Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 7

Artikel: Die Leistungsregelung von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren

Autor: Heyck, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903848

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 18.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Leistungsregelung von Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren

H. Heyck

Die physikalischen Grundlagen von Leichtwasserreaktoren sowie die regeltechnischen Eigenschaften von Druck- und Siedewasserreaktoren werden beschrieben. Es wird gezeigt, wie die Doppelfunktion des Wassers als Moderator und Kühlmittel diese Reaktortypen im Leistungsbetrieb zu «Regelstrecken mit Ausgleich» macht und welche positiven sicherheitsrelevanten Eigenschaften sich daraus ergeben.

Les principes physiques sur lesquels sont basés les réacteurs à eau légère ainsi que les propriétés des deux types de réacteurs (eau pressurisée, eau bouillante) concernant les techniques de réglage sont exposés. On démontre également comment en charge ces installations forment des boucles de réglage en équilibre grâce aux deux fonctions de modérateur et de réfrigérant que remplit l'eau du système primaire et quels avantages en découlent sur le plan de la sécurité.

Adresse des Autors
H. Heyck, dipl. Masch.-Ing. ETH, Hauptabteilung Reaktorsysteme, Eidg. Institut für Reaktorforschung, 5303 Würenlingen.

1. Leichtwasserreaktoren als Regelstrecke

1.1 Kettenreaktion

Die fünf Leichtwasserreaktoren[1] der Schweizer Kernkraftwerke, welche derzeit etwa 40% unserer Elektrizität erzeugen, arbeiten entweder nach dem Prinzip des Druckwasserreaktors (Gösgen, Beznau) oder des Siedewasserreaktors (Mühleberg, Leibstadt). Bei beiden Bauarten dient das Wasser, welches die uranenthaltenden Brennstabbündel von unten nach oben durchströmt, nicht nur zur Abfuhr der durch die Kernspaltungen in den Brennstäben erzeugten Wärme, sondern auch zur Moderation der energiereichen schnellen Spaltneutronen auf eine niedrige thermische Energie. Dabei werden die bei der Kernspaltung prompt, d.h. unmittelbar entstehenden schnellen Neutronen durch Zusammenstösse mit den Wasserstoffkernen des Kühlmittels auf eine thermische, der Kühlmitteltemperatur entsprechende Energie abgebremst. Nur thermische Neutronen vermögen mit ausreichender Wahrscheinlichkeit genügend Uran-235-Kerne für eine selbsterhaltende Kettenreaktion zu spalten.

[1] Bei Leichtwasserreaktoren verwendet man gewöhnliches Wasser als Moderator. Sie benötigen im Gegensatz zu Schwerwasser oder auch graphitmoderierten Reaktoren auf etwa 3% angereichertes Uran 235 als Brennstoff.

Für eine stationäre Kettenreaktion muss von den zwei bis drei schnellen Neutronen, welche pro Spaltung eines Urankernes entstehen, eines nach der Moderation eine Spaltung auslösen, damit wiederum eine gleich grosse Neutronengeneration entsteht. Die restlichen Neutronen gehen durch Leckage oder Absorption für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion verloren. Der Anteil der absorbierten Neutronen kann durch Verstellen neutronenabsorbierender Kontrollstäbe beeinflusst werden.

Der Verlauf der Kettenreaktion ist durch den Multiplikationsfaktor k beschreibbar. Er stellt das Verhältnis einer Neutronengeneration zur vorhergehenden Generation dar. Bei stationärer selbsterhaltender Kettenreaktion ist $k = 1$, bei $k > 1$ nimmt die Kettenreaktion zu, und bei $k < 1$ klingt die Kettenreaktion ab. Die Abweichung vom stationären kritischen Zustand wird durch die Reaktivität ϱ beschrieben. Der Zusammenhang mit dem Multiplikationsfaktor k und der Kritikalität des Reaktors ist in nachfolgender Gleichung und in Tabelle I angegeben.

$$\varrho = \frac{k-1}{k} \qquad (1)$$

Entscheidend bezüglich des Zeitverhaltens der leistungsbestimmenden Kettenreaktion ist, dass die sogenann-

Reaktor	Multiplikationsfaktor k	Reaktivität ϱ	Reaktorleistung
unterkritisch	< 1	< 0	abnehmend
kritisch	1	0	konstant
überkritisch	> 1	> 0	zunehmend

Tabelle I Begriffe

te Generationszeit, binnen welcher ein prompt bei der Spaltung entstehendes Neutron durch den Moderator thermalisiert wird und in einem Uran-235-Kern durch Spaltung wieder 2 bis 3 prompte Spaltneutronen erzeugt, nur etwa 10^{-4} s beträgt. Die Kontrolle einer durch prompte Neutronen selbsterhaltenden Kettenreaktion mit so kurzer Zeitkonstante ist mit mechanisch angetriebenen Kontrollstäben unmöglich.

1.2 Bedeutung der verzögerten Neutronen

Neben den prompten Spaltneutronen entstehen beim Zerfall einiger als *Vorläufer* bezeichneter Spaltprodukte zusätzlich auch noch knapp 1% *verzögerte Neutronen.* Diese entstehen aufgrund der verschiedenen Halbwertszeiten dieser Spaltprodukte im Durchschnitt etwa 10 s verzögert zur Spaltung. Der Reaktor und seine Kontrollorgane werden nun so ausgelegt, dass nur mit Hilfe dieser verzögerten Neutronen eine selbsterhaltende Kettenreaktion erreicht werden kann. Die relativ grosse Zeitkonstante der verzögerten Neutronen erlaubt nun aber, mit Hilfe der Stellorgane der Reaktorleistungsregelung die Kettenreaktion wirksam und sicher zu beherrschen. Dies kommt in der Neutronenbilanz, der sogenannten kinetischen Grundgleichung, zum Ausdruck:

Neutronenbilanz:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\varrho - \beta}{\Lambda} \cdot n + \lambda \cdot C \qquad (2a)$$

Vorläuferbilanz:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} \cdot n - \lambda \cdot C \qquad (2b)$$

$n(t)$ Neutronenzahl
$C(t)$ Vorläuferzahl, d.h. Anzahl der Spaltprodukte, welche verzögerte Neutronen emittieren
β Anteil verzögerter Neutronen aus dem Vorläuferzerfall ($\approx 1\%$)
ϱ Reaktivität
Λ Generationszeit für prompte Neutronen ($\approx 10^{-4}$ s)
λ mittlere Zerfallskonstante der Vorläufer ($\approx 0{,}1\ s^{-1}$)

Für $\varrho < \beta$ ist der erste Term der Neutronenbilanz negativ und zeigt, dass die Kettenreaktion ohne verzögerte Neutronen sehr schnell abklingen würde. Der positive zweite Term, welcher die Produktionsrate verzögerter Neutronen aus dem Vorläuferzerfall (zweiter Term der Vorläuferbilanz) beschreibt, ist daher bestimmend für das Zeitverhalten der Kettenreaktion. Der erste Term der Vorläuferbilanz beschreibt die Produktionsrate der Vorläufer. Trotz dem sehr klein scheinenden Anteil verzögerter Neutronen von knapp 1% ergibt sich bei Berücksichtigung der sehr kurzen Generationszeit und der kleinen mittleren Zerfallskonstante der Vorläufer, dass im stationären Fall etwa 1000mal mehr Vorläufer als Neutronen vorhanden sind.

Übersteigt allerdings die Reaktivität den Anteil der Vorläufer, die verzögerte Neutronen produzieren ($\varrho > \beta$), so wird der erste Term der Neutronenbilanz, welcher die Neutronenzahl ohne Produktion verzögerter Neutronen beschreibt, positiv. Die Zunahme der Neutronenzahl wird dann bestimmt durch den Anstieg prompter Neutronen mit der sehr kurzen Generationszeit als Zeitkonstante; die verzögerten Neutronen können vernachlässigt werden. Dieser Zustand wird als prompt überkritisch bezeichnet und muss durch konstruktive und regeltechnische Systemauslegung ausgeschlossen werden. Zur Leistungserhöhung muss ein Reaktor zwar überkritisch sein, darf aber nie prompt überkritisch werden.

Bevor beim Anfahren des Reaktors der Leistungsbereich erreicht wird, dämpfen allerdings noch keine Temperaturrückwirkungen den Anstieg der Neutronenzahl. Hier begrenzen Schutzschaltungen der Reaktorsteuerung die Reaktivität ϱ so, dass zum Anteil β der verzögerten Neutronen (2a) ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten wird.

1.3 Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Leichtwasserreaktoren

1.3.1 Einfluss des Kühlmittelzustandes

Aus sicherheits- und regeltechnischen Gründen sind Leichtwasserreaktoren untermoderiert ausgelegt, d.h. das Verhältnis von Wasser zu Uran im Reaktor wird unter dem optimalen Moderator-Brennstoff-Verhältnis gehalten. Wenn nun infolge von Reaktorleistungszunahme oder verminderter Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlsystem die Kühlmitteltemperatur steigt und die Dichte der moderierenden Wasserstoffkerne im Kühlmittel abnimmt, vergrössert sich der Abstand zum optimalen Verhältnis, d.h. die Moderation und deren positiver Einfluss auf die Neutronenmultiplikation verschlechtert sich. Kommt es durch Zunahme der Reaktorleistung oder durch kühlmittelleckagebedingte Druckabsenkung zu einer vermehrten Dampfblasenbildung, so verringert sich die Dichte des neutronenabbremsenden Kühlmittels im bereits untermoderierten Reaktor zusätzlich; das Ausmass der Kettenreaktion nimmt ab oder kann bei starker Zunahme des Dampfgehaltes sogar ganz zum Erliegen kommen.

Die negative Rückwirkung steigender Kühlmitteltemperatur und Dampfblasenbildung auf Reaktivität und Verlauf der Kettenreaktion macht den Leichtwasserreaktor zur *Regelstrecke mit Ausgleich,* d.h. Reaktorleistung und Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlsystem streben von selbst einen Gleichgewichtszustand an. Die Reaktivitätskoeffizienten für die Kühlmitteltemperatur und den Dampfblasengehalt der letztere wird auch *Voidkoeffizient* genannt – sind daher beim Leichtwasserreaktor im bestimmungsgemässen Leistungsbetrieb stets negativ.

1.3.2 Einfluss der Brennstofftemperatur

Rund 97% des Brennstoffs enthalten das durch thermische Neutronen nicht spaltbare Uran 238. Dieses absorbiert durch Resonanzeinfänge bei bestimmten Energien einen Teil der noch nicht ganz auf thermische Geschwindigkeit abgebremsten Neutronen, welche somit der leistungserzeugenden Kettenreaktion nicht mehr zur Verfügung stehen. Bei einer Zunahme der Reaktorleistung steigt auch die Brennstofftemperatur, und infolge des Dopplereffekts vergrössern sich dabei die Bereiche der Resonanzenergien[2] für den Neutroneneinfang im Uran 238. So wird mit zunehmender Reaktorleistung ein wachsender Anteil der durch Spaltung entstandenen Neutronen bereits vor der vollständigen Thermalisierung im Uran 238 absorbiert und trägt damit nicht mehr zur Kettenreaktion bei. Dieser negative Einfluss der zunehmenden Brennstofftemperatur

[2] Analog zum akustischen Dopplereffekt ist nicht die absolute, sondern die relative Neutronengeschwindigkeit bezüglich der Uran-238-Kerne bestimmend für deren Neutronenabsorption durch Resonanzeinfänge. Bei zunehmender temperaturabhängiger Wärmebewegung der Uranatome im Brennstoff verbreitern sich daher die Resonanzenergiebereiche.

auf den Verlauf der Kettenreaktion wird durch den negativen Brennstofftemperaturkoeffizienten der Reaktivität beschrieben. Die Brennstofftemperaturzeitkonstante beträgt aufgrund der Wärmekapazität des Brennstoffes etwa 6 s. Das zeitliche Verhalten von Kühlmitteltemperatur und Dampfblasengehalt wird durch die Massen- und Energiebilanz des Reaktorkühlsystems bestimmt.

1.4 Vergleich mit Tschernobyl-Reaktor

Das Zeitverhalten von *Brennstofftemperatur, Kühlmitteltemperatur und Dampfblasengehalt* bewirken beim prompt unterkritischen Reaktor eine wirksame negative Rückkopplung auf den Verlauf der leistungsbestimmenden Kettenreaktion. Sie machen den Leichtwasserreaktor damit zu einer Regelstrecke mit Ausgleich bezüglich der Leistungsregelung und charakterisieren sein kurzfristiges Regelverhalten. Sie verleihen ihm inhärent sichere Eigenschaften, die störungsbedingte ungewollte Reaktivitätserhöhungen selbsttätig auffangen und unkontrollierte Leistungsexkursionen durch prompte Überkritikalität wie beim Unglücksreaktor von Tschernobyl verhindern.

Bei der graphitmoderierten Bauart dieses Reaktortyps dient das Wasser lediglich zur Kühlung der Brennstäbe; es ist nicht – wie beim Leichtwasserreaktor – gleichzeitig Bedingung zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion. Eine Dampfblasengehaltszunahme hat bei einem graphitmoderierten Reaktor praktisch keinen Einfluss auf die Moderation, hat jedoch eine geringere Absorption thermischer Neutronen im Kühlmittel zur Folge (die Moderation im Graphit bleibt dabei unverändert). Der *Dampfblasengehaltskoeffizient* ist hier deshalb im Gegensatz zum Leichtwasserreaktor *positiv* und bewirkt trotz negativem Brennstofftemperaturkoeffizienten unterhalb 20% der Nennleistung sogar einen *positiven Leistungskoeffizienten* der Reaktivität. Der Betrieb in diesem zur Instabilität neigenden Leistungsbereich während der Vorbereitung des verhängnisvollen Versuchs war vorschriftswidrig und schuf in Kombination mit anderen grobfahrlässigen Massnahmen und Schaltungen wegen des positiven Dampfblasenkoeffizienten ein nicht mehr beherrschbares positives Reaktivitätspotential.

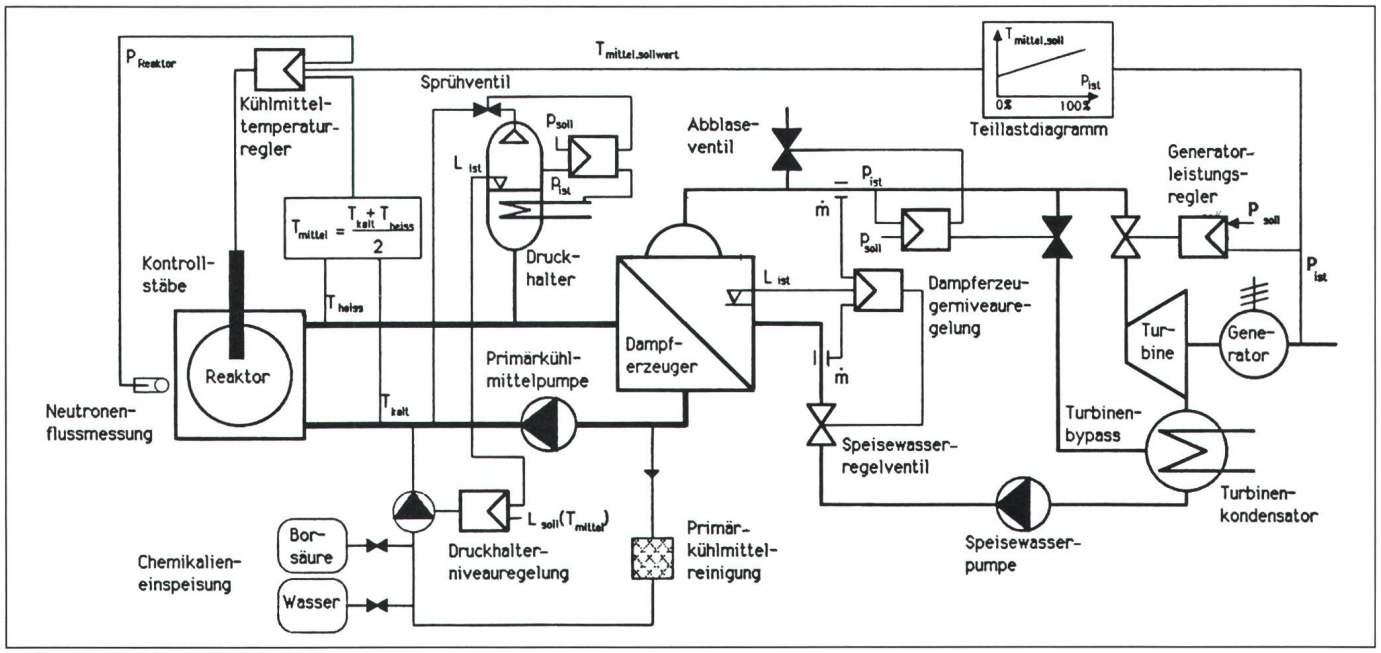
Als dieses bei der Durchführung des Versuches (Abschalten des Turbinengenerators) durch den Ausfall der Kühlmittelumwälzpumpen sehr schnell wirksam wurde, überstieg die Reaktivität den Anteil der verzögerten Neutronen, und der Reaktor wurde prompt überkritisch. Die darauf erfolgte explosionsartige Zunahme der Kettenreaktion, allein durch die prompten Neutronen mit der eingangs erwähnten kurzen Zeitkonstante, war durch die Schnellabschaltung mittels Kontrollstabeinfahren nicht mehr zu beherrschen. Auch der negative Brennstofftemperaturkoeffizient vermochte wegen seiner ungleich grösseren Zeitkonstante nicht mehr wirksam zu werden, so dass die Leistung innert weniger Sekunden auf das über 500fache der Nennleistung anstieg. Diese Leistungsexkursion wurde erst durch die Zerstörung des Reaktors mit den bekannten katastrophalen Folgen beendet.

Beim Leichtwasserreaktor ist aufgrund seines stets negativen Dampfblasengehaltskoeffizienten ein auf diese Weise zustande kommender Störfallablauf aus physikalischen Gründen ausgeschlossen und auch durch grobfahrlässiges Fehlverhalten des Bedienungspersonals nicht herbeiführbar.

2. Die Leistungsregelung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor

2.1 Prinzip

Beim Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (Fig. 1) wird die Wärme aus dem Reaktor durch einen primären Kühlkreislauf abgeführt und mittels wärmetauschenden Dampferzeugern an den sekundären Dampf-Wasser-Kreisprozess übertragen. Durch Dampfturbine und Generator wird



Figur 1 Vereinfachtes Prinzipschema einer Druckwasserreaktoranlage

P Leistung *p* Druck *L* Niveau *ṁ* Massenstrom *T* Primärkühlmitteltemperatur

hier etwa ein Drittel der im Reaktor erzeugten Wärme in elektrische Energie umgewandelt, während der Rest über das Kühlwasser des Turbinenkondensators als Abwärme an die Umgebung abgeführt wird.

Im Primärkreislauf wird die Verdampfung des etwa 300grädigen Kühlmittels durch einen über dem Dampfdruck liegenden Primärkühlmitteldruck (> 150 bar) verhindert. Da es so nur teilweise an den Brennstaboberflächen zu unterkühltem Oberflächensieden kommt, ist die Wirkung des Dampfblasengehaltes auf die Reaktivität im Leistungsbetrieb vernachlässigbar. Der *Brennstofftemperatur- und der Kühlmitteltemperaturkoeffizient* der Reaktivität bestimmen somit das kurzfristige Verhalten bezüglich der Leistungsregelung. Sie verleihen dem Druckwasserreaktor selbstregelnde Eigenschaften und ein stabiles Lastfolgeverhalten, welches am Beispiel einer Leistungsänderung bei ungeregeltem Reaktor gezeigt werden soll.

2.2 Das stabile Selbstregelverhalten des Druckwasserreaktors

Wird durch eine Sollwerterhöhung der elektrischen Wirkleistung, welche ja die Hauptregelgrösse eines Kernkraftwerks ist, das Turbinenregelventil weiter geöffnet, so bezieht die Turbine vorübergehend mehr Sattdampf aus dem Dampferzeuger, als dort momentan erzeugt wird. Dadurch sinkt der Dampfdruck und damit auch die Verdampfungstemperatur. Mit sinkender Temperatur auf der Sekundärseite des Dampferzeugers nimmt im Dampferzeuger das Gefälle zwischen Primär- und Sekundärtemperatur zu. Dem Primärkreislauf wird dadurch ein grösserer Wärmestrom entzogen, wodurch das vom Dampferzeuger zum Reaktor zurückströmende Primärkühlmittel stärker abgekühlt wird. Mit sinkender mittlerer Primärkühlmitteltemperatur wächst im untermoderierten Reaktor die Dichte der neutronenmoderierenden Wasserstoffkerne, was je nach Grösse des negativen Kühlmitteltemperaturkoeffizienten einen entsprechenden Reaktivitätsgewinn zur Folge hat. Damit steigt die Reaktorleistung und etwas verzögert auch die Brennstofftemperatur an. Entsprechend dem negativen Brennstofftemperaturkoeffizienten gehen nun im wärmeren Uran 238 zusätzlich mehr Neutronen durch Absorption verloren, bis sich die Kettenreaktion auf einem höheren Leistungsniveau wieder stationär verhält.

Dieser interne Reaktivitätsabtausch infolge der Veränderung von Moderatordichte und Brennstofftemperatur erfolgt natürlich auch mit umgekehrten Vorzeichen bei Herabsetzung des Leistungssollwertes.

Trotz seines von Natur aus wirksamen Selbstregelverhaltens würden beim ungeregelten Druckwasser primärseitig grosse, temperaturbedingte Druck- und Volumenschwankungen zu unnötig aufwendiger Anlagenauslegung und schlechtem Wirkungsgrad führen. Deshalb wird die mittlere Kühlmitteltemperatur gemäss einem Teillastdiagramm (Fig. 1) geregelt, wobei der mittlere Kühlmitteltemperatursollwert in Abhängigkeit von der Generatorleistung vorgegeben wird. Bei konstantem Primärkühlmitteldurchsatz steigt mit der Generatorleistung der Sollwert der mittleren Primärkühlmitteltemperatur oder wird auch teilweise konstant gehalten. So sinken sekundärseitig Frischdampfdruck und -temperatur nicht zu stark ab, und es wird zugleich eine reaktor- und turbinenschonende Fahrweise erreicht.

2.3 Hauptregelorgane: Kontrollstäbe und Borsäure

Stellorgane der Kühlmitteltemperaturregelung sind die in den Reaktor einfahrbaren *Kontrollstäbe* aus stark neutronenabsorbierendem Material. Der Istwert der Primärkühlmitteltemperatur entsteht durch Mittelwertbildung der in den Hauptkühlmittelleitungen gemessenen Reaktorein- und -austrittstemperaturen. Bei negativer Regelabweichung der mittleren Kühlmitteltemperatur lässt der Kühlmitteltemperaturregler die Kontrollstäbe aus dem Reaktor ausfahren, wodurch infolge geringerer Neutronenabsorption die Leistung bis zum Ausgleich durch höhere Brennstoff- und Kühlmitteltemperatur ansteigt. Positive Regelabweichungen werden durch Kontrollstabeinfahren korrigiert. Sowohl zur Aufrechterhaltung einer gleichmässigen Leistungsverteilung im Reaktor als auch zur Gewährleistung ausreichender Abschaltreaktivität für den sicheren Unterbruch der Kettenreaktion werden die Stäbe im Leistungsbetrieb möglichst weit aus dem Reaktorkern ausgefahren. *Langsam* auftretende Reaktivitätsstörungen wie Spaltstoffabbrand und das stark neutronenabsorbierende Spaltprodukt Xenon 135 werden durch Konzentrationsänderung der homogen im Kühlmittel gelösten neutronenabsorbierenden *Borsäure* korrigiert.

Da die Primärkühlmitteltemperatur verzögert auf Leistungsänderungen reagiert, wird dem Kühlmitteltemperaturregler neben Kühlmitteltemperatur-ist- und -sollwert zusätzlich der zur Reaktorleistung proportionale Neutronenfluss als Hilfsregelgrösse zugeführt. Bei Lastabwürfen und anderen schnellen Leistungstransienten lässt sich so die Reaktorleistung der elektrischen Leistung durch Verstellen der Kontrollstäbe schneller anpassen als allein über den Kühlmitteltemperaturregelkreis.

Kann bei schneller Reduktion der elektrischen Leistung die Reaktorleistung wegen der begrenzten Einfahrgeschwindigkeit der Kontrollstäbe nicht gleich schnell reduziert werden, so muss die Reaktorleistung trotzdem sicher via Dampferzeuger aus dem Primärkühlkreislauf abgeführt werden. Dies geschieht, indem durch die Frischdampfdruckregelung soviel Dampf via Turbinenbypassventil in den Turbinenkondensator oder via Abblaseventil in die Atmosphäre abgeblasen wird, dass die Primärkühlmitteltemperatur nicht unzulässig ansteigt. Wird bei Störungen oder Überschreitung sicherheitsrelevanter Grenzwerte eine Reaktorschnellabschaltung erforderlich, so fallen alle Kontrollstäbe durch ihr Eigengewicht innert Sekunden in den Reaktor ein, wodurch die Kettenreaktion, welche die prompte Leistung erzeugt, sofort unterbrochen wird.

Ein Vorteil von Druckwasserreaktoranlagen ist die Entkopplung des nicht radioaktiven Sekundärkreislaufs vom radioaktiven Primärkreislauf mit Hilfe der Dampferzeuger. Auf diese Weise steht die Atmosphäre durch Abblasen von Frischdampf stets als sichere Ersatzwärmesenke zur Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkühlsystem zur Verfügung.

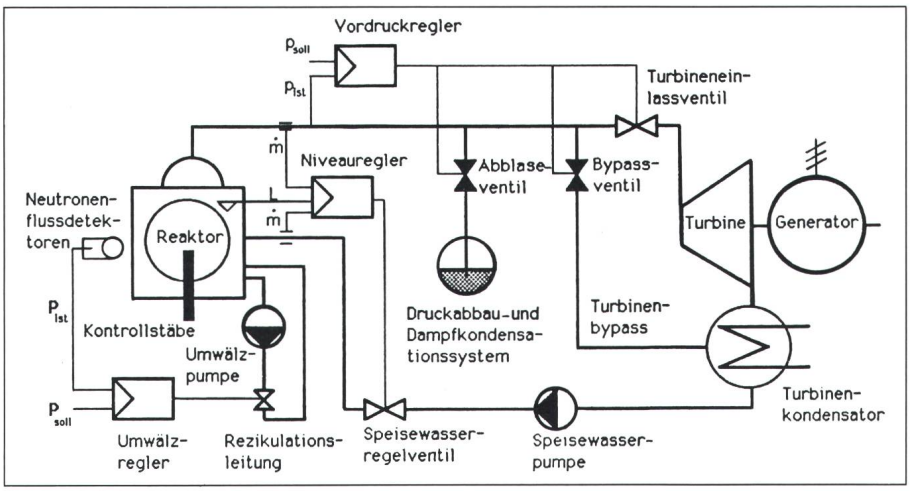
2.4 Hilfsregelorgane

Weitere wichtige Zustandsregelungen im Zusammenhang mit der Leistungsregelung sind die Primärkühlmitteldruckregelung, die Druckhalterniveauregelung und die Dampferzeugerniveauregelung. Der Ausgleich von temperaturbedingten Schwankungen des Primärkühlmittelvolumens erfolgt durch die *Primärkühlmitteldruckregelung* im Gefäss des Druckhalters, welcher mit der Hauptkühlmittellei-

tung zwischen Reaktor und Dampferzeuger verbunden ist. Durch die elektrische Druckhalterheizung wird das Primärkühlmittel auf einer hohen, dem Primärkühlmitteldruck entsprechenden Siedetemperatur gehalten. Über dem siedenden Kühlmittel befinden sich im Druckhalter ein elastisches Sattdampfpolster und Sprühdüsen, welche mit der kälteren Hauptkühlmittelleitung zwischen Hauptkühlmittelpumpe und Reaktor verbunden sind. Durch Öffnen des Sprühventils wird bei positiver Regelabweichung des Primärkühlmitteldruckes kälteres Wasser in das Dampfpolster eingespritzt, so dass durch Dampfkondensation der Primärkühlmitteldruck sinkt. Bei einer negativen Regelabweichung wird die Druckhalterheizleistung erhöht, so dass durch den Anstieg der Siedetemperatur der den Primärsystemdruck bestimmende Druckhalterdruck ansteigt.

Nach dem Prinzip gleichbleibender Primärkühlmittelmasse wird der *Druckhalterniveausollwert* vom Istwert der Primärkühlmitteltemperatur vorgegeben. Die Niveauregelung erfolgt durch Veränderung von Zu- und Abfluss des Volumenregel- und Chemikalienspeisesystems. Hier wird im Nebenstrom ein Teil des Primärkühlmittels ständig gereinigt und die Borkonzentration durch Einspeisen oder Entnahme von Borsäure eingestellt.

Aufgabe der *Dampferzeugerniveauregelung* ist die Konstanthaltung des Wasserniveaus auf der Sekundärseite des Dampferzeugers. Ein zu tiefes Niveau beeinträchtigt die Wärmeabfuhr aus dem Primärkühlkreislauf. Ein zu hohes Niveau gefährdet Frischdampfleitung und Turbine durch Wassereintritt. Die Istwerte von Niveau, Speisewasser- und Dampfmassenstrom werden der Speisewasserregelung zugeführt, deren Stellorgan das Speisewasserregelventil ist.



Figur 2 Vereinfachtes Prinzipschema einer Siedewasserreaktoranlage
P Leistung *p* Druck *L* Niveau $\dot{m}$ Massenstrom

3. Die Leistungsregelung im Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor

3.1 Prinzip

Beim Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (Fig. 2) wird im direkten Kreislauf der die Turbine antreibende Sattdampf im Reaktor selbst erzeugt, indem ein Teil des die Brennelemente durchströmenden Kühlmittels unter einem Druck von 70 bar verdampft. Aus dem vom Reaktor aufsteigenden Nassdampf (286 °C) wird das nicht verdampfte Wasser abgeschieden und im Ringraum des Druckgefässes zwischen Reaktor und Druckgefässwand mit dem zugeführten Speisewasser vermischt. Das zugeführte Speisewasser ersetzt den aus dem Druckgefäss abgeführten Frischdampf, so dass das Kühlmittelinventar im Reaktordruckgefäss konstant bleibt. Die im Ringraum zwischen Reaktor und Druckgefässwand angeordneten Wasserstrahlpumpen fördern das Kühlmittel ins untere Druckgefässplenum und von dort wieder nach oben durch die Brennelemente des Reaktors. Die Treibwasserströme dieser Strahlpumpen werden durch zwei externe Rezirkulationskreisläufe mit je einer Umwälzpumpe erzeugt, welche das Rezirkulationswasser aus dem Ringraum des Druckgefässes beziehen.

Da nur ein Teil des umgewälzten Kühlmittels im Reaktor verdampft wird, beträgt der Kühlmitteldurchsatz beim Siedewasserreaktor ein Mehrfaches des erzeugten Frischdampfmassenstromes. Durch Veränderung des Rezirkulationsmassenstromes lässt sich der Kühlmitteldurchsatz durch den Reaktorkern und damit die Leistung verstellen.

3.2 Das unstabile Selbstregelverhalten des Siedewasserreaktors

Während beim Druckwasserreaktor die Reaktivität wegen des unterkühlten, praktisch inkompressiblen Kühlmittels durch Druckänderungen nicht beeinflusst wird, ist der *Kühlmitteldruckkoeffizient* beim Siedewasserreaktor wegen der Kompressibilität des Dampfes positiv. Das Lastfolgeverhalten des Siedewasserreaktors ist wegen der positiven Rückwirkung des Drukkes auf die Reaktivität *unstabil* und erfordert deshalb ein grundsätzlich anderes Leistungsregelungsprinzip als beim Druckwasserreaktor.

Würde nämlich infolge einer Erhöhung des Generatorleistungssollwertes zuerst das Turbinenregelventil stärker geöffnet, um die Turbinenleistung zu erhöhen, so würde infolge grösserer Dampfentnahme der Kühlmitteldruck im Reaktor abnehmen, das Volumen der Dampfblasen zunehmen und infolge der tieferen Siedetemperatur zusätzliches Kühlmittel ausdampfen. Damit würde die Dichte des Kühlmittels und seiner neutronenmoderierenden Wasserstoffkerne abnehmen und die Reaktorleistung sinken, anstatt entsprechend der Zunahme der Turbinenleistung anzusteigen. Im umgekehrten Fall einer Reduktion von Turbinen- und Generatorleistung würde infolge verbesserter Moderation Dampfdruck und Dichte des Kühlmittels im Reaktor ansteigen und die Reaktorleistung zunehmen, bis zur Druckbegrenzung durch die Abblaseventile. Um diese unerwünschte positive Rückwirkung von Druckänderungen auf die Reaktivität zu vermeiden, wird der Kühlmitteldruck im Reaktor von der *Vordruckregelung* mit Hilfe des Turbineneinlass- bzw. -bypassventils als Stellorgan konstant gehalten. Eine Leistungserhöhung wird erreicht, indem der *Rezirkulationsmassenstrom* erhöht wird, wodurch der Kerndurch-

satz und damit auch die Strömungsgeschwindigkeit der im Reaktor erzeugten Dampfblasen zunimmt. Die Verweildauer der Dampfblasen im Reaktor wird verkürzt und dadurch der Dampfblasengehalt im Kühlmittel verkleinert. Damit erhöht sich die Dichte des Kühlmittels und seiner neutronenmoderierenden Wasserstoffkerne. Der Reaktivitätsgewinn durch verbesserte Moderation lässt die Leistung so lange ansteigen, bis die erhöhte Brennstofftemperatur und Dampfproduktion für einen Ausgleich sorgen. Die Erhöhung des Dampfdruckes über den konstanten Sollwert von etwa 70 bar bewirkt über den Vordruckregler eine Vergrösserung der Öffnung des Turbineneinlassventils, bis mit zunehmendem Frischdampfmassenstrom zur Turbine der Druckistwert wieder mit dem Sollwert übereinstimmt. Ein entsprechendes Verhalten mit umgekehrtem Vorzeichen ergibt sich bei einer Leistungsreduktion.

3.3 Hauptregelorgane: Rezirkulationsmassenstrom und Kontrollstäbe

Das wichtigste Stellmittel zur Leistungsregelung von Siedewasserreaktoren ist der *Rezirkulationsmassenstrom*. Die *Kontrollstäbe* dienen vorwiegend der Beeinflussung der Leistungsverteilung, der Kompensation des Spaltstoffabbrandes sowie zum Starten und zum Abbruch der Kettenreaktion. Wegen des beim Siedewasserreaktor über dem Kern liegenden Wasserabscheiders und Dampftrockners werden die Kontrollstäbe von unten zwischen die Brennelemente eingefahren. Bei einer Reaktorschnellabschaltung geschieht das vollständige Einfahren der Stäbe innert Sekunden.

Anders als beim Druckwasserreaktor kann beim Siedewasserreaktor wegen der Radioaktivität kein Frischdampf in die Atmosphäre abgeblasen werden, so dass hier der Turbinenkondensator die einzige Wärmsenke darstellt. Um bei einem Verlust des Kondensatorvakuums einen Druckanstieg zu verhindern, öffnet die *Vordruckregelung* Abblase- und Sicherheitsventile, welche den Dampf in ein geschlossenes Druckabbau- und Kondensationssystem leiten.

Die Wirkungsrichtung der Leistungsregelung verläuft also beim Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor wegen des positiven Druckkoeffizienten vom Reaktor zur Turbine, während beim Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor die Leistung an der Turbine eingestellt wird und wegen des negativen Kühlmitteltemperaturkoeffizienten die Reaktorleistung der Turbinenleistung folgt.

Im Gegensatz zum graphitmoderierten Siedewasserreaktor mit positivem Dampfblasengehaltskoeffizienten besteht bei unseren Siedewasserreaktoren mit positiven Druckkoeffizienten kein Risiko einer unkontrollierten Leistungsexkursion, da ein Reaktivitätsanstieg durch unbeabsichtigten Druckanstieg im Siedewasserreaktor durch Abblase- und Sicherheitsventile wirksam und sicher begrenzt werden kann.

Jüngere Siedewasserreaktoranlagen verfügen im Rahmen der Leistungsregelung über eine automatische Umwälzregelung, welche durch Anpassen des Rezirkulationsmassenstromes die Reaktorleistung regelt. Dadurch können Störgrösseneinwirkungen wie Spaltstoffabbrand, Änderungen von Speisewassertemperatur und Konzentration der neutronenabsorbierenden Spaltprodukte Xenon und Samarium kompensiert werden.

3.4 Hilfsregelorgane

Im Zusammenhang mit der Leistungsregelung erfüllt die *Regelung des Kühlmittelniveaus* im Reaktordruckgefäss eine wichtige und anspruchsvolle Aufgabe. Ein zu tiefes Wasserniveau gefährdet die Brennstabintegrität durch unzureichende Wärmeabfuhr, während ein zu hohes Niveau im Druckgefäss Frischdampfleitung und Turbine durch Wassereintritt gefährdet. Die Messwerte von Niveau, Dampfmassenstrom und Speisewassermassenstrom wirken über den Niveauregler auf die Speisewasserzufuhr.

4. Schlussbemerkung

Diese sehr stark vereinfachte Begründung des physikalischen Verhaltens leichtwassermoderierter Druck- und Siedewasserreaktoren sollte aus regeltechnischer Sicht verständlich machen, dass es sich bei unseren schweizerischen Kernkraftwerksreaktoren in bezug auf den Verlauf der leistungsbestimmenden Kettenreaktion grundsätzlich um Regelstrecken mit Ausgleich handelt. Auch wurde versucht aufzuzeigen, dass hier im Gegensatz zu anderen Reaktorbauarten das Vorhandensein von genügend Kühlmittel gleichzeitig Bedingung für die leistungserzeugende Kettenreaktion ist. Dies bedeutet nicht, dass andere Reaktortypen im bestimmungsgemässen Leistungsbetrieb unsicher sind, aber sie können sich, wie das Beispiel von Tschernobyl zeigt, bei unvorschriftsmässiger Betriebsweise, bezüglich Reaktivitätsstörungen sehr viel weniger fehlertolerant verhalten als Leichtwasserreaktoren.