

# **ZYKLUSVERLÄNGERUNG DER KONVOI-REAKTOREN DURCH STRECKBETRIEB – ANFORDERUNGEN UND ERFAHRUNGEN AUS SICHT DES BETREIBERS**

**Kai Kosowski, Marcus Seidl**

PreussenElektra GmbH, Hannover

[kai.kosowski@preussenelektra.de](mailto:kai.kosowski@preussenelektra.de), [marcus.seidl@preussenelektra.de](mailto:marcus.seidl@preussenelektra.de)

## **KURZFASSUNG**

Der Betriebszyklus der deutschen Druckwasserreaktoren kann über das natürliche Zyklusende hinaus bei vollständig entboriertem Primärkreis im so genannten Streckbetrieb nahtlos fortgesetzt werden. Dabei werden zusätzliche Strommengen erzeugt. Seit vielen Jahren wird ein Streckbetriebsmodus angewendet, der zu einem moderaten Rückgang der Reaktorleistung und zu einer sehr hohen Ausnutzung des Kernbrennstoffs führt.

Der Streckbetrieb hat eine Rolle bei der Brennelemente-Einsatzplanung gespielt, als historisch gesehen die Uranpreise vergleichsweise hoch waren. Zudem wurden dadurch flexible Revisionsplanungen ermöglicht. Bei den Planungen für das Ende des Leistungsbetriebs hat der Streckbetrieb eine neue Bedeutung erhalten, um die Brennstoffkosten und die Anzahl der abgebrannten Brennelemente zu reduzieren. Die Zykluslänge wurde in der Flotte der PreussenElektra auf 30 bis mitunter 90 Tage nach dem natürlichen Zyklusende verlängert. Die Anforderungen an die Machbarkeit des Streckbetriebs sowie die gewonnenen Erfahrungen werden beschrieben.

## **EINLEITUNG**

Im Leistungsbetrieb eines Druckwasserreaktors (DWR) wird zu Beginn des Zyklus (BOC) ein Reaktivitätsüberschuss vorgehalten, um den Reaktivitätsverlust durch Abbrand des Brennstoffs im Laufe des Zyklus und die Akkumulation von Spaltprodukten zu kompensieren und andere Effekte wie den Leistungsdefekt auszugleichen. Bei BOC wird die überschüssige Reaktivität durch Zugabe des Neutronengifts Bor in das Kühlmittel und durch die Anwesenheit von brennbaren Absorbern wie Gadolinium gebunden. Mit zunehmendem Abbrand im Laufe des Zyklus wird die überschüssige Reaktivität verbraucht. Die Borkonzentration wird daher kontinuierlich abgesenkt, um jederzeit eine ausgeglichene Reaktivitätsbilanz zu erhalten. Das natürliche Ende des Zyklus ( $EOC_{nat}$ ) ist definitionsgemäß erreicht, wenn die Borkonzentration auf einen Mindestwert nahe Null fällt.

Es ist möglich, den Leistungsbetrieb über  $EOC_{nat}$  hinaus fortzusetzen, wenn eine zusätzliche, positive Reaktivitätsquelle den Reaktivitätsverlust durch fortschreitenden Abbrand bzw. durch die weitere Ansammlung von Spaltprodukten kompensiert. Mögliche positive Reaktivitätsquellen bieten entweder eine Abnahme der Reaktorleistung (d. h. die Nutzung des Leistungsdefekts), eine Abnahme der Moderator-temperatur oder eine Kombination aus beidem.

Eine Abnahme der Reaktorleistung senkt in erster Linie die durchschnittliche Brennstofftemperatur und wirkt sich über den Dopplereffekt positiv auf die Reaktivität aus. Auch axiale und radiale Leistungsverteilung kann zu diesem positiven Effekt beitragen. Eine Abnahme der Moderator-temperatur bewirkt eine Erhöhung der Dichte und setzt ebenfalls eine positive Reaktivität über den Moderator-temperaturkoeffizienten frei. Diese zusätzlichen positiven Reaktivitätsquellen erhöhen die Ausnutzung des Kernbrennstoffs. Die Verlängerung des Betriebszyklus mit der vorhandenen Kernbeladung über das natürliche Zyklusende hinaus wird als Streckbetrieb bezeichnet. Die Reaktorleistung nimmt dabei stetig ab.

Veröffentlichte Literatur über den Streckbetrieb ist spärlich. Streckbetriebskonzepte wurden von Herstellern der Kraftwerke in Zusammenarbeit mit Betreibern entwickelt, untersucht und später in einen neuen Status quo der Betriebsgenehmigung überführt und von den Aufsichtsbehörden genehmigt. In den 1970er und 80er Jahren wurden Streckbetriebsfahrweisen in allgemeinen Publikationen beschrieben, z. B. [1], [2], [3]. Die Veröffentlichung von BÖHM et al. [4], die den Streckbetrieb aus der Sicht des

deutschen Herstellers Siemens KWU beschrieb, erschien bereits 1971, lange bevor die ersten Konvoi-Reaktoren der 1300 MW-Leistungsklasse in Betrieb gingen. CONRADS und ENDRIZZI verfassten einen Artikel – ebenfalls aus Herstellersicht – über den Streckbetrieb, insbesondere für die deutschen Vor-Konvoi-DWR und deren Vorgänger [5]. Aus Sicht eines Betreibers beschrieben KAHLSTATT und SGARZ 1986 den ersten Streckbetrieb im Kernkraftwerk (KKW) GROHNDE [6], auch eine Vor-Konvoi-Anlage. Berichte, die die Anwendung des Streckbetriebs beschreiben, erschienen gelegentlich in den 1990er und 2000er Jahren, z. B. im KKW ANGRA [7],[8], ebenfalls ein Vor-Konvoi, oder der erste erfolgreich durchgeführte Streckbetrieb in China im KKW DAYA BAY [9]. Auch einige französische und schweizerische KKW tauchen in Statistiken auf [10], [11]. In den letzten Jahrzehnten erschienen nur wenige Artikel über den Streckbetrieb, lediglich in Statistiken und beiläufig in Diagrammen zu Betriebsverläufen war die charakteristische Leistungsabnahme des Streckbetriebs zu erkennen, ohne besonders erwähnt zu werden.

Der Streckbetrieb wurde in den letzten über 35 Jahren für die gesamte Flotte der DWR von PreussenElektra in vielen Zyklen angewendet. Ursprünglich wurde diese Form der Zyklusverlängerung durchgeführt, um die Brennelementwechsel- und Revisionsplanung flexibler zu gestalten. Erst kürzlich diente das Schema als praktischer Ansatz zur Kostenoptimierung in Zeiten hoher Brennstoffpreise und für die letzten Zyklen einer Anlage vor der endgültigen Abschaltung. So haben die Konvoi-Anlagen die Zykluslänge vielfach auf 30 bis 90 Tage nach  $EOC_{nat}$  verlängert. Vor der endgültigen Stilllegung im Jahr 2015 wurde das KKW GRAFENRHEINFELD zwei Zyklen lang ohne frischen Kernbrennstoff betrieben.

Mit 35 Jahren und mehr sind die Methoden zur Erhöhung der Brennstoffausnutzung zwar nicht neu, aber durch die fast nicht vorhandene Thematisierung in Fachpublikationen ist ein Resümee der jahrzehntelangen Erfahrung und Wirksamkeit des Streckbetriebs angebracht.

## **MÖGLICHE STRECKBETRIEBSFAHRWEISEN**

Die DWR von PreussenElektra werden in zwei etablierten Streckbetriebsfahrweisen betrieben. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der möglichen Leistungsausnutzung, des Ausmaßes einer möglichen Zyklusverlängerung, des Umfangs notwendiger Eingriffe und Anpassungen von Parametern sowohl im Reaktorschutzsystem als auch im vorgelagerten Reaktorbegrenzungs-system. In den folgenden Unterabschnitten werden die Hauptmerkmale der verschiedenen Fahrweisen erläutert.

### **BETRIEBSFAHRWEISE GEMÄß STATIONÄREM TEILLASTDIAGRAMM**

Eines der Markenzeichen der Konvoi-Anlagen ist die konstante mittlere Kühlmitteltemperatur (KMT) im oberen Bereich des Teillastdiagramms, die zu minimalen Änderungen des Druckhalterfüllstands führt und die gute Belastbarkeit der Reaktoren auch bei schnellen Lastwechseln ermöglicht [12]. Die einfachste Möglichkeit, um Reaktivität für den weiteren Betrieb zu gewinnen, besteht darin, die Leistung gemäß stationärem Teillastdiagramm zu reduzieren, siehe Abb. 1a). Dazu wird der Sollwert der Generatorleistung manuell reduziert, während der KMT-Regler aktiviert bleibt, um die mittlere KMT innerhalb seines festen Toleranzbandes zu halten. Diese Fahrweise wird als Phase 3 bezeichnet.

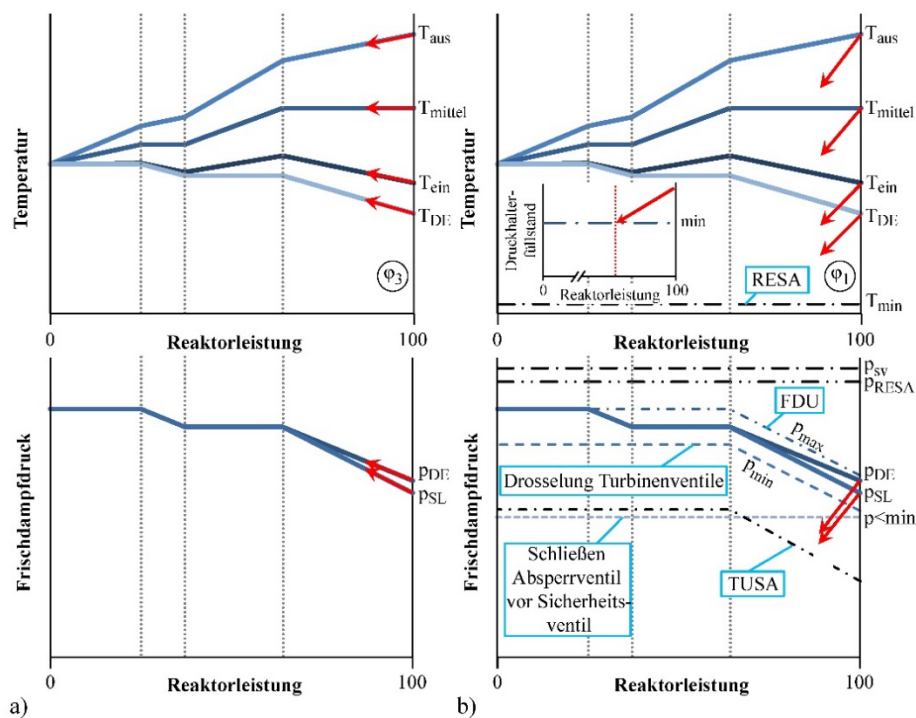
Durch diese Konstanzhaltung hat der Moderator keinen Reaktivitätsbeitrag. Andere Effekte, wie Änderungen der Brennstoffdichte, eine sich ändernde Xenonkonzentration und Leistungsumverteilungen, haben einen geringen Einfluss. Das heißt, der fortschreitende Reaktivitätsverlust durch Abbrand muss allein durch den positiven Reaktivitätsbeitrag infolge der Leistungsabsenkung mit Hilfe des Doppler-Effekts getragen werden, entsprechend (unerwünscht) hoch ist damit auch die Abnahme der Generatorleistung über die Streckbetriebszeit. Neben manuellen Eingriffen für den Sollwert der Generatorleistung und gegebenenfalls für die Position des Turbineneinlassventils sind keine weiteren Modifikationen notwendig. Phase 3 bietet zwar die geringste Leistungsausbeute nach  $EOC_{nat}$ , aber die Fahrweise ist vollständig konform mit dem Teillastdiagramm bzw. zum Anlagenzustand im Leistungsbetrieb.

### **BETRIEBSART MIT VOLLSTÄNDIG GEÖFFNETEN TURBINENEINLASSVENTILEN**

Eine weitere mögliche Streckbetriebsfahrweise besteht darin, die Reaktorleistung in Verbindung mit der mittleren KMT zu verringern. Dazu werden die Steuerstäbe aus dem Kern gezogen und die Turbineneinlassventile vollständig geöffnet. Einerseits wird dadurch der Frischdampfdruck vor den Turbineneinlassventilen abgesenkt, der Druck von gesättigtem Wasser bestimmt die Temperatur im Dampferzeuger

und durch die thermische Kopplung mit dem kalten Strang des Primärkreislaufts auch die Reaktoreintrittstemperatur. Andererseits erhöht sich durch den größeren Öffnungsquerschnitt der Frischdampf-massenstrom, die Turbine entzieht dem Primärkreis über den Sekundärkreis mehr Energie als der Reaktor in dem Moment bei gegebener Reaktivitätsbilanz erzeugen kann. Der Primärkreislauf wird kälter. Sowohl die Kühlmitein- als auch die -austrittstemperatur, und in der Folge die mittlere KMT, sinken stetig ab. Bevor der Wert der mittleren KMT das untere Totband des KMT-Reglers erreicht, wird der Grenzwert manuell nach unten verstellt, um ein weiteres Absinken aller Temperaturen zu ermöglichen. Die Temperaturen verlassen demnach die vorgegebenen Werte gemäß stationärem Teillastdiagramm.

Die sinkende Moderatortemperatur führt über die Erhöhung der Dichte zu einem zusätzlichen positiven Reaktivitätsbeitrag. Für eine ausgeglichene Reaktivitätsbilanz kann der positive Reaktivitätsbeitrag infolge des Doppler-Effekts um jenen des Moderators kleiner ausfallen. In der Folge muss die Reaktorleistung nicht mehr so stark fallen, um die Kritikalität aufrecht zu halten. Diese Option, beide positiven Reaktivitätsbeiträge zu nutzen, führt daher zu einer vergleichsweise moderaten Abnahme der Reaktorleistung und der maximal denkbaren Nutzung von Kernbrennstoff, siehe Abb. 1b). Die Reaktorleistung folgt der Turbinencharakteristik. Die Turbine extrahiert so viel Energie aus dem Reaktor, wie es die Reaktivitätsbilanz zulässt

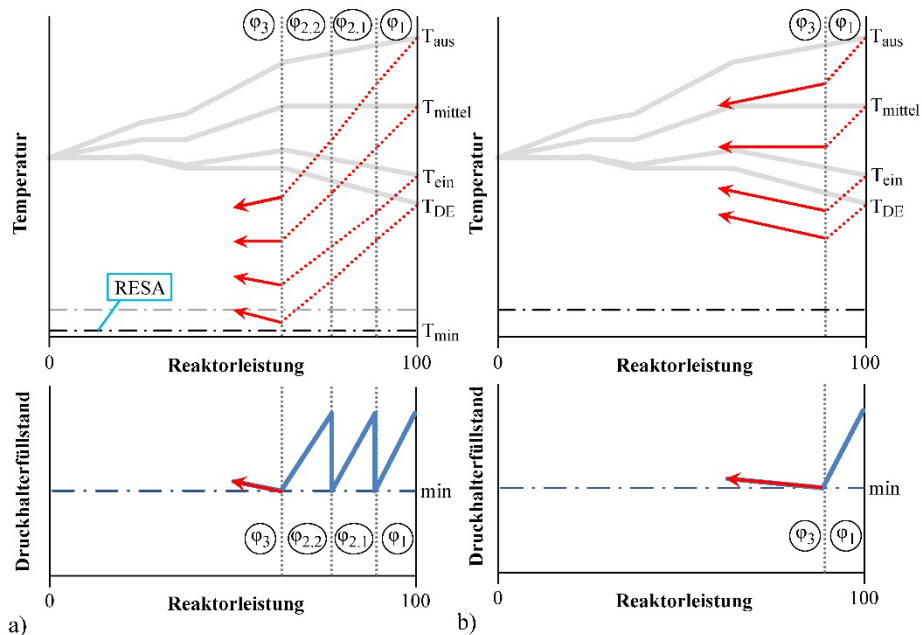


**Abbildung 1: Modus mit konstanter Moderatortemperatur a) und mit fallenden Temperaturen b)**

Das Gleiten sowohl der Moderatortemperatur als auch der Generatorleistung ist schwierig zu simulieren, wenn nicht ein vollständig gekoppeltes Modell mit Primärkreislauf, Sekundärkreislauf und einem Turbinenmodell vorliegt. Die Abnahme der Reaktorleistung und der KMT wurde traditionell empirisch aus dem Anlagenbetrieb abgeleitet. Typische Werte der Leistungsreduzierung liegen zwischen 0,3 und 0,4 Prozentpunkten pro Tag.

Die Erhöhung der Moderatordichte durch die kontinuierlich fallende KMT verursacht eine Volumenkontraktion im Primärkreislauf. Der Druckhalterfüllstand sinkt in der Folge ebenfalls kontinuierlich ab. Dieser Betriebsmodus wird in den DWR von PreussenElektra als Phase 1 bezeichnet. Sie endet, wenn der Druckhalterfüllstand seinen unteren Grenzwert erreicht hat, siehe Abb. 1b).

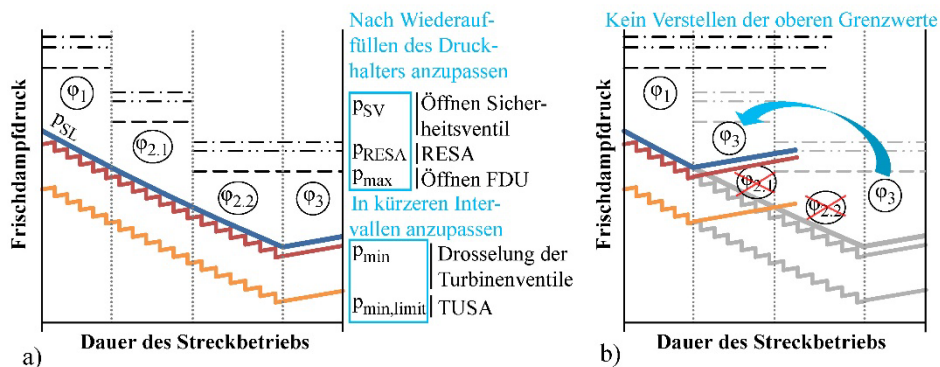
Eine Fortsetzung des Streckbetriebs ist nur möglich, wenn die zuvor beschriebene Phase 3 anschließt, Abb. 2b) oder eine Erhöhung des Primärkühlmittelinventars den Druckhalterfüllstand wieder auf seinen Vollast-Sollwert anhebt. Damit wäre ein weiteres Gleiten der Temperaturen möglich. In den DWR von PreussenElektra wird diese Option Phase 2 genannt, bestehend aus den Phasen 2.1 und 2.2, die durch ein zweites Auffüllen des Druckhalters abgegrenzt werden, siehe Abb. 2a).



**Abbildung 2:** Kombinationen der Streckbetriebsfahrweisen mit „Verlassen“ des Teillastdiagramms

## ALLGEMEINE SICHERHEITSANFORDERUNGEN

Das gesamte Spektrum der Sicherheitsanalysen wird auch während des Streckbetriebs eingehalten. Sicherheitsanalysen, die von BOC als konservative Randbedingung ausgehen, decken den Betrieb über  $EOC_{nat}$  hinaus ab. Sicherheitsanalysen, die  $EOC_{nat}$  als konservative Randbedingung angenommen haben, müssen dahingehend überprüft werden, ob sie weiterhin abdeckend sind oder einer Aktualisierung auf den Betriebszustand über  $EOC_{nat}$  hinaus bedürfen.



**Abbildung 3:** Gleiten des Drucks mit Verstellen der Grenzwerte zur Vermeidung eines Zufahrens der Turbinenstellventile (rot) bzw. der Auslösung einer TUSA (gelb), Vergleich mit Auslassen von Phase 2

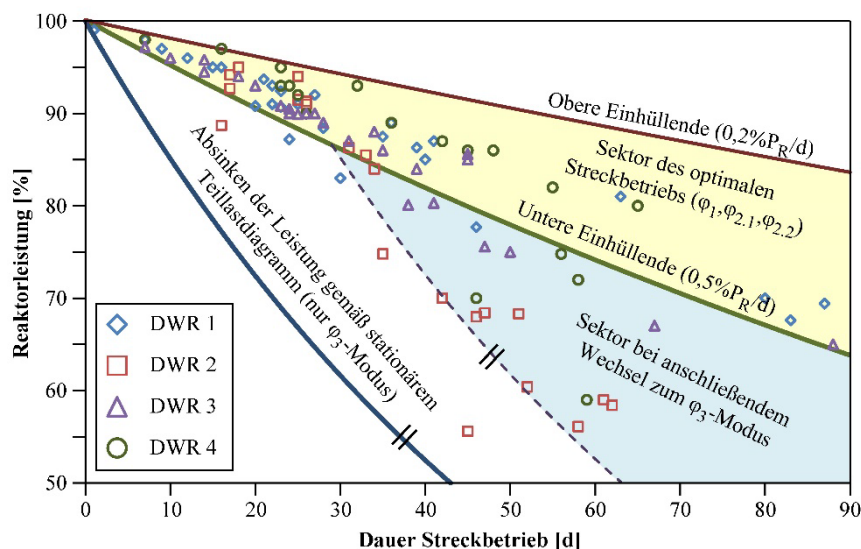
Da die Temperaturen in Phase 1 fallen und der Frischdampfdruck stetig abnimmt, verringern sich die Margen zu den unteren Grenzwerten von Reglern oder Begrenzungseinrichtungen oder sogar vom Reaktorschutz (Abb. 3). Andererseits ist auf die oberen Grenzwerte zu achten, deren Margen durch das Gleiten der Temperaturen größer werden. Die Grundlage der Grenzwerte im Reaktorschutzsystem ergibt sich aus dem stationären Teillastdiagramm des Anlagenzustands, die aktuellen Werte für Temperatur und Druck weichen aber im Laufe des Streckbetriebs deutlich von ihren Nominalwerten ab. Es muss daher sicherheitstechnisch bewertet werden, ob sowohl diese größeren Margen der oberen Grenzwerte als auch die geringen Margen der unteren Grenzwerte weiterhin akzeptabel sind, um alle anormalen Betriebszustände, Transienten und Störfälle sicher zu erkennen und Maßnahmen zur Beherrschung auszulösen. Bevor die gleitenden Werte von Temperatur und Druck auf untere Grenzwerte auflaufen, ist die rechtzeitige Anpassung dieser Grenzwerte – also das Verstellen nach unten, um die Marge wieder auf den ursprünglichen Abstand zu erhöhen – erforderlich, um unnötige Initiierungen zu



vermeiden. Der Begriff „rechtzeitig“ ist auf einer Zeitskala von Tagen zu verstehen, da sich die Temperaturen sehr langsam mit einem Gradienten von etwa 0,4 K pro Tag ändern. Somit bleibt genügend Zeit für die Anpassungen. Dieses Verstellen von Grenzwerten ist im Rahmen der Lizenzierung des Streckbetriebs ebenso sicherheitstechnisch hinsichtlich Störfallerkennung zu bewerten. Eine ausführliche Beschreibung ist in [13] zu finden.

## BETRIEBSERFAHRUNGEN

Resümiert man die letzten Jahrzehnte des Leistungsbetriebs in der DWR-Flotte von PreussenElektra, so war der Streckbetrieb keine gelegentliche Ausnahme. Im Gegenteil, er wurde in den meisten Zyklen durchgeführt (siehe Abb. 4). Unabhängig vom Leistungsverlauf des eigentlichen Betriebszyklus können im Streckbetrieb zusätzliche Strommengen erzeugt werden. Im ersten Jahrzehnt des Anlagenbetriebs führten viele Anlagen einen vollständigen Streckbetrieb durch, inklusive zweimaligem Wiederauffüllen des Druckhalters mit entsprechender Anpassung von Reaktorschutzgrenzwerten (Betrieb im gelben Sektor in Abb. 4). In den 1990er Jahren, als in Deutschland die meisten KKW in Betrieb waren, mussten Revisions- und Nachladeintervalle eng aufeinander abgestimmt werden, um den enormen Bedarf an technischen Fachkräften für wiederkehrende Prüfungen zu bewältigen. Eine Just-in-Time-Verlängerung der Zykluslänge mit dem Streckbetrieb war dabei vorteilhaft. Ein weiterer Aspekt in der Vergangenheit und heute sind die Brennstoffkosten. Höhere Uranpreise oder höhere Steuern auf spaltbares Material geben mehr Anreiz für eine erhöhte Nutzung von Kernbrennstoffen, wobei das Gegenteil zutrifft, wenn die Preise sinken.



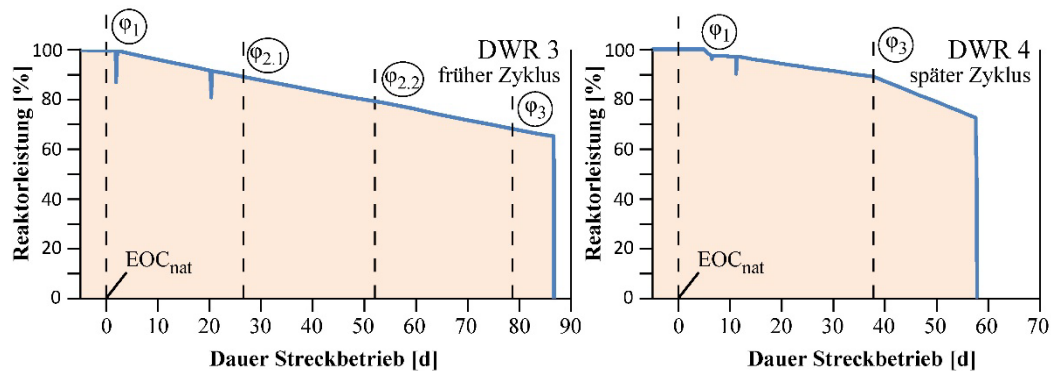
**Abbildung 4: Reaktorleistung am Ende des Streckbetriebs**

Die gewählte Fahrweise oder Kombinationen derselben hängen von der geplanten Dauer des Streckbetriebs und dem Umfang der manuellen Eingriffe ab. In der Regel gehen alle Anlagen mit einem Phase-1-Betrieb mit fallenden Temperaturen in den Streckbetrieb (gelber Sektor in Abb. 4). Ursprünglich wurden danach Phase 2.1, Phase 2.2 und Phase 3 sequentiell durchgeführt, siehe Abb. 5a).

In der Regel war mit der Implementierung von Phase 2.2 die beabsichtigte Zyklusverlängerung bereits sehr ausreichend, so dass Phase 3 übersprungen oder nur kurz betrieben wurde. Da Phase 2 ein Verändern von Reaktorschutzgrenzwerten erforderte, wurde sie später nicht mehr verwendet. Daher ist die häufigste Fahrweise heute Phase 1 + 3. In Abb. 4 würde der Verlauf der Reaktorleistung den gelben Sektor verlassen und in den blauen Sektor mit einem signifikanten Leistungsabfall im Laufe der Zeit schwenken. Die Abnahme der Leistung folgt einem imaginären Gradienten, der der blauen Kurve gleicht, welche aber parallel zum Ende der Phase 1 (ca. 30 bis 35 Tage) verschoben ist. Der Leistungsverlauf in Abb. 5b) zeigt den charakteristischen Knick beim Umschalten auf Phase 3.

Der wesentliche Vorteil dieser Kombination aus Phase 1 + 3 besteht darin, dass für die Sollwerte im Reaktorschutzsystem und im Reaktorbegrenzungssystem nur minimale Eingriffe erforderlich sind.

Nachteilig ist die stärkere Abnahme der Reaktorleistung gegenüber einem inkludierten Phase-2-Betrieb, was sich in dem zuvor erwähnten charakteristischen Knick im Leistungsverlaufsdiagramm widerspiegelt. Weitere Erfahrungen zum Streckbetrieb auch im Hinblick auf die Lastfolgefähigkeit sind in [13] aufgeführt.



**Abbildung 5:** Typisches Absinken der Reaktorleistung während Phase 1 + 2,1 + 2,2 und kurzer Phase 3 (links) gegenüber Phase 1 + 3 mit charakteristischem Knick (rechts)

## SCHLUSSFOLGERUNG

Die Verlängerung des Betriebszyklus der Konvoi-Druckwasserreaktoren von PreussenElektra über das natürliche Zyklusende hinaus war „business as usual“. Die Anwendung des Streckbetriebs in den meisten Zyklen der DWR-Flotte von PreussenElektra in über 35 Jahren führte praktisch zu keinen Problemen oder nachteiligen Auswirkungen auf das Anlagenverhalten. Die Dauer des Streckbetriebs hängt von vielen Faktoren ab: Flexibilität des Revisionsbeginns, Kostenvorteil der Brennstoffeffizienz gegenüber der Brennstoffbeschaffung, Stromverkaufspreis und Besteuerungssystem für spaltbares Material.

Abhängig von der Kombination der Fahrweisen und dem Umfang der (gewünschten) manuellen Eingriffe ist eine Verlängerung der Zykluslänge zwischen 30 und 90 Tagen nach natürlichem Zyklusende mit zusätzlicher Erzeugung von erheblichen Strommengen möglich.

## REFERENZEN

- [1] Lobo, L., "Coast Down in Light Water Reactors as a Fuel Management Strategy", M.Sc. Thesis, *Massachusetts Inst. of Tech*, Cambridge, USA, Nuclear Engineering Department, Dec. 1980, Available from INIS: [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:13650800](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:13650800)
- [2] Fujita, E. K., Driscoll, M. J., and Lanning, D. D., "Design and fuel management of PWR cores to optimize the once-through fuel cycle". *Massachusetts Inst. of Tech*, Cambridge, USA, Energy Lab., Aug. 1978. <https://doi.org/10.2172/6670045>
- [3] Matzie, R.A. "Uranium resource utilization improvements in the once-through PWR fuel cycle". *Technical report*, Combustion Engineering, Inc., Windsor, CT, USA. 1980. <https://doi.org/10.2172/6816911>
- [4] Böhm, W., Janssen, U., Kollmar, W., Märkl, H., Voigt, O., "Load Following Behaviour and Cycle Duration Flexibility of Light Water Reactor Power Stations" *Additional paper of the Fourth United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, Switzerland, September 6-16, 1971, AED-CONF-71-100-04
- [5] Conrads, H., Endrizzi, I., "Stretchout operation in pressurized water reactor plants,". *Atomkernenergie Kerntechnik*, **48**(1), pp. 7-10. ISSN 0171-5747, Germany 1986
- [6] Kahlstatt, P., Sgarz, G., "Stretch-out Operation 1985/86 in the Grohnde Joint Nuclear Power Plant". *VGB Kraftwerkstechnik*, **67**(1), pp. 1-4. ISSN 0372-5715. Germany 1987
- [7] Sakai, M., "An economic analysis of stretch-out for Angra-1 reactor; Uma análise economica de stretch-out para Angra-1", *Technical report* CDTN-DETR--240/89. Brazil. 1989
- [8] Dias, A.; Ferreira Junior, D. B. M.; Monteiro Morgado, M.; Oliveira dos Santos, B.; Nunes Oliveira, M. G., "Prediction and attendance of Angra 2 nuclear power plant cycle extension". *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007*, Santos, Brazil, Sep 30 to Oct 5, 2007 Associação Brasileira de Energia Nuclear. ISBN: 978-85-99141-02-1
- [9] Li Xianfeng, Xiao Min, Zhu Minhong, "The research and implementation of the stretch-out operation in Daya Bay Nuclear Power Station," *Proceedings of the 6th international topical meeting on nuclear reactor thermal hydraulics, operations and safety, (NUTHOS-6)*, Nara, Japan, Oct 4-8, 2004, Paper ID. N6P113, pp. 3690.
- [10] Eurostat, "Operation of Nuclear Power Stations", *Statistical office of the European Community*, Luxembourg, ISBN 92-825-4537-7, 1983
- [11] Swiss Association for Atomic Energy, "Summary of Operating Experience in Swiss Nuclear Power Plants", 2002
- [12] Kosowski, K.; Diercks, F., "Quo Vadis, Grid Stability?" *atw International Journal for Nuclear Power* **66** (2), pp 16–26. ISSN 1431-5254. Germany 2021
- [13] Kosowski, K.; Seidl, M., "Operation Cycle Length Extension of a Konvoi PWR – Requirements and Experience from Operator's Viewpoint", *19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19)*, Brussels, Belgium, March 6-11, 2022, Paper ID: 35039.