

KONTINUIERLICHE DRUCKBEHÄLTERFÖRDERUNG MIT AUTOMATISCHER REGELUNG

S. VÁRADI

Lehrstuhl für Wasserkraftmaschinen,
Technische Universität, H-1521 Budapest

Eingegangen am 25. August 1983
Vorgelegt von Prof. Dr. L. Pápai

Summary

The paper informs about the realization of pneumatic transport operating with pressure tanks and reports on the developed experimental research equipment. Besides various connection methods of the continuous transport there is also presented the conveying instrument equipped with pressure tank and provided with locks. When determining the optimal operational parameters the aim is to adjust the conditions which result in the possible greatest mixingrate and the lest energy consumption.

Wie es auch die internationale Fachliteratur zeigt, wird in der ganzen Welt die pneumatische Dichtstromförderung in wachsendem Maße eingesetzt, daher spielte in den letzten Jahren auch am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen der Technischen Universität Budapest die Forschungstätigkeit auf den Gebieten der Entwicklung pneumatischer Druckbehälterförderung und der Ermittlung der günstigen Betriebsparameter derselben eine bedeutende Rolle.

Der Druckbehälter wird je nach der Dosierung des Fördergutes in zwei verschiedenen Ausführungen verwendet. Die Lösung in Abb. 1.a ergibt ein kleineres Mischungsverhältnis bei größerer Bauhöhe. In der Ausführung in Abb. 1.b wird ein größeres Mischungsverhältnis erreicht, der Behälter läßt sich jedoch nicht vollständig entleeren [1].

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die günstigsten Betriebsparameter der pneumatischen Förderung einzustellen. Die Regelung der Fluidisierluft, die an die physikalischen Eigenschaften des in der Leitung (8) (s. Abb. 1.b) geförderten Fördergutes anzupassen ist, spielt eine wichtige Rolle, da die gewünschte Behälterentleerung durch den fluidisierten Zustand des Materials gewährleistet wird. Durch eine Änderung der über die Leitung (9) in das Förderrohr eingespeisten Zusatzluftmenge können das Mischungsverhältnis und darüber der im Förderrohr entstehende Druck geregelt werden. Durch die Regelung der durch Leitung (7) über dem Fördergut zugeführten Luftmenge wird der Behälterdruck geändert und dadurch können Entleerung des

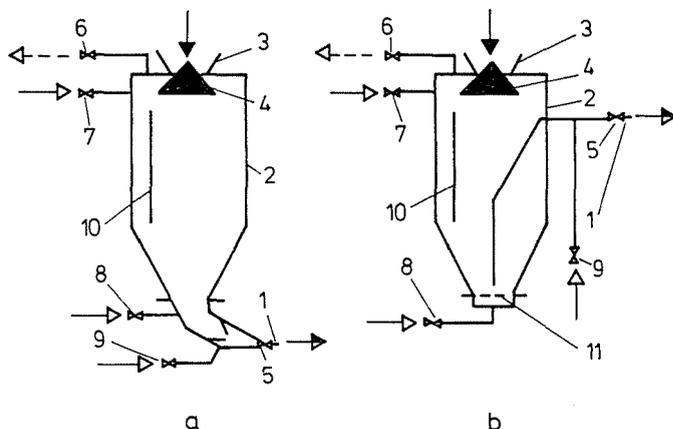


Abb. 1. Prinzipieller Aufbau des Druckbehälters

Behälters, Fördergutstart und Mischungsverhältnis beeinflusst werden. Über Leitung (6) wird der Druckbehälter entlüftet.

Durch periodischen Betrieb zweier Druckbehälter läßt sich eine kontinuierliche pneumatische Materialförderung realisieren.

In Abb. 2 ist die am Lehrstuhl entwickelte Versuchsförderanlage mit Druckbehälter schematisch dargestellt. Wie es die angegebenen Abmessungen (Länge etwa 45 m, Förderrohr-Innendurchmesser $D=27$ mm und 50 mm) zeigen, ist die Versuchsanlage wesentlich größer als bei Modellen üblich, darf also auch aufgrund der Ergebnisse von Förderversuchen (z. B. Fördergut-Massenströmen) als Anlage in halbtechnischem Maßstab gelten. In den Startbehälter kann eine Materialmenge von 150 bis 160 l eingefüllt werden, in Abhängigkeit von dem Ausdehnungsvermögen des fluidisierten Fördergutes, d. h. von dem Materialschichthöhenverhältnis h/h_0 — fluidisiertes Material zu Material in Ruhezustand — bei einem Gerätdurchmesser (Druckbehälter) $D_k = \text{konst.}$ Der Förderrohransatz (2) ist in der Nähe der Fluidisierschicht in den Startbehälter von oben eingeführt, der Einlaufquerschnitt des Rohres befindet sich über der Fluidisierschicht in einem Abstand etwa gleich dem Innendurchmesser des Rohres. Die Linienführung des Förderrohres ist so gestaltet, daß sich die eingebauten Bögen in vertikalen Ebenen befinden. Am Förderrohrende wird das Fördergut im Zyklon (3) abgeschieden. Bei periodischem Fördergut wird das Fördergut im Ausgleichbehälter auf der Waage (4) gesammelt, während bei Stetigförderung der Schleusbehälter (5) zu betätigen ist. Aus Umweltschutzrücksichten wurden in die Anlage eine Nachfiltereinrichtung (6) und ein Absauger (7) eingebaut. Am Förderrohranfang ist die Möglichkeit zur Zusatzluft einspeisung (8) gegeben.

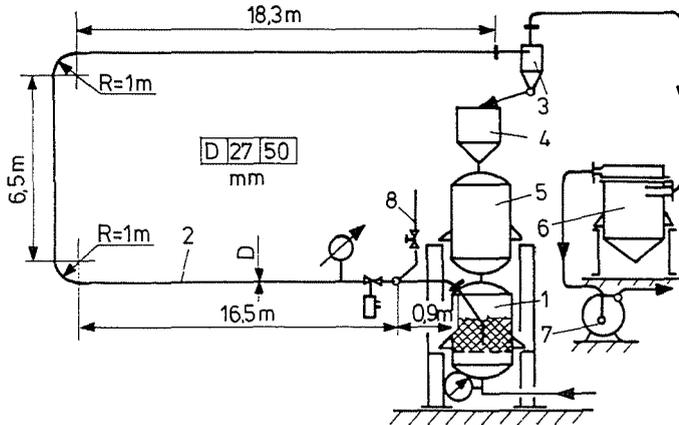


Abb. 2. Skizze der Meßeinrichtung

Um die günstigsten Förderparameter (Druck, Mischungsverhältnis, Energiebedarf, betriebssichere — verstopfungsfreie Förderung zu bestimmen, wurde folgendes Verfahren angewandt: Die dem Startbehälter oben (über das Rohr (A) in Abb. 3) entnommene und im Laufe der Messungen systematisch geänderte Luftmenge wird am Anfang des horizontalen Förderrohrabschnitts als Zusatzluft eingespeist und kann auch zur Förderung benutzt werden, nachdem das im Druckbehälter befindliche Fördergut mit Hilfe der Gesamtluftmenge bereits aufgelockert, fluidisiert wurde.

Nach dem aus der Fachliteratur [2] bekannten Verfahren zur Änderung des Mischungsverhältnisses wird die Zusatzluft von dem Kompressor bei Umgehen des Druckbehälters direkt zu dem Förderrohranfang geleitet. Dazu dient auch die Umgehungsleitung nach Abb. 3, mit dem Unterschied, daß hier die in das Förderrohr geleitete Zusatzluft auch die Fluidisierschicht im Startbehälter durchströmt und dadurch zu der Fluidisierung des Fördergutes im Behälter beiträgt. Durch diese Zusatzlufteinspeisung kann die Mischung im Förderrohr verdünnt werden.

Das Prinzipschema der Stetigförderung ist in Abb. 4 zu sehen.

Mit Hilfe von übereinander angeordneten zwei Druckbehältern und durch zyklische Wiederholung von vier Takten läßt sich erreichen, daß sich in der Förderleitung ein annähernd stationärer Materialfluß ausgestaltet.

Im ersten Takt — während aus dem unteren Behälter gefördert wird — herrscht im oberen atmosphärischer Druck, und dieser Behälter wird mit Fördergut beschickt. Im zweiten Takt wird der obere Behälter unter Druck gesetzt, um die beiden Behälter miteinander verbinden zu können. Nachdem

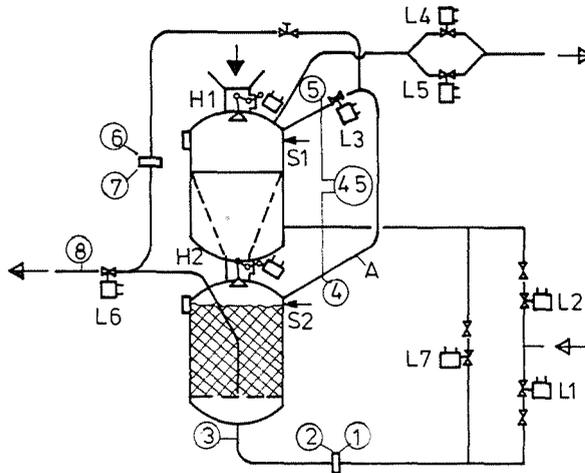


Abb. 3. Schaltschema des Startbehälters

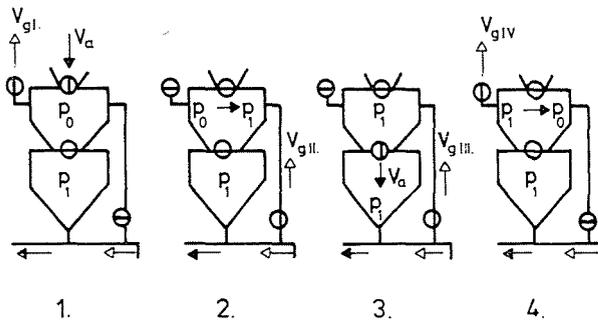


Abb. 4. Prinzipielles Schema der kontinuierlichen Förderung

die beiden Behälter unter gleichem Druck miteinander verbunden sind, wird im dritten Takt das Fördergut abgelassen, wonach der obere Behälter im vierten Takt wieder auf atmosphärischem Druck entspannt wird.

Das schematische Schaltbild, die Instrumentierung und das Steuerdiagramm der elektrischen Automatik des Abgangsabschnitts der Versuchsförderanlage mit Druckbehälter, die nach dem obenbeschriebenen Prinzip für Stetigförderung geeignet ausgestaltet wurde, sind in Abb. 5 dargestellt. In der Abbildung sind L1...L7 elektrisch gesteuerte, pneumatische Kneifventile, H1...H2 elektrisch gesteuerte, pneumatische Glockenventil, S1...S2 Standanzeiger, die Strahlenggeber mit Isotopen Co-60 und Fühler mit Geiger—Müller-Zählrohr enthalten.

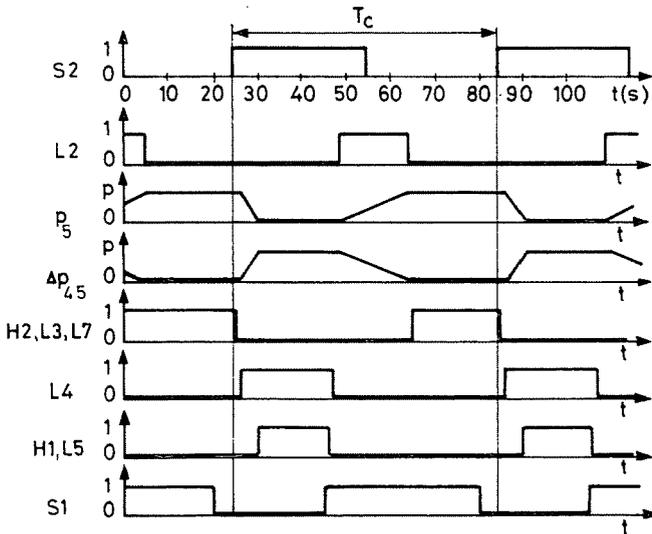
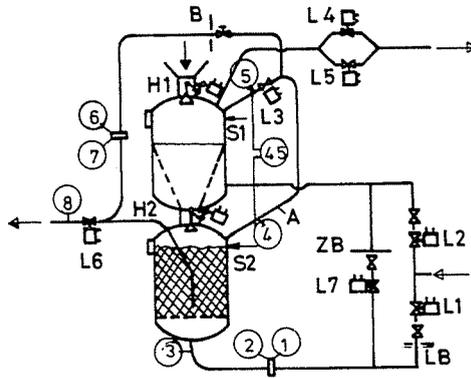


Abb. 5. Steuerungsschema

Im Steuerdiagramm sind die Ventile L1 und L6 nicht dargestellt, weil diese bei Stetigförderung offen sind.

Während der Förderung arbeitet die Steuerautomatik wie folgt:

Als Ausgangssituation wird die Vollanzeige von S2, d. h. der mit Fördergut gefüllte Zustand des Startbehälters betrachtet. Auf Wirkung dieses Signals werden die beiden Druckbehälter getrennt, die Ventile H2, L3, L7 werden also geschlossen. Durch den Endschalter des Glockenventils H2 in geschlossenem Zustand wird das Ventil L4 betätigt, über das die Atmosphäre

im Schleusenbehälter, der bis zu dieser Zeit unter Betriebsdruck war, entspannt wird. Der atmosphärische Druck $p_5 = p_0$ wird durch ein Kontaktmanometer erkannt, das das Befehlssignal zum Öffnen der Ventile H1 und L5 gibt. Damit beginnt die Beschickung des Schleusenbehälters, die bis zur Erkennung des Vollsignals S1 dauert. Durch dieses Signal werden die Ventile H1, L5 und L4 geschlossen. Nachdem diese geschlossen sind, wird das Ventil L2 durch den Endschalter des Glockenventils H1 geöffnet, und damit beginnt die Unterdrucksetzung des aufgefüllten Schleusenbehälters. Währenddem gibt der Standanzeiger S2 das Leersignal, weil sich der Inhalt des abgetrennten Startbehälters infolge der stetigen Förderung vermindert. Sind $S_2 = 0$ und $\Delta p_{4,5} = 0$ gleichzeitig erfüllt, können die beiden Behälter miteinander verbunden werden, die Ventile H2, L3 und L7 werden also geöffnet. Damit in dieser Phase das Fördergut aus dem Schleusenbehälter ausfließen könne, muß es in fluidisiertem Zustand sein, was durch die Änderung der Bohrungsgröße der Schleusenblende ZB im sich dem jeweiligen Betriebszustand anpassenden Zweig des Ventils L7 gewährleistet wird.

Um den gewünschten Förderzustand reproduzierbar einzustellen, wurden für die Luftmengeregelung die Plattenblende LB bzw. in der zur Regelung dienenden Umgangsleitung A die Blende B eingebaut.

Durch die Erkennung des Vollsignals von S2 nach Abfließen des Fördergutes ist man wieder bei der Ausgangssituation angelangt, daher wird im Steuerdiagramm die Zeit zwischen diesen beiden Signalen als Zykluszeit T_c bezeichnet.

Bei den Stetigförderungsmessungen wurde ein Förderrohr mit dem Innendurchmesser $D = 27$ mm, wie bei den früheren Messungen bei Flugaschenförderung, angewandt. In Abb. 6 ist der experimentell ermittelte Arbeitsbereich der Einrichtung, d. h. die Änderung des Fördergut-

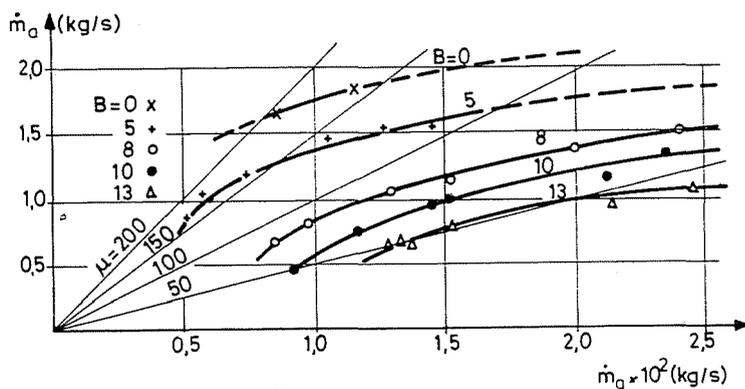


Abb. 6. Meßergebnisse

Massenstromes in Abhängigkeit von dem Förderluft-Massenstrom gezeigt. In der Abbildung sind je Parameter die verschiedenen Blendenmaßdaten B des für die Regelung eingebauten Nebenzweiges dargestellt, sowie die von dem Koordinatenanfangspunkt ausgehenden Geraden eingezeichnet, welche die Werte des für den Förderzustand kennzeichnenden Mischungsverhältnisses $\mu = \text{konst.}$ darstellen.

Eine notwendige Begleiterscheinung der Stetigförderung ist der Verlust der beim Auspuff des Schleusenbehälters entweichenden, für die Förderung nicht ausgenutzten Luftmenge. Auf die Berechnung des Verlustes wird weiter unten eingegangen.

Wir wählten das Rechenverfahren, weil während der Unterdrucksetzung des Schleusenbehälters (eine instationäre Erscheinung) die sich in der Zeit sehr rasch abspielt, die genaue Messung des Luftmassenstromes Schwierigkeiten bereitet hätte.

Der geometrische Aufbau des Schleusenbehälters ist in Abb. 7 dargestellt, wobei der gestrichelte Teil das mit Fördergut gefüllte Volumen bezeichnet. Damit das Fördergut sicher abfließe, wurde eine kegelförmige Lockerungsschicht aus Filz dem Spitzenwinkel von etwa 60° eingebaut.

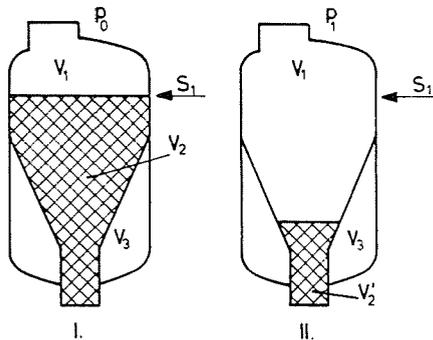


Abb. 7. Skizze des Schleusenbehälters

Der Schleusenbehälter wird bei atmosphärischem Druck p_0 mit Fördergut aufgefüllt. Das für das Fördergut zur Verfügung stehende Volumen wird durch die Geometrie der Einrichtung und die Anordnung des Standanzeigers S_1 bestimmt. Dieses Volumen ist in der Abbildung durch V_2 bezeichnet. Im Zustand I ist das Volumen der im Schleusenbehälter befindlichen Luft

$$V_1 = V_1 + V_2 \cdot \varepsilon + V_3$$

Dabei bedeuten ε den Porenanteil des Materials; definitionsgemäß erhält man

aus den Feststoffdichte ρ_a und der Schüttdichte ρ_h

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_h}{\rho_a}$$

Im Zustand II, also am Ende des Schleusungszyklus T_c , ist das Material im Volumenzustand V'_2 , daher ergibt sich das Volumen der Luft im unter Betriebsdruck p_1 abgetrennten Schleusenbehälter auf atmosphärischem Druck p_0 umgerechnet zu:

$$V_{II} = [V_1 + (V_2 - V'_2) + V'_2 \cdot \varepsilon + V_3] \cdot \frac{p_1}{p_0}$$

Mit Hilfe der Differenz der zu den beiden Zuständen gehörenden Luftvolumina und der atmosphärischen Luftdichte läßt sich die bei der Unterdrucksetzung des Schleusenbehälters und bei der Fluidisierung eingeführte Luftmasse, die gleich der während des Zyklus ausgepufften Luftmasse ist, berechnen:

$$m_{g0} = (V_{II} - V_1) \rho_0$$

Unter Berücksichtigung des Umstands, daß die Förderung annähernd stationär ist, kann geschrieben werden, daß

$$V_2 - V'_2 = \frac{\dot{m}_a \cdot T_c}{\rho_h}$$

Die während eines Schleusungszyklus ausgepuffte Luftmasse beträgt also

$$m_{g0} = \left[(V_1 + V_2 \cdot \varepsilon + V_3) \cdot \left(\frac{p_1}{p_0} - 1 \right) - \frac{\dot{m}_a \cdot T_c}{\rho_h} \cdot \frac{p_1}{p_0} (\varepsilon - 1) \right] \rho_0$$

d. h.

$$m_{g0} = C_1 - C_2 T_c$$

Dabei sind C_1 und C_2 von der Anlagengeometrie und den Förderguteigenschaften sowie von dem Betriebszustand des Fördergutes abhängige Konstanten.

Durch die Ergebnisse der Versuchsreihe läßt sich nachweisen, daß $p_1 > p_0$, $\varepsilon < 1$, folglich $C_1 > 0$ und $C_2 > 0$; daraus ergibt sich, daß während eines Schleusungszyklus die kleinste Auspuffluftmenge durch Einstellen der womöglich längsten Zykluszeit erzielt werden kann.

$$T_{c\max} = \frac{V_2 \cdot \rho_h}{\dot{m}_a}$$

Da bei der energetischen Analyse der Stetigförderung auch die Auspuffluftmenge zu berücksichtigen ist, ergibt sich der Leistungsbedarf der Förderung zu

$$P_{\text{pol}} = \frac{n}{n-1} \cdot p_0 \cdot \frac{\dot{m}_g + \dot{m}_{g0}}{\rho_0} \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Dabei bedeuten

- $n = 1,3$ den Exponenten der polytropen Zustandsänderung
 \dot{m}_g den Förderluft-Massenstrom
 \dot{m}_{g0} den Auspuffluft-Massenstrom bei der Schleusung.

Der Index 0 weist auf den atmosphärischen Zustand, der Index 1 auf den Behälterzustand hin.

Der spezifische Energiebedarf der Stetigförderung wird nach

$$e = \frac{P_{\text{pol}}}{\dot{m}_a \cdot L}$$

berechnet, wo L die Gesamtlänge des Förderrohres bedeutet.

Abb. 8 zeigt den bei der Versuchsreihe gemessenen, spezifischen Energiebedarf der stetigen Flugaschenförderung in Abhängigkeit von dem Mischungsverhältnis.

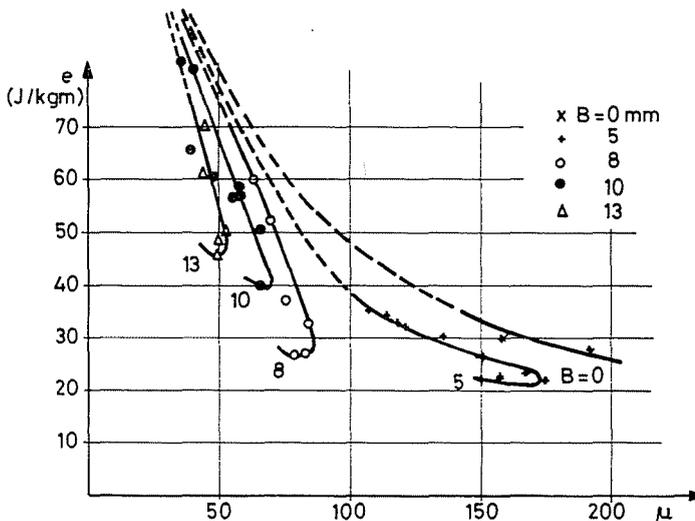


Abb. 8. Zusammenhang des spezifischen Energiebedarf und des Mischungsverhältnisses

Da die Wirkung der Schleusung für die Bestimmung sowohl des Luftverbrauchs als auch des Energiebedarfs von großer Bedeutung ist, wurde diese in Abb. 9 graphisch dargestellt, wo zu erkennen ist, daß der optimale Betriebszustand bei stetiger Förderung durch die Einregelung der an die Anlagengeometrie und an die Förderguteigenschaften angepaßten, maximal möglichen Zykluszeit $T_c = T_{c\max}$ realisiert werden kann. Ein in dieser Weise eingestellter, im Schleusungssystem arbeitender, pneumatischer Stetigförderer mit Druckbehälter ergibt den kleinstmöglichen Luftverbrauch und hat den kleinsten Energiebedarf.

Zu der obengenannten Zykluszeit gehört eine vollständige Entleerung des Schleusbehälters je Zyklus, was für die Steuerelektronik eine verschärfte Lage darstellt. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist die Einstellung eines Wertes $T_c = 0,8 T_{c\max}$ zu empfehlen, der $e/e_{\min} < 1,1$ ergibt, der Mehraufwand an Energie ist also nicht bedeutend.

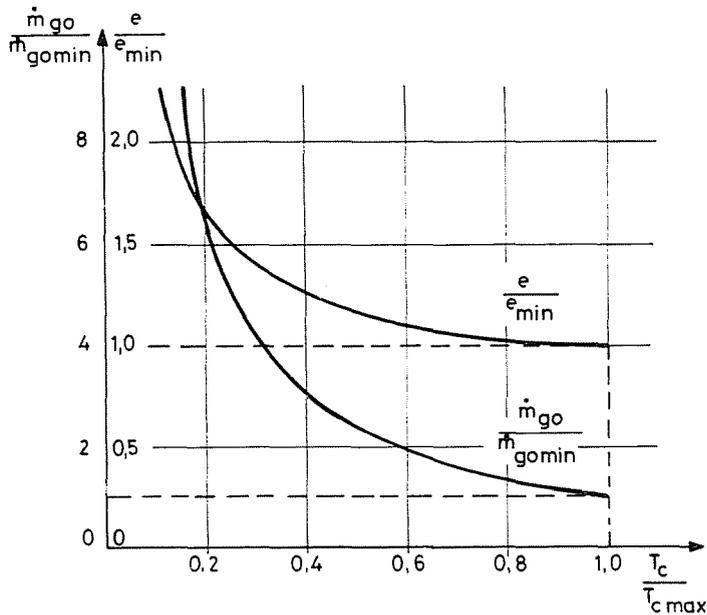


Abb. 9. Prüfung der Zykluszeit der Schleusung

Zusammenfassung

Die Arbeit darlegt die prinzipiellen Möglichkeiten der pneumatischen Druckbehälterförderung und die entwickelte Versuchs-Forschungs-einrichtung. Neben den verschiedenen Schaltvorgängen der Verwirklichung der kontinuierlichen Förderung wird — ausführlich behandelt — auch die mit Schleusensystem wirkende Druckbehälterfördereinrichtung vorgeführt. Im Laufe der Bestimmung der optimalen Betriebsparameter wird das Einregulieren des höchsten Mischverhältnisses bzw. der minimalen Energieverwendung zum Ziele gesetzt.

Literatur

1. KURTH, F.: Stetigförderer. Berlin, 1976. S. 290.
2. JOTAKI, T.—TOMITA, Y.: Characteristics of a blow tank solids conveyor and its operating points working on pipe lines. Pneumotransport 4, 1978. D4, S. 51—59.
3. VÁRADI, S.: Regelung einer pneumatischen Förderanlage mit Druckbehälter. Doktorarbeit (ungarisch), 1981.

Dr. Sándor VÁRADI H-1521 Budapest