990 und 2006 konnte die durchschnittliche Auslastung der amerikanischen Kernkraftwerke von 65 % auf 90 % gesteigert werden. Ferner wurden bei vielen Kraftwerken leistungssteigernde Maßnahmen mit Hilfe von effizienteren Turbinen- und Verdampfersystemen durchgeführt. Laut NRC hat sich seit 1977 somit die installierte Leistung um mehr als 5 GW erhöht. Das Potential dieser Art von Leistungssteigerung ist allerdings ausgeschöpft. Eine Fortführung dieses Trends kann nicht erwartet werden (Jurewitz 2009; NRC 2009d).

(6) Im vergangenen Jahr haben sich einige amerikanische Energieversorger zu ihren Neubauplänen geäußert. Demnach sind für die nächsten zehn Jahre mindestens zehn Blöcke angekündigt. Da die Betreiber allerdings mit Gesamtkosten zwischen **5,6 und 17,5 Mrd. US\$** rechnen, bleibt es fraglich, ob wirklich alle Blöcke realisiert werden (WNA 2008). Die große Spannweite verdeutlicht die finanzielle Unsicherheit, mit denen die Betreiber bei ihrer Planung umgehen müssen. Aufgrund dieser Tatsache ist es schwierig, Annahmen zum zukünftigen Ausbau zu treffen. Vor allem die Frage der Finanzierung ist ungeklärt. Durch die starke Abnahme der Bautätigkeit in den letzten beiden Jahrzehnten stellt sich zusätzlich die Frage, ob die geplanten Kraftwerke überhaupt bis 2020 realisiert werden können. Die im Jahr 2001 von der amerikanischen Kernenergieindustrie vorgestellte „Vision 2020“ mit dem Plan, bis 2020 zusätzlich 50 GW beauftragt, im Bau bzw. fertig-gestellt zu haben, wird sich mit großer Wahrscheinlichkeit nicht in die Tat umsetzen lassen (NEI 2001). Hier dürfte auch der Mangel an ausgebildeten Fachkräften wirksam werden. Seit den 1980er-Jahren sinkt die Zahl an Studienabgängern, Ingenieuren, qualifizierten Kesselbauern, Rohrlegern sowie Betriebs- und Wartungspersonal in den USA (Schneider & Froggatt 2007). Im Jahre 2005 hat die amerikanische Regierung gesetzliche Regelungen verabschiedet („Energy Policy Act“), die Investitionsanreize für den Neubau von Kernkraftwerken bieten sollen. Zu diesen Anreizen gehören unter anderem Kreditbürgschaften in Höhe von 80% für die ersten neu installierten 6.000 MW, sowie zusätzliche finanzielle Unterstützung im Falle erheblicher Bauverzögerungen

für die ersten sechs Kernkraftwerke in Höhe von insgesamt 2 Mrd. US\$ (Schneider & Froggatt 2007; Jurewitz 2009).

(7) Große Probleme werden durch die fragliche Finanzierung sowie die derzeit fehlende Endlagerungskapazität für hochradioaktive Abfälle entstehen. Nur wenn diese Konflikte gelöst werden, kann an einen größeren Neubau von Kernkraftwerken in den USA gedacht werden.

7.1.3 Indien

(1) Indien besitzt derzeit 17 Kernkraftwerke mit einer installierten Bruttoleistung von mehr als **4 GW**. Diese Leistung trägt 2,5 % zur indischen Stromproduktion bei (OECD 2009d). Von den sechs im Bau befindlichen Kraftwerken mit einer Bruttoleistung von 3,1 GW werden fünf mit hoher Wahrscheinlichkeit in den nächsten zwei Jahren fertiggestellt. Zusätzlich sind zehn Kernkraftwerke mit einer installierten Leistung von 9,7 GW geplant und weitere 15 Kraftwerke mit einer Bruttoleistung von ca. 11,2 GW angekündigt (WNA 2009d). Da Indien bislang den Atomwaffen-Sperrvertrag nicht unterzeichnet hat, bestanden international eingeschränkte Handelsbeziehungen für Kernenergie-technik und Brennstoffe. Dies hatte zur Folge, dass die Entwicklung indischer Technik isoliert stattgefunden hat. Durch eine **Lockerung dieses Handelsembargos** wird Indien zukünftig vermehrt mit anderen Ländern wie China, Russland und den USA zusammen arbeiten können (WNA 2009d).

Für sämtliche Aktivitäten in Indien im Bereich der **friedlichen Nutzung** der Kernenergie ist die staatliche "Nuclear Power Corporation of India" (NPCIL) zuständig. Aufsichtsbehörde ist das "Department of Atomic Energy" (DAE), welche keinem weiteren Ministerium, sondern direkt dem Prime Minister Office unterstellt ist. NPCIL verantwortet Design, Bau und Betrieb der Kernkraftwerke. Der **Lizensierungsprozess** sowie die Sicherheitsaufsicht unterliegen dem Atomic Energy Regulatory Board (AERB). Über die Dauer des Genehmigungsprozesses können aufgrund fehlender Informationen keine Aussagen getroffen werden.

(2) Die **spezifischen Investitionskosten** für die zurzeit im Bau befindlichen Kraftwerke liegen laut Betreiber- und Presseinformationen zwischen 1.000 €/kW und 2.400 €/kW. Anderen Berichten zufolge übersteigen jedoch die tatsächlichen Kosten der fertiggestellten Kernkraftwerke die geplanten Kosten um 170 % bis 390 % (Thomas et al. 2007). Darüber hinaus verlängert sich die geschätzte Bauzeit der aktuell im Bau befindlichen Kernkraftwerke auf bis zu acht Jahre. Unter diesen Gesichtspunkten ist es fraglich, ob die oben genannten Planungen realisiert werden können. Vor allem die vier geplanten Schwerwasserreaktoren Kakrapar 3/4 und Rawatbhata 7/8, mit deren Bau Ende 2009 begonnen wurde und

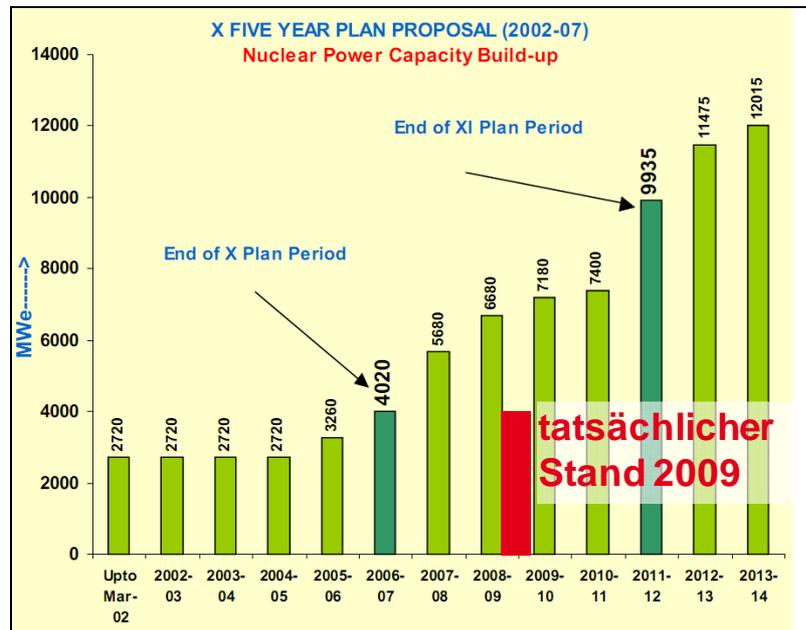
die Ende 2012 ans Netz angeschlossen werden sollen, weisen einen unrealistischen Zeitplan auf.

(3) Auffällig am indischen Kraftwerkspark sind die **unterschiedlichen Reaktortypen**. Während sich andere Länder in Zukunft meistens auf einen Reaktortyp (vorwiegend Druckwasserreaktoren) festlegen, sind in Indien weiterhin drei unterschiedliche Typen geplant. Neben Druck- und Schwerwasserreaktoren befinden sich auch „schnelle Brüter“ in Planung (IAEA/PRIS 2009a).

(4) Vor allem die beiden 1.000 MW-Druckwasserreaktoren russischer Bauart am Standort Kudankulam sollen **erheblich zur Steigerung** des Anteils an der Stromproduktion beitragen. Der Baustatus der beiden Reaktoren beträgt nach Angaben der NPCIL 80 % bzw. 91 %. Es wird damit gerechnet, dass Kudankulam 1 im August 2009 und Kudankulam 2 im Mai 2010 fertiggestellt wird.

(5) Ob die Planungen des DAE – 20 GW installierte Leistung bis zum Jahr 2020 – verwirklicht werden können, bleibt zunächst unklar. Wie in Abbildung 24 erkennbar, liegt die Prognose (für 2009 mehr als 6,6 GW installierte Leistung) um rund 2,5 GW über dem aktuellen Stand von ca. 4 GW. Erst mit den im Bau befindlichen Kernkraftwerken würde das Ziel für 2009 von 7,1 GW erreicht werden, allerdings haben sich diese Projekte in den letzten Jahren allesamt verzögert. Aus diesem Grund ist es unwahrscheinlich, dass bis 2012 knapp 10 GW und bis 2020 rund 20 GW installierter Leistung vorhanden sind.

Abbildung 24: Indische Kraftwerksplanung bis zum Jahr 2014



Quelle: DAE "Long Term Vision of the Department of Atomic Energy" 2001; eigene Hervorhebung in rot

(6) Einer aktuellen Studie der Unternehmensberatung Accenture zufolge hält eine große Mehrheit (96 %) der indischen Bevölkerung es für notwendig, in Zukunft die Nutzung der Kernenergie weiter auszubauen (Accenture 2009). Es gibt zwar vereinzelt Protestbewegungen gegen konkrete Bauvorhaben, allerdings sind diese nicht vergleichbar mit einer Gegenbewegung, wie sie es in anderen Ländern gibt (Gadekar 2009).

Auch wenn China Indien in vielen Bereichen der Kernenergie voraus ist, bleibt Indien ein potenziell **starker Wachstumsmarkt**. Durch die Öffnung der Märkte nach fast 30 Jahre isolierter Entwicklung wird in den nächsten Jahren verstärkt mit internationalen Vertragsabschlüssen gerechnet (WNN 2009d).

7.1.4 Russland

(1) Russland betreibt derzeit 31 Reaktoren mit einer installierten Leistung von **21,7 GW** und deckt damit einen Anteil von 16 % der gesamten Stromproduktion des Landes. Damit besitzt das Land die viertgrößte nukleare Erzeugungskapazität der Welt. Das mittlere Alter der Reaktoren beträgt zurzeit 27 Jahre, und es ist geplant, die Kraftwerke im Durchschnitt mindestens 35 Jahre lang Strom erzeugen zu lassen. Aktuell befinden sich laut IAEA und WNA acht Reaktoren mit einer Gesamtkapazität von mehr als 6 GW im Bau. Bei drei Kernkraftwerken wurde bereits vor mehr als

20 Jahren mit den Arbeiten begonnen und bislang steht nicht fest, ob und wann diese fertiggestellt werden.

(2) Derzeit sind 22 neue Kernkraftwerke mit einer gesamten Bruttoleistung von **18,5 GW** bis zum Jahr 2020 geplant bzw. angekündigt. Darüber hinaus gibt es Planungen für weitere 15 Reaktoren mit einer Gesamtleistung von ca. 18 GW. Bei diesen Kraftwerken steht allerdings weder ein Termin für den Baubeginn noch für die Fertigstellung fest. In Anbetracht der Tatsache, dass in den letzten 20 Jahren lediglich 5 Kraftwerke ans Netz gegangen sind, deren durchschnittliche Bauzeit 13 Jahre betragen hat, erscheinen die oben genannten Planungen als kaum realisierbar. Nicht nur die hohen Investitionskosten für neue Kraftwerke, sondern auch die Kosten für die **Beseitigung der Altlasten** nach Abschaltung sind enorm hoch. Ein im Jahr 2001 für den Rückbau abgeschalteter Reaktoren gegründeter Fonds hat bislang sämtliche Geldmittel für andere Zwecke ausgegeben und ist momentan annähernd ausgeschöpft (Popova 2009).

(3) Wie in vielen anderen Ländern auch, sind für den Bau und den Betrieb von Kernkraftwerken viele Lizenzen und Genehmigungen notwendig. Diese werden von der staatlichen Organisation „Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service“ kurz „**Rostechnadzor**“ erteilt. Über die Dauer eines solchen Genehmigungsprozesses können aufgrund fehlender Informationen keine genauen Angaben gemacht werden.

(4) Die spezifischen **Investitionskosten** der zurzeit im Bau befindlichen Kraftwerke werden in Presseberichten mit 670 €/kW bis 3.800 €/kW angegeben. Die obere Grenze dieser Angaben bezieht sich auf die beiden 35 MW-Druckwasserreaktoren Severodvinsk 1/2, die auf einer schwimmenden Plattform gebaut werden sollen. Sie sollte ursprünglich zur Strom- sowie Wärmeproduktion für die Schiffswerft in Severodvinsk eingesetzt werden. Nachdem bekannt geworden ist, dass sich der Zeitplan und somit die Fertigstellung dieses Kernkraftwerks bis Ende 2012 verzögert, besteht momentan Unklarheit über den zukünftigen Standort des schwimmenden Kernkraftwerks (Barent Observer 2008, 2009). Für die Kraftwerke in der 1.000 MW-Klasse werden die spezifischen Investitionskosten zwischen ca. 1.400 €/kW und 1.900 €/kW angegeben. Damit befinden sie sich auf einem ähnlichen Niveau wie asiatische Kernkraftwerke.

(5) Problematisch für die aktuellen Ausbaupläne sind der derzeitige **Infrastrukturstatus** und die **Personalsituation**. Laut Presseberichten existiert nur ein Betrieb in Russland, der in der Lage ist, Reaktoren herzustellen – und davon auch nur einen pro Jahr. Viele der Fachkräfte gehen bald in den Ruhestand und ihre Bezahlung wird als „miserabel“ eingeschätzt. Energieexperten schät-

zen, dass weniger als 10 % der knapp 55.000 Arbeiter auf den Baustellen und in den Kraftwerken gelernte Facharbeiter sind (Hassel 2009).

Zudem bestehen Zweifel an der **Sicherheit** russischer Kernkraftwerke. Konstruktionsmängel an den Reaktoren des Tschernobyl-Typs können im Nachhinein nicht mehr korrigiert werden. Es gibt Berichte über Risse, defekte Schweißnähte, sowie ein „niedriges Sicherheitsbewusstsein“ innerhalb der Kernkraftwerke. Ähnlich wie in den anderen Ländern, die Kernkraftwerke betreiben, existiert in Russland kein Konzept zur dauerhaften Lagerung hoch-radioaktiver Abfälle. Zurzeit werden die Rückstände in **Zwischenlagern** aufbewahrt, deren Sicherheitsvorkehrungen als zweifelhaft eingestuft werden können. Es bestehen zwar Pläne für ein neues Zwischenlager, dies wird jedoch frühestens 2015 fertiggestellt (Hassel 2009).

(6) Wie stark in **Zukunft** die Nutzung der Kernenergie in Russland vorangetrieben wird, hängt vor allem von der Finanzierungsfrage und den zu lösenden Sicherheitsproblemen ab. Für die russische Wirtschaft hat der Neubau von Kernkraftwerken hohe Bedeutung. Aktuell trägt Erdgas über 43 % zur russischen Stromproduktion bei (IEA 2008). Dieser hohe Anteil soll in Zukunft reduziert werden. Dabei hat sich Gazprom zum Ziel gesetzt, das eingesparte Erdgas ins Ausland zu exportieren, um von den höheren Gaspreisen profitieren zu können. Dies gelingt allerdings nur, wenn der Anteil der nuklearen oder sonstigen Stromerzeugung erhöht wird, oder der Bedarf reduziert wird (Popova 2009).

7.1.5 Frankreich

(1) Frankreich besitzt mit 59 betriebenen Reaktoren nach den USA die zweitgrößte nukleare Erzeugungskapazität der Welt. Mit einer Bruttoleistung von über **66 GW** decken die Kernkraftwerke ca. 77 % des französischen Elektrizitätsbedarfs. Das letzte fertiggestellte Kernkraftwerk, Civaux, ging mit seinen 2 Blöcken im Jahr 2002 ans Netz. Mit dem Europäischen Druckwasserreaktor (EPR) wird am Standort Flamanville zurzeit eines der zwei Bauprojekte in Westeuropa realisiert. Der andere Reaktor, ebenfalls ein EPR, wird in Olkiluoto (Finnland) gebaut. Die Kraftwerke in Frankreich werden von dem französischen Staatskonzern AREVA gebaut und von Electricité de France (EdF) betrieben. Pressemeldungen zufolge ist ein zweiter EPR für den Standort Penly in der Normandie geplant (Verivox 2009a).

(2) Ähnlich wie in anderen Staaten muss der Bau und der Betrieb eines Kernkraftwerkes genehmigt werden. Laut IAEA gehören dazu Lizenzen für den Standort, den Bau, die Inbetriebnahme, den Betrieb und die Außerbetriebnahme. Diese **Lizenzen** werden bei

der staatlichen Atombehörde „Autorité de sûreté nucléaire“ (ASN) beantragt und von dieser ausgegeben. Nach Auskunft der Behörde hat die komplette Genehmigungsdauer von der Antragstellung bis zur Erteilung der Betriebsgenehmigung für das Kraftwerk Civaux insgesamt sieben Jahre in Anspruch genommen.

(3) Die Kosten für den derzeitigen EPR am Standort Flamanville werden wesentlich höher ausfallen als angenommen. Für diesen wurde mit Gesamtkosten von ca. 3,6 Mrd. € gerechnet, allerdings werden sie durch erhebliche **Bauverzögerungen** steigen. Ende 2008 erklärte EdF, dass mit mindestens 4 Mrd. € gerechnet wird (ATW 2008; Verivox 2009b). Ob dies die endgültigen Kosten sind, bleibt abzuwarten. Beim Bau des finnischen EPR betrug die **Mehrkosten** nach weniger als drei Jahren Bauzeit mehr als 1,5 Mrd. € (HB 2008).

Eigenen Berechnungen zufolge beträgt die durchschnittliche Bauzeit eines französischen Reaktorblocks ca. sieben Jahre. Es bleibt abzuwarten, ob dies bei dem EPR in Flamanville ebenfalls erreicht werden kann, da der Bau bisher des Öfteren unterbrochen werden musste. Demnach gab es bereits erste **Probleme** mit dem Betonfundament und der Stahlkonstruktion (Greenpeace 2008; Verivox 2009b).

(4) In Frankreich wird die Kernenergie durch **zwei Staatsunternehmen** vertreten. Zum einen durch den staatlichen Energieversorger „Electricité de France“ (EdF), der sämtliche Kernkraftwerke in Frankreich besitzt und betreibt. In der jüngsten Vergangenheit hat sich EdF durch Übernahmen und Beteiligungen von Energieversorgern im Ausland einen Zugang zu Kernkraftwerken in anderen Ländern gesichert. Der ebenfalls mehrheitlich staatliche Nuklearkonzern Areva ist ein Komplettanbieter von Nukleartechnik und deckt die gesamte nukleare Wertschöpfungskette vom Uranabbau über die Kraftwerksplanung bis hin zur Brennstoffverwertung bzw. der Demontage von stillgelegten Reaktoren ab.

Aktuell baut Areva in Europa die Europäischen Druckwasserreaktoren in Finnland und Frankreich. Areva plant, unter anderem in China, Indien und den USA weitere Reaktoren zu bauen. Für China wurde ein Vertrag in Höhe von 8 Mrd. € über den Bau von zwei Reaktoren am Standort Taishan unterzeichnet (WNN 2007).

EdF hat angekündigt, dass ab dem Jahr 2020 die alten Reaktoren schrittweise **stillgelegt** und durch neue **ersetzt** werden sollen. Dabei sieht es die Planung vor, jedes Jahr einen neuen EPR ans Netz anzuschließen. Ob dieser ehrgeizige Plan umgesetzt wird, kann erst ab Jahr 2015 nach der Fertigstellung des Reaktors in Flamanville genauer beurteilt werden (EdF 2009; 4ecotips 2006).

(5) Zu den **Stärken** der französischen Nuklearindustrie zählt die weltweite Verbreitung französischer Technik. Durch die bestehenden Aufträge für die kommenden Jahre wird die gute Ausgangsposition weiter gefestigt. Areva hat angekündigt, in naher Zukunft ein Werk für EPR-Druckgefäße in den USA bauen und die Produktion im Inland erweitern zu wollen (Areva 2009a). **Problematisch** sind zum einen die in jüngster Zeit aufgetretenen Probleme beim Bau der beiden europäischen Reaktoren in Finnland und Frankreich sowie die fehlende Lösung zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen. Letzteres Problem wird laut WNA frühestens 2025 gelöst, falls bis dahin ein Standort für ein Endlager gefunden und erschlossen ist.

7.2 Analyse der möglichen Neueinsteiger

(1) Neben den Ländern, die bereits Kernenergie nutzen, gibt es verschiedene Staaten, die nach eigenen Angaben in Zukunft ebenfalls Kernenergie nutzen wollen, diese Technik bislang jedoch nie eingesetzt haben (mögliche „Neueinsteiger“). Zudem gibt es Länder wie Italien und Kasachstan, die nach dem Ausstieg aus der Kernenergie über einen Wiedereinstieg nachdenken. Tabelle 7 zeigt sämtliche Staaten, für die die WNA geplante bzw. angekündigte Kernkraftwerke ausweist und die bisher kein Kernkraftwerk bauen oder betreiben. Der Iran wird hier nicht betrachtet, da sein erster Reaktor bald fertiggestellt sein wird.

(2) Bei der Analyse der möglichen **Neueinsteiger** wird darauf geachtet, ob die jeweiligen Länder das „Übereinkommen über nukleare Sicherheit“ (Convention on Nuclear Safety) der IAEA unterzeichnet haben. Dabei wird unterschieden, ob das Übereinkommen unterzeichnet und im jeweiligen Land in Kraft getreten ist, unterzeichnet oder in Kraft getreten ist (durch einen Beitritt) oder ob das Land gar nicht als Mitglied aufgelistet ist (Stand 24.12.2008). Des Weiteren wird untersucht, ob das Land eine Aufsichtsbehörde für zivil genutzte Nuklearanlagen sowie einen Forschungsreaktor besitzt. Es wurde ebenfalls recherchiert, ob ein konkreter Zeitplan für die Nutzung der Kernenergie vorliegt.

(3) Darüber hinaus wird die **Kreditwürdigkeit eines Landes** mit Hilfe der „Country Risk Classification“ der OECD geprüft. Diese Klassifikation beruht auf zwei Komponenten. Zum einen auf quantitativen Einschätzungen zum Ausfallrisiko eines Staates und zum anderen auf qualitativen Beurteilungen der Länder. Die Klassifizierung verwendet eine achtstufige Skala von 0 (kein Ausfallrisiko – politisch stabil) bis 7 (höchstes Ausfallrisiko – politisch extrem instabil).

(4) Unter Zuhilfenahme zweier Indikatoren der Weltbank wird zusätzlich die politische Situation des jeweiligen Staates betrachtet. Dabei wird die **politische Stabilität** (Political Stability) und das Maß der vorhandenen Gewalt innerhalb eines Landes gemessen und abgeschätzt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit einer Destabilisierung der Regierung durch verfassungswidrige, politisch motivierte Gewalt bzw. Terrorismus ist. Ferner wird die **Regulierungsqualität** (Regulatory Quality) des Staates gemessen. Dieser Indikator beurteilt die Leistungsfähigkeit einer Regierung, geeignete Regelungen und Maßnahmen formulieren und durchsetzen zu können, um die Entwicklung des privaten Sektors zu ermöglichen bzw. zu begünstigen. Die Spannweite dieser Indikatoren reicht von 0 (politisch sehr instabil bzw. sehr schlechte Regulierung) bis 100 (politisch sehr stabil bzw. sehr gute Regulierung) (Kaufmann et al. 2008).

Tabelle 7: Mögliche Neueinsteiger in die Kernenergienutzung

Land	Übereinkommen unterzeichnet	Behörde	Forschungsreaktor	Zeitplan	Kreditwürdigkeit 2009	Politische Stabilität 2007	Regulierungsqualität 2007
Bangladesch	X	X	X	X	6	9	21
Weißrussland	(X)	X	-	X	7	53	5
Ägypten	(X)	X	X	X	4	22	35
Indonesien	X	X	X	X	5	15	44
Israel	(X)	X	X	-	3	13	83
Italien	X	X	X	k.A.	0	62	74
Kasachstan	(X)	X	X	X	4	58	34
Nordkorea	-	k.A.	k.A.	k.A.	7	57	0
Polen	X	X	X	X	2	67	72
Thailand	-	X	X	X	3	17	56
Türkei	X	X	X	X	4	21	60
VAE	-	k.A.	-	X	2	73	72
Vietnam	-	X	X	X	5	56	36

Übereinkommen unterzeichnet: X = "Unterzeichnet" und "In Kraft getreten",

(X) = "Unterzeichnet" ODER "In Kraft getreten" (durch Beitritt)

- = Kein Mitglied, k.A. = Keine Angabe

Quelle: IAEA 2007a,b,c,d,f,g,h, IAEA2008a,b,c,d,e,f,g,h, OECD 2009a, World Bank 2008

(5) **Bangladesch** hat im Jahr 1995 das Übereinkommen unterzeichnet, welches 1996 in Kraft getreten ist. Es existiert seit 1986 ein 3 MW TRIGA Mark II Forschungsreaktor am Standort Savar. Die Behörde „Bangladesh Atomic Energy Commission“ (BAEC) hat im Jahr 2005 angekündigt, bis 2015 zwei 500 MW Reaktoren zu bauen. Dieser Plan wurde seitdem mehrmals bekräftigt mit dem Wunsch, gemeinsam mit China einen 600 MW Reaktor zu realisieren. Bangladesch, der politisch instabilste Staat der möglichen Neueinsteiger, wird mit einem hohen Kreditausfallrisiko und einer schwachen regulatorischen Qualität bewertet (IAEA 2007f; IAEA 2007g; IAEA 2008a; IAEA 2008c; WNA 2009a).

(6) **Weißrussland** hat das „Übereinkommen über nukleare Sicherheit“ zwar nicht unterschrieben, ist aber 1999 beigetreten. Zwar existiert bislang kein Forschungsreaktor, allerdings haben die zuständigen Behörden den Plan geäußert, ein Kernkraftwerk mit zwei 1.000 MW Reaktoren russischer Bauart in den Jahren 2016 bzw. 2018 ans Netz anzuschließen. Laut der Weltbank ist die politische Situation in Weißrussland recht stabil. Allerdings birgt es das höchste Ausfallrisiko für Kredite und die Regierung scheint kaum Regulierungsfähigkeit zu besitzen (IAEA 2007f; IAEA 2007h; IAEA 2008b; IAEA 2008c; WNA 2009a).

(7) **Ägypten** hat das Übereinkommen bereits 1994 unterzeichnet, allerdings ist es dort bislang nicht in Kraft getreten. Die zuständigen Behörden („Atomic Energy Authority“, „Nuclear Materials Authority“ und „Nuclear Power Plants Authority“) überwachen die zwei betriebenen Forschungsreaktoren – ein 2 MW Reaktor von 1961 und ein 22 MW Reaktor, der seit 1997 in Betrieb ist. Bereits

seit 1964 existieren in Ägypten immer wieder Planungen für diverse Kernkraftwerke, welche allerdings bislang nie verwirklicht worden sind. Die neuesten Planungen sehen ein 1.000 MW Kraftwerk bis spätestens 2017 vor. Ägyptens Ausfallrisiko für Kredite wird mittelmäßig eingeschätzt. Die politische Stabilität sowie die Regulierungsfähigkeit scheinen schwächer ausgeprägt zu sein (IAEA 2007f; WNA 2009a).

(8) **Indonesien** hat das Übereinkommen im Jahre 1994 unterzeichnet, worauf es 2002 in Kraft getreten ist. Die indonesische Aufsichtsbehörde „National Atomic Energy Agency“ betreibt seit 1987 einen 30 MW Forschungsreaktor. Der 2007 veröffentlichte Zeitplan der Behörde sieht vor, dass 2017 ein 1.000 MW Reaktor in Betrieb geht und bis 2025 schätzungsweise 4.000 MW installierte Leistung vorhanden ist. Dabei wird Indonesien ein hohes Ausfallrisiko sowie wenig politische Stabilität bescheinigt. Allerdings ist die Regulierungsqualität im Gegensatz dazu stärker ausgeprägt (IAEA 2007b; IAEA 2007f; IAEA 2008c; IAEA 2008d; WNA 2009a).

(9) **Israel** hat zwar das Übereinkommen unterzeichnet, allerdings ist es dort bislang nicht in Kraft getreten. Die israelische Atombehörde „Israel Atomic Energy Commission“ betreibt einen 5 MW- und einen 70 MW-Forschungsreaktor, bei dem vermutet wird, dass er für die militärische Plutoniumproduktion verwendet worden ist. Es gibt zwar Angaben zu einem Kraftwerk mit zwei Reaktoren, deren Leistung insgesamt 1.200-1.500 MW betragen soll, allerdings bleibt völlig unklar, wann dieser Plan realisiert werden wird. Israel besitzt ein mittelmäßiges Kreditausfallrisiko, jedoch wird die politische Stabilität aufgrund des Nahost-Konflikts als sehr instabil eingeschätzt. Dem Staat wird eine hohe regulatorische Leistungsfähigkeit zugeschrieben (IAEA 2008c; WNA 2009a).

(10) **Italien** hat bereits Erfahrung mit Kernkraftwerken. Von 1963 bis 1987 hat der Staat insgesamt vier Kernkraftwerke mit einer Leistung zwischen 160 MW und 880 MW betrieben. Zwei weitere Siedewasserreaktoren mit je 982 MW waren zu diesem Zeitpunkt kurz vor der Fertigstellung und sechs Reaktoren befanden sich in der Planung. Dann reagierte die italienische Regierung auf den Unfall in Tschernobyl und stoppte sämtliche nukleare Aktivitäten. Italien hat das Übereinkommen 1994 unterzeichnet, woraufhin es 1998 in Kraft getreten ist. Die zuständige Behörde „Agency for New Technology, Energy and the Environment“ (ENEA) betreibt weiterhin mehrere Forschungsreaktoren mit einer Leistung zwischen 5 kW und 1 MW. In Italien gibt es eine fortlaufende Debatte über den Wiedereinstieg in die Kernenergie. Ein Ergebnis ist zurzeit nicht vorhersehbar. Laut Behördenangaben können keine ge-

nauen Angaben getroffen werden ob, wann und wie viele Kernkraftwerke an welchen Standorten gebaut werden könnten. Als EU-Mitglied besteht kein Kreditausfallrisiko für Italien. Der Staat wird als politisch recht stabil eingeschätzt und besitzt gute regulatorische Qualitäten (IAEA 2007a; IAEA 2007f; IAEA 2008c; IAEA 2008e; WNA 2009a).

(11) **Kasachstan** hat das Übereinkommen bereits 1996 unterzeichnet, allerdings ist es dort bislang noch nicht in Kraft getreten. Der Staat hat wie Italien schon in der Vergangenheit ein Kernkraftwerk betrieben. Ein 90 MW-Reaktor russischer Bauart war zwischen 1973 und 1999 in Betrieb. Das Land besitzt sehr große Uranvorkommen, was eine erneute Nutzung der Kernenergie begünstigt. Die Behörden überwachen derzeit den Betrieb von insgesamt vier Forschungsreaktoren. Diese besitzen eine Leistung zwischen 400 kW und 60 MW. Laut Zeitplan sollen frühestens ab 2016 mehrere Kernkraftwerke unterschiedlicher Leistung ans Netz angeschlossen werden. Dabei steht bislang nicht fest, um welche Reaktoren es sich handelt. Die Kreditwürdigkeit wird ebenso wie die politische Stabilität als mittelmäßig eingestuft. Laut Angaben der Weltbank scheint die Regulierungsqualität schwächer ausgeprägt zu sein (IAEA 2007f; WNA 2009a).

(12) Aufgrund der schwachen Informationslage zu **Nordkorea** ist es derzeit sehr schwierig, konkrete Angaben über das Nuklearprogramm zu machen. Der Staat hat das Übereinkommen nicht unterzeichnet. Es kann keine Aussage über Behörden, Forschungsreaktoren oder geplante Kraftwerke getroffen werden. Laut OECD besteht höchstes Ausfallrisiko für Kredite. Die politische Stabilität wird als „mittel“ eingestuft. Angaben zur Regulierungsqualität liegen nicht vor. (IAEA 2008c; WNA 2009a).

(13) **Polen** hat das Übereinkommen 1994 unterzeichnet, woraufhin es 1996 in Kraft getreten ist. Die polnische Atomenergiebehörde PAA überwacht derzeit einen 30 MW-Forschungsreaktor. Im Jahre 1982 haben im Auftrag der damaligen Regierung Bauarbeiten für ein Kernkraftwerk mit vier Reaktoren russischer Bauart am Standort Zarnowiec begonnen. Diese sind allerdings 1992 als Reaktion auf das Unglück in Tschernobyl gestoppt worden. Die PAA hat Anfang des Jahres bekannt gegeben, dass mindestens zwei Kraftwerke mit insgesamt 3.000 MW Leistung gebaut werden sollen, wovon eines ab 2020 in Betrieb gehen soll. Des Weiteren gibt es Überlegungen zu einem gemeinsam betriebenen Kernkraftwerk mit den Nachbarstaaten Estland und Lettland. Das Ausfallrisiko wird gering eingeschätzt. Polen ist politisch stabil und besitzt gute Regulierungsqualitäten (IAEA 2007c; IAEA 2007f; IAEA 2008c; IAEA 2008g; WNA 2009a).

(14) **Thailand** hat das Übereinkommen bislang nicht unterzeichnet. Die thailändische Behörde „Office of Atoms for Peace“ OAP ist für die Überwachung eines 2 MW Forschungsreaktor zuständig. Dieser ist seit 1977 in Betrieb und ein weiterer befindet sich zurzeit im Bau. Zusätzlich ist bis 2020 der Bau von zwei Reaktoren mit insgesamt 2.000 MW Leistung geplant. Im Jahr 2022 sollen es dann insgesamt 4.000 MW installierte Leistung sein. Trotz mittelmäßigem Ausfallrisiko und Schwierigkeiten mit der politischen Stabilität wird der Regierung eine recht gute Regulierungsqualität zugeschrieben (IAEA 2008c; WNA 2009a).

(15) In der **Türkei** wird ähnlich wie in Ägypten seit mehreren Jahrzehnten die Nutzung von Kernenergie geplant. Das Übereinkommen wurde bereits 1994 unterzeichnet und es ist zwei Jahre später in Kraft getreten. Die zuständigen Behörden beaufsichtigen einen 5 MW-Forschungsreaktor. Derzeit plant die türkische Atombehörde „Turkish Atomic Energy Authority“ TAEK am Standort Akkuyu ein Kraftwerk mit vier Blöcken und einer Gesamtleistung von 4.800 MW. Ab 2016 soll es schrittweise in Betrieb gehen. Laut OECD besitzt die Türkei ein mittleres Ausfallrisiko für Kredite. Das Land wird als politisch instabil eingestuft, besitzt jedoch eine gute regulatorische Qualität. Folgender Überblick zeigt die türkischen Planungen zur Nutzung der Kernenergie (IAEA 2007d; IAEA 2007c; IAEA 2008c; IAEA 2008h; WNA 2009a).

In der **Türkei scheiterten Anläufe zum Kernkraftwerks-Bau** an Finanzierungsproblemen, Anwohnerprotesten und Warnungen vor Erdbebenrisiken:

- 1965** Erste Diskussionen über Kernkraftwerke in der Türkei
- 1976 Erste Ausschreibung** für Akkuyu
- 1997** Erneute Ausschreibung für Akkuyu
- 1998 Erdbeben** mit Epizentrum ca. 100 km von Akkuyu entfernt
- 2000 Ausschreibung abgebrochen** wegen Finanzierungsproblemen angesichts Konsolidierung öffentlicher Finanzen und Inflationsbekämpfung; kein grundsätzlicher Verzicht auf Kernkraft
- 2004 Wiederbelebung** von Kernkraftwerks-Plänen angekündigt
- 2006** Inbetriebnahme für 2012 geplant
- 2008** Willensbekundung, noch 2008 mit dem Bau zweier AKW in Akkuyu und Sinop zu beginnen; erfolgte jedoch nicht
- 2009** Grundsätzliche **Einigung** mit Russland auf den Bau von 4 Blöcken bei Akkuyu

Quelle: SZ, FAZ, SPIEGEL, Handelsblatt

(16) Die **Vereinigten Arabischen Emirate (UAE)** haben das Übereinkommen bislang nicht unterzeichnet. Es gibt derzeit keine Forschungsreaktoren in diesem Land. Die zuständige Behörde „Emirates Nuclear Energy Corporation“ (ENEC) plant jedoch ab

2020 mindestens drei Kernkraftwerke mit je 1.500 MW Leistung in Betrieb zu haben. Das Kreditausfallrisiko wird sehr niedrig eingeschätzt. Der Staat ist politisch stabil und besitzt gute Regulierungsqualitäten (IAEA 2008c; WNA 2009a).

(17) **Vietnam** hat das Übereinkommen ebenfalls noch nicht unterzeichnet. Die „Vietnam Atomic Energy Commission“ (VAEC) überwacht derzeit einen 500 kW-Forschungsreaktor. Laut der Regierung soll 2014 mit dem Bau von zwei Reaktoren mit insgesamt 2.000 MW begonnen werden. 2018 sollen die Bauarbeiten an zwei weiteren Blöcken beginnen. Insgesamt soll im Jahre 2030 eine installierte Leistung von 10 GW am Netz sein. Vietnams Ausfallrisiko wird als hoch eingestuft. Es ist politisch stabil, die Regierung besitzt jedoch nur schwache Regulierungsqualitäten (IAEA 2007f; IAEA 2008c; WNA 2009a).

(18) Angesichts der **Heterogenität der genannten Länder**, die neu oder wieder in die Kernenergienutzung einsteigen wollen greift ein generalisierendes **Fazit** zu kurz: Staaten mit vergleichsweise guter Bonität und stabilen Strukturen wie UAE, Polen oder Italien stehen möglichen Neueinsteigern gegenüber, bei denen eine Lösung der schwer wiegenden Hemmnisse für einen Kernenergie-Einstieg mittelfristig kaum vorstellbar ist. An dieser Stelle erfolgt daher keine Gesamtbewertung der möglichen Neueinsteiger. Die Ausbaupläne aller Länder mit geplanter oder bestehender Kernkraftnutzung werden aber im abschließenden Kapitel 5 einer indikatorgestützten Bewertung unterzogen (vgl. dort).

7.3 Tabellenanhang

Tabelle 8: Anzahl der Reaktoren in Betrieb weltweit nach Ländern und Reaktortypen im Jahr 2009

	BWR	FBR	GCR	LWGR	PHWR	PWR	Summe
Afrika/Austr.							
Afrika							
Südafrika						2	2
Amerika							
Rest-Amerika							
Argentinien					2		2
Brasilien						2	2
Kanada					18		18
Mexiko	2						2
USA							
USA	35					69	104
Asien							
China					2	9	11
Indien	2				15		17
Rest-Asien							
Japan	30					23	53
Südkorea					4	16	20
Pakistan					1	1	2
Taiwan, China	4					2	6
Europa							
Osteuropa							
Armenien						1	1
Bulgarien						2	2
Tschechische Republik						6	6
Ungarn						4	4
Litauen				1			1
Rumänien					2		2
Slowakische Republik						4	4
Slowenien						1	1
Ukraine						15	15
Russland		1		15		15	31
Westeuropa							
Belgien						7	7
Finnland	2					2	4
Frankreich		1				58	59
Deutschland	6					11	17
Niederlande						1	1
Spanien	2					6	8
Schweden	7					3	10
Schweiz	2					3	5
Großbritannien			18			1	19
Summe	92	2	18	16	44	264	436

BWR Boiling Water Reactor – Siedewasserreaktor

FBR Fast Breeder Reactor – Schneller Brutreaktor

GCR Gas Cooled Reactor – Gasgekühlter Reaktor

LWGR Light Water-cooled Graphite-mod. Reactor – Leichtwasserreaktor, graphitmoderiert

PHWR Pressurised Heavy Water Reactor – Schwerwasserdruckreaktor

PWR Pressurised Water Reactor (PWR) – Druckwasserreaktor

Quelle: IAEA/PRIS 2009a

Tabelle 9: Bruttoleistung der Reaktoren in Betrieb weltweit nach Ländern und Reaktortypen im Jahr 2009 in MW

	BWR	FBR	GCR	LWGR	PHWR	PWR	Summe
Afrika/Austr.							
Afrika							
Südafrika						1.888	1.888
Amerika							
Rest-Amerika							
Argentinien					1.005		1.005
Brasilien						1.870	1.870
Kanada					13.425		13.425
Mexiko	1.364						1.364
USA							
USA	35.456					70.292	105.748
Asien							
China							
China					1.400	7.558	8.958
Indien							
Indien	320				3.800		4.120
Rest-Asien							
Japan	28.569					19.366	47.935
Südkorea					2.811	15.582	18.393
Pakistan					137	325	462
Taiwan, China	3.276					1.902	5.178
Europa							
Osteuropa							
Armenien						408	408
Bulgarien						2.000	2.000
Tschechische Republik						3.850	3.850
Ungarn						1.970	1.970
Litauen				1.300			1.300
Rumänien					1.412		1.412
Slowakische Republik						1.844	1.844
Slowenien						730	730
Ukraine						13.835	13.835
Russland							
Russland		600		11.048		11.594	23.242
Westeuropa							
Belgien						6.092	6.092
Finnland	1.780					1.020	2.800
Frankreich		140				65.880	66.020
Deutschland	6.734					14.763	21.497
Niederlande						515	515
Spanien	1.558					6.170	7.728
Schweden	6.450					2.933	9.383
Schweiz	1.610					1.780	3.390
Großbritannien			10.652			1.250	11.902
Summe	87.117	740	10.652	12.348	23.990	255.417	390.264

BWR Boiling Water Reactor – Siedewasserreaktor

FBR Fast Breeder Reactor – Schneller Brutreaktor

GCR Gas Cooled Reactor – Gasgekühlter Reaktor

LWGR Light Water-cooled Graphite-mod. Reactor – Leichtwasserreaktor, graphitmoderiert

PHWR Pressurised Heavy Water Reactor – Schwerwasserdruckreaktor

PWR Pressurised Water Reactor (PWR) – Druckwasserreaktor

Quelle: IAEA/PRIS 2009a

Tabelle 10: Betriebsdauer der Reaktoren in Betrieb weltweit

	Anzahl der Reaktoren	Betriebsdauer durchschn. (Jahre)	Betriebsdauer min. (Jahre)	Betriebsdauer max. (Jahre)
Afrika/Austr.				
Afrika				
Südafrika	2	24	23	25
Amerika				
Rest-Amerika				
Argentinien	2	30	25	35
Brasilien	2	16	8	24
Kanada	18	25	16	38
Mexiko	2	16	14	19
USA				
USA	104	29	13	39
Asien				
China				
China	11	8	2	15
Indien				
Indien	17	18	2	40
Rest-Asien				
Japan	53	23	3	39
Südkorea	20	16	4	31
Pakistan	2	23	9	36
Taiwan, China	6	27	24	30
Europa				
Osteuropa				
Armenien	1	29	29	29
Bulgarien	2	18	15	20
Tschechische Republik	6	17	6	24
Ungarn	4	24	22	26
Litauen	1	22	22	22
Rumänien	2	7	2	12
Slowakische Republik	4	17	9	24
Slowenien	1	26	26	26
Ukraine	15	20	3	28
Russland				
Russland	31	27	3	37
Westeuropa				
Belgien	7	29	24	34
Finnland	4	29	27	32
Frankreich	59	24	7	35
Deutschland	17	27	20	34
Niederlande	1	36	36	36
Spanien	8	25	21	38
Schweden	10	30	24	37
Schweiz	5	34	24	40
Großbritannien	19	27	14	41
Summe	436	24	2	41

Quelle: IAEA/PRIS 2009a

Tabelle 11: Bauzeiten der Reaktoren in Betrieb weltweit

	Anzahl der Reaktoren	Bauzeit durchschn. (Jahre)	Bauzeit min. (Jahre)	Bauzeit max. (Jahre)
Afrika/Austr.				
Afrika				
Südafrika	2	9	8	9
Amerika				
Rest-Amerika				
Argentinien	2	8	6	10
Brasilien	2	19	14	25
Kanada	18	8	5	11
Mexiko	2	16	14	18
USA				
USA	104	9	3	23
Asien				
China				
China	11	6	5	9
Indien				
Indien	17	10	5	15
Rest-Asien				
Japan	53	5	3	7
Südkorea	20	5	4	6
Pakistan	2	7	6	7
Taiwan, China	6	6	6	7
Europa				
Osteuropa				
Armenien	1	5	5	5
Bulgarien	2	10	8	12
Tschechische Republik	6	10	6	16
Ungarn	4	9	7	10
Litauen	1	10	10	10
Rumänien	2	19	14	24
Slowakische Republik	4	12	8	17
Slowenien	1	8	8	8
Ukraine	15	8	4	21
Russland				
Russland	31	7	4	20
Westeuropa				
Belgien	7	6	4	8
Finnland	4	7	6	8
Frankreich	59	7	5	16
Deutschland	17	7	5	11
Niederlande	1	4	4	4
Spanien	8	9	5	11
Schweden	10	7	5	10
Schweiz	5	6	4	11
Großbritannien	19	12	6	24
Summe	436	8	3	25

Quelle: IAEA/PRIS 2009a

Tabelle 12: Betriebsdauer der bisher stillgelegten Reaktoren weltweit

	Anzahl der Reaktoren	Betriebsdauer durchschn. (Jahre)	Betriebsdauer min. (Jahre)	Betriebsdauer max. (Jahre)
Amerika				
Rest-Amerika				
Kanada	7	19	5	26
USA				
USA	28	16	0	34
Asien				
Rest-Asien				
Japan	6	26	11	33
Kasachstan	1	26	26	26
Europa				
Osteuropa				
Armenien	1	11	11	11
Bulgarien	4	26	25	28
Litauen	1	21	21	21
Slowakische Republik	3	20	4	28
Ukraine	4	13	2	19
Russland				
Russland	5	26	19	47
Westeuropa				
Belgien	1	25	25	25
Frankreich	11	20	9	25
Deutschland	19	14	0	36
Italien	4	19	9	26
Niederlande	1	28	28	28
Spanien	2	27	18	37
Schweden	3	21	10	28
Großbritannien	26	35	14	47
Summe	127	22	0	47

Quelle: IAEA/PRIS 2009a

Tabelle 13: In Bau befindliche Reaktoren, deren Bau stagniert im Jahr 2009

	Bau stagniert	Baubeginn (Datum)
Asien		
Indien		
Indien PFBR	1	23-Okt-04
Europa		
Osteuropa		
Bulgarien		
BELENE-1	1	01-Jan-87
BELENE-2	1	31-Mrz-87
Ukraine		
KHMELNITSKI-3	1	01-Mrz-86
KHMELNITSKI-4	1	01-Feb-87
Russland		
Russland		
BELOYARSKY-4 (BN-800)	1	18-Jul-06
KALININ-4	1	01-Aug-86
KURSK-5	1	01-Dez-85
Summe	8	

Quelle: IAEA/PRIS 2009a, ATW, WNA, WNN, Betreiberinformationen u. a. Zur Klärung des Baustatus wurden die laut IAEA offiziell als „in Bau“ geführten 45 Reaktorblöcke einzeln anhand der verfügbaren Literatur bewertet. Als „stagnierend“ wurden Projekte dann bewertet, wenn dieser Ausdruck in der Literatur verwendet wurde, oder wenn laut Literatur keine Bauarbeiten stattfinden.

7.4 Methodik

Das methodische Vorgehen zur quantitativen Abbildung der zukünftigen Reaktor-Anzahl und -Leistung gliedert sich in **mehrere Schritte**. In einem ersten Schritt wurden unterschiedliche Ausgangsdaten herangezogen. Diese wurden zum Teil auf ihre Plausibilität hin überprüft und, wo nötig und möglich, korrigiert. Danach wurden die unterschiedlichen Ausgangsdaten miteinander abgeglichen. In einem letzten Schritt wurden bestimmte Annahmen zu den jeweiligen Datenkategorien getroffen, um daraus ein quantitatives Gesamtbild abzuleiten.

7.4.1 Ausgangsdaten

Es können fünf verschiedene Arten von Ausgangsdaten unterschieden werden.

1. Bestand (3/2009). Diese Daten der momentan betriebenen Reaktoren wurden von der IAEA bereitgestellt und stammen aus dem „Power Reactor Information System“ (PRIS), der laut IAEA-Angaben weltweit umfassendsten Datenbank zu einzelnen Kernreaktoren.

2. Reaktoren in Bau (3/2009). Auch hier wurden aktuelle PRIS-Daten der IAEA genutzt.

3. Blockscharfe Planung und Vorschläge (4/2009). Die WNA führt für viele Länder Listen, in denen einzelne Reaktorblöcke mit Namen, d.h. Standorten, enthalten sind. Meistens sind diese Namen mit einer Leistungsangabe versehen und manchmal auch mit einem angepeilten Datum für Baubeginn und/oder Inbetriebnahme. Tatsächlich von uns verwendet wurden nur solche blockscharfe Daten, bei denen die Leistung und mindestens ein Datum angegeben ist, weil wir hierin einen etwas fortgeschritteneren Stand der Planung sehen. Grundsätzlich wurden alle diese Daten im April 2009 abgerufen. Eine Ausnahme davon bilden die Daten zu Russland. Hier wurde aufgrund aktueller Ankündigungen der russischen Regierung der Datenstand von Anfang Mai 2009 herangezogen. Ähnliches gilt für Südkorea, wo aktuellere Angaben vorlagen.

4. Geplante Reaktoren (4/2009). Aggregierte Daten zur Anzahl und Leistung der geplanten Reaktoren auf Länderebene sind von der WNA erhältlich.

5. Vorgeschlagene Reaktoren (4/2009). Analog zur vorangehenden Kategorie stellt die WNA auch eine zweite Kategorie von aggregierten Daten zu Anzahl und Leistung auf Länderebene bereit. Die WNA spricht hier von „vorgeschlagenen“ Reaktoren (vgl. 3.2).

7.4.2 Überprüfung von Daten

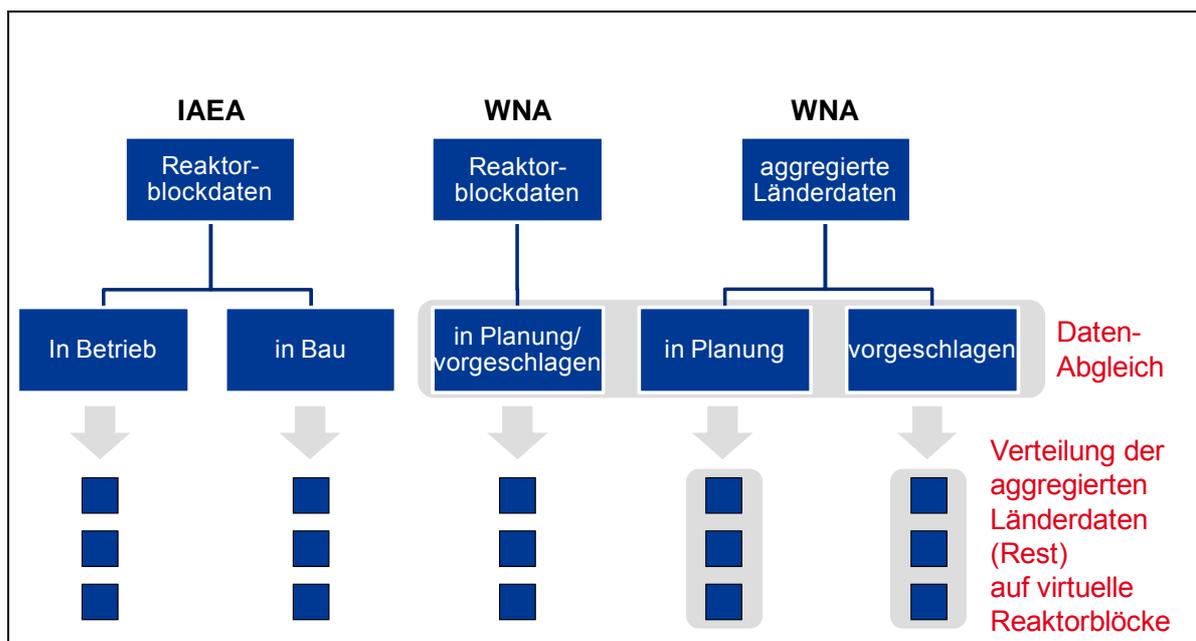
Einzel überprüft wurden die 45 von der IAEA als „in Bau“ befindlich definierten Reaktorblöcke. Hierzu werteten wir Meldungen und Artikel der Fachpresse aus. Als Ergebnis unserer Auswertung muss bei 8 der 45 Reaktoren davon ausgegangen werden, dass ihr Bau stagniert (vgl. 3.4).

7.4.3 Datenabgleich

Ein Abgleich der Ausgangsdaten ist nötig, weil diese auf zwei verschiedenen Aggregationsebenen vorliegen – einerseits block-scharf, d. h. auf Einzelblockebene, und andererseits aggregiert auf Länderebene.

Abbildung 25 illustriert den Prozess des Datenabgleichs. Die von der IAEA einzeln ausgewiesenen Reaktorblöcke in Betrieb und in Bau konnten ohne einen weiteren Abgleich direkt weiterverwendet werden. Bei den WNA-Reaktorblockdaten zur Planung und zu Vorschlägen gibt es hingegen eine Überlappung mit den aggregierten Länderdaten der WNA. Daher wurden die aggregierten Länderdaten an dieser Stelle um die blockscharfen Daten bereinigt. Das heißt, dass die Summe aller Einzelblöcke (in Planung oder vorgeschlagen) von den aggregierten Länderdaten der WNA jeweils abgezogen wurde.

Abbildung 25: Methode des Datenabgleichs zwischen IAEA und WNA



Quelle: Prognos AG

7.4.4 Annahmen

Um den zukünftigen Bestand an Kernreaktoren quantifizieren zu können, mussten wir je nach Betriebszustand eines Reaktors (in Betrieb, in Bau, geplant etc.) eine Reihe von Annahmen treffen.

Für die momentan **in Betrieb** befindlichen Reaktoren wurde angenommen, dass diese nach Altersgruppen differenzierte Gesamtlaufzeiten von 40, 45 und 45 oder mehr Jahren haben werden (Tabelle 14). Ausnahmen von diesen Laufzeiten wurden nur bei solchen Reaktoren gemacht, für die nach WNA-Angaben bereits kürzere Laufzeiten geplant bzw. beschlossen sind, wie z.B. für Deutschland (vgl. 2.2).

Tabelle 14: Annahmen zur Gesamtlaufzeit der gegenwärtig betriebenen Reaktoren

	Inbetriebnahme ab dem Jahr		
	1965	1980	1986
Laufzeit (Jahre)	40	45	≥45

Ausnahmen von diesen Laufzeiten wurden bei solchen Reaktoren gemacht, für die laut WNA-Liste bereits kürzere Laufzeiten geplant bzw. beschlossen sind.

Quelle: Prognos AG.

Bei Kraftwerken **in Bau** lagen in den meisten Fällen Zeitpunkte für die erwartete Inbetriebnahme vor. Sofern die resultierende erwartete Länge des Bauzeitraums genauso lang oder länger war als der länderspezifische Durchschnitt der letzten Jahre, wurde dieser Wert direkt herangezogen. War der resultierende Wert jedoch kürzer als die länderspezifischen Durchschnittswerte der Vergangenheit, so hielten wir diese Planung für wenig plausibel. In einem solchen Fall wurde zur Korrektur ein globaler Durchschnittswert von 8 Jahren Bauzeit angesetzt (vgl. Tabelle 15). Nur in einigen Ländern Asiens wurde hiervon abgewichen, da diese in jüngster Zeit deutlich niedrigere Bauzeiten erreicht haben. Für China und Indien wurden daher als länderspezifische Durchschnittswerte sechs Jahre als Bauzeit angenommen und für Japan und Korea fünf Jahre (s. Kapitel 2.4).

Tabelle 15: Annahmen zur Bauzeit nach Ländern

	angenommene Bauzeit (Jahre)		
	5	6	8
Länder	Japan, Südkorea	China, Indien	alle anderen Länder

Quelle: Prognos AG

Im Ergebnis wurden in vielen Fällen die länderspezifischen Durchschnittswerte herangezogen, da die laut Planung angestrebten Bauzeiten im Vergleich mit der Erfahrung aus der Vergangenheit als zu ambitioniert erschienen (Bsp. Kanada: 5 Jahre angestrebt).

Einige Kraftwerke werden zwar von der IAEA als „in Bau“ geführt, wurden aber nach Sichtung verschiedener Quellen als „Bau stagniert“ eingestuft. Ihre Fertigstellung wurde in unserem Modell in die ferne Zukunft verschoben und ist für den hier betrachteten Zeitraum bis 2030 damit nicht relevant.

Die **blockscharfen Reaktor-Planungen und -Vorschläge** auf der WNA-Liste enthalten unterschiedliche Datumsangaben. Für einige Blöcke liegt ein erwarteter Baubeginn vor, für andere die erwartete Inbetriebnahme. Für einen Teil der Blöcke liegen sogar beide Angaben vor. Diese drei Fälle galt es also zu unterscheiden.

Sofern nur der Zeitpunkt des Baubeginns vorlag, wurden die in Tabelle 15 genannten durchschnittlichen, länderspezifischen Bauzeiten angesetzt, um den Zeitpunkt der Inbetriebnahme zu berechnen. Sofern dagegen nur das Datum der Inbetriebnahme bekannt war, wurde die durchschnittlichen Bauzeiten rechnerisch abgezogen, um den Zeitpunkt des Baubeginns zu bestimmen. Wurde hierbei ein Baubeginn in der Vergangenheit errechnet – so dass der geplante Reaktor eigentlich längst in Bau sein müsste – wurde der gesamte Bauprozess rechnerisch soweit in die Zukunft verschoben, dass der geplante Baubeginn gegen Ende 2009 stattfinden würde.

Die letzte Möglichkeit war, dass für einen bestimmten Reaktor in der WNA-Liste beide Daten vorlagen, d. h. sowohl für den geplanten Baubeginn als auch für die Inbetriebnahme. In diesem Fall wurde, wie oben beschrieben, die Plausibilität der Planung durch einen Vergleich mit den länderspezifischen Durchschnittswerten geprüft. Erschien die Planung als zu ambitioniert, wurde das Datum der Inbetriebnahme in unserem Modell zeitlich nach hinten geschoben.

Insgesamt kommt es durch die Angaben der blockscharfen Planungen und Vorschläge zu einer leichten Verschiebung gegenüber den aggregierten Ausgangsdaten der WNA (Tabelle 16).

Tabelle 16: Bereinigung der aggregierten Länderdaten der WNA um blockscharfe WNA-Daten

WNA	Ausgangsdaten		bereinigt	
	Anzahl	Bruttoleistung (GW)	Anzahl	Bruttoleistung (GW)
geplant	111	123	45	48
vorgeschlagen	273	270	216	203
WNA-Einzelblöcke			113	128
Summe bis 2030	384	393	374	378
Abweichung wegen Einzelblöcken, die erst für die Zeit nach 2030 angekündigt sind				
Anzahl	-10			
Bruttoleistung	-15			

Quelle: WNA 2009g

Die WNA-Ausgangsdaten beziehen sich in ihrer aggregierten Form auf Inbetriebnahmen innerhalb der nächsten 20 Jahre. Aus den blockscharfen WNA-Daten ergeben sich allerdings auch Projekte, deren Inbetriebnahme erst für die Zeit nach dem Jahr 2030 vorgesehen ist. Daher gibt es hier eine Abweichung von den WNA-Ausgangsdaten um 10 Reaktorblöcke bis zum Jahr 2030.

Für die sonstigen **aggregierten Länderdaten** der **in Planung** befindlichen Reaktoren weist die WNA nur einen allgemeinen Zielzeitpunkt aus. Für diese Reaktoren erwartet die WNA eine Inbetriebnahme innerhalb von 8 Jahren, ohne für einzelne Reaktoren bestimmte Jahreszahlen anzugeben (vgl. 3.2). Ausgehend von diesem Zielzeitpunkt wurden die aggregierten Länderdaten rechnerisch in einzelne virtuelle Kraftwerksblöcke mit einer mittleren Bruttoleistung aufgespalten. So wurden z. B. aus 10 Blöcken mit einer Gesamtleistung von 12 GW rechnerisch 10 x 1 Block mit einer Bruttoleistung von jeweils 1,2 GW. Diese Reaktoren wurden in unserem Modell – unter Zugrundelegung bestimmten Annahmen – so über die Zeit verteilt, dass sie rechnerisch für die in den Annahmen dargelegte Zeit in Bau (s.o.) waren und dann bis zum Zielzeitpunkt in Betrieb genommen wurden. Für die **aggregierten Länderdaten** der **vorgeschlagenen Reaktoren**, für die die WNA eine Inbetriebnahme innerhalb der nächsten 20 Jahre erwartet, wurde grundsätzlich das gleiche Verfahren benutzt wie bei den Reaktoren in Planung (s. o.).

Damit sind alle Schritte beschrieben, die zur Abbildung der Planungs- und Vorschlagslisten der WNA nötig sind (vgl. Kapitel 3.2). Der in Kapitel 5 beschriebene realistische Entwicklungspfad fußt auf zusätzlichen Annahmen zum länderspezifischen Realisierungsgrad, zur maximalen Verfügbarkeit von Reaktordruckgefäßen und zur Weltwirtschaftskrise. Diese sind in Kapitel 5 direkt beschrieben.

7.5 Abkürzungsverzeichnis

ATW	Internationale Zeitschrift für Kernenergie, früher: Atomwirtschaft
BWR	Boiling water reactor
DAE	Department of Atomic Energy
DOE	US Department of Energy
EIA	Energy Information Administration
EPR	European Pressurized Water Reactor
FBR	Fast breeder reactor
GCR	Gas-cooled reactor
GW	Gigawatt
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency
kW	Kilowatt
LWGR	Light water-cooled graphite-moderated reactor
MW	Megawatt
NEA	Nuclear Energy Agency
NEI	Nuclear Engineering International
NRC	Nuclear Regulatory Commission
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PFBR	Prototype Fast Breeder Reactor
PHWR	Pressurised heavy water reactor
PRIS	Power Reactor Information System, Reaktordatenbank der IAEA
PWR	Pressurised water reactor
TWh	Terawattstunden
WEO	World Energy Outlook
WNA	World Nuclear Association
WNN	World Nuclear News