

Grundsätze der Dimensionierung von Mischfuttersilos

Dr. sc. techn. C. Füll, KDT/Dr.-Ing. V. Scholz/Dipl.-Ing. M. Swierkowski

Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben der AdL der DDR

1. Problemstellung

Mischfuttersilos haben in Tierproduktionsanlagen die Funktion von Zwischenlagerbehältern. Ihre Hauptaufgabe besteht im Ausgleich der Masseströme von diskontinuierlicher Anlieferung der Futtermittel aus den Kraftfuttermischwerken und quasikontinuierlicher Abgabe bei der Fütterung der Tiere. Sie sind Anfangsglieder von mechanisierten und automatisierten Fütterungssystemen und müssen deshalb hohe Verfügbarkeitswerte von $> 0,98$ erfüllen. Weitere Forderungen an funktionelle Parameter von besonderer Wichtigkeit sind:

– Das Verhältnis der Variationskoeffizienten der Schüttdichten beim Füllen v_f und Entnehmen v_e soll $v_e/v_f \leq 1,1$ sein.

Der Variationskoeffizient bei der Entnahme sollte hierbei den Wert $v_e = 5,5\%$ nicht überschreiten.

– Die zulässigen Futterverluste beim Füllen sollen $\leq 0,02\%$ betragen.

Der Stahlverbrauch sollte für 25-m³-Behälter aus Gründen der Materialökonomie 40 kg/m³ nicht überschreiten. Alle Aufwendungen für Instandhaltung, Instandsetzung und Reinigung müssen minimiert werden.

2. Konstruktive Grundsätze

2.1. Behältergeometrie

Die Entnahme des Mischfutters soll in der überwiegenden Anzahl der Anwendungsfälle im Massenfluß verlaufen. Durch die Bewegung des gesamten Gutes vom Beginn der Entnahme an wird eine teilweise Rückmischung der beim Befüllen eingetretenen und nie vollständig zu verhindernden Entmischung erzielt. Weiterhin tritt durch das ständige Herabgleiten des Gutes an der Behälterinnenwand ein Selbstreinigungseffekt ein. Durch Kondenswasserbildung angefeuchtetes Gut kann sich auf diese Weise nicht in dem Maß an der Behälterinnenwand festsetzen, wie es bei Kernflußbehältern der Fall ist. Massenflußbehälter haben auch günstigere Bedingungen für minimale Entnahmequerschnitte bei gleichzeitigem Verhindern der Brückenbildung.

Die Trichterneigung beeinflusst vor allem den Fließzustand bei der Entnahme. Bei Kernflußbehältern muß der Trichterneigungswinkel garantieren, daß das Gut vollständig ausfließt. Um dies sicher zu erreichen, erfolgt die Festlegung des Trichterneigungswinkels θ nicht in Abhängigkeit vom Wandreibungswinkel φ_x , sondern vom Böschungswinkel α :

$$\theta = 90^\circ - (\alpha + 15^\circ). \quad (1)$$

Bei Massenflußsilos muß die Behälterwandung innerhalb der natürlichen Fließgrenzlinien liegen, die sich über einer Entnahmeöffnung ausbilden. Nach Untersuchungen von Jenike ist der erforderliche Trichterneigungswinkel θ zur Vertikalen abhängig vom Wandreibungswinkel φ_x und vom effektiven Reibungswinkel φ_e , der ein Maß für die innere Reibung des Gutes ist [1].

Der Wandreibungswinkel φ_x ist abhängig von der Rauhtiefe der Wandoberfläche, von

den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wandmaterials oder des Anstrichs und von der Futterart. Für Mischfuttermittel mit einem Trockensubstanzgehalt $TS \geq 87\%$ und Stahloberflächen mit Wandrauigkeiten $\leq 25 \mu\text{m}$ betragen die Wandreibungswinkel i. allg. $\varphi_x = 20^\circ \dots 25^\circ$ [2]. Daraus ergeben sich notwendige Trichterneigungswinkel $\theta \geq 70^\circ$. Massenflußsilos mit diesen Trichterneigungswinkeln haben gegenüber Kernflußsilos ein größeres Höhe-Durchmesser-Verhältnis. Aus materialökonomischen und fließtechnischen Gründen hat sich ein Verhältnis von 4 bis 5 bewährt.

Die Größe des Entnahmequerschnitts muß aus Gründen der Investitionseinsparungen für die Entnahmetechnik so klein wie möglich sein. Dimensionierungsempfehlungen, von denen die Vorschläge nach Jenike, Walker und Zenkov weltweit am meisten angewendet werden, setzen die Kenntnis der Dichte-, Reibungs-, Zug- und Druckfestigkeitswerte sowie der Kohäsion und Adhäsion voraus [3]. Danach berechnete Entnahmedurchmesser stehen in einem statistischen Zusammenhang zum Verhältnis von Zentralwert $x_{50,3}$ und Standardabweichung σ_q von zweiparametrischen logarithmischen Korngrößenverteilungen:

$$d_A = 0,316 \left(\frac{x_{50,3}}{\sigma_q} \right)^{-0,70}; B = 0,71 \quad (2)$$

nach Walker

$$d_A = 0,261 \left(\frac{x_{50,3}}{\sigma_q} \right)^{-0,70}; B = 0,71 \quad (3)$$

nach Zenkov

$$d_A = 0,119 \left(\frac{x_{50,3}}{\sigma_q} \right)^{-0,80}; B = 0,73. \quad (4)$$

Dabei ist folgender Gültigkeitsbereich zu berücksichtigen:

- Zentralwert $x_{50,3} = 0,07 \dots 0,72 \text{ mm}$
- Standardabweichung $\sigma_q = 0,1 \dots 0,5$
- Wandreibungswinkel $\varphi_x = 21^\circ$
- Trichterneigungswinkel $\theta = 20^\circ$
- Trockensubstanzgehalt $TS \geq 87\%$.

2.2. Füllen

Das Befüllen von Mischfuttersilos muß ohne Futterverluste und nahezu entmischungsfrei geschehen. Die Entmischungsneigung kann verringert werden, wenn Maßnahmen zur Senkung der Fallhöhe und der Fallgeschwindigkeit sowie zur Vermeidung einer ausgeprägten Schütkegelbildung getroffen werden. Dies ist mit mechanischen Fördermitteln besser zu erreichen als bei pneumatischer Förderung [1]. Bei der pneumatischen Befüllung ist das Gut in Zyklonen von der Förderluft zu trennen. Bei einer pneumatischen Direktbefüllung würde die Förderluft das Gut im Silo durch Wirbelbildung zusätzlich entmischen.

Für die Zyklondimensionierung sollten die Empfehlungen von Krambrock benutzt werden [4].

2.3. Entnahme

Für die Entnahme aus Silos werden haupt-

sächlich Stetigförderer eingesetzt. Um Staubbelastigung und Futterverluste zu vermeiden, müssen geschlossene Fördersysteme bevorzugt werden.

Zur Berechnung der Druckbelastigung von Entnahmeorganen kann angenähert eine freie Schüttguthöhe von rd. $1 \times$ Entnahmedurchmesser im Fließzustand und von rd. $3 \times$ Entnahmedurchmesser im Füllzustand angenommen werden [5].

Eine weitere Möglichkeit ist die Berechnung nach Jenike [6]. Nach der Theorie von Jenike wird der Vertikaldruck σ_1 im Auslaufbereich nach Gl. (5) bestimmt:

$$\sigma_1 = \frac{\varphi_L g b ff}{1 + m}; \quad (5)$$

φ_L Lagerungsdichte des Gutes

g Fallbeschleunigung

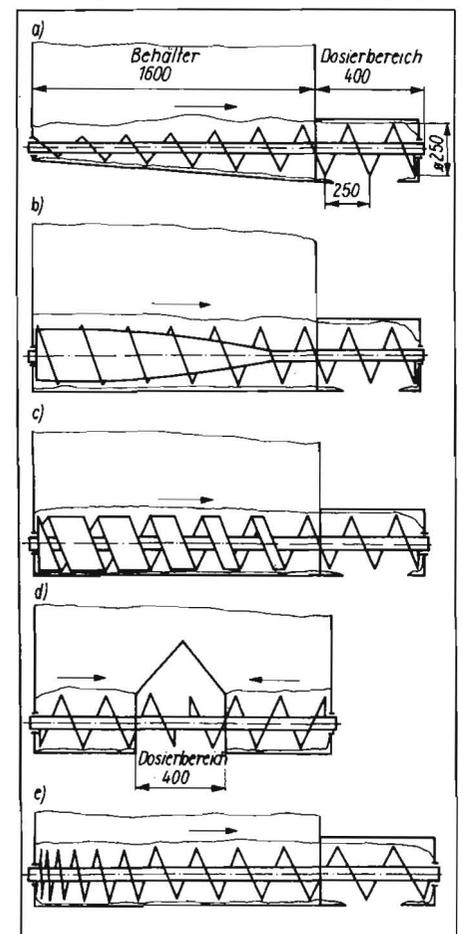
b Öffnungsweite

ff Fließfaktor ($ff = 1,3 \dots 2,0$)

m Trichterform ($m = 1$ für konische Trichter, $m = 2$ für Keiltrichter).

Zur Berechnung des Leistungsbedarfs von Entnahmeschnecken werden die von Geißler [7] aufgestellten Gleichungen empfohlen.

Bild 1. Konstruktive Lösungen für Entnahmeschnecken [8]:
a) Schnecke mit parabolischem Außendurchmesser, b) Schnecke mit parabolischem Innendurchmesser, c) Schnecke mit unterschiedlichem Füllvolumen, d) gegeneinander fördernde Schnecke, e) Schnecke mit wachsender Steigung



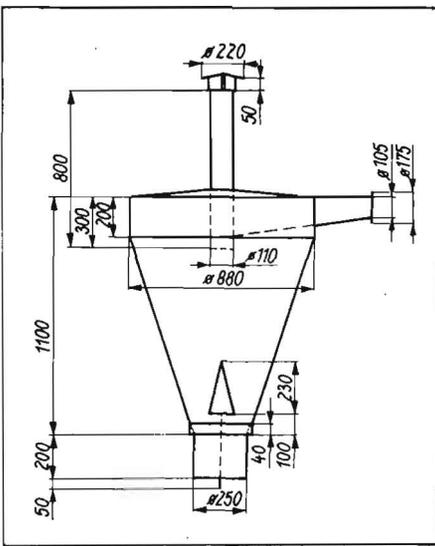


Bild 2. Zyklon für die pneumatische Befüllung des Mischfuttersilos H010A vom Mischfutterfahrzeug

Durch den Entnahmeförderer ist vor allem bei Schlitzöffnungen zu gewährleisten, daß das Aufnahmevermögen in Förderrichtung ansteigt. Für Schneckenförderer wurden von Gatzky [8] konstruktive Lösungen erarbeitet (Bild 1). Der Leistungsbedarf von Entnahmetellern, Entnahmetrommeln, Räumarmen u. a. kann angenähert nach Gl. (6) berechnet werden [6]:

$$P_{\max} = 2\pi \mu p_v A r n + P_f + P_L \quad (6)$$

- μ Wandreibungskoeffizient
- p_v Vertikaldruck
- A Entnahmefläche
- r Radius des Antriebsrades, der Antriebstrommel oder des Antriebsteilers
- n Drehzahl
- P_f Leistungsbedarf für die Weiterförderung
- P_L Leerlaufleistung.

2.4. Festigkeitsgerechte Dimensionierung

Für die festigkeitsgerechte Dimensionierung müssen die Lastannahmen methodisch nach Standard TGL 32 274/09 berechnet werden. Kennwerte über landwirtschaftliche Mischfüttermittel sind allerdings vorerst noch nicht enthalten.

3. Ergebnisse funktioneller Untersuchungen

Die dargelegten Erkenntnisse sind in die Entwicklung des 25-m³-Mischfuttersilos H010A (Hersteller: VEB Landtechnischer Anlagenbau Erfurt, Sitz Mihla) eingeflossen. Neben

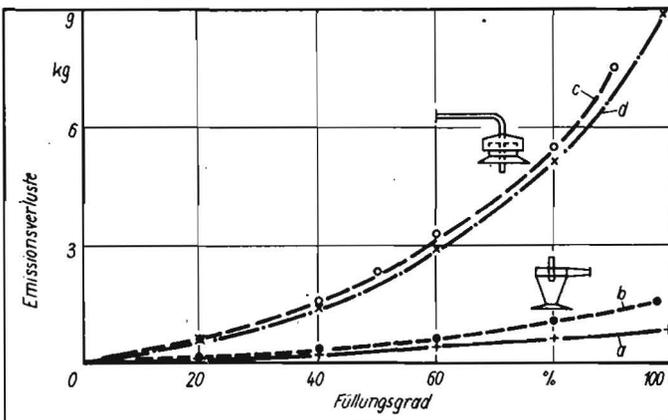


Bild 3 Staubemission bei der Befüllung über Zyklon und Ablufthaube; a Zyklon mit Abschirmkegel und Wellenbinder, b Zyklon ohne Abschirmkegel und Wellenbinder, c Ablufthaube, d Ablufthaube, nicht abgedichtet

einer Materialeinsparung von 20% wurden vor allem Verbesserungen der funktionellen Parameter erreicht.

3.1. Fließzustand

Durch die Neigung des kegligen Auslauftrichters von 70° zur Horizontalen wird für Mischfüttermittel mit Wandreibungswinkel $\varphi \leq 25^\circ$ vom Beginn der Entnahme an Massenfluß erzielt. Infolge des Abrutschens des gesamten Futters an der vertikalen Silowand werden ein Anhaften des Futters vermieden und Verderberscheinungen somit ausgeschlossen. Die notwendigen Reinigungsarbeiten verringern sich auf diese Weise gegenüber dem Mischfuttersilo G 807 deutlich.

3.2. Füllen

Mischfuttersilos sind in der Mehrzahl der Anwendungsfälle einzeln aufgestellt, so daß aus Investitionsgründen die Befüllung pneumatisch vom Mischfutterfahrzeug aus erfolgt. Die Trennung von Förderluft und Gut geschieht in einem Zyklon, der auf die Förderparameter des Mischfutterfahrzeugs abgestimmt ist (Bild 2). Der Abschirmkegel am Zyklonausgang ermöglicht die Abstützung des erzeugten Luftwirbels und verhindert, daß sich dieser in das Siloinnere fortsetzt. Der Wellenbinder unter dem Abschirmkegel bewirkt eine vertikale Ausrichtung und Abbremsung der Gutsträhne. Dadurch wird das Gut annähernd so wie bei der mechanischen Befüllung abgegeben. Die extreme Anreicherung von Feingut an der Silowand, die sonst bei Direkteinblasung durch die Luftverwirbelung entsteht, wird bei der Zyklonbefüllung weitgehend verhindert.

Die Futtermittelverluste in der Abluft des Zyklons vermindern sich gegenüber der Luftabführung über Ablufthaube auf rd. 1/10. Sie betragen bei einer Füllmasse von rd. 15 t 1 bis 1,5 kg (Bild 3). Der zulässige Wert von $\leq 0,02\%$ wird damit weit unterschritten.

3.3. Entnahme

Entnahmestörungen verursachen bisher ein Absinken der Verfügbarkeit, die je nach Futtermittelart, Trockensubstanzgehalt und Korngrößenverteilung Werte von $< 0,94$ annehmen konnte. Durch die Veränderung der Silogeometrie und die Neugestaltung des Entnahmebereichs beträgt die Verfügbarkeit jetzt beim Silo H 010 A 0,99 bis 1,0. Wichtig ist, daß beim Anschluß des Silos an die Fördermittel des Fütterungssystems der für das entsprechende Mischfüttermittel notwendige Entnahmequerschnitt eingehalten wird. Da die Fließkennwerte näherungsweise mit der Schüttdichte korrelieren, ist es für die Praxis

Tafel 1. Abmessungen der Entnahmeöffnung für Mischfüttermittel¹⁾

Durchmesser der Entnahmeöffnung mm	Schüttdichte kg/m ³
100	IV 650
160	IV 600
200	IV 550
250	IV 520
Spaltbreite eines keilförmigen Auslaufs	
250	IV 450

1) Die angegebenen Abmessungen dürfen z. B. bei der Entnahme mit Förderschnecken durch den Einlauf nicht eingengt werden

ausreichend, wenn der Durchmesser bzw. die Spaltbreite der Entnahmeöffnung in Abhängigkeit von der Schüttdichte dimensioniert wird (Tafel 1).

3.4. Entmischung

Die Entmischung wird mit Hilfe des Variationskoeffizienten der Schüttdichte und der Kornmasseanteile ausgedrückt. Für die verwendeten Mischfüttermittel konnte eine Korrelation zwischen Kornmasseanteil $< 0,5$ mm und Rohaschegehalt sowie zwischen Kornmasseanteil 0,5 bis 1,0 mm und Rohproteinanteil ermittelt werden. Dadurch kann auf die aufwendige Bestimmung der Inhaltsstoffe und deren Entmischung während der Entnahme verzichtet werden.

Aus Versuchen mit Schweinemastfutter und Sauenfutter ergibt sich für die Schüttdichte bei der Entnahme ein Variationskoeffizient $v_e = 2...5\%$, wenn der Variationskoeffizient beim Füllen $v_f = 3...6\%$ beträgt. Für den Kornmasseanteil $< 0,5$ mm liegt der Variationskoeffizient während der Entnahme bei $v_e = 4...9\%$ für Variationskoeffizienten beim Füllen von 6 bis 10%. Das Verhältnis der Variationskoeffizienten beträgt im Mittel $v_e/v_f = 0,95$.

Mit diesen Ergebnissen wurde die Entmischung im Mischfuttersilo H010A wesentlich reduziert. Dies resultiert aus technischen Veränderungen der Befüllorgane, der Änderung der geometrischen Hauptparameter und der Entnahmetechnik.

Nachteilig ist, daß bei 10 bis 15% der Gesamtmasse am Schluß der Entnahme die Schüttdichte sinkt und der Korngrößenanteil $< 0,5$ mm ansteigt. Um das zu beheben, wären jedoch unverträglich hohe Aufwendungen erforderlich.

4. Zusammenfassung

Die optimale Dimensionierung von Mischfuttersilos muß nach experimentell ermittelten Stoffeigenschaften erfolgen. Auf dieser Grundlage wurde gemeinsam zwischen dem Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben und dem VEB Landtechnischer Anlagenbau Erfurt, Sitz Mihla, das neue 25-m³-Mischfuttersilo H010A entwickelt. Die entscheidenden Verbesserungen sind die Senkung des Materialaufwands um 20%, die Erhöhung der Verfügbarkeit auf 0,99 bis 1,0, die Senkung der Entmischung auf Variationskoeffizienten der Schüttdichten bei der Entnahme von $v_e = 2...5\%$, die Reduzierung der Futtermittelverluste auf $\leq 1 \cdot 10^{-2}\%$ und die Senkung des Aufwands für Pflege- und Wartungsarbeiten.

Fortsetzung auf Seite 461

Mischfuttersilo H 010 A

Dipl.-Ing. G. Harseim, KDT/Dipl.-Ing. H. Wochatz, KDT, VEB Landtechnischer Anlagenbau Erfurt, Sitz Mihla
Ing. W. Wilhelm, KDT, VEB Kombinat Landtechnik Erfurt

Mit dem neuen Mischfuttersilo H010A aus dem VEB Landtechnischer Anlagenbau Erfurt, Sitz Mihla, wird ein optimaler Lagerbehälter für schrotartige und pelletierte Trockenfuttermittel zur Verfügung gestellt, der bei wesentlich höheren Gebrauchswerteigenschaften hinsichtlich Aufbau und Größenordnung in etwa dem bekannten Vorgängertyp G807 entspricht.

Aufbau

Der Mischfuttersilo H010A besteht aus folgenden Hauptbaugruppen (Bild 1):

- Untergestell
- Auslauftrichter mit flexiblen Anschlußstück
- Zylinder
- Dach
- Zyklon.

Das Untergestell 1 ist eine Stahltragkonstruktion und besteht aus vier über den Tragring und vier Horizontalstreben miteinander verbundenen Rohrstützen. Der Tragring trägt den kegelförmigen Auslauftrichter 2, der sich aus miteinander verschraubten Blechsegmenten zusammensetzt. Daran befestigt sind ein aus PVC-Gurtmaterial bestehendes flexibles Anschlußstück 3 sowie ein Übergangsstück mit Handschieber.

Der zylindrische Silobehälter 4 besteht aus vier übereinander angeordneten Ringen, deren Materialdicken nach oben reduziert sind. Jeder Ring wird jeweils wieder aus vier Ekotablechsegmenten zusammengeschraubt.

Das kegelförmige Dach 5 setzt sich aus zehn durch entsprechende Sicken stabilisierte Ekotablechsegmente zusammen, die ebenfalls miteinander verschraubt sind. Die Verbindung zwischen Dach und Zylinder wird über vier Ringsegmente hergestellt.

Zum Abdichten der Verbindungsstellen sämtlicher Ekotableche werden Plastscheiben verwendet. Die Streifenabdichtung der sich überlappenden Blechsegmente erfolgt an den Schraubstößen mit kalthärtender Silikon-Kautschukpaste.

Auf dem Dach ist ein Zyklon 6 als Luftabscheider für die pneumatische Silobefüllung aufgeschraubt, mit dem die pneumatische Beschickungsleitung 7 verbunden ist. Zwei nach dem Prinzip von Drehflügelwächtern arbeitende Füllstandanzeiger 8 ermöglichen über optische und/oder akustische Einrichtungen das Signalisieren der Füllstände „voll“ bzw. „leer“. Die „Leermeldung“ erfolgt bei einer Restfüllmenge im Silo von rd. 25%.

Zur Durchführung von Wartungsarbeiten kann durch eine im Trichter angeordnete Luke in das Siloinnere eingestiegen werden.

Darüberhinaus besteht die Möglichkeit, im Bedarfsfall über eine fahrbare Leiter AL 12 ein mobiles Wartungspodest auf dem Silodach anzubringen und dieses zur Durchführung von Kontroll- und Wartungsarbeiten zu besteigen.

Entsprechend dem jeweils vorgesehenen

Einsatzfall und den damit verbundenen spezifischen Einsatzbedingungen können Veränderungen gegenüber der im Bild 1 dargestellten Grundvariante der Konfiguration der einzelnen Siloelemente vorgenommen werden. In Abhängigkeit von der geplanten Befüllvariante ist das Aufstellen des Mischfuttersilos mit Zyklon für eine pneumatische Beschickung oder mit Einlaufstutzen anstelle des Zyklons für eine vorzugsweise mechanische Beschickung über entsprechende Fördermittel möglich. In diesem Fall kann wahlweise eine zusätzliche pneumatische Beschickungsleitung angebracht werden. Diese Variante ist jedoch nicht der Beschickung über den Zyklon gleichzusetzen, da hiermit die geforderten Werte hinsichtlich Entmischung und Futtermittelverluste nicht erreicht werden. Zur Vermeidung von Überlastung bzw. Überbeschickung bei einer überwiegender Einlagerung von Futtermitteln mit einer Dichte $\rho \geq 7 \text{ t/m}^3$ ist es notwendig, den Silobehälter nur mit drei Ringen oder einem dritten Füllstandanzeiger aufzustellen. Zur Sicherung einer störungsfreien Futterentnahme, vor allem bei schwerfließenden Futtermitteln und gleichzeitigem Einsatz des Mischfuttersilos in der technologischen Kette einer massekontrollierten Futteraufbereitung, ist die Entnahme aus dem Silo über eine spezielle Entnahmeeinrichtung möglich. Diese Entnahmeeinrichtung besteht aus dem Entnahmegemälde mit einer im Einlaufbereich mit abgestuften Schneckensteigungen ausgerüsteten 250er-Trogschnecke und dem anstelle des konischen Trichteranschlusses vorgeschalteten schlitzförmigen Entnahmetrichter.

Die Entnahmeeinrichtung ist in folgenden drei Varianten der Abstufung der Antriebs- und Entnahmeeinrichtung des Trogschneckenförderers (Entnahmegemälde) lieferbar:

- einschließlich Getriebemotor, Entnahmemassestrom rd. 4 bis 5 t/h für die weit verbreitete Variante einer nachgeordneten Rohrschnecke C100
- einschließlich Getriebemotor, Entnahmemassestrom rd. 15 t/h, für die massekontrollierte Fütterung in Schweineanlagen
- ohne Getriebemotor, für eine durch den Projektanten festzulegende Entnahmeeinrichtung, Absicherung des Getriebemotors durch Montagebetrieb.

Technische Daten

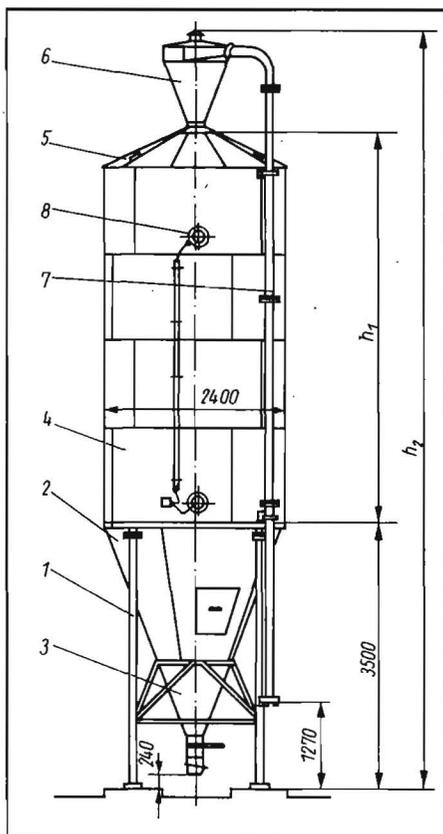
Die technischen Daten des Mischfuttersilos H010A sind in den Tafeln 1 und 2 zusammengestellt.

Gebrauchswert erhöhende Lösungen am Mischfuttersilo H010A

Mit der Produktionsaufnahme des neuen Mischfuttersilos H010A wird den Anwendern der erste Typ einer Lagerbehältergeneration zur Verfügung gestellt, der im Vergleich zum abzulösenden Rationalisierungsmittel folgende Forderungen erfüllt:

- Gewährleistung eines Masseflusses statt des bisher zu verzeichnenden Kernflusses bei gleichzeitiger Reduzierung der Entmischung und Brückenbildung während des

Bild 1. Mischfuttersilo H010A (Grundvariante);
Erläuterung im Text



Fortsetzung von Seite 460

Literatur

- [1] Mührel, K.: Transport, Umschlag und Lagerung in der Landwirtschaft. Berlin: VEB Verlag Technik 1983, Abschn. 6.
- [2] Füll, C.: Lagern landwirtschaftlicher Schüttgüter in Behältern. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation B 1985.
- [3] Füll, C.: Grundlagen für die Berechnung von Auslaufquerschnitten zur Entnahme landwirtschaftlicher Güter aus Behältern. Wissenschaftliche Zeitschrift der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Mathematisch-naturwissenschaftliche Reihe 25 (1976) 4, S. 457–463.
- [4] Krambrock, W.: Berechnung des Zyklonabscheiders und praktische Gesichtspunkte zur Auslegung – Teil 1 und 2. Aufbereitungs-Technik, Wiesbaden 12 (1971) 7, S. 392–401; 10, S. 693–649.
- [5] Reissner, W.; v. Eisenhart-Rothe, M.: Behälter und Silos für Schüttgüter. Cleveland (Ohio): Verlag Trans. Techn. Publications 1971.
- [6] Bedienungsanleitung und Meßvorschrift für das Translationsschergemälde (Jenike-Scherzelle). Fachausschuß „Lagern von Schüttgütern in Bunkern“ der KDT, 1986.
- [7] Geißler, D.: Berechnung des Energiebedarfs und der Axialkraft einer Untenentnahmeschnecke im Bunker. Technische Universität Dresden, Dissertation 1979.
- [8] Gatzky, D.: Konstruktion einer Einrichtung für das Entnehmen und Dosieren von Trockenfuttermitteln aus Hochbehältern mit keilförmigen Auslauftrichtern. Technische Universität Dresden, Konstruktionsbeleg 1979. A 5266