

Der Streckbetrieb – wie funktioniert er und warum eigentlich?

Kai Kosowski, Marcus Seidl

In der derzeitigen Diskussion um eine Laufzeitverlängerung wird immer wieder der sogenannte Streckbetrieb erwähnt. Der Begriff wird mitunter bereits von Publikumsmedien aufgegriffen und Erklärungsversuche werden vorgenommen, aber der interessierte Leser erhält keine intuitive Darstellung wie der Streckbetrieb in der Praxis funktioniert. Die oberste Bundesbehörde BMUV für die sicherheitstechnische Aufsicht und das BMWK haben sich in ihrem Prüfvermerk zur Laufzeitverlängerung¹ auch über den Streckbetrieb eingelassen. Zum Beispiel wurde dargelegt, dass der Streckbetrieb keine zusätzlichen Strommengen bringe. Der Branchenverband KernD sowie Gutachterorganisationen und auch der Pro-Kernkraft Verein Nuklearia e. V. haben den Prüfvermerk mittlerweile in eigenen Stellungnahmen widerlegt^{2 3 4}. Im Folgenden werden wir den Mechanismus des Streckbetriebs erläutern und das beweisen, was schon seit über 30 Jahren bekannt ist: der Streckbetrieb stellt eine zusätzliche Reserve dar, die im kommenden Winter leicht genutzt werden könnte. Und diese zusätzlich erzeugbaren Strommengen sind erstaunlich groß im Vergleich zu dem, was konventionelle Kraftwerke erzeugen können. Aber der Reihe nach.

Einmal mit Brennstoff beladen und ein Jahr lang und mehr Strom erzeugen – der Kernreaktor

Anders als die Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen, haben Kernkraftwerke keine kontinuierliche Brennstoffzufuhr zum Beispiel mittels Gaseinspritzung, Kohleförderband oder ähnliches. Der Reaktorkern wird mit Brennelementen, die Kernbrennstoff enthalten, beladen und in ihnen ist typischerweise die komplette Energiemenge für ein Jahr Erzeugung gespeichert. Der Reaktor-druckbehälter wird verschlossen und der Reaktor erzeugt nach dem Hochfahren durch kontrollierte Kettenreaktion die zur Dampferzeugung erforderliche Wärme. Nach etwa einem Jahr wird der Reaktor wieder heruntergefahren, der Reaktor-druckbehälter geöffnet und etwa ¼ der abgebrannten Brennelemente gegen neue austauscht. Dieser Zeitraum der durchgängigen Stromerzeugung wird als ein Betriebszyklus bezeichnet. Da innerhalb des Betriebszyklus kein Brennstoff von außen zugeführt wird, muss der Reaktor mit den eingeladenen Brennelementen sozusagen haushalten. Mit den frisch beladenen Brennelementen ist zu Beginn des Zyklus (BOC) ein Überschuss an spaltbaren Uran U-235 vorhanden. Der Reaktorkern weist einen hohen Reaktivitätsüberschuss auf. Fängt ein U-235-Kern ein Neutron ein, wird er instabil und

zerfällt in Spaltprodukte. Zudem werden im Mittel zwei bis drei neue Neutronen freigesetzt. Für eine kontrollierte Kettenreaktion wird allerdings nur ein Neutron benötigt, das zudem entschleunigt, also abgebremst werden muss, um vom nächsten Urankern eingefangen werden zu können. Das Abbremsen erfolgt durch den Moderator. In den Druckwasserreaktoren dient das Wasser sowohl als Kühlmittel als auch als Moderator. **Abbildung 1** zeigt schematisch die kontrollierte Kettenreaktion in einem Druckwasserreaktor. Im Wasser stößt das schnelle Neutron mit einem Wassermolekül zusammen, prallt ab, wird umgelenkt und verliert dadurch an Geschwindigkeit, stößt flipperartig auf die nächsten Wassermoleküle und verlangsamt sich weiter.

Im Laufe des Betriebszyklus wird das spaltbare Uran durch Kernspaltung in Spaltprodukte umgewandelt und verbraucht. Man sagt, der Brennstoff wird abgebrannt, Spaltprodukte werden akkumuliert. Für die kontrollierte Kettenreaktion muss die Neutronenbilanz während des Betriebszyklus jedoch stets ausgeglichen sein. Da sich der Reaktivitätsüberschuss kontinuierlich während des Betriebszyklus verringert, bedarf es eines Mechanismus, um einerseits den Reaktivitätsüberschuss zu BOC – es gibt sehr viele spaltbare Urankerne

1 BMWK, BMUV „Prüfung des Weiterbetriebs von Atomkraftwerken aufgrund des Ukraine-Kriegs“ Prüfvermerk, 07.03.2022; <https://www.bmuv.de/download/pruefung-des-weiterbetriebs-von-atomkraftwerken-aufgrund-des-ukraine-kriegs>

2 KernD „Fachliche Kommentierung des Prüfvermerks der Bundesregierung „Prüfung des Weiterbetriebs von Atomkraftwerken aufgrund des Ukraine-Kriegs“ durch den Verband Kerntechnik Deutschland e. V. (KernD)“, Stellungnahme, 15.03.2022; https://www.kern-d.de/assets/docs/presse/Kommentar_KernD_Pruefvermerk_BReg_Weiterbetrieb_KKW.pdf

3 TÜV Stellungnahme zum Prüfvermerk, z. B. hier <https://www.sueddeutsche.de/bayern/atomkraft-laufzeit-isar-2-tuev-gutachten-1.5608181> <https://www.n-tv.de/politik/TUV-Weiterbetrieb-von-Isar-2-problemlos-moeglich-article23419334.html>

4 Nuklearia Stellungnahme „Kernkraftwerke bieten erhebliche Reserven für den Winter 2022/23“, 15.03.2022; <https://nuklearia.de/2022/03/15/kernkraftwerke-bieten-erhebliche-reserven-fuer-winter-2022-23/>

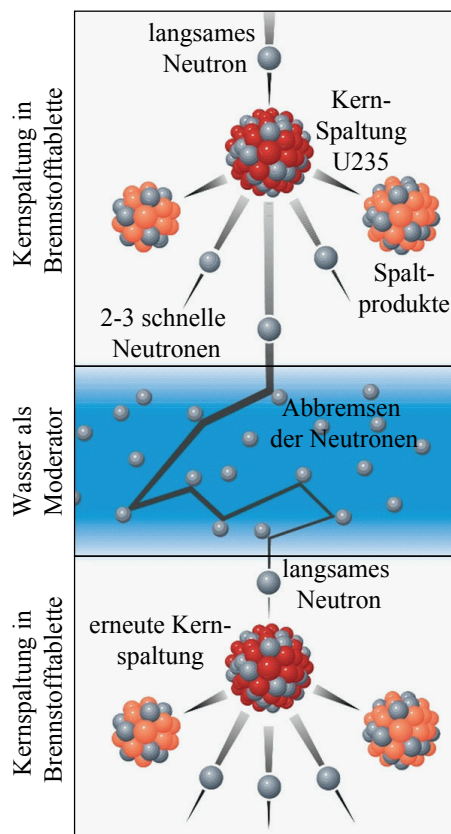


Abb. 1
Kontrollierte Kettenreaktion.

– zu binden und andererseits die schwindende Reaktivität zu EOC – die Urankerne wurden zu Spaltprodukten umgewandelt und nur wenige verbleiben – nicht vollständig zu verlieren. Durch Zugabe von Borsäure in das Wasser wird zu Beginn die überschüssige Reaktivität gebunden. Statt im nächsten Urankern eine Spaltung auszulösen, werden überschüssige Neutronen vom Bor absorbiert und stehen nicht mehr zur Verfügung.

Mit zunehmendem Abbrand und kontinuierlich sinkender Reaktivität würde die Absorption der Neutronen durch Bor die Neutronenbilanz verschlechtern. Die Borkonzentration im Wasser 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, der Primärkreis vollständig entboriert ist, siehe **Abbildung 2**.

Ein weiterer Betrieb wie bisher führt dazu, dass die Neutronenbilanz nicht mehr ausgeglichen wird. Ein langsames Neutron findet unter der Vielzahl von Spaltprodukten und der kleinen U-235 Konzentration keinen spaltbaren Urankern mehr und wird womöglich anderweitig absorbiert und ist für die kontrollierte Kettenreaktion verloren. Der Reaktor

erreicht nicht mehr 100 % Leistung und würde sich langsam selbst abschalten.

Tank leer – oder doch nicht? Der Streckbetrieb

An dieser Stelle kommt der so genannte Streckbetrieb zum Einsatz und ermöglicht einen nahtlosen Weiterbetrieb des Reaktors bei vollständig entboriertem Primärkreis um weitere 60 bis 90 Tage. Das für Außenstehende vermutlich Unbegreifliche an der Sache ist, dass die Reaktoren dafür *keinen* neuen Brennstoff benötigen, also der Reaktordruckbehälter weder geöffnet wird noch Brennelemente nachgeladen werden. Hier ist offenbar ein gedanklicher Knoten im Kopf bei den meisten Laien.

Eine sachkenntliche Analyse der Reaktivitätsbilanz zeigt, dass die Reaktoren auch nach dem natürlichen Zyklusende noch erhebliche Leistungsreserven besitzen. Nicht der „Tank“ ist leer, sondern die Tankanzeige zeigt Null. Seit über 30 Jahren ist bekannt, dass die Kerne noch eine Zeitlang weiterbetrieben werden können, ohne dass sich die Tankanzeige ändert. Wie ist das möglich?

Dazu muss man wissen, dass die Brennelemente etwa vier Jahre im Reaktorkern verbleiben und nicht nach jedem Betriebszyklus allesamt ausgetauscht werden. Vergleichbar ist das mit der „Verweilzeit“ der neuen Schüler in einer Grundschule. Zu den zuletzt zugelassenen frischen Brennelementen (die frischen Erstklässler) gesellen sich die Brennelemente, die schon einen Betriebszyklus im Kern standen, sowie diejenigen, die zwei oder drei Jahre Standzeit aufweisen. Es ist einleuchtend, dass die Brennelemente mit kürzerer Standzeit selbstverständlich auch höhere Leistungsreserven haben als die drei- oder vierjährigen Brennelemente. Normalerweise wechselt man am Ende eines Betriebszyklus von 12 Monaten gemäß dem FIFO-Prinzip (First In – First Out) nur das älteste Viertel aller Brennelemente gegen frische aus, die

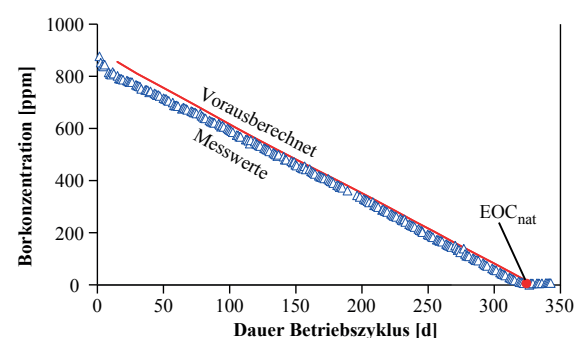


Abb. 2
Abnahme der Borkonzentration entlang des Betriebszyklus zur Aufrechterhaltung der Kritikalität.

übrigen sind noch nutzbar und bleiben im Kern. **Abbildung 3** veranschaulicht die Abbrands- und Reaktivitätsreserven der Brennelemente unterschiedlicher Standzeiten im Kern am Beispiel einer Anlage zum Zyklusende. Die frischesten Brennelemente haben erst einen Abbrand von 12–20 MWd/kgU erfahren, während die zweijährigen Brennelemente etwa den doppelten Abbrand aufweisen, und so weiter.

Die Leistungsreserve der frischeren Brennelemente ist zwar vorhanden, aber es hapert zum natürlichen Zyklusende an der ausgeglichenen Neutronenbilanz. Der Leistungsbetrieb kann über das

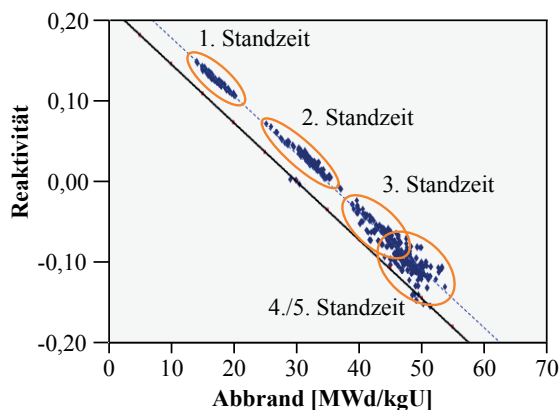


Abb. 3

Verteilung des Abbrand zu EOC am Beispiel eines Betriebszyklus.

natürliche Zyklusende hinaus fortgesetzt werden, wenn eine zusätzliche, positive Reaktivitätsquelle den Reaktivitätsverlust durch fortschreitenden Abbrand des Urans kompensiert und die Neutronenbilanz wieder ausgleicht. Eine mögliche positive Reaktivitätsquelle bietet die Absenkung der Wassertemperatur. Dies bewirkt eine Erhöhung der Dichte des Wassers im Wasserspalt zwischen den Brennstäben (**Abbildung 1**). Anfangs schnelle Neutronen aus der Kernspaltung treffen nun mit höherer Wahrscheinlichkeit auf dichter gedrängte Wassermoleküle und werden flipperartig besser abgebremst, wodurch mehr langsame Neutronen für die Fortsetzung der kontrollierten Kettenreaktion zur Verfügung stehen. Die Neutronenbilanz hat sich dadurch verbessert. Die Verlängerung des Betriebszyklus mit der vorhandenen Kernbeladung über das natürliche Zyklusende hinaus wird als Streckbetrieb bezeichnet.

Bei der Fahrweise mit sinkender Primärwassertemperatur werden die Turbineneinlassventile vollständig geöffnet. Einerseits erhöht sich durch den größeren Öffnungsquerschnitt der Turbineneinlassventile der Durchsatz an Frischdampf, die Turbine als Wärmesenke entzieht dem Primärkreis über den Sekundärkreis mehr Energie als die

Wärmequelle Reaktor in dem Moment bei gegebener Reaktivitätsbilanz erzeugen kann. Andererseits bewirkt das Öffnen der Turbineneinlassventile, dass der Druck stromaufwärts absinkt. Durch Sättigungsbedingungen im Dampferzeuger bestimmt der sinkende Druck vor dem Turbineneinlassventil die Temperatur im Dampferzeuger und durch die thermische Kopplung mit dem kalten Strang des Primärkreislaufs auch die Reaktoreintrittstemperatur. Der Primärkreislauf im Druckwasserreaktor wird in der Folge kälter und liefert über die Erhöhung der Dichte den zusätzlichen positiven Reaktivitätsbeitrag. Insgesamt folgt die Reaktorleistung der Charakteristik der Turbine, d. h. die Turbine extrahiert so viel Energie aus dem Reaktor, wie es die Reaktivitätsbilanz zulässt. Die Reaktorleistung nimmt dabei stetig ab.

Die Abnahme der Reaktorleistung und das Absinken der Wassertemperatur wurde traditionell empirisch aus dem Anlagenbetrieb abgeleitet. Typische Werte der Leistungsreduzierung liegen zwischen 0,3 und 0,4 Prozentpunkten pro Tag.

Die für die Neutronenbilanz erforderliche kontinuierliche Dichteerhöhung des Wassers bewirkt eine Volumenkontraktion im Primärkreislauf, welche sich im Füllstand des Druckhalters bemerkbar macht: Er sinkt in der Folge ebenfalls kontinuierlich ab. Diese Betriebsphase, bis der Füllstand seinen unteren Grenzwert erreicht, wird als Phase 1 bezeichnet.

Eine Fortsetzung des Streckbetriebs ist danach nur möglich, wenn der Druckhalterfüllstand wieder aufgefüllt wird. Damit wäre ein weiteres Gleiten der Temperaturen verbunden mit der notwendigen Dichteerhöhung möglich. Diese Option wird Phase 2 genannt, bestehend aus den Phasen 2.1 und 2.2, die durch ein zweites Auffüllen des Druckhalters abgegrenzt werden.

Da die Temperaturen fallen und der Druck im Dampferzeuger stetig abnimmt und die Werte im Laufe des Streckbetriebs deutlich von ihren Nominalwerten abweichen, verringern sich die Abstände zu den unteren Grenzwerten von Reglern oder Begrenzungseinrichtungen oder sogar vom Reaktorschutz. Bei den oberen Grenzwerten werden die Abstände allerdings größer. Es muss daher sicherheitstechnisch gewährleistet werden, dass diese größeren Abstände zu oberen Grenzwerten als auch die geringen Abstände zu unteren Grenzwerten weiterhin akzeptabel sind, um alle Störfälle sicher zu erkennen und Maßnahmen zur Beherrschung auszulösen.

Um unnötige Grenzwertauslösungen zu vermeiden, die sinkenden Werte von Temperatur und Druck auf untere Grenzwerte auflaufen, ist die rechtzeitige Anpassung dieser Grenzwerte – also das Verstellen nach unten, um die Abstände wieder auf den ursprünglichen Wert zu erhöhen – erforderlich. Dieses Verstellen von Grenzwerten und der Betrag des Verstellens ist im Rahmen der Lizenzierung des Streckbetriebs schon seit vielen Jahren geübte Praxis. Eine ausführliche Beschreibung ist in ⁵ und ⁶ zu finden.

Der Streckbetrieb ist business as usual – Betriebserfahrungen

Der Streckbetrieb wurde in den letzten über 35 Jahren in vielen Betriebszyklen angewendet. Ursprünglich wurde diese Form der Zyklusverlängerung durchgeführt, um den Kernbrennstoff in Zeiten hoher Brennstoffpreise besser auszunutzen und um die Brennelementwechsel- und Revisionsplanung flexibler zu gestalten. **Abbildung 4** zeigt eine Punktwolke. Jeder Punkt steht für einen Betriebszyklus, bei dem Streckbetrieb durchgeführt wurde. Die Punkte geben die Reaktorleistung am Ende des Streckbetriebs an. Es bestand nie die Notwendigkeit, länger als 60 Tage Streckbetrieb zu fahren, aber die Druckwasserreaktoren können es. Praktisch haben sie sogar ein paar Mal fast 90 Tage erreicht. Theoretisch ginge noch länger.

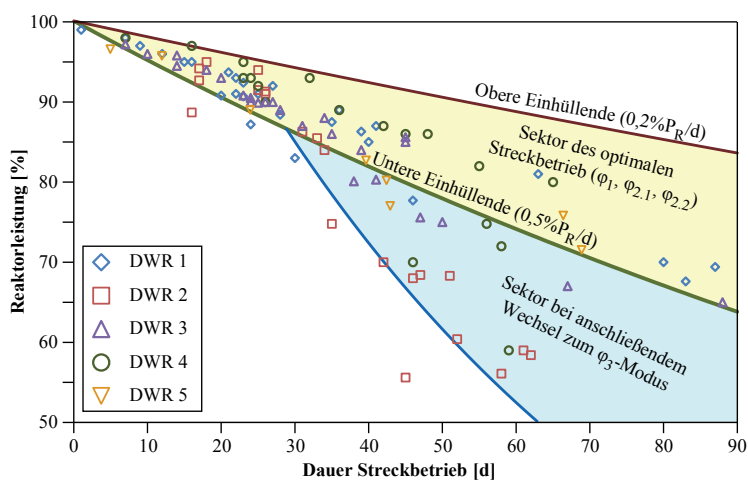


Abb. 4
Reaktorleistung am Ende des Streckbetriebs.

Unabhängig vom Leistungsverlauf des eigentlichen Betriebszyklus, also unabhängig davon, ob Leistung in den Sommermonaten gedrosselt wurde, 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 Grenzwerten (Betrieb im gelben Sektor in **Abbildung 4**). In den 1990er Jahren, als in Deutschland die meisten Kernkraftwerke 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.

An die Phasen 1, 2.1 und 2.2 mit zweimaligem Auffüllen des Druckhalters schließt sich die Phase 3 an, die dadurch gekennzeichnet ist, dass die Temperaturen nicht weiter abgesenkt werden, sondern nur noch die Reaktorleistung. Eine Abnahme der Reaktorleistung weist ebenfalls einen positiven Reaktivitätsbeitrag aus. Ein weiteres Anpassen von Grenzwerten ist dann nicht mehr erforderlich. Allerdings fehlt nun der Reaktivitätsbeitrag durch das Absinken der Wassertemperaturen. Um dies zu kompensieren, erfolgt die Leistungsabsenkung pro Tag entsprechend größer.

In der Regel war mit den Phasen 1 + 2.1 + 2.2 die beabsichtigte Zyklusverlängerung bereits sehr ausreichend, so dass Phase 3 übersprungen oder nur kurz betrieben wurde. Da Phase 2.1 und 2.2 ein Verändern von Grenzwerten erforderte, wurde sie später nicht mehr verwendet. Daher ist die häufigste Fahrweise heute Phase 1 + 3. In **Abbildung 4** würde beim Wechsel auf Phase 3 der Verlauf der Reaktorleistung den gelben Sektor verlassen und in den blauen Sektor mit einem signifikanten Leistungsabfall im Laufe der Zeit schwenken. Der rechte Leistungsverlauf in **Abbildung 5** zeigt den charakteristischen Knick beim Umschalten auf Phase 3.

Der wesentliche Vorteil dieser Kombination aus Phase 1 + 3 besteht darin, dass nur minimale Eingriffe bei der Grenzwertverstellung erforderlich sind. Nachteilig ist die stärkere Abnahme der Reaktorleistung gegenüber einem vollständig durchgeführten Streckbetrieb. Weitere Erfahrungen zum Streckbetrieb sind in ⁵ und ⁶ aufgeführt.

Doch welche zusätzliche Strommenge kann im Streckbetrieb erzeugt werden? Betrachten wir den

5 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.
6 Kosowski, K.; Seidl, M., "Zyklusverlängerung der Konvoi-Reaktoren durch Streckbetrieb – Anforderungen und Erfahrungen aus Sicht des Betreibers", Proceedings Kerntechnik 2022, Leipzig, 21./22. Juni 2022; <https://www.kerntechnik.com/kerntechnik-wAssets/docs/2022/Proceedings.zip>

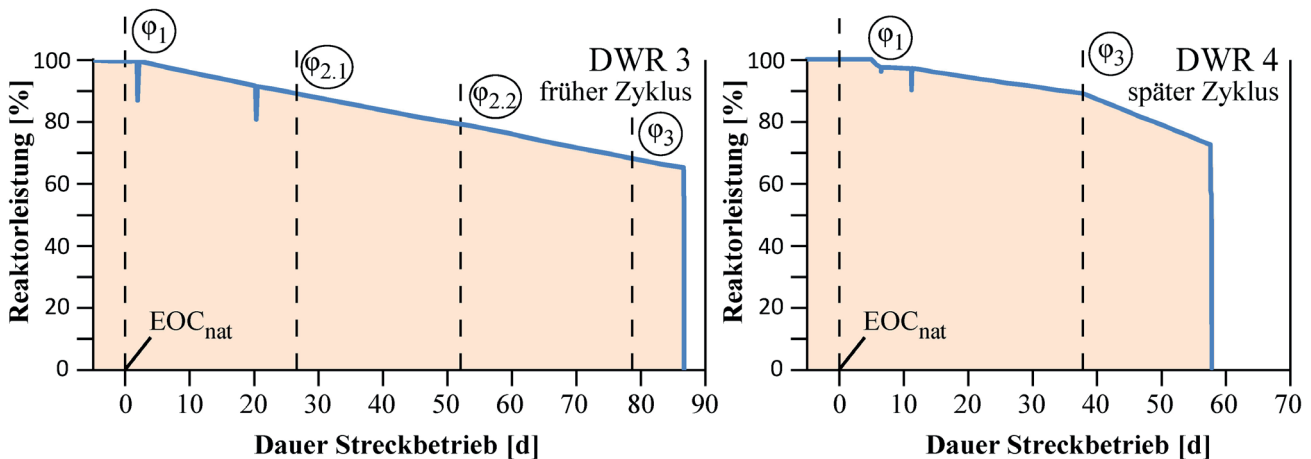


Abb. 5

Typisches Absinken der Reaktorleistung während Phase 1+2.1+2.2 und kurzer Phase 3 (links) gegenüber Phase 1+3 mit charakteristischem Knick (rechts).

linken Verlauf in **Abbildung 5**: nach 88 Tagen liegen noch 70 % der Reaktornennleistung vor. Die erzeugte Strommenge ist die farbige Fläche unterhalb der Kurve. Unterstellt man den linearen Verlauf von 100 auf 70 % in 88 Tagen, dann ist es das gleiche, als würde die Anlage 88 Tage mit dem Mittelwert 85 % konstant betrieben werden. In diesen 88 Tagen kann man grob $1400 \text{ MW}_{\text{el}} \times 24 \text{ Stunden} \times 88 \text{ Tage} \times 85 \% = 2,5 \text{ TWh}$ zusätzlich Strom produzieren.

Fährt die Anlage den Streckbetrieb lediglich mit Phase 1 + 3, sind die Leistungseinbußen zum Ende des Streckbetriebs größer, siehe rechter Verlauf in **Abbildung 5**. Die Frage, ob die Anlage mit Phase 1 + 3 jenseits der 60 Tage weiterbetrieben werden kann, hat sich in den letzten Jahren nicht gestellt, es gab keinen Grund, da es ökonomischer ist, den Zyklus zu beenden, Brennelemente nachzuladen und wieder 100 % Volllast zu fahren. Bei der derzeitigen Fragestellung, ob man mit Streckbetrieb eine mögliche Lieferverzögerung von Brennelementen überbrücken kann, ist die obige Frage mit ja zu beantworten, auch mit Phase 1 + 3 Betrieb können mehr als 60 Tage Streckbetrieb durchgeführt werden.

Quantitativ könnten die drei verbleibenden Konvoi-Anlagen mit dem Streckbetrieb in etwa die Strommenge zusätzlich erzeugen, die das Gaskraftwerk Irsching Block 5 in einem ganzen Jahr produziert, wenn es denn Volllast liefe.

Der Streckbetrieb „in a nutshell“

Die Verlängerung des Betriebszyklus der Druckwasserreaktoren von PreussenElektra über das natürliche Zyklusende hinaus war „business as usual“. Die Anwendung des Streckbetriebs in den

meisten Zyklen 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 Besteuersystem für spaltbares Material.

Abhängig von der Kombination der Fahrweisen und dem Umfang der (gewünschten) manuellen Eingriffe bei der Grenzwertverstellung ist eine nahtlose Verlängerung des Betriebszyklus zwischen 60 und 90 Tagen nach natürlichem Zyklusende mit zusätzlicher Erzeugung von erheblichen Strommengen im Bereich von Terawattstunden möglich – und dies ohne neuen Brennstoff nachladen zu müssen.

Autoren

Dr. Kai Kosowski

PreussenElektra GmbH, Hannover.
kai.kosowski@preussenelektra.de

Dr. Kai Kosowski erhielt sein Diplom in Maschinenbau und promovierte auf dem Gebiet der Thermodynamik an der Technischen Universität Braunschweig. Seit 2009 arbeitet er als Ingenieur für nukleare Sicherheit bei der PreussenElektra GmbH. Er verfügt über ein breites Spektrum an Erfahrungen im Bereich der Sicherheitsanalysen mit Schwerpunkt auf Druckwasserreaktoren unter normalen und anormalen Betriebs- und Störfallbedingungen.

Dr. Marcus Seidl

PreussenElektra GmbH, Hannover.
marcus.seidl@preussenelektra.de

Dr. Marcus Seidl erhielt sein Diplom in Physik an der Technischen Universität München (TUM) und promovierte anschließend an der Universität Mainz. Nach einer Beschäftigung beim TÜV Süd und der Framatome Advanced Nuclear Fuels ist er seit 2006 in der Abteilung Brennelementeinsatz und Entsorgung bei der PreussenElektra GmbH tätig.