

KfK 2777
Februar 1979

Mathematische Modellierung und Simulation der Hydrodynamik luftgepulster Siebbodenkolonnen

J. Hannappel, W. Pfeifer, E. Rathjen
Abteilung Ingenieurtechnik
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

Kernforschungszentrum Karlsruhe

K E R N F O R S C H U N G S Z E N T R U M K A R L S R U H E

Abteilung Ingenieurtechnik
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

KfK 2777

PWA - 135/78

MATHEMATISCHE MODELLIERUNG UND SIMULATION DER
HYDRODYNAMIK LUFTGEPULSTER SIEBBODENKOLONNEN

J. Hannappel
W. Pfeifer
E. Rathjen

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

In vorliegender Arbeit werden die dynamischen Strömungsvorgänge in einer luftgepulsten Siebbodenkolonne durch ein Simulationsmodell beschrieben. Das Modell besteht aus einem System von Differentialgleichungen. Der durch die Pulsluft aufgebaute Druck wird mit den Druckverlusten der schwingenden Flüssigkeitssäule in Pulsrohr und Kolonne ins Gleichgewicht gesetzt.

Bei Vorgabe von

- Kolonnengeometrie
- Integrale hold-up der Kolonne
- Dichte der beteiligten Phasen
- Steuerzeiten der Pulsluftventile
- Pulsfrequenz und Pulsluftreservoirdruck

werden der Hub der Schwingung und damit die Pulsationsintensität berechnet.

An einem konkreten Beispiel wird gezeigt:

- Die Schwingung der Flüssigkeitssäule in Pulsrohr und Kolonne zeigt in allen Fällen Sinuscharakter.
- Die Einbringung einer definierten Pulsation ist auf den Bereich zwischen 0.3 und 3 Hz beschränkt.
- Der Luftbedarf der Pulsation ist abhängig von der Kolonnengeometrie und der Pulsationsintensität. Er kann durch geeignete Wahl des Pulsrohrdurchmessers optimiert werden.

Mathematical Model and Simulation of the Hydrodynamic Of Air-Pulsed Sieve Plate Columns

In this work the dynamic flow events in an air pulsed sieve plate column are described by a simulation model. The model consists of a system of differential equations. The pressure built up by the pulsed air is brought to equilibrium with the pressure losses of the oscillating liquid column in the pulsation tube and in the column.

In case of definition of the

- column geometry,
- integral holdup of the column,
- density of the participating phases,
- control times of the pulsed air valves,
- pulse repetition frequency and pulsed air reservoir pressure

the height of oscillation and hence the intensity of pulsation are calculated.

It is shown by a concrete example that

- the oscillation of the liquid column in the pulsation tube and in the column is sinusoidal in all cases;
- generation of a defined pulsation is restricted to the range between 0.3 and 3 Hz;
- the amount of air needed for pulsation depends on the geometry of the column and on the intensity of pulsation. It can be optimized by appropriate selection of the diameter of the pulsation tube.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	2
2.	Berechnungsgrundlagen zur Simulation der Bewegungsvorgänge in einer luftgepulsten Siebbodenkolonne	3
2.1	Beschreibung des Modells	4
2.2	Bestimmung der homogenen Differentialgleichung des Systems	5
2.2.1	Druckverluste durch Massenträgheit	5
2.2.2	Druckverlust durch Reibung an Rohrwänden, Ein- und Ausläufen und an den Siebböden	7
2.2.3	Druckverlust durch hydrostatische Höhendifferenz	11
2.3	Bestimmung der Störfunktion der Bewegungsgleichung des Systems	13
2.3.1	Lufteinlaßgleichung	13
2.3.2	Luftauslaßgleichung	15
3.	Numerische Lösung	16
4.	Druckverlust an den Siebböden	16
4.1	Strömungswiderstand der Siebböden bei stationärer Durchströmung	16
4.1.1	Beschreibung der Meßanordnung	16
4.1.2	Versuchsdurchführung	17
4.1.3	Versuchsergebnisse	17
4.1.4	Diskussion der Ergebnisse	18
4.2	Strömungswiderstand der Siebböden bei instationärer Durchströmung	19
4.2.1	Beschreibung der Meßanordnung	19
4.2.2	Versuchsdurchführung	20
4.2.3	Versuchsergebnisse	21
4.2.4	Diskussion der Versuchsergebnisse	21
5.	Diskussion der Ergebnisse	22
5.1	Hub der Schwingung im Pulsrohr	22
5.2	Diskussion der Schwingungsform	23
5.3	Bestimmung der Grenzen einer stabilen Pulsation	24
5.4	Luftbedarf der Pulsation	24
5.5	Druckverlustanteile der Pulsationsbewegung	24
5.6	Fehlerbetrachtung	25
	Literaturverzeichnis	27
	Liste der verwendeten Symbole	28
	Abbildungsverzeichnis	31
	Anhang 1	
	Anhang 2	

1. Einleitung

Unter Extraktion versteht man das selektive Herauslösen bestimmter Substanzen aus einer Abgeberphase, welche mittels eines Lösungsmittels in eine Aufnehmerphase überführt werden. Bei der flüssig-flüssig-Extraktion in Kolonnen werden Abgeber- und Aufnehmerphase im Gegenstrom geführt. Damit für den zu erzielenden Stoffaustausch eine möglichst große Austauschfläche zur Verfügung steht, wird eine der Phasen in Tropfen zerteilt. Um die zur Bildung neuer Stoffaustauschoberflächen erforderliche Phasenturbulenz zu erreichen, sind die Kolonnen mit Siebböden versehen. Bei Stoffpaarungen mit geringer Dichtedifferenz wird die erforderliche Dissipationsenergie durch eine zusätzliche Pulsation der Flüssigkeitssäule aufgebracht, die der kontinuierlichen Phase aufgeprägt wird. In der Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen haben pneumatische Pulsatoren Verwendung gefunden, bei denen keine beweglichen Teile mit den Extraktionsmedien in Berührung kommen.

In vorliegender Arbeit wird die Hydrodynamik einer luftgepulsten Siebbodenkolonne durch ein Modell beschrieben. Bei Vorgabe von Pulsluftreservoidruck, Pulsfrequenz und Schaltzeiten der Ventile wird der Pulshub im Pulsrohr berechnet.

2. Berechnungsgrundlagen zur Simulation der Bewegungsvorgänge in einer luftgepulsten Siebbodenkolonne

Zur Berechnung des hydrodynamischen Verhaltens einer luftgepulsten Siebbodenkolonne wird ein mathematisches Modell erstellt.

Das Modell setzt den Druck, der durch die in das Pulsrohr einströmenden Luft aufgebracht wird, mit den Druckverlusten der Flüssigkeitssäule in Kolonne und Pulsrohr ins Gleichgewicht.

In Abhängigkeit der äußeren Variablen

- Kolonnengeometrie
- Verwendetes Stoffsystem
- Pulsluftreservoirdruck
- Pulsfrequenz
- Ventilsteuerzeit

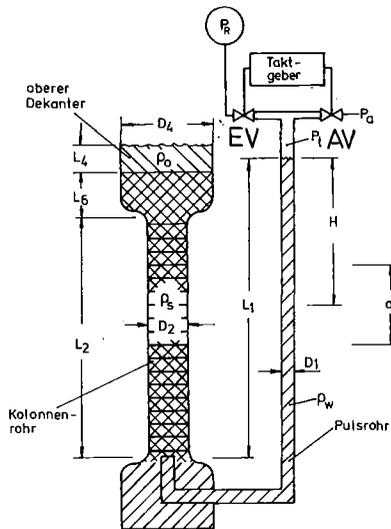
wird der zeitliche Verlauf der Schwingung der Flüssigkeitssäule bestimmt.

Dadurch werden

- der Stoffaustausch in der Kolonne,
- der Durchsatz der Kolonne

und somit die Wirksamkeit der Kolonne beeinflusst.

2.1 Beschreibung des Modells



In vorstehender Skizze ist das Schema einer luftgepulsten Siebbodenkolonne dargestellt. In der gezeigten Ruhelage befinden sich die Flüssigkeitssäule im Pulsrohr mit dem Flüssigkeitsinventar von Kolonnenrohr und oberem Dekanter im hydrostatischen Gleichgewicht.

Über die vom Taktgeber entsprechend der Frequenz angesteuerten Ventile EV und AV, wird die Druckluft zunächst aus dem Reservoirbehälter P_R in das Pulsrohr eingelassen und nachdem sie den Druck P_t aufgebaut hat, in die Abluftleitung entlassen. Durch die so erzeugten Druckimpulse wird die Flüssigkeitssäule um die Länge H ausgelenkt und führt Schwingungen der Amplitude $a/2$ um den Schwingungsmittelpunkt H aus. Zur mathematischen Beschreibung dieses Vorgangs wird am Flüssigkeitsspiegel des Pulsrohres eine Druckbilanz aufgestellt, die den Druck im Pulsrohr mit den Druckverlusttermen der Kolonne ins Gleichgewicht setzt. Der Aufbau des Druckes im Pulsrohr wird durch die Kontinuitätsgleichung für kompressible Medien und Bewegungsgleichung der einströmenden Luft beschrieben. Die Druckverlustterme der Kolonne erhält man aus den bekannten Beziehungen der

Hydrodynamik. Die Kopplung der Gleichungen über den Druck am Flüssigkeitsspiegel des Pulsrohres, führt zu einer nichtlinearen Differentialgleichung 2. Ordnung, die dynamisch gelöst wird.

Bei Vorgabe von Pulsluftreservoirdruck, Pulsfrequenz, Öffnungszeit des Einlaßventils und Totzeit zwischen Einlaß- und Auslaßvorgang, erhält man durch numerische Lösung der gekoppelten Differentialgleichung den zeitlichen Verlauf der Schwingung der Flüssigkeitssäule im Pulsrohr.

2.2 Bestimmung der homogenen Differentialgleichung des Systems

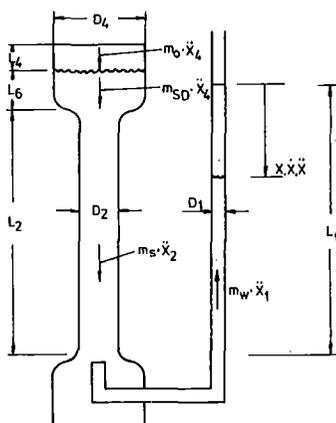
Die homogene Differentialgleichung des Systems beinhaltet die Druckverlustterme in Kolonne und Pulsrohr.

Im einzelnen handelt es sich um Druckverluste infolge

- Massenträgheit
- Reibung an Rohrwänden, Siebböden, Ein- und Ausläufen
- Auslenkung der Wassersäule,

die anschließend beschrieben werden.

2.2.1 Druckverluste in Kolonne und Pulsrohr durch Massenträgheit der Flüssigkeit



In der Skizze ist das Schema einer Siebbodenkolonne mit dem Komponenten der Massenträgheitskraft des Systems dargestellt. Die Massenträgheitskraft bestimmt sich demnach zu:

$$m\ddot{x} = m_W \cdot \ddot{x}_1 + m_S \cdot \ddot{x}_2 + m_{SD} \cdot \ddot{x}_4 + m_O \cdot \ddot{x}_4 \quad (2.1)$$

Mit der Kontinuitätsgleichung für inkompressible Medien

$$\dot{x}_1 \cdot A_1 = \dot{x}_2 \cdot A_2 = \dot{x}_4 \cdot A_4 \quad (2.2)$$

und den Beziehungen

$$m = L \cdot A \cdot \rho, \quad (2.3)$$

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

folgt der Druckverlustanteil infolge Massenträgheit zu:

$$\begin{aligned} \frac{m \ddot{x}}{A_1} = & ((L_1 - x + 1.0) \rho_W \quad 1 *) \\ & + (L_2 - x \cdot \frac{A_1}{A_4} + x \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{\rho_W}{\rho_S} - \frac{V_{SB}}{A_2}) \cdot \rho_S \\ & + (L_6 + x \cdot \frac{A_1}{A_4}) \cdot \frac{\rho_S}{\rho_O} + L_4) \cdot \rho_O) \cdot \ddot{x}_1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

1 *) angenommene Länge des Pulsrohreinlaufes 1,0 m

Als Vereinfachung wurde sowohl die dispergierte organische, als auch die kontinuierliche wäßrige Phase durch eine einheitliche Mischungsdichte ρ_S beschrieben. ρ_S bestimmt sich aus dem integralen hold-up über die Kolonne und den Dichten der reinen Phasen.

2.2.2 Druckverlust durch Reibung an Rohrwänden, Ein- und Ausläufen und an den Siebböden

a) Rohrreibung

Der Druckverlust in durchströmten Kreisrohren bestimmt sich nach der Formel

$$\Delta P_R = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w_0^2 \quad (2.6)$$

Die Rohrreibungszahl λ errechnet sich für die turbulente Durchströmung hydraulisch glatter Rohre nach Prandtl und v.Karman zu:

$$\lambda = \frac{0,309}{[\lg(\frac{Re}{7v})]^2} \quad (2.7)$$

Die Rohrreibungszahl laminar durchströmter Rohre bestimmt sich nach Hagen-Poiseulle zu

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.8)$$

b) Rohrbögen, Ein- und Ausläufe

Der Druckverlust in einem Rohrleitungselement wird durch folgenden Ansatz bestimmt:

$$\Delta P_R = \zeta \frac{\rho}{2} \cdot w_0^2 \quad (2.9)$$

Der Widerstandsbeiwert ζ ist von der Art des Rohrleitungselementes abhängig. Weiterhin muß zu einem ζ -Wert immer die zugehörige Geschwindigkeit definiert werden.

Für die Rohrbögen des Pulsrohres ergibt sich nach [9] :

$$\zeta_{RB} (\dot{x}_1) = 1.1 \quad (2.10)$$

Für den Einlauf des Pulsrohres in die Kolonne ergibt sich nach Impuls- und Energiesatz:

$$\zeta_E (\dot{x}_1) = 1 - 2 \cdot \frac{A_1}{A_2} + \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad (2.11)$$

Für die Ausströmung der Flüssigkeit aus der Kolonne ins Pulsrohr ergibt sich nach [9]

$$\zeta_A (\dot{x}_1) = 3.0 \quad (2.12)$$

c) Druckverlust an Siebböden

Der Druckverlust an den Siebböden wird nach dem Ansatz

$$\Delta P_R = \zeta_{SB} \frac{\rho}{2} w_0^2 \quad (2.13)$$

bestimmt.

Die in der Literatur [1 - 8] angegebenen Widerstandsbeiwerte streuen sehr stark. Eigene Messungen zeigen, daß sich der Druckverlustbeiwert von Stahlsiebböden ohne Nozzles bei stationärer Durchströmung wie folgt beschreiben läßt:

$$\zeta_{SB} = 21.0 + \exp \{-39(w_0 - 0,1)\}$$

Diese Formel stimmt überein mit den Ergebnissen von E.Zelfel [1,2].

Die den tatsächlichen Druckverlust während der Pulsation beschreibenden Druckverlustbeiwerte der instationären Durchströmung wurden nicht gemessen. Aus diesem Grunde werden sie unter Beibehaltung der mathematischen Form

$$\zeta_{SB} = A_0 + \exp \{-a \cdot (w - b)\} \quad (2.14)$$

durch Anpassung der Konstanten A_0 , a , b an Meßwerte bestimmt.

Die Durchführung der Messungen, zur Bestimmung des stationären und instationären Druckverlustes sowie der Aufbau der dazu erforderlichen Versuchsstände, sind in Kapitel 4. dargestellt.

Aus den vorgehenden Betrachtungen ergibt sich der Reibungsdruckverlust in Kolonne und Pulsrohr zu:

$$\begin{aligned} \Delta P_R = & \left(\lambda_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{\rho_W}{2} + \lambda_2 \cdot \frac{L_2}{D_2} \cdot \frac{\rho_S}{2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right. & (2.15) \\ & + (\zeta_A + 2 \zeta_{RB}) \frac{\rho_W}{2} \\ & \left. + N \cdot \zeta_{SB} \cdot \frac{\rho_S}{2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right) \cdot |\dot{x}| \cdot \dot{x} \quad 1 * \end{aligned}$$

$$\lambda(\text{Re} \leq 2230) \Rightarrow \lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

$$\lambda(\text{Re} > 2230) \Rightarrow \lambda = \frac{0,309}{\left[\lg\left(\frac{\text{Re}}{7}\right) \right]^2}$$

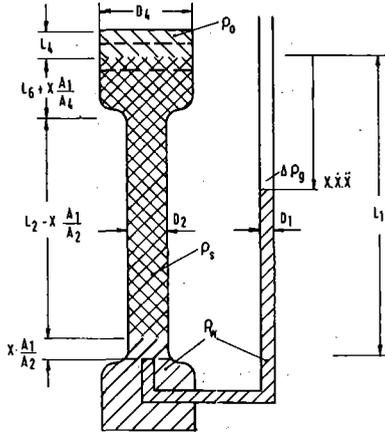
$$\zeta_A (\dot{x} > 0) = \zeta_A = 1 - 2 \frac{A_1}{A_2} + \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2$$

$$\zeta_A (\dot{x} < 0) \Rightarrow \zeta_A = 3.0$$

$$\zeta_{RB} = 1.1$$

1 * Durch das Produkt $|\dot{x}| \cdot \dot{x}$ anstelle von $(\dot{x})^2$ ist gewährleistet, daß der Reibungsdruckverlust immer der Bewegung entgegengerichtet ist.

2.2.3 Druckverlust durch hydrostatische Höhendifferenz



In obiger Skizze ist die Auslenkung der Flüssigkeitssäule im Pulsrohr mit den daraus resultierenden Verschiebungen des Flüssigkeitsinventares der Kolonne dargestellt.

Der Gegendruck im Pulsrohr ergibt sich demnach zu:

$$\Delta P_g = \left\{ \left[-(L_1 - x) + x \frac{A_1}{A_2} \right] \cdot \rho_w + \left[\left(L_2 - x \frac{A_1}{A_2} \right) + \left(L_6 + x \frac{A_1}{A_4} + L_4 \frac{\rho_0}{\rho_s} \right) \right] \cdot \rho_s \right\} \cdot g \quad (2.16)$$

Druckverlustanteile infolge Tropfenbildung an den Siebböden sowie durch innere Reibung der beiden Phasen zueinander werden vernachlässigt.

Über die Zulässigkeit dieser Vereinfachung wurden folgende Überlegungen angestellt:

- Der Druckverlust durch Tropfenbildung an den Siebböden ist vernachlässigbar, da im Emulsionsbereich der Tropfendurchmesser sehr viel kleiner als der Lochdurchmesser der Siebböden ist. Die Tropfenbildung im Emulsionsbereich erfolgt im turbulenten Scherfeld des Reaktionsraumes zwischen den Siebböden.
- Der Druckverlust durch innere Reibung infolge der Relativbewegung der beiden Phasen zueinander ist gering, da die Pulsationsgeschwindigkeit sehr viel größer als die Relativgeschwindigkeit der beiden Phasen ist.

Daher wird dieser Wert auch in der vorhandenen Literatur [3 - 7] übereinstimmend als vernachlässigbar beschrieben.

Nach diesen Betrachtungen ergibt sich die homogene Differentialgleichung des Systems durch Summation der Gleichungen 2.5, 2.15, 2.16 zu:

$$\begin{aligned}
 & \left[(L_1 - x + 1,0) \cdot \rho_w + (L_2 - x \frac{A_1}{A_4} + x \frac{A_1}{A_2} \frac{\rho_w}{\rho_s} - \frac{V_{SB}}{A_2}) \cdot \rho_s \right. \\
 & + \left. \left((L_6 + x \frac{A_1}{A_4}) \frac{\rho_s}{\rho_o} + L_4 \right) \cdot \rho_o \right] \cdot \ddot{x}_1 \\
 & + \left[N \cdot \zeta_{SB} \cdot \frac{\rho_s}{2} \cdot \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right. \\
 & + \left. \lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{\rho_w}{2} + \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \cdot \frac{\rho_s}{2} \cdot \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right. \\
 & + \left. (\zeta_A + 2 \zeta_{RB}) \cdot \frac{\rho_w}{2} \right] \cdot |\dot{x}_1| \cdot \dot{x}_1 \\
 & + \left[(- (L_1 - x) + x \frac{A_1}{A_2}) \cdot \rho_w \right. \\
 & + \left. \left((L_2 - x \frac{A_1}{A_2}) + L_6 + x \frac{A_1}{A_4} + L_4 \frac{\rho_o}{\rho_s} \right) \cdot \rho_s \right] \cdot g = 0
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

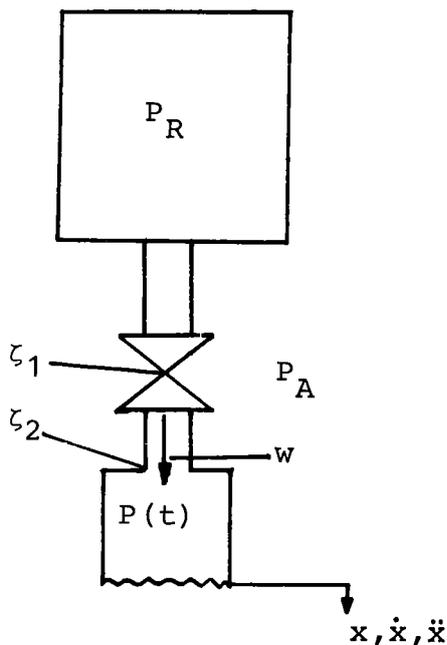
2.3 Bestimmung der Störfunktion der Bewegungsgleichung des Systems

Die den treibenden Druck P_t im Pulsrohr beschreibenden Differentialgleichungen des Lufteinlaß- bzw. Luftauslaßvorganges beruhen auf der Kontinuitätsgleichung für kompressible Medien.

$$\frac{\partial \rho(P, t)}{\partial t} = \frac{\partial (\rho \cdot w)}{\partial x} \quad (2.18)$$

Die in den Kontrollraum strömende Luft wird mit positivem Geschwindigkeitsvektor versehen.

2.3.1 Lufteinlaßgleichung



Die Kontinuitätsgleichung partiell integriert über x ergibt:

$$w \cdot A \cdot \rho(P_t) \cdot dt = d\rho(P_t) \cdot (V_0 + A_1 \cdot x) \quad (2.19)$$

mit dem Boyle-Mariotteschen Gesetz

$$\frac{P_t}{\rho(P_t)} = \frac{P_a}{\rho(P_a)} \quad (2.20)$$

ergibt sich:

$$\frac{d P_t}{dt} = \frac{w \cdot A \cdot P_t}{V_0 + A_1 \cdot x} \quad (2.21)$$

Die Einströmgeschwindigkeit w wird nach

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (2.22)$$

bestimmt.

Mit

$$P_R - P_t = (\zeta_1 + \zeta_2) \cdot \frac{\rho(P_t)}{2} \cdot w^2 \quad (2.23)$$

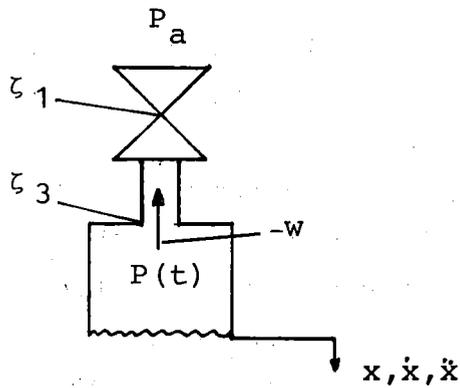
$$\zeta_1 = 50 [9]$$

$$\zeta_2 = 1 + 2 \frac{A}{A_1} + \left(\frac{A}{A_1}\right)^2 = 0,25$$

folgt die Einblasegeschwindigkeit der Pulsluft:

$$w = \sqrt{\frac{P_R - P_t}{50,25 \frac{P_t}{P_a} \cdot \frac{\rho(P_a)}{2}}} \quad (2.24)$$

2.3.2 Luftauslaßgleichung



Die Kontinuitätsgleichung partiell integriert über x ergibt:

$$-w \cdot A \cdot \rho(P_t) \cdot dt = d\rho(P_t) \cdot (V_0 + A_1 \cdot x) \quad (2.25)$$

mit Boyle-Mariotte

$$\frac{P_t}{\rho(P_t)} = \frac{P_a}{\rho(P_a)} \quad (2.26)$$

ergibt sich:

$$\frac{d P_t}{dt} = \frac{w \cdot A \cdot P_t}{V_0 + A_1 \cdot x} \quad (2.27)$$

Nach einer Zwischenrechnung entsprechend 2.3.1 ergibt sich mit

$$\zeta_1 = 50 \quad \zeta_3 = 0,5 \quad [9]$$

die Ausblasgeschwindigkeit der Luft zu

$$w = \sqrt{\frac{P_t - P_a}{50,5 \frac{P_t}{P_a} \cdot \frac{\rho(P_a)}{2}}} \quad (2.28)$$

3. Numerische Lösung

Die Kopplung der in Abschnitt 2 vorgestellten Differentialgleichungen und die Lösung des so erhaltenen Gleichungssystems wird mit einem Simulationsprogramm durchgeführt. Das Programm wurde in der IBM-Sprache CSMP (Continuous System Modelling Program) geschrieben. Diese Programmiersprache verarbeitet ein analoges Modell digital, was im Hinblick auf die Programmierung und auf die Genauigkeit der Simulation erhebliche Vorteile hat. Der Ablauf der Simulation kann aus Bild 1 entnommen werden. Eine Listing des Programms befindet sich im Anhang 1.

4. Druckverlust an den Siebböden

4.1 Strömungswiderstand der Siebböden bei stationärer Durchströmung

Die in der Literatur angegebenen Widerstandsbeiwerte für flüssigkeitsdurchströmte Siebböden streuen in weiten Grenzen. Aus diesem Grund wurden zunächst eigene Messungen des ζ_{SB} -Wertes bei stationärer Durchströmung vorgenommen, um einen Vergleich mit umfangreichen Messungen an gasdurchströmten Siebböden von Zelfel [1,2] zu erhalten.

4.1.1 Beschreibung der Meßanordnung

Die Meßanordnung ist in Bild 2 dargestellt.

Die Meßstrecke besteht aus 13 Siebböden (1), die in Originalgeometrie übereinander angeordnet sind. Darüber befindet sich ein oben offener Behälter (2), der mit einem Schauglas (3) verbunden ist. Über ein Regelventil (4) und ein Rotameter (5) wird ein definierter Wasserstrom in den Behälter gefördert, der nach Durchströmen der Siebböden über eine Blende (6) abfließt. Im Behälter befindet sich ein Beruhigungsblech zur Glättung des Wasserspiegels.

4.1.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit Brauchwasser aus dem Netz des KfK durchgeführt. Zunächst wurde für einen gegebenen Volumenstrom \dot{Q} der sich im Behälter einstellende Höhenstand ohne Siebböden gemessen. Danach wurden die Siebböden eingebracht und bei gleichem Volumenstrom die Höhe des Wasserspiegels im Schauglas gemessen. Der Höhenunterschied im Schauglas zwischen den beiden Messungen ergibt das Maß für den zusätzlichen Druckverlust durch die Siebböden.

Der Widerstandsbeiwert der 13 Siebböden bestimmt sich nach der Bernoulligleichung zu:

$$P + \frac{\rho}{2} w_0^2 + \rho \cdot g \cdot z = \text{const} \quad (4.29)$$

$$\zeta_{\text{ges}} = \frac{2 \cdot g \cdot H \cdot A_2^2}{\dot{Q}^2} \quad (4.30)$$

$$\zeta_{\text{SB}} = \frac{\zeta_{\text{ges}}}{13} \quad (4.31)$$

4.1.3 Versuchsergebnisse

Die Versuche wurden sowohl mit Stahlsiebböden ohne Nozzles 2 mm dick, $D_a = 100 \text{ mm}$, $\frac{A_F}{A_2} = 28,8 \%$, $d_L = 4 \text{ mm}$, als auch mit Stahlsiebböden mit Nozzles 2 mm dick, $D_a = 100 \text{ mm}$, $\frac{A_F}{A_2} = 22,05 \%$, $d_L = 3,5 \text{ mm}$ durchgeführt.

Die gemessenen Widerstandsbeiwerte sind in Bildern 3, 4, 5 dargestellt.

4.1.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Meßwerte für Siebböden mit Nozzles unterscheiden sich beträchtlich je nach Anströmungsrichtung, was jedoch augenscheinlich aus der Strömungsform (Mündungsströmung) zu erklären ist. Die Meßwerte für Siebböden ohne Nozzles stimmen in etwa mit den Werten für Nozzlesböden, die entgegen der Wulstrichtung angeströmt wurden, überein.

Weiterhin zeigen die Verlustbeiwerte für Siebböden ohne Nozzles eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der von Zelfel [1, 2] durchgeführten Untersuchung der Druckverluste, die bei der Durchströmung eines Gases durch einen Siebboden und der darüber liegenden Flüssigkeitsschicht auftreten.

Für die Durchströmung eines "trocken geblasenen Siebbodens" hat Zelfel die Ergebnisse von Meßreihen durch eine empirische Gleichung wie folgt beschrieben:

$$\zeta_t = \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2 + (1 - \varphi)^2 + \frac{100}{K_S} \quad (4.32)$$

Darin bedeuten

$$\alpha = 0,55 + 0,45 \varphi^6 \quad (4.33)$$

$$\varphi = \frac{0,907}{\left(\frac{t}{d_L} \right)^2} \quad (4.34)$$

$$K_S = \text{Re}_L \left(\frac{d_L}{S} \right) \cdot \left(\frac{S}{t} \right)^{0,7} \cdot Z^{0,25} \quad (4.35)$$

Gleichung Nr. 4.32 gilt streng nur für Siebböden mit $S > d_L$. Die von Stichlmair, Mersmann [2, S.111] u.a. angegebenen Korrekturgleichungen zur Umrechnung auf Werte von $S/d_L < 2$ bzw. $S/d_L > 2$ ergeben jedoch im betrachteten Anströmgeschwindigkeitsbereich nur geringe Abweichungen.

Nach Gleichung Nr. 4.32 wird im Bereich von $w_0 < 10^{-4}$ m/s der Kurvenverlauf durch den Summanden $\frac{100}{K_S} (\sim \frac{1}{w_0})$ bestimmt.

Für $w_0 > 10^{-1}$ m/s ist ζ_t konstant.

Da Kurvenverläufe $\sim \frac{1}{w_0}$ (Für $w_0 \rightarrow 0$, $\zeta_t \rightarrow \infty$) am Rechner nur schwer zu realisieren sind, wurden die gemessenen ζ -Werte mit e-Funktion vom Typ

$$\zeta = A_0 + \exp \{a (w_0 - b)\} + \exp \{c(w_0 - d)\} + \dots \quad (4.36)$$

approximiert. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt. Zur eigentlichen Simulation wurden e-Funktionen vom Typ

$\zeta = A_0 + \exp \{a(w_0 - b)\}$ herangezogen. Der daraus resultierende Fehler ist gering, da mit abnehmender Geschwindigkeit der Druckverlust $\sim w_0^2$ abfällt.

4.2 Strömungswiderstand der Siebböden bei instationärer Durchströmung

Die oben angeführten Betrachtungen gelten nur für stationäre Durchströmung der Siebböden. Während der Pulsation wird die Kolonne jedoch instationär, d.h. in einer Aneinanderreihung von Anlaufvorgängen, durchströmt. Daraus resultiert die Aufgabe, unter der Annahme $\zeta = A_0 + \exp \{-a(w_0 - b)\}$ die Konstanten (A_0 , d , b) durch Anpassung an gemessene Werte (Amplitude der Schwingung im Pulsrohr) zu ermitteln.

4.2.1 Beschreibung der Meßanordnung

Die in Bild 7 dargestellte Meßstrecke besteht aus einer Kolonne mit Pulsrohr, die in Form eines U-Rohres miteinander verbunden sind.

- Kolonnenlänge beträgt 6,50 m
- Kolonnendurchmesser 0,110 m
- Pulsrohrdurchmesser 0,030 m
- Füllstandshöhe ohne Siebböden 5,70 m

Im größeren Schenkel sind 58 Stahlsiebböden ohne Nozzles in Originalgeometrie angebracht. Im kleineren Schenkel, d.h. im Pulsrohr der Anordnung ist eine Hubmeßeinrichtung installiert. Die Pulsluft wird über die skizzierte Pulsationseinrichtung eingebracht. Zur Anpassung der Konstanten zur Beschreibung des Widerstandsbeiwertes wurde das Simulationsprogramm entsprechend der Anordnung verändert. Die Öffnungszeiten der Pulsluftsteuerventile wurde durch die Messung der Stromaufnahme der zugehörigen Magnetventile bestimmt. Eine charakteristische Stromaufnahmekurve ist in Bild 8 dargestellt. Die zeitliche Verschiebung der Antwortfunktion des Druckes im Pulsrohr zu der idealen Einschaltfunktion des Taktgebers wurde mit einem 2-Strahloszilografen aufgenommen. Ein Beispiel der Verzögerung ist in Bild 9 gegeben. Eine eingehende Beschreibung der Meßtechnik an diesem Versuchsstand ist in [10] gegeben.

4.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit vollentsalztem Wasser, das auf eine definierte Leitfähigkeit von $190 \mu\text{S}$ eingestellt war, durchgeführt. Die Festlegung der Leitfähigkeit war notwendig, da die Hubmessung in der verwendeten Form nur innerhalb eines bestimmten Leitfähigkeitsbereiches arbeitet.

Die Pulsationsversuche wurden bei einem Reservoirdruck von $1,25 \text{ bar}$ und mit Pulsfrequenzen von $0,5 - 2,0 \text{ Hz}$ durchgeführt. Bei der anschließenden Simulation am Rechner wurden die Konstanten der Gleichung

$$\zeta_{\text{SB}} = A_0 + \exp \{ -a(w_0 - b) \} \quad (4.37)$$

derart verändert, daß gute Übereinstimmung der Meßpunkte mit den gerechneten Werten für den Hub der Schwingung bzw. die Auslenkung des Schwingungsmittelpunktes erzielt wurde.

4.2.3 Versuchsergebnisse

Die Versuche wurden mit Stahlsiebböden ohne Nozzles 2 mm dick, $D_a = 110$ mm, $\frac{A_F}{A_2} = 28,0$ %, $d_L = 4$ mm, $t = 7$ mm durchgeführt. Eine weitgehende Übereinstimmung von Experiment und Rechnung wurde mit Widerstandsbeiwerten der Form

$$\zeta_{SB} = 85 + \exp \{- 39 (|w_0| - 0,1)\} \quad (4.38)$$

erreicht.

Die Meß- und Rechnerwerte sind in Bild 10 dargestellt.

4.2.4 Diskussion der Versuchsergebnisse

Der Druckverlustbeiwert der Siebböden bei instationärer Durchströmung ist etwa 4 mal größer als der entsprechende Wert bei stationärer Durchströmung. Der Grund dieser Erhöhung ist, daß es sich bei der Pulsation um eine fortlaufende Aneinanderreihung von Anlaufvorgängen handelt. Diese Betrachtung gilt ebenso für die Druckverlustbeiwerte der Rohrreibung, der Einbauten und der Ein- bzw. Ausläufe. Eine Korrektur dieser Beiwerte wurde nicht vorgenommen, da der daraus resultierende Druckverlust klein gegenüber den Druckverlustanteilen aus Massenträgheit und geodätischer Höhe ist. Eine weitergehende Diskussion des daraus resultierenden Fehlers wird in Kapitel 5.6 vorgestellt.

5. Diskussion der Ergebnisse

5.1 Hub der Schwingung im Pulsrohr -----

Als konkretes Beispiel wurden die hydraulischen Verhältnisse der Versuchskolonne Komet I des IHCH simuliert. Die geometrischen Daten der Kolonne befinden sich in Anhang 2.

Bild 11 zeigt den nichtlinearen Anstieg des Hubes der Schwingung im Pulsrohr gegen einen Maximalwert von 24 cm mit wachsender Öffnungszeit des Einlaßventiles. Der Maximalwert wird erreicht mit einer Öffnungszeit des Einlaßventiles von 0,34 sec. Die Totzeit zwischen Einlaß- und Auslaßvorgang beträgt bei der Komet I 160 ms. Die gerechneten Werte zeigen gute Übereinstimmung mit Meßwerten [11] an der Kolonne.

Bild 12 zeigt den Hub im Pulsrohr im Parameterfeld der Luft-einlaß- und -auslaßzeit. Die gezeigte Kurvenschar ist ohne Totzeit ΔI gerechnet. Die bei jeder Pulsationseinrichtung gesondert zu bestimmende Totzeit der Pulsluftsteuerventile muß daher noch von der Öffnungszeit des Auslaßventiles abgezogen werden. Entlang einer Linie mit gleicher Öffnungszeit des Einlaßventiles zeigt sich die Abhängigkeit des Hubes im Pulsrohr von der Öffnungszeit des Auslaßventiles.

Die Kurve hat einen Minimalwert, wenn die Öffnungszeiten von Ein- und Auslaßventil unmittelbar aufeinander folgen. Mit wachsender Totzeit zwischen Ein- und Auslaßvorgang steigt die Kurve an und fällt nach Erreichen eines Maximums, das bei Auslaßzeit = halber Pulszeit liegt, wieder ab.

In Bild 13 ist der besonders interessierende Bereich des sofortigen Öffnens des Auslaßventiles nach dem Einlaßvorgang dargestellt. Die Ansprechzeit der Ventile muß auch hier von der Öffnungszeit des Auslaßventiles abgezogen werden.

5.2 Diskussion der Schwingungsform

Die Schwingung der Wassersäule im Pulsrohr ist mit dem zeitlichen Verlauf des Druckes P_t gekoppelt. In Bild 14 ist der Verlauf des Druckes P_t , der Auslenkung der Wassersäule x aus der Ruhelage und der Auslenkungsgeschwindigkeit \dot{x} dargestellt.

Der mit großer Flankensteilheit ansteigende Druck fällt nach Schließen des Einlaßventils zunächst sanft ab. Der Grund hierfür ist die Vergrößerung des eingeschlossenen Luftvolumens infolge der Auslenkung x . Nach Öffnen des Luftauslaßventils bricht der Druck im Pulsrohr rasch zusammen. Die aus P_t bestimmten Kurven \dot{x} und x folgen der P_t -Kurve mit den charakteristischen Phasenverschiebungen der ein- bzw. zweimaligen Integration.

Zur Diskussion der Schwingungsform der Bewegung der Wassersäule sind in Bild 15 und Bild 16 der Verlauf von Auslenkung x und der Beschleunigung \ddot{x} bei verschiedenen Ventilsteuerzeiten dargestellt. In Bild 15, - die Ventilsteuerzeit ist hier idealisiert ohne Totzeit,- besteht die \ddot{x} -Kurve im positiven Bereich aus einem schmalen Anstieg und Abfall in den negativen Bereich, worauf sie sich wieder allmählich der Nulllinie nähert. Die zweimal integrierte x -Kurve glättet zwar den Verlauf des Kurvenzugs, aber das Maximum der sinusähnlichen Bewegung ist nach links verschoben. In Bild 16 ist die Öffnungszeit des Einlaßventiles festgehalten, das Auslaßventil öffnet jedoch erst nach der halben Pulsationszeit. Der Kurvenverlauf von \ddot{x} zeigt hier eine sehr viel harmonischere Charakteristik und die x -Kurve besteht aus einem beinahe idealen Sinusverlauf.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß alle berechneten x -Kurven Sinuscharakter hatten. Es scheint daher ausgeschlossen, andere Pulsationsformen, z.B. mit Sägezahncharakteristik, einzubringen.

5.3 Bestimmung der Grenzen einer stabilen Pulsation

Für den Betrieb einer gepulsten Siebbodenkolonne ist der Bereich wichtig, in dem sich ein eindeutiger Pulshub in Abhängigkeit von Pulsfrequenz und Reservoirdruck einstellt. Bild 17 zeigt den Hub der Pulsationsbewegung über der Frequenz. Mit wachsender Frequenz geht der Pulshub gegen Null. Mit kleiner werdender Frequenz steigen die Pulshubkurven gleichen Reservoirdruckes jeweils gegen einen Maximalwert an. Der Bereich in dem der Anstieg quasi linear erfolgt, wächst mit wachsendem Reservoirdruck. Unterhalb der eingezeichneten Grenzkurve wird die Pulsation undefiniert, da während eines Pulsationszyklusses die Flüssigkeitssäule mit kleiner Amplitude nachschwingt.

5.4 Luftbedarf der Pulsation

Zur Dimensionierung der Abluftstrecke einer Extraktionskolonne benötigt man das während der Pulsation durchgesetzte Luftvolumen.

Bild 18 zeigt den Luftverbrauch der Pulsationseinrichtung bei charakteristischen Agitationsbedingungen (Frequenz 1 Hz, Pulshub in der Kolonne 1,5 cm). Die Kurve wird durch die Berechnung des Luftverbrauches bei verschiedenen Pulsrohrdurchmessern bestimmt. Der Luftverbrauch steigt demnach zunächst steil an und nähert sich dann einem oberen Grenzwert. Die Auslenkung des Schwingungsmittelpunktes geht entsprechend dem kleineren Volumen-Durchmesser Verhältnis zurück. Da die untere Grenze des Pulsrohrdurchmessers aus betrieblichen Überlegungen (Schaumbildung, Einbringen einer Pulshub-Meßeinrichtung) bei etwa 35 mm liegt, erscheint in diesem Fall eine Optimierung des Luftverbrauches über den Pulsrohrdurchmesser nicht sinnvoll.

5.5 Druckverlustanteile der Pulsationsbewegung

Die einzelnen Druckverlustterme der homogenen Differentialgleichung des Modells beschreiben unterschiedlich genau die tatsächlichen Druckverluste. Während die Terme der Massenträg-

heit und der geodätischen Höhe exakt die tatsächlichen Verhältnisse beschreiben, ist der Reibungsdruckabfall bei instationärer Durchströmung nur schwer zugänglich (vergl. Kapitel 4). Um die Wirkung von Änderungen an der Kolonne (z.B. Veränderung des Pulsrohrdurchmessers) abzuschätzen oder um Fehlerquellen in ihrer Wirkung zu klassifizieren, benötigt man das quantitative Verhältnis der Druckverlustterme zueinander.

Bild 19 zeigt den zeitlichen Verlauf der einzelnen Druckverluste während der Pulsation.

Der Schwereterm (ΔP_{Schw}), welcher proportional zur Auslenkung der Wassersäule verläuft, erbringt einen Anteil von etwa 7000 N/m^2 , der als permanente Rückstellung wirkt. Der Trägheitsterm ($\Delta P_{\text{Träg}}$) verläuft entgegengesetzt zur Pulsationsbewegung. Die Maximalwerte dieses Terms treten kurz vor dem oberen Totpunkt der Pulsationsbewegung auf und liegen bei etwa 11000 N/m^2 . Die höchsten Verzögerungswerte (Minimalwerte) treten kurz vor dem unteren Totpunkt auf und liegen bei etwa -9000 N/m^2 .

Der Druckverlust durch Reibung (ΔP_{Reib}) ist stets der Bewegung der Wassersäule entgegengerichtet. Die Maximalwerte betragen etwa 5000 N/m^2 , die Minimalwerte etwa -6000 N/m^2 .

Aus dieser Zusammenstellung ist zu ersehen, daß die 3 Druckverlustanteile in derselben Größenordnung am Gesamtdruckverlust teilhaben.

Innerhalb dieser Grenze liefert der Reibungsterm den geringsten Beitrag.

5.6 Fehlerbetrachtung

Bei der Betrachtung der Genauigkeit der Simulation ist es wichtig, die Fehlerquellen des Modells zu bestimmen und ihre Wirkung quantitativ abzuschätzen.

Im vorliegenden Fall wird die Kolonne instationär (d.h. in einer Aneinanderreihung von Anlaufvorgängen) durchströmt. Die aus der einschlägigen Literatur bekannten Beziehungen der Flüssigkeitsreibung gelten jedoch nur für stationäre Durchströmung. Die instationären Widerstandsbeiwerte der Siebböden ζ_{SB} , werden durch Anpassung des Modells an gemessene Werte (Hub der Schwingung im Pulsrohr) an einer Versuchsanordnung bestimmt (s. Kapitel 4). Für die Druckverlustbeiwerte der Rohrreibung und der Einbauten gelten die selben Überlegungen. Die Zunahme des Druckverlustes durch die instationäre Durchströmung, wird bei der Anpassung des ζ_{SB} -Wertes an die Meßwerte der Versuchsanordnung dem wesentlich größeren Druckverlust an den Siebböden zugeschlagen. Weiterhin gewinnt das Modell dadurch an Sicherheit, daß im besonders interessierenden Bereich kurzer Totzeiten zwischen Einlaß- und Auslaßvorgang, eine Veränderung des ζ_{SB} -Wertes nur geringen Einfluß auf den Hub im Pulsrohr hat (s. Bild 20).

Literaturverzeichnis

- [1] Zelfel, E : Dissertation, TU-München, 1966

- [2] Zelfel, E : Versuche über den Widerstandswert von Einzelbohrungen. Zur Berechnung des Druckverlustes von Siebböden. Chemie Ingenieur Technik Nr. 12 (1965), S. 1209 - 1214

- [3] Weech, M.E.: Interim report on the development of an air pulsed for pulse column application. AEC Research and Development Report IDO - 14559

- [4] Weech, M.E., Knight, B.E. : Design of air pulsers for pulse column application. I&EC Process Design and Development Vol. 6 No.4, Oct.1967

- [5] Thornton, J.D.: The effect of pulse wave form and plate geometry on the performance and throughput of a pulse column. Liquid-Liquid Extraction, Part XIII TRANS.INSTN CHEM. ENGRS, Vol. 35, 1957

- [6] Chantry, W.A. e.a.: Application of pulsation to liquid-liquid extraction. I&EC, Vol. 47, No.6 (1955) P. 1153 - 1159

- [7] Jealous, A.C., Johnson, H.F.: Power requirements for pulse generation in pulse columns. I&EC, Vol.47, No.6 (1955) P. 1159 - 1166

- [8] Perry, J.H.: Chemical engineers handbook Third Edition (1950)

- [9] Bohl, E.: Technische Strömungslehre Vogel-Verlag (1971)

- [10] Döbele, Hannappel (1979) unveröffentlicht

- [11] Galla, IHCH : persönliche Mitteilung

Liste der verwendeten Symbole

a	: Hub der Pulsationsbewegung
a _K	: Hub in der Kolonne
A	: Querschnittsfläche der Luftzuführungsleitung
AV	: Auslaßventil
A ₁	: Querschnittsfläche des Pulsrohres
A ₂	: Querschnittsfläche der Kolonne
A ₃	: Freie Querschnittsfläche der Siebböden
A _F	: Freie Querschnittsfläche der Siebböden in Anhang 1
A ₄	: Querschnittsfläche des oberen Dekanters
D _a	: Außendurchmesser der Siebböden
D ₁	: Durchmesser Pulsrohr
D ₂	: Durchmesser Kolonne
d _L	: Lochdurchmesser der Siebböden
EV	: Einlaßventil
f	: Pulsfrequenz
g	: Erdbeschleunigung
H	: Auslenkung des Schwingungsmittelpunktes aus der Ruhelage
H ₁	: Höhenstand im Schauglas ohne Siebböden in Anhang 1
Imp	: Öffnungszeit des Lufteinlaßventiles
ΔI	: Totzeit zwischen Lufteinlaß- und Luftauslaßvorgang
I1	: Öffnungszeit des Luftauslaßventiles
I2	: Taktzeit der Pulsation $f = \frac{1}{I2}$
K _S	: Siebbodenkennzahl in Anhang 1
L ₁	: Höhe des Flüssigkeitsspiegels im Pulsrohr in der Ruhelage
L ₂	: Aktive Länge der Kolonne

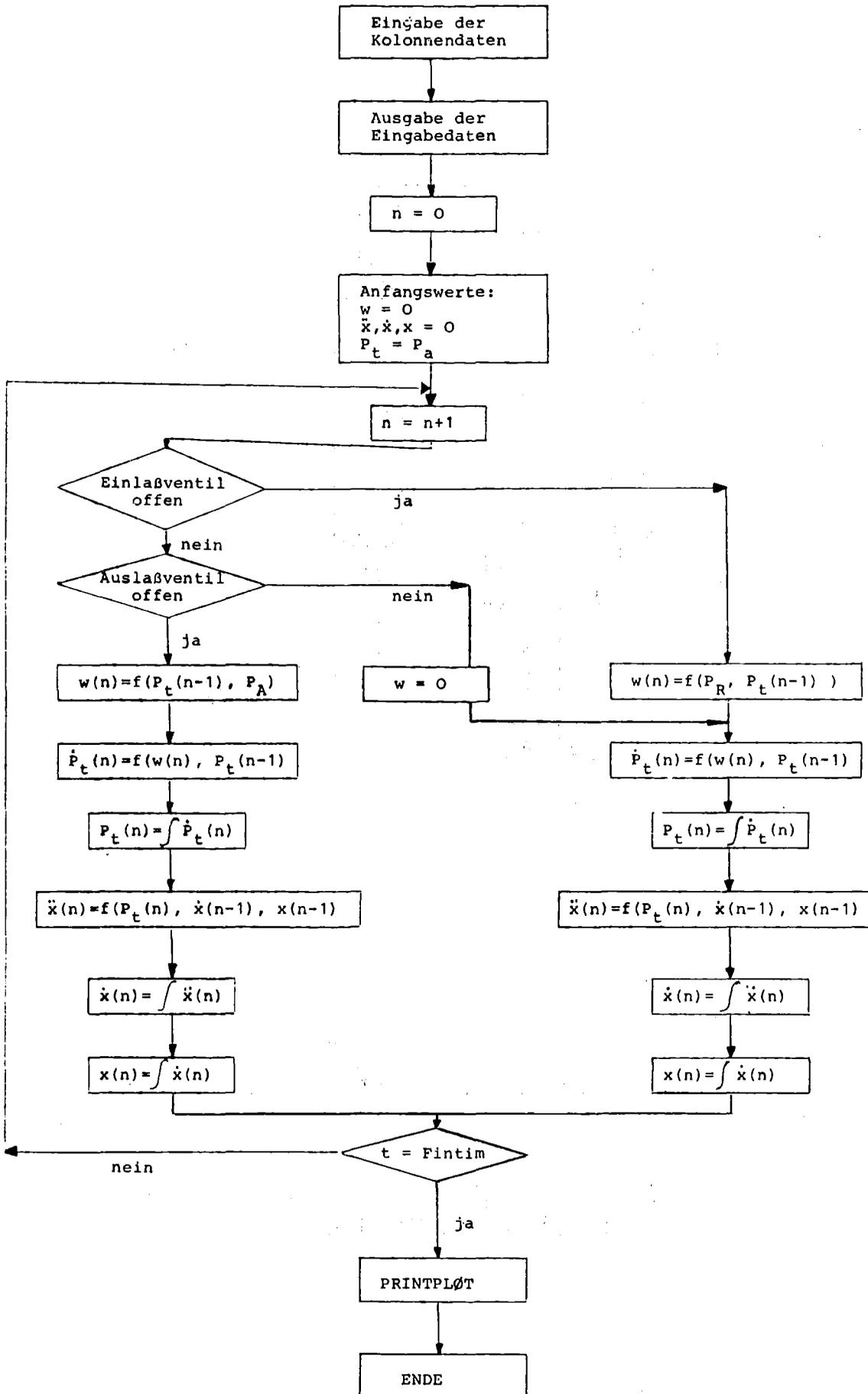
L_3	: Höhe des Siebbodens
L_4	: Höhe der organischen Phase im oberen Dekanter
L_5	: Höhe des Leerraumes im Pulsrohr in der Ruhelage
L_6	: Höhe der Mischphase im oberen Dekanter
m_0	: Masse der reinen organischen Phase
m_S	: Masse der Mischphase
m_{SD}	: Masse der Mischphase im oberen Dekanter
m_W	: Masse der reinen wäßrigen Phase
N	: Anzahl der Siebböden
P_a	: Außendruck
P_R	: Reservoirdruck
P_t	: Zeitabhängiger Druck im Pulsrohr
ΔP	: Druckdifferenz des Reservoirdruckes zum Außendruck
ΔP_g	: Druckverlust durch geodätische Höhendifferenz
ΔP_R	: Druckverlust durch Reibung
ΔP_t	: Druckverlust durch Massenträgheit
ΔP_{V1}	: Reibungsdruckverlust in der Meßanordnung ohne Siebböden
ΔP_{V2}	: Reibungsdruckverlust in der Meßanordnung mit Siebböden
\dot{Q}	: Volumenstrom
Re	: Reynoldszahl = $\frac{w \cdot D}{\nu}$
S	: Dicke der Siebböden
T	: Tastverhältnis der Pulsation = $\frac{\text{Öffnungszeit Einlaßventil}}{\text{Öffnungszeit Auslaßventil}}$
t	: Lochteilung der Siebböden
V_0	: Leervolumen im Pulsrohr in der Ruhelage
V_{SB}	: Volumen der Siebböden in der Kolonne
\dot{V}_C	: Fluß der kontinuierlichen Phase
\dot{V}_d	: Fluß der dispersen Phase
\dot{V}	: Gesamtfluß in der Kolonne

w	: Ein- bzw. Ausströmgeschwindigkeit der Pulsluft
w_0	: Anströmgeschwindigkeit der Siebböden = $w(A_2)$
x	: Auslenkung der Wassersäule im Pulsrohr aus der Ruhelage
x_2	: Auslenkung der Flüssigkeitssäule in der Kolonne
x_4	: Auslenkung der Flüssigkeitssäule im oberen Dekanter
\dot{z}	: Anzahl der Bohrungen in den Siebböden
Z	: Allgemeine Höhenkoordinate
α	: Kontraktionszahl
ζ_A	: Druckverlustbeiwert des Pulsrohreinlaufes
ζ_{RB}	: Druckverlustbeiwert der Pulsrohrbögen
ζ_{SB}	: Druckverlustbeiwert eines Siebbodens
ζ_1	: Druckverlustbeiwert des Lufteinlaß- bzw. des Luftauslaßventiles
ζ_2	: Druckverlustbeiwert der Querschnittserweiterung im Lufteinlaßsystem
ζ_3	: Druckverlustbeiwert der Querschnittsverengung im Luftauslaßsystem
λ	: Rohrreibungsbeiwert
ν	: Kinematische Viskosität
ρ	: Allgemeine Dichte
ρ_0	: Dichte der organischen Phase
ρ_S	: Dichte der Mischphase
ρ_W	: Dichte der wäßrigen Phase
φ	: Örtliches Flächenverhältnis

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Ablaufplan der Simulation
- Abb. 2 Versuchsordnung zur Messung des stationären
Druckverlustes
- Abb. 3 Widerstandsbeiwert bei stationärer Durchströmung
ohne Nozzles
- Abb. 4 Widerstandsbeiwert bei stationärer Durchströmung
Nozzles nach oben
- Abb. 5 Widerstandsbeiwert bei stationärer Durchströmung
Nozzles nach unten
- Abb. 6 Widerstandsbeiwerte der stationären Durchströmung
- Abb. 7 Schema der Kolonne mit zugehöriger Pulsations-
einrichtung
- Abb. 8 Ventilöffnungszeiten aus Stromaufnahme der
Magnetventile
- Abb. 9 Druckverlauf im Pulsrohr über Tastverhältnis
- Abb. 10 Auslenkung und Hub der Schwingung der Wassersäule
im U-Rohr
- Abb. 11 Hub der Schwingung über Öffnungszeit des Einlaßventiles
- Abb. 12 Hub im Pulsrohr über Ventilsteuerzeit (Komet I)
- Abb. 13 Hub im Pulsrohr
- Abb. 14 Druck-, Geschwindigkeits- und Bewegungsverlauf im
Pulsrohr der Komet I
- Abb. 15 Pulsform über Ventilsteuerzeit
- Abb. 16 Pulsform über Ventilsteuerzeit
- Abb. 17 Grenzwerte der Amplitude
- Abb. 18 Luftbedarf v und Auslenkung H über Pulsrohrdurchmesser
- Abb. 19 Druckverlustterme der Pulsation
- Abb. 20 Einfluß des Widerstandsbeiwertes auf den Hub im
Pulsrohr

Ablaufplan der Simulation



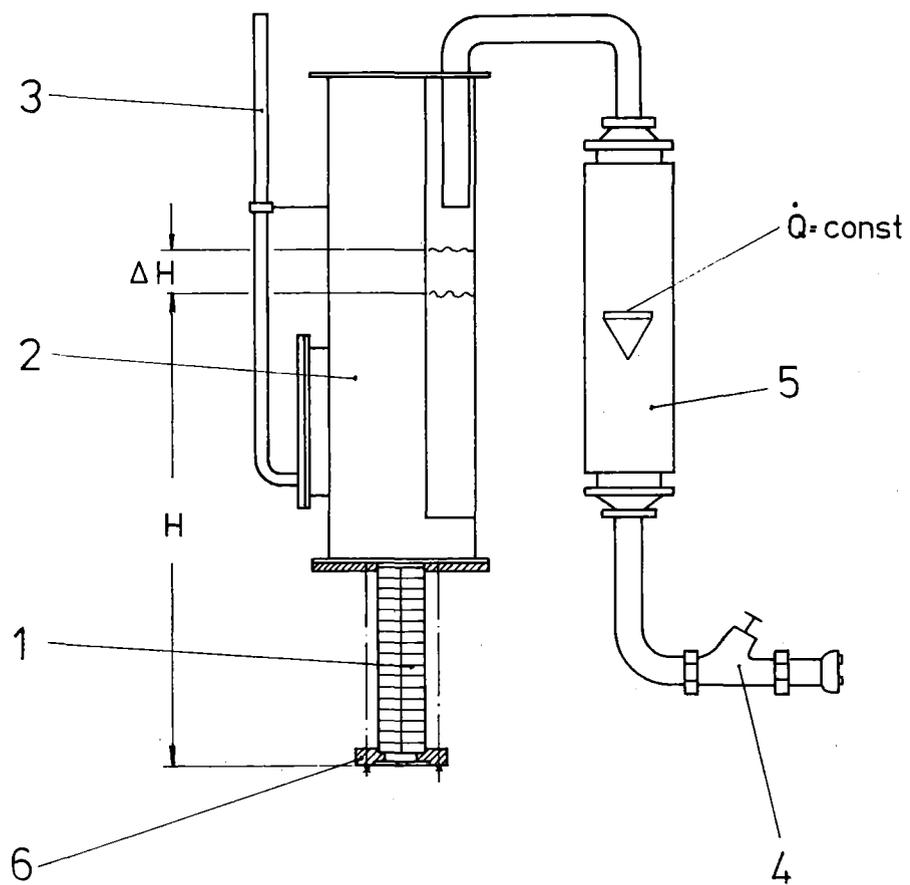
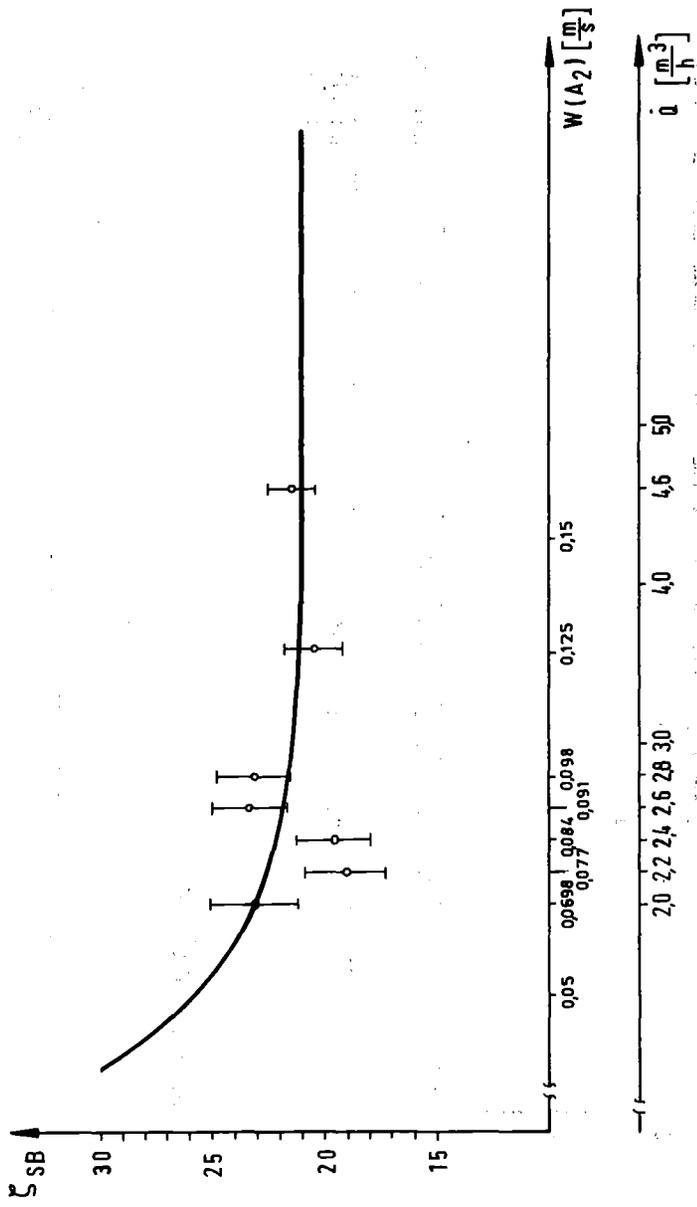


ABB. 2

Versuchsanordnung zur Messung des stationären Druckverlustes

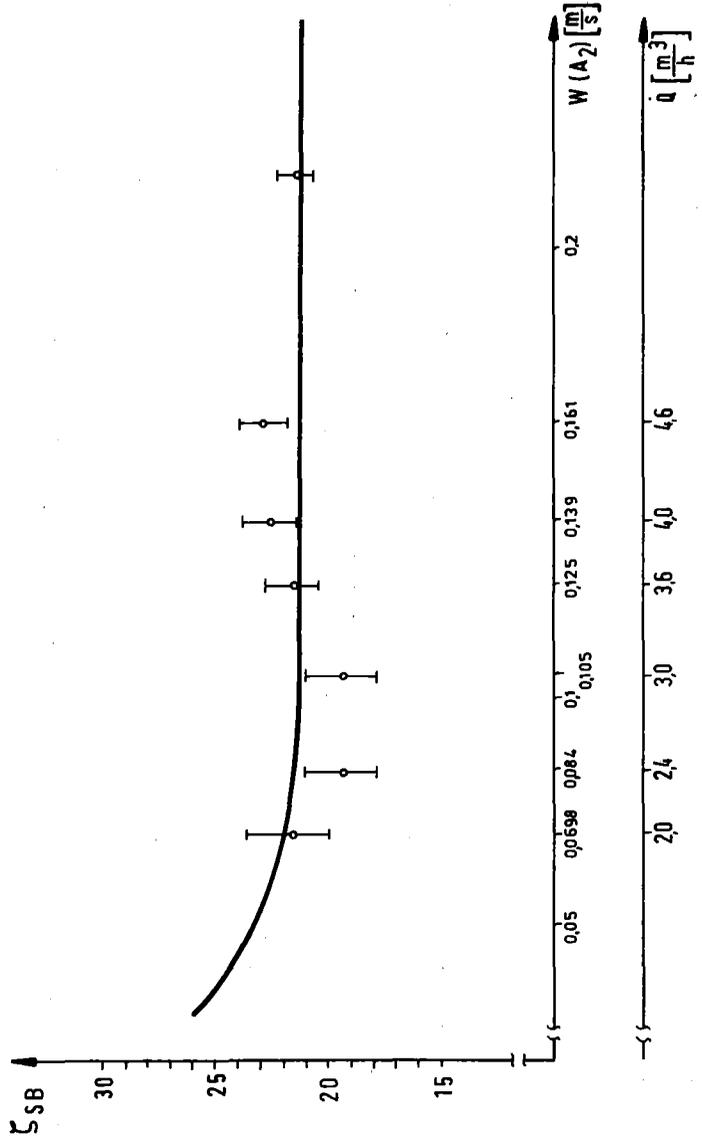


ohne Nozzles



ABB. 3

Widerstandsbeiwert bei stationärer Durchströmung



Nozzles nach oben



ABB. 4

Widerstandsbeiwert bei stationärer Durchströmung

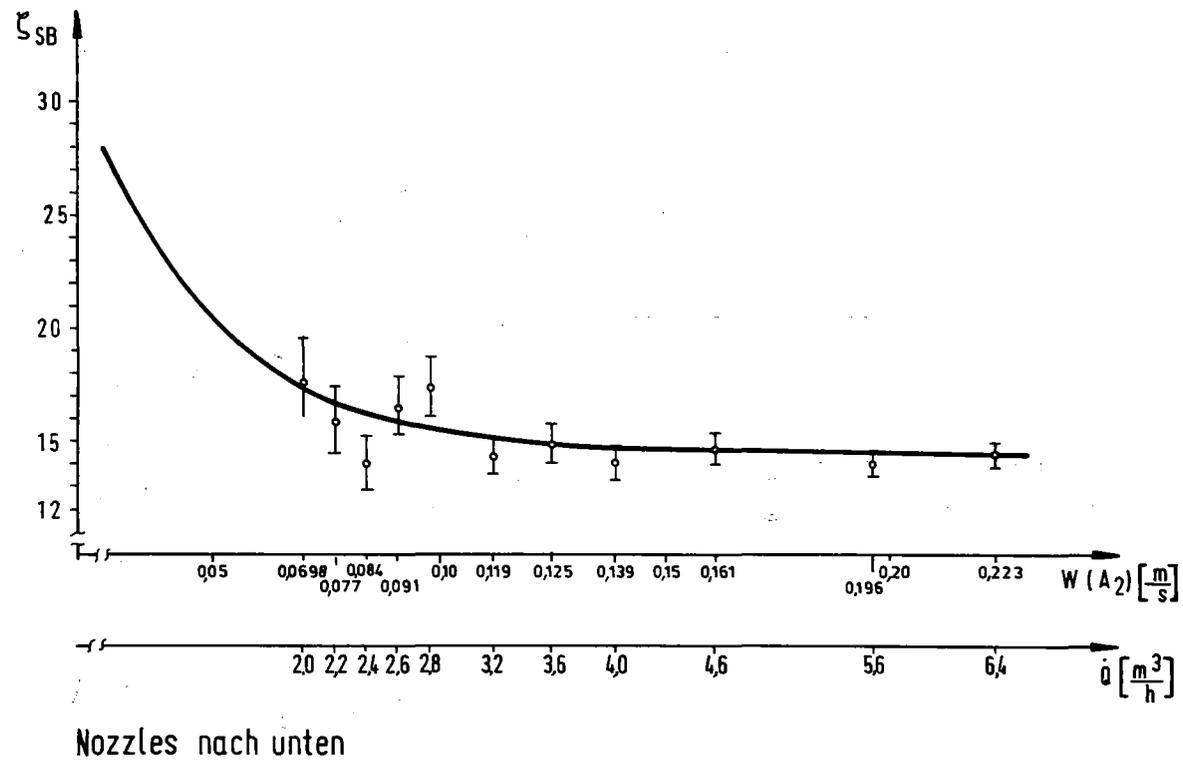


ABB. 5

Widerstandsbeiwert bei stationärer Durchströmung

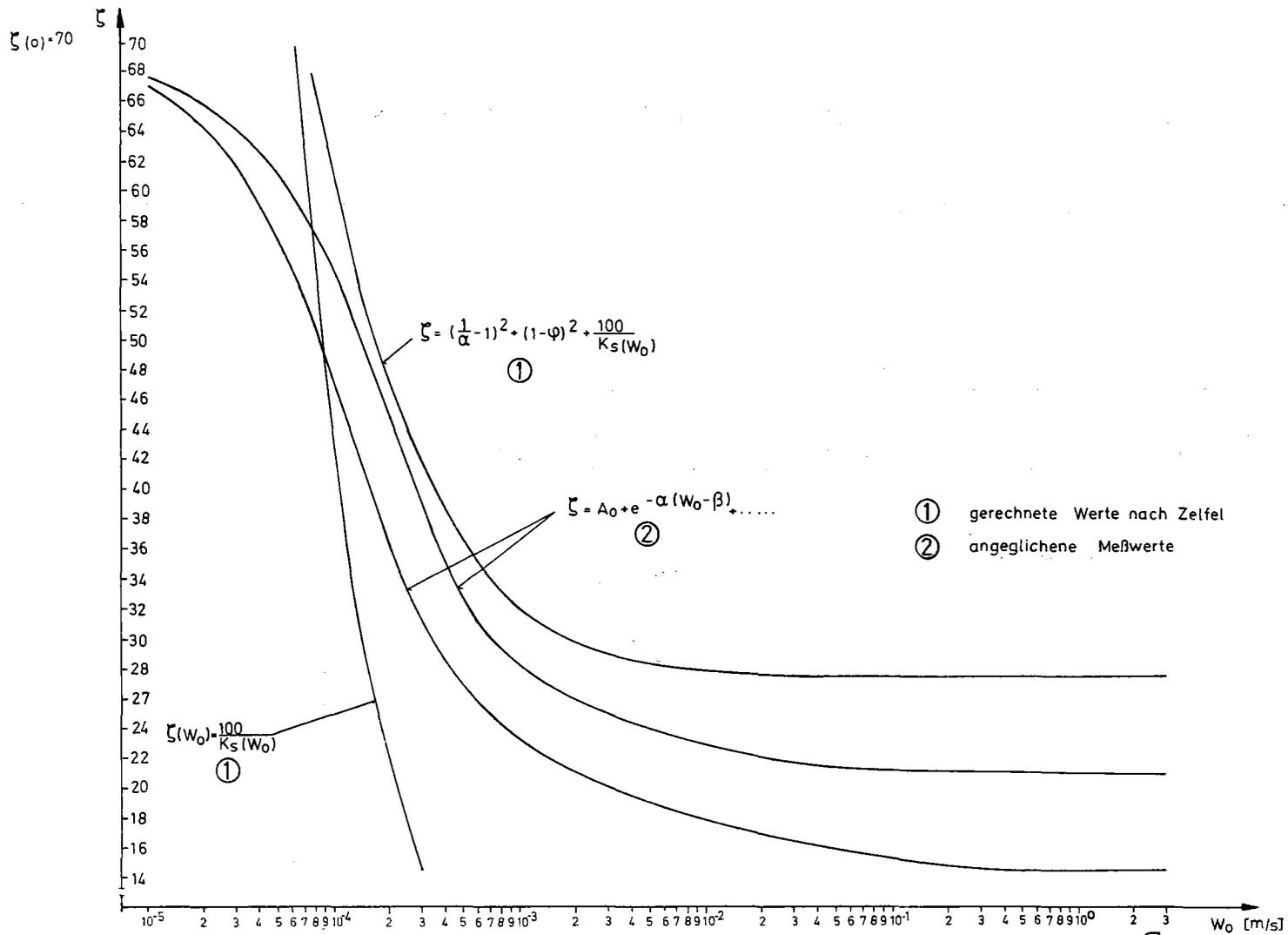


ABB. 6

Widerstandsbeiwerte der stationären Durchströmung

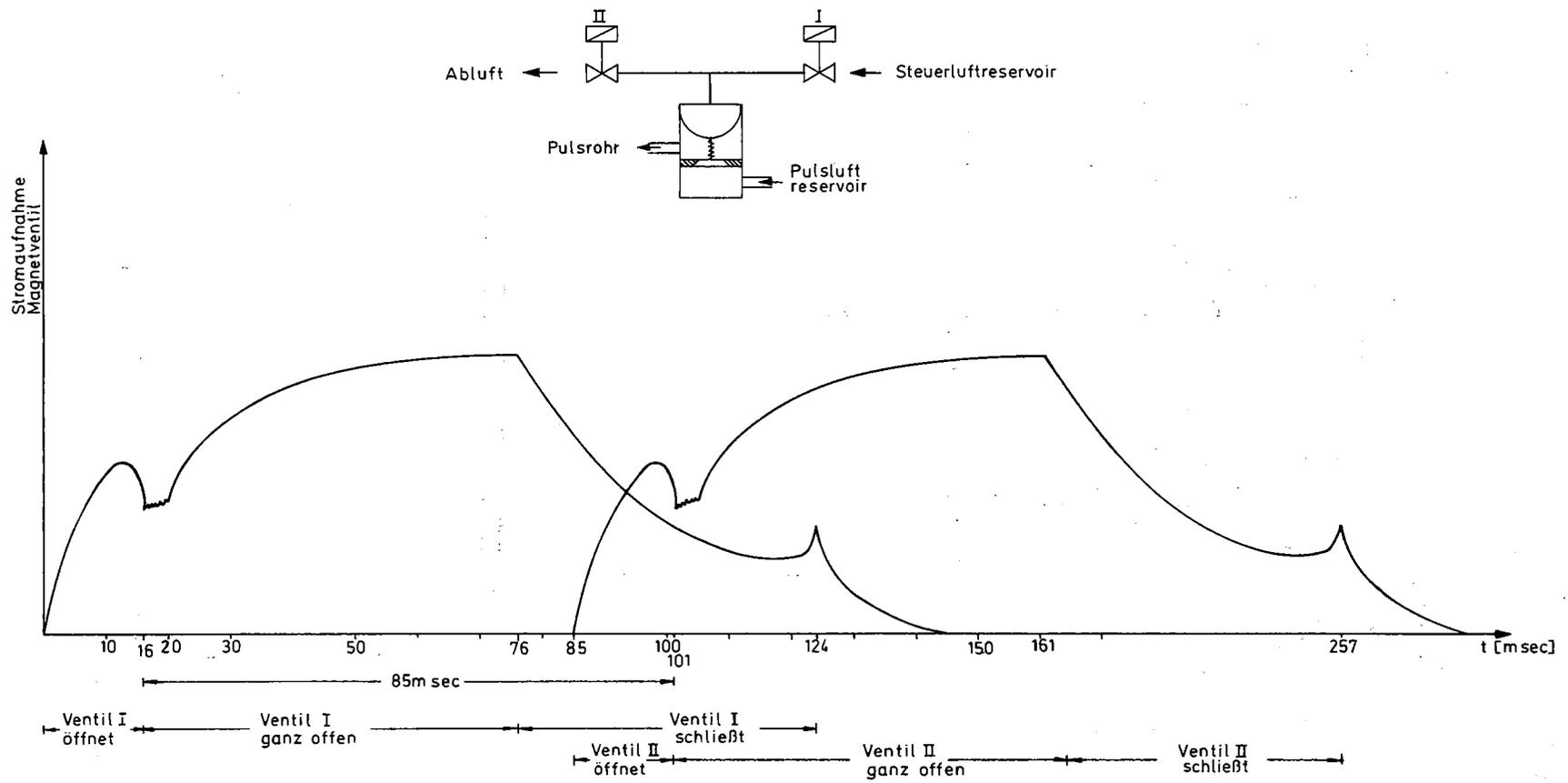
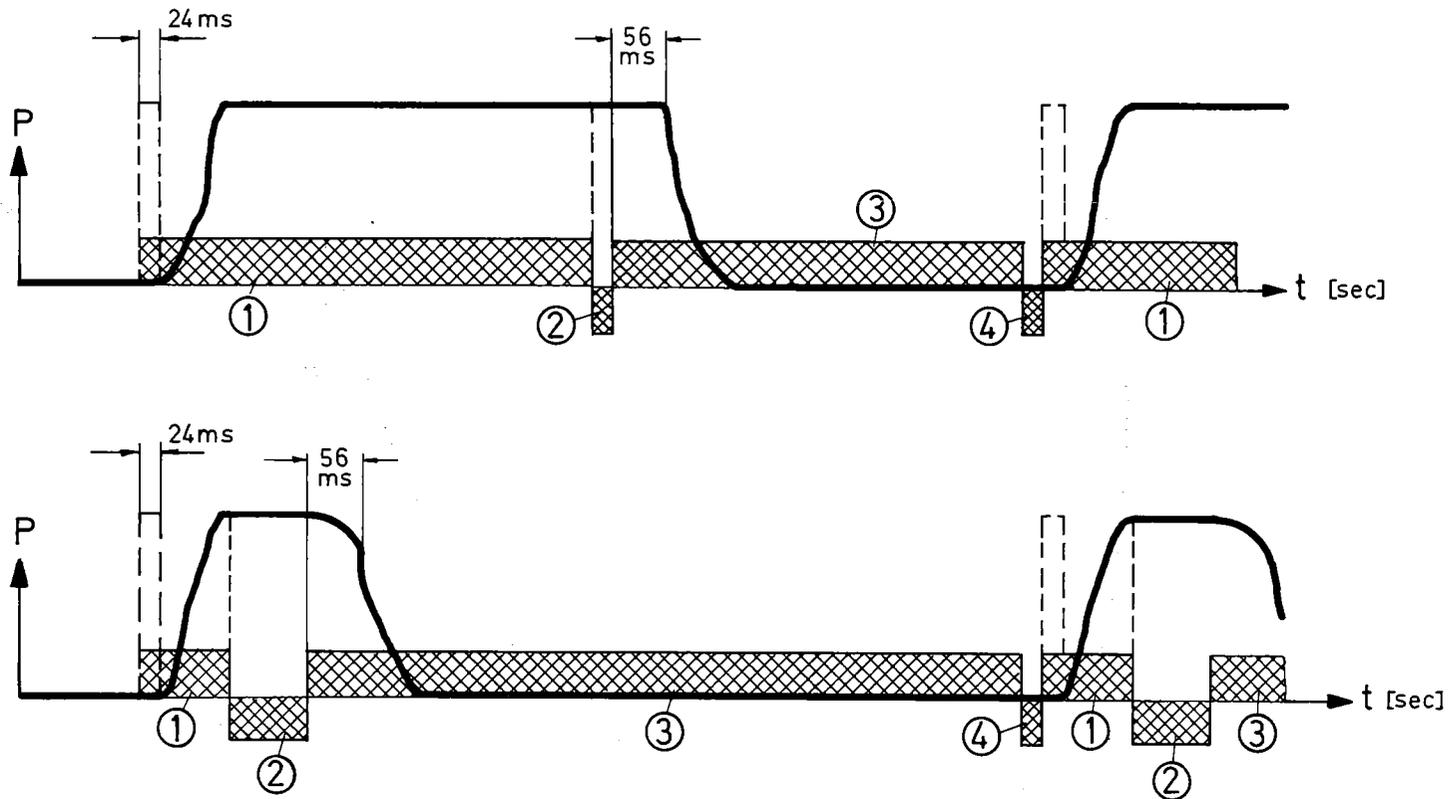


ABB. 8

Ventilöffnungszeiten aus Stromaufnahme der Magnetventile

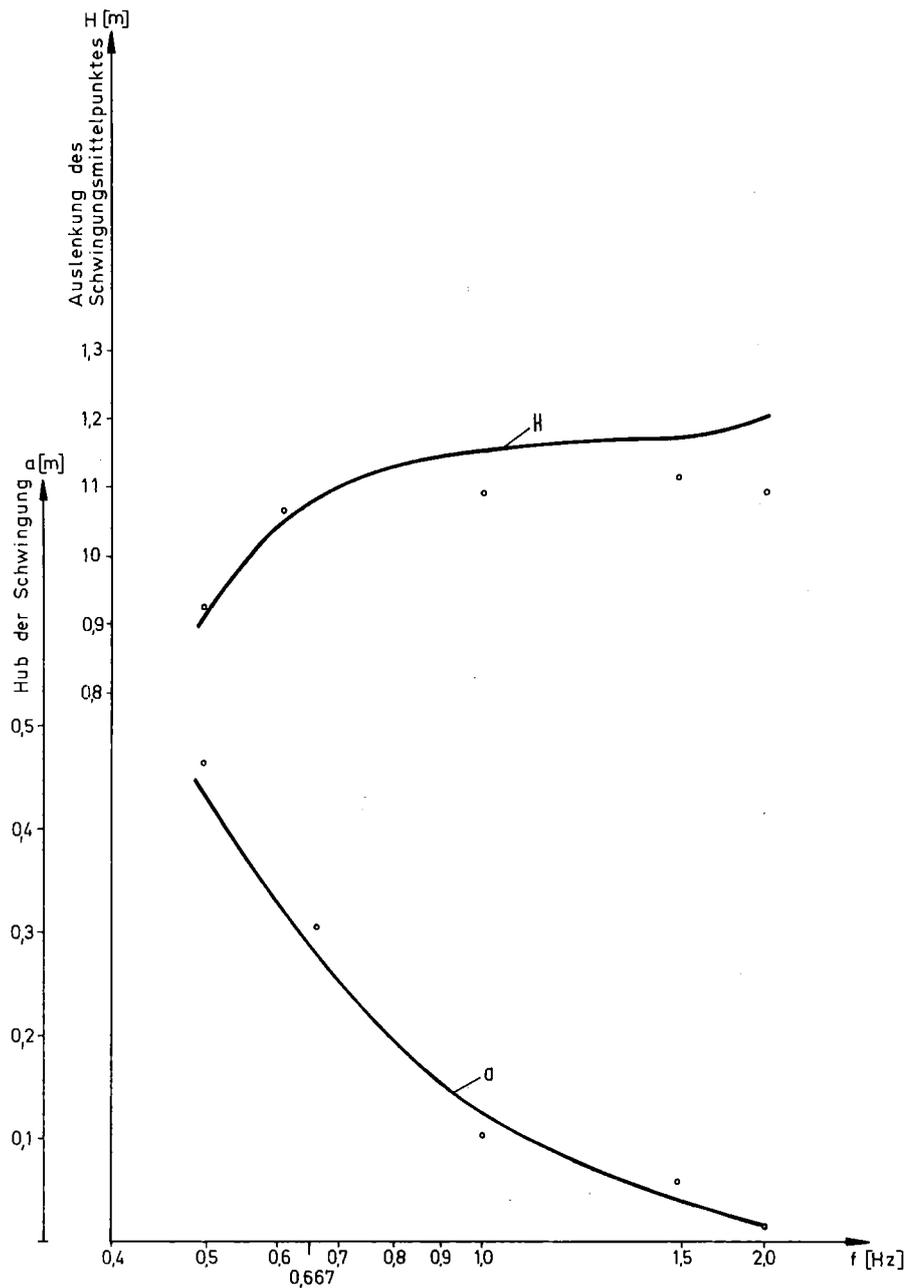


- ① Einlaßventil offen
- ② Einlaß und Auslaßventil geschlossen
- ③ Auslaßventil offen
- ④ Einlaß und Auslaßventil geschlossen

KfK

ABB. 9

Druckverlauf im Pulsrohr über Tastverhältnis



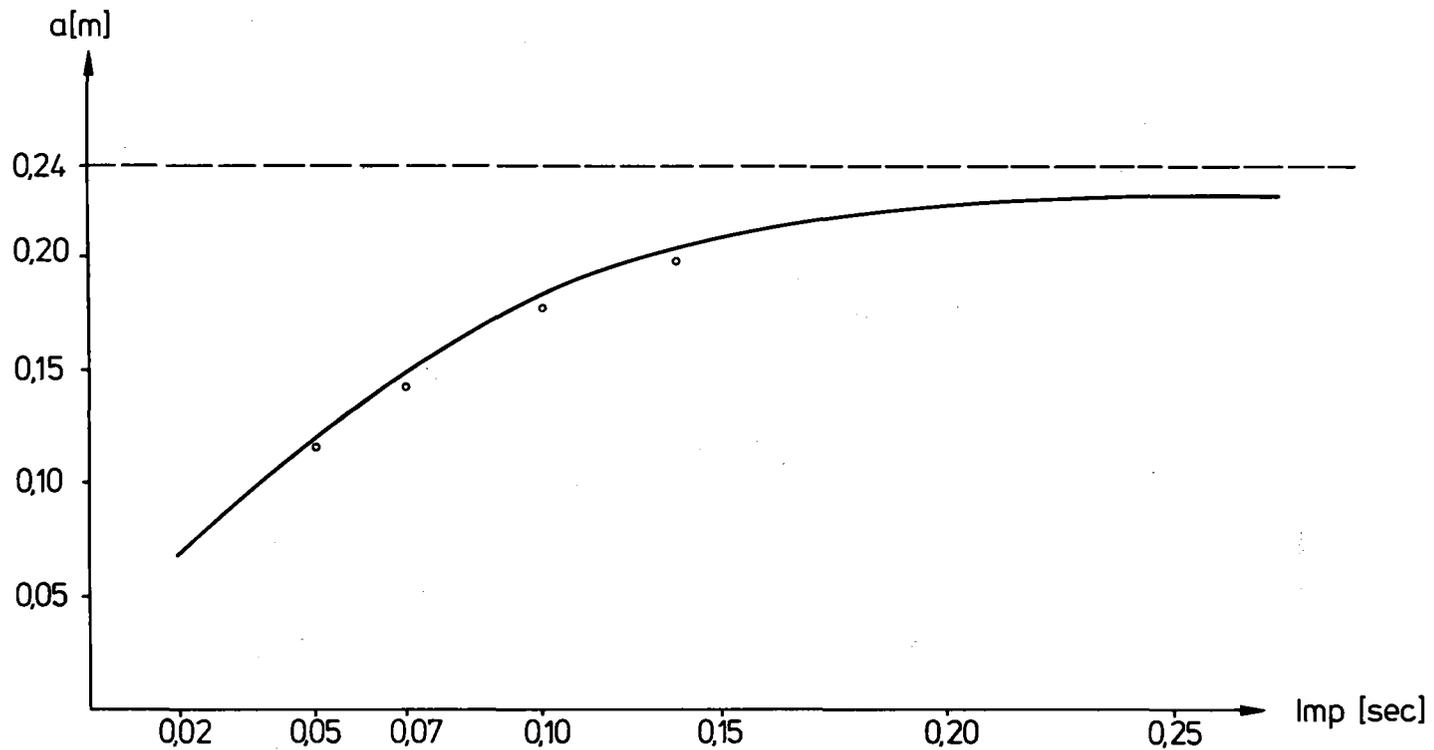
- gerechnete Werte
 o gemessene Werte

P_R 1,25 bar
 D_1 0,030 m
 D_2 0,110 m
 N 58



ABB. 10

Auslenkung und Hub der Schwingung der Wassersäule im U-Rohr



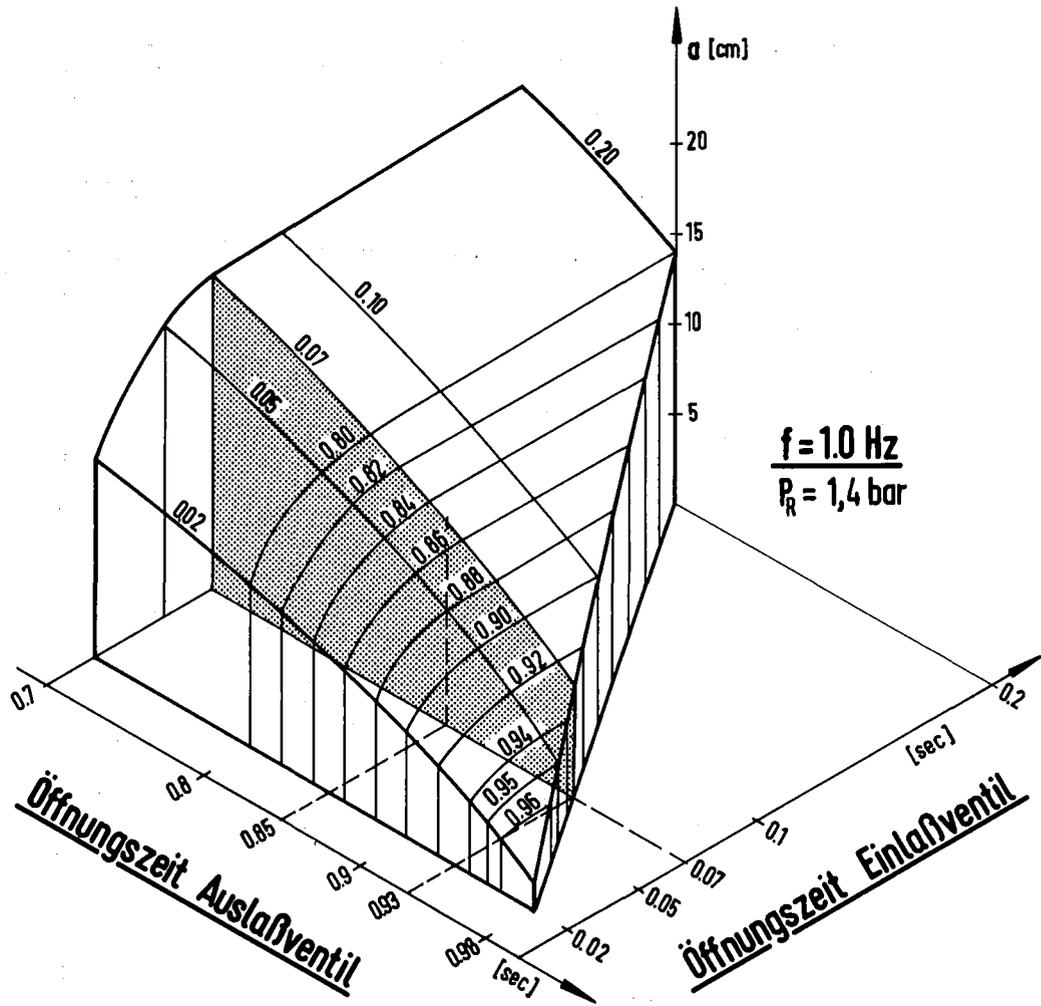
$P_R = 1,4 \text{ bar}$
 $f = 1 \text{ Hz}$
 $\Delta l = 160 \text{ m/sec}$

◦ gemessene Werte
 — gerechnete Werte



ABB. 11

Hub der Schwingung über Öffnungszeit des Einlaßventiles

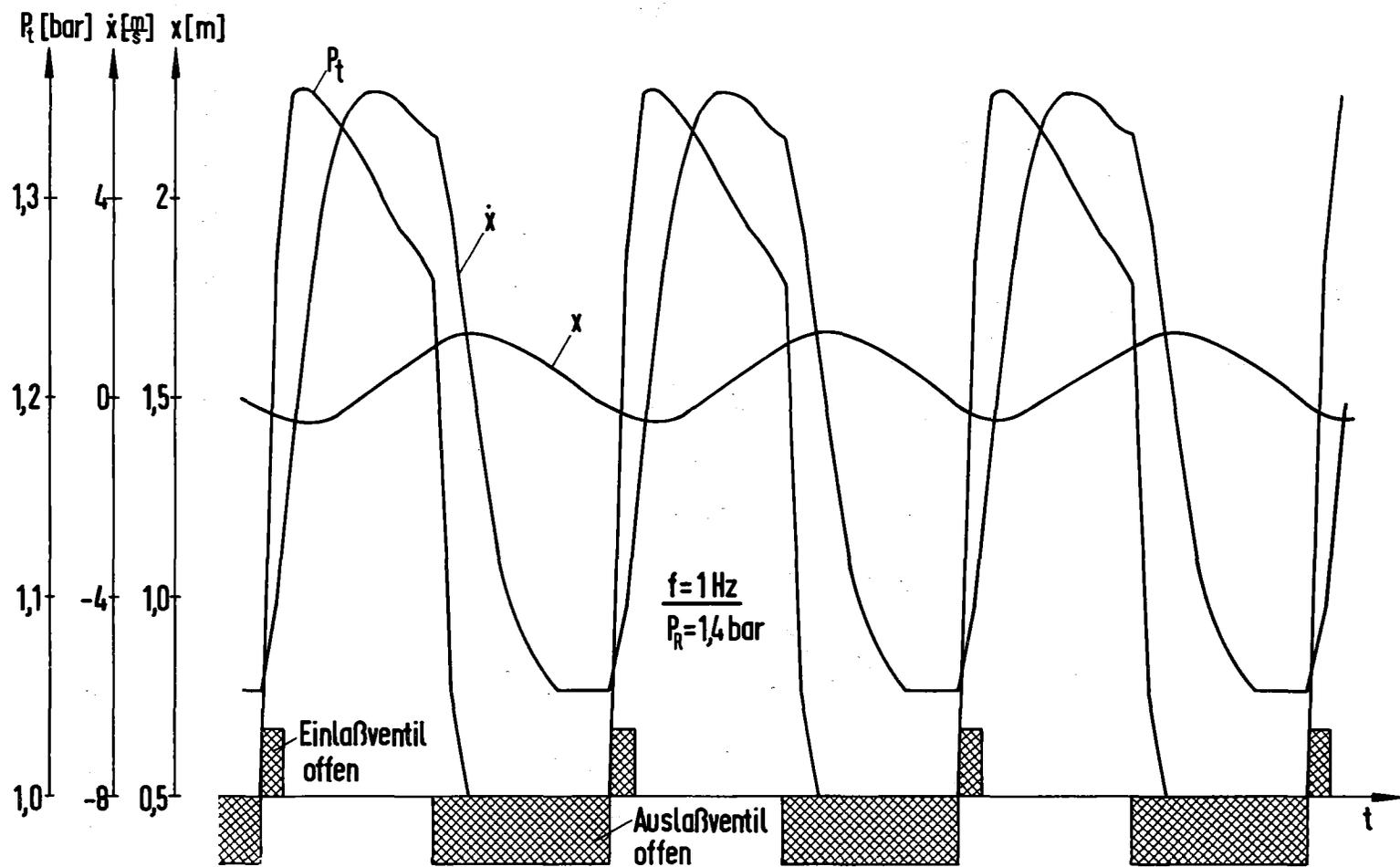


$D1 = 0,038 \text{ m}$
 $D2 = 0,1004 \text{ m}$
 $L2 = 2,842 \text{ m}$

KfK

ABB. 13

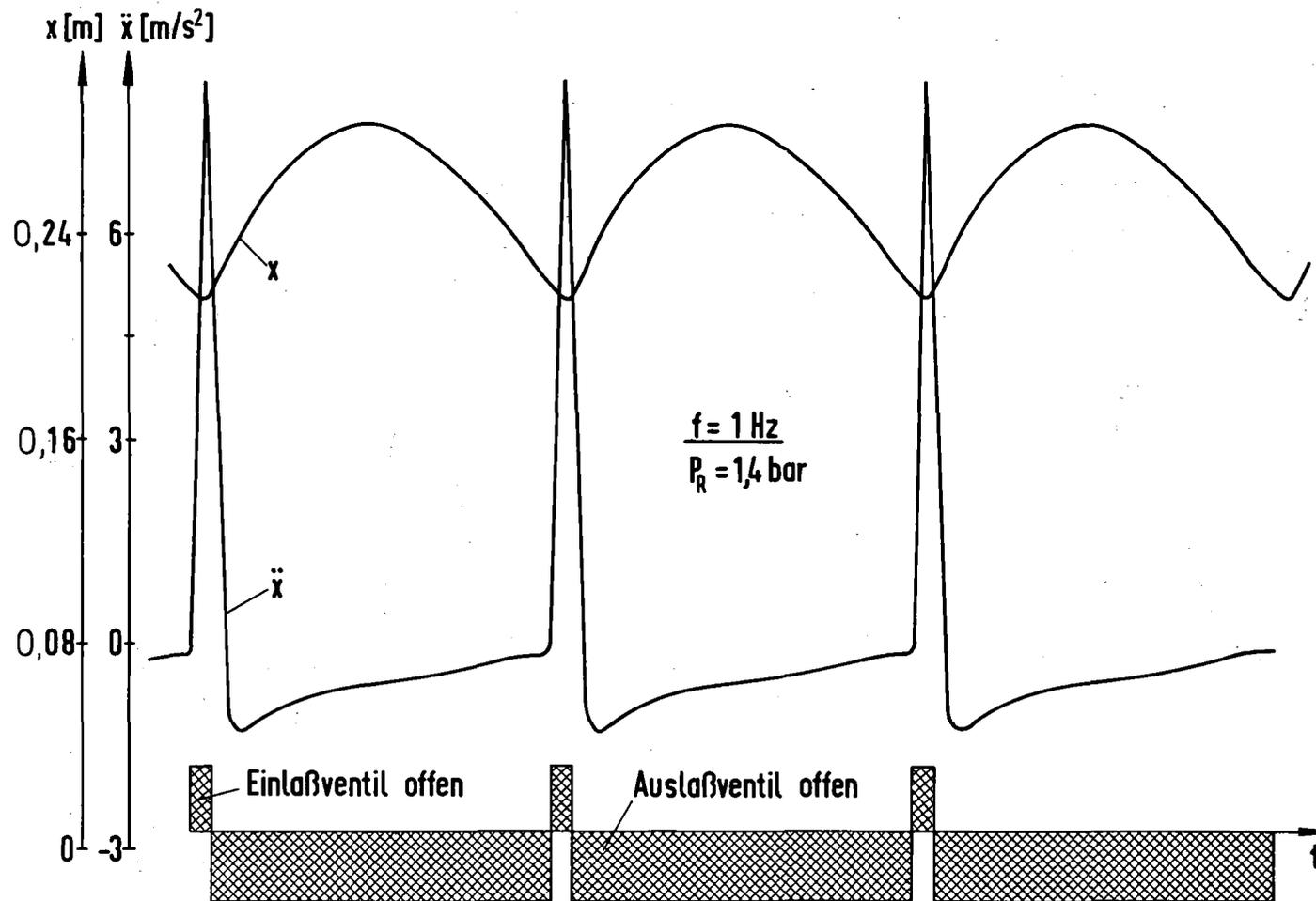
Hub im Pulsrohr



KfK

ABB. 14

Druck-, Geschwindigkeits und Bewegungsverlauf im Pulsrohr der Komet I

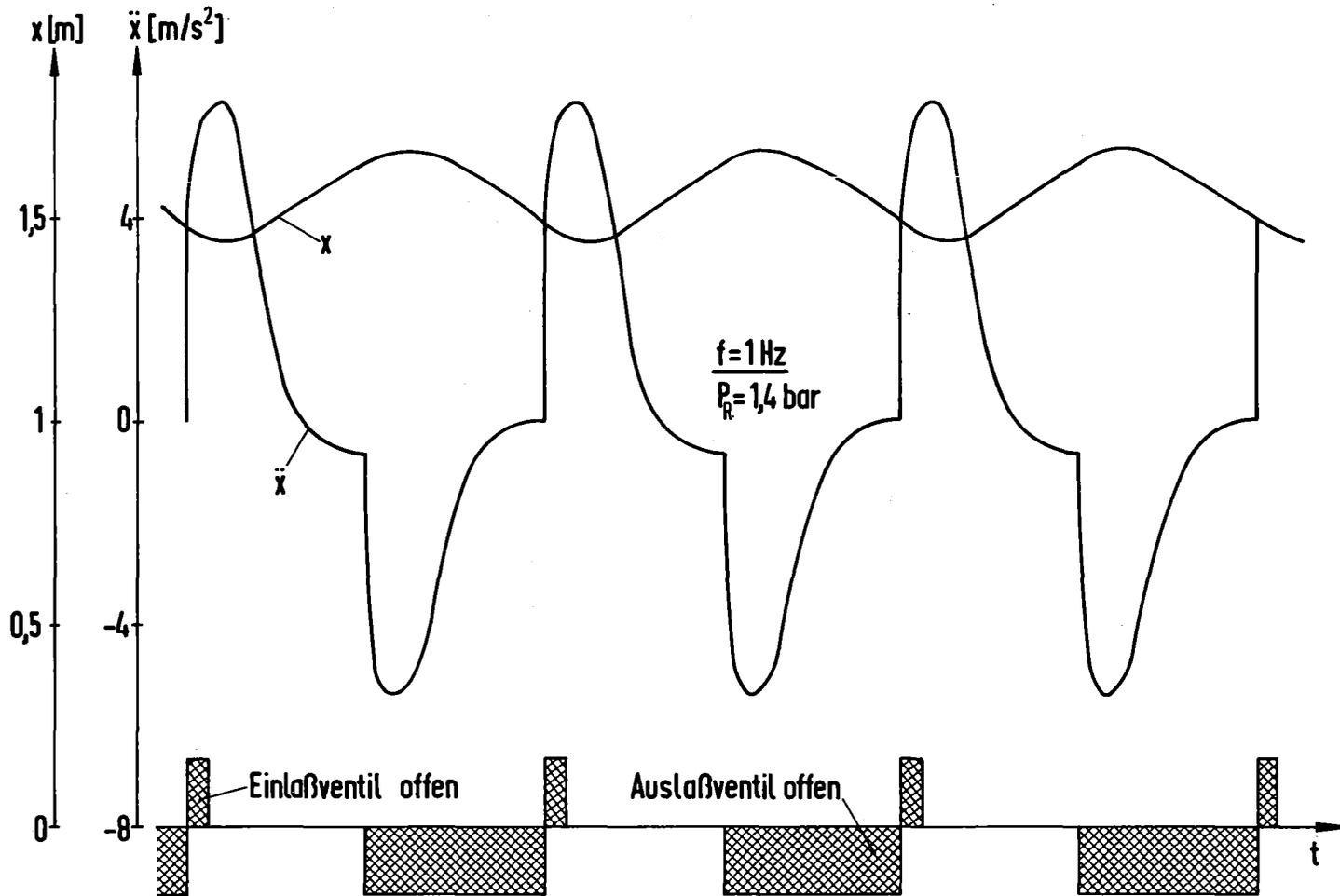


KfK

ABB. 15

Pulsform über Ventilsteuerzeit

$T_{\text{ein}} = 0,10 \text{ sec}$
 $T_{\text{aus}} = 0,90 \text{ sec}$



KfK

ABB. 16

Pulsform über Ventilsteuerzeit

$T_{\text{ein}} = 0,10 \text{ sec}$
 $T_{\text{aus}} = 0,50 \text{ sec}$

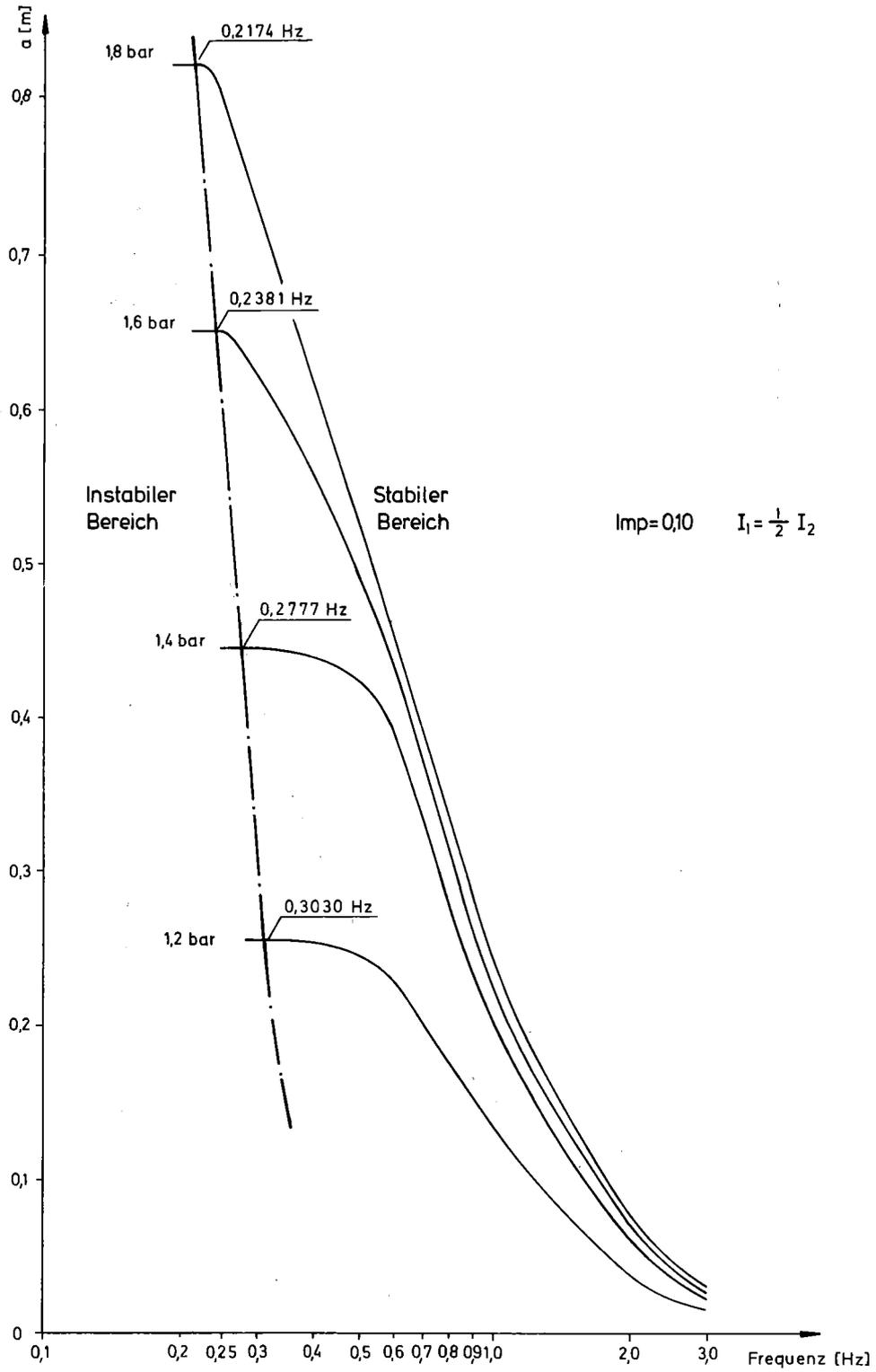


ABB. 17

Grenzwerte der Amplitude

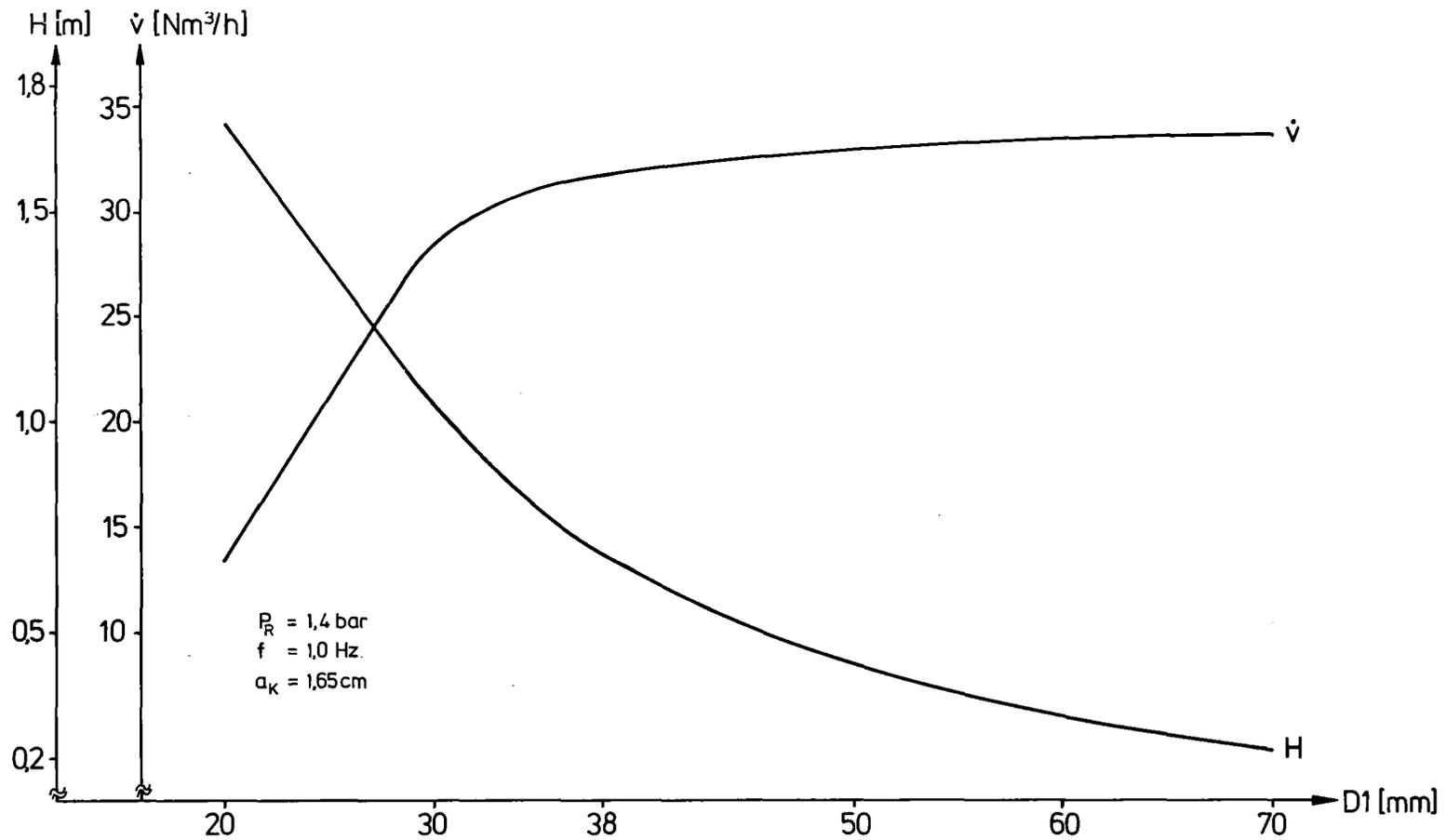
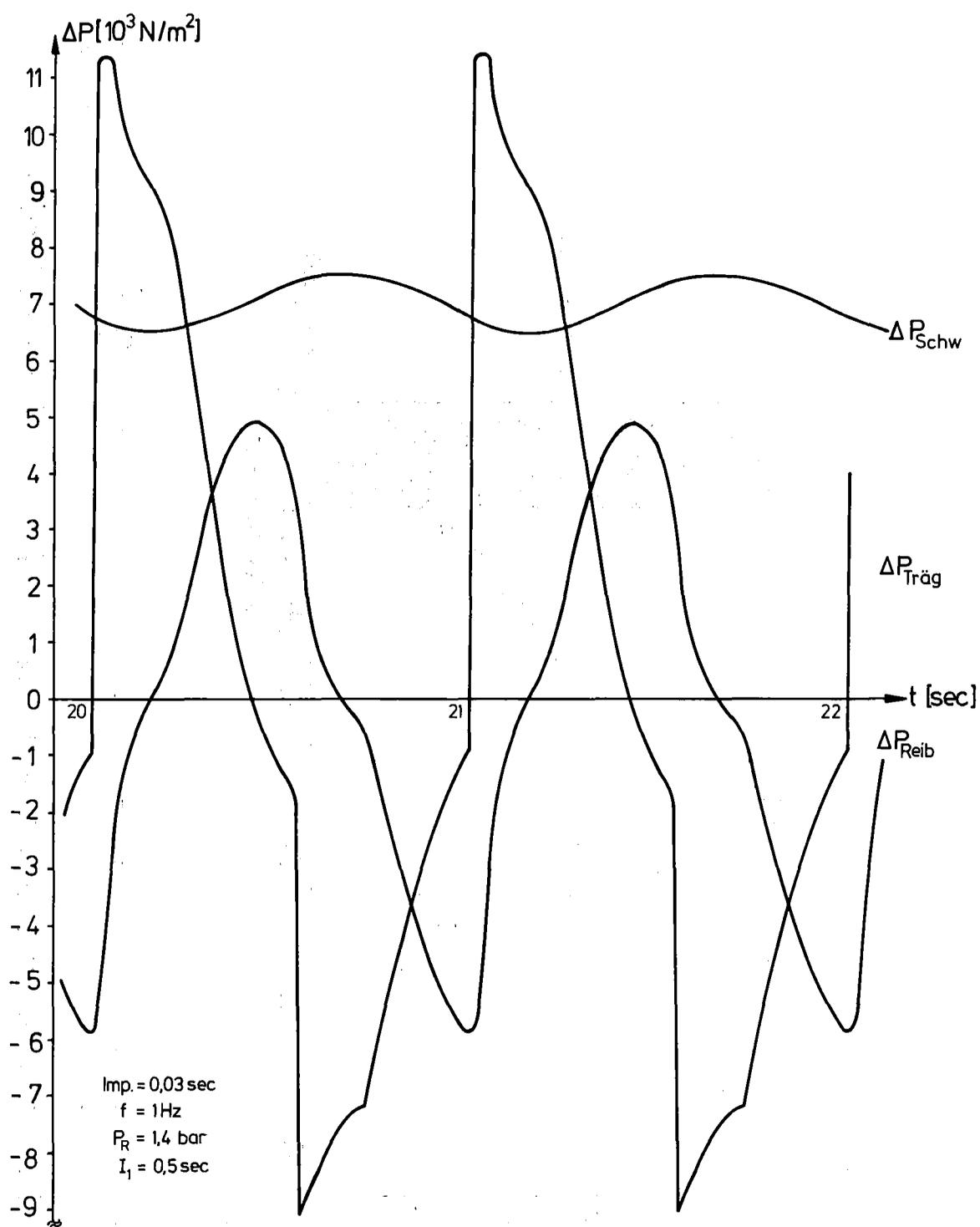
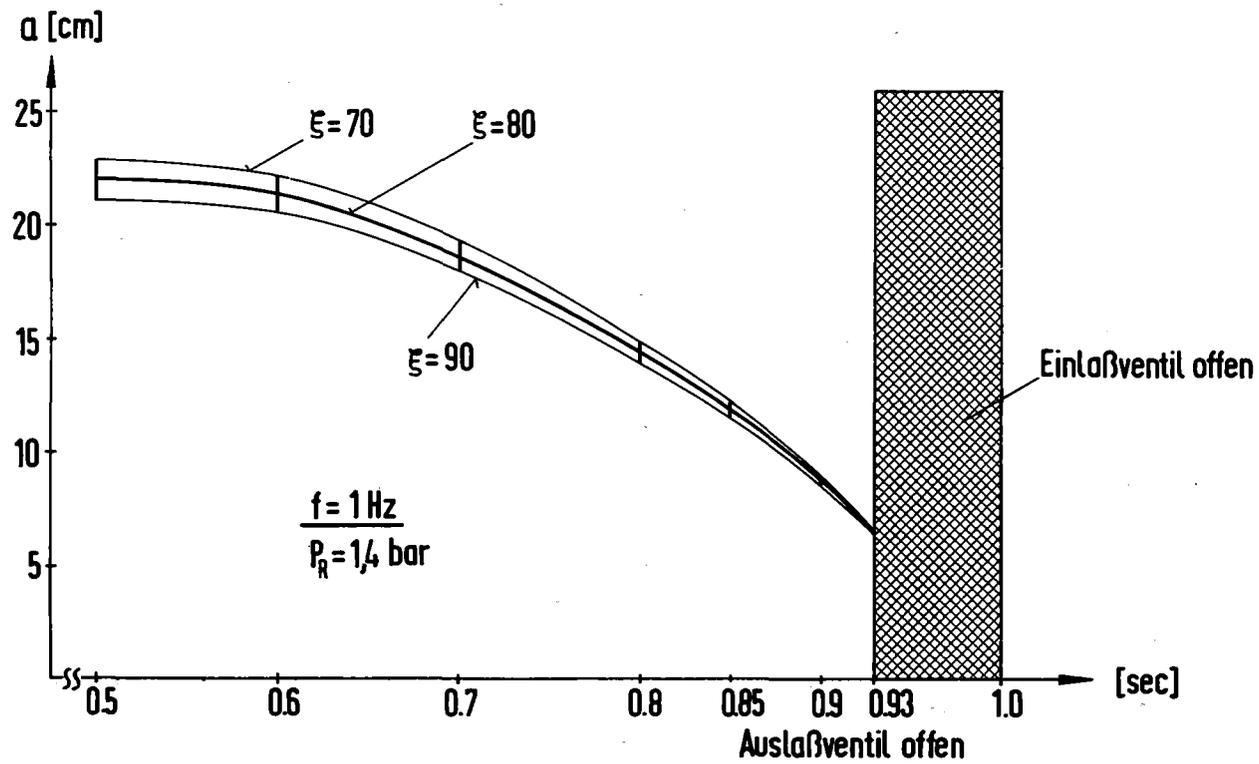


ABB. 18

Luftbedarf \dot{v} und Auslenkung H über Pulsrohrdurchmesser



Druckverlustterme der Pulsation

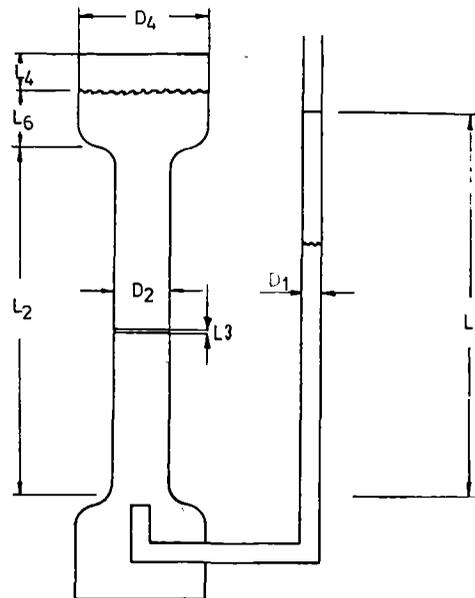


KfK

ABB. 20

Einfluß des Widerstandsbeiwertes auf den Hub im Pulsrohr

ANHANG 1



Schematische Darstellung KOMET I

aktive Kolonnenlänge	$L_2 = 2,5$	m
Dicke der Siebböden	$L_3 = 2,0$	mm
Höhe der Mischphase im oberen Dekanter	$L_4 = 0,3$	m
Höhe der organischen Phase im oberen Dekanter	$L_6 = 0,3$	m
Pulsrohrdurchmesser	$D_1 = 0,04$	m
Kolonnendurchmesser	$D_2 = 0,1004$	m
Dekanterdurchmesser	$D_4 = 0,3$	m

A N H A N G 2

\$\$\$CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM III V1M3 TRANSLATOR OUTPUT\$\$\$

```

*
*
INITIAL
*
*
*
CONSTANT
    G = 9.81,
    PA = 1.0E5,
    PR = 1.4E5,
    RHQA=1.29,
    CETA1=50,CETA2=0.25,CETA3=0.5,
    CETA4=0.74,CETA5=3.0,CETA6=54.4,CETA7=1.1,
    AE=0.377E-3,
    I1=0.0, I2=1.0,
    IMP=0.10,
    DELTAI=0.10,
    RHQW=1.0E3, RHQD=0.82E3, RHOS=0.97E3,
    L2 = 2.5,
    L3 = 2.0E-3,
    L4 = 0.3,
    L6 = 0.3,
    DA = 0.020,
    D1 = 0.040,
    D2 = 0.100,
    D3 = 0.0035,
    D4 = 0.300,
    NYW=0.1053E-5, NYS=0.116E-5

XPKMAX = 1.0
PT      = PA
AX1PKT = 0.0
AX      = 0.0
W       = 0.0
ALUFT  = 0.0
EB      = 0.0
SCHR1  = 18*I2
SCHR2  = 19*I2
IMP3    = IMP+DETAI
OG      = 0.0
UG      = 0.0
AWLUFT = 0.0
X       = AX
APT     = PT
WLUFT  = 0.0
RHOR   = (PR/PA)*RHQA
A1     = D1**2*3.14/4
A      = DA**2*3.1416/4
A2     = D2**2*3.14/4
A3     = D3**2*3.14/4
A4     = D4**2*3.14/4
N      = 112
Z      = 1688
L1     = ((L2+0.51)*RHOS+L4*RHOD)/RHOW
L5     = L2+L4+L6-L1
VNULL  = A1*L5+0.8E-3
XK3    = CETA6*RHOS/2*(A1/A2)**2
XK4    = (L1-X)/(2*D1)*RHOW
XK5    = L2/D2*(A1/A2)**2*RHOS/2
XK6    = (CETA4+2*CETA7)*RHOW/2

```

```

00000150
00000160
00000170
00000180
00000190
00000200
00000210
00000220
00000230
00000240
00000250
00000260
00000270
00000280
00000290
00000300
00000310
00000320
00000330
00000340
00000350
00000360
00000370
00000380
00000390
00000400
00000410
00000420
00000430
00000440
00000450
00000460
00000470
00000480
00000490
00000500
00000510
00000520
00000530
00000540
00000550
00000560
00000570
00000580
00000590
00000600
00000610
00000620
00000630
00000640
00000650
00000660
00000670
00000680
00000690
00000700
00000710
00000720

```

```

XK7 = 0.0
XK8 = (L1+1.0-X)*RHOW+(L1-N*(A2-Z*A3)/A2*L3+A1/A2*RHOW ... 00000730
      /RHOS*X)*RHOS*A1/A2 00000740
XK9 = D1/(7*NYW) 00000750
XK10 = (D2/(7*NYS))*(A1/A2) 00000770
XK16 = N*(A2-Z*A3)/A2*L3 00000780
NOSORT 00000790
* WRITE(6,601) RHOR,A,A1,A2,A3,A4,L1,N,Z 00000800
* 601 FORMAT(' RHOR=',E14.4/' A=',E14.4/' A1=',E14.4/ 00000810
* $ ' A2=',E14.4/' A3=',E14.4/' A4=',E14.4/ 00000820
* $ ' L1=',E14.4/' N=',E14.4/' Z=',E14.4/) 00000830
SORT 00000840
* 00000850
* DYNAMIC 00000860
* 00000870
NOSORT 00000880
FKT1 = IMPULS(I1,I2) 00000890
FKT2 = PULSE(IMP,FKT1) 00000900
FKT3 = PULSE(IMP3,FKT1) 00000910
* 00000920
* 00000930
* 00000940
* 00000950
* 00000960
* 00000970
* 00000980
* 00000990
* 0001000
* 0001010
* 0001020
* 0001030
* 0001040
520 CONTINUE 0001050
APT = PT 0001060
AX1PKT = X1PKT 0001070
AX = X 0001080
AWLUFT = WLUFT 0001090
XK4 = (L1-X)/(2*D1)*RHOW 0001100
XK15 = ABS(-39.0*((X1PKT)*A1/A2-0.10)) 0001110
XK6 = (CETA5+2*CETA7)*RHOW/2 0001120
IF (XK15.GT.130) GOTO 290 0001130
CETA9 = 85.0+EXP(-39.0*(ABS(X1PKT)*A1/A2-0.10)) 0001140
GOTO 291 0001150
290 CETA9 = 85.0 0001160
291 CONTINUE 0001170
XK3 = N*CETA9*RHOS/2*(A1/A2)**2 0001180
XK7 = ((X*A1/A2-(L1-X))*RHOW+((L2-X*A1/A2)+(L6+L4* ... 0001190
      RHOO/RHOS))*RHOS)*G 0001200
XK8 = (L1+1.0-X)*RHOW+((L2-XK16-X*A1/A2)*A1/A2+X*(A1/A2) ... 0001210
      **2*RHOW/RHOS+(L6+L4*RHOO/RHOS)*(A1/A4)**2)*RHOS 0001220
RE1 = X1PKT*XK9*7 0001230
RE2 = X1PKT*XK10*7 0001240
IF (RE1.LT.1.0E-20) GOTO 400 0001250
IF (RE2.LT.1.0E-20) GOTO 400 0001260
IF (RE1.LT.2230) GOTO 410 0001270
IF (RE2.LT.2230) GOTO 410 0001280
LAMDA1= 0.309/((ALOG10 (XK9*X1PKT))**2) 0001290
LAMDA2= 0.309/((ALOG10 (XK10*X1PKT))**2) 0001300
GOTO 401 0001310
400 LAMDA1=0.0 0001310

```

	LAMDA2=0.0	00001320	
401	CONTINUE	00001330	
	GOTO 411	00001340	
410	LAMDA1 = 64/RE1	00001350	
	LAMDA2 = 64/RE2	00001360	
411	CONTINUE	00001370	
	IF (PT.GE.PR) GOTO 300	00001380	
	IF (PT.LE.PA) GOTO 301	00001390	
	GOTO 200	00001400	
300	PT = PR	00001410	
200	CONTINUE	00001420	
	GOTO 201	00001430	
301	PT = PA	00001440	
201	CONTINUE	00001450	
	IF (FKT2.EQ.0.0) GOTO 243	00001460	
	ARGW = (PR-PT)/((CETA1+CETA2)*RHOR/2)	00001470	
	IF (ARGW.LE.0.0) GOTO 240	00001480	
	W = SQRT (ARGW)	00001490	
	GOTO 241	00001500	
240	W = 0.0	00001510	
241	CONTINUE	00001520	
	VPKTL = W*A*PT/PA	00001530	
	VLUFT = INTGRL (ALUFT,VPKTL)	00001540	
	NLUFT = W*A*PT	00001550	
	WLUFT = INTGRL (AWLUFT,NLUFT)	00001560	
	PTPKT = W*A*PT/(VNULL+A1*X)	00001570	
	PT = INTGRL (APT,PTPKT)	00001580	
	GOTO 244	00001590	
243	PNULL1 = PT	00001600	
	VNULL1 = VNULL+A1*X	00001610	
	PTPKT = -PNULL1*VNULL1*A1*X1PKT/(VNULL+A1*X)**2	00001620	
	PT = INTGRL (APT,PTPKT)	00001630	
244	CONTINUE	00001640	
	X2PKT = (PT-PA-(XK3+(XK4*LAMDA1)	...	00001650
	+ (XK5*LAMDA2)+XK6)*(ABS(X1PKT)*X1PKT)	...	00001660
	-XK7)/XK8		00001670
	X1PKT = INTGRL (AX1PKT,X2PKT)		00001680
	X = INTGRL (AX,X1PKT)		00001690
	PVERL = XK3*(ABS(X1PKT)*X1PKT)		00001700
	PREIB = (XK3+XK4*LAMDA1	...	00001710
	+ (XK5*LAMDA2)+XK6)*(ABS(X1PKT)*X1PKT)		00001720
	PTRAEG = XK8*X2PKT		00001730
	PSCHW = XK7		00001740
	PANTR = (PT-PA)		00001750
	PLUFT = 0.0		00001760
	PSUMM = PREIB+PTRAEG+PSCHW+PLUFT-PANTR		00001770
	IF (TIME.LT.1.0) GOTO 521		00001780
	SPEZLV = VLUFT/TIME*3600		00001790
	SPEZEV = WLUFT/TIME*3600		00001800
521	CONTINUE		00001810
	GOTO 526		00001820
*			00001830
*	AUSBLASVORGANG		00001840
*			00001850
525	CONTINUE		00001860
	APT = PT		00001870
	AX1PKT = X1PKT		00001880
	AX = X		00001890
	XK4 = (L1-X)/(2*D1)*RHGW		00001900

```

XK15 = ABS(-39.0*((X1PKT)*A1/A2-0.10))          00001910
XK6 = (CETA5+2*CETA7)*RHOW/2                    00001920
IF (XK15.GT.130) GOTO 295                        00001930
CETA9 = 85.0+EXP(-39.0*(ABS(X1PKT)*A1/A2-0.10)) 00001940
GOTO 296                                          00001950
295 CETA9 = 85.0                                  00001960
296 CONTINUE                                      00001970
XK3 = N*CETA9*RHO5/2*(A1/A2)**2                 00001980
XK7 = ((X*A1/A2-(L1-X))*RHOW+((L2-X*A1/A2)+(L6+L4*  ... 00001990
      RHO0/RHO5))*RHO5)*G                        00002000
XK8 = (L1+1.0-X)*RHOW+((L2-XK16-X*A1/A2)*A1/A2+X*(A1/A2) ... 00002010
      **2*RHOW/RHO5+(L6+L4*RHO0/RHO5)*(A1/A4)**2)*KHOS 00002020
RE1 = X1PKT*XK9*7                                00002030
RE2 = X1PKT*XK10*7                               00002040
IF (RE1.LT.1.0E-20) GOTO 405                    00002050
IF (RE2.LT.1.0E-20) GOTO 405                    00002060
IF (RE1.LT.2230) GOTO 415                       00002070
IF (RE2.LT.2230) GOTO 415                       00002080
LAMDA1= 0.309/((ALOG10 (XK9*X1PKT))**2)        00002090
LAMDA2= 0.309/((ALOG10 (XK10*X1PKT))**2)      00002100
GOTO 406                                          00002110
405 LAMDA1=0.0                                    00002120
      LAMDA2=0.0                                  00002130
406 CONTINUE                                      00002140
      GOTO 416                                     00002150
415 LAMDA1 = 64/RE1                               00002160
      LAMDA2 = 64/RE2                             00002170
416 CONTINUE                                      00002180
      IF (PT.GE.PR) GOTO 305                      00002190
      IF (PT.LE.PA) GOTO 306                      00002200
      GOTO 205                                    00002210
305 PT = PR                                       00002220
205 CONTINUE                                      00002230
      GOTO 206                                     00002240
306 PT = PA                                       00002250
206 CONTINUE                                      00002260
      RHOPT = PT/PA*RHOA                           00002270
      ARGW = (PT-PA)/((CETA1+CETA3)*RHOPT/2)     00002280
      W = -SQRT(ARGW)                              00002290
      PTPKT = W*A*PT/(VNULL+A1*X)                 00002300
      PT = INTGRL(APT,PTPKT)                      00002310
      IF (PT.LE.PA) GOTO 225                      00002320
      X2PKT = (PT-PA-(XK3+(XK4*LAMDA1)           ... 00002330
      +(XK5*LAMDA2)+XK6)*(ABS(X1PKT)*X1PKT)    ... 00002340
      -XK7)/XK8                                    00002350
      X1PKT = INTGRL (AX1PKT,X2PKT)               00002360
      X = INTGRL (AX,X1PKT)                       00002370
      PLUFT = 0.0                                  00002380
      GOTO 226                                     00002390
225 W = A1/A*X1PKT                                00002400
      X2PKT = (PT-PA-(XK3+(XK4*LAMDA1)           ... 00002410
      +(XK5*LAMDA2)+XK6)*(ABS(X1PKT)*X1PKT)    ... 00002420
      -XK7+(CETA1+CETA2)*RHOA/2*ABS(W)*W)/XK8  00002430
      X1PKT = INTGRL (AX1PKT,X2PKT)               00002440
      X = INTGRL (AX,X1PKT)                       00002450
226 CONTINUE                                      00002460
      PLUFT = (CETA1+CETA2)*RHOA/2*ABS(W)*W     00002470
      PVERL = XK3*(ABS(X1PKT)*X1PKT)             00002480
      PREIB = (XK3+(XK4*LAMDA1)                   ... 00002490

```

```

      +(XK5*LAMDA2)+XK6)*(ABS(X1PKT)*X1PKT)
PTRAEQ = XK8*X2PKT
PSCHW = XK7
PANTR = (PT-PA)
PSUMM = PREIB+PTRAEQ+PSCHW+PLUFT-FANTR
IF (TIME.LT.1.0) GOTO 526
SPEZLV = VLUFT/TIME*3600
SPEZEV = WLUFT/TIME*3600
526 CONTINUE
IF (TIME.LE.SCHR1) GOTO 700
IF (TIME.GE.SCHR2) GOTO 700
IF (ABS(X1PKT).GE.0.01) GOTO 700
IF (X2PKT.GT.0.0) GOTO 703
OG = X
GOTO 704
703 UG = X
704 CONTINUE
IF (OG.EQ.0.0) GOTO 700
IF (UG.EQ.0.0) GOTO 700
HUB = (OG-UG)*A1/A2
DIFF = HUB-0.0150
IF (ABS(DIFF).LE.0.0005) GOTO 700
EB = 1.0
700 CONTINUE
SORT
METHOD RECT
*
*   TERMINAL
*
*   WRITE(10) D1,IMP,SPEZLV
*
*   WRITE(6,605) D1,IMP,SPEZLV,SPEZEV,HUB,OG,UG
605 FORMAT(' D1=',E14.4/' IMP=',E14.4/' SPEZLV=',E14.4/
$         ' SPEZEV=',E14.4/' HUB=',E14.4/' OG=',E14.4/
$         ' UG=',E14.4/)
*
*   IF (IMP.GE.0.5000) GOTO 701
*   IF (EB.EQ.0.0) GOTO 701
*
*   ITERATION DES PULSHUBES
*
*   IF (ABS(DIFF).GT.0.002) GOTO 720
*   IF (DIFF.GT.0.0) GOTO 706
IMP = IMP+0.0025
GOTO 707
706 IMP = IMP-0.0025
707 HV1 = 0.0
GOTO 730
720 HV2 = 0.0
IF (DIFF.GT.0.0) GOTO 711
IMP = IMP+0.025
GOTO 712
711 IMP = IMP-0.025
712 HV3 = 0.0
730 HV4 = 0.0
CALL RERUN
701 CONTINUE
*
*

```

TIMER DELT=0.001,FINTIM=20.0,OUTDEL=0.05,PRDEL=0.01
 FINISH EB=1.0
 PRTPLT X,X1PKT,X2PKT
 PRTPLT PREIB,PTRAEG,PSCHW
 END

00003090
 00003100
 00003110
 00003120
 00003130
 00003140
 00003150
 00003160
 00003170
 00003180

*
 * PARAMETER
 *
 END
 STOP

OUTPUT VARIABLE SEQUENCE

XPKMAX	AX1PKT	W	ALUFT	EB	SCHR1	SCHR2	IMP3	OG	UG
AWLUFT	PT	APT	WLUFT	RHOR	A	A4	A1	L1	L5
VNULL	A2	XK3	AX	X	XK4	XK5	XK6	XK7	N
Z	A3	XK8	XK9	XK10	XK16	FKT1	FKT2	FKT3	ZZ1000
APT	AX1PKT	AX	AWLUFT	XK4	XK15	XK6	CETA9	CETA9	XK3
XK7	XK8	RE1	RE2	LAMDA1	LAMDA2	LAMDA1	LAMDA2	LAMDA1	LAMDA2
PT	PT	ARGW	W	W	VPKTL	VLUFT	NLUFT	WLUFT	PTPKT
PT	PNULL1	VNULL1	PTPKT	PT	X2PKT	X1PKT	X	FVERL	PREIB
PTRAEG	PSCHW	PANTR	PLUFT	PSUMM	SPEZLV	SPEZEV	APT	AX1PKT	AX
XK4	XK15	XK6	CETA9	CETA9	XK3	XK7	XK8	RE1	RE2
LAMDA1	LAMDA2	LAMDA1	LAMDA2	LAMDA1	LAMDA2	PT	PT	RHOPT	ARGW
W	PTPKT	PT	X2PKT	X1PKT	X	PLUFT	W	X2PKT	X1PKT
X	PLUFT	PVERL	PREIB	PTRAEG	PSCHW	PANTR	PSUMM	SPEZLV	SPEZEV
OG	UG	HUB	DIFF	EB	ZZ1012	IMP	IMP	HV1	HV2
IMP	IMP	HV3	HV4						

\$\$\$ TRANSLATION TABLE CONTENTS \$\$\$

CURRENT

MAXIMUM

MACRO AND STATEMENT OUTPUTS	150	600
STATEMENT INPUT WORK AREA	377	1900
INTEGRATORS+MEMORY BLOCK OUTPUTS	11 + 0	300
PARAMETERS+FUNCTION GENERATORS	34 + 0	400
STORAGE VARIABLES+INTEGRATOR ARRAYS	0 + 0/2	50
HISTORY AND MEMORY BLOCK NAMES	21	50
MACRO DEFINITIONS AND NESTED MACROS	6	50
MACRO STATEMENT STORAGE	13	125
LITERAL CONSTANT STORAGE	0	100
SORT SECTIONS	1	20
MAXIMUM STATEMENTS IN SECTION	37	600

\$\$\$END OF TRANSLATOR OUTPUT\$\$\$