

8. Zusammenfassung

Der Berücksichtigung der instationären Rohrströmung bei der Untersuchung des dynamischen Verhaltens von hydrostatischen Anlagen kommt vor allem dann Bedeutung zu, wenn lange Leitungen installiert sind, bei relativ hochfrequenten Schwingungsvorgängen aber auch in kompakten Systemen. Wegen der zahlreichen Nichtlinearitäten in der Hydraulik ist eine Behandlung im Zeitbereich sinnvoll. Hierzu wird ein Verfahren zur Simulation auf dem Digitalrechner vorgestellt. Die Berechnungen dienen im allgemeinen der Optimierung von mit hydraulischen Komponenten aufgebauten Regelungen und Steuerungen.

Zunächst wird ein Überblick über die Geschichte der Druckstoßbehandlung gegeben, ausgehend von Berechnungen an Wasserkraftwerken bis zu neueren Untersuchungen im Motorenbau und in der Medizin.

Die Entwicklung des mathematischen Modells für die instationäre Rohrströmung berücksichtigt die verteilten Parameter Masse, Elastizität und Reibung. Die Bewegung wird in einem zweidimensionalen System dargestellt, wobei der Rohrlängskordinate die vorrangige Bedeutung zukommt. Der Abstand von der Rohrmitte ist zur Beschreibung des Laminarzustandes und der daraus resultierenden Reibung als zweite Koordinate eingeführt. Es wird vorausgesetzt, daß die Strömungsgeschwindigkeit erheblich niedriger als die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit ist.

Mit diesen Vereinfachungen ist es möglich, die bei ölhydraulischen Anlagen auftretenden Effekte mit vertretbarem Aufwand zu beschreiben. Andererseits wird die frequenzabhängige Dämpfung ausführlich dargestellt, da ihr bei geringen Rohrdurchmessern und hohen Viskositäten ein erheblicher Einfluß

zukommt. Der Vergleich Messung-Rechnung zeigt gute Übereinstimmung.

Die Vorgehensweise im Frequenzbereich wird kurz erläutert. Für die Simulation im Zeitbereich wird ein Rechnerprogramm vorgestellt, das auf dem Charakteristiken-Verfahren basiert. Das Leitungsmodell ist hier einschließlich des Reibungseinflusses und der Nichtlinearität bei Kavitation enthalten. .

Die Zustände an den Rohrenden (Druck und Volumenstrom) stehen in einheitlicher Form zur Verknüpfung mit anderen Bauteilen oder Rohren im Schaltplan und zur Auswertung zur Verfügung. Wegen des modularen Aufbaus können auch komplexe Systeme in kurzer Zeit programmiert werden. Die Programmalgorithmen werden gemeinsam mit dem bereits eingeführten Programmsystem DSH (Digitale Simulation Hydraulischer Antriebe und Systeme) eingesetzt, da sich für den Anwender hieraus wesentliche Vereinfachungen ergeben. Das Programm ist auch auf relativ kleinen Rechenanlagen lauffähig.

Weiterhin wird ein neues Verfahren zur Messung der Volumestrompulsation von Hydropumpen mit Hilfe einer reflexionsfrei abgeschlossene Rohrleitung vorgestellt. Hierbei werden die gemessenen Drücke nach einer einfachen Beziehung in Volumenströme umgerechnet. Die genaueren, mit dem Rechnerprogramm ermittelten Werte weisen die Gültigkeit der vereinfachten Beziehung unter bestimmten, in der Praxis leicht nachvollziehbaren Bedingungen nach. Die Meßergebnisse von verschiedenen Pumpenbauarten werden vorgestellt. Sie zeigen für viele Pumpen überraschend hohe Pulsationswerte, die durch die bisher übliche rein kinematische Betrachtungsweise des Verdrängungsvorgangs ohne Analyse des Kompressionsinflusses nicht erklärt werden können.

Desweiteren wird der Einfluß der Leitungsdynamik auf hydraulische Regelsysteme untersucht. Hier werden zwei Beispiele

vorgestellt: Im ersten Fall handelt es sich um einen drehzahlgeregelten Hydromotor, der bei langen Zuführungsleitungen instabil wird. Hier kann durch zusätzliche Dämpfungsmaßnahmen Abhilfe geschaffen werden.

Das zweite Beispiel betrifft ein Druckbegrenzungsventil, dessen dynamisches Verhalten bei Vernachlässigung der Rohreigenschaften nur unzureichend beschrieben werden kann. Die Rechnung mit dem vollständigen Modell ermöglicht dagegen eine gute Wiedergabe der experimentellen Untersuchungen.

Die wesentlichen bei den Berechnungen verwendeten Programm-Algorithmen sind im Anhang ausführlich dokumentiert.

Summary

The properties of unsteady pipe flow should be taken into consideration during the investigation of the dynamic behaviour of hydrostatic installations, especially, when long pipelines are involved, but also in compact systems, when relatively high frequencies occur. The time domain treatment is appropriate because of the numerous nonlinearities in hydraulic transmissions. For this purpose, a simulation method for the digital computer is presented here. The computations are generally used to optimize control systems consisting of hydraulic components.

To begin with, a survey of the history of pressure surge investigations is given, from water power stations until more recent investigations on combustion engines and in medicine.

The development of the mathematical model for the unsteady pipe flow includes the distributed parameters of mass, elasticity, and friction. The movement appears in a two-

dimensional system, the co-ordinate in longitudinal direction being the more important one. The distance from the center line is introduced as the second co-ordinate to describe the laminar state and the friction resulting from it. The flow velocity is assumed to be considerably smaller than the wave propagation velocity.

With these simplifications, it is possible to describe the effects occurring in hydrostatic systems with tolerable effort. However, frequency dependent damping is represented in detail because of its substantial influence with small pipe diameters and high viscosities. The comparison of measurement and computation shows good results.

The procedure in the frequency domain is explained briefly. For the simulation of the time domain a computer program is presented which has been based on the characteristic method. It contains the line model including the friction influence and the cavitation nonlinearity.

The states at the pipe ends (pressure and flow) are available in a uniform manner in order to be connected to other components or pipes in the circuit and for output. Because of the modular structure even complex systems can be programmed in a short time. The program algorithms are employed in conjunction with the program system DSH (Digital Simulation of Hydrostatic Transmissions) which has been already in use, in order to take advantage of essential simplifications for the user. The program is supported also on smaller machines.

Furthermore, a new method to measure the flow pulsation of hydrostatic pumps with a nonreflecting pipeline is presented. The measured pressures are converted to flow values according to a simple relation. The more exact values determined with the computer program prove the validity of the

simple relation under certain conditions which can easily be reproduced in practice. The results from different pump designs are presented. They demonstrate surprisingly high pulsation values for many pumps that can not be explained with the merely kinematic theory of the positive displacement process, without the analysis of the influence of compression.

Moreover, the influence of pipeline dynamics on hydraulic control systems is investigated. Two examples are presented here: The first case is a speed controlled variable displacement motor which becomes unstable with long power pipelines. Additional damping improves its performance.

The second example is a pressure relief valve, whose dynamic behaviour can be described only unsatisfyingly if pipeline properties are neglected. The computation with the complete model, however, provides a good reproduction of the experimental results.

There is a detailed documentation in the appendix of the essential algorithms used for the computations.