



Doctoral Thesis

Oszillatorische Instabilität des Durchflusses in Verdampferrohren

Author(s):

Janach, Walter

Publication Date:

1971

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000090083> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. Nr. 4640

Oszillatorische Instabilität des Durchflusses in Verdampferrohren

ABHANDLUNG

zur Erlangung

der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE

ZÜRICH

vorgelegt von

WALTER JANACH

dipl. Masch.-Ing. ETH

geboren am 1. Oktober 1939

von Schaffhausen und Hallau (Kt. Schaffhausen)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. P. Profos, Referent

Prof. Dr. H. Thomann, Korreferent

Juris Druck + Verlag Zürich

1971

Zusammenfassung

Dampf ist ein in der Technik häufig verwendeter Energieträger, der in grossen Mengen auf vielfältige Art produziert wird. Eine in Dampferzeugern mitunter auftretende unerwünschte Begleiterscheinung des Verdampfungsprozesses ist der instabile Bewegungsablauf des Arbeitsmittels in den durchströmten Rohren. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von Schwingungen der Durchflussmengen in parallelen Verdampferrohren, die an gemeinsame Sammler angeschlossen sind. Den Ausgangspunkt bilden Experimente am Versuchsdampferzeuger des Instituts für Regelung und Dampfanlagen der ETH Zürich. Die Anlage dient der Untersuchung eines konvektiv beheizten Dampferzeugers, wie er in Kernkraftwerken mit gasgekühlten Reaktoren zur Anwendung kommt.

In den zwei parallelen Rohren des untersuchten Dampferzeugers treten bei konstanter totaler Speisewassermenge periodische Schwingungen des Durchflusses auf mit Schwingungszeiten in der Grössenordnung einer Minute. Der Vorgang ist genau symmetrisch mit einer halben Periode Phasendifferenz zwischen den beiden Rohrsträngen. Auf der Eintrittseite sind die Amplituden sehr gross und führen abwechselungsweise zur Rückströmung des Speisewassers. Die beiden Dampfmenen am Austritt schwingen weniger kräftig, wiederum mit einer halben Periode Phasenverschiebung gegenüber den zugehörigen Wassermengen. Die Schwingungen sind nicht an einen ausgezeichneten Betriebszustand gebunden, sondern sind über einen weiten Bereich der Betriebsparameter anzutreffen. Sie können jedoch immer durch zusätzlich erzeugten Druckverlust am Eintritt in die einzelnen Rohre unterdrückt werden.

Das Vorgehen besteht in der Bildung eines mathematischen Modells des Originalsystems mit denselben dynamischen Eigenschaften. Am Modell lassen sich das Entstehen der Schwingung sowie die Parametereinflüsse bequem beobachten. Massgebend für das Auftreten der Schwingung ist die Instabilität des stationären

Gleichgewichtszustandes in einem bestimmten Betriebspunkt des Dampferzeugers. Die Untersuchung beschränkt sich auf das dynamische Verhalten bei kleinen Abweichungen vom Beharrungszustand. Ihr zeitlicher Verlauf bestimmt die Stabilitätsverhältnisse.

In den durchgehenden Rohren des Dampferzeugers wird zunächst das Wasser auf Siedetemperatur aufgeheizt, dann verdampft, und schliesslich wird der entstandene Dampf noch überhitzt. Das Verdampferrohr bildet ein System mit verteilten Parametern, das durch die beiden Unstetigkeiten des Anfangs- und Endpunktes der Verdampfung sowie durch Nichtlinearitäten gekennzeichnet ist. Die Beschränkung auf kleine Störungen des Gleichgewichtszustandes ermöglicht eine zweckmässige mathematische Behandlung durch Linearisieren. Die Lösung der partiellen Differentialgleichungen erfolgt für den Vorwärmer-, Verdampfer- und Ueberhitzerabschnitt getrennt mit Hilfe der Laplace-Transformation bezüglich der Zeit. Die so erhaltenen Uebertragungsfunktionen der einzelnen Abschnitte sind die Elemente der Dynamik des Gesamtsystems. Die Stabilitätsuntersuchung erfolgt direkt im Frequenzbereich, wodurch die mühsame Rücktransformation in den Zeitbereich entfällt. Dies geschieht durch Anwenden des Nyquist-Stabilitätskriteriums auf die Uebertragungsfunktion des Hauptschwingkreises.

Für den Vorwärmer ist nach Laplace-Transformation bezüglich der Zeit eine geschlossene Lösung über den Ort möglich; sie liefert direkt die gesuchte Uebertragungsfunktion. Der Verdampfer erfordert eine weitere Aufteilung in Unterabschnitte. Hier gelingt die Lösung im Zeitbereich für sprungförmige Anfangsbedingung. Die erhaltenen Sprungantworten werden nach Approximation durch integrierende und Totzeitelemente ebenfalls in den Frequenzbereich transformiert. Jeder Verdampferabschnitt ist mit jedem anderen durch Teilübertragungsfunktionen gekoppelt, woraus ein stark vermaschtes Blockschaltbild entsteht. Die numerische

Auswertung der Gesamtübertragungsfunktion des vollständigen Systems erfolgt mit Hilfe eines Digitalprogramms auf dem Rechenautomaten.

Von grosser Bedeutung für die Modellbildung ist die Wahl der vereinfachenden Annahmen, ohne die eine mathematische Behandlung nicht möglich ist. Sie beruht auf einem quantitativen Vergleich der verschiedenen Teilvorgänge bezüglich ihres relativen Einflusses. Hier seien nur die wichtigsten Voraussetzungen aufgezählt, nämlich: zeitlich konstante Beheizung, Druckunabhängigkeit der Dichte von Wasser und Satttdampf, Kolbenströmung und thermodynamisches Gleichgewicht im Zweiphasengebiet.

Im Vorwärmerabschnitt wird die Wärmespeicherung der Rohrwand berücksichtigt in der Herleitung für die Verschiebung des Verdampfungsanfangspunktes. Das Uebertragungsverhalten im Zweiphasengebiet enthält die Einflüsse der Verschiebung dieses Punktes und der Speicherdampfvorgänge. Der Ueberhitzer wird bezüglich des Druckabfalls als einzelne Drosselstelle behandelt.

Die Schwingung entsteht im Zusammenspiel der im Vorwärmer konzentrierten trägen Wassermasse einerseits und dem Druckabfall über den hinteren Teil des Verdampfers und den Ueberhitzer andererseits. Jede Druckabfallstörung erteilt der Vorwärmermasse eine gewisse Beschleunigung, die zu einer Durchflussstörung führt. Diese durchläuft anschliessend das Zweiphasengebiet und erzeugt schliesslich wieder eine Störung des Druckabfalles. Es handelt sich um ein System mit Energiezufuhr, das durch das Vorhandensein von internen Energiesteuerstellen grundsätzlich der Gefahr von Instabilität ausgesetzt ist.

Mit Hilfe des Digitalprogramms wurde an einer Reihe typischer Betriebszustände des Versuchsdampferzeugers die Stabilitätsuntersuchung durchgeführt. Der anschliessende Vergleich mit experimentellen Ergebnissen ergab einen befriedigenden Grad der Uebereinstimmung. Die Gegenüberstellung von Experiment und Berechnung vermittelt einen Begriff über den Gültigkeitsbereich

des Modells und seine Anwendungsmöglichkeiten. Der Schwerpunkt liegt eher in der Voraussage der von einer Parametervariation ausgehenden Einflüsse auf das Schwingungsverhalten eines Verdampfersystems als bei einer exakten Berechnung der Stabilitätsverhältnisse eines gegebenen Betriebszustandes.

Jede vereinfachende Annahme bei der Modellbildung führt zu einer Beschränkung des Gültigkeitsbereiches. Die Herleitungen wurden für einen konvektiv beheizten Gegenstrom-Dampferzeuger vorgenommen und seinen spezifischen Eigenschaften angepasst. In diesem Sinne ist das Modell als Ganzes nur bedingt auf andersartige Verdampfersysteme anwendbar. Einzelne fundamentale Zusammenhänge sind jedoch charakteristisch für den Verdampfungsvorgang im durchströmten Rohr und besitzen allgemeine Gültigkeit. Ihre mathematische Formulierung und der gewählte Lösungsgang bilden einen Beitrag auf dem weitreichenden Gebiet der Verdampferdynamik.