

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 84 (1966)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Regelungsverhalten von Kernkraftwerken und Wasserkraftwerken  
**Autor:** Stein, T.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-68832>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

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

## Regelungsverhalten von Kernkraftwerken und Wasserkraftwerken

Von T. Stein, dipl. Ing. ETH, Vicenza

DK 621-531.9:621.039.524.44

Eine Wirkung in verkehrter Richtung durch Dampfblasen in einem Kernreaktor tritt in analoger Weise bei Wasserturbinen durch den Druckstoss ein. In beiden Fällen wird der störende Effekt auf die Turbinenleistung durch optimale Regelung aufgehoben. Die Lösung des Regelungsproblems gestattet durch Fortfall aller Wärmeaustauscher das ganze Kernkraftwerk zu vereinfachen, wobei es sich wie ein Wasserkraftwerk an der Frequenzregelung beteiligt.

### Wirkung in verkehrter Richtung

An einer Tagung der Schweiz. Gesellschaft für Automatik über Regelungsprobleme an Kernreaktoren wurde dargelegt [1], dass nach einer sprunghaften Steigerung der direkten Dampfentnahme aus Reaktoren, die mit Wasser als Kühlmittel und Moderator arbeiten, der Neutronenfluss und damit die Reaktorleistung nicht zunimmt, sondern durch verstärkte Dampfblasenbildung abnimmt. Es findet also im Reaktor für den Neutronenfluss eine Wirkung in verkehrter Richtung statt.

Es wäre irrig aus diesem Verhalten der Anlage bei sprunghafter Änderung der Stellgrösse *ohne Regeleinriff* zu schliessen, dass sich nicht bei Einschaltung einer richtig ausgebildeten und eingestellten Regelung in den Regelkreis jede Wirkung der Turbinenleistung in verkehrter Richtung vollkommen beseitigen lässt.

In schweizerischen Elektrizitätswerken ist uns wohlbekannt, dass der *Druckstoss* bei Wasserturbinen nach sprunghafter Steigerung der Öffnung der Stellorgane an der *ungeregelten Anlage* zunächst die Turbinenleistung nicht zunehmen, sondern abnehmen lässt. Es findet also wie bei Kernreaktoren mit ausschliesslich direkter Dampfentnahme in der unregelmässigen Anlage eine Wirkung in verkehrter Richtung statt (Bilder 1a und 1b).

Bei schlecht eingestelltem Regler einer Wasserturbine (Bild 1c) erstreckt sich diese Wirkung in verkehrter Richtung nicht nur auf die Änderung des Wasserdruckes und damit des krafterzeugenden Gefälles, sondern auch auf die erzeugte Turbinenleistung. Dagegen beschränkt sich nach Bild 1d die Wirkung in verkehrter Richtung ausschliesslich auf den Wasserdruck und sie *verschwindet vollkommen* für die Änderung der erzeugten Turbinenleistung bei *optimal* eingestellter Regelung [2]. Es wird sich zeigen, wie die Regelungstechnik imstande ist, auch bei Kernreaktoren mit direkter Dampfentnahme aus dem Reaktor ein ebenso gutes Regelungsverhalten wie bei Wasserturbinen zu erreichen.

### Beteiligung an der Frequenzregelung des Netzes

Das durch die Entwicklung der Regelungstechnik erreichte gute Regelungsverhalten der Wasserturbinen trotz der erschwerenden Druckstosswirkung geht so weit, dass bei gemischter hydraulischer und thermischer Energie-Produktion bisher in erster Linie Wasserkraftwerke zur Frequenzhaltung herangezogen wurden. Dies trotzdem es bei brennstoffgefeuerten Dampfkraftwerken kein Druckstossproblem mit Wirkung in verkehrter Richtung gibt [2]. Die Dampfzeugung folgt aber den Stellgrössen der Kesselregelung [3] nur träge, und besonders bei Verwendung von Zwangsdurchlaufkesseln mit hohen Kesseldrücken nimmt das ausgleichende Speichervermögen des Kessels ab.

Für die *Primärregelung* der Frequenz durch Steuerung der Turbinenleistung besteht aber die Tendenz, dass im westeuropäischen Verbundnetz auch modernste Dampfkraftwerke sich an der Frequenzhaltung beteiligen. Für die kurzzeitigen wechselnden Lastabweichungen nach oben und unten um eine langsamer sich ändernde Mittellage reicht auch die herabgesetzte Speichermöglichkeit in den Rohren von Hochdruckkesseln mit Zwangsdurchlauf ohne dampfspeichernde Wassermassen einer Kesseltrommel aus, um die verspätete Wärmezufuhr im Kessel zu überbrücken [4]. Wenn im westeuropäischen Verbundnetz durch Beseitigung von Öffnungsbegrenzungen und bei Dampfkraftwerken von Vordruckreglern, die auf Grundlast steuern, sich alle hydraulischen und thermischen Kraftwerke an der primären Frequenzregelung beteiligen, wie dies von der U.C.P.T.E. [5] seit Jahren angestrebt wird, entfällt auf jede Einheit nur eine ganz geringe Laständerung. Es können und müssen sich dann auch Kernkraftwerke, die, um wirtschaftlich zu arbeiten, mit z. B. 80% also 7000 Volllast-Jahresstunden auszunutzen sind, für diese kleinen Laständerungen an der primären Frequenzregelung beteiligen. Sie sind grundsätzlich dazu noch besser geeignet als moderne feuerbeheizte thermische Kraftwerke, da grosse wärmespeichernde Wassermassen zur Verfügung

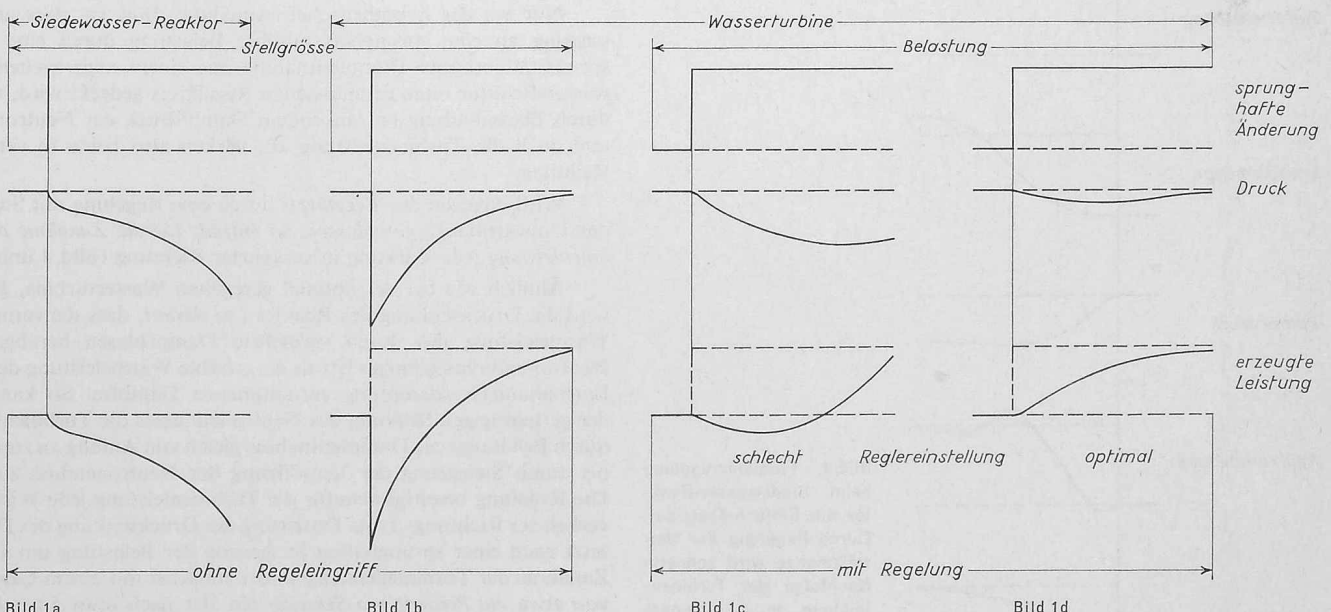


Bild 1a

Bild 1b

Bild 1c

Bild 1d

Bild 1. Wirkung in verkehrter Richtung bei sprunghafter Zunahme der Stellgrösse ohne Regeleinriff und der Belastung bei geregelter Wasserturbine

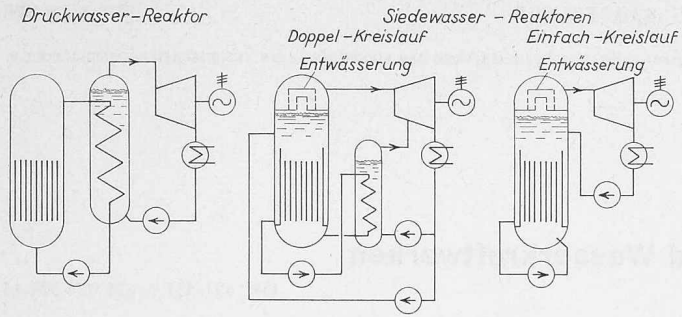


Bild 2a. Ganze Dampfmenge indirekt durch Wärmeaustauscher erzeugt

Bild 2b. Sekundäre Teildampfmenge indirekt durch Wärmeaustauscher erzeugt

Bild 2c. Kein indirekter Wärmeaustauscher, Ganze Dampfmenge direkt im Reaktor erzeugt

Bild 2. Fortgesetzte Vereinfachung der Kernkraftwerke, die mit Leichtwasser-Reaktor arbeiten, indem beim Siedwasser-Reaktor mit Einfach-Kreislauf 2c alle indirekten Wärmeaustauscher mit ihren eingebauten Heizflächen-Systemen wegfallen

stehen. Um so mehr muss man die Regelung so ausbilden, dass diese guten Regeleigenschaften nicht durch störende Gegenwirkungen des Neutronenflusses ungenützt bleiben.

Für den praktisch wichtigsten Fall hoher Leistung des Kernkraftwerks mit einer geringen Marge zur Beteiligung an der Frequenzregelung wird nachfolgend keine Änderung der Stellgröße für die Steuerstäbe angenommen, die zur Lastreduktion den Neutronenfluss heruntersetzen.

#### Selbstregelung bei indirektem Wärmeaustauscher

Wenn zur Deckung einer sprunghaften Zunahme der Belastung mehr Dampf aus einem Wärmeaustauscher, Bild 2a oder 2b, entnommen wird, der zwischen Reaktor und Dampfturbine eingeschaltet ist, so kühlt sich sein Wasserinhalt ab, und infolgedessen sinkt (durch Umlauf des Reaktorwassers durch die Heizfläche des Wärmeaustauschers) auch die mittlere Wassertemperatur im Reaktor, was selbstregelnd durch Abkühlung den Neutronenfluss steigert, bis die Reaktorleistung dem gesteigerten Dampfbedarf entspricht. Der Neutronenfluss folgt also selbstregelnd dem Leistungsbedarf [1]. Beim Druckwasser-Reaktor, Bild 2a, wird die ganze Dampfmenge indirekt durch Wärmeaustauscher erzeugt.

Beim Siedwasser-Reaktor mit Doppel-Kreislauf, Bild 2b, wird nur eine sekundäre Teildampfmenge indirekt durch Wärmeaustauscher erzeugt. Zur Laständerung wirkt die Regelung auf diese Sekundärdampfmenge, während die aus dem Reaktor entnommene Primärdampfmenge unverändert bleibt. Somit tritt keine vermehrte Dampfblasenbildung ein, die den Neutronenfluss herabsetzen würde. Wasser-

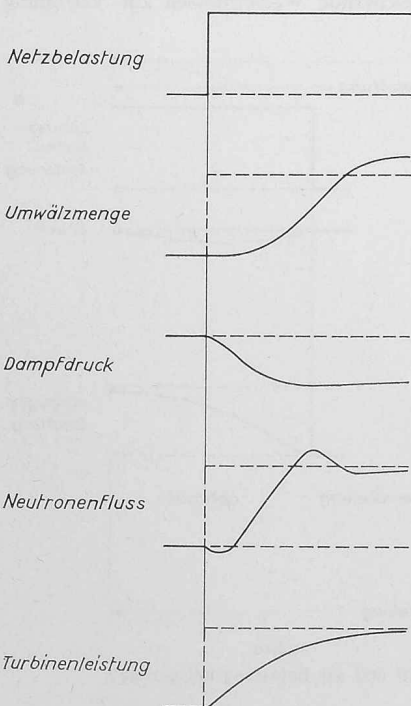


Bild 4. Frequenzregelung beim Siedwasser-Reaktor mit Einfach-Kreislauf. Durch Regelung der Umwälzmenge wird schnelle Nachfolge der Turbinenleistung, ohne Leistungsänderung in verkehrter Richtung erreicht (unten)

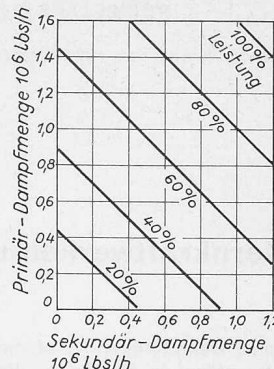


Bild 3a. Änderung der Reaktorleistung durch veränderte Sekundärdampfmenge

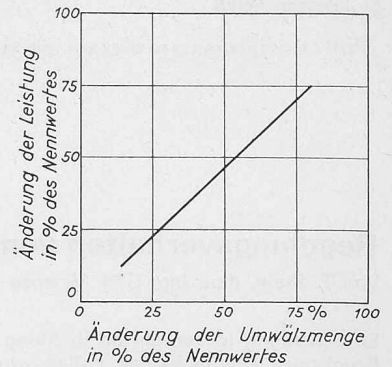


Bild 3b. Änderung der Reaktorleistung durch veränderte Umwälzung

Bild 3. Regelung der Siedwasser-Reaktoren

abscheidung und Trocknung für den aus dem Reaktor entnommenen Dampf erfolgt im Reaktor selbst [6].

Durch die zunehmende Sekundärdampfmenge findet im Wärmeaustauscher und demzufolge durch Wasserumlauf im Reaktor eine Abkühlung statt, die den Neutronenfluss steigert, bis sich die erzeugte Wärme dem Mehrbedarf an Sekundärdampf anpasst [1].

Bild 3 zeigt am Beispiel des Kernkraftwerkes Dresden von 200 MW, wie die Leistung von Primär- und Sekundärdampfmenge abhängt [6]. Bei unveränderter Primärdampfmenge lässt sich die Reaktorleistung durch Regelung der Sekundärdampfmenge von 100% auf unter 60% heruntersetzen. Die Regelung der Sekundärdampfmenge des Siedwasser-Reaktors genügt also in weiten Grenzen allen Erfordernissen zur Beteiligung an der Frequenzregelung des Netzes. Bei dieser Bauart des Siedwasserreaktors gibt es keine Wirkung in verkehrter Richtung [1].

#### Siedwasser-Reaktor mit Einfach-Kreislauf

Zur fortgeschrittensten Vereinfachung der Reaktoren [8] mit Wasser als Kühlmittel und Moderator arbeitet nach Bild 2c der Reaktor im Gegensatz zu den Bildern 2a und 2b ohne jeden Wärmeaustauscher zwischen Reaktor und Dampfturbine, jedoch mit Zwangsumlauf für das Reaktor-Wasser. Hier wird die Reaktorleistung statt durch veränderte Sekundärdampfmenge, Bild 3a, durch veränderte Menge des Zwangsumlaufes geregelt [8] (Bild 3b). Die in Bild 3b gezeigte annähernde Proportionalität zwischen Änderung der Umwälzmenge und Änderung der Reaktorleistung gilt bei unveränderten Bedingungen für Temperatur, Druck und Dampfblasenbildung im Reaktor. Der Einfluss der Umwälzmenge auf die Reaktorleistung ist so gross, dass er auch bei entgegenwirkenden Änderungen dieser Größen, die sich bei Regelvorgängen ergeben, bestehen bleibt.

Nur bei der hypothetischen Annahme, Bild 1a, dass eine Anpassung an eine sprunghaft erhöhte Belastung durch eine ebenso sprunghaft erhöhte Dampfentnahme aus einem unregelmäßig Siedwasser-Reaktor ohne geschlossenen Regelkreis gedeckt wird, nehmen durch Blasenbildung bei sinkendem Dampfdruck der Neutronenfluss und auch die Turbinenleistung ab, wirken also beide in verkehrter Richtung.

Wird dagegen der Regelkreis durch eine Regelung mit Steuerung der Umwälzmenge geschlossen, so entfällt für die Zunahme der Turbinenleistung jede Wirkung in verkehrter Richtung (Bild 4 unten)

Ähnlich wie bei der optimal geregelten Wasserturbine, Bild 1d, wird die Drucksenkung des Reaktors so dosiert, dass die verminderte Wärmeleistung des durch vermehrte Dampfblasen herabgesetzten Neutronenflusses geringer ist, als die erhöhte Wärmeleistung des durch Entspannungsverdampfung entnommenen Dampfes. So kann trotz der geringfügigen Senkung des Neutronenflusses die Turbinenleistung durch Erhöhung der Dampfentnahme gleich von Anfang an zunehmen, bis durch Steigerung der Umwälzung der Neutronenfluss zunimmt. Die Regelung beseitigt also für die Turbinenleistung jede Wirkung in verkehrter Richtung. Trotz Dosierung der Drucksenkung des Dampfes setzt nach einer sprunghaften Steigerung der Belastung um 10% die Zunahme der Turbinenleistung sofort zunächst mit einem Gradienten von etwa ein Prozent pro Sekunde ein, der nach etwa 5 s unter dem Einfluss steigender Umwälzung auf den Wert von 1/2% pro s übergeht. Infolge des durch grössere Umwälzung gesteigerten Neutronen-



flusses wird auch trotz verstärkter Dampfentnahme zur Deckung der sprunghaft erhöhten Belastung der ursprüngliche Dampfdruck wieder hergestellt. Die Dampfturbine wird durch einen frequenzabhängigen Vordruckregler gesteuert. Die Frequenz stellt den Sollwert des Vordruckreglers, wobei Ausmass und Gradient der Verstellung dosiert sind.

Die Frequenz wirkt ausserdem auf die Steuerung der Umwälzpumpen. Nach Überwindung der Trägheit ihrer Schwungmassen setzt nach wenigen Sekunden die Steigerung des Neutronenflusses ein. Bis dahin speist die Entspannungsverdampfung den Lastanstieg, von da ab bewirkt der erhöhte Neutronenfluss ausser der Dampflieferung für den weiteren Anstieg der Turbinenleistung auch die Rückführung des Dampfdruckes auf den ursprünglichen Wert (Bild 4).

#### Analoges Regelungsverhalten wie bei Wasserturbinen

Nach der Gegenüberstellung, Bild 5, stimmt das optimale Regelungsverhalten eines Siedewasser-Reaktors mit Einfach-Kreislauf (Bild 2c) mit dem einer Wasserturbine überein.

Die Wirkungen in verkehrter Richtung – für das Gefälle durch den Druckstoss der Wasserturbine, für den Neutronenfluss beim Reaktor – werden nicht beseitigt, sondern durch optimale Regelung so dosiert, dass im Gegensatz zum schlecht eingestellten Regler, Bild 1c, für die Änderung der Turbinenleistung jede Wirkung in verkehrter Richtung verschwindet. Das wird in beiden Fällen dadurch erleichtert, dass selbst bei einem sprunghaften Laststoss im Netz die Turbinenleistung sich nicht sprunghaft zu ändern braucht, weil zunächst die Mehrleistung aus den speichernden Schwungmassen der Turbinen im Netz gedeckt wird. Einem Laststoss folgen dadurch die regelnde Frequenz und die Turbinenleistung nicht sprunghaft, sondern mit einem Gradienten.

Daraus geht hervor, dass der Siedewasser-Reaktor auch in seiner einfachsten Bauart (Bild 2c) ohne jeden indirekten Wärmeaustauscher ebenso wie Wasserturbinen geeignet ist, an der Frequenzregelung des Netzes teilzunehmen. Dabei sind die tatsächlichen Bedingungen der primären Frequenzregelung für Wasserkraftwerke wie für Kernkraftwerke wesentlich leichter zu erfüllen, als die hier zugrunde gelegten sprunghaften Änderungen der Belastung. In einem Verbundnetz verlaufen dank geringem Gleichzeitigkeitsfaktor von Stromstössen die Laständerungen nicht sprunghaft, sondern praktisch stetig, was die Regelung erleichtert.

#### Durch Automatik vereinfachte Gesamtanlage

In der vereinfachenden Weiterentwicklung der Leichtwasser-Reaktoren geht man beim Einfach-Kreislauf des Siedewasser-Reaktors nach Bild 2c dazu über [8], alle indirekten Wärmeaustauscher vollkommen wegzulassen. Trotz diesem vereinfachenden Wegfall sämtlicher Wärmeaustauscher kommt man wie beim Druckwasser-Reaktor nach Bild 2a mit nur zwei Pumpen-Kreisläufen aus statt drei Pumpen-Kreisläufen beim Siedewasser-Reaktor mit Doppel-Kreislauf nach Bild 2b. Dem Druckwasser-Reaktor nach Bild 1a gegenüber erreicht man eine wesentliche Vereinfachung durch Wegfall aller Wärmeaustauscher mit ihren eingebauten Heizflächen.

Es gehört zum Wesen der Automatik, die Aufgabe zu erfüllen, mit ihren im Verhältnis zur Anlage geringen Kosten auf die ganze Anlage verbessernd einzuwirken. Dass hier die Automatik gestattet,

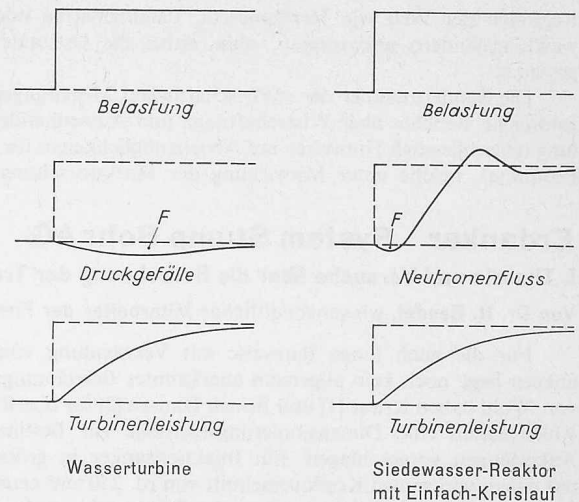


Bild 5. Analog zur Wasserturbine verschwindet bei optimaler Regelung die Wirkung in verkehrter Richtung auf den Verlauf der Turbinenleistung (unten) auch beim Siedewasser-Reaktor mit Einfach-Kreislauf vollkommen, trotz vorübergehend verkehrter Reaktion des Druckgefälles bei Wasserturbinen und des Neutronenflusses beim Kernreaktor (Flächen F)

unter Überwindung der entgegenwirkenden Reaktionen das ganze Kernkraftwerk durch Wegfall aller Wärmeaustauscher mit ihren eingebauten Heizsystemen zu vereinfachen, wobei wie bei Wasserkraftwerken die Beteiligung an der Frequenzregelung des Netzes erfolgt, ist ein bedeutender Fortschritt, der durch die Regelungstechnik erreicht wird.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Profos, P.: Regeltechnisches Konzept von Kernenergieanlagen. Übersichtsvortrag an der Tagung der Schweiz. Gesellschaft für Automatik in Würenlingen 23.—24. 11. 1965.
- [2] Stein, T.: Der Druckstoss als Hindernis bei der Regelung und Dimensionierung von Wasserkraftanlagen. Vortrag an der Tagung der Schweiz. Gesellschaft für Automatik in Zürich 5. 9. 1957. SBZ 1957, H. 42, S. 671—675.
- [3] Profos, P.: Die Regelung von Dampfanlagen. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962.
- [4] Stühlen, H.: Alte und neue Kraftwerke in Sicht des Verbundbetriebes. «Techn. Mitteilungen» 1964, Heft 1, S. 30—39.
- [5] Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité. Jahresbericht 1958—1959.
- [6] Shannon, R. H., Roy, G. M.: Central Station BWR Nuclear Power. American Society of Mechanical Engineers, Nov. 1962.
- [7] Crowther, R. L., Fischer, D. L.: Nuclear Characteristics of large Advanced Boiling Water Reactors. American Nuclear Society, Sept. 1963.
- [8] White, G.: Developments in Boiling Water Reactors. Third International Conference on the peaceful uses of Atomic Energy, Genf August—September 1964.

## Zur Wirtschaftslage der Schweiz

DK 338.97 (494)

Die erste Ausgabe 1966 (Nr. 1—2) des Wochenblattes «Wirtschaftliche Mitteilungen» der Schweizerischen Zentrale für Handelsförderung (Office suisse d'expansion commerciale, Rue de Bellefontaine 18, 1001 Lausanne) ist als 52seitige Sondernummer erschienen. Einleitend stellt Dr. Albert Masnata, Direktor der Handelszentrale und Dozent an der Universität Lausanne, Betrachtungen zum internationalen Wirtschaftsgeschehen an. Nach einer kurzen Würdigung der Ergebnisse in den verschiedenen Erdteilen kommt Dr. Masnata auf den «Sonderfall Schweiz» zu sprechen, wobei es sich eher nur insofern um einen Sonderfall zu handeln scheint, als wir allen Grund haben, uns um die Absatzmärkte im Ausland ernsthaft zu bemühen. Wir geben nachfolgend den Schluss dieser Studie teilweise gekürzt wieder:

«Informationen, die man von der Industrie erhält, vertreten die Auffassung, dass die aussergewöhnlich günstige Lage, in der sich unser Land bisher in bezug auf den Absatz ihrer Erzeugnisse befunden hat, ein

Ende zu nehmen scheint, wenn auch die Verhältnisse, je nach Industrien, verschieden sind. Diese Sachlage gibt Anlass, uns im Interesse der schweizerischen Wirtschaft mit dem Geschehen auf den Auslandsmärkten zu befassen. Es sind Verschiebungen im Gange, und auf einzelnen Märkten müssen wir auch Rückschläge verzeichnen, die uns veranlassen, die eintretenden Veränderungen sowohl vom Gesichtspunkt des einzelnen Unternehmens wie auch von der allgemeinen Werte der Wirtschaftspolitik der Schweiz aus zu studieren. Alle bisher durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass der relative Anteil der Schweiz an der Einfuhr in die EWG in den letzten Jahren zurückgegangen ist, zweifellos in erster Linie wegen der Zolldiskriminierung. Die Totalziffern unserer Exporte nach diesen Ländern lassen wohl erkennen, dass die Dinge für manche Industrien noch günstig liegen, doch können gewisse Ausfälle auf den EWG-Märkten in den EFTA-Ländern nur teilweise kompensiert werden. Um so mehr müssen wir uns intensiv und mit Beständigkeit für Märkte in anderen