

LASTFOLGEBETRIEB UND PRIMÄRREGELUNG

ERFAHRUNGEN MIT DEM VERHALTEN DES REAKTORS

Karl Müller

E.ON Kernkraft GmbH
Kernkraftwerk Isar

1. Einleitung

Die Lastwechselfähigkeit von Kernkraftwerken war von jeher ein konzeptbestimmendes Auslegungskriterium und ist nicht das Ergebnis einer nachträglichen Ertüchtigung der Reaktoranlagen. Gemäß den Anforderungen der DVG wurden für KKI 2 folgende maximale Laständerungsgeschwindigkeiten im Betriebshandbuch (BHB) verankert:

- 10% der Nennleistung pro Minute bei Leistungsänderungen von max. 20% der Nennleistung
- 5 % der Nennleistung pro Minute bei Leistungsänderungen von max. 50 % der Nennleistung
- 2 % der Nennleistung pro Minute bei Leistungsänderungen von max. 80 % der Nennleistung.

Um diese Anforderungen zu erfüllen ist es natürlich erforderlich, den Systemen zur Kernüberwachung und Reaktorregelung besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da diese ja nicht nur die Lastwechselfähigkeit, sondern auch die rationelle Brennstoffausnutzung wesentlich mitbestimmen.

Für den praktischen Betrieb war und ist das Ziel den Operateur dabei weitgehend von allen Steuer- und Regelfunktionen zu entbinden. Alles, was der Operateur zu tun haben sollte, ist, die gewünschte Kraftwerkleistung und die gewünschte Laständerungsgeschwindigkeit am Hauptleitstand vorzugeben. Generator- und Reaktorleistung folgen dieser Vorgabe automatisch, ebenso wie alle Steuer- und Regelfunktionen zur Anpassung des Anlagenzustandes an die geänderte Leistungsabgabe.

2. Auslegungsgrundsätze zur Erzielung der hohen Lastwechselflexibilität

Grundvoraussetzung zur Erzielung einer hohen Lastwechselflexibilität ist die Erhaltung eines stabilen Reaktorkernzustandes zu allen Lastanforderungen. Diese Stabilität wird neben einer optimierten Kernauslegung vor allem durch folgende Parameter wesentlich beeinflusst:

- der Wahl des Teillastdiagrammes
- der Reaktorregelung; hier vor allem des Steuerstab-Fahrkonzeptes
- der Kerninstrumentierung
- der Trennung von Regelungs- und Begrenzungsfunktionen

Wahl des Teillastdiagrammes

Das stationäre Teillastdiagramm gibt den Zusammenhang zwischen dem Sollwert der mittleren Kühlmitteltemperatur und der Reaktorleistung für stationäre Betriebszustände wieder. Mit der mittleren Kühlmitteltemperatur und den Wärmeübertragungseigenschaften der Dampferzeuger ist auch der Frischdampfdruck festgelegt, der sich als Funktion der im Dampferzeuger übertragenen Leistung stationär einstellt.

Es sind hierbei zwei grundsätzliche Typen von Teillastdiagrammen für den oberen Leistungsbereich denkbar (siehe Abb. 1). Bei Typ A ist die Kühlmitteltemperatur unabhängig von der Reaktorleistung konstant, der Frischdampfdruck nimmt dann mit zunehmender Leistung ab. Bei Typ B ist der Frischdampfdruck unabhängig von der Leistung konstant, dafür steigt die Kühlmitteltemperatur mit der Leistung an.

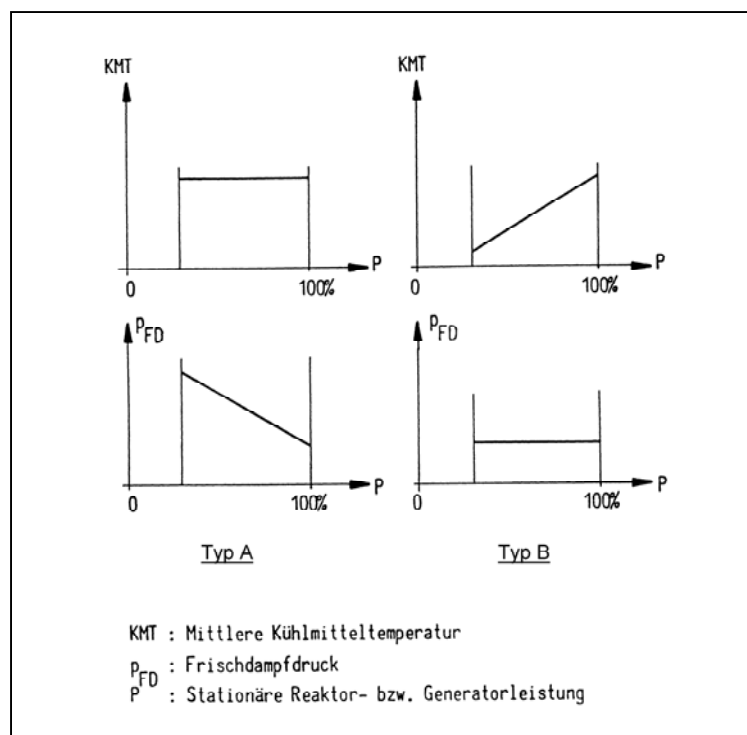


Abb. 1: Typen von Teillastdiagrammen im oberen Leistungsbereich

Der Typ des Teillastdiagrammes hat wesentlichen Einfluß auf die Lastwechselflexibilität der Reaktoranlage, insbesondere wenn schnelle und große Leistungsänderungen gefahren werden sollten.

Die Gründe hierfür sind:

- Mit der Kühlmitteltemperatur ändert sich auch die Reaktivität des Reaktors. Bei einem Teillastdiagramm nach Typ B muß diese Reaktivitätsänderung von Steuerelementen zusätzlich zu der mit der reinen Leistungsänderung verknüpften

Reaktivität (der sog. Doppler-Reaktivität) aufgebracht werden. Das bedeutet, daß die Steuerstäbe in diesem Fall einen erhöhten Stellbereich benötigen und dies wiederum hat zur Folge, daß für den Lastwechselbetrieb mehr Steuerstäbe über größere Eintauchtiefenbereiche eingesetzt werden müssen als bei einem Teillastdiagramm des Typ A.

- Mit der Kühlmitteltemperatur ändert sich auch die im Primärsystem gespeicherte Wärmemenge. Bei einem Teillastdiagramm nach Typ B muß der Reaktor bei einem Leistungsanstieg zusätzlich zur geforderten Generatorleistung diese Speicherwärme aufbringen. Das führt bei großen und schnellen Leistungsanstiegen zu einem vermehrten Überschwingen der Reaktorleistung über ihren Zielwert oder, wenn die Reaktorregelung der erhöhten Leistungsanforderung nicht schnell genug folgen kann, zu einem Absinken des Frischdampfdruckes. Beides ist unerwünscht: Das Überschwingen belastet den Brennstoff unnötigerweise und führt, wenn Grenzwerte erreicht werden, zu vorübergehenden Einschränkungen der Vollast-Verfügbarkeit; das Absinken des Frischdampfdruckes verhindert ebenfalls das schnelle Erreichen von Vollast. Bei einem Teillastdiagramm nach Typ A hingegen nimmt die Speicherwärme der Sekundärseite mit der Leistung ab; dieses Teillastdiagramm kommt daher dem natürlichen Übergangsverhalten der Anlage entgegen und gestattet es, das Energiespeichervermögen der Dampferzeuger für schnelle Lastwechselvorgänge besser nutzbar zu machen.
- Das Teillastdiagramm bestimmt die thermische Wechselbeanspruchung der Primärkreis Komponenten bei Lastwechseln sowie die erforderliche Größe des Druckhalters. Beide sind bei Teillastdiagrammen vom Typ A geringer.

Daraus ergibt sich, daß Teillastdiagramme vom Typ A für den Lastwechselbetrieb besser geeignet sind als solche vom Typ B.

Das Übergangsverhalten von KWU-Anlagen während schneller Leistungserhöhungen wird weiterhin dadurch verbessert, daß vorübergehende Abweichungen der Kühlmitteltemperatur von ihrem stationären Sollwert nach unten zugelassen werden. Dies erleichtert den Ausgleich sowohl der Energie- als auch der Reaktivitätsbilanz. Eine entsprechende Sollwertführung für die Frischdampf-Minimaldruck-Regelung verhindert in solchen Fällen ein Ansprechen dieser Grenzwertregelung.

Reaktorregelung, Wahl des Steuerstabfahrkonzeptes

Aufgabe der Leistungs-Regleinrichtungen am Reaktor ist es zunächst, die integrale Reaktorleistung nach den Anforderungen der Kühlmitteltemperatur-Regelung so zu steuern, daß immer Frischdampf ausreichender Qualität für die Turbine zur Verfügung steht. Vom Reaktor wird jedoch nicht nur erwartet, daß er jederzeit die von ihm geforderte Leistung abgibt, sondern auch, daß dabei sein innerer neutronenphysikalischer und thermohydraulischer Zustand in zulässigen Grenzen bleibt. Eine zweite wichtige Aufgabe der Regleinrichtungen ist in diesem Zusammenhang, die räumliche Verteilung der Leistungsdichte (kurz Leistungsverteilung) unter Kontrolle zu halten.

Die Leistungsverteilung ändert sich mit dem Betriebszustand und der Betriebsvorgeschichte des Kerns. Angestrebt wird eine hinreichend symmetrische, für den Betrieb optimale Grundform der Leistungsverteilung. Abweichungen von dieser Grundform führen im allgemeinen zu einer Erhöhung der lokalen Brennstabbelastung.

Stellmittel der Reaktorregelung sind die Steuerstäbe und Borvergiftung des Kühlmittels. Steuerstäbe sind relativ schnell wirkende Stellmittel, beeinflussen aber außer der Reaktorleistung auch die Leistungsverteilung. Die homogen über den Kern verteilte Borvergiftung läßt die Leistungsverteilung unverändert, ist aber ein relativ langsam wirkendes Stellmittel.

Die Strategie, nach der die beiden Stellmittel Steuerstäbe und Borvergiftung für die Reaktorregelung eingesetzt werden, wird durch das Steuerstab-Fahrprogramm festgelegt. Damit ein Lastwechselbetrieb mit schnellen Laständerungsgeschwindigkeiten möglich wird, muß das Steuerstab-Fahrprogramm 2 Voraussetzungen erfüllen:

- 1) Die Wirksamkeit der zur Leistungssteuerung eingesetzten Stäbe muß hinsichtlich Betrag und Änderungsgeschwindigkeit ausreichend sein;
- 2) Die beiden Grundfunktionen der Reaktorregelung, nämlich die Steuerung der Leistung und der Leistungsverteilung, müssen unabhängig voneinander ausgeübt werden können.

Steuerstab-Fahrprogramme

Prinzipiell sind wieder mindestens zwei Konzepte der Reaktorregelung mittels Steuerstab-Fahrprogrammen denkbar. In Abb. 2 sind zwei Stabkonfigurationen dargestellt, wie sie für den Betrieb im oberen Leistungsbereich vorgesehen sind. Beiden Konfigurationen ist gemeinsam, daß der größere Teil der Steuerstäbe ganz oder nahezu ganz aus dem Kern gezogen ist. Entscheidende Unterschiede bestehen jedoch in der Zahl und der Fahrweise der eintauchenden Stäbe und in den Aufgaben, die den einzelnen Stabbänken zugewiesen sind.

In dem Beispiel der Abb.2 b hat die Abschaltbank im Normalbetrieb keine Funktion und bleibt vollständig gezogen; sie wird nur zur Schnellabschaltung verwendet. Für die Reaktorregelung wird die Regelbank verwendet; sie besteht typischerweise aus 8 Stäben, die relativ weit in den Kern eintauchen. Zusätzlich zu den normalen Steuerstäben werden sog. "graue" Stäbe verwendet. Bei anderen Konzepten werden auch sog. "teillange" Steuerstäbe eingesetzt.

Das Konzept der KWU-DWR (Abb. 2 a) ist wesentlich einfacher als das Vergleichsbeispiel; Es gibt nur eine Art von Steuerstäben, alle vorhandenen Steuerstäbe werden für die Reaktorregelung (und natürlich für die Reaktorschnellabschaltung) eingesetzt. In funktioneller Hinsicht werden die Steuerstäbe zu 2 Bänken zusammengefaßt:

Die D-Bank besteht (im oberen Leistungsbereich) nur aus 4 Stäben, die bei Vollast nur sehr wenig in den Kern eintauchen. Die D-Bank ist im Gegensatz zur Regelbank des Beispiels aus Abb. 2 b eine "schwache" Bank, d.h. sie besteht nur aus wenigen Stäben, die die Leistungsverteilung nur wenig stören. Diese wird daher bevorzugt zur Steuerung der Reaktorleistung verwendet.

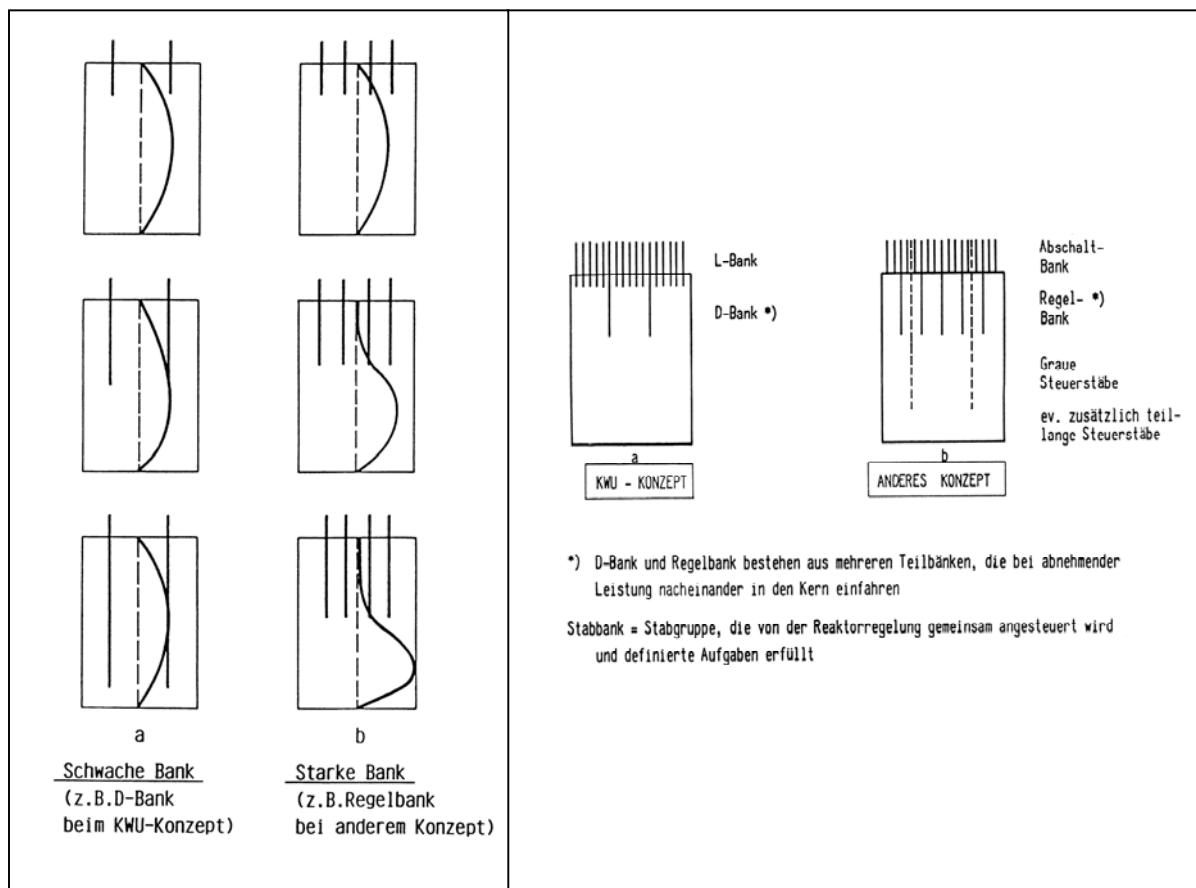


Abb. 2: Steuerstabkonfigurationen für den Betrieb im oberen Leistungsbereich

Der überwiegende Teil der Steuerstäbe bildet die L-Bank und taucht sehr wenig, bis überhaupt nicht, in den Kern ein. Die L-Bank hat als Hauptaufgabe die Regelung der axialen Leistungsverteilung. Trotz ihrer sehr geringen Eintauchtiefe hat sie eine große Wirksamkeit, weil sie aus vielen Stäben besteht und in einem Bereich nahe der Kern-Oberkante operiert, in dem ein starker Abbrandgradient existiert.

Regelung der Leistungsverteilung

Innere Ursachen für Abweichungen der axialen Leistungsverteilung von ihrer abbrandabhängigen optimalen Grundform sind:

- Die mit der Leistung veränderlichen Temperaturen und Temperaturverteilungen im Kern
- Die mit der Betriebs-Vorgeschichte veränderliche Verteilung, der Xe-Konzentration

Als wichtigste äußere Ursache für Deformationen der Leistungsverteilung sind die eintauchenden Steuerstäbe zu nennen.

Abweichungen der Leistungsverteilung von ihrer optimalen Grundform sind fast immer mit einer Erhöhung der maximalen lokalen Leistungsdichte verbunden. Diese Erhöhungen dürfen aus sicherheitstechnischen Gründen gewisse Grenzen nicht überschreiten.

Hier zeigt sich der Vorteil der Trennung von **Regelungs- und Begrenzungsfunktionen** sehr deutlich. Während die Regelung der Anlage wirklich

außschließlich auf Regelungsaufgaben optimiert ist und keine Funktionen der Reaktorbegrenzung mit übernehmen muß, wie es in vielen anderen Reaktorkonzepten der Fall ist.

Gerade Lastwechsel bewirken einerseits wesentlich stärkere Anregungen der Umverteilungstendenzen für die Leistungsdichte als der Konstantlastbetrieb; andererseits sind gerade beim Lastwechselbetrieb Abweichungen der axialen Leistungsverteilung von ihrer optimalen Grundform unerwünscht, da sie den betrieblichen Spielraum einschränken.

Das bei den KWU-DWR realisierte Konzept löst das Problem der kompensierten Leistungsverteilungs-Regelung auf eine ebenso einfache wie wirkungsvolle Weise. Es macht Gebrauch von der Tatsache, daß die D-Bank als relativ schwache Bank die Leistungsverteilung nur sehr wenig beeinflusst, die L-Bank dagegen als sehr wirksame Bank stark. Um die Leistungsverteilung bei gegebener Gesamtleistung zu ändern, braucht man daher nur die L- und die D-Bank kompensiert gegeneinander zu fahren, d.h. so, daß sich deren Wirkungen auf die Gesamtleistung aufheben.

Diese Methode erlaubt eine sehr gute Steuerung der axialen Leistungsverteilung; sie ist einfach, schnell, erfordert nur geringe Eintauchtiefen und kommt ohne Boränderungen aus, bleibt also bis zum Ende eines Abbrandzyklus voll wirksam. Eine wesentliche Voraussetzung für ihre Wirksamkeit ist selbstverständlich das Vorhandensein einer **Kern-Instrumentierung**, die die Leistungsverteilung prompt und genau erfassen kann.

Abb. 3 gibt einen Eindruck über die Wirksamkeit der Leistungsverteilungsregelung. Am Beispiel eines Lastwechselvorganges sind Messwerte gezeigt für

- Die axiale Leistungsverteilung im Heißkanal (gemessen mit dem Kugelmeßsystem)
- Die maximale lokale Leistungsdichte in der oberen und unteren Kernhälfte, gemessen mit den Leistungsverteilungs-Detektoren im Kern (LVD-System)

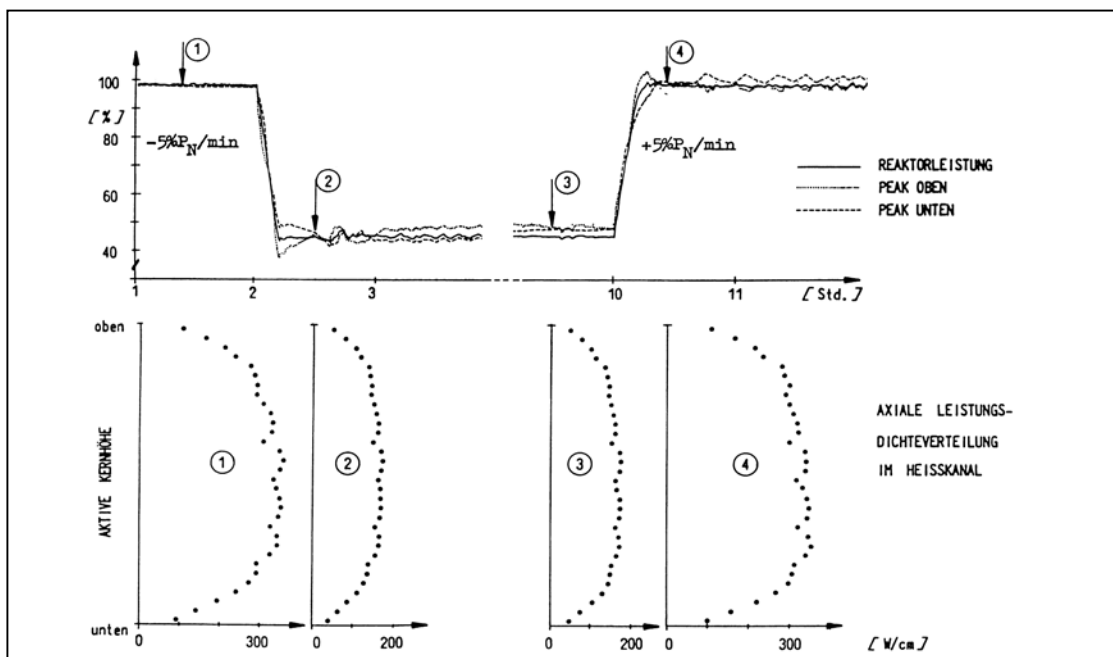


Abb. 3: Leistungsdichte und Leistungsdichteverteilung während des Lastwechselbetriebes

Die Form der axialen Leistungsverteilung ist vor und nach den Übergängen dieselbe. Die maximalen Leistungsdichten in den beiden Kernhälften ändern sich während der Lastwechsel im selben Verhältnis wie die Reaktorleistung. Daraus folgt, daß sich die Form der axialen Leistungsverteilung auch während der Übergänge nicht wesentlich ändert.

3. Auswirkungen der Reaktorkern-Beladungen auf die Lastwechselflexibilität

Grundsätze

Die Leistungsdichte ist zusammen mit dem Abbrand maßgebend für die Belastung der Brennelemente sowohl im bestimmungsgemäßen Betrieb als auch bei Störfällen. Es existieren deshalb Grenzwerte für die Leistungsdichte, die im Betrieb nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwerte ergeben sich aus Betrachtungen zum Brennstab-Verhalten bei Lastwechseln und Auslegungsstörfällen, z.B.

- Unterschiedliche thermische Ausdehnung bzw. Schrumpfung von Brennstofftabletten und Hüllrohr bei Leistungsänderungen,
- Spannungsaufbau und –Relaxation im Brennstoff und im Hüllrohr bei mechanischer Wechselwirkung
- Niederkriechen der Hülle unter Außendruck
- Dimensionsänderungen der Brennstofftabletten im Betrieb (Nachverdichten, Schwellen, Relocation)
- Erzeugung und Freisetzung von Spaltgasen und sonstigen Spaltprodukten

Die Leistungsdichte, die sich im Konstantlastbetrieb einstellt, wird im wesentlichen von der Auslegung des Reaktorkernes und Steuerstab-Konfiguration bestimmt. Im instationären Betrieb, d.h. bei Anfahr- und Lastwechselvorgängen, ändert sich die Form der Leistungsverteilung und mit ihr die Leistungsdichte. Der Abstand zwischen dem stationären Wert der Leistungsdichte und ihrem Grenzwert definiert den Spielraum, der für solche Umverteilungen zur Verfügung steht. Da der Leistungsdichte-Grenzwert sicherheitstechnische Bedeutung hat, müssen in den für den Lastwechselbetrieb vorgesehenen Spielraum auch Reserven für mögliche oder unterstellte Meßfehler einbezogen werden.

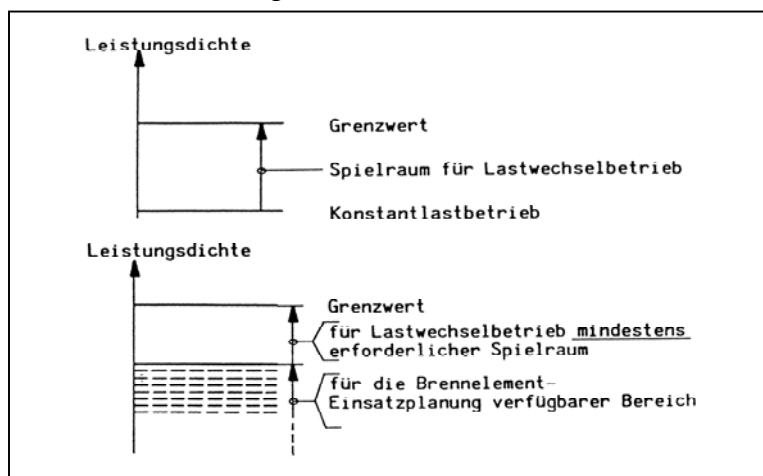


Abb. 4: Spielräume für Auslegung und Betrieb

Es gilt nun ganz allgemein, daß die Optimierung des Brennstoffeinsatzes nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten umso weniger eingeschränkt ist, je höher die maximale Leistungsdichte im Kern sein darf. Der in diesem Sinne für die BE-Einsatzplanung verfügbare Bereich der Leistungsdichtewerte konkurriert mit dem für den Lastwechselbetrieb erforderlichen Spielraum (Abb. 4)

Verhalten des Reaktorkernes mit wirtschaftlich optimierter BE-Einsatzplanung

Das Reaktivitätsverhalten des Reaktorkernes bei Lastwechseln und anderen Betriebstransienten und Störfällen wird im Wesentlichen durch die Reaktivitätskoeffizienten der Brennstofftemperatur, der Kühlmitteltemperatur, der Kühlmitteldichte, des Xenon sowie anderer neutronenkinetischer Daten bestimmt.

Für den aus der Resonanzabsorption im U-238 resultierenden Brennstofftemperaturkoeffizienten (Dopplerkoeffizient) sind durch Anreicherungs- und Abbranderhöhungen keine signifikanten Änderungen zu erwarten.

Der Kühlmitteltemperaturkoeffizient (Abb. 5) hängt außer vom Moderationsverhältnis vor allem vom Neutronenspektrum ab. Dieses wird mit zunehmender Anreicherung und Abbrand vor allem im thermischen Energiebereich reduziert, was zu größerer Abhängigkeit von Moderationseffekten und damit zu stärker negativen Temperaturkoeffizienten führt. Die Xenonreaktivität (Abb. 6) nimmt dabei ebenfalls entsprechend der zunehmenden Verhärtung des Neutronenspektrum ab.

Während also Anfahrvorgänge mit fortgeschrittenen Reaktorkernen (hoher mittl. Kernabbrand zu BOC, dh. hoher Pu-Anteil) bis zur Erreichung einer konstanten mittleren Kühlmitteltemperatur höhere Anforderungen an das Betriebspersonal stellen, zeigt sich gerade bei Lastwechselanforderungen das gegenteilige Bild

Aufgrund der betragsmäßigen Zunahme des negativen Temperaturkoeffizienten und der Abnahme der Xenonwirksamkeit zeigt sich eine deutliche Stabilisierung der axialen Leistungsdichteverteilung im Lastwechselfall. Eine Störung der Leistungsdichteverteilung aufgrund des Steuerstab-Fahrprogrammes sowie die Gefahr einer xenoninduzierten Leistungsdichteumverteilung (Xenonschwingung) spielen im Vergleich zu Erstkernen keine Rolle mehr.

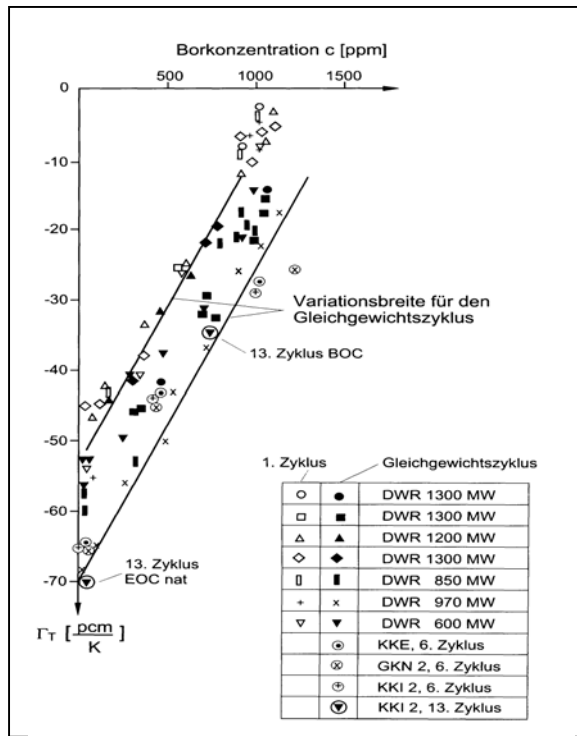


Abb. 5: Kühlmittel-Temperaturkoeffizient bei Vollast für verschiedene DWR

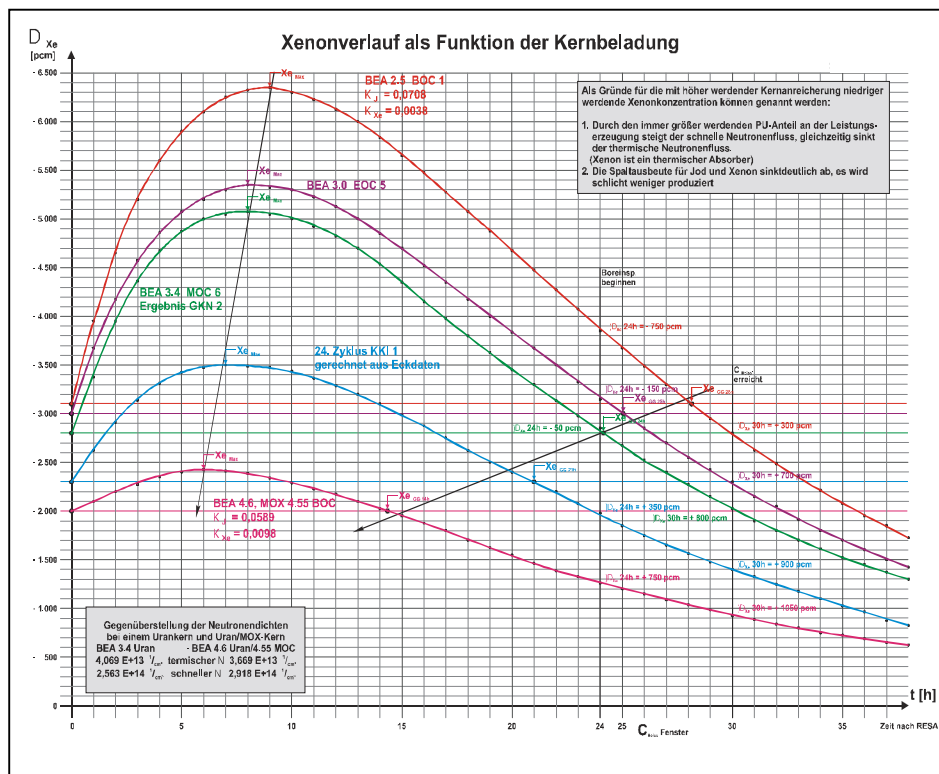


Abb.6: Xenon-Verlauf als Funktion der Kernbeladung

Dies bedeutet wiederum, daß sich der Spielraum für die BE-Einsatzplanung in Richtung wirtschaftlich optimierter Kernbeladungen weiter verbessert. Mögliche noch vorhandene Margen zu sicherheitstechnisch wichtigen Grenzwerten können damit noch besser genutzt werden.

In den Abb. 7 –11 ist beispielhaft das Lastverhalten des Reaktorkernes anhand der konkreten Lastanforderungen für KKI 2 im Dezember 2002 dargestellt. Hier wird die gute Regelfähigkeit der Anlage nochmals sehr deutlich. Die Leistungsänderungen wurden sehr gut mit den D-Bänken in Verbindung mit den L-Bänken zur Leistungsverteilungs-Regelung realisiert. Borkonzentrationsänderungen waren primär nicht bzw. nur in geringem Umfang erforderlich. Die Neutronenflußsignale Peak oben /Peak unten folgten der Thermischen Reaktorleistung nahezu proportional. Axiale Instabilitäten sind zu keiner Zeit erkennbar.

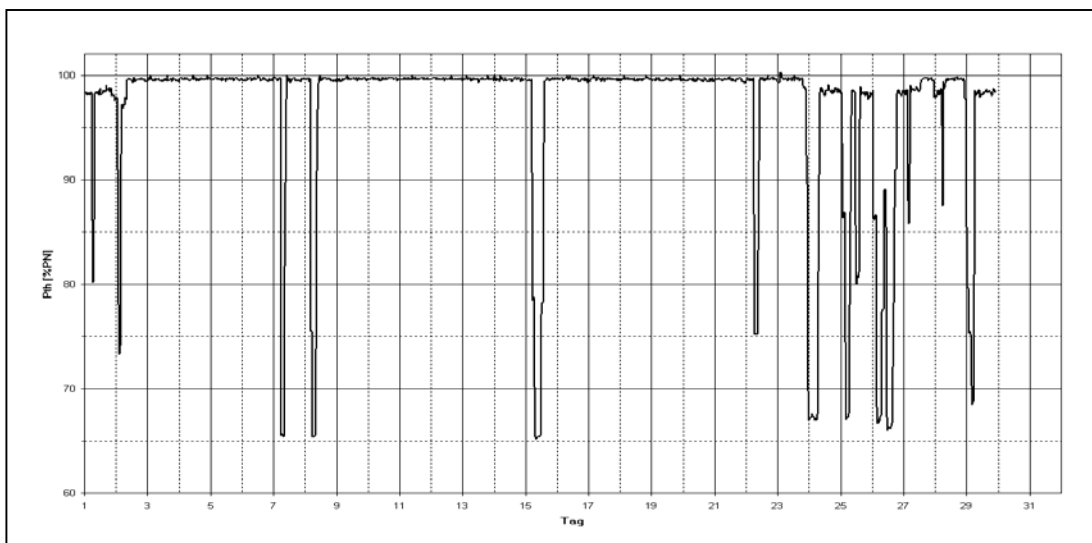


Abb. 7: KKI-2 Thermische Reaktorleistung Dezember 2002

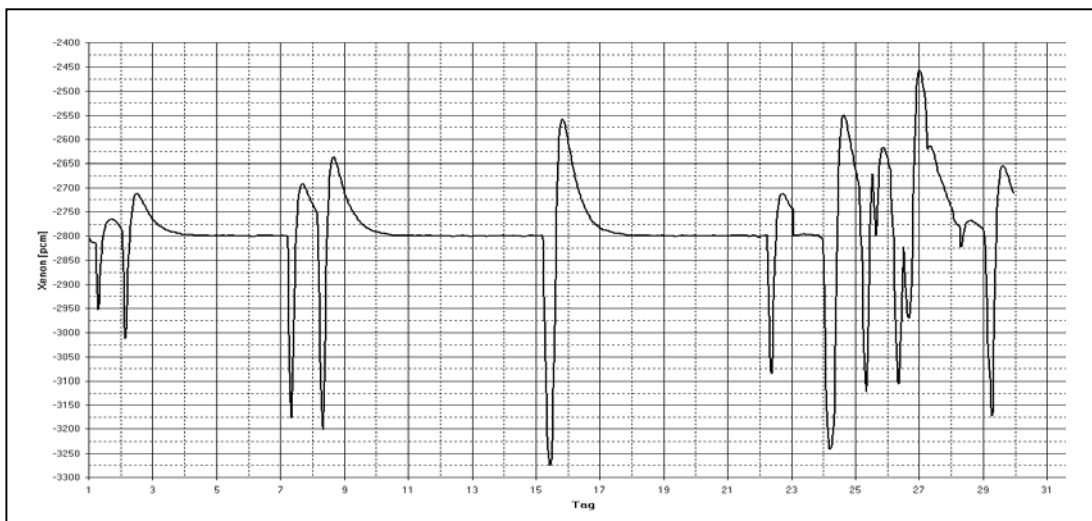


Abb. 8: KKI-2 Xenon-Vergiftung Dezember 2002

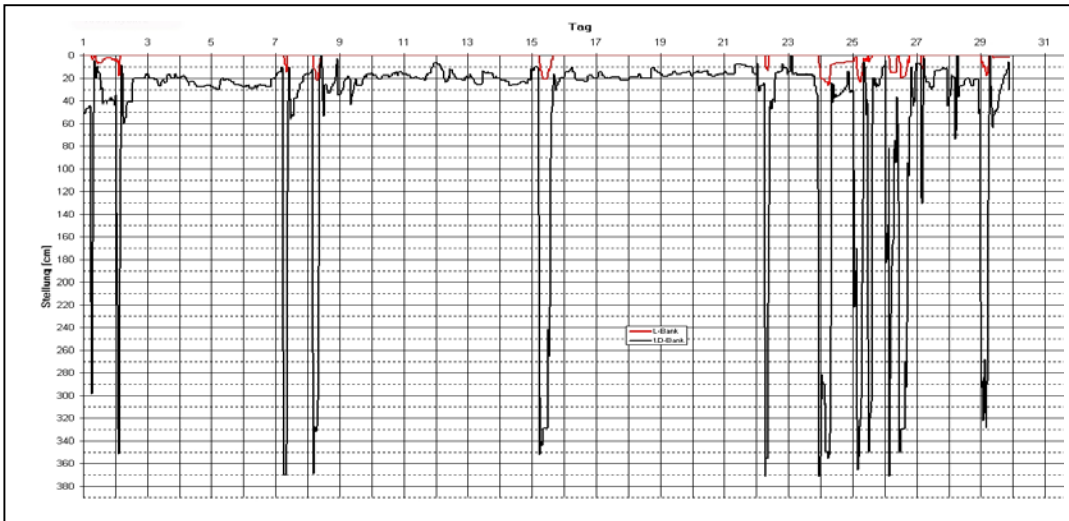


Abb. 9: KKI-2 Stellung L-Bank und 1. D-Bank Dezember 2002

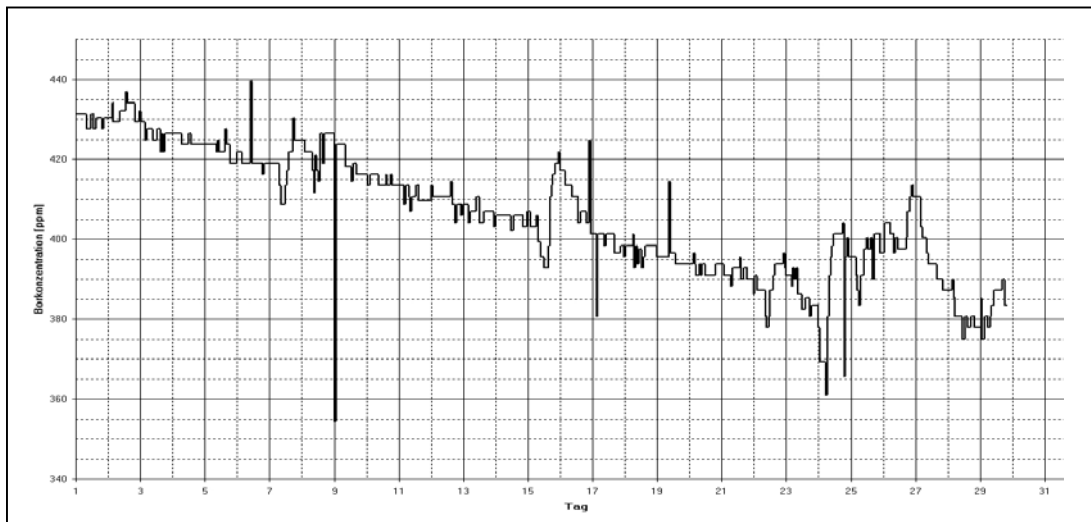


Abb. 10: KKI-2 Borkonzentration Dezember 2002

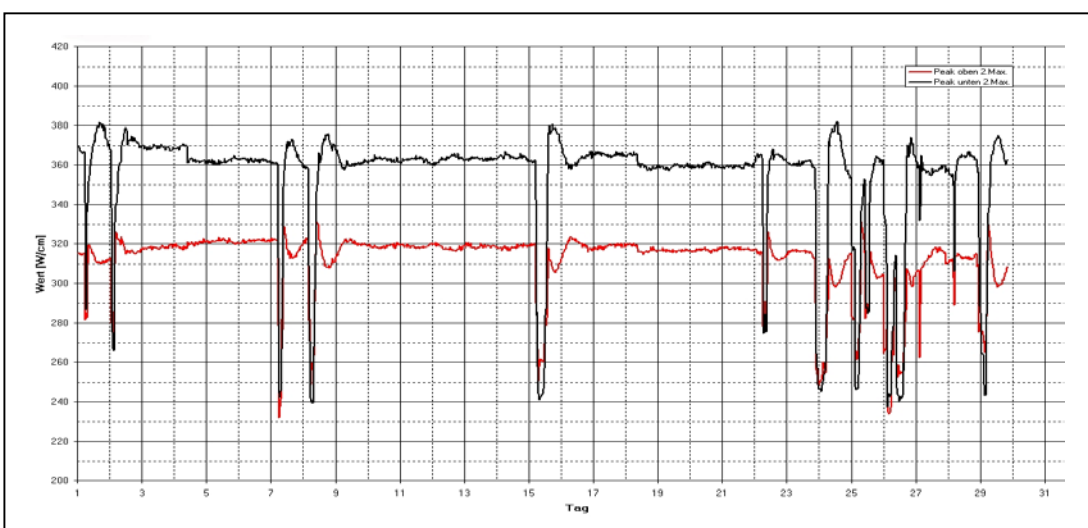


Abb. 11: KKI-2 Peak unten/oben Dezember 2002

4. Verhalten des Reaktorkernes bei Frequenzstützbetrieb

Zeigt die Anlage ein derart gutes Regelverhalten bei Lastfolgebetrieb so liegt es auf der Hand, daß ein Frequenzstützbetrieb jederzeit möglich ist. Zu Anfang des Frequenzstützbetriebes herrschte jedoch noch Unsicherheit bezüglich der Häufigkeit der Steuerelementbewegungen und der Sorge eines erhöhten Verschleißes der Stellglieder.

Es wurden deshalb im Rahmen eines Probetriebes der Primärfrequenz-Regelung ($\pm 2,5\%$ Pnenn) im November 1992 bzw. Mai 1994 die D-Bank-Fahrbewegungen bei unterschiedlichen Dämpfungen ausgewertet (Tab. 1).

Jahr	Zyklus	Bewegungen/Tag	Dämpfung
1992	5 BOC	1004	800 ms
1994	6 MOC	213	1700 ms
1994	6 MOC	268	1700 ms

Tab. 1: Auswirkung der Dämpfung auf die Stabbewegungen

Mit zunehmenden Abbrand bzw. fortgeschritteneren Reaktorbeladungen reduzierten sich die D-Bank-Bewegungen aufgrund der betragsmäßigen Zunahme des neg. Temperaturkoeffizienten nochmals sehr deutlich. Erhöhter Verschleiß der SE-Stellglieder aufgrund häufiger SE-Bewegungen ist damit nicht zu besorgen (Abb. 12 und 13).

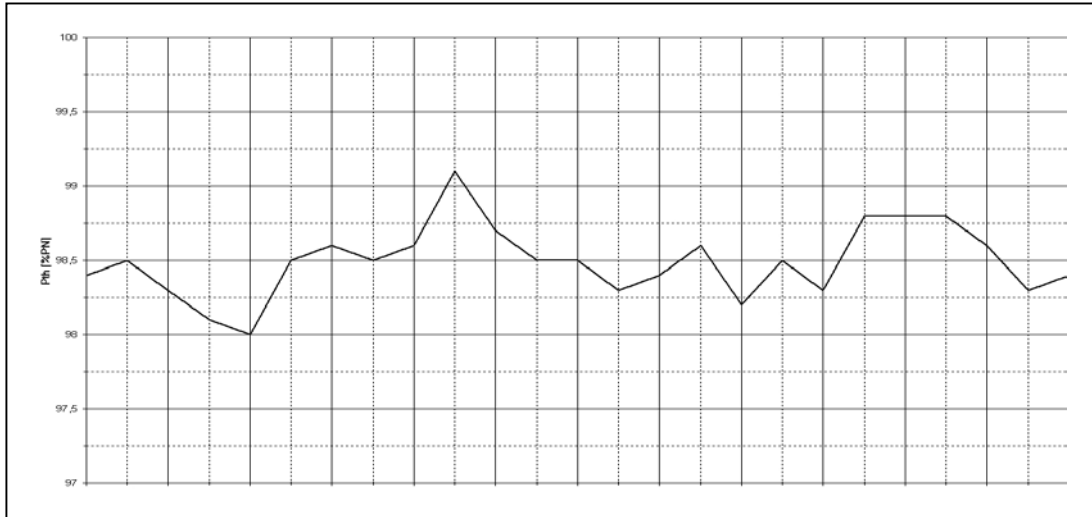


Abb. 12: KKI 2 Thermische Reaktorleistung bei Frequenzstützbetrieb am 24.12.2002, 12:00 – 24:00 Uhr

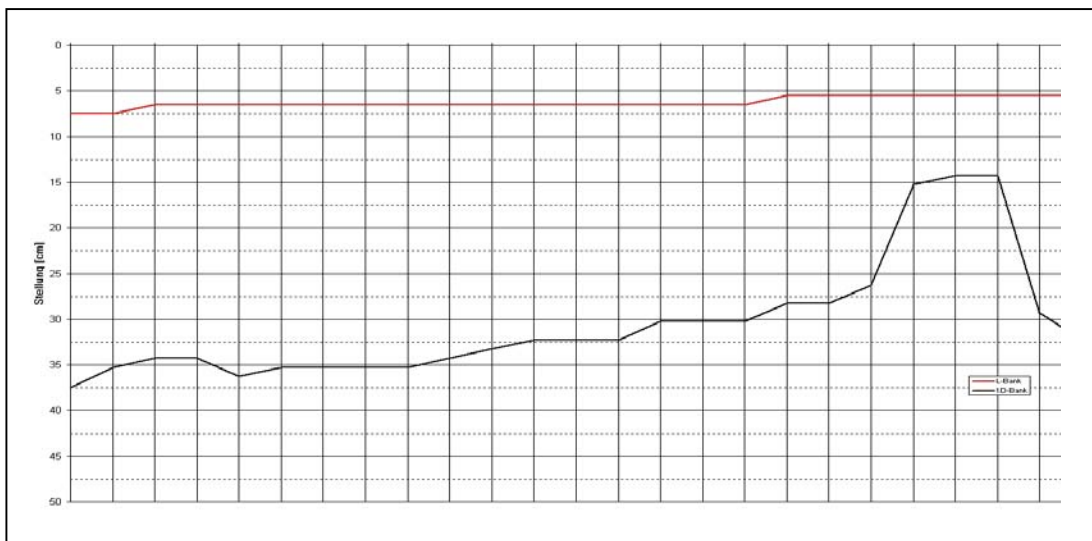


Abb. 13: KKI 2 Stellung L- und 1. D-Bank bei Frequenzstützbetrieb am 24.12.2002. 12:00 – 24:00 Uhr

Zusammenfassung:

Die Lastwechselfähigkeit der KWU-DWR-Anlagen war von jeher ein konzeptbestimmendes Auslegungskriterium, das die Anlagen von Anfang an sehr gut erfüllen konnten.

Moderne, fortschrittliche Reaktorkerne, erfüllen die Forderungen der Lastwechselfähigkeit in besonderem Maße. Die nochmals verbesserte axiale Leistungsdichte-Stabilität läßt sich zur weiteren wirtschaftlichen Optimierung der Brennstoffnutzung ohne Einschränkung der Lastwechselflexibilität heranziehen.

Quellenverzeichnis:

- KWU Bericht ZEN000 /CW/ 0254/851010
Die Lastwechselfähigkeit von KWU-Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor (1985)
- TÜV Süddeutschland
Kernkraftwerk Isar 2; Gutachten zum Einsatz von Brennelementen mit einer Anreicherung von 4,6 Gew.-% U-235, Januar 2000
- EKK/KKI/UP2; ASKA Ver. 3.0 v.27.11.2002
Auswertesystem für Kugelmessungen und Abbrandrechnungen EKK/KKI 1995 – 2000
- Kernkraftwerk Isar (KKI)
Betriebshandbuch (BHB) Block 2