

# **Grenzen und Sicherheitsrisiken des Lastfolgebetriebs von Kernkraftwerken**

Studie im Auftrag von Greenpeace

erstellt von:



Renneberg Consult UG  
Wolfgang Renneberg  
[www.atomsicherheit.de](http://www.atomsicherheit.de)

Bonn, Januar 2011

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Wesentliche Ergebnisse im Überblick.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen des Lastfolgebetriebs .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Zulässiger Rahmen für den Lastfolgebetrieb auf der Grundlage von Herstellerspezifikation und ursprünglicher Genehmigung.....</b>	<b>11</b>
<b>4. Sicherheitstechnische Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf die Anlagensicherheit.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Anforderungen an die Prüfung der Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf die Sicherheit .....</b>	<b>20</b>
5.1 Auswertung der Betriebserfahrungen zur Ermittlung des Lebensdauerverbrauchs.....	20
5.2 Ermittlung der künftig zu erwartenden Ermüdungsbeanspruchungen.....	20
5.3 Spannungs- und Ermüdungsanalysen zur Ermittlung von Ermüdungsfolgen .....	21
5.4 Prüfung der Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf Regelsysteme.....	21
5.5 Nachweis der Störfallsicherheit bei Teillastzuständen .....	21
<b>6. Stand der aktuellen Prüfungen der Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf die Sicherheit .....</b>	<b>22</b>
6.1 Gutachten des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart .....	22
6.2 Gutachten der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit 2010 .....	23
<i>GRS - Prüfungsergebnis</i> .....	23
<i>Offene Nachweise</i> .....	25
<b>7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>29</b>
<b>8. Literatur.....</b>	<b>31</b>

## 1. Wesentliche Ergebnisse im Überblick

### Höheres Risiko durch Lastfolgebetrieb

Kernkraftwerke sollen in Zukunft in steigendem Maße im Lastfolgebetrieb gefahren werden, um die Schwankungen im Stromnetz bei größer werdenden Anteilen des Wind- und Solarstroms auszugleichen. Dadurch erhöht sich das Sicherheitsrisiko insbesondere beim Weiterbetrieb der älteren Atomkraftwerke zusätzlich. Denn der Lastfolgebetrieb bedeutet für die Kernkraftwerke einen „Dauerstress“, der zu erhöhten Lasten und Anforderungen in praktisch allen sicherheitstechnischen wesentlichen Bereichen der Anlage führt.

Die Störfallsicherheit ist für den Lastfolgebetrieb der deutschen Kernkraftwerke bislang nicht nachgewiesen. Wenn die erhöhten Lasten auf Vorschädigungen von Bauteilen der alten Reaktoren treffen, können sich die Folgen von Vorkommnissen und Störfällen verschlimmern.

An das Personal werden durch den Lastwechselbetrieb höhere Anforderungen gestellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Fehlhandlungen kommt, steigt.

### Fehlende Sicherheitsanalysen – fehlende Genehmigungen

Die Zulässigkeit des Dauerbetriebs von Kernkraftwerken im Lastfolgebetrieb ist eine wesentliche Änderung der Betriebsweise und bedarf nach § 7 Abs.1 Satz 1 des Atomgesetzes der atomrechtlichen Genehmigung. Solche Genehmigungen liegen jedoch nicht vor. Solange diese Genehmigungen nicht vorliegen, ist die Atomaufsicht verpflichtet, den Lastfolgebetrieb durch aufsichtliche Maßnahmen zu beschränken.

### Beschränkte Regelfähigkeit der Kernkraftwerke

Das gesicherte verfügbare Regelvolumen des gesamten Kernkraftwerksparks beträgt ca. 25% bis max. 30% der installierten Leistung. Dies entspricht weniger als 10 % der im Jahr 2020 auf der Basis der Energieszenarien der Bundesregierung zu erwartenden Schwankungen bei der Einspeisung von Wind- und Solarstrom.

### Konkurrenz Atomenergie – Erneuerbare

Die Fähigkeit, die Erzeugung von elektrischem Strom an die entstehenden Schwankungen der Solar- und Windstromeinspeisung anzupassen, stößt bereits jetzt zeitweilig an die technisch ökonomischen Grenzen des inflexiblen Kraftwerk-Grundlastparks der großen Energieversorgungsunternehmen. Bereits jetzt entstehen den großen Energieversorgungsunternehmen durch die fehlende Anpassungsfähigkeit der Stromproduktion an die Netzschwankungen Gewinneinbußen.

Die Regelfähigkeit der Atomkraftwerke reicht nicht aus, um die entstehenden Lastschwankungen auszugleichen. Dies gilt erst recht dann, wenn die sicherheitstechnischen zusätzlichen Risiken des Lastfolgebetriebs zu weiteren Einschränkungen der Fahrweise führen.

Atomstrom kann für die Betreiber zukünftig nur dann optimal wirtschaftlich verwertet werden, wenn der jetzige gesetzliche Vorrang für die Einspeisung von Strom aus Solar- und Windstrom beseitigt und die Entwicklung der Erneuerbaren durch andere Instrumente verlangsamt wird. Entweder wird der Atomstrom auf Kosten der Entwicklung der erneuerbaren Energien verwertet oder die Erneuerbaren Energien werden auf Kosten der Verwertung des Atomstroms entwickelt. Insoweit ist die Laufzeitverlängerung keine Brücke zur Entwicklung der erneuerbaren Energien sondern ein Hindernis.

## 2. Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen des Lastfolgebetriebs

Kernkraftwerke sind traditionell Grundlastkraftwerke, gehören also zu den Kraftwerken, die über das ganze Jahr mit nahezu voller Leistung fahren. Das ist ökonomisch sinnvoll, da ihre laufenden Kosten nach hoher Erstinvestition geringer sind als die anderer thermischer Kraftwerke, die zwar billiger zu bauen sind, aber höhere laufende Betriebskosten aufweisen (Hundt, 2009). Die Auslastungsgrade der deutschen Kernkraftwerke lagen deshalb bis vor kurzem in vielen Fällen bei ca. 90 %.

**Abb. 1: Auslastungsgrad deutscher Kernkraftwerke**

Betriebsergebnisse Kernkraftwerke 2009

Kernkraftwerk	Nennleistung brutto/MWe	Brutto-Stromerzeugung - MWh		Zeitverfügbarkeit % <sup>1</sup>		Arbeitsverfügbarkeit % <sup>2</sup>	
		Jahr 2008	Jahr 2009	Jahr 2008	Jahr 2009	Jahr 2008	Jahr 2009
Biblis A	1.225	8.990.829	1.098.261	88,75	16,14	88,44	15,84
Biblis B	1.300	10.975.041	1.614.042	99,86	17,26	99,67	16,77
GKN I Neckarwestheim	840	4.187.792	4.825.484	79,58	94,94	78,07	94,62
GKN II Neckarwestheim	1.400	11.431.720	11.515.750	93,87	94,83	93,47	94,75
KBR Brokdorf	1.480	12.042.400	12.050.357	94,72	94,29	94,57	94,13
KKB Brunsbüttel	806	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
KKE Emsland	1.400	11.490.541	11.429.673	93,48	93,53	93,35	93,27
KKG Grafenrheinfeld	1.345	10.330.499	11.056.120	89,12	94,55	88,85	94,38
KKI 1 Isar	912	7.884.456	7.077.433	100,00	92,19	98,67	89,02
KKI 2 Isar	1.485	12.093.046	12.126.709	93,55	94,49	93,33	94,32
KKK Krümmel	1.402	0	349.362	0,00	3,24	0,00	2,89
KKP 1 Philippsburg	926	6.423.289	6.448.081	83,31	87,76	82,51	87,18
KKP 2 Philippsburg	1.458	11.429.510	11.582.804	90,54	92,52	90,32	92,26
KKU Unterweser	1.410	9.776.485	10.542.429	87,23	89,82	82,83	89,51
KRB B Gundremmingen	1.344	10.164.555	10.936.399	86,16	92,60	85,10	92,03
KRB C Gundremmingen	1.344	10.416.883	10.773.974	88,08	91,74	87,49	91,13
KWG Grohnde	1.430	11.169.843	11.505.158	91,62	94,61	91,32	94,36
<b>gesamt</b>	<b>21.507</b>	<b>148.806.890</b>	<b>134.932.036</b>	<b>79,99</b>	<b>73,20</b>	<b>80,86</b>	<b>74,21</b>

<sup>1</sup> Maß für die zeitliche Einsatzfähigkeit eines Kraftwerks in Prozent. Ergibt sich aus dem Bezugszeitraum (z. B. Kalenderjahr) und der Zeit, in der die Anlage in diesem Zeitraum für die Stromerzeugung zur Verfügung stand.

<sup>2</sup> Maß für die technisch und betrieblich mögliche Stromerzeugung eines Kraftwerks in Prozent. Ergibt sich aus der Nennarbeit (maximal mögliche Stromerzeugung ohne jegliche Einschränkung) einer Anlage im Bezugszeitraum (z. B. Kalenderjahr) und der tatsächlich erzeugten Strommenge zuzüglich der darüber hinaus technisch und betrieblich möglichen Stromerzeugung.

Nach dem Energieeinspeisegesetz (EEG) sind die Betreiber verpflichtet worden, den aus erneuerbaren Energiequellen stammenden Strom zu einem garantierten Preis zu kaufen und in ihr Netz einzuspeisen. Falls mehr Strom im Netz ist als abgenommen werden kann, müssen die Stromeinspeisung aus fossilen Energiequellen oder aus Kernkraftwerken zurückgefahren oder die Produzenten von Strom aus erneuerbaren Energiequellen entschädigt werden. Solange die Menge des eingespeisten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen nicht zu groß ist, sind die Auswirkungen auf das Netz und den bestehenden Kraftwerkspark vernachlässigbar.

Bereits aus Studien u.a. des Fraunhofer Instituts für Systemforschung und Innovationsanalyse aus den achtziger Jahren war bekannt, dass allein das technisch und ökonomisch nutzbare Potential der Windenergie in Deutschland mindestens 80 % des Stromverbrauchs betrug. Gleichwohl behaupteten die Betreiber der Atomkraftwerke Anfang der neunziger Jahre, dass die erneuerbaren Energiequellen über eine Nischentechnologie nicht hinauskommen würden. Einen Anteil der von 0,9 % Windstrom an der Stromerzeugung, wie im Jahr 1989 in Dänemark, sei in der Bundesrepublik wegen anderer klimatischer Verhältnisse nicht möglich.<sup>2</sup>

Im Jahr 2009 machten die erneuerbaren Energiequellen bereits einen Anteil von 16,3 % der Bruttostromerzeugung aus (Bundesumweltministerium, 2010). Die gesamte installierte Leistung der erneuerbaren Energiequellen betrug 46 293 MW (ebenda). Davon steuerten die Windenergieanlagen 21164 MW und damit mehr als die Kernkraftwerke mit 20470 MW bei (a.a.O.). Die Photovoltaik Anlagen erreichten 9800 MW Leistung.

Die tatsächlich abgegebene Leistung schwankt jedoch mit der Wetterlage. Die Nachfrage nach Strom schwankt ebenfalls. Die schwächste Nachfrage beispielsweise im Jahr 2007 betrug 40 GW, die stärkste Nachfrage im gleichen Jahr 93 GW (Fraunhofer, 2009). Träfe also bereits heute das stärkste Angebot aus erneuerbaren Energiequellen (ca. 46 GW) auf die schwächste Nachfrage (40 GW) würde sich eine negative Residuallast ergeben, d.h. selbst wenn alle nuklearen und fossilen Stromerzeugungskapazitäten heruntergefahren würden, ergäbe sich noch ein Überschuss von 6 GW.

Die tatsächliche Situation im Jahr 2007 zeigen die von Fraunhofer IWES zusammengestellten Daten (Abb. 2). An der Leipziger Strombörse wird die Megawattstunde (MWh) Strom üblicherweise im Mittel für 40 – 50 Euro verkauft. Am Sonntag, dem 4. Oktober 2009 bekamen Käufer für die Stromabnahme erst-

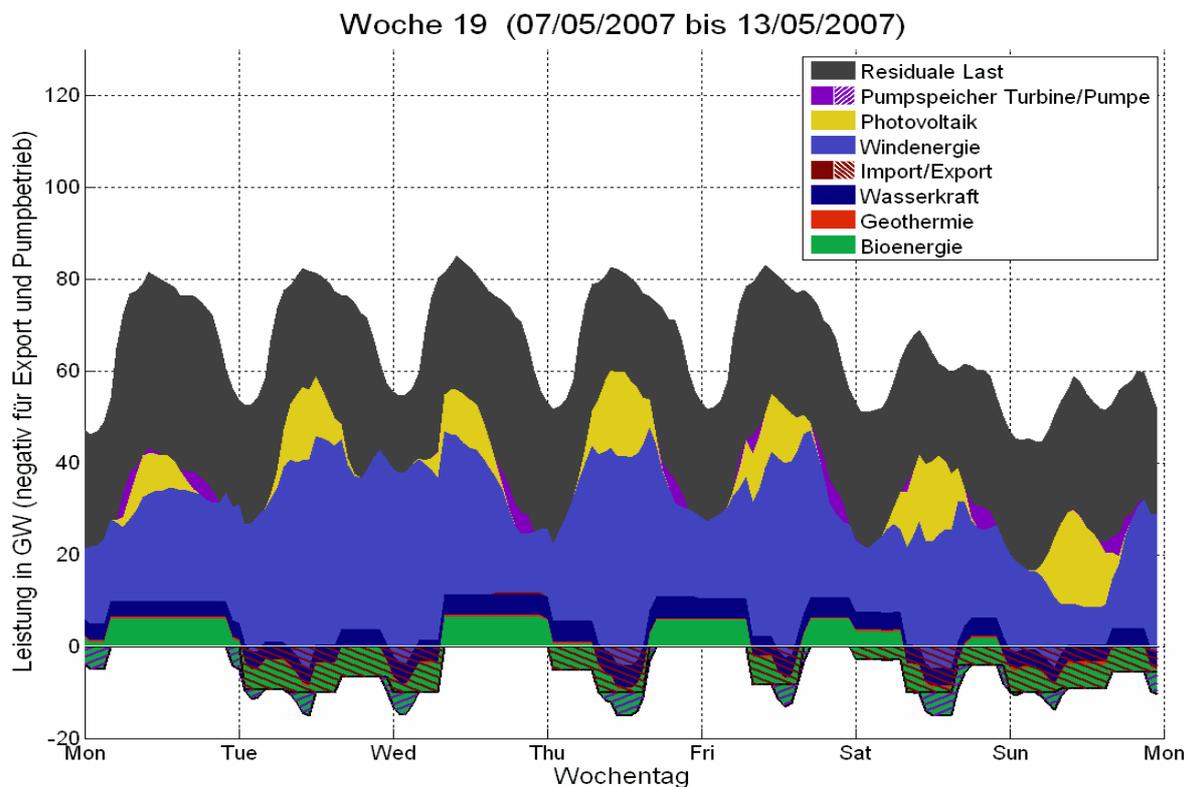
---

<sup>2</sup> Informationskreis Kernenergie, Kernenergienachrichten, 1990:

*„Die Dänen sind europäischer Spitzenreiter bei der Nutzung der Windenergie: 1988 wurde in Dänemark fast jede hundertste Kilowattstunde aus Wind erzeugt – das entspricht einem Anteil von 0,9 Prozent am gesamten Stromverbrauch. Eine vergleichbar intensive Nutzung der Windkraft ist in der Bundesrepublik wegen anderer klimatischer Bedingungen nicht möglich.“*

mals Geld hinzu. Der „negative Preis“ betrug 500,02 Euro/MWh<sup>3</sup>. Diese Prämie für den Abnehmer des Stroms betrug damit etwa das Zehnfache dessen, was er üblicherweise als Käufer für den Strom zahlen muss. Für die anbietenden Energieversorger war es billiger, diesen hohen Preis zu zahlen als ihre Kraftwerke herunterzufahren. Als Grund für die ungewöhnlich niedrigen Preise gaben Stromhändler die schwache Nachfrage und ein üppiges Windangebot an<sup>4</sup>.

**Abbildung 2: Lastabdeckung in einer Woche im Jahr 2007 mit hoher Einspeisung von Solar- und Windstrom**



<sup>3</sup> Vgl. u.a. Nachricht der Stadtwerke Bochum vom 5.10.2009: „Zum ersten Mal war der Stromindex Phelix Day Base an der Leipziger Strombörse EEX negativ. Für den Sonntag, 4. Oktober, notierte am Spotmarkt der Phelix Base bei minus 11,59 Euro für die Megawattstunde, ist in den EEX-Markdaten nachzulesen. Zudem gab es einen negativen Preis von minus 500,02 Euro/MWh für die Stunde 2-3 Uhr für Sonntag, 4. Oktober. Es handelt sich bislang um den tiefsten notierten negativen Preis in der Stundenauktion am Spotmarkt, bestätigte eine EEX-Sprecherin auf energate-Nachfrage. Aber auch von 1-2 Uhr (-105,76 Euro/MWh) und 3-4 Uhr (-100,09 Euro/MWh) waren die Preise noch tief. Einen positiven Strompreis gab es erst wieder zwischen 7-8 Uhr (11,35 Euro/MWh) morgens. Bei einem negativen Strompreis erhält der Stromkäufer für die Stromabnahme Geld vom Verkäufer. Theoretisch könnte der Preis bis auf minus 3.000 Euro sinken, dann greift das EEX-System ein. Tiefere Notierungen sind dann nicht mehr möglich.“

<sup>4</sup> Das Windangebot lag zwischen 17 und 18 GW (Andor, 2009)

Negative Preise sind an der Leipziger Strombörse seit dem 4. September 2008 zulässig und traten im Jahr 2009 in 71 Stunden auf. Diese Stunden fielen häufig mit einer hohen Windenergieeinspeisung zusammen, wie das Beispiel vom 4. Oktober 2009 verdeutlicht. Zur bisher längsten Zeitspanne negativer Strompreise kam es am ersten und zweiten Weihnachtsfeiertag 2009. Eine Windeinspeisung von durchschnittlich über 16500 MW führte in elf aufeinander folgenden Stunden zu negativen Preisen. (Andor, 2009)

Stromerzeuger zahlen Stromabnehmern nicht freiwillig Prämien für den Strom, den sie eigentlich produzieren, um ihn zu verkaufen. Sie sind dazu gezwungen, weil Sie ihr Angebot bereits heute technisch und ökonomisch nicht mehr in allen Fällen schnell genug steuern können. Ausschlaggebend hierfür sind die Schwankungen des Angebots an erneuerbarer Energie auf der einen Seite und die technisch/ökonomisch beschränkte Regelfähigkeit ihres konventionellen fossilen und nuklearen Kraftwerksparks auf der anderen Seite.

Je mehr Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingespeist wird, umso geringer wird andererseits die vom übrigen Kraftwerkspark zu übernehmende sog. „Residualleistung“. So kommt auch eine von der Energiewirtschaft in Auftrag gegebene Studie zu dem Schluss, dass die Residuallast immer häufiger niedrige Werte annimmt. Prinzipiell seien deshalb auch in Zukunft Situationen zu erwarten, in denen im Netz Überschussenergie zu erwarten sei (Hundt, 2009). Diese Entwicklung hat deshalb die Verdrängung derjenigen Stromerzeugungskapazitäten zur Folge, mit denen die großen Energieversorgungsunternehmen bislang ihre Gewinne realisiert haben (Kohle, Kernenergie). Die erneuerbaren Energien entwerten deshalb tendenziell die großen traditionellen Erzeugungskapazitäten der Energieversorgungsunternehmen, auf denen ihre Marktmacht beruht. Daraus ergibt sich eine strukturelle Gegnerschaft, die die Erneuerbaren mittelfristig eher als Störfaktor, denn als Entwicklungsperspektive sieht. Es liegt deshalb in der Logik der weiteren Entwicklung, dass der Druck der EVU auf die bestehende Vorrangregelung des EEG zugunsten der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien zunehmen wird und die EVU versuchen, die Entwicklung der erneuerbaren Energien verlangsamen.

Die Situation für die großen Energieversorgungsunternehmen und damit der Druck auf Vorrangregelung des EEG werden durch die Leistungscharakteristik des eingespeisten Stroms aus Erneuerbaren weiter verschärft. Denn die ökonomische Verwertung der hohen Grundlastkapazitäten der EVU in Form von Kohle und Kernenergie wird durch die mangelhafte Regelfähigkeit ihres Grundlastparks tendenziell weiter reduziert. Unter der Geltung der Vorrangregelung des EEG werden die Grundlastbetreiber immer häufiger dazu gezwungen sein, Strom an Industriekunden oder an der Börse zu verschenken, weil sie ihre Stromproduktion nicht schnell genug an den Verbrauch anpassen können. (s.o.). Die Einführung negativer Strompreise an der Leipziger Börse ist Ausdruck dieser Entwicklung.

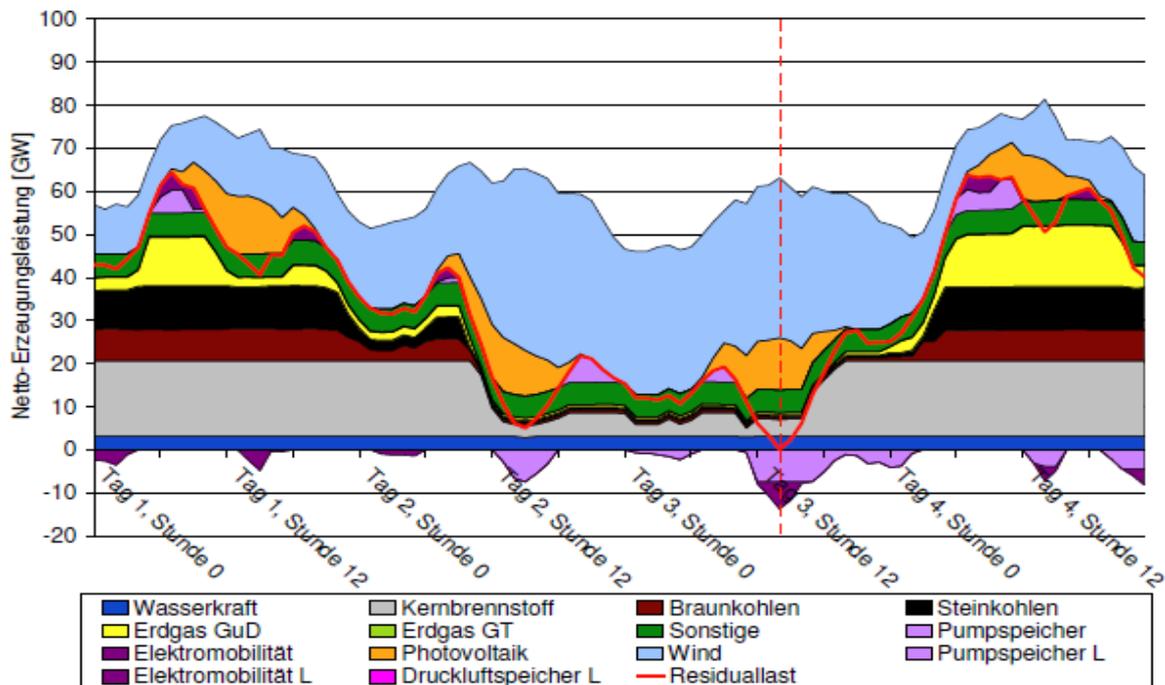
Auf Grund des starken Wachstums der erneuerbaren Energiequellen steht im Jahr 2020 nach der Prognose des Bundesverbandes Erneuerbarer Energie eine installierte Leistung erneuerbarer Energiequellen in Höhe von ca. 112 GW zur Verfügung<sup>5</sup> nach

---

<sup>5</sup> (Fraunhofer 2009); so auch (SRU, 2010, S. 54)

den Energiegutachten der Bundesregierung etwa 90 GW<sup>6</sup> und allein für Solar und Windstrom eine Leistung von über 60 GW. Die im Jahr angeforderte maximale Leistung (Jahreshöchstlast) beträgt zwischen 90 und 100 GW, die minimale Last etwa 40 GW. Wenn also auf Grund der Wetterlage die volle Leistung der Erneuerbaren zur Verfügung steht, ist je nach Stromnachfrage im Netz kein Platz für Strom aus den fossilen und nuklearen Stromerzeugungskapazitäten mehr, die sog. „Residuallast“ damit gleich oder kleiner als Null (vgl. Abb. 3, Tag 3, Stunde 12).

**Abbildung 3: Kraftwerkseinsatz bei hoher Windstromeinspeisung; Szenario Laufzeitverlängerung im Jahr 2030 (Hundt, 2009)**

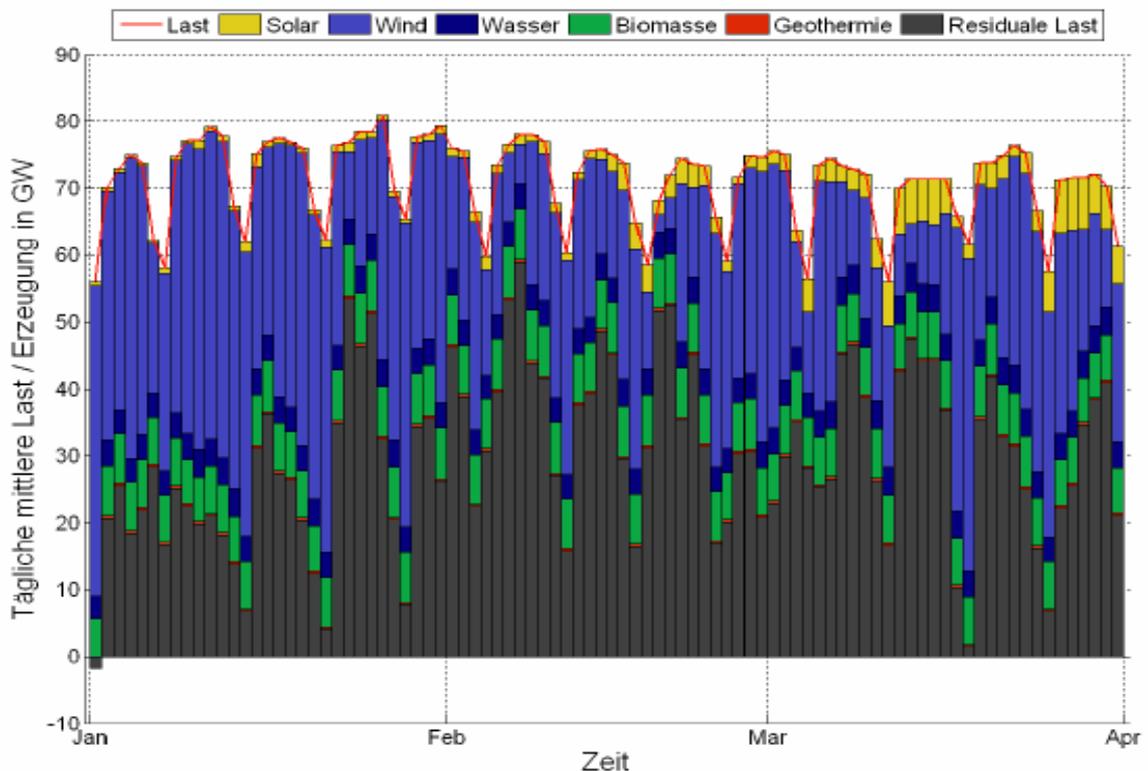


Nach dem Fraunhofer-Szenario beträgt die Residuallast, die von den konventionellen Kraftwerken zu erbringen ist, an 92 Tagen weniger als 25 GW, an 10 Tagen weniger als 10 GW, wobei im Verlaufe eines Tages diese Grenzen oft deutlich häufiger unterschritten werden (Fraunhofer, 2009).

In Abbildung 4 werden die Schwankungen der Residuallast (schwarzer Bereich) deutlich. Die Lasttäler zeigen, dass es praktisch kaum noch einen Bereich gibt, in dem eine „Grundlast“ (ca. 45 GW allein Braunkohle und Kernenergie) mit 100 % Vollast durchgefahen werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich nur um Tagesmittelwerte handelt, die im Stundenbereich durch weitere Lastspitzen oder –senken noch stärker schwanken.

<sup>6</sup> (BMU 2010)

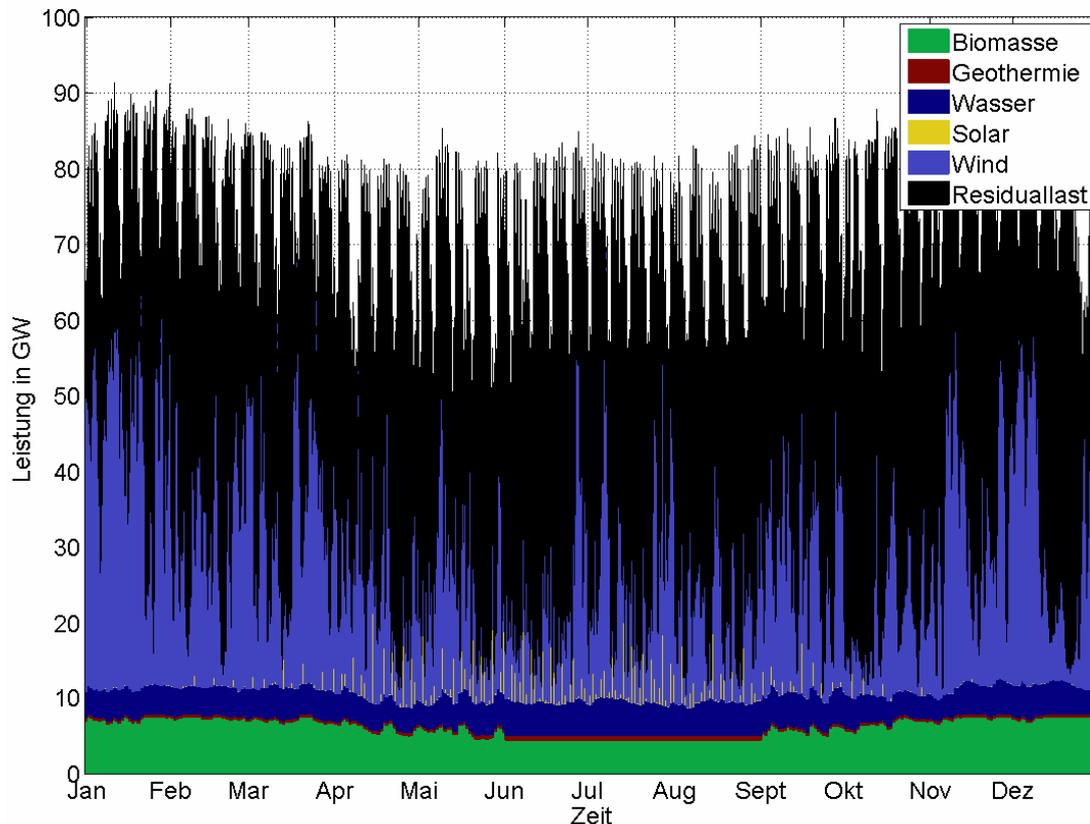
Abbildung 4: Residuallast 1. Quartal 2020; tägliche Mittelwerte nach (Fraunhofer IWES, 2009)



Das Spektrum der nach dem Szenario der Studie auftretenden Residualleistungen (d.h. ohne EE Anteil) reicht über das gesamte Jahr von ca. minus 13 GW (d.h. es tritt ein Leistungsüberschuss auf) bis ca. 73 GW. Die in der Vergangenheit noch deutlicher voneinander abgrenzbaren Lastbereiche (Grund-, Mittel- und Spitzenlast) werden deshalb zunehmend ineinander übergehen. Eine eindeutige (idealtypische) Zuordnung der Lastbereiche zu einzelnen Kraftwerkstypen (Grund-, Mittel- und Spitzenleistungskraftwerke) wird es in Zukunft nicht mehr geben, so auch die von der Energiewirtschaft in Auftrag gegebene Studie von Hundt (Hundt, 2009).

Der zu erwartende Lastverlauf stellt extreme Anforderungen an die Regelfähigkeit des Kraftwerksparks. Dies wird in der stündlichen Simulation des Verlaufs der erneuerbaren Stromerzeugung und der Stromnachfrage deutlich. (Fraunhofer 2009). Die Spitzen der Residuallast in Abbildung 5 (in der Darstellung schwarz) müssen durch den konventionellen und nuklearen Kraftwerkspark nachgefahren oder mithilfe von Speicherkraftwerken geglättet werden.

Abbildung 5: Residuallast in stündlicher Auflösung für das Jahr 2020 nach (Fraunhofer 2009)



Selbst wenn man unterstellt, dass die Extremfälle durch ein verbessertes Lastmanagement, durch zusätzliche Pumpspeicherwerke und durch Export bzw. Import ausgeglichen werden könnten, verbliebe ein hoher Regelbedarf für den konventionellen, fossilen und nuklearen Kraftwerkspark. Auch wenn in solchen Situationen die für den bisherigen Grundlastbereich errichteten Kohlekraftwerke heruntergefahren würden – was nur beschränkt möglich ist - müssten auch die Kernkraftwerke in weitem Umfang am sog. „Lastfolgebetrieb“ teilnehmen, d.h. ihre Leistung häufig drastisch reduzieren und bei dem folgenden Anstieg der Nachfrage wieder hochfahren<sup>7</sup>. Statt wie in der Vergangenheit überwiegend mit 100% Vollast zu fahren, müssten die Kernkraftwerke im Regelbetrieb in hoher Frequenz zwischen Leistungen möglichst zwischen 0 – 100 % betrieben werden.<sup>8</sup> Dafür waren sie ursprünglich nicht vorgesehen. Diese neuen Anforderungen an Kernkraftwerke ergeben sich grundsätzlich – nur etwas später - auch nach einem anderen Szenario der von der Energiewirtschaft beauftragten Studie, die von einer langsameren Entwicklung der erneuerbaren Energiequellen ausgeht (Hundt, 2009).

<sup>7</sup> Dies führte für die Betreiber von Kernkraftwerken, die ursprünglich als Grundlastkraftwerke für eine Vollauslastung konzipiert sind, zu Gewinneinbußen. Um solche Gewinneinbußen zu vermeiden, sind die Betreiber der Kernkraftwerke deshalb schon in der Logik ihres Geschäftsinteresses nur sehr begrenzt daran interessiert, in erneuerbaren Energiequellen zu investieren. Vgl. hierzu auch (SRU 2010, S. 74)

<sup>8</sup> Vgl. (VDW 2010, S. 36 f.) im Anschluss an (Hohmeyer 2010)

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit Kernkraftwerke die technischen Anforderungen eines Lastfolgebetriebes, die sich durch den wachsenden Anteil erneuerbarer Energiequellen stellen, erfüllen können und inwieweit sich dabei zusätzliche Risiken für die Sicherheit der Anlagen ergeben.

### 3. Zulässiger Rahmen für den Lastfolgebetrieb auf der Grundlage von Herstellerspezifikation und ursprünglicher Genehmigung

Kernkraftwerke können nicht einfach abgeschaltet werden, wenn der von Ihnen produzierte Strom zeitweise nicht gebraucht wird. Reaktorschnellabschaltungen werden in der Regel nur aus Sicherheitsgründen vorgenommen. Ein mögliches kontinuierliches Herunterfahren des Reaktors auf „Null-Leistung“ ist für einen Lastfolgebetrieb in der Regel auch nicht geeignet, da das Wiederhochfahren eines Reaktors bis auf volle Leistung je nach Betriebsbedingungen mindestens zwischen 2 – 3 Stunden aus unterkritisch heißem Zustand benötigt und bis zu 10 – 12 Stunden aus dem kalten Zustand<sup>9</sup>. Bei einem schnellen Herunterfahren insbesondere um 50 % der Leistung oder mehr kann die eintretende Xenonvergiftung des Spaltmaterials zu einer weiteren deutlichen Verzögerung des Hochfahrens führen<sup>10</sup>.

Für einen Lastfolgebetrieb können Kernkraftwerke ihre Leistung jedoch in bestimmten Bereichen grundsätzlich dem Bedarf anpassen. Der Lastfolgebetrieb von Kernkraftwerken gehört zum bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlagen. Die konkreten Randbedingungen für den Lastfolgebetrieb sind für einige Anlagen zum Teil in den Betriebsvorschriften der Betriebshandbücher (BHB) erfasst.<sup>11</sup>

Für die Druckwasserreaktoren, die etwa zwei Drittel der in Deutschland vorhandenen Kernenergiekapazität darstellen, ist grundsätzlich ein variabler Betrieb zwischen 100% und 50% der Leistung zulässig, für die sog. Konvoi- und Vorkonvoi Druckwasserreaktoren darüber hinaus ein variabler Betrieb bis zu 20 % der Leistung. Der Regelbereich der Siedewasserreaktoren beschränkt sich auf 100 % bis 60 % der Nennleistung (Hundt, 2009). Je stärker die Leistung verändert wird, desto geringer ist die zulässige Änderungsgeschwindigkeit.

Für die drei Konvoi Anlagen (DWR Baulinie 4) sind in den angegebenen Leistungsbereichen folgende Leistungsänderungsgeschwindigkeiten zulässig:

- 10 % der Nennleistung pro Minute bei Leistungsänderungen von maximal 20 % der Nennleistung
- 5 % der Nennleistung pro Minute bei Leistungsänderungen von maximal 50 % der Nennleistung

<sup>9</sup> Ein kalter Druckwasserreaktor muss zunächst durch die Kühlpumpen und die Nachzerfallwärme auf eine Betriebstemperatur von etwa 260 Grad Celsius gebracht werden, um einen Zustand zu erreichen, in er sich nach dem Zünden der Kettreaktion sicher verhält (negativer Kühlmittel-Temperaturkoeffizient). Bei einem Siedewasserreaktor wird dieser Zustand in etwas kürzerer Zeit (ca. 5 Std.) erreicht, da der Druck im Reaktor niedriger ist. Kommen aus besonderen Gründen wiederkehrenden Prüfungen hinzu, kann das Hochfahren eines Reaktor bis zu drei Tagen in Anspruch nehmen.

<sup>10</sup> Vgl. Kapitel 3

<sup>11</sup> Vgl. hierzu und zu den anderen technischen Beschreibungen (GRS, 1990), (GRS, 1990)

- 2 % der Nennleistung pro Minute bei Leistungsänderungen von maximal 80 % der Nennleistung

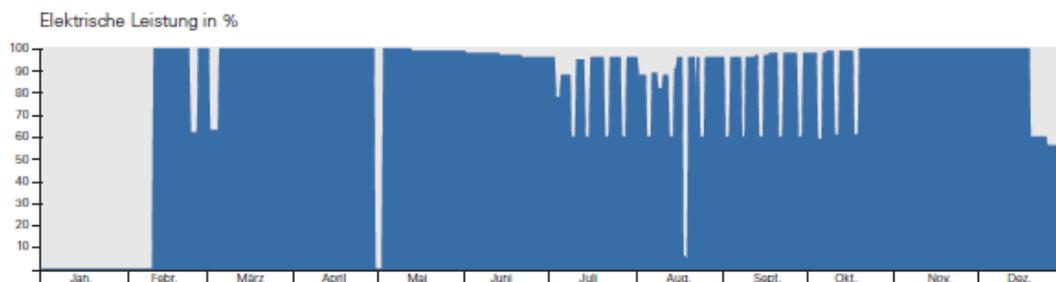
Insgesamt kann nach Regelung der Betriebshandbücher der Konvoi-Anlagen der gesamte Leistungsbereich zwischen 20 % und 100 % der Nennlast im Allgemeinen (ohne Beschränkungen) in 30 bis 60 Minuten durchfahren werden. Die anderen betrachteten DWR weisen teilweise etwas geringere aber durchaus vergleichbare, zulässige Leistungsanpassungsgeschwindigkeiten auf.

Der Lastfolgebetrieb umfasst nach der jeweiligen Anforderung aus dem Verbundnetz drei Bereiche: die Primär-, die Sekundär- und die Tertiärregelung.

Die Primärregelung dient als erste Stufe zum Ausgleich von kleinen Leistungsschwankungen im Netz. Wird das Netz stärker belastet, drehen sich die Generatoren unter der größeren Last langsamer. Da die Drehzahl der Generatoren die Frequenz im Netz bestimmt, äußert sich die höhere Belastung als Verringerung der Netzfrequenz. In einer schmalen Bandbreite von Netzfrequenzänderungen reagieren die Kraftwerke automatisch mit einer Leistungserhöhung um die Netzfrequenz zu stabilisieren.

Die Sekundärregelung setzt ein, wenn die automatische Frequenzstabilisierung nicht mehr ausreicht. Darüber wacht der jeweilige Lastverteiler des Energieversorgungsunternehmens, dem das Netz gehört. Von der Schaltzentrale des Lastverteilers wird die benötigte Reaktorleistung im Rahmen einer Bandbreite von 2,5% der Reaktorleistung unmittelbar erhöht oder vermindert. Wenn die Bandbreite von 2,5 % der Sekundärregelung nicht mehr ausreicht, um die Frequenz im Netz ausreichend zu stabilisieren, greift die Tertiärregelung ein. Die Steuerung der zum Netz gehörenden Kraftwerke wird nicht mehr unmittelbar vom Lastverteiler durchgeführt. Das benötigte Mehr oder Weniger an Leistung wird beim Kraftwerk angefordert und vom Kraftwerk selbst angesteuert. Insbesondere diese Regelung wird für den Ausgleich der schwankenden Einspeisung aus Windkraftwerken zukünftig relevant.

**Abbildung 6: Lastfolgebetrieb von Biblis A im Jahr 2008<sup>12</sup>**

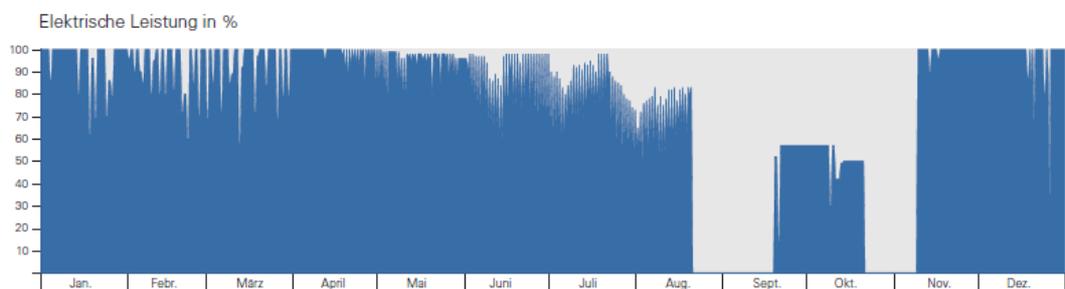


<sup>12</sup> (atw, 2009)

Auszug aus dem Betriebsbericht:

*„Leistungsabsenkungen größer 10 % und länger 24 h Februar – Dezember: Auf Anforderung des Lastverteilers wurde die Leistung mehrfach an den Wochenenden und im Dezember 2008 über die Feiertage und den Jahreswechsel auf ca. 750 MW abgesenkt. (Außeneinfluss)“*

**Abbildung 7: Lastfolgebetrieb von Kernkraftwerk Unterweser im Jahr 2008<sup>13</sup>**



Auszug aus dem Betriebsbericht:

*„Im gesamten Betriebsjahr kam es im Kernkraftwerk Unterweser zu mehr als 500 Leistungsänderungen. Ein großer Teil der Lastfolgeregelungen umfasste einen Leistungsbereich von 50 % der zur Verfügung stehenden Kraftwerksleistung (Tertiärregelungen).“*

#### **4. Sicherheitstechnische Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf die Anlagensicherheit**

Der Lastfolgebetrieb ist sicherheitstechnisch nicht neutral. Bei einem Lastfolgebetrieb verändern sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Leistung die Belastungen. Es ändern sich im Wesentlichen die Temperatur, der Druck und der Massestrom, d.h. die Geschwindigkeit der Strömungen in den Rohrleitungen, in den Armaturen und sonstigen Komponenten. Regelungseinrichtungen werden häufiger beansprucht. Der Neutronenfluss im Reaktor ändert sich. Damit werden die Reaktivität und damit die Steuerung der nuklearen Kettenreaktion beeinflusst. Es ändert sich die Wasserchemie mit Auswirkungen auf die korrosiven Eigenschaften des Kühlmittels. (GRS, 2010)

<sup>13</sup> (atw, 2009)

„Insgesamt gesehen werden beim Lastfolgebetrieb gegenüber dem Konstantlastbetrieb erhöhte Anforderungen an Systeme und deren Komponenten gestellt.“ (GRS, 1990)

## **Ermüdungsrelevante Auswirkungen**

**Beim Druckwasserreaktor wirkt sich ein Lastfolgebetrieb im Einzelnen sicherheitstechnisch insbesondere auf folgende Bereiche des Kernkraftwerks aus:**

- auf die Rohrleitungen und Komponenten des Primärsystems einschließlich des Reaktordruckbehälters, der Dampferzeuger, des Druckhalters und der Hauptkühlmittelpumpen im Hinblick auf die Temperatur
- auf die sekundärseitigen Komponenten im Hinblick auf Druck, Temperatur und Durchströmungsgeschwindigkeit
- auf die Reaktorregelung: Um eine Änderung der Reaktorleistung herbei zu führen müssen entsprechende Regeleinrichtungen tätig werden, wie zum Beispiel die Boriersysteme und die Steuerstäbe, die die Kettenreaktion im Reaktor steuern
- auf den Reaktorkern: Bei schnellen Leistungsänderungen erfahren die Brennelemente Temperaturwechsel, die im Konstantlastbetrieb nicht auftreten. Hierdurch kann es zu Druckkontakten zwischen dem Brennstoff und dem Hüllrohr kommen mit der Folge möglicher Schäden am Brennstabhüllrohr
- auf Anlagenteile, die durch zusätzlich erforderliche Funktionen aktiviert werden und einer gegenüber dem Konstantlastbetrieb erhöhten Inanspruchnahme und damit einem erhöhtem Verschleiß unterliegen können.

**Bei Siedewasserreaktoren wirken sich Laständerungen insbesondere aus:**

- auf das Frischdampfsystem über Änderungen der Durchströmungsgeschwindigkeit und –Menge
- auf das Speisewassersystem, bei dem bei einer Leistungsabsenkung die Temperatur sinkt, insbesondere auf die Zwangsumwälzpumpen, die den Durchsatz von Kühlmittel durch den Reaktorkern erhöhen oder verringern

**Bei beiden Reaktortypen sind betroffen:**

- Die Unterstützungen der Rohrleitungen betroffener Anlagenteile infolge der unterschiedlichen Dehnungen und Verschiebungen bei Leistungsänderungen<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> „Die bei Leistungsänderungen zu erwartenden unterschiedlichen Dehnungen und Verschiebungen von Rohrleitungen bewirken eine verstärkte Inanspruchnahme der Unterstützungen der Komponenten. Daraus ergibt sich, dass z.B. an Federhänger oder Konstanthänger erhöhte Funktionsanforderungen aus dem Lastfolgebetrieb gestellt werden. Zudem werden auch die Befestigungsmittel, z. B. Schrauben, Bolzen, durch die wechselnde Beanspruchung erhöht in Anspruch genommen.“ (GRS, 1990)

- Regelventile, die bei Lastwechseln betätigt werden, Pumpen, deren Fördermengen verändert oder ab- oder zugeschaltet werden<sup>15</sup>
- Die Wasserchemie, die insbesondere Einfluss auf die Korrosion der durchströmten Bauteile hat.

Die beschriebenen Effekte führen im Wesentlichen zu einer erhöhten Ermüdung<sup>16</sup> wesentlicher Teile der Anlage.

*„Schnelle Änderungen der Temperatur führen insbesondere bei dickwandigen Bauteilen zu erhöhten Temperaturspannungen. Wechselnde Belastungen (Druck, Temperatur) und deren Häufigkeit führen zum Lebensdauerverbrauch der Komponenten und Bauteile.“ (GRS, 1990)*

In den Genehmigungsverfahren der Kernkraftwerke sind deshalb für die aus damaliger Sicht wichtigen Bauteile Ermüdungsgrenzwerte festgelegt worden. Die zulässigen Leistungsänderungen wurden bei der Auslegung im Genehmigungsverfahren spezifiziert, d.h. in einer Genehmigungsunterlage festgelegt. Während des langjährigen Betriebs werden die jeweiligen Leistungsänderungen (z.B. 100 % - 80 - 100 %) gezählt und addiert. Im Verlaufe des Betriebs können dann die tatsächlich aufgetretenen Leistungs- und damit verbundenen Laständerungen mit den nach der Genehmigung zulässigen Werten verglichen werden<sup>17</sup>.

Da vom Lastwechsel durch das zusammenhängende Rohrleitungssystem alle sicherheitstechnisch wesentlichen Bereiche der Anlage betroffen sind, die ihrerseits wiederum in vielfacher Wechselwirkung miteinander stehen, ist die Ermüdungsproblematik ein sehr komplexes Problem. Ermüdung kann nicht global nach einem gleichen Muster erfasst werden. Ermüdung kann grundsätzlich in Verbindung und als Mitursache einer erhöhten Korrosion als Folge einer veränderten Wasserchemie an ganz bestimmten Komponenten auftretenden - und an anderen nicht. Die Ausdehnung und Schrumpfung von Rohren, Behältern, Armaturen und anderen Komponenten auf Grund der Temperaturwechsel führt teilweise zu spezifischen Materialspannungen in einzelnen Leitungen oder Behältern. Bei Laständerungen können sich Schwingungen

<sup>15</sup> „Beim Lastfolgebetrieb wird jedoch bei einer Vielzahl von aktiven Komponenten eine vermehrte Funktion verlangt, was sich im Allgemeinen durch eine erhöhte Anzahl von Schaltvorgängen bemerkbar macht. Die aktiven Komponenten müssen dafür sorgen, dass die betroffenen Anlagensysteme anstehende Leistungsänderungen in angemessener Zeit problemlos nachvollziehen. Des Weiteren muss die Anlage so gefahren werden, dass sich bei einer Leistungsänderung stabile Bedingungen in der Anlage einstellen. Hiervon betroffen sind insbesondere die aktiven Komponenten der Reaktorregelung und in Hilfssystem sowie in Kreisläufen. Die beim Lastfolgebetrieb beteiligten Systeme und Komponenten sind im Abschnitt 5 behandelt. Diese vermehrte Inanspruchnahme betrifft sowohl die mechanischen Teile als auch die elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Antriebs- und Steuerelemente.“ (GRS, 1990)

<sup>16</sup> Ein Sonderproblem stellt die Wechselwirkung der Lastwechsel mit der Reaktorsteuerung dar, die verhindern muss, dass der Reaktor in Reaktivitätstransienten fährt, d.h. dass der Reaktor weder lokal noch insgesamt durch eine verstärkte nukleare Kettenreaktion überhitzt oder lokal zu ungleich erhitzt und es dadurch zu starker vorzeitiger Materialermüdung oder sogleich zu Brennelementeschäden kommt.

<sup>17</sup> „Dabei werden die den Lastfällen zugeordneten Lastzyklen in einem Lastkollektiv beschrieben, das neben An- und Abfahrvorgängen auch Lastzyklen des laufenden Betriebs enthält. Darüber hinaus werden auch diejenigen Lastzyklen für Lastfälle erfasst, die vom Normalbetrieb abweichen. Darunter fallen auch postulierte Störfälle. Lastzyklen verursachen in den Komponenten Beanspruchungen infolge der dabei auftretenden Temperatur- und/oder Druckänderungen. Das so festgeschriebene Lastkollektiv ist dann Grundlage für die Lebensdauerbestimmung der Komponenten, die im Rahmen der Analyse des mechanischen Verhaltens ermittelt wird.“(GRS, 1990)

ergeben, die zu zusätzlichen Lasten führen. Solche Materialspannungen und Schwingungsbelastungen können sich mit bereits bestehenden Materialspannungen an ganz verschiedenen Stellen der Anlage summieren. Wenn insbesondere bei alten Reaktoren unentdeckte Vorschädigungen oder unentdeckte vorzeitige Alterungsprozesse zu einer Schwächung der Materialien geführt haben, kann die Überlagerung mit der zusätzlichen Ermüdung durch häufige Lastwechsel zu unvorhergesehenen Schäden führen. Darüber hinaus können unerkannte Mechanismen zu einer schnelleren Ermüdung führen als ursprünglich nach den festgelegten Lastwechselzahlen erwartet. Ein besonderes zusätzliches Risiko besteht dann, wenn aus anderen Gründen ein Störfall eintritt und besondere Störfalllasten auf vorzeitig oder unerkannt ermüdete Bauteile wirken. In einem solchen Fall kann auch die Störfallbeherrschung in Frage gestellt sein.<sup>18</sup>

Im Ergebnis ist zu erwarten, dass durch die ermüdungsrelevanten Rückwirkungen das Risiko des Betriebs weiter erhöht wird, weil es häufiger zu sicherheitsrelevanten Ausfällen und Schäden kommen wird, die sich auch zu gravierenden Störfällen entwickeln können.

## **Xenonvergiftung**

Der Lastfolgebetrieb hat darüber hinaus Auswirkungen auf die Leistungsregelung des Reaktors durch die Xenonvergiftung.<sup>135</sup>Xenon ist ein radioaktives Spaltprodukt, das sich verstärkt bei Leistungsänderungen zeitversetzt bis zu einem bestimmten Maximum im Reaktorkern etwa bis zum Dreifachen der Normalkonzentration aufbaut (Hippler). Es bremst die Kettenreaktion im Reaktor, weil es die Neutronen, die die Kettenreaktion in Gang halten, einfängt. Der Xenonaufbau beeinflusst damit das Regelverhalten des Reaktors. Eine erhöhte Xenonvergiftung der Brennelemente tritt bei schneller Leistungsverminderung insbesondere unter 50% der Nennleistung auf. Wird der Reaktor abgeschaltet, baut sich die Xenonvergiftung nach einigen Stunden zu einem Maximum auf. Aufgrund der verstärkten Neutronenabsorption wird ein Wiederanfahren zu diesem Zeitpunkt erschwert oder sogar unmöglich gemacht. Nach dem Erreichen des Maximums dauert dieser Zustand einige Stunden an, bis das Xenon zu einem genügenden Teil wieder zerfallen ist<sup>19</sup>.

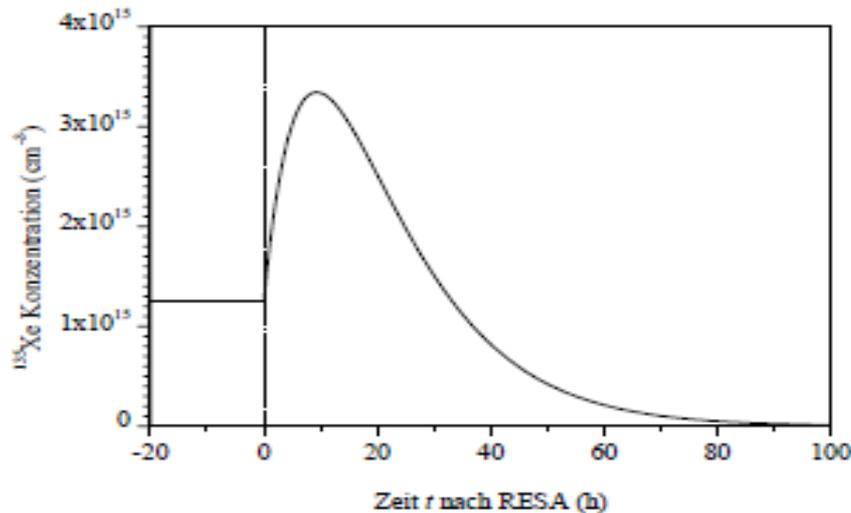
Die Xenonvergiftung wirkt sich jedoch nicht nur beim vollständigen Abfahren der Anlage auf 0% Leistung aus, sondern auch dann, wenn der Reaktor nach schnellem Herunterfahren um 50% der Leistung oder mehr einige Stunden im niedrigen Teillastzustand verbleibt. Auch in diesem Fall steigt die Xenonvergiftung des Spaltmaterials an und kann das schnelle Wiederhochfahren des Reaktors für einige Stunden verhindern.

---

<sup>18</sup> Vgl. zu Fällen aus der Betriebserfahrung (GRS, 1990) sowie zur Alterungs- und Ermüdungsproblematik insgesamt (Renneberg, 2010)

<sup>19</sup> Halbwertszeit: 9,09 Stunden

**Abbildung 8: Typischer Verlauf der Xenonanreicherung nach einer Reaktorschnellabschaltung<sup>20</sup>**



Insbesondere nach schnellen und großen Leistungsschritten muss die Änderung der Xenonvergiftung mit Steuerstabbewegungen ausgeglichen werden bis sich eine neue Gleichgewichtsverteilung (stabiler Zustand) eingestellt hat (Hippler). Große Reaktorkerne sind zudem empfindlich für räumliche Xenonoscillationen. Dabei werden kleine Unregelmäßigkeiten in der Leistungsverteilung innerhalb des Kerns durch die Kinetik der Xenonvergiftung intensiviert. In Bereichen mit geringfügig erhöhtem Neutronenfluss wird durch den verstärkten Abbrand von <sup>135</sup>Xenon die Reaktivität weiter vergrößert. Umgekehrt sinkt in Gebieten mit vermindertem Neutronenfluss die Reaktivität durch den verminderten Abbrand (ebenda). Insgesamt steigen die Anforderungen an die Reaktorsteuerung und seine Regeleinrichtungen.

### **Zur Aussagekraft von Ermüdungsanalysen aus zurückliegenden Genehmigungsverfahren**

Die den Spannungs- und Ermüdungsanalysen zum Zeitpunkt des Genehmigungsverfahrens zugrunde gelegte Lebensdauer orientierte sich an einer Betriebszeit von 40 Jahren.<sup>21</sup> Die Spezifikationen<sup>22</sup> der Hersteller (vgl. Abb. unten) enthalten die maximale Anzahl der zulässigen Lastzyklen<sup>23</sup> für die Lebensdauer der Anlage. Nach den

<sup>20</sup> Nach (Hippler)

<sup>21</sup> (GRS, 1990) unter Bezug auf (Grün, 1985) und (KWU 1981).

<sup>22</sup> Spezifikationen sind Dokumente, in den die Anforderungen, die die Anlage oder Anlagenteile erfüllt festgelegt sind. Sie sind in der Regel in den Genehmigungen als Bezugsunterlagen enthalten.

<sup>23</sup> Ein Lastzyklus ergibt sich aus der Anforderung des Netzes (s.o) und beschreibt die Änderung der Reaktorfahrweise vom Grundzustand (in der Regel der Vollast) zum Minimum der Leistung bis zum Wiedererreichen der Vollast. Zahl und Intensität der Lastzyklen, die aus dem Lastfolgebetrieb resultieren, bestimmen die Anforderungen an das jeweilige Kernkraftwerk.

Angaben der KWU<sup>24</sup> (Tabelle) aus dem Jahre 1985 kann ein KWU-Druckwasserreaktor des Typs „Konvoi“ während seiner Betriebszeit beispielsweise 1000 Mal, d.h. 2 Mal pro Monat von 100% auf 20% herunter- und anschließend wieder auf 100% hochgefahren werden.<sup>25</sup>

**Abbildung 9: Zulässige Häufigkeit von Lastwechseln für KWU Druckwasserreaktoren**

Art der Lastzyklen		Häufigkeit der Lastzyklen <sup>1)</sup>
Sprungförmig: um 10 %		100 000
Rampen- förmig:	100-80-100 %	100 000 <sup>2)</sup>
	100-60-100 %	15 000
	100-40-100 %	12 000
	100-20-100 %	1 000 <sup>3)</sup>
	100- 0-100 %	400
Summe:		128 400
<p><sup>1)</sup> Die Lastzyklen des anomalen Betriebs und der Störfälle sind hierin nicht enthalten.</p> <p><sup>2)</sup> <math>\hat{=}</math> 7 Zyklen pro Tag</p> <p><sup>3)</sup> <math>\hat{=}</math> 2 Zyklen pro Monat</p>		

<sup>24</sup> Zitiert nach GRS, 1990; Die Lastwechsellzahlen der Abb. 9 beruhen allein auf dieser Veröffentlichung der KWU für aus dem Jahr 1985 für die neuesten deutsche Reaktoren. Welche ursprünglichen Lastwechsellzahlen den Genehmigungen der großen Mehrheit der älteren Anlagen zu Grunde gelegt sind, ist nicht öffentlich dokumentiert.

<sup>25</sup> Diese Lastwechsellzahlen entsprechen den Anforderungen des Verbundnetzes zum Zeitpunkt der Genehmigungserteilung (GRS, 2010) /GRÜ/. /GRÜ 85/, /KWU 81/. Ein Lastfolgebetrieb zum Ausgleich von Netzschwankungen durch Windstromspeisung war seinerzeit nicht vorgesehen.

Diese Analysen aus der Zeit der Erteilung der Genehmigungen liegen selbst bei den jüngsten Anlagen deutlich mehr als 20, bei den ältesten Anlagen mehr als 35 Jahre zurück. Der Stand von Wissenschaft und Technik hat sich seit dieser Zeit wesentlich weiter entwickelt. Diese Lastwechselzahlen sind nach heutiger Kenntnis für viele sicherheitstechnisch wichtige Bauteile nicht mehr gültig. Vorzeitige Ermüdung vieler Bauteile (GRS, 2010) hat gezeigt, dass die Angaben der KWU und ihre Festlegung in den Auslegungsspezifikationen der Kernkraftwerke nach heutiger Kenntnis oft nur noch historischen Wert haben. (GRS, 1990), (Renneberg, 2010). Der Grad der Ermüdung kann nicht aktuell durch die praktizierten, stichprobenartigen zerstörungsfreien Prüfungen festgestellt werden. Die regelmäßigen zerstörungsfreien Prüfungen an derartigen Komponenten dienen der Erkennung von Schäden und sind nicht für eine voreilende Erkennung der Ermüdungsausnutzung der Werkstoffe geeignet (GRS, 1990). Eine Hilfe zur Überwachung der Ermüdung stellt die im Nachhinein in den Anlagen teilweise installierte betriebsbegleitende Messung von Temperaturschwankungen und Schwingungen an einzelnen Bauteilen dar. Ein generelles quasi automatisches arbeitendes Ermüdungsüberwachungssystem gibt es jedoch nicht. Die ermüdungsrelevanten Stellen müssen ermittelt werden, so bereits der Gutachter des Bundesumweltministeriums im Jahre 1990 (GRS, 1990).

**Ganz entscheidend für den sicheren Betrieb der Anlagen sind deshalb die Auswertung der Betriebserfahrungen und die darauf basierende Prüfung,**

- **ob die ursprünglichen Spannungs- und Ermüdungsanalysen vollständig sind und ob die hoch beanspruchten Stellen identifiziert sind**
- **ob insbesondere die tatsächlich auftretenden mechanischen Lasten auch unter Berücksichtigung potentieller Schwingungen korrekt zugrunde gelegt sind**
- **ob alle Lastwechselbeanspruchungen korrekt ermittelt und dokumentiert sind und den gemachten Annahmen entsprechen**
- **ob Vorschädigungen im Umfeld in die Analyse zum Beispiel durch Korrosion mit einzubeziehen sind**
- **ob die ursprünglich angewandten Rechenmethoden aus heutiger Sicht noch ausreichend sind.**

Diese Auswertung der Betriebserfahrung für jede einzelne Anlage nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ist - unabhängig von der Frage des in Zukunft erforderlichen Lastfolgebetriebs – aktuelle und kontinuierliche Prüfungsaufgabe für jedes weiter betriebene Kernkraftwerk und gehört zum selbstverständlichen Teil eines Alterungsmanagements (RSK, 2004).

Der zukünftige Lastfolgebetrieb gibt der Ermüdungsproblematik jedoch eine ganz neue Bedeutung und ein qualitativ weit höheres Gewicht. Denn wie auch eine aktuelle Studie der Gesellschaft für Reaktorsicherheit feststellt, wurden zwar die Arten und Häufigkeiten von angenommenen Lastzyklen für den Lastfolgebetrieb in den ursprünglichen Genehmigungen, bezogen auf eine Gesamtle-

bensdauer der Anlagen von ca. 40 Jahren spezifiziert. Die Häufigkeit der Lastzyklen wurde dabei jedoch nur

*„so groß angesetzt, dass sie einen regelmäßigen Lastfolgebetrieb – gemäß den Forderungen, die das Verbundnetz **zum Zeitpunkt der Auslegung** an die Lastwechselfähigkeit von Kraftwerksblöcken stellte – während der vorgesehenen Lebensdauer des Kraftwerks mit abdecken.“ (GRS, 2010).*

Die hohen Anforderungen an die Frequenz und die Intensität der Lastwechsel, die sich aus dem Lastfolgebetrieb zum Ausgleich des schwankenden Angebots aus erneuerbaren Energien ergeben, stellte das Verbundnetz zum Genehmigungszeitpunkt noch nicht.<sup>26</sup>

In den Genehmigungen der Anlagen sind die Ermüdung und damit die Alterung der Anlagen unter den Bedingungen des geplanten Lastfolgebetriebs nicht zu Grunde gelegt und nicht geprüft.<sup>27</sup>

## **5. Anforderungen an die Prüfung der Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf die Sicherheit**

Die durchzuführenden Prüfungen müssten die Frage beantworten, welche zusätzlichen Risiken aus dem erwarteten Lastfolgebetrieb entstehen und wie sie gegebenenfalls vermieden oder begrenzt werden können. Aus den technisch vorgegebenen Abhängigkeiten leiten sich folgende notwendige Prüfschritte ab:

### **5.1 Auswertung der Betriebserfahrungen zur Ermittlung des Lebensdauer- verbrauchs**

Die *bisherigen* Betriebserfahrungen müssen präzise für jede Anlage im Hinblick auf Laständerungen ausgewertet und der bisherige Lebensdauerverbrauch der Anlagenteile nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik für jede Anlage festgestellt werden (s.o). Dazu gehört u.a. die anlagenspezifische Auswertung aller bisherigen Ereignisse, die im Zusammenhang mit dem bereits erfolgten Lastfolgebetrieb stehen können. Hierzu gehören auch Ereignisse, die nicht meldepflichtig sind, wie beispielsweise betriebsbedingte Schäden an Brennstäben.

### **5.2 Ermittlung der künftig zu erwartenden Ermüdungsbeanspruchungen**

In einem zweiten Schritt sind die durch den Lastfolgebetrieb *zukünftig* zu erwartenden Ermüdungsbeanspruchungen zu ermitteln.

Diese zukünftigen Ermüdungsbeanspruchungen können nur dann festgestellt werden, wenn

---

<sup>26</sup> Andere Auffassung (AREVA 2010 )

<sup>27</sup> Die Kernkraftwerke haben somit mit der Genehmigung der Anlagen auf der Basis des Stempel des Technischen Überwachungsvereins auf den Prüfungsunterlagen kein Zertifikat für einen insoweit über 40 Jahre sicheren Betrieb erhalten.

- die zukünftigen Leistungsbandbreiten der Lastwechsel (z.B. 100% – 90% – 100% oder 100% – 20% – 100%) und deren Geschwindigkeiten sowie
- die zugehörigen Häufigkeiten dieser Lastwechsel

für die einzelnen Anlagen ausreichend genau bekannt sind. Eine Analyse aufgrund von Simulationen der zukünftigen Lastregelungen ist von den Betreibern der Kernkraftwerke und den Atomgenehmigungs- und Aufsichtsbehörden bislang nicht durchgeführt worden.

### **5.3 Spannungs- und Ermüdungsanalysen zur Ermittlung von Ermüdungsfolgen**

In einem dritten Schritt ist die zu erwartende Ermüdung durch den Lastwechselbetrieb auf der Basis aller bekannten chemischen und mechanischen vergangenen und zukünftigen Beanspruchungen der Anlagenteile (auf Grundlage von 2.1 und 2.2) mithilfe aktueller Spannungs- und Ermüdungsanalysen zu ermitteln. Damit ist nachzuweisen, dass die Auslegungsgrenzen der jeweiligen Komponenten durch die gefahrenen sowie zukünftig zu erwartenden Lastwechsel eingehalten werden.

### **5.4 Prüfung der Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf Regelsysteme**

Die Auswirkung des Lastfolgebetriebs auf die Häufigkeit von Transienten<sup>28</sup> oder Störfällen ist zu untersuchen. Dabei muss dargestellt werden, inwieweit bei einem LFB im Vergleich zur Konstantlast vermehrt Schalthandlungen, Parametereinstellungen, Prüfungen etc. anfallen oder auch vermehrte automatische Regelaktionen vorgenommen werden. Sodann wäre zu prüfen und bewerten, inwieweit dadurch erhöhte Potentiale für Fehlhandlungen oder technische Fehler und damit für eintretende Störungen gegeben sind und welche Vorsorgemaßnahmen getroffen werden müssten. In diese Untersuchungen wären die Auswirkungen der Xenonvergiftung auf das Regelverhalten des Reaktors mit einzubeziehen. Die Untersuchungen müssten anlagenspezifisch durchgeführt werden.

### **5.5 Nachweis der Störfallsicherheit bei Teillastzuständen**

Für eine Prüfung und Bewertung potentieller Auswirkungen auf die zu beherrschenden Störfälle ergeben sich neue Anforderungen. Bisher wurde in der Regel unterstellt, dass Störfälle bei Vollast eintreten. Wenn jedoch, wie für den Lastfolgebetrieb typisch, häufig auch Teillastzustände vorliegen, müssen alle nach Stand von Wissenschaft und Technik zu betrachtenden Ereignisse<sup>29</sup> auch im Teillastbetrieb beherrscht werden. Dabei wären auch transiente Teillastzustände zu unterstellen, also solche, bei denen betriebliche Grenzwerte bereits nicht mehr eingehalten sind.

<sup>28</sup> Transienten sind Überschreitungen der für den Normalbetrieb zulässigen Auslegungsgrenzwerte für die Betriebsfahrweise ( z. B. Druck, Temperatur, Reaktivität)

<sup>29</sup> (BMU 2009) Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Kapitel 3

Die Störfallbeherrschung muss also auch unter den durch den Lastfolgebetrieb geänderten Randbedingungen nachgewiesen sein.<sup>30</sup>

## 6. Stand der aktuellen Prüfungen des Lastfolgebetriebs und seiner Auswirkungen auf die Sicherheit

### 6.1 Gutachten des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart

Das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart hat Ende 2009 im Auftrag von E.ON die hier bereits zitierte Studie erstellt, die sich mit technischen und ökonomischen Aspekten der „*Verträglichkeit von erneuerbaren Energien und Kernenergie im Erzeugungsportfolio*“ befasst (Hundt, 2009). Die Studie kommt zusammenfassend zu der folgenden Aussage:

*„Die in Deutschland in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke können aufgrund ihrer technischen Auslegung durchaus für den Lastfolgebetrieb genutzt werden. Für alle Kernkraftwerke ergibt sich bei konservativer Abschätzung ein Leistungsbereich von bis zu 9,6 GW mit Leistungsänderungsgeschwindigkeiten von 3,8 bis 5,2 %/min, mit denen sie ohne Einschränkungen zum Lastfolgebetrieb genutzt werden können. Kernkraftwerke erlauben somit ähnliche Leistungsänderungsgeschwindigkeiten wie kohlenbefeuerte Kondensationskraftwerke.“ (Hundt, 2009, S. 45)*

Die Studie geht zur Begründung dieser Aussage davon aus, dass der gesamte Kraftwerkspark zu 90 Prozent verfügbar ist. Diese Annahme ist falsch. Die zeitliche Verfügbarkeit im Jahr 2008 lag bei 79,99 % im Jahr 2009 bei 73,20 %. Dies sind darüber hinaus auch nur Mittelwerte. Die gesicherte Verfügbarkeit der Kernkraftwerke beträgt unter Berücksichtigung möglicher gleichzeitiger Stillstände, wie sie auch in der Vergangenheit aufgetreten sind und wegen häufiger anlagenspezifischer Beschränkungen der Fahrweise maximal die Hälfte bis zu zwei Drittel der gesamten installierten Leistung. Das angenommene Regelvolumen von 9,6 MW ist bereits deshalb deutlich überhöht. Hinzu kommen die Einschränkungen von schnellen umfangreichen Lastwechseln durch die Xenonvergiftung. Darüber hinaus ist ein Abfahren der Kernkraftwerke unter 30 % Leistung nach den geltenden BHB nur noch manuell möglich<sup>31</sup> und wird deshalb weitgehend vermieden.

Die Studie enthält keine Untersuchung und keinen Bezug zu einem Dokument, aus dem Anzahl und Intensität der praktisch im zukünftigen Lastfolgebetrieb auftretenden Laständerungen hervorgehen. Es ist den Autoren damit nicht bekannt, welcher Anzahl von Lastwechseln die Kernkraftwerke mit welcher Laständerungsgeschwindigkeit und welchem Lastwechselvolumen zukünftig ausgesetzt sind. Inwieweit die Lastfolgebeanspruchungen zu Sicherheitsfragen bei den Kernkraftwerken führen und welche Beschränkungen sich daraus für den Lastfolgebetrieb ergeben, ist in der Studie nicht untersucht worden. Sie bezieht sich allein auf die Daten aus alten Herstel-

<sup>30</sup> Dies gilt im Hinblick auf Ereignisse mit Anforderung des Reaktorschutzes auch unter der gemäß dem kerntechnischen Regelwerk verschärfend anzunehmenden Bedingung, dass das zuerst anstehende Messsignal zur Aktivierung der Sicherheitseinrichtungen ausgefallen ist.

<sup>31</sup> Nach telefonischer Betreiberauskunft

lerspezifikationen, die den ursprünglichen Betriebsgenehmigungen zugrundeliegen. Diese gelten Daten gelten jedoch nur für beschränkte Lastwechsel im Rahmen früher normaler Lastfluktuationen, nicht jedoch ohne weitere Prüfung für die Anforderungen eines Lastfolgebetriebs zum Ausgleich der Wind- und Solarstromschwankungen. Bereits aus diesem Grund ist die Aussage der Studie, zukünftig stände ein schnelles Regelvolumen der Kernkraftwerke in Höhe von 9,6 MW zur Verfügung, nicht haltbar. Nach realistischer Abschätzung steht bei dem jetzigen Kernkraftwerkspark ein gesichertes verfügbares Regelvolumen von etwa 5 bis maximal 6 GW zur Verfügung<sup>32</sup>. Dies entspricht einem Anteil von etwa 25% bis maximal 30% der installierten Kernkraftwerksleistung. Inwieweit diese Regelleistung auf Dauer zur Verfügung steht ist wegen der ungeprüften Sicherheitsfragen ungeklärt.

## 6.2 Gutachten der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit 2010

Vor dem Hintergrund der Frage, inwieweit die deutschen Kernkraftwerke bei den zukünftigen Laständerungen im Stromnetz im Lastfolgebetrieb sicher betrieben werden können, hat das Bundesumweltministerium die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit am 1.12.2009 beauftragt, ein Gutachten zu erstellen.<sup>33</sup> Das Gutachten mit dem Titel

*„Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf technische Einrichtungen und den Ablauf von Ereignissen in deutschen Kernkraftwerken“*

liegt seit Juli 2010 vor (GRS, 2010) und kommt im Wesentlichen zu folgenden Ergebnissen:

### GRS - Prüfungsergebnis

Das Gutachten bestätigt zunächst, dass sich aus dem Lastfolgebetrieb

*„gegenüber dem Konstantlastbetrieb zusätzliche bzw. veränderte Beanspruchungen“* ergeben, *„die im Hinblick auf ihre möglichen Auswirkungen auf verschiedene Schädigungsmechanismen und –Phänomene“* zu betrachten seien. *„Betrachtet wurden insbesondere denkbare Auswirkungen auf Hüllrohrschäden an Brennelementen infolge zusätzlicher thermomechanischer und korrosiver Beanspruchungen, Rissbildungen an Steuerelementen infolge Schwellen des Absorbermaterials durch erhöhte Neutronenfluenzen, Rissbildungen bzw. lokale Schädigungen an druckführenden Komponenten infolge zusätzlicher thermischer Lastwechsel und korrosiver Beanspruchungen sowie verstärkten Verschleiß an aktiven mechanischen Komponenten infolge einer erhöhten Anzahl von Regelvorgängen. Dabei sind die Auslegung und konstruktive Ausführung der betroffenen Einrichtungen, die Art und Höhe der tatsächlichen Beanspruchungen, sowie die vorgesehenen betrieblichen Maßnahmen zur Ver-*

<sup>32</sup> Eine quantitativ genauere Abschätzung setzt eine Analyse von Häufigkeit, Intensität und Schnelligkeit der erforderlichen Lastwechsel auf Grund einer Prognose der Netzanforderungen und Netzregelung voraus. Eine solche Analyse liegt zur Zeit der Erstellung dieser Studie nicht vor.

<sup>33</sup> (GRS, 2010); AREVA hat als Hersteller von Kernkraftwerken im Auftrag der Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber (VGB) eine Kurzbewertung zu den Fragen des Lastfolgebetriebs vorgelegt (AREVA 2010). Diese Kurzbewertung berücksichtigt nicht die vorliegenden Studien der GRS (GRS, 1990; GRS 2010) und geht auf die dort dargelegten offenen Sicherheitsfragen nicht ein.

*folgung und Beherrschung dieser Beanspruchungen bzw. ihrer Auswirkungen zu betrachten. Die Betriebserfahrung kann darüber hinaus Hinweise auf gegebenenfalls vorhandene Schwachstellen geben.“ (GRS, 2010, S. 52)<sup>34</sup>*

Zusammenfassend kommt das Gutachten zu folgender Bewertung:

*„Die von uns durchgeführte anlagenübergreifende Betrachtung führt zu dem Schluss, dass die Auslegung und konstruktive Ausführung der technischen Einrichtungen sowie die implementierten betrieblichen Maßnahmen einschließlich Nachweisführung und grundsätzlich geeignet sind, sicherheitstechnisch bedeutsame Auswirkungen des Lastfolgebetriebs zu vermeiden bzw. rechtzeitig zu erkennen.“ (GRS, 2010, S.52)*

*Diese Bewertung ist auf den ersten Blick irreführend, weil sie den Anschein erweckt, der Lastfolgebetrieb bereite den deutschen Kernkraftwerken keine Probleme. Das Gutachten trifft gerade keine Aussage dazu, ob die deutschen Kernkraftwerke für den Lastfolgebetrieb, insbesondere über die Dauer der geplanten Laufzeitverlängerungen, geeignet sind. Es erfüllt auch nach eigenem Anspruch nicht die Anforderungen an eine Überprüfung der Sicherheit der Kernkraftwerke vor dem Hintergrund der Risiken des Lastfolgebetriebs (zu den Anforderungen vgl. Kap. 5) Hierzu im Einzelnen:*

- Betriebserfahrungen mit bisherigem Lastfolgebetrieb werden nicht ausgewertet. Der GRS ist nicht bekannt, inwieweit die einzelnen Anlagen am Lastfolgebetrieb teilgenommen haben (GRS, 2010, S.5f.). Soweit meldepflichtige Ereignisse ausgewertet werden, erfolgt keine Prüfung anhand von hierzu erforderlichen Prüfmerkmalen/Prüfungskriterien<sup>35</sup>. (Prüfungsschritt 5.1)
- Der aktuelle technische Lebensdauerverbrauch - insbesondere der praktisch nicht austauschbaren Kernbestandteile der Kraftwerke - wird nicht bestimmt. (Prüfungsschritt 5.1)
- Es erfolgt keine Analyse der aus dem Lastfolgebetrieb zu erwartenden Anforderungen (Prüfungsschritt 5.2)
- Spannungs- und Ermüdungsanalysen wurden nicht durchgeführt, Betreiberdokumente nicht ausgewertet. Die verbleibende Restlebensdauer der sicherheitstechnisch bedeutsamen Komponenten wird nicht bestimmt. (Prüfungsschritt 5.3)
- Störfallnachweise bei Teillastzuständen sind nicht überprüft. Die vier nur exemplarisch betrachteten Störfallscenarien betrachten den 60% Lastfall, nicht jedoch den im zukünftigen Lastfolgebetrieb relevanten 20% Lastfall (Prüfungsschritt 5.4).

---

<sup>34</sup> Vgl. Kap. 5 dieser Studie

<sup>35</sup> GRS: „Dabei ist zu berücksichtigen, dass mögliche Auswirkungen des Lastfolgebetriebs `unterhalb der Meldeschwelle` hierdurch nicht erfasst werden und dass in der AtSMV kein gesondertes Meldekriterium mit Bezug zum Lastfolgebetrieb vorhanden ist.“

Das zitierte Ergebnis der GRS formuliert im Wesentlichen nur die methodische Aussage, das Instrumentarium zur Ermittlung der sicherheitstechnisch relevanten Folgen des Lastfolgebetriebs sei vorhanden. Das Resultat des Gutachtens ist deshalb im Wesentlichen ein Arbeitsprogramm, welches den Stand der Erkenntnisse über die unbeantworteten Fragestellungen der sicherheitstechnischen Auswirkungen des Lastfolgebetriebs wiedergibt.

## Offene Nachweise

### Genehmigungsnachweise berücksichtigen Medieneinfluss<sup>36</sup> nicht

- Im Rahmen der Ermüdungsanalysen ist über die zum Zeitpunkt der Auslegung geführten Nachweise hinaus auch der Medieneinfluss mit zu berücksichtigen (s.o.). Detaillierte Anforderungen werden seit längerem diskutiert, nach Angabe der GRS z. B. in der Reaktorsicherheitskommission, gegenwärtig insbesondere im Zusammenhang mit der Überarbeitung der KTA-Regeln der Serien 3201 und KTA 3211. Entsprechend dem aktuellen Stand sollen danach Unsicherheiten hinsichtlich der Wirkung des Mediums auf die Bauteilintegrität durch eine Beschränkung des zulässigen Erschöpfungsgrades D, durch betriebsnahe Experimente oder durch geeignete Maßnahmen im Rahmen der Betriebsüberwachung und wiederkehrenden Prüfungen berücksichtigt werden (GRS, 2010, S. 14). Inwieweit dies geschehen ist, welche Ergebnisse dieses Vorgehen erbracht hat, ist nach allem weiterhin offen.
- Im Druckwasserreaktor sind länger andauernde Leistungsänderungen mit einem Wasseraustausch zur Veränderung der Borkonzentration verbunden. Es sind daher im Hinblick auf korrosive Beanspruchungen insbesondere auch Änderungen der Lithiumkonzentration im Primärkühlmittel zu berücksichtigen. Zu geringe Lithiumkonzentrationen könnten verstärkte Korrosionsproduktablagerungen auf den Brennelementen zur Folge haben. Bei höheren Lithium-Konzentrationen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Brennelement-Hüllrohrkorrosion, weil durch Siedevorgänge an den Hüllrohroberflächen der Brennelemente eine örtliche Anreicherung des Alkalisierungsmittels stattfinden kann. Daher sind in den wasserchemischen Richtlinien der Betreiber entsprechende Normalbetriebswerte und so genannte Action Levels festgelegt, deren Einhaltung dazu dienen soll, Schäden zu vermeiden (VGB, 2006)<sup>37</sup>. Je stärker der obere Normalbetriebswert überschritten wird, desto größer ist jedoch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hüllrohrkorrosion. Die entsprechenden Action Level sind nach Angabe der GRS mit den Brennelement-Herstellern abzustimmen und in den Betriebshandbüchern fixiert. Inwieweit jedoch

*„der Lastfolgebetrieb zu einem häufigeren Erreichen / Überschreiten von Action Levels der Lithiumkonzentration führt, ist uns nicht bekannt und wäre gegebenenfalls auf der Grundlage entsprechender Betreiberunterlagen gesondert auszuwerten und zu bewerten.“ (GRS, 2010, S.6f.)*

<sup>36</sup> Kühlmittel, Schmiermittel und andere chemische Stoffe, mit denen die Materialien in Berührung kommen

<sup>37</sup> Zitiert nach (GRS, 2010)

## **Genehmigungsnachweise berücksichtigen thermische Schichtungen nicht**

In Bereichen, in denen Medien mit unterschiedlichen Temperaturen zusammengeführt werden, können transiente thermische Schichtungen oder Schleichströmungen auftreten, die thermische Wechselbeanspruchungen zur Folge haben. Diese Beanspruchungen sind in der ursprünglichen Auslegung nicht bekannt gewesen. Die erkannten Bereiche zur Erfassung der transienten Wandtemperaturen sind weitgehend instrumentiert worden. Die entsprechenden Messwerte werden in Ermüdungsüberwachungssystemen erfasst und ausgewertet. Zielsetzung ist es dabei, die während des Betriebs tatsächlich auftretenden transienten Belastungen zu erfassen und den aktuellen Erschöpfungsgrad für diese Bereiche zu bestimmen. (ebenda, S. 13) Eine Auswertung des Erschöpfungsgrades der wichtigen Komponenten in deutschen Kernkraftwerken liegt nicht vor.

## **Erhöhter Verschleiß mechanischen Komponenten**

Jede Änderung der Generatorleistung bedingt sowohl im Reaktor als auch im Wasser-Dampf-Kreislauf Regelvorgänge. In der Praxis heißt dies, dass Regelventile (Speisewasser, Turbine, Haupt- und Nebenkondensat) betätigt werden, die Fördermenge von Pumpen (Zwangsumwälzpumpen) verändert wird oder bei größeren Leistungsänderungen einzelne Pumpen ab- oder zugeschaltet werden (Speisewasser). Ebenso werden andere Systemfunktionen benötigt, so zum Beispiel die Boreinspeisung zur Xenonkompensation oder bei Ansprechen der Steuerstabsausfahrbegrenzung. Eine verstärkte Anzahl von Regelvorgängen erhöht grundsätzlich den Verschleiß von aktiven mechanischen Komponenten (ebenda, S. 18). Die GRS kommt hierbei zu dem Schluss, dass dem erhöhten Verschleiß dieser Komponenten durch eine den Betriebsbedingungen angepasste vorbeugende Instandhaltung begegnet werden könne. Eine Aussage, ob dies in den Kernkraftwerken in ausreichendem Maße der Fall ist oder welche Betriebserfahrungen hierzu vorliegen, enthält das Gutachten nicht.

## **Auswirkungen des Lastfolgebetriebes auf die Häufigkeit von Ereignissen**

Die GRS und damit auch die Bundesaufsicht können keine Aussagen machen, inwieweit es durch den Lastfolgebetriebes zu einem häufigeren Versagens von Sicherheitseinrichtungen kommt (Ereignissen, Störfällen):

*„Die Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf die Häufigkeit von Ereignissen sowie auf die Zuverlässigkeit von Systemkomponenten können nur auf Basis probabilistischer Analysen bestimmt werden. Die hierfür erforderliche, spezifische Datenbasis ist nicht vorhanden. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte daher keine probabilistische Bewertung der Häufigkeit der nachfolgend untersuchten auslösenden Ereignisse aufgrund von Lastfolgebetrieb durchgeführt werden. Die Untersuchungen beschränken sich auf den möglichen Einfluss des Lastfolgebetriebs auf den Ablauf von Ereignissen“ (ebenda, S. 20).*

## Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf den Ablauf von Störfällen

Von der GRS wurden exemplarische Analysen zum Einfluss des Lastfolgebetriebs auf den Ablauf von Störfallereignissen für *eine Referenzanlage* mit Druckwasserreaktor durchgeführt. Es handelte sich um die Ereignisse Ausfall der Hauptwärmesenke, ATWS<sup>38</sup> mit Notstromfall, Leck in der Frischdampfleitung und Dampferzeuger-Heizrohrleck. Die Störfallereignisse wurden jeweils ausgehend von einer Reaktorleistung von 100% sowie dazu im Vergleich von 60 % durchgeführt.

Dabei ergaben sich Fälle, in denen bei Teillast die Abschaltreaktivität näher an die Auslegungsgrenzwerte heranreichte.<sup>39</sup> (ebenda, S. 54) Im Ergebnis dieser Betrachtung gibt es Störfallabläufe, in denen bei Teillastzuständen die Sicherheitsreserven geringer ausfallen als bei Vollastbetrieb. Ob sich dieser Effekt bei verringerter Teillast auf 20% verstärkt und ob sich in den anderen zu betrachtenden Störfallszenarien gleiche Effekte zeigen oder möglicherweise sogar Auslegungsgrenzwerte überschritten werden können, ist nicht untersucht worden. Die GRS empfiehlt deshalb eine umfassende Analyse, die sowohl alle zu unterstellenden Störfallabläufe umfasst wie auch eine Untersuchung für jedes Kernkraftwerk:

*„Die vier untersuchten Ereignisabläufe stellen angesichts einer Anzahl von etwa 20 bis 25 Ereignisabläufen, die für deutsche Kernkraftwerke bei deren sicherheitstechnischer Bewertung zu untersuchen sind, kein abdeckendes Spektrum zur Bewertung des Einflusses des Lastfolgebetriebs dar. Dies insbesondere dann, wenn die Analysen kein einheitliches Bild zur Bewertung der Prozessgrößen ergeben. So zeigen die durchgeführten Analysen, dass sich ausgehend von Anlagenzuständen aus Teillast durchaus unterschiedliche Verhältnisse in Bezug auf die Abstände zu den Nachweiskriterien zur Einhaltung der Schutzziele ergeben können.“*  
(ebenda)

## Untersuchungsprogramm

Zur Bewertung des Einflusses des Lastfolgebetriebs auf die Anlage wären nach den Schlussfolgerungen der GRS folgende Untersuchungen erforderlich (ebenda, S. 54 ff.):

- Ermittlung der tatsächlichen Lastzyklen und Laständerungsgeschwindigkeiten
- Analysen mit einem abdeckenden Spektrum möglicher Lastanforderungen als auch einer ausreichenden Anzahl von Ereignisabläufen (anlagenspezifisch)
- Anpassung der Analyserandbedingungen an die spezifischen Gegebenheiten des Lastfolgebetriebs

<sup>38</sup> „Anticipated transient without scram“; Ereignis, bei dem das vorgesehene Einfahren der Steuerstäbe zur Schnellabschaltung versagt

<sup>39</sup> Die Abschaltreaktivität ist die ein Maß dafür ist, wie weit der Reaktor von der Schwelle entfernt ist, eine neue nukleare Kettenreaktion zu starten.

- Quantitative Ermittlung der vorhandenen Sicherheitsreserven für jedes Kernkraftwerk

Zur Bewertung der Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf die Steuerung und die Lebensdauer insbesondere der wesentlichen Komponenten hält die GRS folgende Untersuchungen für erforderlich:

- detaillierte anlagenspezifische Untersuchungen auf Komponenten- und Bauteilebene unter Berücksichtigung der konkreten Fahrweise
- Berücksichtigung der Vorschädigungen der technischen Einrichtungen aus dem vorangegangenen Betrieb
- Ermittlung der tatsächlichen Lastzyklen und Laständerungsgeschwindigkeiten im Vergleich mit den spezifizierten Werten
- Ermittlung und Bewertung der im Rahmen der betrieblichen Überwachung erfassten mechanischen, thermischen und korrosiven Belastungen
- Auswertung der relevanten Betriebserfahrung unterhalb der Meldeschwelle auf der Basis aussagefähiger Betreiberunterlagen
- Auswertung der internationalen Erfahrung.

## 7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Insbesondere durch die Einspeisung von Wind- und Solarstrom kommt es bereits jetzt und in weit erhöhtem Maße in der Zukunft immer öfter zu einem kurz- bis mittelfristigem zeitlich sehr schwankenden Überangebot von elektrischer Energie im Stromnetz. Dies zwingt die Energieversorgungsunternehmen dazu, auch die Leistung von Kernkraftwerken immer öfter und immer weiter herunter zu regeln und etwa bei Windflaute oder Bewölkung kurzfristig wieder hochzufahren. Die Fähigkeit, die Erzeugung von elektrischem Strom an solche Schwankungen anzupassen, stößt bereits jetzt zeitweilig an die technisch-ökonomischen Grenzen. Die Energieversorgungsunternehmen sind auch heute schon gezwungen Strom zeitweise zu verschenken oder sogar noch zusätzliche Abnahmeprämien in zehnfacher Höhe des sonstigen Verkaufspreises zu zahlen, da die Anpassungsfähigkeit der Stromproduktion an die Netzschwankungen nicht mehr ausreicht.

Die beschränkte Möglichkeit die Kernkraftwerke im Lastfolgebetrieb zu fahren, führt insbesondere bei der geplanten Entwicklung der erneuerbaren Energiequellen zu einer ökonomischen Konkurrenz von Atomstrom und erneuerbaren Energiequellen. Zugleich führt der Lastfolgebetrieb zu Rückwirkungen auf die Sicherheit des Betriebs von Kernkraftwerken.

### Grenzen des Lastfolgebetriebs

Legt man ein gesichertes Regelvolumen von 30% der installierten Kernkraftwerksleistung zugrunde sowie die heute verfügbare Leistung von 20, 37 GW, so stehen unter Berücksichtigung der laufzeitbedingten Abschaltung von ein bis zwei Kernkraftwerken bis zu diesem Zeitpunkt höchsten 5 GW Regelreserve aus dem gesamten Kernkraftwerkspark zur Verfügung. Dieses Regelpotential steht einer witterungsbedingten Einspeisung aus Wind- und Solarstromanlagen von mehr als 60 GW gegenüber (ewi, gws, prognos, 2010) (IWES, 2009). Im Verhältnis zur Schwankung der Einspeisung Wind- und Solarstromerzeugung um 50 GW betrüge das Regelpotential der Kernenergie 10 %. Die Kernenergie könnte damit lediglich 10% der Schwankungen der Wind- und Solarstromeinspeisung ausgleichen.

### Sicherheitsrisiken

Durch den Lastfolgebetrieb werden die Risiken des Betriebs von Kernkraftwerken erhöht. Der Lastfolgebetrieb bedeutet für die Kernkraftwerke einen „Dauerstress“, der zu erhöhten Lasten und Anforderungen in praktisch allen sicherheitstechnischen wesentlichen Bereichen der Anlage führt, insbesondere bei starken Leistungsabsenkungen, wie sie zukünftig benötigt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass weder die Belastungen der Bauteile durch den Lastwechselbetrieb noch Vorschädigungen zu jedem Zeitpunkt völlig bekannt sind und die Folgen des Lastwechselbetriebs zu einem bestimmten Teil deshalb immer unberechenbar bleiben. Insbesondere dann, wenn die erhöhten Lasten auf Vorschädigungen von Bauteilen der alten Reaktoren treffen, können sich die Folgen von Vorkommnisse und Störfällen verschlimmern.

Nicht nur an die Bauteile der Anlagen, auch an das Personal werden durch den Lastwechselbetrieb höhere Anforderungen gestellt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Fehlhandlungen kommt, steigt.

Bei bestimmten Störfällen können die Abstände von Sicherheitsgrenzwerten bei abgesenkter Leistung geringer sein als im Volllastbetrieb. Das Störfallrisiko kann bei Teillast und damit beim Lastwechselbetrieb höher sein als beim Volllastbetrieb. Die Störfallsicherheit ist für den Lastfolgebetrieb der deutschen Kernkraftwerke bislang nicht nachgewiesen.

Um welchen Betrag das Risiko durch den Lastfolgebetrieb steigt, ist zurzeit nicht geklärt. Um dies zu klären sind umfangreiche Untersuchungen notwendig. Diese Untersuchungen müssen anlagenspezifisch durchgeführt werden.

Die Voraussetzungen für anlagenspezifische Untersuchungen liegen zurzeit noch nicht vor. Weder Betreiber noch Aufsichtsbehörden haben bislang eine Analyse vorgelegt, aus der hervorgeht, welche Bandbreiten von Lastwechseln und welche Anzahl von Lastwechseln auf die Kernkraftwerke aus der Wind- und Solarstromspeisung zukommen.

Die Herstellerspezifikationen und Prüfungen in vergangenen Verfahren zur Erteilung der Betriebsgenehmigungen zur Lebensdauer sind nach den bisherigen Betriebserfahrungen und nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik nicht mehr belastbar und insoweit teilweise nur noch von historischem Wert.

Bereits nach den veralteten Herstellerspezifikationen sind die sicherheitsrelevanten Komponenten der Kernkraftwerke nur für etwa 40 Jahre ausgelegt. Die Belastungen eines Lastfolgebetriebs, wie sie in Zukunft Standard sein werden, wurden dabei nicht berücksichtigt. Laufzeitverlängerungen über einen Gesamtzeitraum von 40 Lebensjahren hinaus verfügen bereits deshalb zurzeit auch nicht über eine formelle rechtliche Basis.

Nach § 7 Abs.1 Satz bedarf nicht nur jede wesentliche Änderung der Anlage einer Genehmigung sondern auch jede wesentliche Änderung des Betriebs. Wesentlich ist eine Änderung, wenn sie eine neue Sicherheitsfrage aufwirft, die im Rahmen der Genehmigung nicht geprüft worden sind aber bei Vorliegen der Umstände hätten geprüft werden müssen. Mit dem Lastfolgebetrieb sind, wie dargestellt, eine Reihe von neuen Sicherheitsfragen aufgeworfen, die bislang nicht in einem Genehmigungsverfahren nicht geprüft worden sind aber zweifellos hätten geprüft werden müssen. Hierzu gehört u.a. die Störfallbeherrschung, die auf Grund der neuen Betriebsweise einer erneuten Prüfung bedarf,

Solange keine anlagenspezifischen Sicherheitsnachweise für den geplanten Lastfolgebetrieb vorliegen und keine entsprechenden Genehmigungen, sind die Atomaufsichtsbehörden verpflichtet, den Lastfolgebetrieb aufsichtlich so zu begrenzen, dass zusätzliche Risiken ausgeschlossen sind.

## 8. Literatur

- Andor (2009)** Negative Preise und der Vorrang Erneuerbarer Energien, Universität Münster, Lehrstuhl für Volkswirtschaft, 2009
- AREVA (2010)** Ludwig, Salnikowa, Waas, Lastwechselfähigkeiten deutscher AKW, atw, August/September 2010
- atw (2009)** Internationale Zeitschrift für Kernenergie, Betriebsergebnisse 2008, Berlin, 2009
- BMU (2010)** Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, „Energiekonzept der Bundesregierung“, [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept\\_bundesregierung.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf),
- BMU (2009)** Bundesumweltministerium, Gesellschaft für Reaktorsicherheit Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Revision D [Bericht] Bonn, April 2009  
[www.bmu.de/atomenergiesicherheit/rechtsvorschriften\\_technische\\_Regeln/sicherheitskriterien/doc/44296.php](http://www.bmu.de/atomenergiesicherheit/rechtsvorschriften_technische_Regeln/sicherheitskriterien/doc/44296.php)
- Fraunhofer (2009)** Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche, Kassel, Dezember 2009
- GRS (2010)** Auswirkungen des Lastfolgebetriebs auf technische Einrichtungen und den Ablauf von Ereignissen in deutschen Kraftwerken, Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Köln, 2010
- GRS (1990)** Informationen und Bewertungsansätze zur Lebensdauer drucktragender Komponenten unter Berücksichtigung des Lastfolgebetriebs, Köln, 1990
- Grün (1985)** Grün A., Die Lastwechselfähigkeit von KWU-Kernkraftwerken, Kraftwerks-Union 1985
- Hipler** Reaktorchemie, Vorlesungsskript, Hannover: [www.zsr.uni-hannover.de/folien/reakchem.pdf](http://www.zsr.uni-hannover.de/folien/reakchem.pdf).
- Hohmeyer (2010)** Hohmeyer, O., Die Zukunft der Energie, Gutachten im Auftrag von Lichtblick, 2010.  
[www.lichtblick.de/uf/Studie\\_2050\\_Die\\_Zukunft\\_der\\_Energie](http://www.lichtblick.de/uf/Studie_2050_Die_Zukunft_der_Energie).
- Hundt (2009)** Hundt M., Barth R., Sun N., Wissel S., Voß A., Verträglichkeit von erneuerbaren Energien und Kernenergie im Erzeugungssportefolio, Gutachten im Auftrag der E.ON Energie AG München, Stuttgart, Oktober 2009

- KWU (1981)** Belastungsangaben für Rohrleitungssysteme der Class 1 innerhalb des Sicherheitsbehälters Kraftwerks-Union, zitiert nach GRS (1990)
- Renneberg (2010)** Risiken alter Kernkraftwerke, Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion von Bündnis 90/Die Grünen, Bonn, 2010
- RSK (2004)** Beherrschung von Alterungsprozessen in Kernkraftwerken, Empfehlung der Reaktorsicherheitskommission, 2004
- Schwarz (2007)** Schwarz E., Streitfall Kernenergie, Studie im Auftrag des Bundesumweltministeriums, 2007  
[http://www.bmu.de/atomenergie\\_sicherheit/downloads/doc/40852.php](http://www.bmu.de/atomenergie_sicherheit/downloads/doc/40852.php)
- SRU (2010)** Sachverständigenrat für Umweltfragen, Stellungnahme Nr. 15, 2010
- VDW (2010)** Ambitionierte Ziele - untaugliche Mittel: Deutsche Energiepolitik am Scheideweg, Vereinigung Deutscher Wissenschaftler: Hennicke, Samadi, Schleicher, Stellungnahme 2010
- VGB (2006)** Richtlinie für das Wasser in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren, R 401 J. VGB PowerTec. e.V.

.