



# Lastwechselfähigkeiten deutscher KKW

*Holger Ludwig, Tatiana Salnikova und Ulrich Waas, Erlangen*

**Sonderdruck** aus  
Jahrgang 55 (2010), Heft 8/9 August/September

**Internationale  
Zeitschrift für  
Kernenergie**

In der Diskussion, ob eine Laufzeitverlängerung der vorhandenen Kernkraftwerke die erweiterte Nutzung der regenerativen Energieträger in der Stromerzeugung unterstützt oder behindert, wird teilweise unterstellt, dass Kernkraftwerke als typische Grundlastkraftwerke nur mit mehr oder minder konstanter Leistung betrieben werden könnten.

Tatsächlich sind die Kernkraftwerke in Deutschland bereits in den 70er-Jahren dafür ausgelegt worden, größere Lastwechsel ausgleichen zu können. Zu der entsprechenden Auslegung gehörten folgende spezifische Merkmale: ein Teillastdiagramm mit konstanter Kühlmitteltemperatur (DWR) bzw. eine Umwälzregelung (SWR) im oberen Teillastbereich, ein besonderes Steuerelement-Fahrkonzept (DWR), aufwändige Messeinrichtungen, besondere leittechnische Einrichtungen zum Regeln und Begrenzen der Leistung und Leistungsdichte sowie die Berücksichtigung einer großen Zahl von Lastwechseln für die Auslegung gegen Ermüdung der Komponenten.

Die inzwischen vorliegenden Betriebserfahrungen bestätigen eindeutig, dass die so ausgelegten, vorhandenen KKW gut geeignet sind, Lastwechsel auszugleichen, wie sie sich z.B. bei weiterem erheblichen Ausbau der Windkraftwerke infolge Windschwankungen ergeben werden. Weiterhin zeigt die Auswertung der Betriebserfahrungen auch unter Berücksichtigung der heute vorliegenden Kenntnisse, dass keine sicherheitstechnischen Gesichtspunkte einem routinemäßigen Lastwechselbetrieb der vorhandenen KKW entgegenstehen. Insofern kann, wenn gewünscht, der Weiterbetrieb der KKW den Ausbau der regenerativen Energiequellen in der Stromerzeugung absichern.

**Anschrift der Verfasser:**  
Dipl.-Ing. Holger Ludwig  
Dr.-Ing. Tatiana Salnikova  
Dipl.-Phys. Ulrich Waas  
Areva NP GmbH  
Paul-Gossen-Str. 100  
91052 Erlangen

# Lastwechselfähigkeiten deutscher KKW

Holger Ludwig, Tatiana Salnikova und Ulrich Waas, Erlangen

## 1 Anforderungen an den Lastwechselbetrieb deutscher KKW

Seit einigen Monaten wird diskutiert, ob eine Laufzeitverlängerung der vorhandenen Kernkraftwerke die erweiterte Nutzung der regenerativen Energieträger (vor allem Windkraft und Photovoltaik) in der Stromerzeugung unterstützt oder behindert. Dabei wird oftmals unterstellt, dass Kernkraftwerke als typische Grundlastkraftwerke nur mit mehr oder minder konstanter Leistung betrieben werden könnten und bei Leistungsänderungen unflexibel reagierten (so z.B. die Große Anfrage der SPD-Bundestagsfraktion vom 25. Februar 2010 [1]).

Der Eindruck in der Öffentlichkeit mag entstanden sein, weil deutsche Kernkraftwerke in der Vergangenheit überwiegend im Grundlastbetrieb liefen. Tatsächlich aber sind ausführliche Informationen zur Lastwechselfähigkeit schon in den 70er- und 80er-Jahren veröffentlicht worden (z.B. grundlegend [2] aus dem Jahr 1985). Der Grund für diese Auslegung war damals hauptsächlich die Erwartung größerer Kernkraftwerksanteile an der Energieerzeugung bei kleinteiligeren Netzstrukturen, nicht die heutige beachtliche Steigerung des Anteils erneuerbarer Energie an der Gesamtstromerzeugung. Für die vom Kernkraftwerkspark geforderte Leistungsänderung ist es jedoch unerheblich, ob eine unerwartete Windstille oder die Halbzeitpause des WM-Finales die Ursache der Anforderung ist; wichtig sind nur der Leistungsgradient (Geschwindigkeit der Leistungsänderung) und der Leistungshub (Betrag der Leistungsänderung).

Eine aktuelle Studie des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) [3] hat für die Jahre 2020 und 2030 untersucht, wie weit der dann voraussichtlich bestehende Kraftwerkspark zum zeitgerechten Ausgleich des schwankenden Stromangebots erneuerbarer Energien geeignet ist, wobei für erneuerbare Energien 30 bzw. 40 % der Stromerzeugung zugrunde gelegt wurden. Sie kam zu dem Ergebnis, dass der Kraftwerkspark diese Aufgabe in dem Szenario mit

Laufzeitverlängerung der bestehenden Kernkraftwerke besser erfüllen würde als in dem Ausstiegs-Szenario. Das Szenario „Laufzeitverlängerung“ erwies sich dabei als kostengünstiger und erbrachte die größere CO<sub>2</sub>-Einsparung. Als Randbedingung verwendete das IER einen Leistungsgradienten von bis zu 65 MW/min je Kernkraftwerk sowie einen Leistungshub über 50 % (Druckwasserreaktor: DWR) bzw. 40 % (Siedewasserreaktor: SWR) der Nennleistung. Mit diesen Randbedingungen können die deutschen KKW insgesamt bis zu 9.600 MW Regelleistung bereitstellen. (Tatsächlich ist nach der Auslegung noch etwas mehr möglich, d.h. bis zu rund **10.000 MW Regelleistung aus den KKW.**)

Die Kernkraftwerksbetreiber (VGB) haben den Hersteller (heute AREVA) gebeten, diese Annahmen unter Berücksichtigung der heute vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnisse aus technischer Sicht zu bewerten, damit insgesamt eine technisch belastbare Aussage zum Zusammenspiel von Kernkraft mit anderen CO<sub>2</sub>-freien Energieerzeugungsformen getroffen werden kann.

Dazu werden im Folgenden erläutert:

- die Lastwechselfahrweisen für die DWR und die Siedewasserreaktoren SWR,
- die wichtigsten vorhandenen Auslegungsmerkmale,
- die bisher gesammelten Betriebserfahrungen im Lastwechselbetrieb und
- der Einfluss eines häufigeren Lastwechselbetriebs auf die Systeme und Komponenten.

## 2 Beschreibung der Lastwechselfahrweise

### DWR

Das schematische Teillastdiagramm eines DWR (Abbildung 1) zeigt die Temperatur des Kühlmittels (KMT) am Eintritt in den Reaktordruckbehälter (RDB), am RDB-Austritt und die mittlere KMT über die Dampferzeuger in Abhängigkeit von der Reaktorleistung (100 % = Nennleistung). Deutlich zu erkennen ist der Bereich konstanter Kühlmitteltemperatur zwischen (im

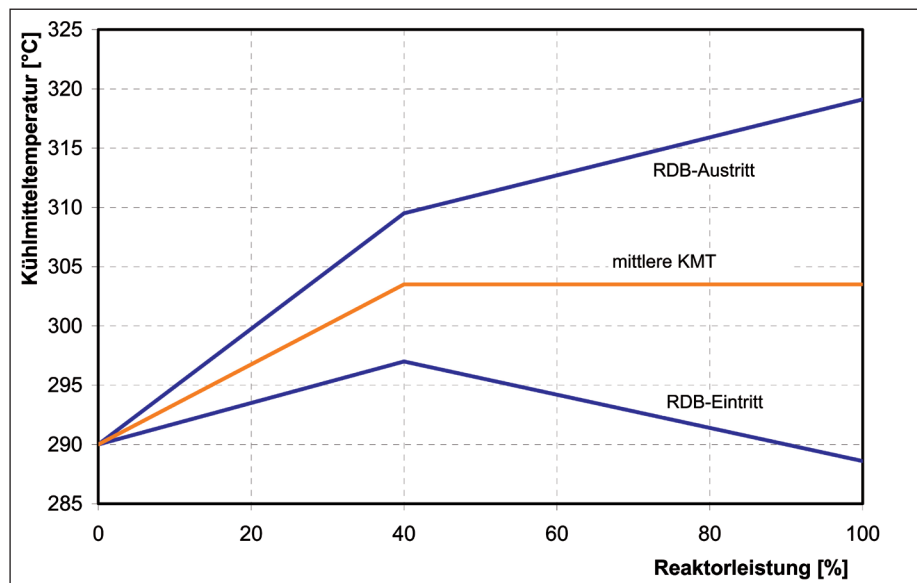


Abb. 1: Schema eines Teillastdiagramms eines Druckwasserreaktors (DWR; Reaktordruckbehälter: RDB, Kühlmitteltemperatur: KMT)

Beispiel) 40 und 100 % Leistung. Im Falle einer Leistungsreduktion wird die sogenannte D-Bank (4 Gruppen mit je 4 über den Reaktorkern verteilten Steuerelementen) in den Reaktorkern eingefahren, bis die gewünschte Leistungsänderung erreicht ist. Die übrigen Steuerelemente (typischerweise 45) sind der sogenannten L-Bank zugeordnet, die im Leistungsbetrieb immer an einer möglichst hohen Position im Kern verharren und damit die sicherheitstechnisch bedeutsame Abschaltreserve gewährleisten. Nach dem Erreichen der gewünschten Leistung auftretende langsamere Änderungen der Leistungsverteilung im Kern und der Konzentration der Xenonisotope im Kernbrennstoff werden durch kleine Bewegungen der L-Bank und Änderungen der Borkonzentration im Kühlmittel ausgeregelt. Bei einer Anhebung der Leistung wird zunächst wieder die D-Bank aus dem Kern gezogen. Gegebenenfalls

kann über ein gleichzeitiges Ziehen der L-Bank die Leistungsanhebung unterstützt werden, dieses hängt jedoch von der Stellung der L-Bank ab (zur Übersicht zu den genannten Komponenten s. *Abbildung 2*).

Für eine Leistungsanhebung ist der Leistungsgradient unter anderem durch die zulässige Leistungsdichte begrenzt. Eine Leistungsabsenkung ist praktisch in jeder gewünschten Geschwindigkeit möglich.

**SWR**

Siedewasserreaktoren können entweder durch das Verfahren der Steuerelemente oder durch Änderung der Drehzahl der Zwangsumlaufpumpen und damit des Kühlmitteldurchsatzes (Umwälzregelung) in ihrer Leistung geregelt werden. Für den Lastwechselbetrieb im oberen Leistungsbereich (ca. 60 bis 100 % Nennleistung) ist die Umwälzregelung hervorragend geeignet. Bei einer Verringerung des Kühlmittel-

durchsatzes nimmt die Dampfmenge im Reaktorkern zu, sodass sich die Moderatorichte und damit die Reaktivität verringert. Eine Erhöhung des Kühlmitteldurchsatzes führt dagegen zu einer Zunahme der Moderatorichte und der Reaktivität und damit zu einem Leistungsanstieg. In *Abbildung 3* ist die Reaktorleistung in Abhängigkeit vom Kerndurchsatz bei konstanter Steuerelementstellung in der sogenannten Umwälzregelkennlinie dargestellt. Ein wesentlicher Vorteil der reinen Umwälzregelung besteht darin, dass bei Laständerung die relative Leistungsverteilung im Kern nicht wesentlich beeinflusst wird, weil hierzu kein Verfahren von Steuerelementen erforderlich ist. Hiermit wird die durch Last- und damit Temperaturänderung im Brennstab verursachte Beanspruchung der Brennstäbe auf ein Minimum beschränkt. Die maximal realisierbaren Lastwechselgeschwindigkeiten liegen im Leistungsbereich der Umwälzregelung bei ca. 10 %  $P_{Nenn}/min$ . Über den Umwälzregelbereich hinaus werden Leistungsänderungen durch das Verfahren von Steuerelementen realisiert. Auch dabei sind bei Optimierung der Steuerelementfahrfolge ausreichend hohe Gradienten möglich, sodass insgesamt Leistungshübe zwischen ca. 20 und 100 % gefahren werden können (zur Übersicht zu den genannten Komponenten s. *Abbildung 4*).

**An- und Abfahren**

Die in der IER-Studie [3] angenommenen 9.600 MW Regelleistung können die deutschen Kernkraftwerke im besonders gut regelbaren oberen Leistungsbereich bereitstellen. Darüber hinaus gäbe es die Möglichkeit, Anlagen vorübergehend komplett vom Netz zu nehmen und danach wieder hochzufahren. In diesem Fall benötigt ein Kernkraftwerk nicht die oft genannten 1 bis 2 Tage bis zum Erreichen der Vollast, sondern nur 1 bis 2 Stunden. Der Unterschied liegt in den verschiedenen möglichen Anlagenzuständen bei Nulllast begründet. Während für das Hochfahren eines KKW nach einem Brennelementwechsel in der Tat 1 bis 2 Tage benötigt werden, wird ausgehend vom Zustand „Nulllast heiß“ innerhalb von ca. 2 Stunden annähernd Vollast erreicht. Noch schneller geht es, wenn die Anlage auf „Eigenbedarf“ gehalten, d.h. der Strombedarf des Kraftwerks aus dem eigenen Generator gedeckt wird. Der Generator bleibt dann mit dem Netz synchronisiert. Das Hochfahren auf Vollast ist so in weniger als einer Stunde möglich. Diese Betriebsweise ist für Einzelfälle durchaus

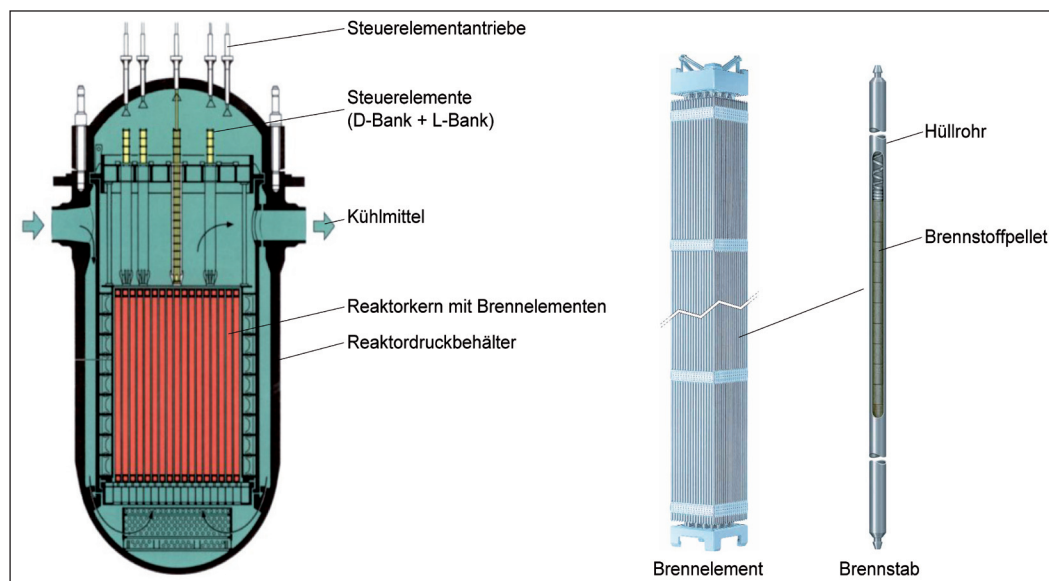


Abb. 2: Darstellung typischer Reaktordruckbehälter (RDB)-Einbauten eines Druckwasserreaktors (DWR)

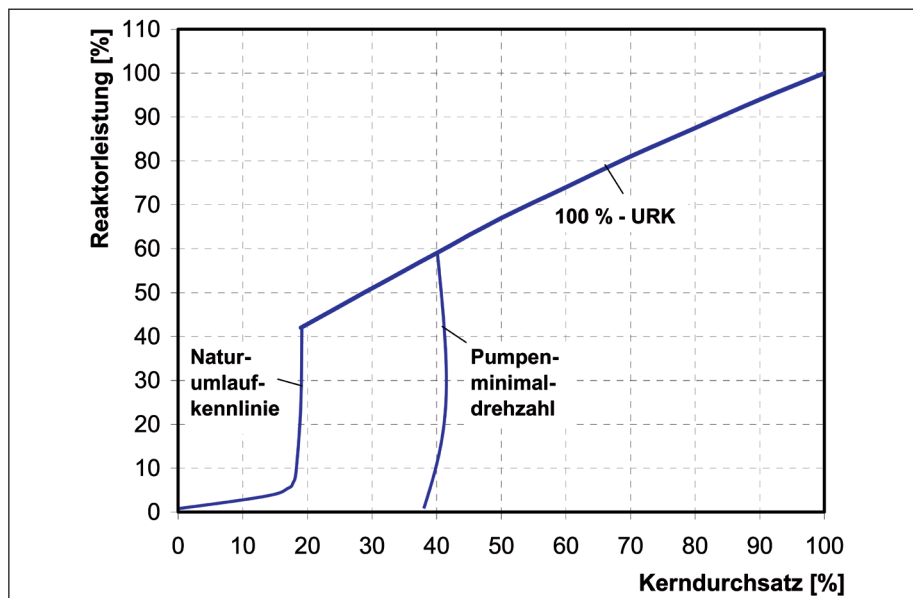


Abb. 3: Schema einer Umwälzregelkennlinie (URK) eines Siedewasserreaktors (SWR)

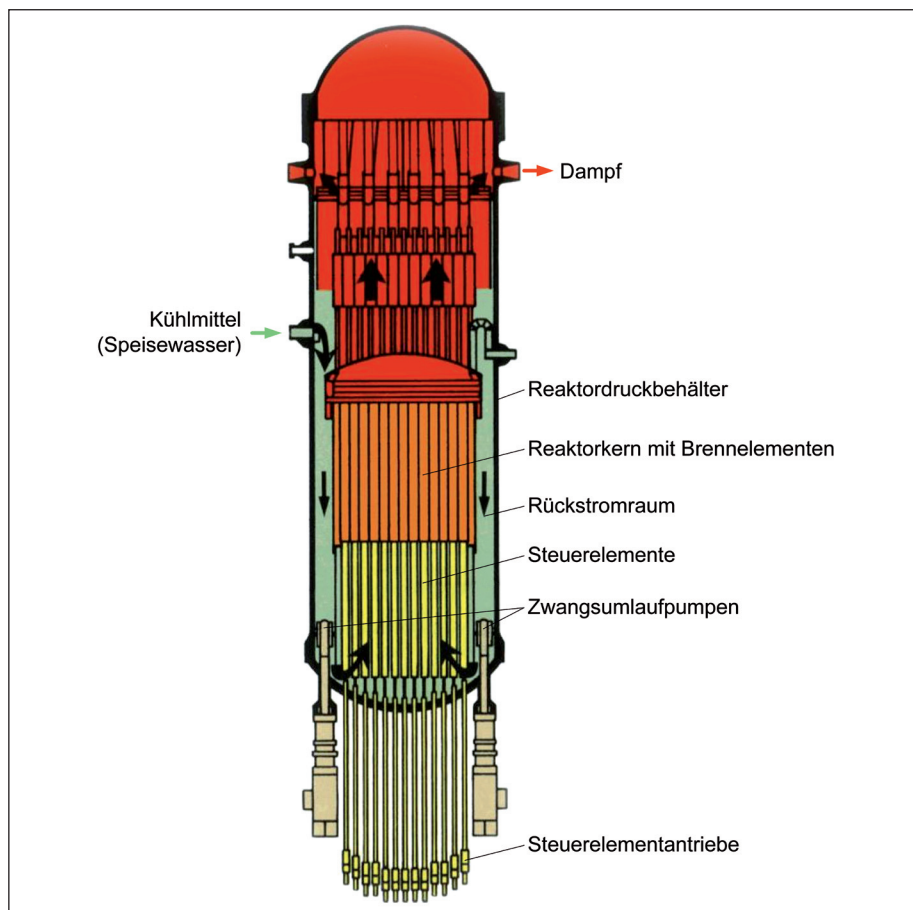


Abb. 4: Darstellung typischer Reaktordruckbehälter (RDB)-Einbauten eines Siedewasserreaktors (SWR)

vorgesehen und war in den Anforderungen an die Kernkraftwerke aus Sicht der Netzbetreiber auch ausdrücklich gefordert (geforderte maximale Anfahrzeit 3 h) [4].

### 3 Auslegungsmerkmale

An die deutschen KKW wurden schon während der Auslegung hohe Anforderungen hinsichtlich der Regelbarkeit gestellt. Da-

her haben sie besondere Designmerkmale, die sich vom internationalen Standard abheben (siehe z.B. [2, 5, 6]).

#### Steuerelement-Fahrprogramm (DWR)

Das Verfahren von Steuerelementen zum Zweck der Leistungsregelung hat immer auch einen Einfluss auf die axiale Leistungsverteilung im Kern, welche im idealisierten Zustand eine Cosinusform hat. Eine Leistungsanhebung wird im Allgemei-

nen zu einer erhöhten lokalen Leistungsdichte führen. Die vorhandenen Leistungs- und Leistungsdichtebegrenzungen stellen hier sicher, dass trotz solcher Änderungen zulässige Maximalwerte der Leistungsdichte nicht überschritten werden. Da aber ein Ansprechen der Begrenzungseinrichtung eine Leistungsanhebung verlangsamt, ist es für eine effektive und vor allem schnelle Reaktorregelung wichtig, dass Leistung und Leistungsverteilung unabhängig voneinander gesteuert werden können.

Das Steuerelement-Fahrprogramm der deutschen DWR setzt dabei auf einheitliche Steuerelemente, die alle sowohl für die Regelung als auch für die Abschaltung des Reaktors eingesetzt werden können. In funktioneller Hinsicht werden die Steuerelemente zu 2 Bänken zusammengefasst, der D-Bank aus 4 gestaffelt fahrenden Gruppen zu je nur 4 Steuerelementen sowie der L-Bank mit dem überwiegenden Teil der Steuerelemente. Die D-Bank dient der Regelung der integralen Reaktorleistung. Dabei wird mit jeweils nur 4 fahrenden Steuerelementen die axiale Leistungsverteilung nur wenig verzerrt. Die L-Bank kann unterstützend zur Reaktorleistungsregelung eingesetzt werden. Ihre Hauptaufgabe ist aber die Regelung der axialen Leistungsverteilung, wofür bereits wenige Zentimeter Stellungsänderung eine ausreichende Wirkung erzielen. (Um bei konstanter Reaktorleistung die Leistungsverteilung zu ändern, braucht man nur die L- und D-Bank kompensiert gegeneinander zu verfahren.) Dieses Steuerelement-Fahrkonzept ermöglicht schnelle Leistungsänderungen, erfordert aber eine prompte und genaue Messung der Leistungsverteilung durch eine geeignete Kerninstrumentierung.

#### Kerninstrumentierung (DWR und SWR)

Die Leistungsdichte ist, zusammen mit dem Abbrand, maßgebend für die Belastung der Brennelemente (BE). Es existieren deshalb Grenzwerte für die Leistungsdichte, die nicht überschritten werden dürfen. Bei Lastwechseln (mit Steuerelementen) ändert sich die Form der Leistungsverteilung und mit ihr die maximale lokale Leistungsdichte. Der Abstand zwischen dem jeweils maximalen lokalen Wert der Leistungsdichte und ihrem Grenzwert definiert den Spielraum, der für solche Umverteilungen zur Verfügung steht. Je sicherer und genauer die lokale Leistungsdichte im Betrieb erfasst und überwacht werden kann, desto größer sind die für den Lastwechselbetrieb vorhandenen Spielräume. Die in deutschen Kernkraftwerken verwendete Kernüberwachung ist, gerade auch im internationalen Vergleich, schnell und genau und bietet so größere Spielräume für den Lastwechselbetrieb. Ermöglicht wird dies durch eine Kerninstrumentierung mit



sowohl In-Core Leistungs-Verteilungs-Detektoren (LVD), welche die Leistungsverteilung direkt im Kern kontinuierlich messen (dadurch schnell), als auch einem Kugelmesssystem (DWR) bzw. Fahrkammer-system (SWR), mit dem die LVD-Detektoren im Betrieb regelmäßig kalibriert werden (dadurch genau).

#### Teillastdiagramm (DWR)

Grundsätzlich gibt es 2 Arten von Teillastdiagrammen für DWR, eines mit konstanter mittlerer KMT und eines mit variierender KMT, aber konstantem Frischdampfdruck. In deutschen DWR wird eine Mischung aus beiden Typen angewendet (s. *Abbildung 1*). Im für den Lastwechselbetrieb bedeutenderen Leistungsbereich von ca. 60 bis 100 % werden die Lastwechsel mit konstanter mittlerer KMT durchgeführt. Das hat den Vorteil, dass bei Leistungsänderungen das Kühlmittelvolumen relativ konstant bleibt und auch die Änderung der Reaktivität durch die KMT gering ist. Somit sind die Anforderungen an das Volumenregelsystem und die Reaktorleistungsregelung (Steuerelement-Fahren) vermindert. Außerdem wird der Massenaustausch zwischen Druckhalter und dem Rest des Reaktorkühlsystems vermindert, was zu geringeren Temperaturschwankungen in der Ausgleichsleitung führt.

#### Umwälzregelung (SWR)

Die oben bereits erläuterte Umwälzregelung beim SWR vereint (siehe *Abbildung 3*), vereinfacht gesprochen, die Vorteile des optimierten Steuerelement-Fahrprogramms und des Teillastdiagramms des DWR für die Bedingungen des SWR. Damit kann der SWR systembedingt die Leistung im oberen Lastbereich noch schneller und mit geringeren Leistungsverteilungsdeformationen ändern als der DWR, weil dazu kein Verfahren von Steuerelementen erforderlich ist. Hierbei bleiben Temperatur und Druck im Frischdampfsystem konstant, sodass auch die Belastungen auf die Komponenten des Reaktorkühlsystems und angrenzender Systeme gering bleiben.

#### Begrenzungen (DWR und SWR)

Für wichtige Betriebsparameter in Kernkraftwerken gibt es sicherheitstechnisch relevante Grenzwerte, die nicht überschritten werden sollen. Um dies zu gewährleisten, gibt es gestaffelte leittechnische Einrichtungen zur automatischen Ansteuerung von Maßnahmen:

- Abweichungen vom Normalzustand werden zunächst von den betrieblichen Regelungen abgefangen und zurückgeführt.
- Wenn die Regelungen dazu nicht in der Lage sind, greifen vorrangig wirkende Begrenzungen ein und führen die Anla-

ge in den Regelbereich der betrieblichen Regelungen zurück.

- Falls dies bei ganz gravierenden Störungen auch nicht reichen sollte, wird durch das Reaktorschutzsystem ein sicherer Zustand hergestellt, indem insbesondere eine Reaktorschnellabschaltung (RESA) ausgelöst wird.

Durch die Begrenzungen wird ein Eingreifen des Reaktorschutzes (z.B. RESA) für die meisten Störungen vermieden und die Anlage geschont. Somit erfüllen die Begrenzungen nicht nur eine sicherheitstechnische Funktion, sondern erhöhen auch die Verfügbarkeit der Anlage. Die deutschen Kernkraftwerke sind international Vorreiter in der Automatisierung derartiger Begrenzungsfunktionen. In das Begrenzungskonzept der deutschen DWR wie SWR sind viele Überlegungen und Erfahrungen zum Lastwechselbetrieb eingeflossen. Insbesondere die Leistungs- und Leistungsdichtebegrenzungen mit ihren verschiedenen Bestandteilen sowie die Steuerelement-Fahrbegrenzungen tragen wesentlich zu einem ausreichenden Abstand zu sicherheitstechnischen Grenzwerten gerade unter Berücksichtigung von Lastwechseln bei.

Die Vorteile der automatisierten Begrenzungsfunktionen in Hinblick auf die Lastwechselfähigkeiten deutscher KKW sind:

- Die Regeleinrichtungen können primär unter dem Gesichtspunkt der optimalen Funktion ausgelegt werden, während die sicherheitstechnischen Aspekte davon unabhängig von den Begrenzungen abgedeckt werden.
- Das Betriebspersonal wird von Überwachungsaufgaben entlastet und kann somit den Lastwechselvorgängen besondere Aufmerksamkeit widmen.
- Die Anlagenverfügbarkeit und damit die Netzsicherheit werden verbessert.
- Die hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Begrenzungseinrichtungen (im Zusammenspiel mit den Kerninstrumentierungen) ermöglichen größere Spielräume für Lastwechsel.

#### Konstruktive Vorkehrungen zur Minderung und Beherrschung von zyklischen Beanspruchungen (DWR und SWR)

Lastwechsel in dem vorstehend beschriebenen Rahmen sind ganz überwiegend mit nur geringen Änderungen von globalen Anlagenparametern wie Druck und Temperatur im Reaktorkühlsystem verbunden. Die dadurch bedingten geringen Wärmespannungen sind für die Ermüdung der betroffenen Komponenten unerheblich. Größere Temperaturgradienten mit entsprechend höheren Beanspruchungen können auftreten, wenn in einzelnen Komponenten unterschiedlich heiße Medien aufeinandertreffen. Neben einer anlagenschonenden Fahrweise (s. Teillastdiagramm) werden solche Belastungen durch eine geeignete

Auslegung beherrscht, also durch die Wahl geeigneter Werkstoffe und entsprechende Dimensionierung oder durch konstruktive Vorkehrungen zur Minderung von Temperaturänderungen z.B. im Bereich von Einspeisestutzen. Deutsche KKW sind für die mit Lastwechseln verbundenen Belastungen ausgelegt. Dabei ist eine bestimmte Anzahl von Lastfällen (in diesem Fall Lastwechselvorgängen) unterstellt, die die über die Lebensdauer der Anlage zu erwartenden Häufigkeiten abdeckt.

#### Ermüdungsüberwachung (DWR und SWR)

Für ermüdungsrelevante Komponenten besteht eine kontinuierliche Ermüdungsüberwachung (Messung, Aufzeichnung und Auswertung von Wandtemperaturen), die sowohl abgestufte Schnellauswerteverfahren als auch detaillierte Ermüdungsanalysen ermöglicht. Außerdem kann z.B. durch den Vergleich der aufgetretenen Lastfälle, wie etwa Lastwechsel oder Betriebstransitionen, mit den in den wärmetechnischen Belastungsangaben dokumentierten Auslegungsannahmen sichergestellt werden, dass sich von der Komponentenauslegung her keine Einschränkungen für den Betrieb der Anlagen ergeben. Darüber hinaus gibt es in vorgeschriebenen Abständen wiederkehrende, zerstörungsfreie Prüfungen, insbesondere für sicherheitsrelevante Komponenten. Falls trotz allem unerwartete Effekte auftreten sollten, würden diese somit rechtzeitig erkannt.

## 4 Betriebserfahrungen

In Deutschland wie auch international liegen umfangreiche Erfahrungen mit dem Lastwechselbetrieb vor. Etabliert ist insbesondere die sogenannte Primärregelung, bei der die Reaktorleistungsregelung unmittelbar und ohne Eingriff des Operators an die Netzfrequenz gekoppelt ist. Die Leistungshübe sind dabei auf maximal 5 % der Nennleistung begrenzt (entsprechend bis zu 65 MW pro Block), wobei jedoch die Leistungsänderung schnell erfolgen kann. Diese Fahrweise belastet aufgrund der begrenzten Leistungshübe die Anlage nur gering und die Erfahrungen sind positiv (*Isar 2 (KKI 2)* [5] und *Isar 1 (KKI 1)* [6]).

Größere Lastrampen werden in der Regel manuell vom Operator vorgegeben. Die Vorbereitungen für den Einsatz einer automatisierten Sekundärregelung, bei der die Leistung der Anlagen über ein Signal von außen gesteuert wird, sind für verschiedene Anlagen bereits abgeschlossen oder werden gerade getroffen. Alle Anlagen haben im Laufe ihrer Betriebszeit entsprechende Lastrampen gefahren. Im Jahr 2009 befanden sich z.B. *Philippsburg 1 (KKP 1)* und *Neckarwestheim 1 (GKN I)* fast durchgängig im Lastfolgebetrieb (s. *Abbildung 5* [7]).

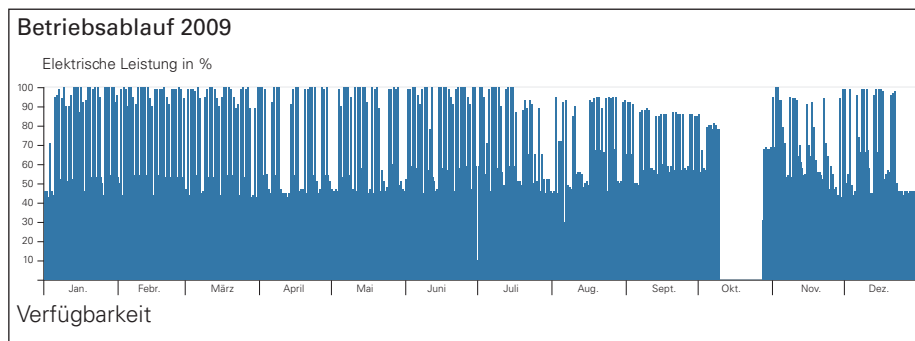


Abb. 5: Lastwechselbetrieb im Kernkraftwerk Neckarwestheim I (GKN I) im Jahr 2009 [7]

Die Lastgradienten erreichten hierbei bis zu 2 %/min, die Leistungshübe lagen in der Regel in dem Bereich konstanter KMT (DWR) bzw. der Umwälzregelung (SWR). Die vorliegenden Betriebserfahrungen mit diesem Lastwechselbetrieb sind ebenfalls positiv. Die genannten 2 %  $P_{Nenn}/min$  bedeuten immerhin ca. 400 MW Leistungsänderung in einer Viertelstunde für jeweils nur eines der größeren KKW, sodass damit bereits die Anforderungen zum Ausgleich der Windchwankungen praktisch abgedeckt sind.

Hinsichtlich der Erfahrungen mit dem Lastwechselbetrieb lohnt auch ein kurzer Blick über den Rhein. In Frankreich sind mit Stand 2008 ca. 58 % der Stromerzeugungskapazitäten nuklear, der Anteil an der Stromerzeugung lag sogar bei 76 %. Naturgemäß wirken die französischen KKW sowohl an der Frequenzstützung als auch am Ausgleich mittelfristiger Lastschwankungen mit. Definiert sind dabei Lastgradienten von bis zu 5 %/min in einem Lastbereich von 30 bis 100 %.

## 5 Einfluss des Lastwechselbetriebs auf die Anlage

Der Einfluss von Lastwechseln auf die Anlage wurde aus Herstellersicht bereits bei der Auslegung berücksichtigt und jetzt aus heutiger Sicht überprüft. Im Folgenden werden zuerst die Auswirkungen auf den Reaktorkern dargestellt, danach werden für die anderen Komponenten und Systeme die Auswirkungen des Lastwechselbetriebs in mechanischer, chemischer, radiologischer, verfahrenstechnischer und elektrischer Hinsicht sowie für den Ablauf von Transienten bewertet.

### Reaktorkern

Für die spezifizierten Lastrampen mit bis zu 10 %  $P_{Nenn}/min$  ist sowohl für die SWR als auch für die DWR die Machbarkeit in der Inbetriebsetzung nachgewiesen worden. In der darauffolgenden Betriebszeit sind die Anlagen teilweise modifiziert (z.B. Anreicherungserhöhungen, Leistungserhöhungen) und die BE-Beladestrategien für den Grundlastbetrieb optimiert worden.

Dies führte in der Regel dazu, dass die für Lastwechsel zur Verfügung stehenden Spielräume (Abstände bis zum Ansprechen der Leistungs- und Leistungsdichtebegrenzungen) eher geringer geworden sind. Teilweise wurden die Spielräume durch Verbesserungen bei der Brennelementtechnik (z.B. der Übergang auf höhere Brennstabteilungen beim SWR) aber auch wieder erhöht. Die mit Blick auf einen Ausbau der Windenergie gewünschten Leistungsgradienten von 2 %  $P_{Nenn}/min$ , das entspricht bei den meisten Anlagen ca. 25 MW/min, können in jedem Fall realisiert werden.

Größere Leistungsgradienten von bis zu 100 MW/min können bei SWR im Bereich zwischen 60 und 100 %  $P_{Nenn}$  durch Drehzahländerung der Zwangsumlaufpumpen auslegungsgemäß relativ einfach erreicht werden. Bei DWR könnten heute unter Umständen bei Leistungsanhebungen mit großem Gradienten und großem Hub hinsichtlich der maximalen Leistungsdichte Werte erreicht werden, bei denen die Begrenzungsfunktionen automatisch die Geschwindigkeit der Leistungsanhebung verringern würden. (Schnelle Leistungsabsenkungen sind immer möglich.) Aus sicherheitstechnischer Sicht ist das Ansprechen der Begrenzungen zulässig, aus betrieblicher Sicht hingegen unerwünscht. Daher können – falls für den Ausgleich im Netz erwünscht – zur Absicherung größerer Leistungsgradienten bei großen Leistungshüben auch noch betriebliche Optimierungen vorgenommen werden. Dazu gehören unter anderem:

- Optimierte BE-Beladestrategie (DWR/SWR)
- Optimierte Steuerelement-Fahrregelungen (DWR/SWR)
- Optimierte Messwertauswahl für die LVD-Signale (leittechnische Berücksichtigung von Abschattungseffekten der D-Bank) (DWR)

Brennstäbe (BS) und BE sind grundsätzlich für die Beanspruchungen des Lastwechselbetriebs ausgelegt. Relevant hinsichtlich der Beanspruchungen ist vor allem der Schadensmechanismus PCI. Unter PCI wird die Kombination von Pellet Cladding Mechanical Interaction (PCMI) und Mechanismen der Spannungsriss-Korrosi-

on im Innern des Brennstabes verstanden. PCMI wird durch Kontakt zwischen Brennstoffpellet und Hüllrohr (cladding) aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnung hervorgerufen. Die Dehnung des Brennstoffs ist abhängig von der Leistung; entsprechend sind die „Dehnungsunterschiede“ zwischen Pellet und Hüllrohr abhängig vom Leistungshub. Die PCI-Schwelle definiert das Leistungsniveau, unterhalb dessen keine PCI-Schäden erwartet werden. Spannungsabbau durch Relaxation des Hüllrohrs bei höheren Leistungen kann die PCI-Schwelle anheben. Dieser Vorgang wird als Konditionierung bezeichnet.

In den Begrenzungen gibt es zur Vermeidung von PCI einen entsprechenden Vorhalt, der auch die Leistungsgeschichte des Reaktors und damit die Konditionierung des Brennstoffs berücksichtigt. Sowohl Analysen als auch die bisherigen Betriebserfahrungen belegen die Wirksamkeit dieser Maßnahme. Vorsorglich sollten jedoch weitere Betriebserfahrungen, auch mit höheren Leistungsgradienten, gesammelt und ausgewertet werden.

Insgesamt wird mit den genannten Vorkehrungen erreicht, dass auch bei Lastwechselbetrieb BS-Defekte nicht zu erwarten sind. Sollten einzelne BS-Defekte auftreten (Undichtigkeiten an einzelnen der mehr als 40.000 Brennstäbe im Reaktorkern sind – wenn auch selten – aus anderen Gründen vorgekommen), ist die Kühlmittelreinigung der Anlage dafür ausgelegt, radioaktive Stoffe wieder aus dem Kühlmittel zu entfernen und damit Auswirkungen auf das Personal und die Umgebung auf zulässige Werte zu begrenzen. Weiterhin ist grundsätzlich vorgesehen, bei eventuell vorliegenden BS-Defekten Lastwechselbetrieb nicht in größerem Umfang durchzuführen.

KKW können Lastwechsel leichter (schneller, größerer Hub) durchführen, wenn der Operator über den bevorstehenden Lastwechsel ein paar Stunden vorher informiert wird. Mit besserer Vorhersage der Ausbeute der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wachsen auch die Möglichkeiten einer optimierten Lastfolge der KKW. Wenn beispielsweise eine Stunde im Voraus der benötigte Lastwechsel bekannt ist, kann der Reaktoroperator die Anlage vorbereiten (Einstellen optimaler Parameter hinsichtlich verfügbarer Steuerelementreaktivität, Leistungsverteilung, PCI-Vorhalt), sodass die Abläufe zur Leistungsanhebung vereinfacht werden.

### Mechanische Einflüsse

#### Materialermüdung

Komponenten aus metallischen Werkstoffen haben die Eigenschaft, unter zyklischen Belastungen, die bestimmte Werte überschreiten (Dauerfestigkeitsgrenze), an

Laständerung [% P <sub>Nenn</sub> ]	Anzahl gesamt
10 (Lastsprung)	100.000
100-80-100	100.000
100-60-100	15.000
100-40-100	12.000

Tab. 1: Auslegungs-Lastwechsel im Bereich 40 bis 100 % Nennleistung, Beispiel KONVOI (Druckwasserreaktor: DWR)

Betriebsfestigkeit zu verlieren, was als Materialermüdung bezeichnet wird. Solche zyklischen Belastungen können auch durch Lastwechsel erzeugt werden, insbesondere wenn größere Temperaturtransienten im Werkstoff auftreten. Die Auslegung der deutschen Kernkraftwerke hat jedoch, wie oben bereits erwähnt, einen Lastwechselbetrieb während der gesamten Lebensdauer angenommen. Entsprechend wurde die Anzahl der Lastwechsel relativ hoch angesetzt (siehe Tabelle 1 für Laständerungen, wie sie im diskutierten Zusammenhang relevant sind). Die mit den jeweiligen Lastwechseln verbundenen Beanspruchungen wurden für ermüdungsrelevante Bauteile ermittelt und bei der Dimensionierung berücksichtigt. Mit den aus der Ermüdungsüberwachung gewonnenen Daten werden zusätzlich aktuelle Ermüdungsnachweise geführt.

Da die deutschen KKW in ihrer bisherigen Betriebszeit überwiegend mit konstanter Leistung betrieben wurden, sind hinsichtlich Materialermüdung noch erhebliche Reserven vorhanden. Zur Veranschaulichung ein simples Exempel: Ein Kraftwerk mit einer typischen Anzahl von bisher 2 000 gefahrenen Lastwechseln zwischen 60 und 100 % wäre für weitere 13.000 solcher Lastwechsel ausgelegt. Bei (unrealistischer) Annahme, dass für den Ausgleich wechselnder Windenergieerzeugung täglich derartige Lastwechsel benötigt würden, wäre die Auslegungsanzahl von Lastwechseln erst nach weiteren 35 Jahren erreicht. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass die Auslegung ohnehin noch eine erhebliche Sicherheitsreserve enthält, bis Schäden (z.B. Leckagen) auftreten könnten.

Im Übrigen ist durch die kontinuierliche Ermüdungsüberwachung mit Bewertung sichergestellt, dass auf eventuelle neue Erkenntnisse und Anforderungen (z.B. zu Festigkeitswerten) frühzeitig und gezielt reagiert werden kann.

Die Kraftwerke können auch präventiv Maßnahmen ergreifen, um den Einfluss der Lastwechsel auf die Materialermüdung weiter zu mindern. Hierbei sind zunächst Optimierungen der betrieblichen Regelungen zu nennen. Auch die Weiterentwicklung der Ermüdungsanalyse zu realistischeren Verfahren wird bei der Bewertung des Einflusses des Lastwechselbetriebs hilfreich sein. Sollte trotz allem ein einzelnes Bauteil

oder ein Rohrleitungsabschnitt an seine Auslegungsgrenzen gelangen, wäre grundsätzlich auch ein Austausch der betroffenen Komponente bzw. des betroffenen Rohrleitungsabschnitts möglich.

#### Erosionskorrosion

In den Fluidsystemen eines KKW können bei Lastwechselbetrieb Drosselungen von Durchsätzen erforderlich werden, z.B. an Armaturen des Hauptspeisewassersystems (DWR), was erhöhte Erosionskorrosion durch lokale Fließgeschwindigkeitserhöhungen zur Folge haben könnte. Dies betrifft grundsätzlich nur betriebliche Systeme, nicht jedoch Sicherheitssysteme, da sich diese während des Normalbetriebs der Anlage in der Regel nicht in Betrieb befinden. Aus betrieblichen Gründen kann anlagenspezifisch eine Bewertung und ggf. Verfolgung dieser Effekte sinnvoll sein.

#### Verschleiß

Aktive Komponenten (z.B. Regelventile, Pumpen) können durch den Lastwechselbetrieb stärkerem Verschleiß ausgesetzt sein. In der Regel handelt es sich dabei um Betriebssysteme ohne sicherheitstechnische Bedeutung. Der Einfluss der Lastwechsel kann in den Wartungs- und Instandhaltungsplänen berücksichtigt werden.

Falls Komponenten von Sicherheitssystemen durch den Lastwechselbetrieb öfter aktiviert werden (z.B. Steuerelementantriebe), ist dies durch eine spezifizierte Anzahl von Lastwechseln in der Auslegung berücksichtigt worden (siehe oben). Gegebenenfalls würde über wiederkehrende Prüfungen ein Einfluss des Lastwechselbetriebs frühzeitig erkannt.

#### Chemie/Radiologie

Die durch den Lastwechselbetrieb verursachten Schwankungen der physikalischen Parameter (Druck, Temperatur, Durchsatz) des Reaktorkühlsystems sind für die Korrosionsvorgänge im Reaktorkühlsystem von eher untergeordneter Bedeutung. Abweichungen chemischer Parameter werden im Rahmen der ständigen Überwachung des Kühlmittels erkannt. Falls nötig, wird vom Personal eine Korrektur eingeleitet. Betriebserfahrungen zeigen keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss des Lastwechselbetriebs auf Korrosion und Dosisleistungen infolge von Korrosionspartikeln im Kühlmittel [8].

#### Verfahrenstechnik

Die verfahrenstechnischen Abläufe bei Lastrampen wurden grob bereits im Kapi-

tel 2 beschrieben. Bei einem Kernkraftwerk handelt es sich um eine Anlage mit mehreren ineinandergreifenden Regelungen und verschiedenen, sich gegenseitig beeinflussenden Systemen. Es kann Leistungszustände geben, in denen die Anlage „ruhiger“ betrieben werden kann (minimaler Eingriff betrieblicher Regelungen) als in anderen. Aus betrieblicher Sicht sind solche „ruhigen“ Leistungszustände vorzuziehen bzw. es wäre darauf hinzuwirken, diesen Leistungsbereich möglichst auszuweiten. Ein Beispiel für eine solche Verbesserung betrieblicher Abläufe wäre der Einsatz von drehzahlgeregelten Pumpen anstelle von Drosselarmaturen. Damit könnte gleichzeitig auch der elektrische Eigenbedarf der Anlage verringert werden.

#### Elektrik

Es ist kein wesentlicher Einfluss des Lastwechselbetriebs auf den Generator zu erwarten, da im Teillastbereich der Generator weniger Wirkleistung zu erbringen hat und somit die Reserven höher sind. Auch für die Transformatoren ist der Einfluss marginal, da im Teillastbereich der Maschinentransformator weniger belastet wird. Die Eigenbedarfstransformatoren sind nahezu unbeeinflusst vom Lastwechselbetrieb, da die Eigenbedarfsleistung nur wenig vom Lastzustand des Kraftwerks abhängt.

#### Transienten/Störfälle

Sicherheitsanalysen sind für Transienten des anormalen Betriebs und für Störfälle durchzuführen. Gemäß der Forderung des deutschen Regelwerks werden dabei die ungünstigsten Zustände des Normalbetriebs als Ausgangszustände für die Transienten und Störfälle unterstellt. Soweit Teillastzustände ungünstiger sind, wurde dies grundsätzlich schon in den Analysen berücksichtigt, da die durch Lastwechsel möglichen Reaktorzustände schon bisher genehmigt waren.

Lastwechselvorgänge haben Auswirkungen auf verschiedene Parameter, die den Ausgangszustand von möglichen Transienten beschreiben, wie z. B. Reaktorleistung, Kühlmitteltemperaturen, Kerndurchsatz, Xe-Konzentration und -Verteilung, kritische Borkonzentrationen, Leistungsverteilungen und Steuerelement-Stellungen. Die genannten Parameter werden durch diverse Regelungen, die Steuerelement-Einfahrtsgrenzen und verschiedene Leistungsbegrenzungen (mit Vorhalten z.B. für Kühlmittelverlust-Störfälle oder Notstromfall) in einem engen Bereich geregelt bzw. begrenzt. Auch wenn Lastwechselvorgänge verschiedene Parameter verändern, werden die Regelbereiche und die Ansprechwerte der Begrenzungen



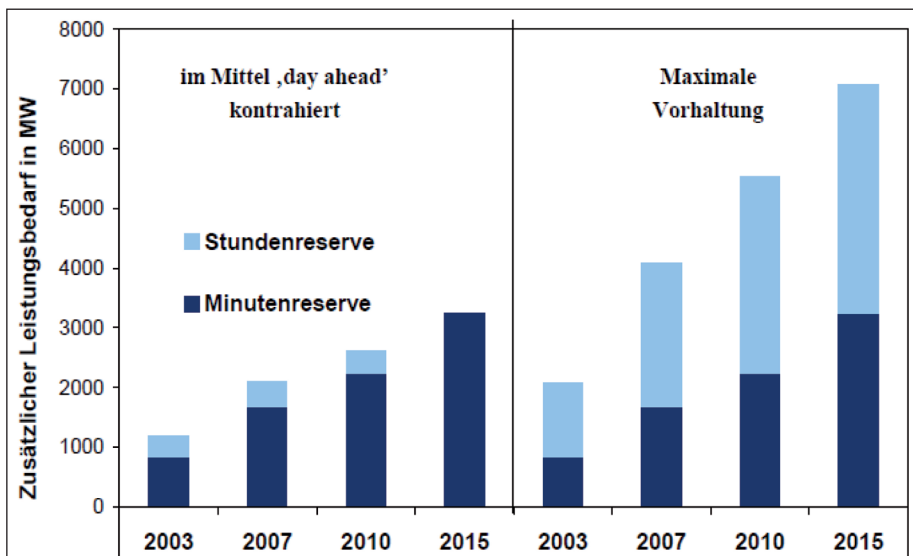


Abb. 6: Für Windkraftanlagen zusätzlich benötigte Regel- und Reserveleistung [9]

unabhängig von der Leistungsvorgeschichte eingehalten.

## 6 Schlussfolgerungen

Für Lastwechsel mit Leistungsgradienten von bis zu 2 %/min und Leistungshüben im Bereich zwischen ca. 50 bis 100 % liegen umfangreiche Betriebserfahrungen vor, teilweise auch für höhere Gradienten. Solche Lastwechsel in den vorhandenen KKW sind in Summe mit bis zu ca. 10.000 MW sicher ausreichend, um den nach den vorliegenden Analysen [9] erwünschten Ausgleich für ein schwankendes Windstromangebot abzudecken (s. *Abbildung 6*).

Wenn vom Netz größere Leistungsgradienten und -hübe gewünscht werden, kann dies ebenfalls realisiert werden. Je nach Anlage können zwar die derzeit maximal erreichbaren Gradienten/Hübe z.B. durch die Margen zu Ansprechwerten der Begrenzungen limitiert sein. Es gibt aber ausreichend Möglichkeiten, die Anlagen zu optimieren und höhere Leistungsgradienten zu erreichen. Ansatzpunkte sind beispielsweise:

- eine für Lastwechsel optimierte BE-Beladestrategie,
- optimierte Stueerelement-Fahrregelungen und
- vorausschauende Fahrweise.

Ebenso gibt es Optimierungsmöglichkeiten für eine anlagenschonende Fahrweise, vorzugsweise im Bereich betrieblicher Regelungen, um die durch Lastwechsel verursachten zusätzlichen Beanspruchungen zu mindern. Grundsätzlich sind die Belastungen infolge Lastwechselbetrieb aber bereits durch die Auslegung der KKW abgedeckt.

Die Sicherheit der KKW wird durch den Lastwechselbetrieb nicht beeinflusst, da

- alle relevanten Anlagenzustände (auch verschiedene Lastzustände) in den ab-

deckenden Sicherheitsnachweisen berücksichtigt wurden,

- zuverlässige Begrenzungen vorhanden sind,
- eine kontinuierliche Überwachung der Ermüdung von exponierten Komponenten gewährleistet ist und
- wiederkehrende Prüfungen von sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten durchgeführt werden.

Aus sicherheitstechnischer Sicht gibt es daher keine Einwände gegen einen Lastwechselbetrieb, wie er in Kombination mit einem weiteren Ausbau der regenerativen Energien benötigt würde.

Energiewirtschaftlich gesehen steigt mit zunehmendem Ausbau der regenerativen Energie der Bedarf an Kraftwerken, die für große, schnelle Laständerungen geeignet sind. Eine Kompensation der Einspeise-Schwankungen durch entsprechend große Speichermöglichkeiten ist für die nähere Zukunft nicht absehbar. Kernkraftwerke eignen sich daher besonders gut für ein Zusammenwirken mit regenerativen Energien.

## Literatur

- [1] Deutscher Bundestag, Drucksache 17/832, Große Anfrage der Fraktion der SPD vom 25.02.2010: Verlängerung von Restlaufzeiten von Atomkraftwerken – Auswirkungen auf die Entwicklung des Wettbewerbs auf dem Strommarkt und auf den Ausbau erneuerbarer Energien
- [2] Aleite, Werner: Lastfolgefähigkeiten von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren; VGB-Kongress „Kraftwerke 1985“
- [3] Hundt, Barth, Sun, Wissel, Voß: Verträglichkeit von erneuerbaren Energien und Kernenergie im Erzeugungsportfolio Institut für Energiewirtschaft und Ratio-

nelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2010

- [4] Deutsche Verbundgesellschaft e.V.: Das Versorgungsgerechte Verhalten der thermischen Kraftwerke; Heidelberg, Oktober 1991
- [5] Müller: Lastfolgebetrieb und Primärregelung – Erfahrungen mit dem Verhalten des Reaktors KKI 2; KTG Fachtagung Reaktorbetrieb und Kernüberwachung, FZ Rossendorf, Februar 2003
- [6] Frank: Lastfolgebetrieb und Primärregelung – Erfahrungen mit dem Verhalten des Reaktors KKI 1; KTG Fachtagung Reaktorbetrieb und Kernüberwachung, FZ Rossendorf, Februar 2003
- [7] atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie: Kernkraftwerke in Deutschland - Betriebsergebnisse 2009
- [8] Rich, Stellwag, Böttcher, Jürgensen, Holz, Markgraf, Schütz, Rübénich: Zink-Dosierung in Siemens-DWR Anlagen; VGB PowerTech 5/2010
- [9] DEWI / E.ON Netz / EWI / RWE Transportnetz Strom / VE Transmission: Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020; DENA-Netzstudie, Köln, 24. Februar 2005 ■

## Internationale Zeitschrift für Kernenergie



### Herausgeberbeirat:

Prof. Dr. Dr.-Ing. e. h. Adolf Birkhofer  
 Dr. Helmut Bläsing  
 Dr. Peter Fritz  
 Dipl.-Ing. Ulrich Gräber  
 Dr. Ralf Güldner  
 Dr. Norbert Haspel  
 Dr. Walter Hohlefeldler  
 Prof. Dr. Gerd Jäger  
 Dr. Johannes F. Lambertz  
 Dr. Joachim Ohnemus  
 Prof. Dr. Winfried Petry  
 Karl Schnadt  
 Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dirk Steinheider  
 Dr. Michael Süß  
 Prof. Dr. Bruno Thomauske  
 Prof. Dr. Frank-Peter Weiß  
 Dr. Hans-Josef Zimmer  
 Ernst Michael Züfle

### Redaktionsbeirat:

Ex officio der Vorsitzende der KTG sowie die Sprecher der KTG-Fachgruppen

### Redaktion:

Christopher Weißelmann  
 Im Tal 121, 45529 Hattingen  
 Telefon +49 2324-4397723, Fax +49 2324-4397724  
 E-Mail: redaktion@atomwirtschaft.de

### Verlagsanschrift:

INFORUM Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH  
 Robert-Koch-Platz 4, 10115 Berlin  
 Telefon: +49 30 498555-0, Fax: +49 30 498555-19  
 www.atomwirtschaft.de

### Geschäftsführung:

Dieter H. Marx, Berlin

### Verlagsleitung:

Dieter H. Marx, Berlin

### Copyright:

INFORUM Verlags- und Verwaltungsgesellschaft mbH  
 Alle Rechte vorbehalten. Namentlich gezeichnete Autorenbeiträge stellen nicht unbedingt die Meinung der Redaktion dar.

### Satz:

Waltraud Zimmer, Bonn  
 Telefon: +49 228 2428867, Fax: +49 228 2428967  
 E-Mail: w.zimmer@atomwirtschaft.de

### Druck:

in puncto druck + medien GmbH, Bonn

ISSN 1431-5254