

- [4] Dokumentation der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München, 1987; vgl. auch Umweltbundesamt (Hrsg.): Daten zur Umwelt 1986/87, Berlin, S. 520 f. Siehe auch: Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl auf die Bundesrepublik Deutschland. Zusammenfassender Bericht der Strahlenschutzkommission, Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1987. Die Feststellung der Strahlenschutzkommission wurde durch Vergleiche der Totgeburten und Geburten Mißgebildeter vom 28. November bis 28. Dezember 1986 in den hochbelasteten bayerischen und niedrigbelasteten niederdeutschen Gebieten bestätigt. Hierbei ergaben sich keine Unterschiede untereinander und zum vorangegangenen Jahr (Welt am Sonntag, 3. Januar 1988). Andererseits wurden nach einer Hochrechnung, die an der Universität Athen durchgeführt wurde, aufgrund der Rezeption des Reaktorunfalls von Tschernobyl in Griechenland etwa 2500 zusätzliche Abtreibungen durchgeführt. Die Schätzungen für Westeuropa belaufen sich auf 100 000 bis 200 000 zusätzliche Abtreibungen. Vgl. *Trichopoulos, D., u.a.*: Victims of Chernobyl in Greece: Induced Abortions after the Accident. In: *British Medical Journal*, Vol. 295 vom 31. Oktober 1987.
- [5] *Keplinger, H.M., und Roth, H.*: Kommunikation in der Ölkrise des Winters 1973/74. Ein Paradigma für Wirkungsstudien. In: *Publizistik* 23 (1978), S. 337—356.
- [6] *Lang, K., and Lang, G.E.*: The Unique Perspective of Television and its Effect: A Pilot Study. In: *American Sociological Review* 18 (1953), pp. 3—12. Siehe dazu auch *Noelle-Neumann, E., und Mathes, R.*: The "Event as Event" and the "Event as News". In: *European Journal of Communication* 2 (1987), pp. 391—415.
- [7] *Keplinger, H.M.*, in Zusammenarbeit mit *Brosius, H.-B., Staab, J.F., und Linke, G.*: Kommunikation im Konflikt, Freiburg i.Br. (erscheint 1989).
- [8] Zur Berichterstattung über Tschernobyl in der Bundesrepublik Deutschland siehe auch *Teichert, W.*: Tschernobyl in den Medien. Ergebnisse und Hypothesen zur Tschernobyl-Berichterstattung. In: *Rundfunk und Fernsehen* 35 (1987), S. 185—204; *Rager, G.*: Kommentar ohne Meinung. In: *journalist* (1987), H. 10, S. 36—38; *Graf, E.*: Örtliche Strahlung. In: *journalist* (1987), H. 5, S. 32—34; *Keplinger, H.M.*: Künstliche Horizonte. Die Darstellung von Technik in der Presse und ihr Einfluß auf die Ansichten der Bevölkerung, 1965 bis 1986. Opladen (erscheint 1989); *Keplinger, H.M.*: „Die Kernenergie in der Presse.“ Eine Analyse zum Einfluß subjektiver Faktoren auf die Konstruktion von Realität. In: *Kölnner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 40 (1988).

Ursachen unterschiedlicher Verfügbarkeiten von Leichtwasserreaktoren in ausgewählten Industrieländern

Von D. Winje*, K.F. Hansen**, E. Beckjord**, E.P. Gyftopoulos**, M.W. Golay** und R.K. Lester**

Leichtwasserreaktoren sind die weitverbreitetsten Kernkraftwerke in der Welt. Anfang des Jahres 1987 waren 176 Druckwasserreaktoren (DWR) und 81 Siedewasserreaktoren (SWR) in Betrieb. Damit haben Leichtwasserreaktoren einen Anteil von etwa 70% an allen Kernkraftwerken [1].

In den frühen Jahren der Leichtwasserreaktoren-Entwicklung wurde angenommen, daß diese bis auf die Zeiten des Brennstoffwechsels nahezu die ganze Zeit bei Vollast Elektrizität produzieren würden. Die Realität zeigt allerdings, daß die tatsächlich erzielten Betriebsergebnisse in manchen Ländern weit unter den Erwartungen liegen. So erreichen die Leichtwasserreaktoren in den USA eine Verfügbarkeit von weniger als 60%. Zahlreiche Studien haben mit Hilfe von statistischen Analysen versucht, die Ursachen der Nichtverfügbarkeiten zu erklären, so durch Korrelationen zwischen den Betriebsergebnissen und erklärenden Variablen wie Kraftwerksgröße, Alter, Kraftwerkstyp (DWR oder SWR) oder Hersteller des Dampferzeugers.

Die hier zugrundeliegende Untersuchung [2] legt den Schwerpunkt der Erklärungshypothesen auf die internationalen Unterschiede und deren Ursachen. Es sollen im folgenden die Unterschiede der Verfügbarkeiten von Leichtwasserreaktoren in sechs Industrienationen analysiert werden, die über größere Kernkraftwerksprogramme verfügen. Diese Länder sind: Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Japan, Schweden, die Schweiz und die USA.

Die ersten Leichtwasserreaktoren wurden in den USA entwickelt, andere Länder entwickelten später auf der Basis ame-

rikanischer Lizenzen eigene Reaktorprogramme. Obwohl die ausgewählten Industrieländer als ein hohes Bruttoinlandsprodukt aufweisen und marktwirtschaftlich orientiert sind, bestehen große Unterschiede in der Anzahl der Kernkraftwerke und in den Wirkungen auf die gesamte Elektrizitätswirtschaft. Diese Unterschiede kommen als mögliche Ursachen für die verschiedenartigen Betriebsergebnisse in Frage.

Es wurden die Betriebsergebnisse für den Zeitraum von 1975 bis 1984 betrachtet und die meisten Leichtwasserreaktoren mit mehr als 300 MW elektrischer Leistung einbezogen. Die Konstruktionsmerkmale und Technologien der Reaktoren sind größtenteils ähnlich. Neben der Datenanalyse wurde untersucht, ob und inwieweit das Umfeld, in dem die Kernkraftindustrie operiert, Einfluß auf die Betriebsergebnisse haben kann. Die betrachteten Bereiche waren

- die Struktur der Elektrizitätswirtschaft insgesamt,
- die Struktur der Herstellerindustrie von Kernkraftwerken,
- die interne Organisation von Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU),
- die relative Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung aus Kernkraftwerken,
- die ökonomische Regulierung und
- die Sicherheitsbestimmungen.

Quantitative Analyse der Betriebsergebnisse

Vorgehensweise

Der Untersuchungszeitraum der Studie erstreckt sich von 1975 bis 1984. Mit Ausnahme von Frankreich lagen alle Länderdaten von zehn Jahren vor. Von Frankreich waren nur die Daten der letzten drei Jahre verfügbar. Die Daten entstammen verschiedenen Quellen [3].

* Professor Dr. D. Winje, Technische Universität Berlin, Fachbereich 16, Fachgebiet Energie- und Rohstoffwirtschaft, Berlin.

** Professor K.F. Hansen, Professor E. Beckjord, Professor E.P. Gyftopoulos, Professor M.W. Golay und Professor R.K. Lester, Department of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts/USA.

Die Datenbasis beinhaltet Bemessungsgrößen für die Verfügbarkeit der Kernreaktoren in jedem Land. Zwei grundsätzlich verschiedene Bemessungsgrößen der Verfügbarkeit werden im Rahmen der Untersuchung angewendet:

$$\text{Arbeitsausnutzung (AN)} = \frac{\text{Erzeugung}}{\text{Nennarbeit}}$$

$$\text{Energieverfügbarkeit (EV)} = \text{AN} + \frac{\text{Nichtverfügbarkeit aufgrund externer Ursachen}}{\text{Nennarbeit}}$$

Die Nichtverfügbarkeit aufgrund externer Ursachen kann z.B. durch geringere Stromnachfrage oder nicht ausreichende Kühlkapazität verursacht werden. Sofern die Leichtwasserreaktoren mit voller Auslastung betrieben werden, besteht nur ein geringer Unterschied zwischen der Arbeitsausnutzung und der Energieverfügbarkeit.

Für diejenigen Länder, in denen die Diskrepanz zwischen Arbeitsausnutzung und Energieverfügbarkeit signifikant ist (Frankreich und die Bundesrepublik Deutschland), wird die Energieverfügbarkeit als Bemessungsgröße verwendet. Sie gibt an, welche elektrische Energie vom Kraftwerk an das Netz geliefert werden kann, unabhängig davon, welche Energie vom Lastverteiler zur Deckung des aktuellen Bedarfs angefordert wurde. Die Energieverfügbarkeit beschreibt die Leistungsfähigkeit von Kraftwerken besser als die Arbeitsausnutzung, da sie die technologisch mögliche Verfügbarkeit von den externen Ursachen trennt. In den Ländern, in denen die beiden Bemessungsgrößen nahezu identisch sind, wird diejenige Größe verwendet, bei der die Datenbasis konsistent ist. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird der Übersichtlichkeit halber nur der Begriff „Verfügbarkeit“ verwendet. Die länderspezifische Bedeutung dieses Ausdrucks verdeutlicht Tafel 1.

In Frankreich besteht im Betrachtungszeitraum ein Unterschied zwischen Energieverfügbarkeit und Arbeitsausnutzung von etwa 4,6%, da die französischen Kraftwerke zum Teil als Fahrplan- und Regelkraftwerke eingesetzt werden. Diese Betriebsweise der Kraftwerke ist bedingt durch den hohen Anteil der Kernkraftwerke an der gesamten installierten Kraftwerksleistung. In der Bundesrepublik Deutschland besteht ein Unterschied zwischen den beiden Bemessungsgrößen, da ein Abkommen zwischen den Elektrizitätsversorgungs- und den Kohleförderunternehmen existiert, wonach ein bestimmter Prozentsatz der elektrischen Energie aus einheimischer Kohle zu erzeugen ist. In manchen Fällen hat das zur Folge, daß ein Kernkraftwerk mit verringerter Leistung betrieben oder abgeschaltet werden muß. Der daraus resultierende Verlust (die Nichtverfügbarkeit) wird als externer, ökonomisch bedingter Netzverlust bezeichnet und von den technologisch bedingten Verlusten getrennt [4].

Tafel 1. Allgemeine Angaben zu den untersuchten Kernkraftwerken (Bezugsjahr: 1984).

Land	Bemessungsgröße	Anzahl der	
		DWR	SWR
Frankreich	Energieverfügbarkeit	28	—
Bundesrepublik Deutschland	Energieverfügbarkeit	7	4
Japan	Arbeitsausnutzung	11	13
Schweden	Arbeitsausnutzung	3	7
Schweiz	Arbeitsausnutzung	3	1
USA	Energieverfügbarkeit	52	25

Tafel 2. Zuordnung von Nichtverfügbarkeiten.

Erzwungen
• Primärkreislauf Brennstoff Reaktorkühlsystem Dampferzeuger Brennstoffwechsel andere
• Sekundärkreislauf Turbine Generator Kondensator Kreislaufwasser/Speisewasser/Kühlwasser für Komponenten andere
• Wirtschaftlichkeit
• menschliche Ursachen
• andere
Geplant
• Primärkreislauf Brennstoff Reaktorkühlsystem Dampferzeuger Brennstoffwechsel andere
• Sekundärkreislauf Turbine Generator Kondensator Kreislaufwasser/Speisewasser/Kühlwasser für Komponenten andere
• Wirtschaftlichkeit
• menschliche Ursachen
• andere
Sicherheitsbehörden (geplant/nicht geplant)
Unbekannte

Bei der Beurteilung der Verfügbarkeitsdaten in den einzelnen Ländern ist zu beachten, daß die Anzahlen der betrachteten Kernkraftwerke äußerst unterschiedlich sind.

Bei der verwendeten Datenbasis bestehen geringe Inkonsistenzen hinsichtlich der Definitionen von geplanten und nichtgeplanten Stillständen, der Klassifikation von Ausfällen im Bereich des Kondensators und der Behandlung von Wartungsmaßnahmen während der jährlichen Revision. Eine detaillierte Beschreibung dieser Unterschiede ist in [4] enthalten.

Daten über die Betriebsergebnisse werden in einer Vielzahl von Formen gesammelt. Im folgenden orientieren wir uns an dem OPEC-2-Datenbanksystem [5]. Die Struktur ist ähnlich derjenigen, die bei *Koppe, Olson und LeShay* [6] und *Winje und Hansen* [7] benutzt wird. Das Datenbanksystem ist relativ detailliert bezüglich der Anlagen und Komponenten, die erfaßt werden, und berücksichtigt auch geplante und nichtgeplante Nichtverfügbarkeiten (Tafel 2).

Länderspezifischer Vergleich der Betriebsergebnisse

Die Verfügbarkeiten von Druckwasserreaktoren in den untersuchten Ländern werden in Bild 1 und Tafel 3 gezeigt.

Die drei schweizer Druckwasserreaktoren haben mit über 85% die höchste durchschnittliche Verfügbarkeit. Der niedrigste jährliche Wert ist 81,1% (1980) und der höchste Wert 90,2% (1978). Das Betriebsergebnis der schweizer Druckwasserreaktoren ist damit ausgezeichnet.

Deutsche Druckwasserreaktoren befinden sich mit einer Verfügbarkeit von 78,4% (13-Jahres-Durchschnittswert) an zwei-

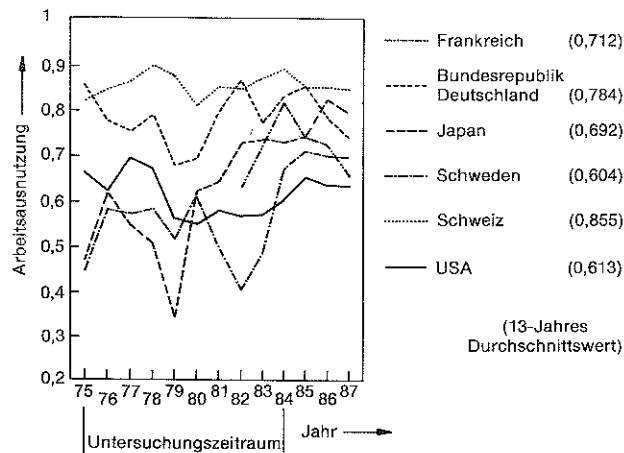


Bild 1. Jährliche Arbeitsausnutzung der Druckwasserreaktoren (nach [4]).

ter Stelle. Der niedrigste jährliche Wert ist 68,1% (1979) und der höchste 86,8% (1982). Diskussionen mit deutschen Experten ergaben, daß die Verbesserungen nach 1979 auf die gemeinsamen Anstrengungen von Kraftwerksherstellern und Energieversorgungsunternehmen hinsichtlich einer Verbesserung der Revisionsplanung und Kraftwerkstechnologie sowie der Reduzierung der wirtschaftlich bedingten Verluste zurückzuführen sind.

Daten über die französischen Kernkraftwerke waren nur nach 1982 verfügbar. Die französischen Experten betonen ihre detaillierte Planung und die verstärkte Integration von Betriebserfahrungen in den Planungsprozeß. Als Resultat ist eine ständige Verringerung sowohl der geplanten als auch der ungeplanten Stillstände bis 1984 zu verzeichnen.

Die Betriebsergebnisse in Japan zeigen eine Verfügbarkeit von 52% im Zeitraum von 1975 bis 1979, gefolgt von einem rapiden Anstieg auf 82% nach 1979. Ursache hierfür ist nicht zuletzt das seit Mitte der 70er Jahre bestehende japanische Konzept,

die Technologie von industriellen Prozessen und Anlagen zu verbessern.

Die Betriebsergebnisse der amerikanischen Kernkraftwerke zeigen nach dem niedrigsten Wert in 1980 einen allmählichen Anstieg in der Verfügbarkeit bis 1985 und eine geringfügige Verringerung dieses Wertes in den Jahren danach. Es sollte erwähnt werden, daß die Verfügbarkeit der Druckwasserreaktoren 1985 erheblich verbessert werden konnte.

Die Betriebsergebnisse der schwedischen Druckwasserreaktoren haben den niedrigsten 10-Jahres-Durchschnittswert (60%). Es muß angemerkt werden, daß nur drei Kraftwerke berücksichtigt werden konnten, von denen zwei erst 1981 bzw. 1983 ihren Betrieb aufgenommen haben.

Erzwungene Stillstände

Die 10-Jahres-Durchschnittswerte der Verluste durch erzwungene Stillstände sind in Schweden und in den USA wesentlich höher als in den anderen Ländern. Die französischen Betriebsergebnisse nehmen eine Mittelstellung ein, während die Werte in Japan, der Schweiz und der Bundesrepublik Deutschland eher niedrig sind. In Frankreich wird jegliche Nichtverfügbarkeit, die nicht Teil der geplanten jährlichen Wartung ist, als erzwungene Nichtverfügbarkeit betrachtet.

In Schweden sind der Dampferzeuger, in den USA das Reaktorkühlsystem, das Turbine-Generator-System und die Kondensatorsysteme die Hauptursachen der erzwungenen Stillstände.

Geplante Stillstände

Tafel 3 zeigt eine Zusammenfassung der geplanten Stillstände. Die Daten über die geplanten Stillstände machen deutlich, daß in der Schweiz die Zeitdauer der Brennstoffwechsel und Wartung wesentlich kürzer sind als in den anderen Ländern. In Japan sind die geplanten Nichtverfügbarkeiten aufgrund der Besonderheiten bezüglich der Wartungsplanung relativ lang. Andererseits sind hier aufgrund der langen Wartungszeiten die erzwungenen Stillstände relativ gering.

Tafel 3. Nichtverfügbarkeiten der Druckwasserreaktoren (Mittelwert 1975 bis 1984).

	Frankreich	Bundesrepublik Deutschland	Japan	Schweden	Schweiz	USA
Erzwungene Stillstände						
• Primärkreislauf	0,005	0,002	0,002	0,000	0,004	0,025
Reaktorkühlsystem						
Dampferzeuger	0,005	0,004	0,016	0,084	0,009	0,012
andere	0,026	0,002	0,003	0,033	0,000	0,012
• Sekundärkreislauf						
Turbine	0,006	0,002	0,001	0,005	0,002	0,013
Generator	0,007	0,008	0,000	0,011	0,000	0,012
Kondensator	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,015
andere	0,012	0,002	0,002	0,072	0,004	0,005
• andere	0,022	0,002	0,002	0,034	0,002	0,031
Summe	0,086	0,023	0,026	0,239	0,021	0,125
Geplante Stillstände						
• Primärkreislauf	1	0,164	0,325	1	0,097	0,130
• Sekundärkreislauf	1	0,005	0,002	1	0,016	0,013
• andere	1	0,016	0,013	1	0,005	0,020
Summe	0,178	0,185	0,340	0,174	0,118	0,163
Sicherheitsbehörden	0,000	0,009	0,000	0,044	0,000	0,109

¹ Daten nicht verfügbar

Durch Sicherheitsbehörden verursachte Stillstände

Die durch Sicherheitsbehörden verursachten Stillstände (Tafel 3) sind in allen Ländern sehr gering mit Ausnahme von Schweden und den USA, wobei die amerikanischen Werte mit 6,6% (1975 bis 1979) bzw. 13,6% (1980 bis 1984) mehr als doppelt so hoch wie in Schweden sind (10-Jahres-Durchschnittswert 4,4%). Aus Frankreich, Japan und der Schweiz sind keine Stillstände der genannten Kategorie dokumentiert. Mit der Erklärung der hohen Ausfallrate amerikanischer Kernkraftwerke beschäftigten sich die Arbeiten von *Hulkower* [8] und *Anderson* [9].

Die durch Sicherheitsbehörden verursachten Stillstände betragen in der Bundesrepublik Deutschland im Durchschnitt 0,9%, mit Spitzenwerten von 2,6% (1976) und 2,8% (1984). Diskussionen mit den deutschen Experten lassen den Schluß zu, daß diese relativ geringen Werte in der Verfahrensweise der Sicherheitsbehörden begründet sind. Es ist anzunehmen, daß durch die enge Zusammenarbeit zwischen den EVU, den Kraftwerksherstellern und den verschiedenen Sicherheitsbehörden effiziente Lösungen von Sicherheitsproblemen gefunden werden können. Wenn ein Problem eine Modifikation der Kraftwerkstechnologie erfordert, stimmen die EVU und die Sicherheitsbehörden einen Zeitplan ab, ohne daß eine Anweisung zur Abschaltung des Kernkraftwerkes ausgesprochen werden muß. Die Planung der EVU geht dahin, die erforderlichen Arbeitsschritte zur Beseitigung des Problems in die Zeit der Revision zu verlegen, wodurch ein möglicher Stillstand dann nicht mehr als Stillstand durch die Sicherheitsbehörden bezeichnet wird. Weiterhin kann dieselbe Ausfallursache zu einer unterschiedlichen Klassifikation in der Bundesrepublik Deutschland und in den USA führen.

Die Werte der genannten Ausfallkategorie betragen in Schweden durchschnittlich 4,4% im Zeitraum von 1975 bis 1984. Spitzenwerte traten auf in den Jahren 1975 (11,2%), 1982 (12,0%) und 1983 (12,4%). Die letzten beiden Werte sind auf umfangreiche Inspektionen des Dampferzeugers an zwei der drei schwedischen Druckwasserreaktoren zurückzuführen.

Die durch Sicherheitsbehörden verursachten Ausfälle werden in den USA als wesentlich höher angegeben als in jedem anderen Land. Der Durchschnittswert war bis zum Three-Mile-Island-Zwischenfall relativ niedrig (4%) und stieg danach bis auf 14% an. Die höchsten Verlustwerte traten 1979 und 1980 mit jeweils mehr als 16% auf, der Durchschnittswert seit 1981 beträgt 13%. Mehr als zwei Drittel dieser Verluste stehen in Zusammenhang mit Auflagen der Sicherheitsbehörden zur Verbesserung der Erdbebensicherheit, Rohrleitungen im Primärkreislauf und Dampferzeugern.

Die Datenbasis der Ausfälle am Dampferzeuger ist geringfügig inkonsistent. Einige EVU klassifizieren den Austausch des Dampferzeugers oder der Rohrleitungen als durch Sicherheitsbehörden verursacht, andere wiederum nicht. Sofern alle Ausfälle am Dampferzeuger als technologisch bedingt angesehen werden, würde der Wert der durch Sicherheitsbehörden verursachten Ausfälle um 2% sinken. Dennoch sind die verbleibenden Ausfälle wesentlich höher als in anderen Ländern. Vergleicht man die Betriebsergebnisse der Kernkraftwerke Europas mit denen der USA, so wird deutlich, daß die in Zusammenhang mit dem Dampferzeuger auftretenden Ausfälle in Europa fast ausschließlich der Technologie und nicht den Sicherheitsbehörden zugerechnet werden.

Siedewasserreaktoren

Die Verfügbarkeiten von Siedewasserreaktoren in den betrachteten Ländern zeigen Bild 2 und Tafel 4. Es ist deutlich, daß erhebliche Schwankungen in allen Ländern vorliegen mit Ausnahme der Schweiz (nur ein Siedewasserreaktor in der Datenbasis). In der Bundesrepublik Deutschland, Japan und Schweden bestanden zwischen 1975 und 1979 Verfügbarkeits-

probleme, danach sind allmählich Verbesserungen erfolgt. Im Gegensatz dazu ist die Verfügbarkeit in den USA seit 1979 geringer geworden.

Der schweizer Siedewasserreaktor hat einen 13-Jahres-Wert der Arbeitsausnutzung von 86,2% und übersteigt damit die Arbeitsausnutzung der Druckwasserreaktoren (85,5%). Insgesamt sind die Betriebsergebnisse der schweizer Reaktoren herausragend.

Es existieren vier Siedewasserreaktoren in der deutschen Datenbasis; diese weisen von den untersuchten fünf Ländern den niedrigsten 13-Jahres-Wert der Arbeitsausnutzung (64,3%) auf. Die niedrigen Werte von 1976 bis 1980 sind auf den vorsorglichen Austausch eines Großteils des Rohrleitungssystems zurückzuführen, für den jeweils ein Zeitaufwand von einem Jahr pro Kraftwerk notwendig war. Das Austauschprogramm wurde 1982 abgeschlossen. Danach stieg die Arbeitsausnutzung rasch an und erreichte 83,5% im Jahre 1985.

Eine ähnliche Entwicklung ist in Japan von 1975 bis 1979 zu verzeichnen. Es ist problematisch, spezifische Verlustkategorien zu identifizieren, da alle größeren Ausfälle in den Daten über die Revisionen enthalten sind. In der Vergangenheit hat es stetige Verbesserungen gegeben. Informationen des Institute of Nuclear Power Operations (INPO) lassen vermuten, daß die Planung und Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen bei Druckwasser- und Siedewasserreaktoren strukturell gleich sind.

Die schwedischen Betriebsergebnisse schwanken geringer als in anderen Ländern. Schwedische Siedewasserreaktoren haben den zweithöchsten 13-Jahres-Wert (74,4%). Von 1980 bis 1985 betrug dieser Wert durchschnittlich 79,7%.

Der Verlauf der amerikanischen Betriebsergebnisse ist dem der anderen Länder entgegengesetzt. Insbesondere seit 1979 sind die Werte gesunken.

Erzwungene Stillstände

Die Werte der Verluste durch erzwungene Stillstände von 1975 bis 1984 für die untersuchten Länder zeigt Tafel 4. Japan und die Schweiz weisen dabei extrem geringe Werte auf (1,4 bzw. 1,3%), die Verluste in der Bundesrepublik Deutschland sind auf einem mittleren Niveau (6,5%) und Schweden sowie die USA zeigen die höchsten Werte (12,9 bzw. 14,4%).

Eine detaillierte Untersuchung der Daten über die Ausfälle des Primärkreislaufes ergab, daß das Reaktorkühlsystem eine wesentliche Ausfallursache sowohl in den USA als auch in der Bundesrepublik Deutschland darstellt. Verluste aufgrund von Brennstoffproblemen sind in den USA weit höher als in anderen Ländern, obwohl die Tendenz abnehmend ist.

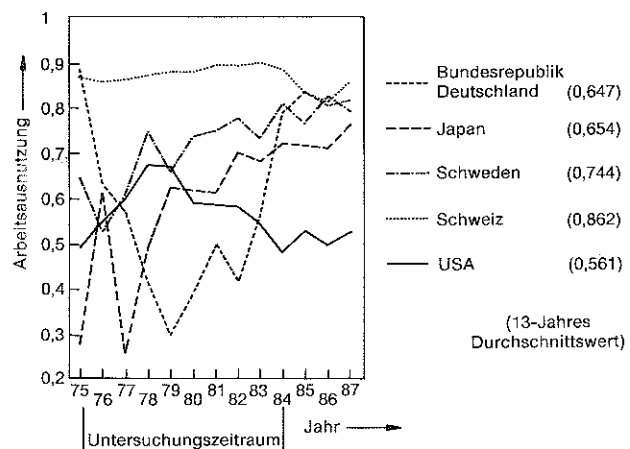


Bild 2. Jährliche Arbeitsausnutzung der Siedewasserreaktoren (nach [4]).

Tafel 4. Nichtverfügbarkeiten von Siedewasserreaktoren (Mittelwert 1975 bis 1984).

	Bundesrepublik Deutschland	Japan	Schweden	Schweiz	USA
Erzwungene Stillstände					
• Primärkreislauf					
Reaktorkühlsystem	0,016	0,003	0,002	0,005	0,031
andere	0,024	0,002	0,020	0,001	0,027
• Sekundärkreislauf					
Turbine	0,008	0,002	0,011	0,006	0,013
Generator	0,001	0,001	0,015	0,000	0,004
Kondensator	0,008	0,000	0,000	0,000	0,017
andere	0,005	0,002	0,062	0,001	0,023
• andere	0,003	0,004	0,019	0,000	0,029
Summe	0,065	0,014	0,129	0,013	0,144
Geplante Stillstände					
• Primärkreislauf	0,282	0,344	1	0,089	0,127
• Sekundärkreislauf	0,005	1	1	1	0,016
• andere	0,020	1	1	1	0,028
Summe	0,307	0,376	0,145	0,107	0,171
Sicherheitsbehörden	0,113	0,000	0,007	0,000	0,104

¹ Daten nicht verfügbar

Die erzwungenen Stillstände durch Probleme im Sekundärkreislauf sind in Schweden am höchsten; sie verteilen sich auf die Turbine, den Generator, das Kühlwasser und andere Komponenten. Eine detaillierte Analyse ergab, daß die Verluste von 1975 bis 1979 am höchsten waren. In dem Zeitraum von 1980 bis 1984 sind die Verluste auf weniger als 5% jährlich zurückgegangen. Zur gleichen Zeit stieg die Anzahl der Reaktoren auf sieben.

Die Verluste im Sekundärkreislauf amerikanischer Siedewasserreaktoren betragen im Durchschnitt 5,7%, während sie für die Bundesrepublik Deutschland, die Schweiz und Japan sehr gering sind. In allen Ländern sind die Verluste durch Ausfälle an der Turbine und am Generator gering. In den USA sind Verluste am Kondensator von durchschnittlich 1,7% zu verzeichnen; sie sind damit doppelt so hoch wie die entsprechenden Verluste in der Bundesrepublik Deutschland. In den anderen Ländern treten Verluste durch Ausfälle am Kondensatorsystem nicht auf.

Geplante Stillstände

In der Tafel 4 sind die Werte der Verluste durch geplante Stillstände dargestellt. Die schweizer Werte sind dabei mit 11%/a erstaunlich niedrig. Die schwedischen und amerikanischen Werte sind relativ gering und entstehen in Zusammenhang mit dem Brennstoffwechsel. Mit Verlusten von jeweils 30% weisen die Bundesrepublik Deutschland und Japan die höchsten Werte auf. Die Ursachen der Ausfälle sind jedoch unterschiedlich. In der Bundesrepublik Deutschland war das Austauschprogramm des Rohrleitungssystems für die hohen Werte verantwortlich. Im Gegensatz dazu ist der hohe Wert in Japan auf die Tatsache zurückzuführen, lang andauernde Revisionen vorzunehmen.

Durch Sicherheitsbehörden verursachte Stillstände

Die Werte dieser Kategorie sind in der Bundesrepublik Deutschland (Austausch des Rohrleitungssystems) und in den USA sehr hoch (mehr als 10% im 10-Jahres-Durchschnitt). Schweden weist dagegen sehr geringe Verluste auf, die im Zeitverlauf konstant sind (0,7%).

Die Verluste der amerikanischen Siedewasserreaktoren betragen von 1975 bis 1979 durchschnittlich 5% und stiegen durch

die zunehmende Stringenz der Sicherheitsbehörden nach dem Three-Mile-Island-Zwischenfall rasch auf 10% an.

Schlußfolgerungen

Die vorliegende Studie behandelt ausschließlich Leichtwasserreaktoren (DWR und SWR). Da die Technologien dieser Kernkraftwerkstypen in den untersuchten Ländern relativ ähnlich sind, sind die unterschiedlichen Betriebsergebnisse mit großer Wahrscheinlichkeit eher auf die Betriebsweise, die Verfahrensweise der Sicherheitsbehörden und Managementprobleme als auf technologische Probleme zurückzuführen. Angesichts der großen Bandbreite der Ergebnisse gestattet sich eine Entscheidung, ob die Unterschiede in den Betriebsergebnissen signifikant sind, problematisch. Es muß daher unterstrichen werden, daß die auf der Analyse basierenden Schlußfolgerungen mit Unsicherheiten behaftet sind.

Erste Schlußfolgerungen lassen sich aus den herausragenden Betriebsergebnissen schweizer Kernkraftwerke ziehen. Obwohl die Datenbasis relativ schmal ist (drei Druckwasserreaktoren und ein Siedewasserreaktor), deuten die konstant hohen Verfügbarkeiten darauf hin, daß die Betriebsweise und das Management richtungweisend für die anderen Länder sind. Insbesondere die Fähigkeit, Betrieb und Instandhaltung mit überwiegend eigenem Personal durchführen zu können, die präzise Planung der Revisionen und das Einbringen von Betriebserfahrungen in die Trainingsprogramme für das Kraftwerkpersonal leisten ihren Beitrag zum Erfolg. Festzustellen ist weiterhin, daß die guten Ergebnisse mit Kernkraftwerken verschiedener Hersteller erzielt werden.

Aus den Ergebnissen der Studie ist abzuleiten, daß das Einbringen von Betriebserfahrungen von alten in die Betriebsweise neuer Kernkraftwerke eine hohe Bedeutung für die Verfügbarkeit hat. Japan ist ein Beispiel dafür, wie durch landesweite Programme zur Verbesserung industrieller Technologie die erzwungenen Ausfälle von Kernkraftwerken drastisch reduziert werden können. Die französischen Daten zeigen eine ähnliche Tendenz. Die Daten aus der Bundesrepublik Deutschland zeigen insbesondere bei den Siedewasserreaktoren unterschiedliche Ergebnisse, dennoch ist eine Verbesserung der Betriebsergebnisse im Laufe der Zeit erkennbar. Auch in Schweden konnte die Verfügbarkeit insgesamt erhöht werden.

Alle untersuchten Länder besitzen eine eng verflochtene Kernkraftindustrie, in der ein reger Informationsaustausch existiert. Dennoch variiert die Struktur der Kernkraftindustrie von Land zu Land. Es ist offensichtlich, daß ganz unterschiedliche Strukturen der Kernkraftindustrie zu guten Betriebsergebnissen führen können, sei es die Existenz nur eines staatlichen Elektrizitätsversorgungsunternehmens (Frankreich) oder mehrerer privater EVU (Japan), eines einzelnen Kraftwerksherstellers (Bundesrepublik Deutschland) oder mehrerer (Schweden, Schweiz).

Es ist zu vermuten, daß die Wirtschaftlichkeit von Kernkraftwerken Auswirkungen auf die Betriebsergebnisse hat. Sofern die Kosten nichtnuklearer Stromerzeugung hoch sind gegenüber den Kosten der Kernkraftwerke, ist es ökonomisch sinnvoll, qualitativ hochwertige und wartungsfreundliche Kraftwerkskomponenten einzusetzen, wodurch die Ausfallrate gesenkt werden kann. Dieser Aspekt wurde allerdings in der Studie nicht explizit untersucht.

Die ökonomische Regulierung ist in den USA anders als in den anderen Ländern. Der Einfluß auf die Betriebsergebnisse konnte im Rahmen dieser Studie nur qualitativ erfaßt werden, es ist allerdings zu vermuten, daß in den USA hierdurch größere Einflüsse entstehen.

Das Verhalten der Sicherheitsbehörden kann einen großen Einfluß auf die Betriebsergebnisse haben. Das in den USA angewandte System unterscheidet sich wesentlich von denen in Europa, wie durch zwei vergleichende Untersuchungen festgestellt wurde [8, 9]. Betrachtet man die USA und die Bundesrepublik Deutschland, so ist festzustellen, daß gleiche technische Ausfallursachen auch zu annähernd gleichen Nichtverfügbarkeiten führen. Indem jedoch die Ausfallursachen unterschiedlich klassifiziert werden, erscheinen die durch Sicherheitsbehörden verursachten Ausfälle in der Bundesrepublik Deutschland niedrig und in den USA hoch.

Die amerikanische Kernkraftindustrie ist größer und verschiedenartiger als in den anderen Ländern: Unter den 79 Reaktoren, die untersucht wurden, befinden sich sowohl solche mit guten als auch einige mit extrem schlechten Betriebsergebnissen. Die Auswertungen der Daten lassen folgende Schlüßfolgerungen zu:

- Da in den USA die ersten Kernkraftwerke gebaut und in Betrieb genommen wurden, trat hier das Problem des Lernens aus Betriebserfahrungen erstmalig auf. Bis heute ist dieses Problem in den USA, ganz im Gegensatz zu den anderen Ländern, weitgehend ungeklärt.
- In der amerikanischen Kernkraftindustrie existiert geringere Kommunikation bzw. Zusammenarbeit zwischen Herstellern und Betreibern.
- Hohe Verfügbarkeiten von Kernkraftwerken erfordern ein starkes Management der EVU im Verhältnis zu den Kraftwerksherstellern, eine breite Wissensbasis bei den Betreibern sowie die Bereitschaft, aus den Erfahrungen zu lernen, und eine enge Zusammenarbeit der beteiligten Institutionen.

Literatur

- [1] Nuclear Engineering International, April 1988, pp. 14/15.
- [2] Winje, D., Beckjord, E., Golay, M.W., Gyftopolous, E.P., Hansen, K.F., and Lester, R.K.: International Comparison of LWR Performance. Report No. MIT-EL 87-004. Massachusetts Institute of Technology, February 1987.
- [3] Angaben von Kraftwerksbetrieben und leitenden Angestellten von Elektrizitätsversorgungsunternehmen, Fachzeitschriften und Forschungsstellen der Energiewirtschaft, Angaben der Mitarbeiter von Sicherheitsbehörden.
- [4] Wilson, C.T.: A Numerical Comparison of International Light Water Reactor Performance 1975 to 1984. Report No. MIT-EL 86-007, Massachusetts Institute of Technology, May 1986.
- [5] S.M. Stoller Corp.: Operating Plant Evaluation Code-2 (OPEC-2), User's Manual. Boulder, Colorado/USA (1983).
- [6] Koppe, R.H., Olson, E.A.J., and LeShay, D.W.: Nuclear Unit Operating Experience: 1980—1982 Update. EPRI-Report NP-3480, Palo Alto, California/USA. Electric Power Research Institute, April 1980.
- [7] Winje, D., and Hansen, K.F.: Disparities in Nuclear Power Plant Performance in the United States and the Federal Republic of Germany. Report No. MIT-EL 84-018. Massachusetts Institute of Technology, December 1984.
- [8] Hulkower, S.D.: The Effects of Regulation on the Performance of Nuclear Power in the United States and the Federal Republic of Germany. Report No. MIT-EL 86-008. Massachusetts Institute of Technology, June 1986.
- [9] Anderson, S.C.: An International Comparison of the Impact of Safety Regulation on LWR Performance. Massachusetts Institute of Technology, June 1987.

Lebensdauererlängerung — ein komplexes Planungsziel

Von J. Garieff¹, R.B. Dooley², H.R. Kautz³, J. van Liere⁴ und K. Plate⁵

In vielen Industrieländern der westlichen Welt haben sich in den letzten Jahren die Rahmenbedingungen für den Bau und den Einsatz fossilbefeuerteter Kraftwerke derart verändert, daß Überlegungen angestellt werden, wie ihre Lebensdauer verlängert werden kann. Das gilt vornehmlich für bereits laufende ältere Anlagen. Aber auch bei der Planung von Neuanlagen haben diese Gedanken Eingang gefunden.

Gründe für die Lebensdauererlängerung

Von den in folgender Aufzählung aufgeführten Gründen treffen für die einzelnen Unternehmen in den verschiedenen Ländern jeweils nur einige zu, und das mit unterschiedlicher Wichtigkeit. Die Aufzählung gilt im wesentlichen für in Betrieb befindliche Anlagen. Auf die Planung bei zukünftigen Anlagen wird am Schluß kurz eingegangen.

Hier sind zu nennen:

- kapitalintensive Nach- oder Umrüstung von Altanlagen, um sie den geänderten gesetzlichen Vorschriften — zum Beispiel zum Umweltschutz — anzupassen, oder andere sichere Brennstoffe nutzen zu können. So aufwendig nachgerüstete Anlagen müssen selbstverständlich länger als ursprünglich vorgesehen betrieben werden;

¹ Dipl.-Ing. J. Garieff, Hamburgische Electricitäts-Werke AG (HEW), Hamburg, Vorsitzender des VGB-Hauptausschusses „Wärme-kraftwerke“.

² Dr. R.B. Dooley, Ph. D., Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, Kalifornien/USA.

³ Dr.-Ing. H.R. Kautz, Großkraftwerk Mannheim AG, Mannheim.

⁴ Dr. Ir. J. van Liere, N.V. KEMA, Arnheim/Niederlande.

⁵ Dipl.-Ing. K. Plate, VGB-Geschäftsstelle, Essen.