

Tafel I. Technische Daten der Mineralstoffdosierer H 825 M und H 826 M

		H 825 M	H 826 M
Gesamtabmessungen			
Länge	mm	2000	
Breite	mm	750	
Höhe	mm	1630	
Behältervolumen			
max. Zuladung	kg	0,5	700
Masse	kg	245	365
Dosierschnecke			
Außendurchmesser	mm	67	
Wendelhöhe	mm	8	
Steigung	mm	40	
Drehzahl	U/min	19,3 ... 113,5	3,7 ... 26,1
Rührwelle			
Außendurchmesser	mm	160	
Drehzahl	U/min	16,4	
Stellgetriebemotor			
		ZG2-BKG 1-KMR 80 K4	ZG4-BKG3-KMR 100 S8
Anschlußwert gesamt			
	kW	1,5	

hängigkeit vom Futtermittel erreicht bzw. erweitert. Einflußgrößen auf den Massestrom sind Art, Korngrößenverteilung, Feuchtigkeitsgehalt und besonders die Schüttdichte der Futtermittel.

Vom Mineralstoffdosierer wird ein der Dosierschneckendrehzahl direkt proportionaler Massestrom erzeugt.

Entsprechend den Fütterungshinweisen nach [5] und der vorhandenen Fütterungseinrichtung kann der Anwender aus dem Nogramm (Bild 3) die erforderliche Schneckendrehzahl zur Rationsgestaltung ermitteln. Das eingetragene Anwendungsbeispiel verdeutlicht, daß bei der geforderten Rationsgröße einer Mineralstoffmischung ($\rho = 1,5 \text{ kg/dm}^3$) von $120 \text{ g/Tier} \cdot \text{d}$ und bei Nutzung des Krippenauszugsbandes T906 als Fütterungseinrichtung eine Schneckendrehzahl von 30 U/min am Mineralstoffdosierer einzustellen ist. Der Dosierprozeß ist stationär, d. h. die Dosiermenge ist unabhängig vom Füllstand im Vorratsbehälter. Dieses positive Verhalten konnte bei der Dosierung von Mineralstoffmischungen nur durch eine aktive Zerstörung der Brückenbildung mit Hilfe der mit konstanter Drehzahl betriebenen Rührwelle erreicht werden. Den entscheidenden Einfluß auf die Wirksamkeit des Einsatzes der Rührwelle stellt die

Größe des Abstands der Rührwellenmitnehmerleisten zu den Wänden des Vorratsbehälters dar. Brückenbildungsansätze werden nur bei minimalem Abstand unterbunden.

Der Variationskoeffizient ist als Kriterium der Dosiergleichmäßigkeit entsprechend Gl. (5) abhängig von der Auffangzeit und der Drehzahl der Dosierschnecke. Die Verwendung einer Bezugsauffangzeit von 10 s gestattet die Darstellung in Abhängigkeit von der Drehzahl und damit vom erzeugten Massestrom (Bild 4). Eine der Wendelneigung entgegengesetzte schräge Abwurfkante vergleichmäßig den Massestrom besonders im Drehzahlbereich von 6 bis 20 U/min . Die ATF bezüglich der Dosiergleichmäßigkeit werden jedoch auch von einer geraden Abwurfkante erfüllt.

Der Vergleich der Kurve mit dem theoretischen Verlauf entsprechend Bild 1 zeigt, daß die zu erwartenden Minima der Kurve bei 6 U/min und ganzzahligen Vielfachen davon durch stochastische Einflüsse und den Meßfehler der Bandwaage verdeckt werden.

Dabei stellte sich heraus, daß der so ermittelte Variationskoeffizient 1 bis 2% höher liegt als bei der Probenahme von Hand und anschließendem Auswiegen der Nettomasse mit einer Laborwaage.

Während der staatlichen Eignungsprüfung konnten die positiven Laborergebnisse unter Praxisbedingungen in einer Milchviehanlage mit 1930 Tierplätzen und in einer Jungrinderanlage mit 4480 Tierplätzen nachgewiesen werden.

Dabei zeigte sich, daß besonders der untere bis mittlere Massestrombereich zur Anwendung gelangt. Wichtig für die Erhaltung der Einsatzsicherheit ist die Verwendung von trocken gelagerten Futtermitteln. Feuchtes Gut führt zu Ablagerungen und Verkrustung im Dosierer, wodurch ein erhöhter Reinigungsaufwand entsteht.

Arbeiterschwernisse für die Bedienperson treten bei der Beschickung von Hand durch das Überschreiten der zulässigen Staubkonzentration (TGL 32601/1) und die Oberflurauflistung durch das Heben der in 25 - bzw. 50 -kg-Säcken abgepackten Futtermittel auf.

Die weitere Entwicklungsarbeit wird sich auf die Verminderung der Arbeiterschwernisse, die Verbesserung des Korrosionsschutzes und die Vereinheitlichung des Dosierschneckenantriebs konzentrieren.

Im VEB LIA Havelberg wurde die Serienproduktion des Mineralstoffdosierers H 825 M/H 826 M im vierten Quartal 1979 aufgenommen.

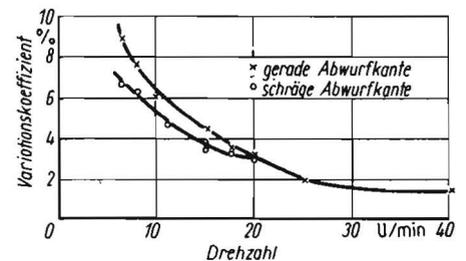


Bild 4. Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Dosierschneckendrehzahl bei einer Mineralstoffmischung mit 127 g Phosphor

5. Zusammenfassung

Im Beitrag wird eine technische Lösung für das Dosieren von Mineral- und Wirkstoffmischungen in Rinderproduktionsanlagen dargestellt. Zur Untersuchung verschiedener Parameter der Arbeitsqualität kommt eine Einrollenbandwaage unter Laborbedingungen zur Anwendung. Diese Ergebnisse dienen zur Auswahl der Konstruktionsparameter der Dosierschnecke.

Eine Beschreibung und technische Daten charakterisieren die entwickelte Dosiereinrichtung.

Für den Anwender werden Hinweise zum Einsatz des Mineralstoffdosierers vermittelt. Erkenntnisse aus Untersuchungen unter Labor- und Praxisbedingungen kennzeichnen den erreichten technischen Stand. Mit dem Mineralstoffdosierer H 825 M/H 826 M wird eine Mechanisierungslücke im Maschinensystem der Rinderproduktion geschlossen.

Literatur

- [1] Teltscher, U.: Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Prüfung des regelbaren Aufgabegerätes MAR-1. TU Dresden. Praktikumsarbeit 1974 (unveröffentlicht).
- [2] Matiaske, W.: Regelbares Aufgabegerät Typ MAR-1. Zentrale Prüfstelle für Landtechnik Potsdam-Bornim, Prüfbericht 1974 (unveröffentlicht).
- [3] Agrotechnische Forderungen an eine Dosiereinrichtung für Mineral- und Wirkstoffe. Forschungszentrum für Mechanisierung Schlieben/Bornim 1976 (unveröffentlicht).
- [4] Michaelis, G.: Grundlagen zum Dosieren von Futterkomponenten und Gemischen. Forschungszentrum für Mechanisierung Schlieben/Bornim, Forschungsbericht 1977 (unveröffentlicht).
- [5] Röhnisch, H.-G.; Knappe, G.: Qualitätsanforderungen für industrielle Mischfuttermittel, Wirk- und Mineralstoffmischungen und wissenschaftliche Empfehlungen für den Einsatz in der sozialistischen Landwirtschaft der DDR. Markkleeberg: agr-Buch 1975. A 2675

Grundlagen zur geometrischen Anordnung starrer Einbauten in Schüttgutbehältern

Dipl.-Ing. V. Scholz, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/ Bornim der AdL der DDR

Verwendete Formelzeichen

A	m^2	Fläche
Fr	—	Froude-Zahl
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h	m	Höhe
i	—	Faktor nach Jenike
k	—	Konstante
l	m	Länge
m	kg/s	Massestrom

r	m	Radius
\dot{v}	m/s	mittlere Geschwindigkeit
w	m	Wandabstand, Freispaltbreite
α	$^\circ$	Winkel zur Horizontalen
Θ	$^\circ$	Winkel zur Vertikalen
σ	Pa	Spannung
ρ	kg/dm^3	Dichte
φ	$^\circ$	Reibungswinkel

Indizes

A	Auslauföffnung
E	Einbau
e	effektiver Wert
0	Nullniveau
W	Behälterwand
w	Freispalt
T	Trichter

1. Problemstellung

Starre Einbauten, die koaxial im Auslaufbereich von Schüttgutbehältern angeordnet werden, verursachen definierte Änderungen der Spannungs- und Geschwindigkeitsfelder. Die hieraus resultierenden Effekte sind technisch begrenzt nutzbar, zum Beispiel zur Erzielung masseflußähnlicher Bedingungen, zur Regulierung des Auslaufmassesstromes, zur Druckentlastung der Austragorgane oder zur Reduzierung der Brückenbildung.

Aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und sonstigen Vorteile werden starre Einbauten relativ häufig in Silos und Bunkern als Austraghilfen mit unterschiedlicher Zielstellung eingesetzt. Doch nicht in jedem Fall wird ein Erfolg verzeichnet, da die Form, die Größe und Lage der Einbauten oft empirisch festgelegt werden oder deren fließverbessernde Wirkung überschätzt wird.

Im vorliegenden Beitrag werden in Abhängigkeit von dem jeweiligen Effekt Grundlagen zur geometrischen Anordnung konischer Einbauten in Behälteraufgängen dargestellt und hieraus entsprechende Schlußfolgerungen und Grenzen für den Einsatz von starren Einbauten abgeleitet.

2. Einfluß starrer Einbauten auf das Fließprofil

Ein Körper, der innerhalb des Behälters im Bereich der Fließzone angeordnet wird, bewirkt eine Änderung des Fließprofils. Bei einer bestimmten Größe und Lage des Körpers kann eine ursprünglich in der Breite begrenzte Fließzone bis an die Behälterwand ausgeweitet werden.

Ausgehend von dieser Überlegung entwickelten sowohl Kvapil [1] als auch Johanson [2] theoretische Grundlagen zur Dimensionierung von Einbauten hinsichtlich der Erzielung masseflußähnlicher Bedingungen in Kernflußsilos. Kvapil [1] beschränkt sich dabei auf eine über der Auslauföffnung eines Flachbodenbehälters angeordnete Platte, für deren maximal zulässigen und minimal erforderlichen Radius r_E er folgende Berechnungsformel angibt:

$$h_E \tan \frac{90^\circ - \alpha}{2} + r_A \leq r_E$$

$$\leq \frac{h_E}{\tan \alpha} - r_A \quad (2.1)$$

Wird der natürliche Böschungswinkel α dem Trichterneigungswinkel $(90^\circ - \Theta_T)$ gleichgesetzt und Gleichung (2.1) entsprechend umgeformt, kann der Wandabstand w des Einbaus in Abhängigkeit von Einbauradius r_E , Auslauföffnungsradius r_A und Trichterinnenwinkel $2\Theta_T$ dargestellt werden:

$$2 \leq \frac{w}{r_A}$$

$$\leq \left(\frac{r_E}{r_A} - 1 \right) \left[\frac{\tan \Theta_T}{\tan(\Theta_T/2)} - 1 \right] \quad (2.2)$$

Johanson [2] bestimmt in gut fundierten theoretischen Analysen das Spannungsfeld im Trichter, das ein konischer Einbau beeinflussen kann, und erhält einen kritischen Wandabstand w_{krit} , bei dem die größte Verbreiterung der Fließzone und damit maximales Fließvolumen erreicht werden. Er gibt keine analytische Lösung an, sondern stellt das kritische Verhältnis von Wandabstand zu Einbauradius $(w/r_E)_{krit}$ grafisch dar, und zwar in Abhängigkeit von Trichterwinkel Θ_T , effektivem Reibungswinkel φ_e und Wandreibungswinkel φ_w . Durch Mo-

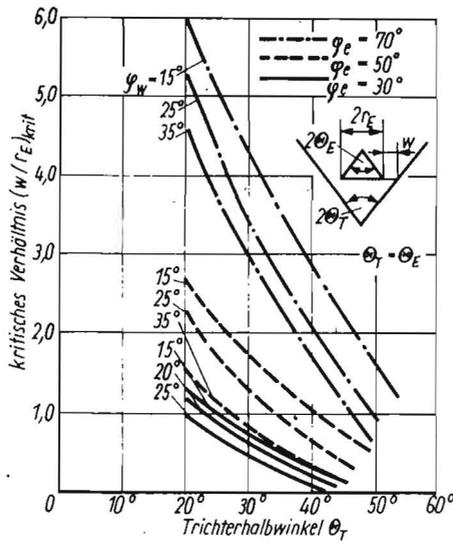


Bild 1. Kritisches Verhältnis von Wandabstand zu Einbauradius für maximales Fließvolumen nach Johanson [2]

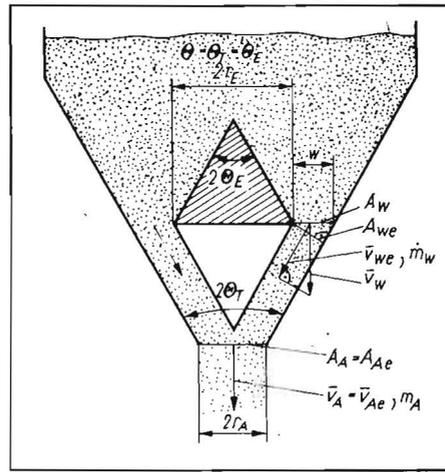


Bild 2. Modell zur Dimensionierung konischer Einbauten auf Basis des Auslaufmassesstromes

dellversuche konnte Johanson eine gute Übereinstimmung von theoretischen und experimentellen Ergebnissen nachweisen (Bild 1).

Eine Verbreiterung der aktiven Fließzone bzw. die Vergrößerung des Fließvolumens werden im praktischen Betrieb beispielsweise dann gefordert, wenn infolge von Kernfluß das Gut zu stark entmischt aus dem Silo ausgetragen wird. Kernfluß, bei dem das Gut nur im Silozentrum fließt, fördert die Entmischung des Gutes beim Austrag, denn bei zentrischer Befüllung sammelt sich aufgrund unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften der Kornfraktionen das Feinkorn im Innern des Silos an, während sich das Grobkorn an der Peripherie ablagert. Beim Vorliegen von Kernfluß überwiegen demzufolge zu Beginn der Entnahme die feinkörnigen und gegen Ende die grobkörnigen Bestandteile des Gemisches. Massefluß, bei dem das Gut im gesamten Siloquerschnitt fließt, bewirkt dagegen, daß sich die Kornfraktionen im Auslaufbereich etwa wieder im gleichen Verhältnis mischen, so daß während des gesamten Entnahmeprozesses ein homogenes Gut ausfließt. Masseflußähnliche Bedingungen können durch Einsatz optimal dimensionierter Einbauten geschaffen werden.

3. Einfluß starrer Einbauten auf die Fließgeschwindigkeit

Ein konischer Einbau, der im Auslaufbereich des Behälters angeordnet ist, bildet im ebenen Fall (langer keilförmiger Trichter) zwei geradlinige Freispalte und im radialsymmetrischen Fall (kegelförmiger Trichter) einen ringförmigen Freispalt zwischen Einbau und Trichterwand oder natürlicher Gutböschung. Beim Fließen stellt der Freispalt eine Quelle und die Auslauföffnung eine negative Quelle bzw. Senke dar. Das Flächenverhältnis von Quelle und Senke bestimmt die Auslaufgeschwindigkeit und den Auslaufmassesstrom des Gutes. Ist die Spaltbreite, die dem Wandabstand w entspricht, im Verhältnis zum Auslaufradius r_A zu klein, wird der Auslaufmassesstrom \dot{m}_A durch die Quellstärke des Freispaltes bestimmt und im anderen Fall durch die negative Quellstärke der Auslauföffnung. Der Übergangszustand, bei dem die positive Quellstärke \dot{m}_w gleich der negativen Quellstärke \dot{m}_A ist, wird hinsichtlich des Auslaufmassesstromes als optimal definiert und das zugehörige Verhältnis von Wandabstand w und Auslaufradius r_A mit $(w/r_A)_{opt}$ bezeichnet. Unter der Annahme, daß die Guteigenschaften keinen Einfluß haben, kann dieses Verhältnis theoretisch bestimmt werden (Bild 2).

Für Einbauten, deren Spitzenwinkel $2\Theta_E$ gleich dem Trichterwinkel $2\Theta_T$ ist, liegen im Freispalt und in der Auslauföffnung prinzipiell die gleichen Fließverhältnisse vor, wobei die effektive Fläche A_{we} und die effektive mittlere Strömungsgeschwindigkeit \bar{v}_{we} im Freispalt von dem Winkel $\Theta = \Theta_E = \Theta_T$ abhängig sind. Bei gleichen Masseströmen durch Freispalt und Auslauföffnung $\dot{m}_w = \dot{m}_A$ gilt mit $\dot{m} = \rho A v$ folgende Beziehung:

$$\frac{A_{we}}{A_{Ae}} = \frac{\bar{v}_{Ae}}{\bar{v}_{we}} \quad (3.1)$$

Für den ebenen Fließzustand gelten folgende Verhältnisse der effektiven Flächen und Strömungsgeschwindigkeiten:

$$\frac{A_{we}}{A_{Ae}} = \frac{2w / \cos \theta}{2r_A / r_A} = \frac{w}{r_A} = \cos \theta \quad (3.2)$$

$$\frac{\bar{v}_{Ae}}{\bar{v}_{we}} = \frac{\bar{v}_A}{\bar{v}_A \cos \theta} = \cos^{-1} \theta \quad (3.3)$$

Mit Gl. (3.1) ergibt sich demzufolge für den ebenen Fließzustand das optimale Verhältnis $(w/r_A)_{opt}$:

$$(w/r_A)_{opt} = \cos^{-2} \theta \quad (3.4)$$

Für den radialsymmetrischen Fließzustand gilt folgendes Verhältnis der effektiven Flächen:

$$\frac{A_{wr}}{A_{Ae}} = \frac{\pi w \cos \theta (2r_E + \cos \theta)}{\pi r_A^2}$$

$$= \frac{w^2}{r_A^2} \cos \theta \left(2 \frac{r_E}{w} + \cos^2 \theta \right) \quad (3.5)$$

Bei der Bestimmung des Verhältnisses der effektiven Strömungsgeschwindigkeiten muß berücksichtigt werden, daß hier $\bar{v}_w \neq \bar{v}_A$ gilt, da im Freispalt ein annähernd ebener Fließzustand vorliegt, während in der Auslauföffnung radialsymmetrische Verhältnisse vorherrschen. Experimentell kann nachgewiesen werden, daß für beide Fließzustände die Froude-Zahl Fr in Abhängigkeit von der Breite der Auslauföffnung konstant ist [3, 4]. Damit ergibt sich ein mathematisch formulierbarer Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten:

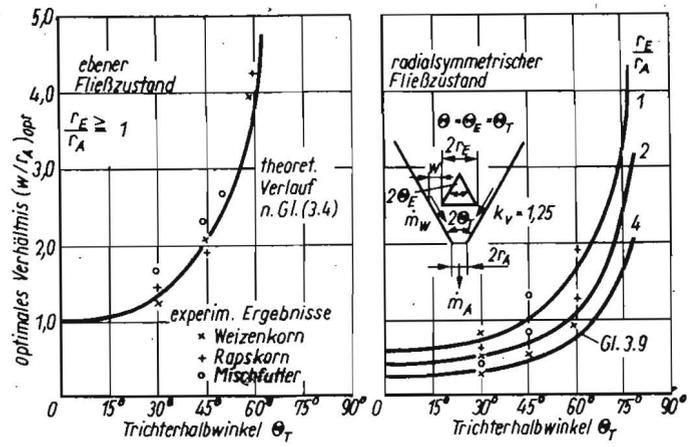
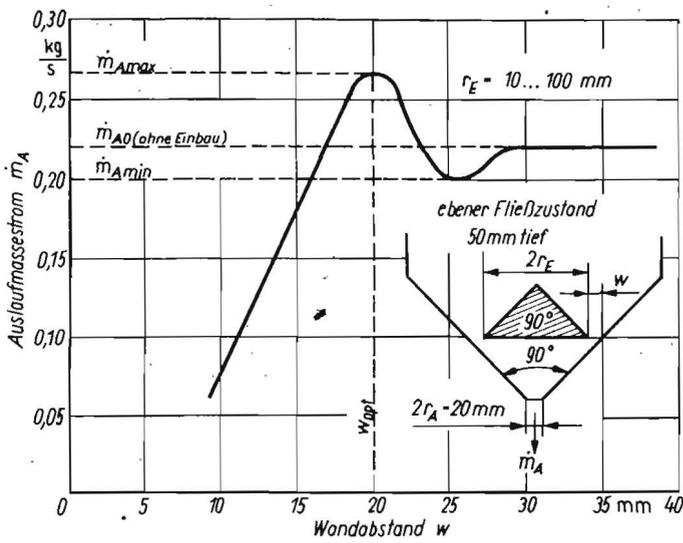


Bild 4. Optimales Verhältnis von Wandabstand zu Auslaufradius für maximalen Auslaufmassstrom

Bild 3. Auslaufmassstrom von Weizen in Abhängigkeit vom Wandabstand eines konischen Einbaus

$$F_r = \frac{\bar{v}_w}{\sqrt{g w}} = k_v \frac{\bar{v}_A}{\sqrt{2g r_A}} = \text{const.} \quad (3.6)$$

Hieraus kann das Verhältnis der effektiven Strömungsgeschwindigkeiten abgeleitet werden:

$$\frac{\bar{v}_{Ac}}{\bar{v}_{Ac}} = \frac{\sqrt{2}}{k_v} \sqrt{\frac{r_A}{w}} \cos \theta \quad (3.7)$$

Ergebnisse von Auslaufversuchen mit mehreren Schüttgütern zeigen, daß die Konstante k_v , die das Verhältnis der Froude-Zahlen vom ebenen und radialsymmetrischen Fließzustand angibt, weitestgehend unabhängig von den Guteigenschaften ist. Sie beträgt für geometrisch eindeutige Fließzustände $k_v \approx \sqrt{2}$. Da beim Fließen durch einen ringförmigen Freispalt jedoch kein eindeutig ebener Zustand vorliegt, wird die Konstante k_v in Abhängigkeit vom Einbauradius r_E einen geringeren Wert aufweisen:

$$1 \leq k_v \leq \sqrt{2} \text{ für } 0 \leq r_E \leq \infty. \quad (3.8)$$

Die Zusammenfassung und entsprechende Umformung der Gln. (3.1), (3.5) und (3.7) ergibt das optimale Verhältnis $(w/r_A)_{opt}$ für den radialsymmetrischen Fließzustand in folgendem impliziten Ausdruck:

$$0 = \left(\frac{w}{r_A}\right)_{opt}^5 \cos^6 \theta + 4 \left(\frac{w}{r_A}\right)_{opt}^4 \left(\frac{r_E}{r_A}\right) \cos^4 \theta + 4 \left(\frac{w}{r_A}\right)_{opt}^3 \left(\frac{r_E}{r_A}\right)^2 \cos^2 \theta - \frac{2}{k_v^2} \cos^{-2} \theta \quad (3.9)$$

Bei Einhaltung des optimalen Verhältnisses $(w/r_A)_{opt}$ erreicht der Auslaufmassstrom sowohl beim ebenen als auch beim radialsymmetrischen Fließzustand ein Maximum \dot{m}_{Amax} , das deutlich über dem Auslaufmassstrom ohne Einbau \dot{m}_{A0} liegt. Positive und negative Quellstärke von Freispalt und Auslauföffnung sind hier gleich und weisen ihre höchsten erreichbaren Werte auf ($\dot{m}_A = \dot{m}_w = \max.$). Mit größer werdendem Wandabstand w durchläuft der Auslaufmassstrom im Normalfall ein Minimum und bleibt anschließend konstant (Bild 3).

Eine Erklärung für das Auftreten dieser Extrema kann auf der Basis der Theorie des dynamischen Gewölbes nach Platanov gegeben werden [5]. Diese Theorie besagt, daß sich beim Ausfließen von Schüttgut über der Auslauföffnung des Behälters ein sog. dynamisches Gewölbe bildet, das die darüberliegende Last trägt und durch das die Gutteilchen hindurchtreten, um anschließend im freien Fall die Auslauföffnung zu passieren. Im Bereich $0 < \dot{m}_A < \dot{m}_{Amax}$ ist im Auslauf nicht genügend Gut vorhanden, um ein solches Gewölbe aufzubauen.

Die aus dem Freispalt fließenden Teilströme \dot{m}_w weisen einen erhöhten Impuls auf, da sie unterhalb des Einbaus ungehindert und infolge der Schwerkraft beschleunigt fließen. Infolgedessen erreicht der Massestrom durch die Auslauföffnung den Maximalwert \dot{m}_{Amax} . Wird durch Vergrößerung des Wandabstands w der Auslauföffnung mehr Gut zugeführt, beginnt sich ein dynamisches Gewölbe aufzubauen, das den Impuls der Teilströme und somit auch den Auslaufmassstrom verringert. Das Minimum \dot{m}_{Amin} wird durch die horizontale Komponente des Impulses verursacht, die in dem sich aufbauenden Gewölbe die Bewegung der Teilchen behindert.

Bei ausreichend gefülltem Auslaufrichter bildet sich ein vollständiges dynamisches Gewölbe aus, das den Auslaufvorgang stabilisiert. Der Auslaufmassstrom ist in diesem Bereich vom Wandabstand des Einbaus unabhängig. Experimentelle Untersuchungen mit mehreren landwirtschaftlichen Schüttgütern bestätigen den in den Gln. (3.4) und (3.9) angegebenen funktionellen Zusammenhang zwischen dem optimalen Verhältnis $(w/r_A)_{opt}$ und dem Trichterwinkel $2\theta_T$ sowie dem Verhältnis von Einbau- zu Auslaufradius r_E/r_A . Das Verhältnis $(w/r_A)_{opt}$, bei dem der Auslaufmassstrom sein Maximum erreicht, steigt progressiv mit wachsendem Trichterwinkel. Beim ebenen Fließzustand ist es im Bereich $1 \leq r_E/r_A \leq 8$ von der Breite des Einbaus unabhängig, beim radialsymmetrischen Zustand verringert es sich mit zunehmendem Einbauradius (Bild 4).

4. Einfluß starrer Einbauten auf den Spannungszustand

Der Spannungszustand im Trichterbereich hat unmittelbaren Einfluß auf die Ausbildung stabiler Gutbrücken.

Gelingt es, einen coaxialen Einbau so anzuordnen, daß sich die darunter befindliche spannungsverminderte Zone bis in den Bereich der Auslauföffnung erstreckt, können die Verfesti-

gungsspannung σ_A und damit die Häufigkeit der Brückenbildung verringert werden. Der zugehörige Wandabstand w_{max} des Einbaus, bis zu dem eine spannungsvermindernde Wirkung im Auslaufquerschnitt erzielt wird, läßt sich näherungsweise unter Einbeziehung vorhandener Theorien und bestimmter Vereinfachungen rechnerisch bestimmen.

Innerhalb eines in einem Trichter gelagerten Schüttgutes haben die Spannungen die Tendenz, zur Spitze des Trichters hin auf Null abzunehmen [6, 7]. Dabei ist es gleichgültig, ob eine Hauptspannung oder eine beliebig anders orientierte Spannung betrachtet werden. In einem Trichter mit Auflast erfolgt beginnend von der Auflastspannung σ_0 ein stetiger Spannungsabfall (Bild 5a). In einem Trichter ohne Auflast erhöhen sich die Spannungen von der Schüttgutoberfläche bis zu einer bestimmten Tiefe und verringern sich anschließend wieder auf Null. Jenike und Johanson [7] geben einen experimentell bestätigten dreieckförmigen Spannungsverlauf an, dessen Maximalspannung σ_i in der Höhe $i \cdot h_{max}$ auftritt.

Ein solcher dreieckförmiger Spannungsverlauf liegt unterhalb eines mit der Trichterwand abschließenden konischen Einbaus vor (Bild 5b). Durch Kürzung des Einbaus und Vergrößerung des Freispaltes wird sich infolge der zunehmenden Auflast die Maximalspannung σ_i erhöhen. Der maximal zulässige Wandabstand w_{max} , bis zu dem eine Verringerung der Spannung im Auslaufquerschnitt möglich ist, wird erreicht, wenn die Spannung σ_i gleich der ursprünglichen Spannung σ_A im Auslaufquerschnitt ist (Bild 5c).

Dabei muß vereinfachend angenommen werden, daß unterhalb des Einbaus der Spannungszuwachs für alle Wandabstände $w = 0$ und $w > 0$ gleich ist. Im Bereich des Einbaus $h_{OE} \leq h \leq 2h_{OE}$ wird im ebenen Fall für gleiche Winkel $\theta_E = \theta_T$ die Spannung linear von Null bis auf den ursprünglichen Wert (ohne Einbau) anwachsen (Bild 5d).

Bei Unterstellung eines solchen Spannungszustands lassen sich in Abhängigkeit von der Höhe folgende geometrische Proportionen bilden:

$$\frac{h_A}{\sigma_A} = \frac{2 h_{OE}}{\sigma_{OE}} \quad (4.1)$$

$$\frac{i h_{OE}}{\sigma_i} = \frac{2 h_{OE}}{\sigma_{OE}} \quad (4.2)$$

$$\frac{h_w - h_{OE}}{\sigma_w} = \frac{h_{OE}}{\sigma_{OE}} \quad (4.3)$$

