

Diplomarbeit

Thema:

Optimierung von Kunststoffrecyclatbunkern



eingereicht von

GEGENHUBER Robert

Leoben, März 07

Betreuer:

Mag. Verena MAJER
Dipl.-Ing. Dr. mont. Stefan WIRTH

Begutachter:

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Franz KESSLER
Vorstand des Lehrstuhls für Fördertechnik und Konstruktionslehre

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	iv
Akronyme	iv
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Mechanische Verfahrenstechnik – Schüttgutmechanik	3
2.1.1 Allgemein	3
2.1.2 Grundlegenden Charakterisierung des Schüttguts	4
2.1.3 Mohr - Coulombsches Fließkriterium	6
2.1.4 Scherversuche zur Ermittlung der Fließfähigkeit	9
2.1.4.1 Jenike Schergerät	10
2.1.4.2 Torsionsschergeräte	11
2.1.4.3 Ringschergeräte	11
2.1.4.4 Gerät zur Messung der Wandreibung	12
2.1.5 Übersicht über weitere Prüfverfahren	13
2.1.5.1 Fließfähigkeitsindex nach Carr	13
2.1.5.2 Rührer	14
2.1.5.3 Verdichtbarkeitsmessung	15
2.1.5.4 Cohesion Tester, Flowability Test	15
2.1.5.5 Penetration Test	16
2.1.5.6 Johanson Hang-up Indiciser™, ähnliche Messprinzipien	17
2.1.5.7 Zweiachsiger Druckversuch (Biaxial compression test)	18
2.1.6 Probleme beim Austrag	18
2.1.6.1 Brückenbildung	20
2.1.6.2 Schachtbildung	21
2.1.6.3 Unregelmäßiges Fließen	21
2.1.6.4 Entmischungserscheinungen	21
2.1.6.5 Schießen von Material	24
2.1.6.6 Unterschiedliche Verweilzeiten des Schüttgutes	24
2.1.7 Fließprofile	25
2.1.7.1 Massenfluss	26
2.1.7.2 Kernfluss	26
2.2 Bunker und Silos	27

2.2.1	Definition	27
2.2.2	Werkstoffe	27
2.2.3	Formen.....	28
2.3	Austragshilfen und -organe	30
2.3.1	Definition und Unterscheidung.....	30
2.3.2	Bandförderer und Abzugsbänder.....	31
2.3.3	Kratzerförderer.....	33
2.3.4	Trogkettenförderer	34
2.3.5	Schneckenförderer.....	36
2.3.6	Rotierende Räumleinrichtungen	39
2.3.7	Drehtelleraufgeber	41
2.3.8	Schwingförderer.....	42
2.3.8.1	Allgemeines	42
2.3.8.2	Schwingrinne	43
2.3.8.3	Schwingrost	44
2.3.8.4	Schwingtrichter	44
2.3.9	Drehbalkenboden.....	45
2.3.10	Schubaufgeber.....	46
2.3.11	Zellenradschleusen.....	47
2.3.12	Walzen-/ Trommelaufgeber	47
2.3.13	Pneumatische Systeme	48
2.3.13.1	Kontinuierliche Einwirkung.....	48
2.3.13.2	Temporäre Einwirkung.....	49
2.3.13.3	Indirekte Einwirkung	50
2.4	Grundlagen der Kunststoffkunde	51
2.4.1	Einteilung nach der Bildungsreaktion	51
2.4.2	Einteilung der molekularen Struktur.....	52
2.4.2.1	Thermoplaste.....	52
2.4.2.2	Duroplaste	53
2.4.2.3	Elastomere.....	54
2.4.3	Die zu lagernden Kunststoffarten.....	54
2.4.3.1	PE	54
2.4.3.2	PA.....	56
2.4.3.3	PET.....	57
2.4.3.4	PC.....	58

2.5	Vergleichende Betrachtung.....	60
3	Übersicht über mögliche Ausführungen.....	64
3.1	Förderband.....	66
3.2	Rotierender Räumarm.....	68
3.3	Rotierender Schneckenarm	69
3.4	Schneckenbatterie	70
3.5	Drehteller.....	71
3.6	Walzenaufgeber	72
3.7	Senkrechte Schnecke	76
3.8	Schwingförderer	78
3.9	Drehbalkenboden.....	78
3.10	Schubaufgeber.....	79
4	Detailbetrachtungen.....	80
4.1	Förderband.....	81
4.2	Rotierender Räumarm.....	85
4.3	Rotierender Schneckenarm	89
4.4	Schneckenbatterie	92
5	Zusammenfassung.....	95
6	Abbildungsverzeichnis	97
7	Tabellenverzeichnis	101
8	Literaturverzeichnis	102

Formelzeichen

x_{\max}	[mm]	größte Partikelabmessung des Schüttgutes
b	[mm]	kritische Auslaufbreite
d	[mm]	kritischer Auslaufdurchmesser
d_E	[mm]	Einlaufdurchmesser des Austragsorgans
d_A	[mm]	Auslaufdurchmesser
φ_w	[grad]	Wandreibungswinkel
φ	[grad]	Böschungswinkel
φ_i	[grad]	Winkel der inneren Reibung
φ_e	[grad]	Winkel der Geraden des effektiven Fließorts
α	[grad]	Bodenneigungswinkel
φ_R	[grad]	Reibungswinkel
ρ_b	[kg/m ³]	Schüttgutdichte
σ_t	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
σ_D	[N/mm ²]	Druckfestigkeit
F_V	[N]	Verdichtungskraft
F_M	[N]	Prüf- bzw. Messkraft

Akronyme

PE	Polyethylen
PEHD	Polyethylen mit hoher Dichte (High Density)
PELD	Polyethylen mit niedriger Dichte (Low Density)
PELLD	lineares Polyethylen mit niedriger Dichte (Linear Low Density)
PA	Polyamid
BOPA	biaxial orientiertes Polyamid
PET	Polyethylenterephthalat
CHDM	1,4 - Cyclohexandimethylol
PC	Polycarbonat

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit soll für die Firma Majer Maschinenbau Ges.m.b.H. mit Niederlassung in Gmunden eine Optimierung ihrer Bunker zur Lagerung von Kunststoffschrot durchgeföhrt werden. Die zu lagernden Kunststoffschrot gelangen gewaschen und getrocknet über eine Fördereinrichtung oder durch eine direkte Entleerung von Big Bags in den Bunker. Die bisher gefertigten Bunkermodelle verfügten über einen Durchmesser von etwa zwei Metern, einer Höhe von etwa fünf Metern (mit Tragsäulen) und je nach Ausführung ein Volumen von acht oder zehn Kubikmeter. Das Gewicht des in Abb. 1-1 dargestellten Modells liegt bei etwa 2300kg. Zur Gewährleistung des reibungslosen Austrages setzte man bisher einen Rührbalken ein, der je nach Bedarf mit zusätzlichen Verstärkungsleisten ausgestattet wurde. Die Ausführung des Rührbalkens und die Anordnung der Austragsöffnung ist auch in Abb. 1-1 ersichtlich.



Abb. 1-1: bisherige Bunkerkonstruktion

Nach der Ausbringung erfolgt die Förderung zur weiteren Verarbeitung mittels einer Schnecke. Der zur Verfügung stehende Platz für andere Konstruktionen ist besonders in horizontaler Richtung sehr limitiert.

Einer Beibehaltung der bestehenden zylindrischen Konstruktion ist von Seiten der Firma aus der Vorzug zu geben. Dennoch dürfen Vorschläge für einen rechteckigen Bunkerquerschnitt nicht ganz unberücksichtigt bleiben. In die Bewertung der Optimierungsvorschläge fließt dieser Sachverhalt natürlich ein.

Mit einer Bestandsanalyse der Lagerungs- und Ausbringungstechnik, der Theorie der Schüttgutmechanik sowie der Charakterisierung der Kunststoffe befasst sich der erste Teil dieser Arbeit. Die Aussagen dieser Themenkomplexe stecken grob die Grenzen ab, in der sich die Ergebnisse für die zu untersuchende Problematik bewegen können.

Der zweite Teil soll Lösungen liefern, die für eine schnelle Realisierung geeignet sind. Die Verbesserungsvorschläge stützen sich auf bekannte Technologien aus dem Bereich der Schüttgutlagerungs- und Ausbringungstechnik. Die in Frage kommenden Technologien werden mittels des Konstruktionsprogramms Solid Edge visualisiert um den Platzbedarf und das Gewicht abschätzen zu können. Bei der Auswahl der Technologien wird darauf geachtet, in wie weit diese mit schon länger bekannten schwierigen Schüttgütern (wie z.B. Holzspäne) zu Recht kommen. Dies ist notwendig, weil der überwiegende Teil der Fachliteratur die Lagerung von Kunststoff - Recyclaten in der vorliegenden Form von Folienschnitzel bisher wenig Beachtung schenkte und Know-How von Firmen in diesem Bereich auf Erfahrung basiert, die somit teuer erworben wurde und infolgedessen nicht veröffentlicht wird, um den Wettbewerbsvorteil zu sichern. Demzufolge ist auch der Zukauf des gesamten Austragsteiles eine interessante Option, wenn sich auf diese Weise die Kosten reduzieren lassen und es zu einer eindeutigen, sichergestellten Verbesserung der Austragsleistung kommt.

Auf Originalproben der zu lagernden Güter aus PE-LD, PE-HD und BOPA kann zu Versuchszwecken leider nicht zurückgegriffen werden. Es ist auch nicht zweckmäßig mit einer beliebigen PE Folie Versuche durchzuführen, da jede Kunststoffsorte, auch wenn sie unter einem Oberbegriff wie PE bekannt ist, andere Eigenschaften hat. Diese Tatsachen erschweren die Suche nach besseren Ausführungen.

Die Kunststoffschnitzel haben eine Dicke von 0,05 mm und ihre Dimension übersteigt bei allen Materialien die Abmessungen von 30 mal 50 mm nicht.

Alle Optimierungsvorschläge sind zusätzlich auch hinsichtlich ihrer Eignung zur Lagerung von PET – Flakes und CDs bzw. DVDs, bestehend aus PC, zu untersuchen, da die Firma Majer in diesem Bereich Potential für die Zukunft sieht.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Mechanische Verfahrenstechnik – Schüttgutmechanik

2.1.1 Allgemein

Schüttgüter verhalten sich weder wie eine Flüssigkeit noch wie ein Festkörper. Unter gewissen Bedingungen kommen sie aber dem Verhalten der beiden Stoffe recht nahe, wie z.B. bei einem Fließbett bei dem das zugeführte Gas eine Fluidisierung hervorruft. Ein Schüttgut stellt ein komplexes System dar, das aus mehr oder weniger feinen Feststoffteilchen besteht. Dieses System besteht mindestens aus zwei Phasen, und zwar aus den Feststoffteilchen und dem Gas in den Zwischenräumen. Hinzukommen kann dann noch eine flüssige Phase die das Schüttgutverhalten stark verändern kann.

Eine Analyse des Verhaltens von Schüttgut und Flüssigkeit zeigt einen essentiellen Unterschied auf (siehe Abb. 2-1).

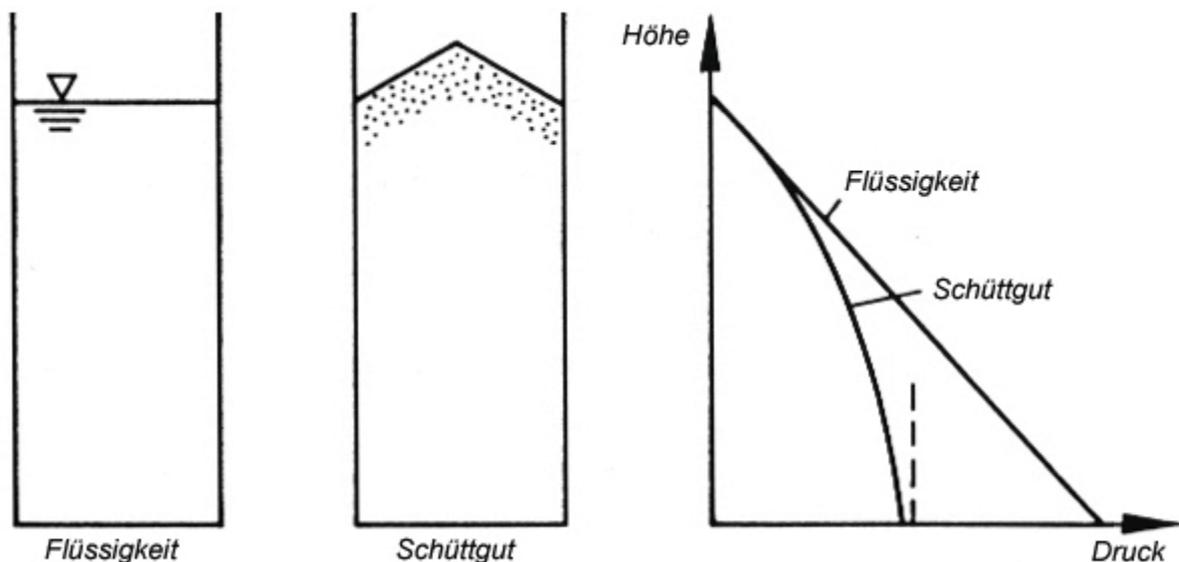


Abb. 2-1: Unterschied zwischen Schüttgut und Flüssigkeit [6]

Eine Flüssigkeit die sich in Ruhe befindet bildet in einem Behälter eine horizontale Oberfläche aus und kann keine Schubkräfte übertragen. Der Druck nimmt hydrostatisch mit der Tiefe zu und ist nach allen Richtungen gleich. Ein Schüttgut das sich in Ruhe in einem Behälter befindet kann dagegen eine nahezu beliebige Form der Oberfläche haben, die, wie später aufgeführt wird, hauptsächlich von der Art der Beschickung abhängig ist. Es werden vom Schüttgut im Ruhezustand sehr wohl Schubkräfte übertragen und die Drücke nehmen nicht linear mit der Tiefe des Behälters zu, sondern sie nähern sich einem Endwert an. Dieser Umstand kommt durch die Reibung des Schüttgutes an der Behälterwand zustande, wodurch ein Teil des Schüttgutgewichtes getragen wird. Zu

dieser grundlegenden Feststellung kommt aber noch, dass der Druck von der Richtung abhängig ist und beim Füllen, Lagern und Entleeren verschieden sein kann. [6]

2.1.2 Grundlegenden Charakterisierung des Schüttgutes

Für die Auslegung von Lagerbehältern ist es wichtig die Charakteristik des zu lagernden Schüttgutes zu ermitteln. Vor allem im Hinblick auf den Austrag ist es wichtig dass Fließverhalten zu kennen. Da sich Schüttgüter weder mit den Gesetzen der Flüssigkeiten noch mit den Gesetzen der Festkörper beschreiben lassen, müssen andere Kennwerte und Gesetze herangezogen werden. Bei der Betrachtung von Abb. 2-1 liegt die Vermutung nahe, dass der Böschungswinkel ein akkurates Mittel für die Beschreibung der Eigenschaften eines Schüttgutes ist. In Abb. 2-2 sind drei verschiedene Methoden zur Bestimmung des Böschungswinkels dargestellt, die deutlich machen, dass der so ermittelte Böschungswinkel von der Meßmethode abhängt. Das Aufschütten eines Schüttgutkegels (siehe Abb. 2-2a) liefert bei einer konvexen Oberfläche einen kleineren Winkel als bei einer konkaven. Abb. 2-2b zeigt das Auslaufen lassen von Schüttgut aus einem Behälter mit kreisförmiger Öffnung im horizontalem Boden. Bei der Rotation eines mit Schüttgut gefüllten Behälters um die horizontale Achse nach Abb. 2-2c unterliegt der sich einstellende Böschungswinkel der Drehgeschwindigkeit der Trommel, also dynamischen Einflüssen.

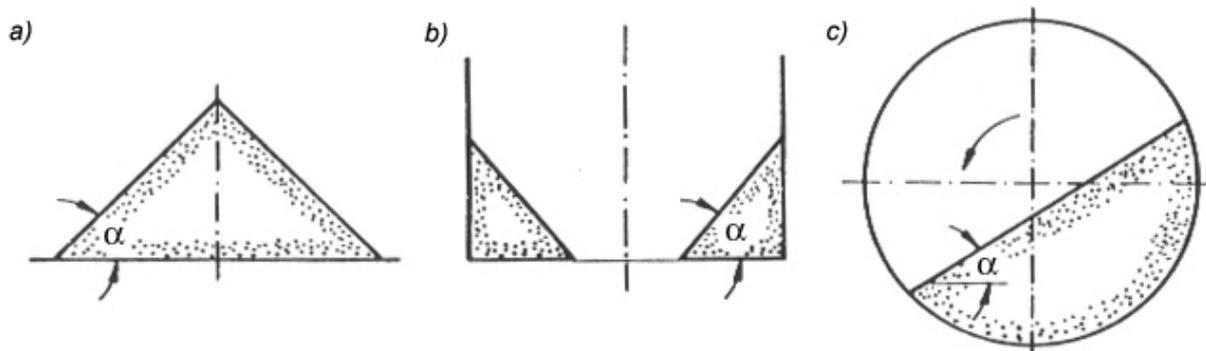


Abb. 2-2: Methoden zur Bestimmung des Böschungswinkels [6]

Obwohl die Messung des Böschungswinkels von der Messmethode bzw. der Geometrie der Messapparatur abhängt und der Böschungswinkel nur bei ohnehin leicht fließenden Schüttgütern eine reproduzierbare und eindeutige Eigenschaft darstellt ist er nach wie vor die am häufigsten benutzte Größe zur Beschreibung eines Schüttgutes.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Fließfähigkeit, die aber auch wie die vorherigen Methoden von der Form und Oberflächenbeschaffenheit der Probenbehälter abhängt, ist die Messung der Auslaufzeit für eine bestimmte Schüttgutmenge. Solche Messverfahren haben dann ihre Berechtigung wenn ein eindeutiger Zusammenhang

zwischen den Versuchsergebnissen und dem Schüttgutverhalten in der technischen Anwendung gefunden wurde. Da der Zusammenhang meist empirisch hergestellt wird ist eine Übertragung auf andere Anwendungsfälle problematisch.

Schüttgüter lassen sich hinsichtlich des Fließverhaltens in zwei Gruppen unterteilen, und zwar in

- frei fließende, kohäsionslose und
- kohäsive Schüttgüter.

Erstere lassen sich gut mit dem Böschungswinkel charakterisieren, aber kohäsive Schüttgüter können bei entsprechendem Verdichtungsgrad sogar Böschungswinkel von mehr als 90° aufweisen. Wegen dieser Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad eignet sich diese Art der Charakterisierung der Fließfähigkeit nicht. Die Modellvorstellung in Abb. 2-3 veranschaulicht eine andere Art der Charakterisierung von Schüttgut, nämlich die aus der Plastizitätslehre stammenden Fließkriterien.

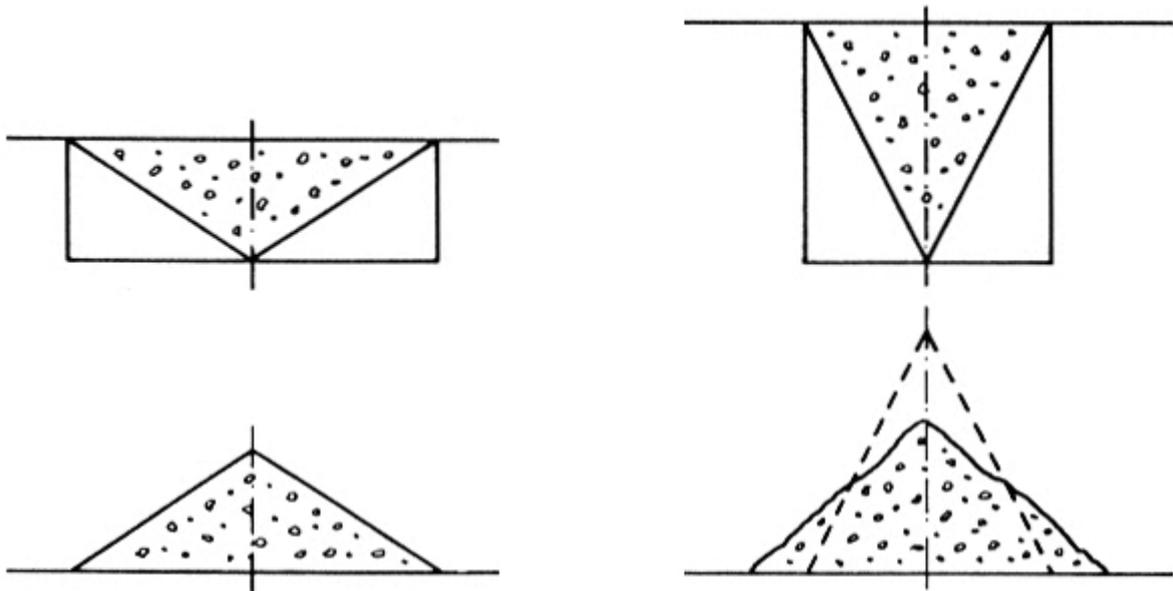


Abb. 2-3: Modellvorstellung zur Definition des Fließkriteriums [6]

Zwei Kegelformen mit stark unterschiedlichem Öffnungswinkel werden mit Schüttgut gefüllt. Als Nächstes werden die Kegel mit Platten abgedeckt und umgedreht. Wenn jetzt beiden Formen entfernt werden, wird das Schüttgut beim stumpfen Kegel seine aufgeprägte Form nicht verändern, während das Schüttgut beim spitzen Kegel zusammenbricht um einen stabilen Zustand zu erreichen. Das Ziel des Fließkriteriums ist, vereinfacht ausgedrückt, die Grenzgeometrie zu finden bei der sich das Schüttgut gerade noch im statischen Gleichgewicht befindet bzw. bei der schon die plastische Verformung beginnt. [6]

2.1.3 Mohr - Coulombsches Fließkriterium

Das Verhalten der Materialien in der Bodenmechanik ist dem von Schüttgütern sehr ähnlich. In der Bodenmechanik wird eine Analogie zur Festkörperreibung genutzt, das Mohr – Coulombsche Fließkriterium. Dieses Kriterium wird für die Schüttgutmechanik modifiziert indem Druckspannungen und Verdichtungen als positive Größen eingeführt werden.

Um die Thematik des Mohr – Coulombsche Fließkriteriums anschaulicher zu machen ist es günstig schrittweise vorzugehen. In Abb. 2-4 ist zu sehen wie auf einen Körper bzw. ein Schüttgutelement eine Druckkraft N wirkt. Zur Bewegung längs der Fläche A ist eine Schubkraft S nötig. Zwischen S und N besteht ein meist linearer Zusammenhang über den Reibungskoeffizienten μ nach (1).

$$\mu = \tan \varphi_R \quad (1)$$

Da die Reibung von der Berührfläche A unabhängig ist wählt man für die Visualisierung die Schubspannung τ und die Druckspannung σ nach (2). Die Fließgrenze im σ, τ Diagramm wird Coulombgerade genannt.

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{S}{A} \\ \sigma &= \frac{N}{A} \end{aligned} \quad (2)$$

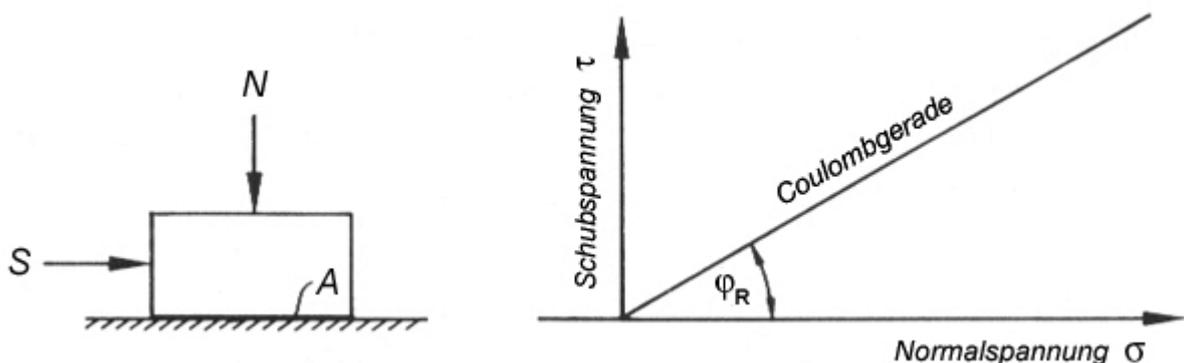


Abb. 2-4: Fließkriterium nach Mohr - Coulomb für ein kohäsionsloses Schüttgut [6]

Schwierig auszutragen sind meistens kohäsionsbehaftete Schüttgüter. Eine exakte Grenze, ab der ein Schüttgut kohäsionsbehaftet ist gibt es nicht. Stattdessen ist ein Korngrößenbereich von 100 bis 250µm als Bereich definiert, in dem die Kräfte signifikanten Einfluss haben. Zu den Effekten die eine kohäsive Wirkung erzeugen zählen die Van der Waals Kräfte, elektrostatische Kräfte, Flüssigkeitsbrücken und

Feststoffbrücken. Feststoffbrücken können durch Sinterungs-, Schmelz- und Kristallisationsprozesse entstehen.

Um den Einfluss der Kohäsion im Modell zu erfassen wird der Faktor C als eine von N unabhängige Anziehungskraft eingeführt. Diese Kraft führt dazu dass bei $\sigma = 0$ die Schubspannung nicht mehr 0 ist. Die Coulombgerade geht nicht mehr durch den Koordinatenursprung, sondern schneidet die $\sigma = 0$ – Linie in der Höhe C (siehe Abb. 2-5). Dies führt zu einer Geradengleichung für die Schubspannung τ (3).

$$\tau = c + \sigma * \tan\varphi_R \quad (3)$$

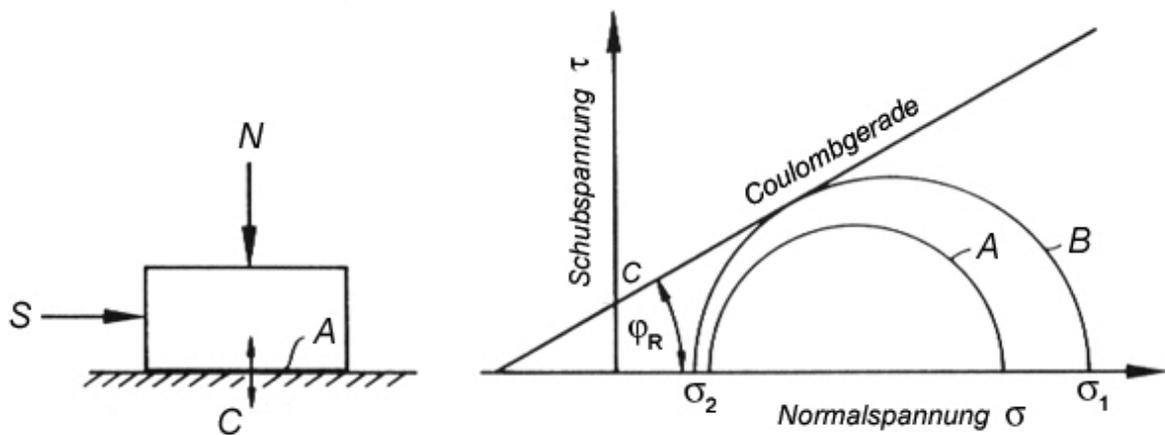


Abb. 2-5: Fließkriterium nach Mohr – Coulomb für ein kohäsives Schüttgut [6]

Der Mohrsche Spannungskreis ermöglicht es nun Spannungszustände in unterschiedlichen Ebenen eines Schüttgutelements im σ, τ Diagramm darzustellen. Es genügt nun nicht mehr nur ein Wertepaar um weitere Aussagen machen zu können, sondern man benötigt einen vollständigen Spannungskreis. So lassen sich zu Abb. 2-5 folgende Aussagen abgeben:

- Spannungszustände wie bei dem Spannungskreis A führen zu keiner plastischen, sondern nur zu elastischen Verformungen.
- Spannungskreise, die wie Kreis B die Coulombgerade tangieren, erfüllen den Fließzustand.
- Spannungskreise die über die Coulombgerade hinausgehen, sie also schneiden sind nicht möglich, da das Schüttgut über dieser Gerade keine weiteren Belastungen aufnehmen kann.

Das bisher besprochene und in den Abb. 2-4 und Abb. 2-5 dargestellte Fließkriterium nach Mohr – Coulomb ist noch an die Gegebenheiten der Bodenmechanik angepasst. Dort herrschen hohe und konstante Drücke, welche aber in der

Schüttgutmechanik kaum anzutreffen sind. In den niedrigen Druckbereichen, die bei der Lagerung von Schüttgut auftreten, ist die Abhängigkeit der Lage der Fließgrenze von der Schüttgutdichte nicht mehr zu vernachlässigen. Neben den bisherigen Einflussgrößen wie Kohäsion C und Reibungswinkel φ_R ist nun auch die Schüttgutdichte ρ_b zu berücksichtigen. In Abb. 2-6 ist zu sehen wie sich diese neue Einflussgröße auswirkt. Nach Jenike heißen die Fließgrenzen realer Schüttgüter Fließorte und weichen in folgenden Bereichen von der bisher betrachteten Coulombgeraden ab:

- Im Bereich kleiner Druckspannungen bildet sich ein gekrümmter Verlauf aus.
- Es gibt einen Endpunkt in Richtung steigender Druckspannung.
- Die Lage ist von der Schüttgutdichte abhängig.

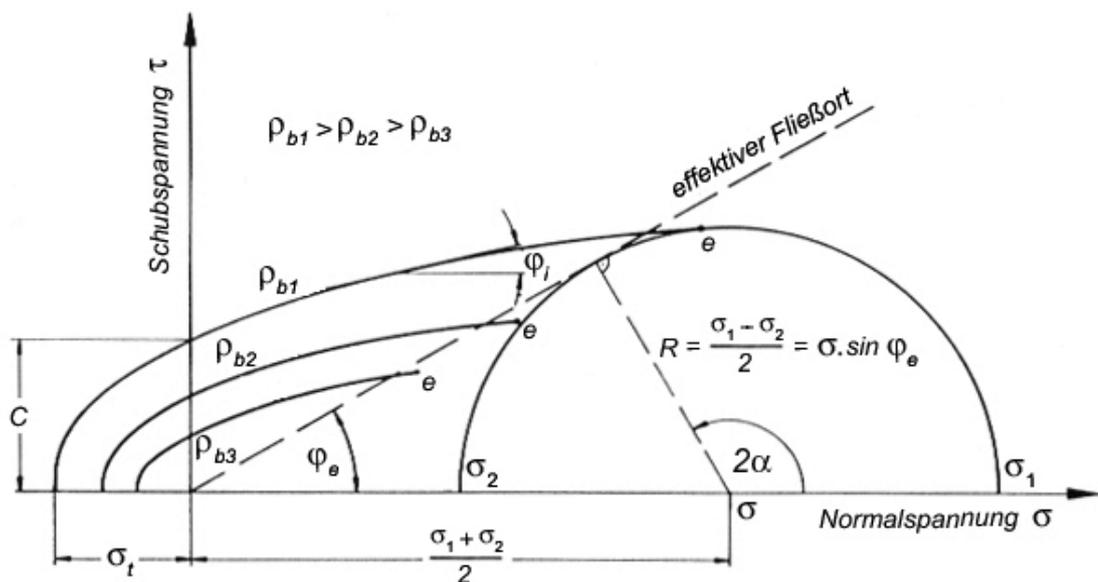


Abb. 2-6: Einfluss der Schüttgutdichte auf die Fließorte [6]

Die Abweichungen von der Geraden führen auch dazu, dass der Winkel der inneren Reibung nicht mehr konstant ist, sondern sich in Abhängigkeit von der Schüttgutdichte und der Normalspannung verändert. Die Kohäsion und die Zugfestigkeit nehmen, wie auch in der Praxis festzustellen ist, mit zunehmender Verdichtung zu.

Die Fließorte haben einen Endpunkt der das stationäre Fließen kennzeichnet. In diesem Zustand fließt das Schüttgut, ohne dass eine Änderung der Schüttgutdichte oder des Spannungszustandes eintritt. Durch diesen Endpunkt geht auch der dazugehörige Spannungskreis. Zeichnet man durch jeden Endpunkt e der Fließorte der unterschiedlichen Schüttgutdichten einen Spannungskreis, so lässt sich näherungsweise eine Gerade finden, die durch den Koordinatenursprung geht und alle Kreise tangiert. Diese Gerade, die nach Jenike effektiver Fließort genannt wird, dient mittels des Winkels φ_e (4) der Dimensionierung von Silos und Bunkern. [1, 6, 11]

$$\sin \varphi_e = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (4)$$

2.1.4 Scherversuche zur Ermittlung der Fließfähigkeit

Um die Werte zu erhalten, die nötig sind um die unterschiedlichen Fließorte mit ihren Endpunkten und den damit verbundenen effektiven Fließort zu bestimmen, müssen Scherversuche durchgeführt werden. Um den Spannungszustand eines Schüttgutelements eindeutig beschreiben zu können benötigt man drei Größen:

- die Normalspannung σ
- die Schubspannung τ
- die Schüttguldichte ρ_b bzw. die Porosität ε

In Abhängigkeit von der Vorgeschichte der Schüttgutproben können beim Fließen drei Fälle eintreten:

- Volumenvergrößerung
- Volumenkonstanz
- Volumenverkleinerung

Diese Abhängigkeit von der Vorgeschichte zwingt dazu, eine einheitliche Vorgeschichte für alle Proben zu verlangen, damit diese in Beziehung gesetzt werden können. Dies wird durch den Vorgang des „Anscherens“ erreicht, bei dem der Zustand des „stationären Fließens“ eintritt. Beim „stationärem Fließen“ sind die Normalspannung, die Schubspannung und die Schüttguldichte konstant. Damit wird das Schüttgut in einen definierten Verfestigungszustand gebracht. Im σ, τ Diagramm in Abb. 2-7 wird der Anscherpunkt über die Werte σ_{an} und τ_{an} gekennzeichnet.

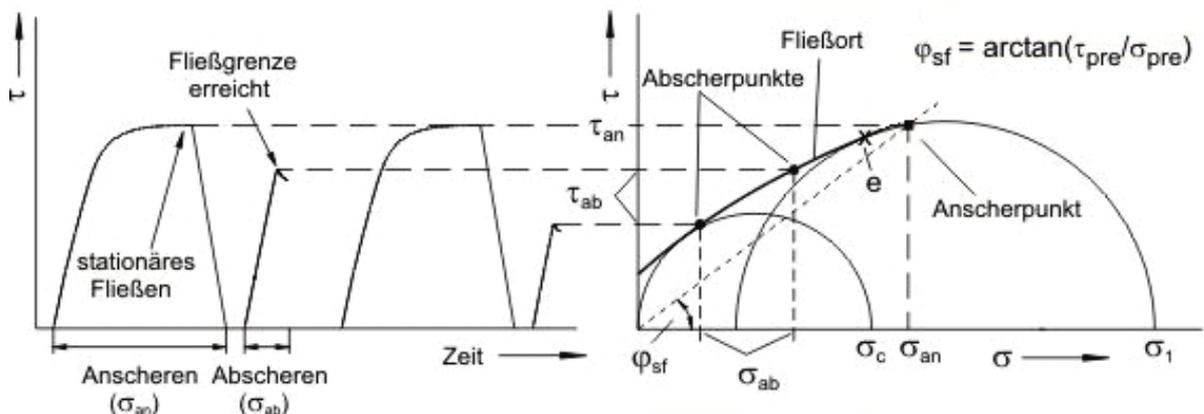


Abb. 2-7: Vorgänge beim Scherversuch [2]

Anhand der Abbildung ist zu erkennen dass das Anscheren sofort beendet wird wenn die Schubspannung sich nicht mehr verändert. Die Probe wird entlastet und dann mit einer Spannung $\sigma_{ab} < \sigma_{an}$ erneut belastet. Dieser Vorgang, genannt „Abscheren“, ist dann abgeschlossen wenn die Probe zu fließen beginnt.

Den gesamten Zyklus mit dem „Anscheren“ bei immer gleicher Spannung σ_{an} und dem „Abscheren“ bei immer anderer Spannung σ_{ab} wiederholt man nun so oft bis man genug σ_{ab}, τ_{ab} Wertepaare hat um die Fließortkurve zu zeichnen. Ändert man die Spannung σ_{an} beim „Anscheren“, so erhält man eine andere Schüttgutedichte und somit im weiteren Verlauf einen anderen Fließort. [2, 6, 7]

2.1.4.1 Jenike Schergerät

Die Jenike Scherzelle ist eines der am weitest verbreiteten Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von Schüttgütern durch Scherung. Diese ist besonders zur Ermittlung der Fließeigenschaften von feinkörnigen, kohäsiven Schüttgütern geeignet. Die in Abb. 2-8 dargestellte Anordnung zeigt den Schnitt durch die Scherzelle mit ihren beiden konzentrischen Ringen. Der bodenseitig geschlossene Ring 1 ist fixiert und der obere Scherring 2 liegt verschiebbar auf ihm. In den Raum, den die beiden Ringe bilden, kommt eine Probe des Schüttguts. Über den Scherdeckel 3 wird die in 4 einwirkende Normalkraft N flächig auf das Schüttgut übertragen. Die Scherkraft wird über den Scherpin 7 mit einer konstanten Geschwindigkeit eingebracht und zugleich über eine Kraftmessdose erfasst. Der maximale Scherweg ist auf die doppelte Wandstärke der Ringe begrenzt und beträgt somit nur etwa 5 mm. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Schüttgutprobe schon vor dem Start des Versuchs nahezu kritisch verfestigt wird. [6]

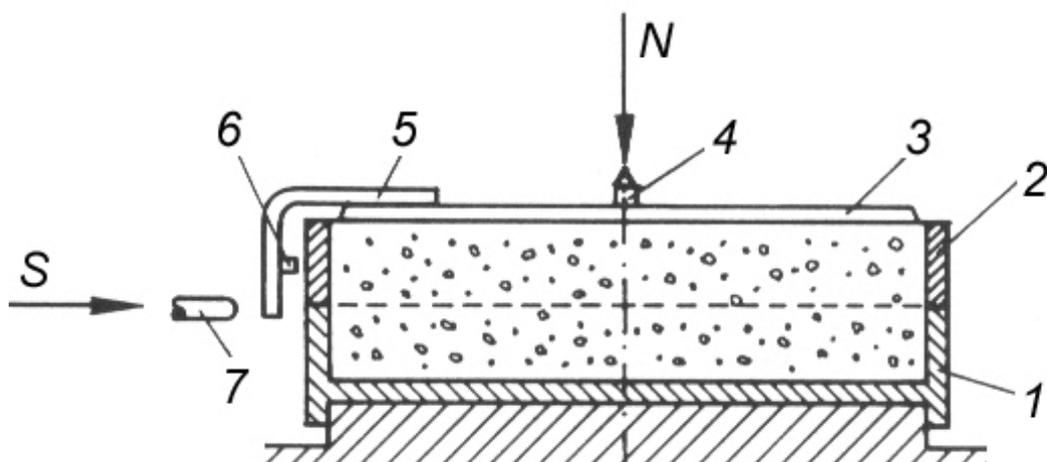


Abb. 2-8: Scherzelle des Jenike Gerätes [6]

2.1.4.2 Torsionsschergeräte

Bei diesem Gerät erfolgt die Scherverformung nicht translatorisch wie beim Jenike – Schergerät sondern rotatorisch. Zwei Bauformen von Torsionsschergeräten sind in Abb. 2-9 zu sehen. Abb. 2-9a stellt die Standardausführung dar und bei Abb. 2-9b ist ein Modell mit geteilter Scherzelle zu sehen. Das Problem bei dieser Art von Schergeräten ist, dass die Scherverformung vom Zentrum (keine Verformung) nach außen hin zu nimmt. Dafür kann aber ein unbegrenzter Scherweg realisiert werden. [13]

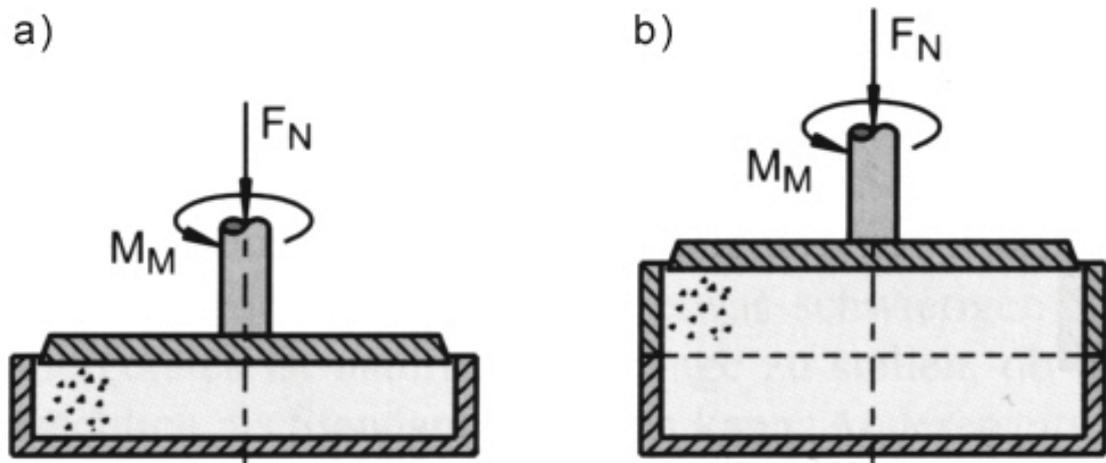


Abb. 2-9: Ausführungen von Torsionsschergeräten [13]

2.1.4.3 Ringschergeräte

Das Ringschergerät (siehe Abb. 2-10) stellt weitere eine Alternative zu den Translationsschergeräten wie dem Jenike Scherzelle dar und liefert genauere Werte als das Torsionsschergerät. Im Vergleich zur zuvor erwähnten Jenike Scherzelle eignen sich Ringschergeräte besser für grobkörniges, kohäsives Material. Vom Prinzip her wird auch hier der Scherversuch, wie bereits allgemein ausgeführt, mit „Anscheren“ und „Abscheren“ durchgeführt. Anstatt der Messung einer Kraft, wie S in Abb. 2-8, werden beim Ringschergerät zwei Kräfte (F_1 und F_2) gemessen. Ein großer Vorteil eines Ringschergeräts ist aber der unbegrenzte Scherweg in der Kreisbahn. Als Nachteile sind die erschwerte Messung von Proben unter Zeitverfestigung und die radienabhängig unterschiedlich realisierten Scherwege anzuführen. [3, 4, 6, 13]

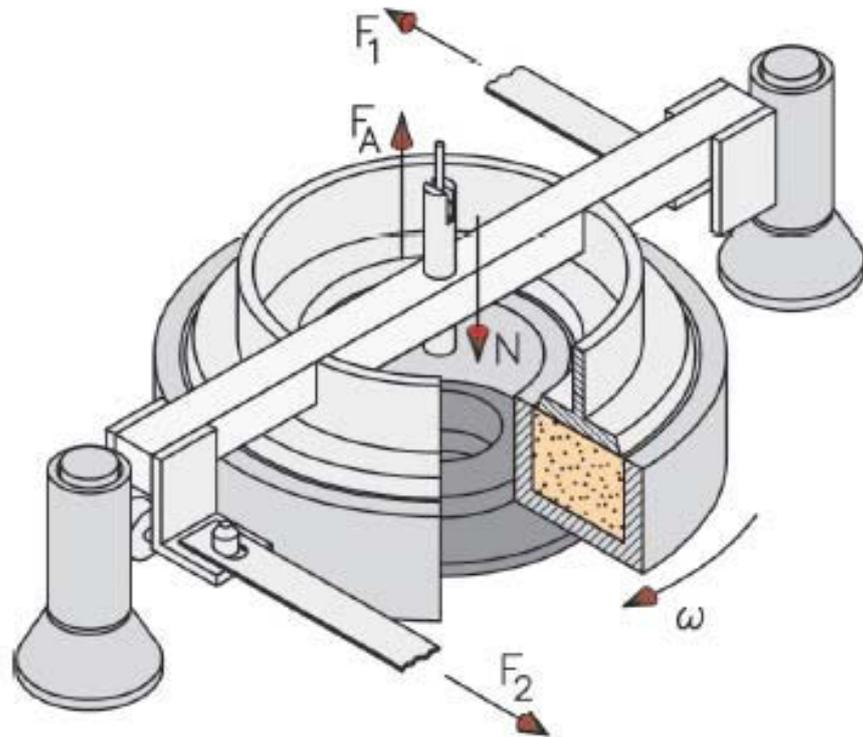


Abb. 2-10: Ringscherzelle [3]

2.1.4.4 Gerät zur Messung der Wandreibung

Für Auslegungszwecke ist neben den spezifischen Schüttgutkennwerten auch noch das Zusammenspiel des Gutes mit dem Material des Behälters interessant. Zu diesem Zweck wird der Wandreibungswinkel mit einem der Jenike Scherzelle ähnlichem Aufbau ermittelt (siehe Abb. 2-11). [4, 6]

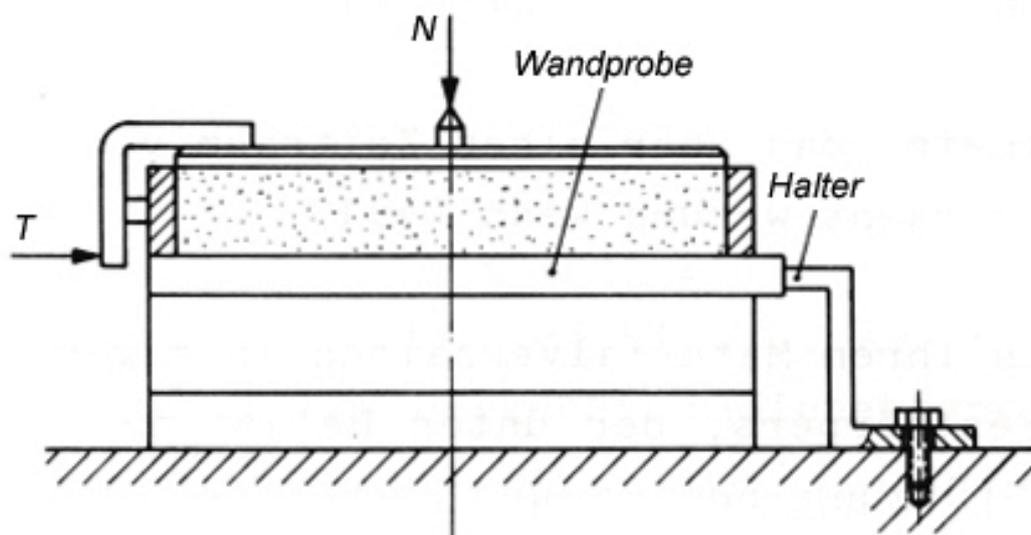


Abb. 2-11: Ermittlung der Wandreibung [4]

2.1.5 Übersicht über weitere Prüfverfahren

Die drei vorgestellten Prüfgeräte (das Gerät zur Messung der Wandreibung zählt als Sonderversion vom Jenike – Schergerät nicht dazu) sind für die Erfassung von Daten zur Ermittlung des Schüttgutverhaltens am besten geeignet, da sie nachfolgende Anforderungen vollkommen bzw. weitgehend erfüllen.

1. Verfestigungsvorgang mit anschließender Messung der Festigkeit
2. Verfestigung der Schüttgutprobe bis zum Erreichen des stationären Fließens
3. Nicht oder nur gering voneinander abweichende Beanspruchungsrichtungen (gleiche Richtungen der größten Hauptspannungen) beim Verfestigen und beim Messen der Festigkeit
4. Reproduzierbare Beanspruchung der Probe bei der Verfestigung (4a) und beim Messen der Festigkeit (4b).
5. Bekannte mittlere Spannungen in der Messebene bei möglichst homogener Spannungsverteilung beim Verfestigen (5a) und beim Messen der Festigkeit (5b).
6. Möglichkeit zur Variation der Verfestigungsspannung (Anpassung an die Anwendung für die die Messungen durchgeführt werden).
7. Möglichkeit zur Messung der Zunahme der Druckfestigkeit mit der Zeit (Auswirkung der Zeitverfestigung auf die Eigenschaften)

Die nachfolgenden Geräte und Verfahren werden dahingehend untersucht ob sie die obigen Punkte erfüllen, ob sie andere Vergleichswerte liefern und welche Einschränkungen zu berücksichtigen sind. [13]

2.1.5.1 Fließfähigkeitsindex nach Carr

Um diesen Fließindex zu erhalten wird die Summe der Werte von vier unterschiedlichen Messungen gebildet. Jede dieser Messungen liefert eine Zahl zwischen 0 und 25. Eine Messung ermittelt den Böschungswinkel von Schüttgut auf einer runden Platte die fünfmalig gleich stark erschüttert wurde (siehe Abb. 2-12a). Bei diesem Winkel wird auch vom Fallwinkel gesprochen.

Die Ermittlung des Spatelwinkels geschieht durch die Messung des Böschungswinkels auf einem Spatel der, nachdem er mit Schüttgut überdeckt wurde, senkrecht nach oben bewegt wird (siehe Abb. 2-12b).

Die dritte Messung ist das Sieben des Schüttgutes (siehe Abb. 2-12c) unter festgelegten Rahmenbedingungen und der letzte Punkt ist die Messung des Schüttgutgewichts und des Stampfgewichts. [13]

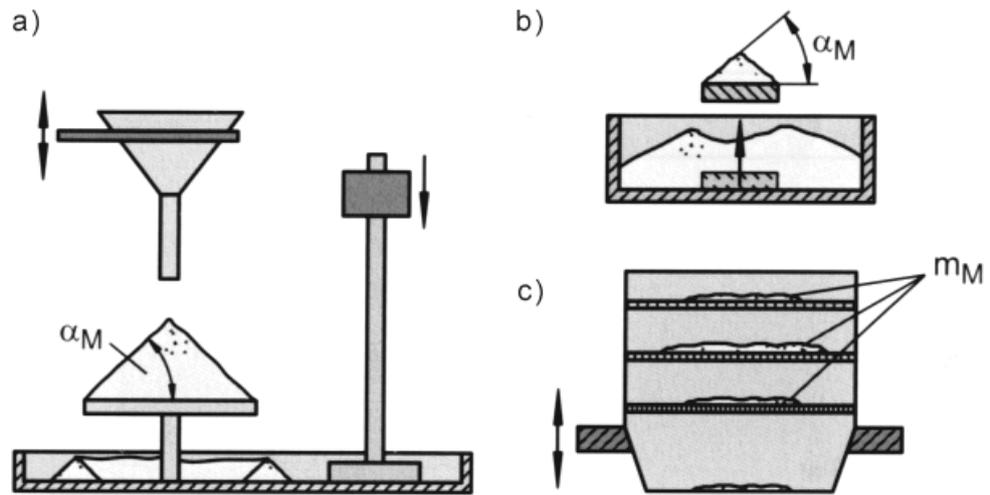


Abb. 2-12: Messprinzipien zur Ermittlung des Fließindex nach Carr [13]

Der Fließfähigkeitsindex ist ein qualitativer Vergleichstest für feinkörnige Schüttgüter ohne quantitative Aussage hinsichtlich Fließfähigkeit und Zeitverfestigung. [13]

Kriterium:	1	2	3	4a/4b	5a/5b	6	7
Erfüllt?	nein	-	-	-	-	-	nein

Tab. 2-1: Bewertung des Fließfähigkeitsindex nach Carr [13]

2.1.5.2 Rührer

In einen Behälter in den ein Rührer hineinragt, dessen Blätter gerade oder geneigt sind, wird das zu prüfende Schüttgut eingefüllt (siehe Abb. 2-13). Anhand des gemessenen Rührerdrehmoments wird das Schüttgut beurteilt. Manchmal werden auch Werte wie Drehzahl, Vertikalkraft, usw. berücksichtigt. [13]

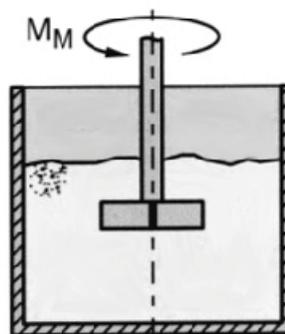


Abb. 2-13: Rührer im Schüttgut [13]

Dieses Prüfverfahren liefert keine quantitative Aussage über die Fließfähigkeit oder den Einfluss von Zeitverfestigung. Das Schüttgut befindet sich während der

Untersuchung in einem bewegten und aufgelockerten Zustand. Es können Effekte wie Fluidisation oder Agglomeration auftreten. [13]

Kriterium:	1	2	3	4a/4b	5a/5b	6	7
Erfüllt?	nein	–	–	–	–	–	nein

Tab. 2-2: Bewertung des Rührers [13]

2.1.5.3 Verdichtbarkeitsmessung

Dieses Verfahren kann auf zwei Arten durchgeführt werden. Einerseits mittels Verdichtung einer Schüttgutprobe (siehe Abb. 2-14a) mit Gegenüberstellung von der notwendigen Kraft und der damit erreichten Schüttguldichte. Die andere Möglichkeit bedarf zweier Messwerte. Ein Wert ist die Schüttguldichte in unverdichtetem Zustand und der andere die Stampfdichte die mittels eines Stampfvolumeter (siehe Abb. 2-14b) ermittelt wird. Mit den beiden Werten wird ein Index errechnet der über die Fließfähigkeit Auskunft geben soll. [13]

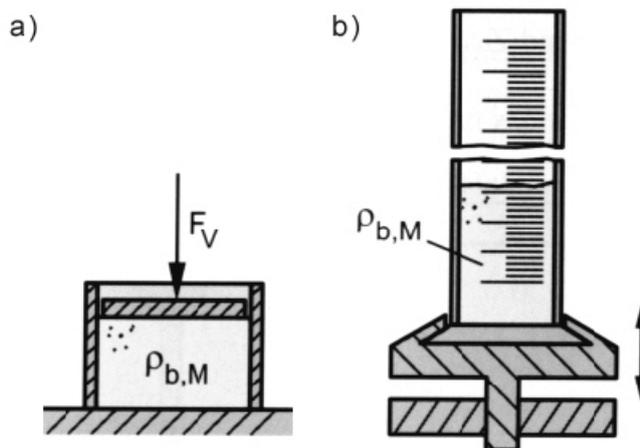


Abb. 2-14: a) einfache Verdichtbarkeitsmessung b) Stampfvolumeter [13]

Bei diesen Verfahren handelt es sich um geräteabhängige, qualitative Vergleichsmessungen für feinkörnige Schüttgüter. [13]

Kriterium:	1	2	3	4a/4b	5a/5b	6	7
Erfüllt?	nein	–	–	–	–	–	nein

Tab. 2-3: Bewertung der Verdichtbarkeitsmessung [13]

2.1.5.4 Cohesion Tester, Flowability Test

Bei der Abb. 2-15a handelt es sich um den Warren Bradford Cohesion Tester bei der die Schüttgutprobe zuerst verdichtet wird und in die daraufhin ein mit radialen

Lamellen versehenes Rad gedrückt wird. Ist das Rad vom Schüttgut bedeckt wird es gedreht und das maximale Drehmoment gemessen. Dieses Drehmoment wird in eine Schubspannung umgerechnet und als Kohäsion interpretiert. Ähnlich funktioniert der Flowability Test (siehe Abb. 2-15b), nur mit dem Unterschied, dass die Verdichtung stattfindet wenn sich der Rührer im Schüttgut befindet. [13]

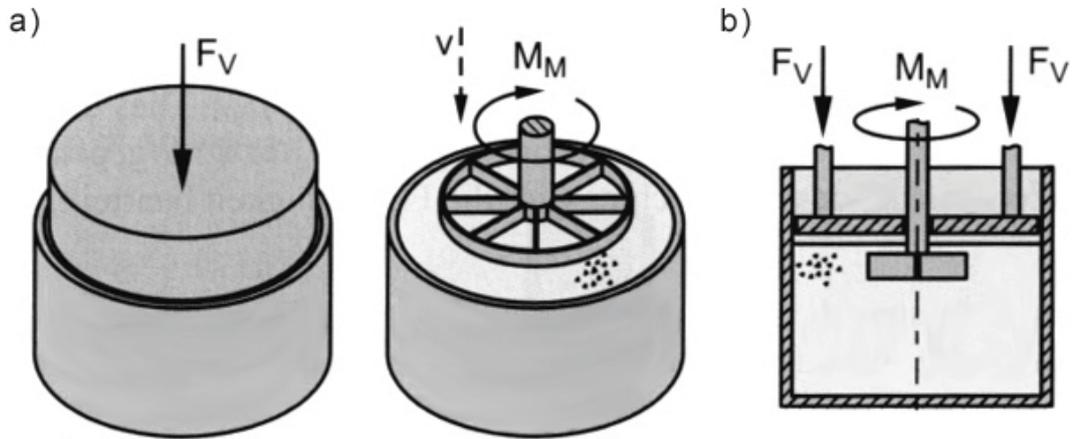


Abb. 2-15: a) Warren S. Bradford Cohesion Tester, b) Flowability Test [13]

Die beiden Messverfahren werden als qualitative Vergleichsmessung hinsichtlich eines Wertes ähnlich der Kohäsion eingestuft. [13]

Kriterium:	1	2	3	4a/4b	5a/5b	6	7
Erfüllt?	ja	nein	nein	ja/ja	ja/nein	ja	nein

Tab. 2-4: Bewertung Cohesion Tester und Flowability Test [13]

2.1.5.5 Penetration Test

Wie in Abb. 2-16 zu sehen ist wird die Schüttgutprobe erst in vertikaler Richtung verfestigt und anschließend mit einer Spitze geprüft. Die Kraft die notwendig ist um die Spitze so weit in das Schüttgut zu drücken das es zum Bruch entlang gekrümmter Gleitlinien kommt wird gemessen und unter vereinfachten Maßnahmen in eine Druckfestigkeit umgerechnet. [13]

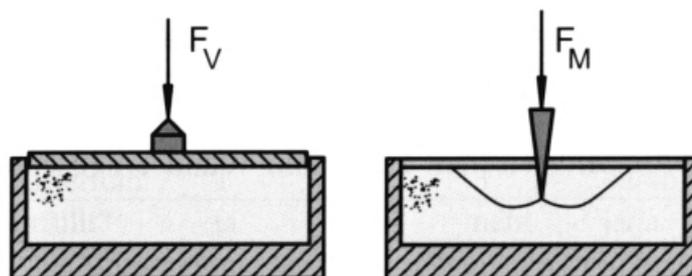


Abb. 2-16: Penetration Test [13]

Auch hier handelt es sich vom Prinzip her um eine qualitative Vergleichsmessung. [13]

Kriterium:	1	2	3	4a/4b	5a/5b	6	7
Erfüllt?	ja	nein	nein	ja/ja	ja/nein	ja	ja

Tab. 2-5: Bewertung für Penetration Test [13]

2.1.5.6 Johanson Hang-up Indiciser™, ähnliche Messprinzipien

Das Prinzip dieser Gruppe von Prüfverfahren ist, dass zuerst die Schüttgutprobe mit einem größeren Stempel verfestigt wird und der Prüfvorgang mit einem kleineren Stempel durchgeführt wird, wobei aber erst ein Teil des Behälterbodens entfernt wird. Die Rahmenbedingungen für die einzelnen Verfahren variieren teils sehr stark, wie zum Beispiel beim Durchmesser der Behälter und der Stempel (siehe Abb. 2-17). Aus der Kraft bei der der Bruch erfolgt und der Kraft die zuvor für die Verdichtung aufgewendet wurde wird die Druckfestigkeit bzw. ein das Schüttgut beschreibender Index errechnet.

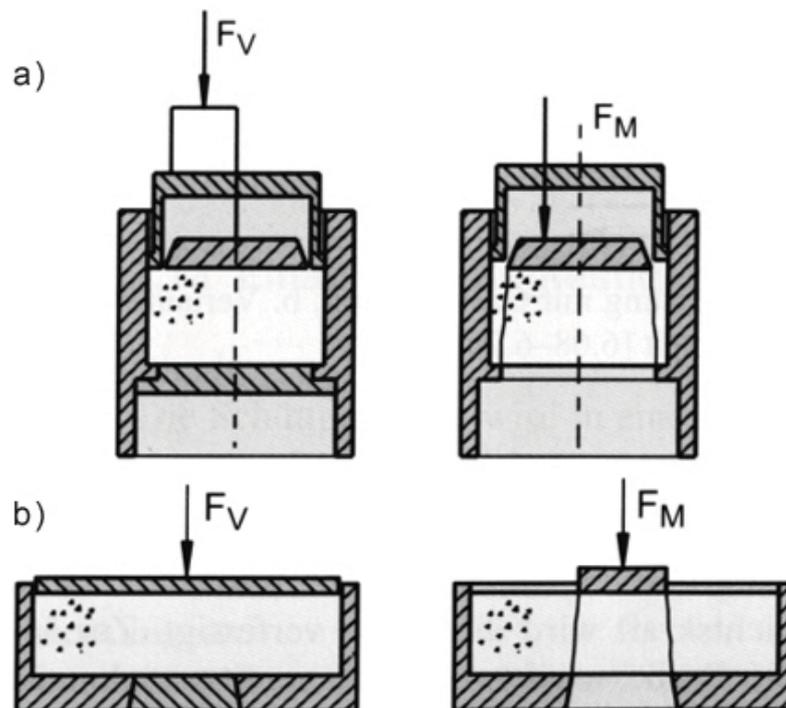


Abb. 2-17: a) Johanson Hang-up Indiciser™, b) Drucktopf [13]

Mit diesen Verfahren ist eine qualitative Aussage hinsichtlich Fließfähigkeit und Zeitverfestigung möglich. Ein Vorteil dieser Gruppe an Prüfverfahren ist, dass es automatisierte Geräte gibt wie den der Johanson Hang-up Indiciser™ und sich so der Aufwand für eine Prüfserie reduziert.

Kriterium:	1	2	3	4a/4b	5a/5b	6	7
Erfüllt?	ja	nein	nein	ja/ja	nein/nein	ja	ja*

* bei Langzeitbelastung mit Verfestigungsspannung

Tab. 2-6: Bewertung des Johanson Hang-up Indiciser™, ähnliche Prinzipien [13]

2.1.5.7 Zweiachsiger Druckversuch (Biaxial compression test)

In Abb. 2-18 ist das Prinzip dieses Tests dargestellt. Die Verfestigung mittels einer Druckplatte mit rauher Unterseite erfolgt durch das Zusammenspiel von Druckstab und Führungsstab bis stationäres Fließen eintritt. Nach dem stationären Fließen wird das Schüttgut entlastet und der Führungsstab entfernt. Die Druckplatte wird dann über den Druckstab erneut belastet bis Fließen eintritt. Über die gemessene maximale Kraft F_M im Druckstab ergibt sich die Druckfestigkeit des Schüttgutes. [13]

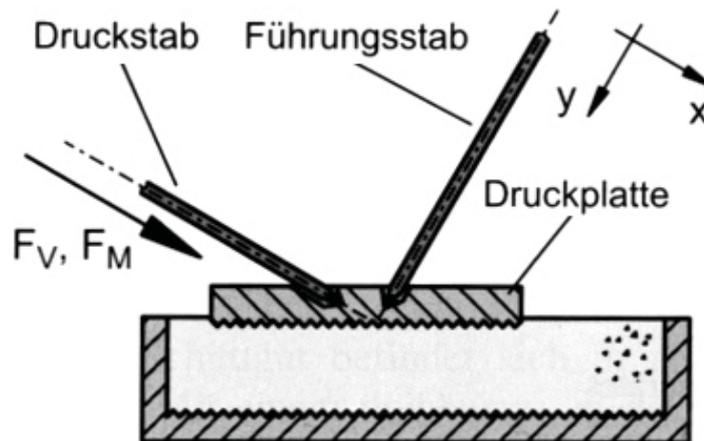


Abb. 2-18: Prinzip des zweiachsigen Druckversuchs [13]

Dieses Messverfahren ermöglicht eine quantitative Aussage zur Fließfähigkeit.

Kriterium:	1	2	3	4a/4b	5a/5b	6	7
Erfüllt?	ja	nein	ja	ja/ja	ja/ja	ja	ja

Tab. 2-7: Bewertung des zweiachsigen Druckversuchs [13]

2.1.6 Probleme beim Austrag

Bunker und Silos dürfen nicht nur nach den statischen Belangen ausgelegt werden. In den vorhergehenden Kapiteln ist bereits ausführlich darauf eingegangen worden, dass jedes Schüttgut eine eigene Charakteristik hat, die auch von den äußeren Umständen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst wird. Besonders bei Schüttgütern, die nach

einer Einteilung von Taubmann [5] (siehe auch Tab. 2-8) einen Wert über 5 besitzen, ist besondere Vorsicht geboten.

	Böschungswinkel	Plattenband-aufgeber	Band-aufgeber	Trogketten-förderer	Schnecken-aufgeber	Schwing-aufgeber	Walzen-aufgeber	Zellenrad-aufgeber	Hängketten-aufgeber	Schuban-aufgeber	Teller-aufgeber	Drehkratzer	Schwierigkeits-grad
Aluminiumoxyd	30°			×	×			×					4-5
Ammonsulfat	30-60°		×			×						×	6-8
Asche (trocken)	40-60°		×	×	×	×		×					2-3
Asche (naß)	45-60°		×								×		5-7
Baryt	30-45°	×	×	×		×							2-5
Bohnen	30-45°		×	×		×							2
Dolomit	30-45°	×	×			×			×	×	×	×	2-5
Eisensulfat	30-45°		×			×							6
Erze (schwer)	40-50°	×				×			×	×	×	×	4
Erze (leicht)	40-50°	×		×		×	×			×			4-5
Fischmehl	45-60°		×	×	×	×							5-6
Flugasche (trocken)	20°			×	×			×					7-8
Getreide	45°			×	×	×							1-2
Gips	30-45°		×	×	×								2-5
Hochofenschlacke	30-45°		×			×	×				×		1,5-3
Holzspäne	45-60°			×	×								9,5-10
Kalk (gelöscht)	35°		×	×	×	×						×	6
Kalkhydrat	5°/60°							×					8-10
Kalkstein	30-45°	×	×			×			×	×	×	×	2-4
Kies	30-45°		×			×	×				×		1,5-2,5
Kohle (normal)	35-45°	×	×	×	×	×				×	×	×	3
Kohle (stark schleißend)	35-45°	×	×	×	×	×				×	×		4
Kohlenschlamm	—	×	×	×	×	×							5-6
Kohlenstaub	30-60°			×				×					6
Koks	30-45°	×	×			×						×	4-5
Magnesit	30-45°	×	×			×			×	×	×	×	3
PVC (körnig)	30-45°		×			×							2
PVC (Pulver)	30-60°				×			×					3-6
Rohmehl (Zement)	30-45°			×	×			×					6-8
Ruß	15-30°			×	×			×					7-9
Sägemehl	45-60°		×	×	×								5-7
Salz (stückig)	30-45°	×	×			×				×	×	×	2-4
Salz (Kochsalz)	30-45°		×			×	×	×				×	3
Sand (trocken)	30-45°		×			×	×			×	×	×	2
Sand (feucht)	45-60°		×			×	×				×	×	3-6
Schamotte	30-45°		×		×	×		×			×		2-5
Talkum (gebrochen)	30-45°	×	×			×	×		×	×	×	×	2-4
Talkum (Puder)	30-45°		×	×	×	×		×					4-6
Titanoxyd	45-60°				×			×					6
Ton (Lehm)	45-60°	×	×			×					×	×	7,5-10
Waschberge	38-45°	×	×			×		×	×	×	×	×	4
Zement	5°/60°			×	×			×					6-8
Zementklinker	30-45°	×	×			×					×		2-3
Zinkweiß	30-60°				×			×					6-8
Zucker (körnig)	30-45°		×	×	×	×	×	×			×		2-3
Heißgut		×				×				×	×		3-5,5
hygroskopische Stoffe			×								×	×	5-9
klebende Stoffe				×	×							×	6-8,5
körnige Stoffe			×	×	×	×		×	×			×	1-3
Staub					×			×					5-8,5

Tab. 2-8: Schwierigkeitsgrade nach Taubmann, zus. mit Böschungswinkel und Austragsvorschlag [5]

Der Austrag kann unter ungünstigen Bedingungen durch die im folgenden beschriebenen Probleme unregelmäßig werden, sich verlangsamen, ins Stocken geraten

oder das Geförderte entspricht nicht mehr der ursprünglichen Spezifikation für die Weiterverarbeitung.

2.1.6.1 Brückenbildung

Es bildet sich ein stabiles Gewölbe über der Ausflussöffnung, das einen weiteren Austrag des Schüttgutes verhindert. Die Ursache dieser Störung des Austrages beruht bei groben, kohäsionslosen Schüttgütern auf einer Verkeilwirkung von Einzelteilchen, wogegen bei feinkörnigen, kohäsiven Schüttgütern die durch Haftkräfte bedingte Festigkeit die Ursache darstellt. [6]

Die Brückenbildung (Abb. 2-19a) gehört zu den Problemen die sehr oft auftreten. Häufig, wenn es keine speziellen Einrichtungen zur Zerstörung der Brücke gibt, wird manuell die Fließfähigkeit wieder hergestellt indem die Silowand mit einem Hammer bearbeitet oder mit einer langen Stange über die Ausflussöffnung das Schüttgut zum Fließen angeregt wird.

Einer der wichtigsten Faktoren bei der Bildung einer Brücke aus Schüttgut ist die kritische Auslaufgröße. Die Berechnung dieser Größe kann überschlagsmäßig durch die Formeln (5) berechnet werden. In diesen Formeln ist x_{max} die größte Partikelgröße, die für den Durchmesser d eines kreisförmigen und die Breite b eines schlitzförmigen Auslaufes bestimmend ist.

$$d > 10 * x_{max}$$

$$b > 7 * x_{max} \quad (5)$$

Eine genauere Berechnung ist für feinkörnige Schüttgüter problemlos möglich. Für kohäsionslose, grobkörnige Schüttgüter gelten Erfahrungswerte. Auf Schüttgüter bei denen man wie im vorliegenden Fall keine Korngröße im eigentlichen Sinn definieren kann und die über ein hohes Maß an kohäsiven Kräften verfügen wird nicht eingegangen. [7]

Neuere Bücher und Artikel nehmen sich schon verstärkter der Problematik der Lagerung von Kunststoffrecyclaten an, jedoch sind Kennwerte für eine Berechnung und detaillierte Falluntersuchungen immer noch Mangelware. Es wird aber nachdrücklich darauf hingewiesen, dass Recyclate wegen ihrer teilweise sehr geringen Schüttdichten (um 50 kg/m^3), ihrer Form, die leicht ein Verhaken ermöglicht, und fallweise wegen ihrer statischen Aufladung stark zu Brückenbildung neigen. [8, 9]

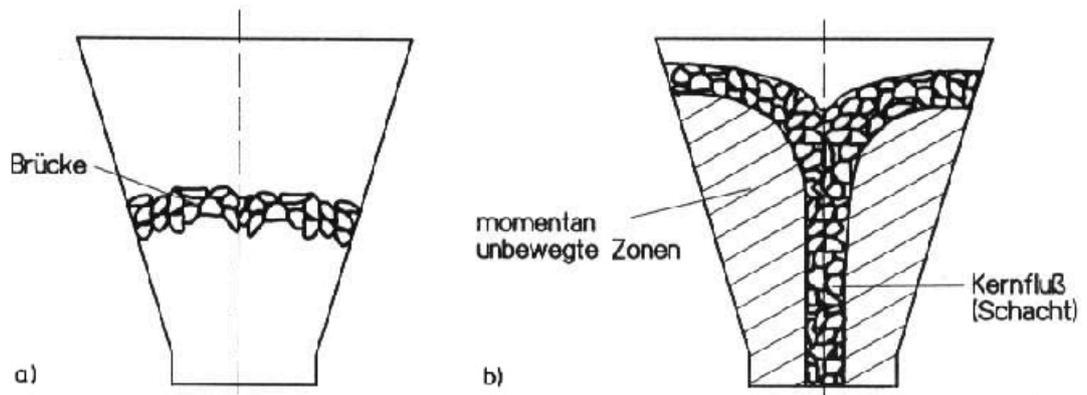


Abb. 2-19: Auslaufstörungen aus einem Silo/Bunker [8]

2.1.6.2 Schachtbildung

Bei der Schachtbildung (Abb. 2-19b) kommt es zwar im Gegensatz zur Brückenbildung zu einem Materialfluss, aber es fließt nur das Schüttgut aus, das sich über der Auslauföffnung befindet. Ist es beim Schüttgut zu einer partiellen Änderung der Festigkeitswerte gekommen, z.B. durch Entmischen beim Füllen, durch Feuchtigkeits- und/oder Temperaturunterschiede, dann entstehen asymmetrische Schächte. Ein durchaus wichtiger Aspekt der beachtet werden muss ist, dass bei der Schachtbildung die Füllstandskontrollen getäuscht werden, welche sich meist an der Behälterwand befinden. [6]

2.1.6.3 Unregelmäßiges Fließen

Das unregelmäßige Fließen entsteht durch ein Zusammenspiel der Brücken und der Schachtbildung. Beide Probleme treten dabei immer nur kurzzeitig auf indem kontinuierlich Brücken in darunter liegende Schächte einstürzen und beim Aufprall wegen der Verdichtung neue Brücken bilden. Ein gesicherter Massenstrom und somit eine Dosierung der Schüttgutmenge ist so nicht zu gewährleisten. [6]

2.1.6.4 Entmischungserscheinungen

Beim Befüllen der Silos und Bunker kann es aufgrund unterschiedlicher Partikelgröße, -dichte und/oder -form zu Entmischungen kommen, die sich dann auf das Austragsverhalten auswirken. Beim zentrischen, mechanischen Befüllen bildet sich ein Schüttkegel aus, bei dem die größeren Partikel aufgrund ihrer größeren Masse und somit mit ihrer höheren kinetischen Energie in der Peripherie ansammeln (Abb. 2-20a). Das Schüttgut mit dem hohen Feinanteil aus dem Zentrum wird, da es

sich über dem Auslass befindet, zuerst ausgetragen. Nach einiger Verzögerung kommt es zum Austrag des Grobgutes (Abb. 2-20b). Für nachgeschaltete Prozesse, die eine gleichmäßige Partikelgrößenverteilung bedingen, ist ein derartiger Vorgang nicht hinnehmbar.

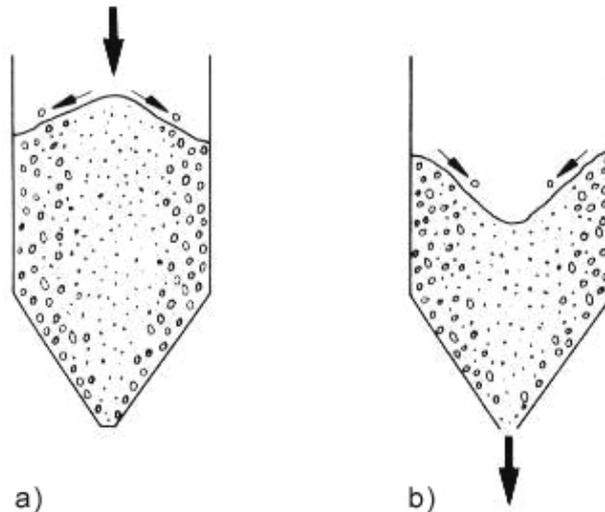


Abb. 2-20: Schüttgutverhalten bei zentraler, mechanischer Befüllung [7]

Ähnliches kann bei einer zentralen, pneumatischen Befüllung passieren, nur dass hier die Partikelverteilung das genaue Gegenteil darstellt (Abb. 2-21a). Bei zu hohen Füllständen entsteht eine Vertiefung in der sich die grobkörnigen Partikel sammeln während sich das Feingut von der Lüstströmung an die Peripherie tragen lässt. Logischerweise erfolgt nun zuerst der Austrag des Grobgutes und erst zum Schluss der des Feingutes (Abb. 2-21b).

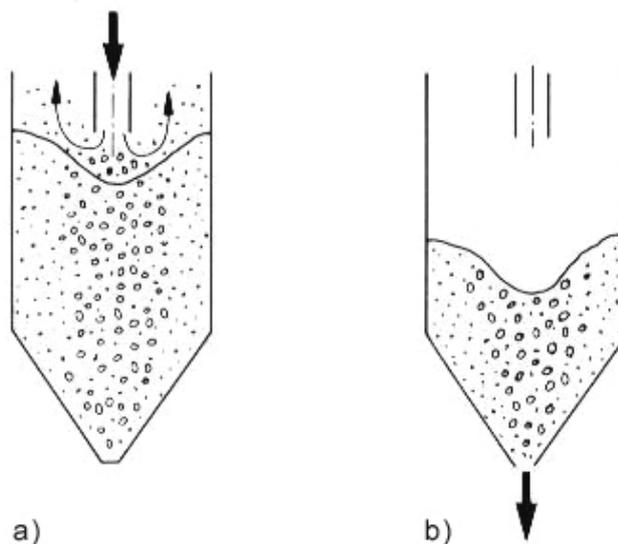


Abb. 2-21: Schüttgutverhalten bei zentraler, pneumatischer Befüllung [7]

Ein anderer Entmischungszustand stellt sich bei tangentialer, pneumatischer Befüllung ein, da wie in Abb. 2-22a angedeutet der Zykloneffekt zum Tragen kommt.

Die Entmischung findet sowohl über den Querschnitt als auch entlang des Umfangs statt. Der ganze Vorgang führt dazu, dass sich kein zentraler Abflusstrichter bildet, sondern sich eine asymmetrische Fließzone ausbildet (Abb. 2-22b).

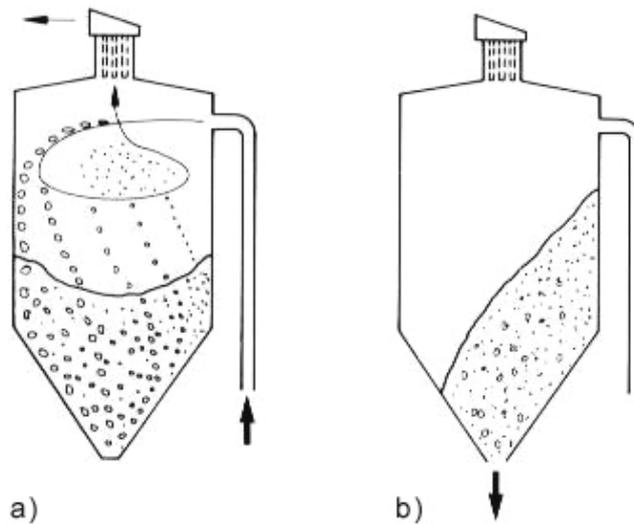


Abb. 2-22: Schüttgutverhalten bei tangentialer, pneumatischer Befüllung [7]

Zu einer asymmetrischen Fließzone kann es auch kommen wenn eine horizontale, pneumatische Befüllung zum Einsatz kommt. [7]

Um Entmischungen zu reduzieren bzw. zu verhindern gibt es verschiedene Möglichkeiten, von denen einige in Abb. 2-23 dargestellt sind.

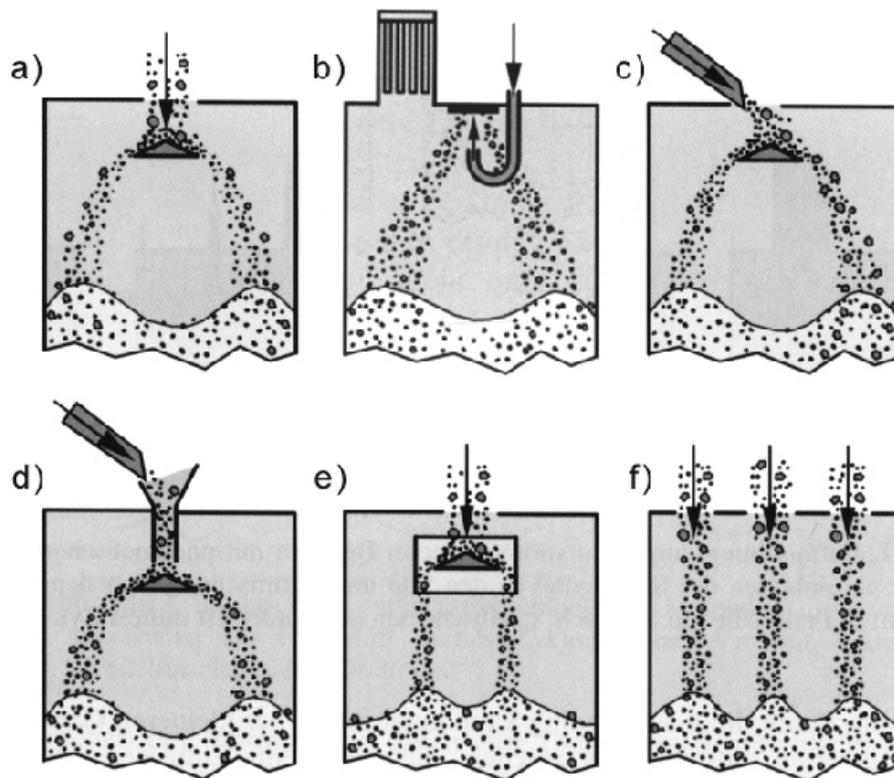


Abb. 2-23: Möglichkeiten zur Reduzierung der Entmischung [13]

Abb. 2-23b zeigt wie sich die Entmischung bei pneumatischer Befüllung reduzieren lässt indem der Förderstrom auf einer Prallplatte auftrifft. Wird der Bunker oder Silo über mehrere Öffnungen befüllt wie in Abb. 2-23f zu sehen, so führt dies ebenfalls zu einer besseren Partikelverteilung. Abb. 2-23c zeigt wie eine Verteilerplatte falsch eingesetzt werden kann. Abb. 2-23a, d und e sind Beispiele für einen verbesserten Einsatz einer Verteilerplatte, doch die Ergebnisse sind recht unterschiedlich und für jeden Anwendungsfall zu untersuchen. [13]

2.1.6.5 Schießen von Material

Dieses Problem tritt hauptsächlich bei feinkörnigen Schüttgütern auf, wenn Schächte und Brücken einstürzen. Die in den Hohlräumen, in den Schächten und unter den Brücken vorhandene Luft führt beim Einsturz zu einer Fluidisierung des Schüttgutes. Aufgrund der flüssigkeitsähnlichen Eigenschaften ist der Schüttgutstrom nicht mehr durch Absperr- und Dosierorgane zu kontrollieren. Wegen des Durchschießens des Schüttgutes kommt es zu einer erheblichen Staubentwicklung, die vor allem bei staubexplosionsgefährdeten Schüttgütern ein großes Risiko darstellt. [7]

2.1.6.6 Unterschiedliche Verweilzeiten des Schüttgutes

Tote Zonen in einem Silo oder Bunker führen zu einer breiten Verweilzeitverteilung. Nicht immer sind solche toten Zonen unerwünscht, wie noch beim Thema Kernfluss im Kapitel 2.1.7.2 gezeigt wird. Häufig stellen aber solche toten Zonen ein großes Problem dar und sind von der Planung her nicht vorgesehen. Vor allem bei Gütern, die bei längerer Lagerung ihre Eigenschaften ändern, kann es zu Störungen der nachfolgenden Verarbeitung kommen. Entweder wird in einem entsprechenden Zeitrahmen der Lagerbehälter vollkommen entleert und/oder angepasste Austragshilfen bauen die toten Zonen kontinuierlich ab. Wie kritisch sich tote Zonen auf die Verweilzeitverteilung auswirken können ist in Abb. 2-24 ersichtlich. Die mittlere Verweilzeit, die für die Fälle ohne (6) (a in Abb. 2-24) und mit (7) (b in Abb. 2-24) toten Zonen berechnet werden kann, zeigt dass tote Zonen die mittlere Verweilzeit verkürzen, aber die Streuung deutlich erhöhen. [7]

$$\bar{t}_1 = \frac{V_s}{\dot{V}} \quad (6)$$

$$\bar{t}_2 = \frac{V_s - V_t}{\dot{V}} \quad (7)$$

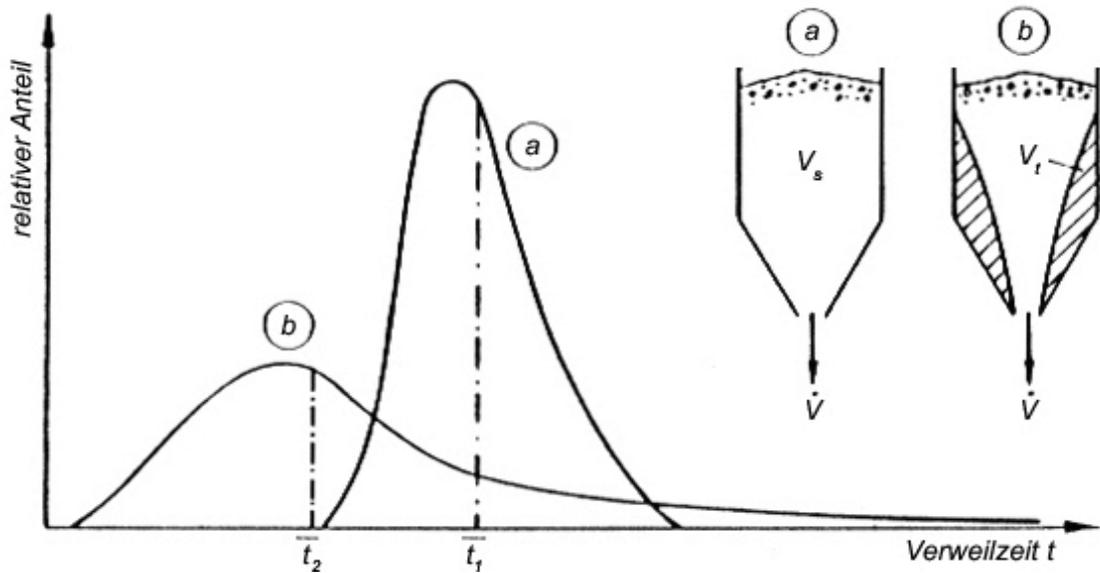


Abb. 2-24: Verweilzeitverteilung bei Bunkern und Silos [6]

Es ist auf jeden Fall wichtig, dass bei Silos mit toten Zonen die Füllstandskontrolle für eine effektive Messung entsprechend angebracht wird. [6]

2.1.7 Fließprofile

Beim Fließen von Schüttgütern wird eine Unterscheidung zwischen Massenfluss und Kernfluss vorgenommen. Die Abb. 2-25 zeigt die beiden Profile wie man sie sich idealisiert vorstellen kann. [6]

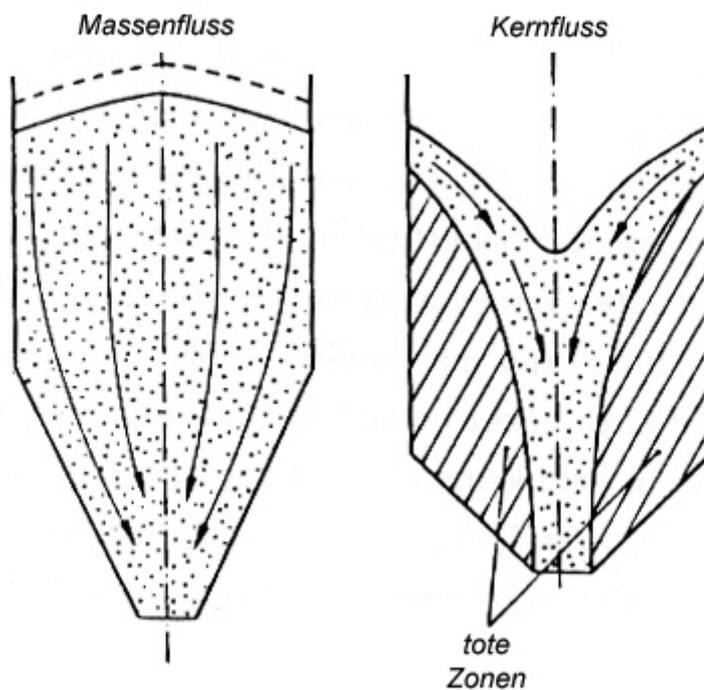


Abb. 2-25: Fließprofile in Silos und Bunkern [6]

2.1.7.1 Massenfluss

Wird aus einem Lagerbehälter, der eine Auslegung auf Massenfluss hat, Schüttgut abgezogen, so wird die gesamte Behälterfüllung in Bewegung versetzt. Um derartiges zu erreichen müssen die Trichterwände entsprechend glatt und steil sein. Außerdem darf der Behälter keine scharfen Kanten oder abrupte Übergänge haben und die Reibungsverhältnisse dürfen sich nicht stellenweise verschlechtern. Kennzeichnend für Massenfluss ist die gleichmäßige und relativ geringe Geschwindigkeit der Schüttgutsäule. Ein weitgehend konstanter Auslaufmassenstrom, eine verminderte Gefahr des Schießens von Material und verminderte Entmischungserscheinungen runden das Eigenschaftsprofil ab. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist eine Auslegung auf Massenfluss der Auslegung auf Kernfluss vorzuziehen, da sich so Austragsprobleme von Anfang an vermeiden lassen, speziell bei feinkörnigen, kohäsiven Schüttgütern. [6]

2.1.7.2 Kernfluss

Zu Kernfluss kommt es wenn die Trichterwände zu rau und/oder zu flach sind. Es kann auch kurzzeitig Kernfluss auftreten wenn zu starke Entmischungserscheinungen im Schüttgut vorliegen (siehe Kapitel 2.1.6.4.). Tritt Kernfluss auf, so fließt zunächst nur Schüttgut aus der zentralen Zone über der Austragsöffnung aus. Ein Abflusstrichter entsteht bei weiterer Entleerung, in welcher dann Schüttgut von den Seiten nachfließt. Während dieses ganzen Prozesses befinden sich tote Zonen in der Peripherie die das aktive Lagervolumen reduzieren. Diese toten Zonen, die in Abb. 2-25 beim Kernfluss zu sehen sind, sind auch für die bereits erwähnte ungünstige Verweilzeitverteilung des Schüttguts (siehe Kapitel 2.1.6.6) verantwortlich. Des Weiteren ist die Gefahr des Schießens, besonders bei feinkörnigem Material, groß. Als Vorteil einer Auslegung auf Kernfluss sind die etwas niedrigeren Investitionskosten anzuführen. Die Einsparungen ergeben sich aus der verringerten Bauhöhe wegen des flacheren Trichters. [6]

2.2 Bunker und Silos

2.2.1 Definition

Eine Unterscheidung zwischen den Begriffen „Bunker“ und „Silo“ wird landläufig nicht gemacht. Die meist grauen, runden Behältnisse welche bei einem Bauernhof stehen und zum Lagern von Futtermittel dienen bezeichnet an sich jeder als Silo. Lagerbehältnisse die man bei Bergwerken oder Kraftwerken findet bezeichnet man fast selbstverständlich als Bunker. Wie auf dem Gebiet der Technik üblich gibt es für diese Begriffe eine Definition die für eine Unverwechselbarkeit sorgen.

Unter Bunker versteht man geschlossene oder oben offene Sammelbehälter aus Werkstoffen wie Stahl, Mauerwerk oder Stahlbeton deren Höhe-zu-Querschnitt Verhältnis gering ist. Bunker in den unterschiedlichsten Ausführungen dienen zur Aufnahme von Schüttgütern aller Art.

Silos haben eine quadratische, rechteckige, sechseckige, meist aber runde Grundfläche bei einem sehr großen Höhe-zu-Querschnitt Verhältnis. Die bis zu 40m hohen Sammelbehälter aus gewebeverstärktem Gummi, Stahl, Mauerwerk, Stahlbeton oder beschichtetem, hochfestem Kunstfasergewebe werden zu Batterien vereinigt, sodass sehr hohe Lagermengen bei geringem Flächenbedarf möglich sind. [10]

Unter diesen Gesichtspunkten ist bewiesen, dass das Behältnis, um dessen Optimierung es sich bei dieser Diplomarbeit handelt, eindeutig als Bunker zu bezeichnen ist. Rein von der Schüttgutmechanik her gibt es aber zwischen einem Bunker und einem Silo keinen essentiellen Unterschied.

2.2.2 Werkstoffe

Im vorherigen Kapitel sind bereits die üblichen Werkstoffe für Bunker und Silos erwähnt worden. In diesem Kapitel soll nun der Werkstoff Edelstahl als Baumaterial für Bunker kurz behandelt werden.

Ein wichtiger Einflussfaktor für das Fließprofil und somit das Austragsverhalten bildet der Wandreibungswinkel φ_w . Harte Wandmaterialien mit glatten Oberflächen weisen die geringsten Wandreibungswinkel auf. Somit sind blanke Metalloberflächen optimal und sogar einer beschichteten Metalloberfläche vorzuziehen. Daraus folgt, dass für die meisten Silieraufgaben in Bereichen wie Chemie, Kunststoffverarbeitung, Lebensmitteltechnik usw. Edelstahl und Aluminiumlegierungen optimale Werkstoffe sind. Neben einem geringen Wandreibungswinkel zeichnen sich derartige Werkstoffe durch ihre Witterungsbeständigkeit und Lebensmittelverträglichkeit, die einfache Reinigung, den geringen Wartungsaufwand sowie ihre rationelle Verarbeitbarkeit aus. [6]

2.2.3 Formen

In Abb. 2-26 sind einige Grundformen für Behälter abgebildet. Für alle Formen von Silos und Bunker sind folgende drei Gesichtspunkte maßgebend:

- beste Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Raumes
- gute Füllungs- und Entleerungsmöglichkeit
- kleine Eigenmasse d.h. optimierte Ausnutzung der Festigkeit der Baustoffe

Mit einem prismatischen oder zylindrischen Oberteil lässt sich die erste Forderung praktisch am Besten erfüllen. Um eine gute Entleerung zu gewährleisten ist es bei vielen Schüttgütern zweckmäßig eine Bodenneigung mit einem Winkel α nach (8) zu wählen. Die Bodenneigung reduziert zwar den nutzbaren Raum für die Lagerung und widerspricht somit der ersten Forderung, aber ein einfacher Austrag ohne zusätzliche Hilfseinrichtungen ist langfristig gesehen wirtschaftlicher als eine leicht erhöhte Lagerkapazität.

$$\alpha \cong \varphi + 15^\circ \quad (8)$$

Ein parabolischer Querschnitt (siehe Abb. 2-26h und i) erfüllt die dritte Forderung am Besten und sorgt auch für eine gute Entleerungsmöglichkeit. Bei vollständiger Füllung treten nur Zug- und keine Biegespannungen auf. Bei nur teilweiser Befüllung geht der Vorteil der günstigen Belastungscharakteristik verloren.

Um die Möglichkeit des Auftretens einer Brückenbildung schon durch die Bunkerform zu reduzieren sollten Knickkanten benachbarter Wände nicht in gleicher Höhe liegen (siehe Abb. 2-26j und k). Dies führt zu der Sonderkonstruktion, die bis hin zur Form eines Dodekaeders reichen.

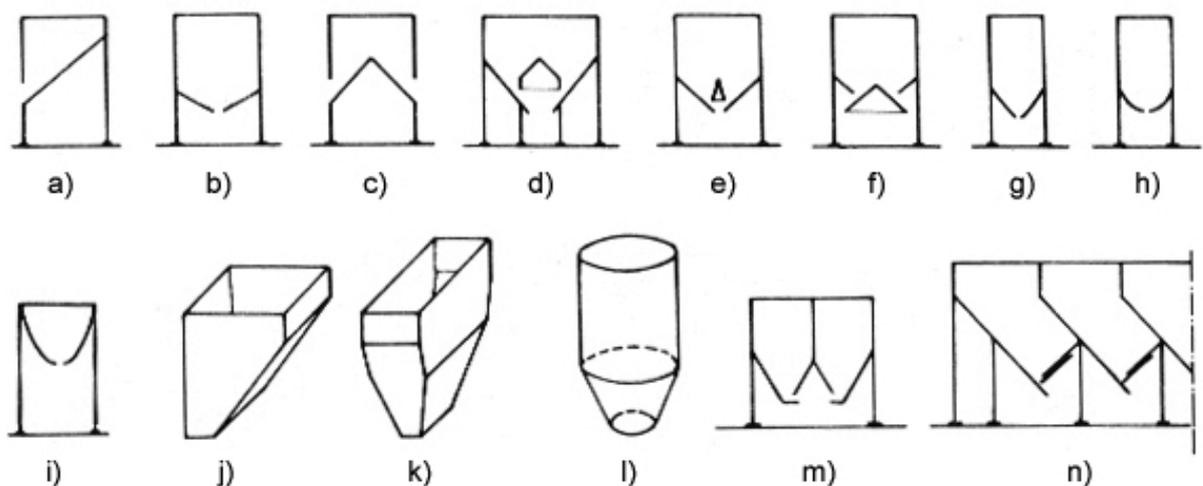


Abb. 2-26: einige Grundformen von Bunkern [10]

Eine besondere Form stellen die so genannten Schlitzbunker dar. Diese Bunker benötigen keinen Bunkerverschluss, da diese Aufgabe von dem Schüttgut, das sich von der waagrechten Fläche unterhalb der Austrittsöffnung ausgehend anhäuft, übernommen wird. Die ersten beiden Forderungen werden von dieser Art von Bunkern weitestgehend erfüllt. Die dritte Forderung rückt in den Hintergrund, da es sich meist um betonierte, schwere Ausführungen handelt für den Einsatz in der rohstoffverarbeitenden Industrie. [12]

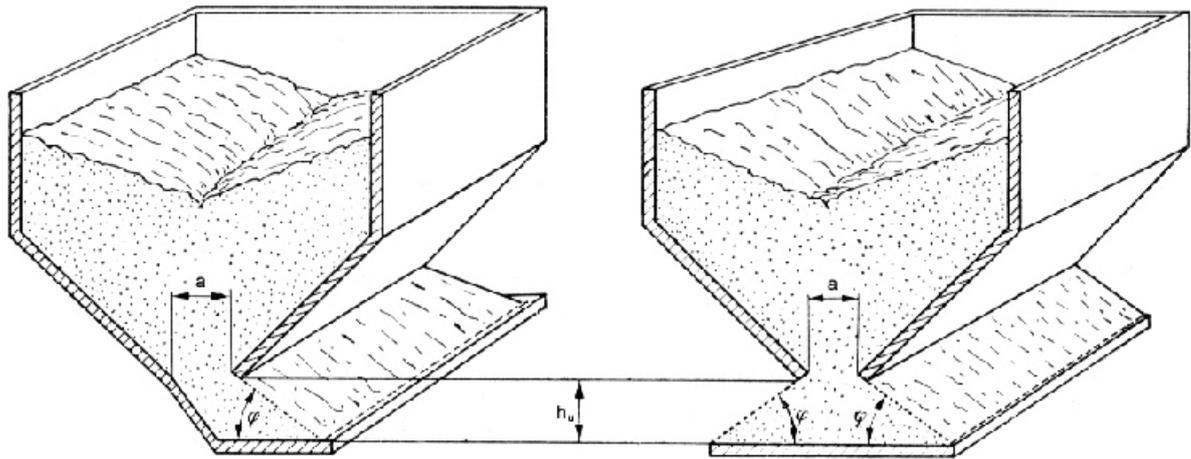


Abb. 2-27: Schlitzbunkerausführungen [12]

Die Eigenschaften des Schüttgutes schränken einen Konstrukteur von Anfang an in der Auswahl der Bunkerform ein. Geeignete Austragshilfen und -organe verschaffen einen größeren Spielraum, doch sollte man deren Grenzen kennen. Die Behebung von Fehlfunktionen ist oftmals sehr zeitaufwendig und teuer, und deswegen kann es hilfreich sein für eine erste Auslegung Abb. 2-28 zu berücksichtigen um Probleme von Anfang an zu vermeiden.

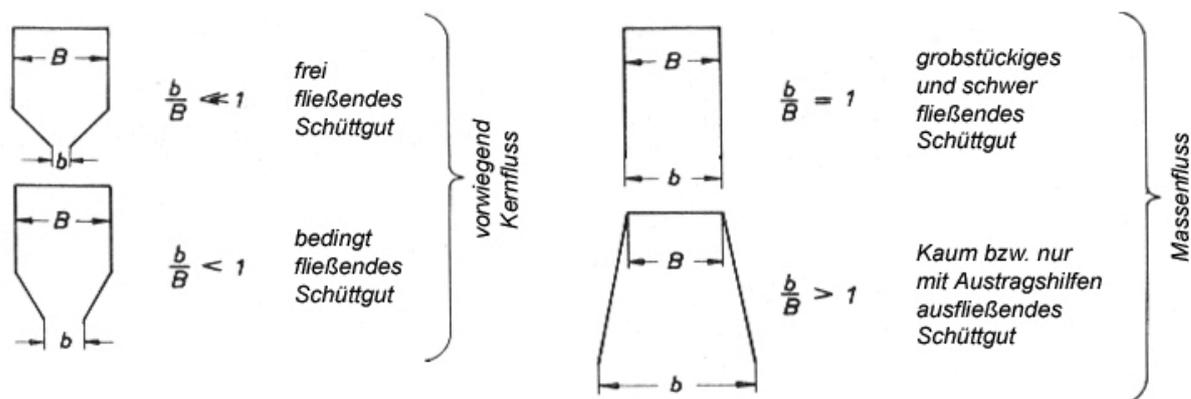


Abb. 2-28: Behälter und Ausflussweiten in Abhängigkeit vom Schüttgut [10]

2.3 Austragshilfen und -organe

2.3.1 Definition und Unterscheidung

Bei Austragsorganen und Austragshilfen handelt es sich um Geräte und/oder Einbauten die unterhalb des Siloauslaufes oder im Trichter angeordnet sind. Sie haben die Aufgabe durch eine geeignete Bauweise oder mittels entsprechender Energieeinleitung den Auslaufmassenstrom zu initiieren, aufrechtzuerhalten und zu regeln bzw. zu dosieren.

Geräte und/oder Einbauten die eine Anregung bzw. Aufrechterhaltung des Schüttgutstromes oder eine Restlosentleerung von Lagerbehältern ermöglichen bezeichnet man als Austragshilfen.

Die Aufgaben der Austragsorgane sind hingegen dem Lagerbehälter einen bestimmten Produktstrom zu entnehmen und diesen häufig auch zu dosieren. Oft sind Austragsorgane so konzipiert, dass sie zusätzlich auch als Austragshilfe wirken. Eine äußerst wichtige Anforderung, welche die Austragsorgane erfüllen sollen ist, dass sie den Schüttgutstrom über den gesamten Auslaufquerschnitt aktivieren.

In Abb. 2-29 wird der Unterschied im Einsatz von Austragsorganen und Austragshilfen verdeutlicht. Aus der verfahrenstechnischen Auslegung ergibt sich der kritische Auslaufdurchmesser d . Ist dieser größer als der Einlaufdurchmesser des Austragsorgans, wie es oft bei kohäsiven Schüttgütern der Fall ist, so kommt es zu Förderproblemen, weil sich über dem Austragsorgan Brücken und dergleichen bilden. Um den Unterschied zwischen diesen beiden Durchmessern zu überbrücken werden Austragshilfen eingesetzt. Sehr oft lassen sich nur so Bunker- und Siloausläufe in einer vernünftigen Durchmesserdimension für einen optimalen, kontinuierlichen Massenstrom verwirklichen. [6]

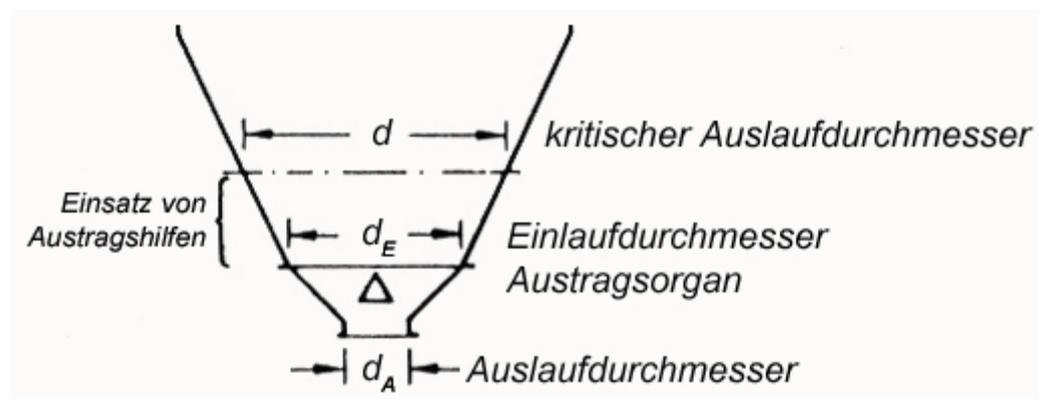


Abb. 2-29: Visualisierung des Unterschieds von Austragsorganen und -hilfen [6]

2.3.2 Bandförderer und Abzugsbänder

Eine schematische Darstellung eines Förderbandes mit allen wichtigen Elementen ist in Abb. 2-30 zu sehen. Als Tragorgan des Fördergutes dient bei dieser Gruppe von Förderern ein endloses Band. Dieses ist gleichzeitig auch das Zugorgan, das um mindestens zwei Umlenkstationen geführt wird und meist zwischen diesen eine Abstützung mit Tragrollen erhält. Mindestens eine der Umlenkstationen ist mit einer Spanneinrichtung versehen und normalerweise ist eine andere Umlenkstation für den Antrieb zuständig.

Die Abstände der Tragrollen bei dem belasteten Obertrum sind eher gering und liegen zwischen 1 und 1,5 Metern. Bei erhöhter Belastung des Obertrums, wie sie beim Einsatz als Austragsorgan auftritt, sind Abstände entsprechend zu verringern. Zur Abstützung des Leertrums reicht in der Regel ein Abstand von 6m der aber bei zu großem Gurtdurchhang reduziert wird. Die Größe der Umlenktrommeln muss dem verwendeten Gurt und den zulässigen Gurtkräften angepasst werden. [11, 21]

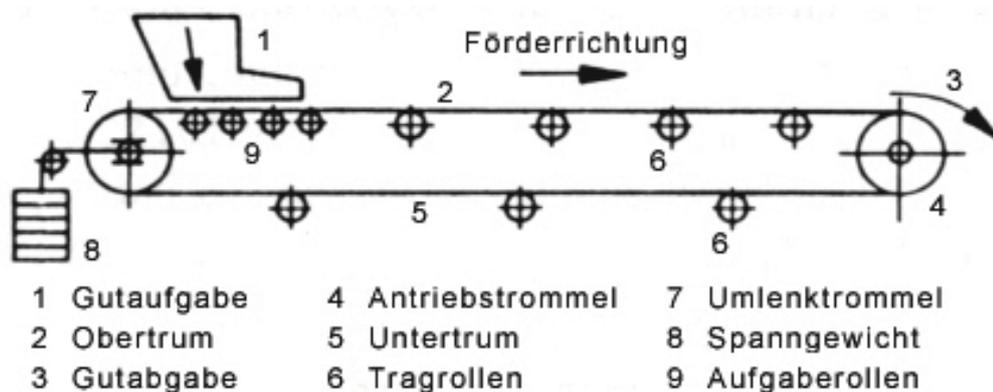


Abb. 2-30: Aufbau eines Gurtförderers [21]

Wegen der hervorragenden Eigenschaften des Bandförderers gehört dieser zu den am weitesten verbreiteten Fördermitteln. Zu diesen Eigenschaften zählen die hohe erreichbare Fördergeschwindigkeit, die Einsetzbarkeit für Schütt- und Stückgut, die einfache Konstruktion, der geringe Kraftbedarf, die auf den Gutdurchsatz bezogenen geringe Eigenmasse usw..

Dem gegenüber stehen Nachteile wie die beschränkte Förderneigung bei üblichen Ausführungen, komplizierte und relativ kostspielige Abdichtung des Bandes bei Staubentwicklung sowie Probleme der Bänder bei Umgebungseinflüssen wie hoher Temperatur, chemischen Angriffen und Verschmutzungen. [12]

Bandförderer die als Austrags- und Dosierorgane eingesetzt werden verfügen über ein gerade liegendes Band. Das Band ist meist ein Gummiband mit Gewebeeinlage das vorwiegend bei körnigen Schüttgütern zum Einsatz kommt.

Wichtig bei der Verwendung eines Bandes für Austrag und Dosierung ist, dass die Austragsöffnung des Bunkers richtig ausgeführt wird. Wie in Abb. 2-31a dargestellt bildet sich eine tote Zone wenn keine konstruktiven Maßnahmen getroffen werden. Eine Möglichkeit, die in Abb. 2-31b dargestellt ist, ist eine Anpassung des unteren Teils der Bunkerseitenwände. Die Seitenwände werden schräg beschnitten um es dem Schüttgut zu ermöglichen sich zur Austragsöffnung hin auf dem Band mehr und mehr abzuböschchen. Das bringt eine Zunahme der Austragsleistung in Richtung der Austragsöffnung. Diese gewährleistet, dass der Austrag über den gesamten Bunkerquerschnitt stattfindet sodass keine toten Zonen entstehen können.

Für grobe, stückige und schwere oder auch heiße Schüttgüter können Plattenbandförderer verwendet werden. Diese bestehen meist aus trogförmigen Platten die, ausgestattet mit seitlichen Rollen, auf Schienen laufen und über Ketten verbunden sind. [7]

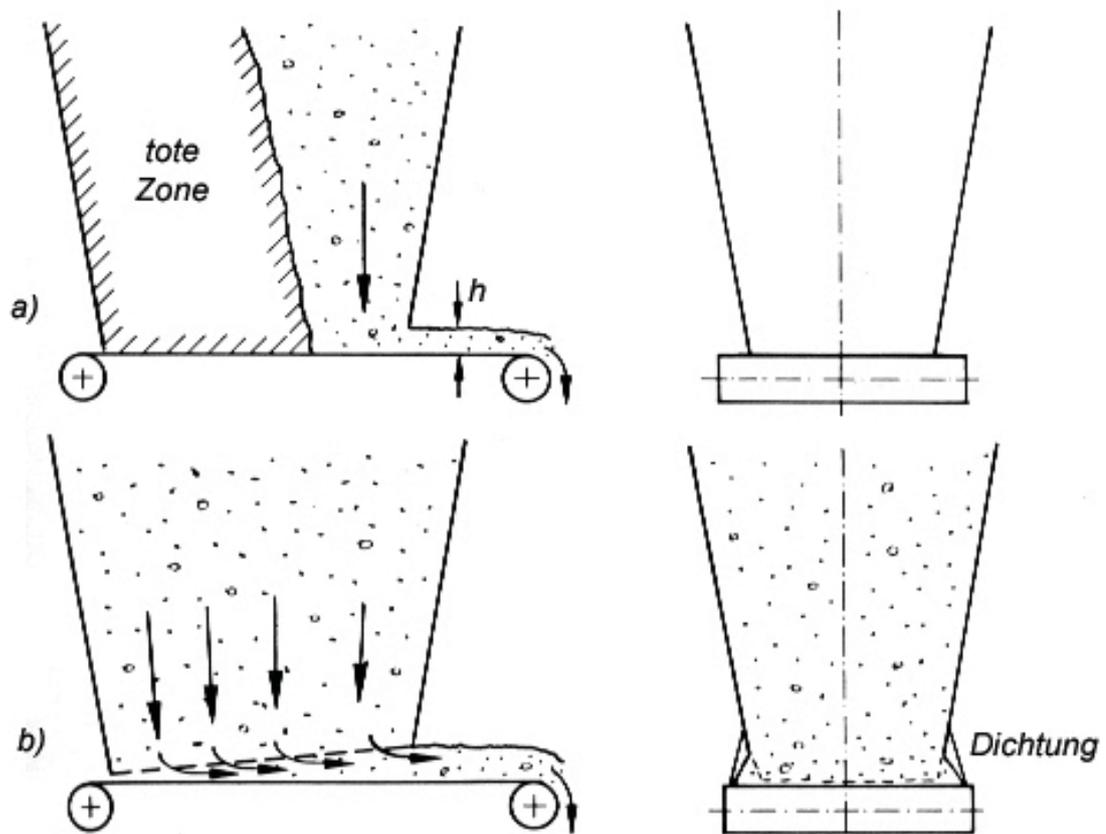


Abb. 2-31: Falsche (a) und verbesserte (b) Ausführung eines Bandförderers [7]

In Abb. 2-31 fängt der Bandförderer fast das gesamte Gewicht der Schüttgutsäule ab. Wenn es das Schüttgut aufgrund der Fließeigenschaften zulässt kann die Austragsöffnung wie in Abb. 2-32 ausgebildet werden, um einerseits den Anfahrwiderstand zu reduzieren und andererseits den Mehraufwand für eine längere sowie schwerer ausgeführte Anlage zu vermeiden. [11]

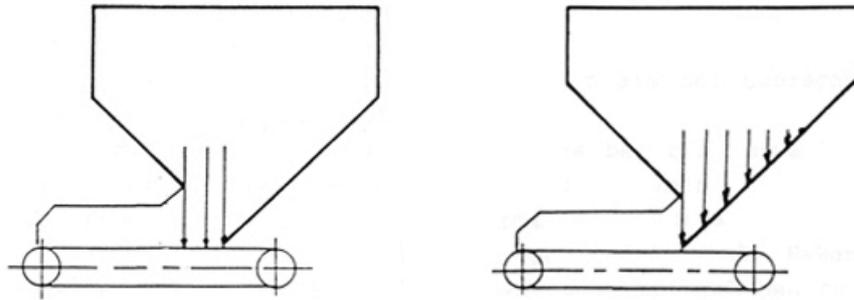


Abb. 2-32: Möglichkeiten der Abstützung der Schüttgutsäule [11]

2.3.3 Kratzerförderer

Diese Art von Förderern bewegt das Fördergut durch einfaches Fortschieben in einem Steigungsbereich von $+25^\circ$ bis -35° . In Abb. 2-33 sind zwei unterschiedliche Bauarten zu sehen.

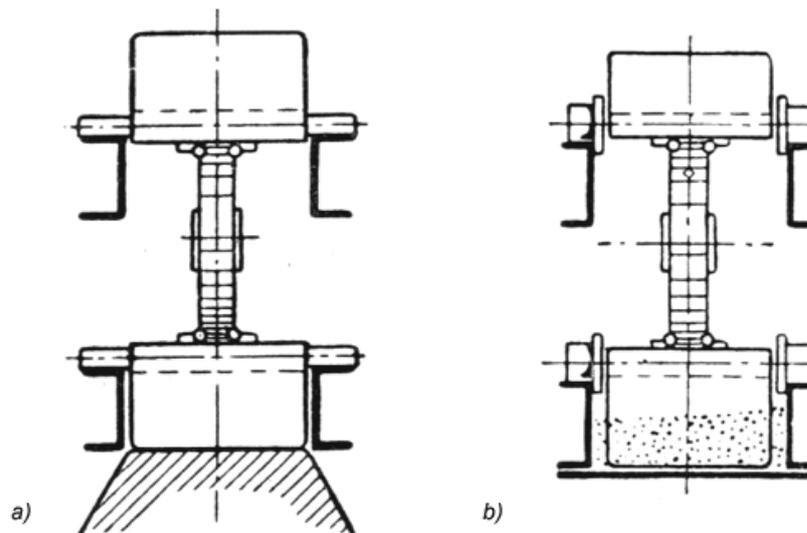


Abb. 2-33: Bauarten von Kratzerförderern [5]

Abb. 2-33a zeigt einen Kratzerförderer ohne Rinnenboden und gleitender Kette. Eine solche Ausführung führt zu einem enorm erhöhten Energiebedarf. Als Vorteile dieser Konstruktion sind einerseits die billige Anschaffung anzuführen und andererseits, dass das Schüttgut nur so weit befördert wird wie notwendig. Sobald unter dem Kratzerförderer Platz frei ist fällt es nach unten. Somit braucht man beim Anfüllen von lang gestreckten Füllrumpfen keinerlei zusätzliche Einrichtungen vorzusehen, da sich die Förderlänge selbsttätig einstellt.

In Abb. 2-33b ist eine Ausführung mit Rinnenboden und rollender Kette zu sehen. Diese beiden Maßnahmen senken den Energieverbrauch deutlich, auch wenn er im Vergleich zu anderen Fördermitteln, mit Ausnahme der Schneckenförderer, höher bleibt. Die Abb. 2-34 zeigt grob den gesamten Aufbau eines solchen Kratzerförderers.

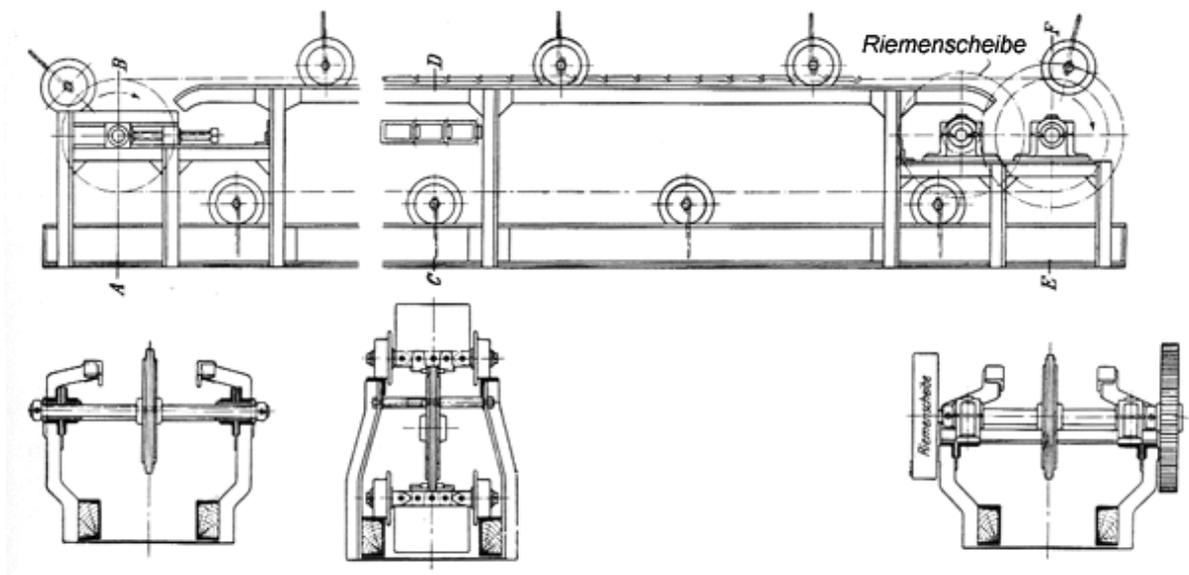


Abb. 2-34: Kratzerförderer [5]

Kratzerförderer sind robuste, einfache Förderer die sich auch als Austragsorgane eignen. Ein nicht unerheblicher Nachteil bei einem Einsatz außerhalb des Bergbaus oder der Schwerindustrie ist die Lärmentwicklung, die ein Kratzerförderer verursacht. [5]

2.3.4 Trogkettenförderer

Der Trogkettenförderer kann pulverisiertes, flockiges, körniges und auch feinklumpiges Material horizontal, schräg, senkrecht oder in Kurven bewegen. Die Förderung des Gutes geschieht mittels eines endlosen Kettenstranges aus einer Vielzahl von einzelnen Bügelkettengliedern die sich innerhalb eines geschlossenen Gehäuses bewegen. Die Kettenglieder sind über ein drehbares Kettengelenk, wie anhand zweier Beispiele in Abb. 2-35 dargestellt, miteinander verbunden und gestatten so eine leichte Kurvenführung.

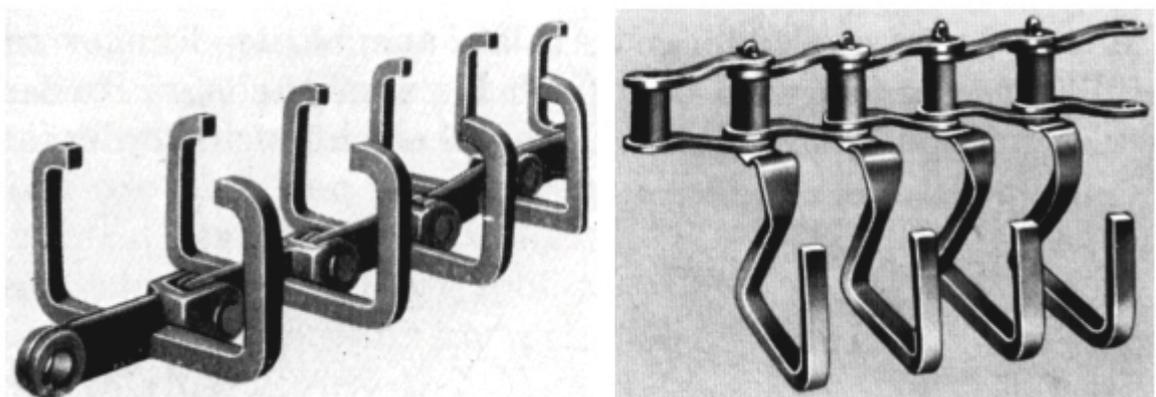


Abb. 2-35: Beispiele für Trogketten [5]

Die Kettenglieder sind im Förderschacht vollständig vom Fördergut umgeben. Dies bildet ein Polster zwischen Kette und Gehäuse das die Reibung von Metall auf Metall verringert. Bei ansteigender Förderung erhalten Förder- und Leertrum jeweils geschlossene Gehäuse. Die Segmente des Gehäuses für das Fördertrum sind besonders maßhaltig auszuführen, damit das zu fördernde Gut als eine feste Säule im geschlossenen Transportstrom gehoben wird. Trogkettenförderer zeichnen sich neben ihrer flexiblen Förderstromführung (siehe Abb. 2-36) darin aus, dass sie bei gleicher Förderleistung bedeutend weniger Platz benötigen als andere Stetigförderer. Dies liegt vor allem daran dass außerhalb des Gehäuses keine Laufrollen, Stützschiene usw. erforderlich sind.

Trogkettenförderer haben neben einer vergleichsweise beschränkten Durchsatzmenge weitere Nachteile wie einen hohen Energieverbrauch, einen starken Verschleiß der Trogwandungen und der Ketten mit ihren Verbindungsgelenken sowie eine Beschränkung der Korngröße der zu fördernden Schüttgüter. [5]

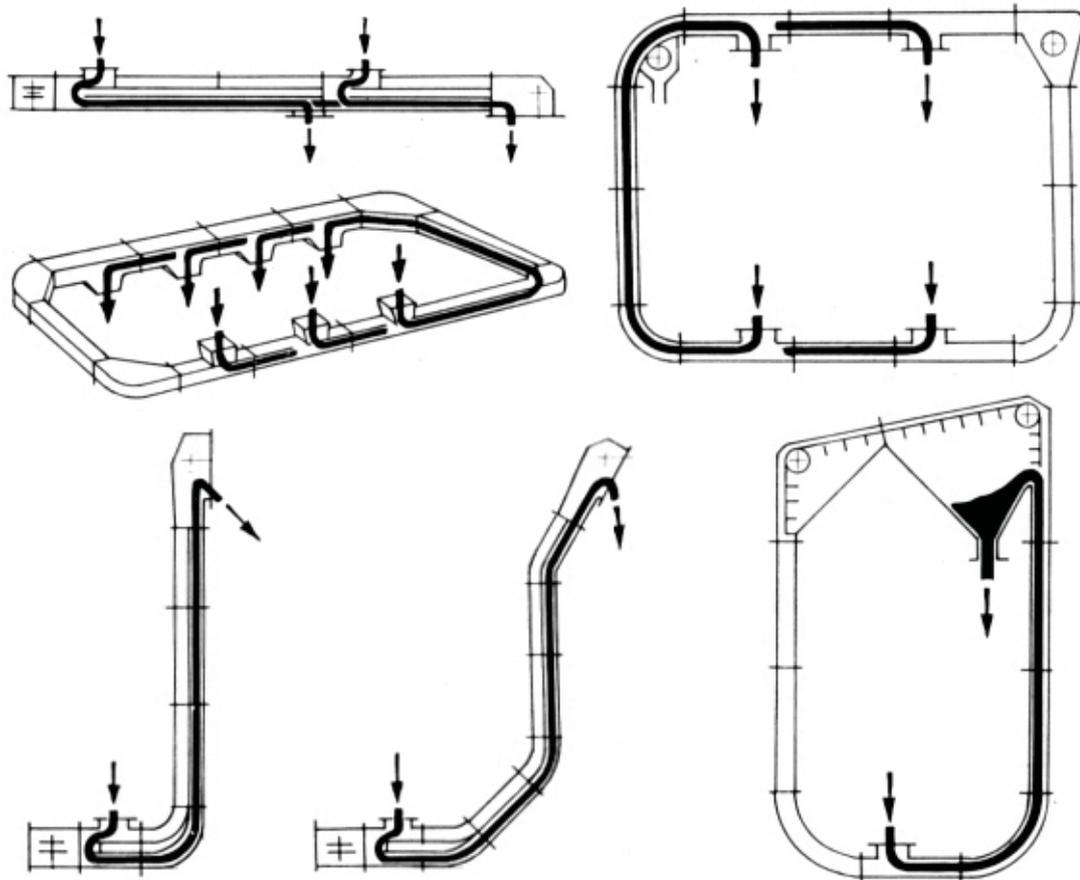


Abb. 2-36: Möglichkeiten der Förderstromführung [5]

Erfolgt nur eine horizontale Förderung, so muss Förder- und Leertrum nicht in separaten Gehäusen geführt werden. In Abb. 2-37 ist ein horizontaler Trogkettenförderer dargestellt der als Austragsorgan fungiert. Das Schüttgut bösch sich auf einer Fläche im

Fördergehäuse ab, über das auch der obere Kettenzug führt. Während des Betriebes fördert der obere Kettenzug genau die richtige Menge an Schüttgut zum unteren Kettenzug, der die Förderung zum Auslauf übernimmt. Auf diese Art kann sich im Gehäuse des Trogkettenförderers das Gut nicht ansammeln. Ein überfülltes Gehäuse bedeutet höhere Reibung und Verschleiß. Tritt beides in nicht eingeplantem Maße dauerhaft auf, ist eine Betriebsstörung unausweichlich. [5,7]

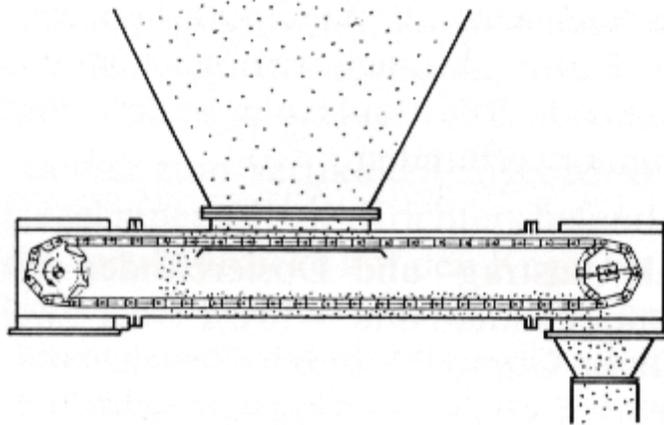


Abb. 2-37: Trogkettenförderer als Austragsorgan [7]

Wie auch beim Bandförderer so ist auch beim Austrag mittels Trogkettenförderer darauf zu achten dass sich keine tote Zone bildet. Wie sich ohne Maßnahmen die tote Zone ausbildet ist in Abb. 2-38a zu sehen. Ein Beispiel für eine Abhilfemaßnahme ist in Abb. 2-38b zu sehen.

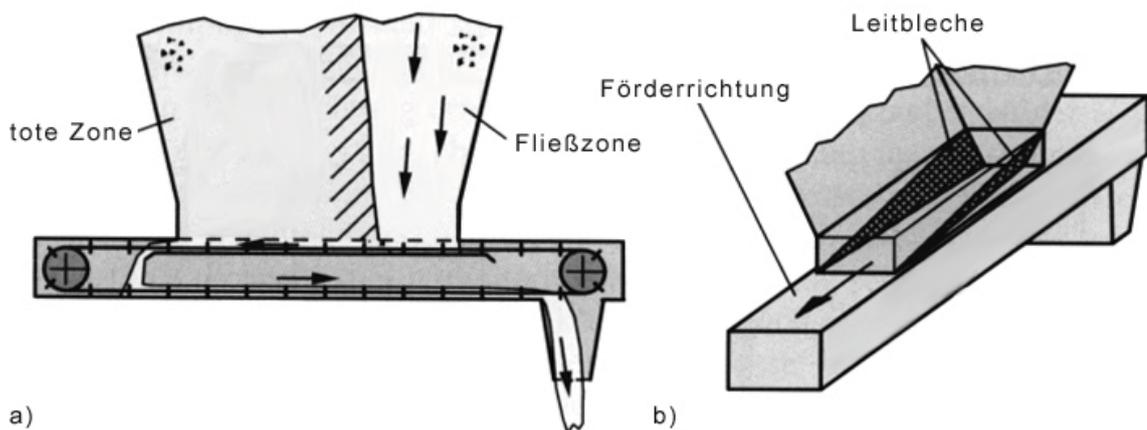


Abb. 2-38: a) Fließprofil ohne Maßnahmen, b) mögliche Verbesserung [13]

2.3.5 Schneckenförderer

Diese Gruppe der Förderer gehört zu den ältesten Maschinen für stetiges Fördern. Das Fördergut wird durch eine Schnecke fortgeschoben, wobei zwischen dieser und dem Fördergut eine Relativbewegung stattfindet.

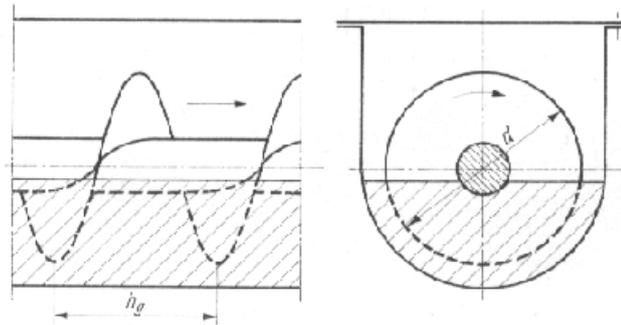


Abb. 2-39: Schnecke in einem U - Trog mit Fördergut [12]

Wegen dieser Relativbewegung, bei der zusätzlich Reibungsarbeit geleistet werden muss, ist der Energieverbrauch höher als bei Kratzerförderern, die das Gut nur auf der Unterlage fortschieben. Dafür sind die kompakte und robuste Bauweise, die Möglichkeit die Gehäuse auf einfache Art und Weise staub- oder gasdicht, vakuum- oder druckfest ausführen zu können, Vorteile die oftmals einen höheren Energieaufwand rechtfertigen. Des Weiteren sind Schneckenförderer günstig in der Anschaffung und es gibt unzählige Möglichkeiten einen Schneckenförderer für eine gegebene Förderaufgabe anzupassen. Vor allem die Gestaltung der Schnecke sorgt für ein breites Anwendungsspektrum das über eine reine Förderung hinausgehen kann. Schnecken mit abnehmender Steigung können das Fördergut verdichten, Paddelschnecken sorgen für eine bessere Durchmischung und Schnecken können sogar als Wärmetauscher ausgeführt werden (Abb. 2-40).

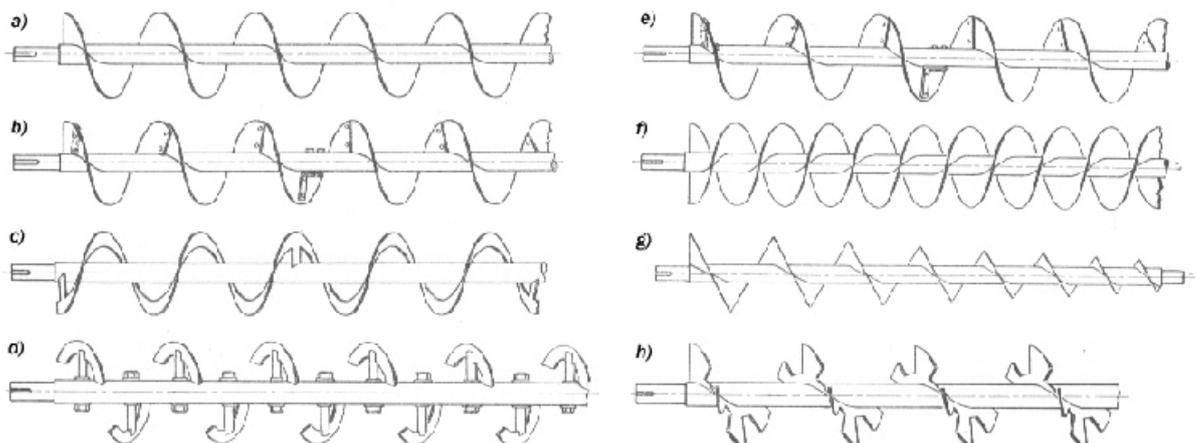


Abb. 2-40: Schneckenausführungen [5]

Die Förderleistung und die Wirtschaftlichkeit eines Schneckenförderers hängen sehr stark von den Eigenschaften des Fördergutes ab. Am besten zu fördern sind leichte, nicht schleißende und frei fließende Schüttgüter wie Weizen und trockene Staubkohle. Besonders schlecht sind Güter wie Asche, Kieselerde und Zement die stark schleißend, zäh, hart und großstückig sind. Zwischen diesen Extremen variiert auch der Füllungsgrad bei reinen Förderaufgaben in der waagerechten zwischen 45% und weniger als 15% des

möglichen Gesamtvolumens des Schneckengehäuses. Bei Austragsschnecken liegt der Füllungsgrad mitunter bei bis zu ca. 80%.

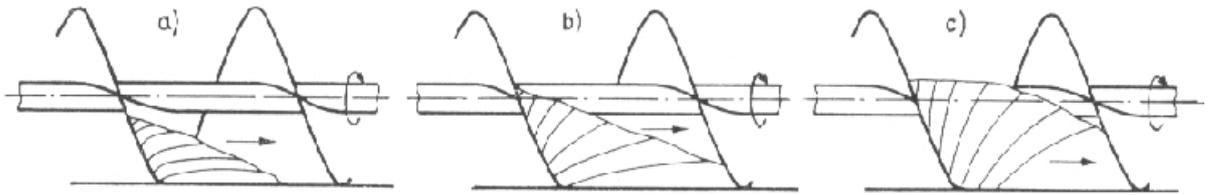


Abb. 2-41: Bewegungsfäden des Gutes bei verschiedenen Füllungsgraden [12]

Um das Förderverhalten, das, wie vorher ausgeführt, hauptsächlich vom Fördergut abhängig ist nicht zu verschlechtern, ist es notwendig den Einlauf groß genug auszuführen. [5, 12, 19]

Erfahrungsgemäß ist für reine Förderzwecke bei trockenem und feuchtem Kunststoffmahlgut sowie Folienschnitzeln Vollgewindeschnecken eine gute Wahl aufgrund ihrer guten und dosierenden Förderwirkung. Damit eignen sie sich als Abzugsorgan von Siloanlagen und Zerkleinerungsaggregaten, als Zuteiler für die Zwangsbeschickung, usw.. [9]

Eine Übersicht über die Einsetzbarkeit einiger Schneckenformen zeigt Tab. 2-9.

Schüttguteigenschaften:	1	2	3	4	5
sehr leicht fließend	1	1, 4, 5	1, 4, 5	2, 3, 5	
leicht fließend	1	1, 4, 5	1, 4, 5	2, 3, 5	
etwas schwer fließend	1	1, 4, 5	1, 5	5	
schwer fließend		1	1		
staubig	1	1, 4, 5	1, 4, 5		
klebrig, zäh	1		1		
klumpig	1		4		
ölig, schmierig	1	4	4		
feucht	1	1, 4, 5	1, 4, 5		
hygroskopisch	1	1, 4, 5	1, 4, 5	2, 3, 5	
Brücken bildend		1, 4, 5	1	5	
zu Kernfluß neigend	1	1, 4, 5		5	

Tab. 2-9: Auszug über die Einsetzbarkeit von Doppelschneckenausführungen [18]

In der Tabelle steht 1 für Pulver, 2 für Schüttgut mit kugelförmigen Partikeln, 3 für Granulat, 4 für Fasern und 5 für Flakes. Eine wichtige Aussage der Tabelle ist, dass Schnecken die die gleiche Gängigkeit haben, synchronisiert sind und leicht ineinander greifen sich gegenseitig reinigen. Dies ist besonders bei sich verklebenden und verklumpenden Schüttgut interessant. [18]

Ein gutes Beispiel für den richtigen Einsatz von Schnecken als Austragsorgan ist in Abb. 2-42b dargestellt, weil es hier zu einer vollständigen Aktivierung des Auslaufquerschnittes kommt. Neben der gezeigten Möglichkeit des abnehmenden Kerndurchmessers kann auch noch der Schneckendurchmesser zunehmen oder die Schneckensteigung größer werden. Abb. 2-42a führt anschaulich das Negativbeispiel vor, bei der die tote Zone, anders als beim Negativbeispiel des Gurtförderers (Abb. 2-31a), auf der Seite der Austragsöffnung liegt. [6]

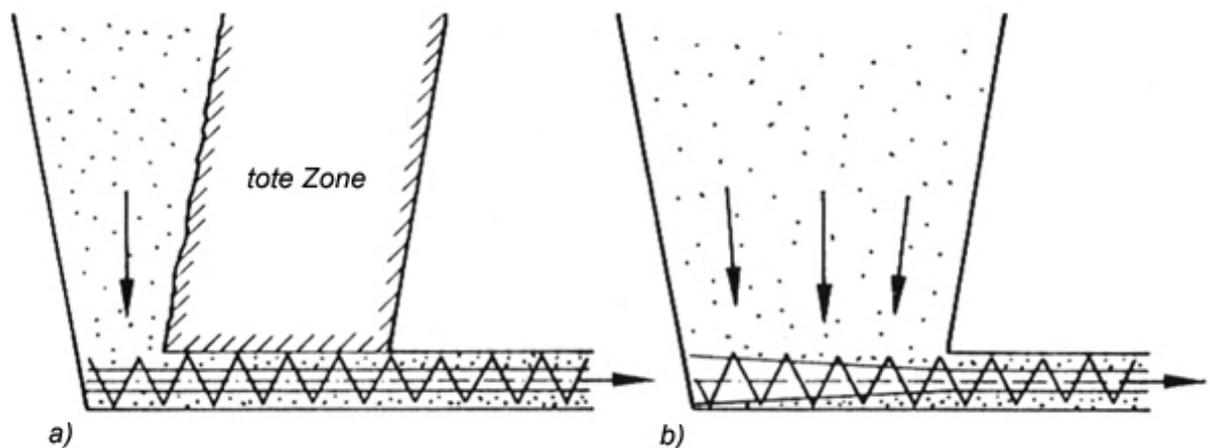


Abb. 2-42: Beeinflussung des Fließprofils durch Schneckenaustragsorgane [6]

2.3.6 Rotierende Räumrichtungen

Unter diesem Namen sind die Räumschnecke und der Räumarm zusammengefasst. Beide sind zum Austrag von schwer fließenden Schüttgütern geeignet und beide fördern das Gut zu einem zentralen Auslauf.

Als Räumarm hat sich eine Auslegung mit einem einzelnen spiralförmigen Arm bewährt (siehe Abb. 2-43a). Entweder reicht der Räumarm bis zur Behälterwand oder er unterschneidet diese. Mit der Rotationsgeschwindigkeit des Armes erfolgt die Mengenregelung.

Die rotierende Räumschnecke ist eine Anlehnung an verfahrbare, rotierende Räumräder und Räumflüge für Schlitzbunker. Die Schnecke ist rotierend um sich selbst und um ihren Aufhängepunkt mit der darunter liegenden Austragsöffnung ausgeführt (siehe Abb. 2-43b). Das Schüttgut wird von der Schnecke aus der Peripherie zur Öffnung

gefördert, aber erst die zwangsgesteuerte Rotation der gesamten Schnecke ermöglicht einen Abzug des Schüttgutes aus jedem Bereich des Bunkers. [6]

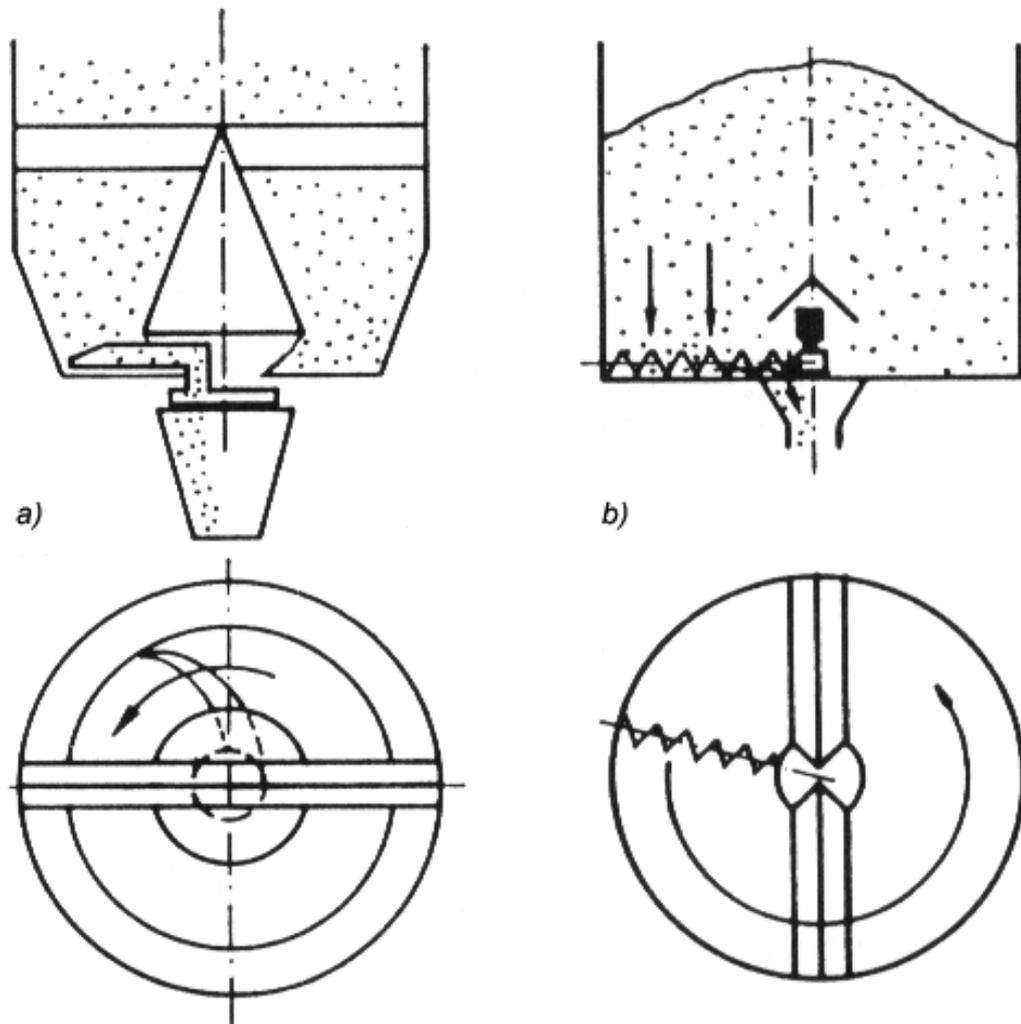


Abb. 2-43: rotierende Räumvorrichtungen [6]

In Abb. 2-44 ist die Form der rotierenden Fließzone bei einer rotierenden Räumschnecke zu sehen.

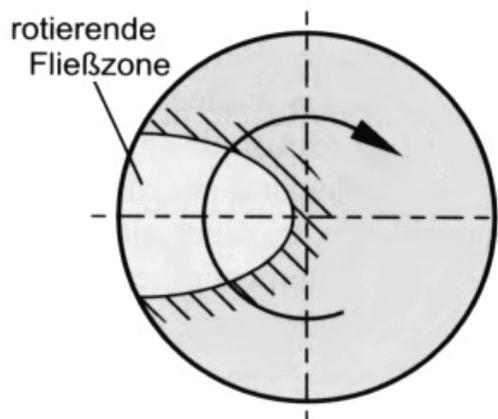


Abb. 2-44: rotierende Fließzone beim Abzug mit einer rotierenden Schnecke [13]

2.3.7 Drehtelleraufgeber

Diese Zuteilvorrichtung setzt sich vom Prinzip her aus einer drehbaren Platte und einem festen einstellbaren Abstreifer zusammen. Auf der Platte ruht der Schüttkegel aus dem oberhalb liegenden Lagerbehälter. Die Größe des Schüttkegels wird durch den Durchmesser der kreisrunden Bunkeröffnung und ihrem Abstand zur Platte festgelegt. Wie in Abb. 2-45 angedeutet kann bei Verwendung einer verschiebbaren Manschette der Abstand zur Platte variiert werden. Damit wird die Menge des sich auf der Platte abböschenden Gutes verändert. In der Abbildung ist weiters zu sehen, dass es nicht sinnvoll ist die Abböschungsfläche über die Lage der Manschette größer einzustellen als das Drehteller groß ist. [5]

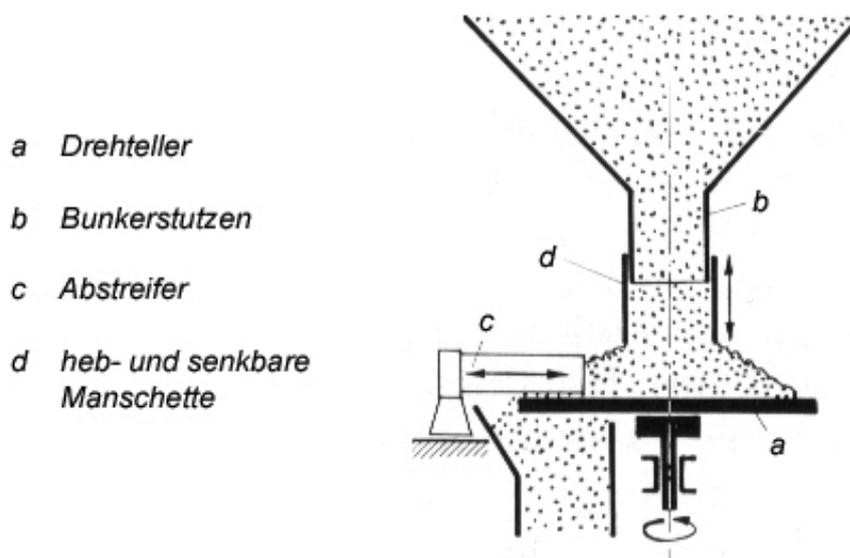


Abb. 2-45: Drehtelleraufgeber [5]

Neben der Verschiebung der Manschette zur Veränderung der Austragsleistung ist es auch noch möglich den Abstreifer und die Drehzahl zu verstellen. Drehtelleraufgeber verfügen über eine robuste Bauweise und sind schwer gebaut. Zur Überwindung der hohen inneren Reibung sind diese Aufgeber mit starken Antrieben und überdimensionierten Getrieben ausgerüstet. Betrieb und Wartung sind teuer, zumal Teile wie der Abstreifer hohem Verschleiß unterliegen. Aufgrund der sperrigen Bauart und des hohen Gewichts ist es nur selten möglich den Drehteller direkt am Bunkerauslauf anzubringen. Nichts desto trotz ist aufgrund der vielseitigen Verwendbarkeit und der großen Unempfindlichkeit ein Einsatz von Drehtelleraufgebern gerechtfertigt. [5]

Eine andere Ausführung der Manschette ist in Abb. 2-46 zu sehen. Durch diese Form der Manschette wird gewährleistet dass über den Umfang die Austragsleistung zunimmt. Dies ist vor allem bei Ausführungen mit großen Austragsöffnungen interessant um die Bildung toter Zonen bzw. Zonen mit vermindertem Austrag zu verhindern.

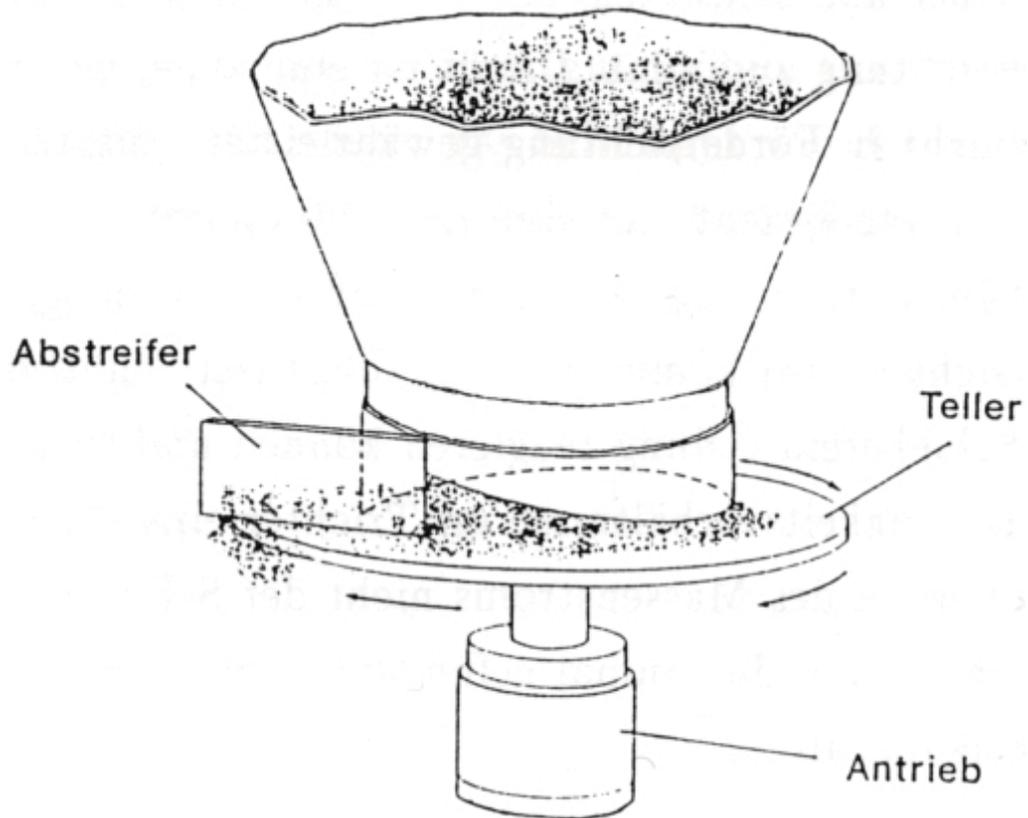


Abb. 2-46: Drehteller mit einer Manschette für zunehmende Böschung [14]

Die vorhin erwähnten Nachteile der schweren Bauweise und des hohen Verschleißes scheinen sich sehr stark an den „gewöhnlichen“ Arten von Schüttgut zu orientieren wie Sand, Erz, Asche etc. mit ihren zum Teil viel höheren Dichten und ihren schleißenden Eigenschaften. Kunststoffrecyclat verfügt weder über eine hohe Dichte, noch sind schleißende Eigenschaften in relevantem Umfang festzustellen. Bei der Lösungserarbeitung für eine optimierte Bunkerkonstruktion sollte eine Drehtellerausführung in die Überlegungen miteinbezogen werden.

2.3.8 Schwingförderer

2.3.8.1 Allgemeines

Schwingförderer sind Stetigförderer bei denen ein Schwingungserreger das schwingungsfähig gelagerte Trag- bzw. Förderorgan in eine periodisch hin- und hergehende Bewegung versetzt. In Förderrichtung wird das auf dem Förderorgan liegende Gut wegen der Normal- und Reibungskräfte beschleunigt. Aufgrund der Wirkung der Massenkräfte behält das Fördergut selbst bei der Rückwärtsbewegung des Förderorgans seine ursprüngliche Richtung bei. Der prinzipielle Aufbau eines Schwingförderers mit seinen Grundbauteilen ist in Abb. 2-47 zu sehen.

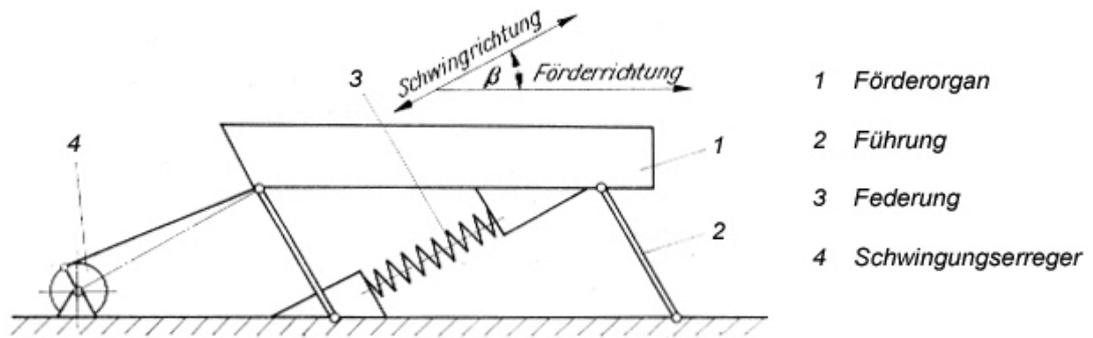


Abb. 2-47: Grundaufbau eines Schwingförderers [12]

Bei den Schwingungserregern unterscheidet man zwischen formschlüssigem Antrieb und kraftschlüssigem Antrieb. Zentrische Schubkurbelgetriebe zählen zu den formschlüssigen Antrieben. Federkraft-, Massenkraft- und elektromagnetischer Antrieb gehören zur Gruppe der kraftschlüssigen Antriebe.

Die Abstützung des Förderorgans mittels Führungs- und Federelementen dient der Aufnahme der statischen Last aus Förderorgan und –gut, der Bildung eines Schwingensystems und der Vorgabe der Schwingrichtung.

Förderprinzipien für Schwingförderer sind das Gleitprinzip und das Wurfprinzip. Beim Gleitprinzip wird das Fördergut in der Vertikalen zu wenig beschleunigt um die Erdanziehungskraft zu überwinden. Das Fördergut gleitet, je nach Auslegung, mit konstantem oder variablem Druck auf dem Förderorgan. Hebt das Fördergut wegen einer vertikalen Beschleunigung, die höher liegt als die negative Erdanziehungskraft, vom Förderorgan ab, so spricht man vom Wurfprinzip. In diesem Fall sind die Bewegungsgesetze des schrägen Wurfs zu berücksichtigen.

Schwingförderer zeichnen sich durch ihren einfachen Aufbau aus, die eine Kapselung problemlos möglich macht. Je nach Ausführung lassen sich Sieb- und Trennprozesse durchführen oder einfache Dosiervorgänge. Besondere Beachtung ist den Isolierungsmaßnahmen zu schenken, da keine störenden Schwingungen vom Förderer in die umgebenden Teile getragen werden sollten. [12]

2.3.8.2 Schwingrinne

Eine Schwingrinne als Austragsorgan eröffnet einige interessante Möglichkeiten in der Auslegung. Aufgrund der robusten Bauweise kann die Bunkersäule in vielen Fällen komplett auf der Rinne ruhen. Wie in Abb. 2-48 zu sehen ist lässt sich nach diesem Prinzip ein Austrags- und Verschlussystem für einen Bunker mit negativem Wandneigungswinkel realisieren. Die Rinne wird dabei unter die Auslauföffnung gehängt und der Bunker wird entsprechend gelagert. Die

Schwingungen der Rinne übertragen sich bei einem derartigen Aufbau bis zu einem gewissen Grad auf den Bunker und somit wird jede Brückenbildung verhindert. [5]

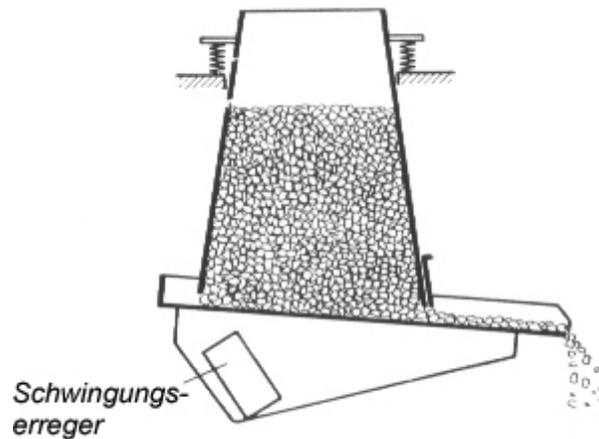


Abb. 2-48: Schwingrinne in hängender Bauweise [5]

2.3.8.3 Schwingrost

Ein Schwingrost besteht aus mehreren Einzelflächen, wobei jede vom Prinzip her wie eine Schwingrinne funktioniert. Alle Einzelflächen sind miteinander verbunden und führen synchron eine Schwingungsbewegung aus wie anhand des Typs Siletta (Abb. 2-49a) und des Typs Hogan (Abb. 2-49b) zu sehen ist.

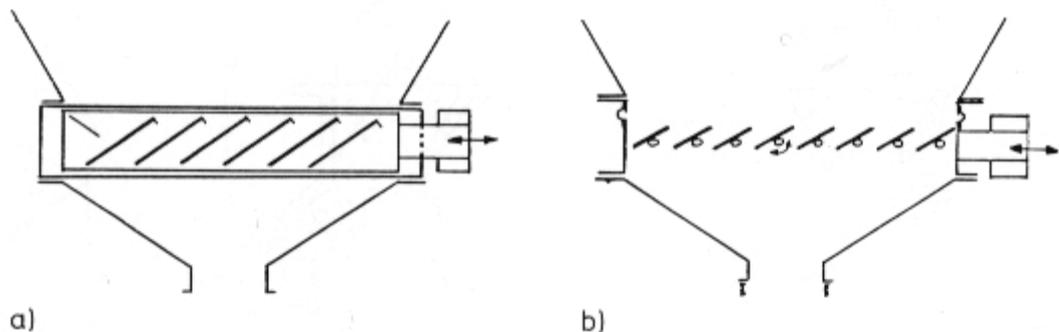


Abb. 2-49: Schwingroste [7]

Durch die Schwingungen werden die Brücken die sich im Ruhezustand gebildet haben zerstört und ein Austrag findet statt. Schwingroste können nur dann ohne zusätzliches Absperrorgan eingesetzt werden wenn sich die Lamellen in ihrer Neigung verstellen lassen. [7]

2.3.8.4 Schwingtrichter

Dem Namen entsprechend wird bei diesem Austragsorgan der trichterförmige Teil vor der Austragsöffnung mitsamt einem, in das Schüttgut ragendem, Schild in

Schwingung versetzt um den Materialfluss zu gewährleisten. Wie in Abb. 2-50 ersichtlich ist es bei einem Schwingtrichter nötig, flexible Verbindungen zu der Bunkerwand und der nachgeschalteten Förderanlage vorzusehen.

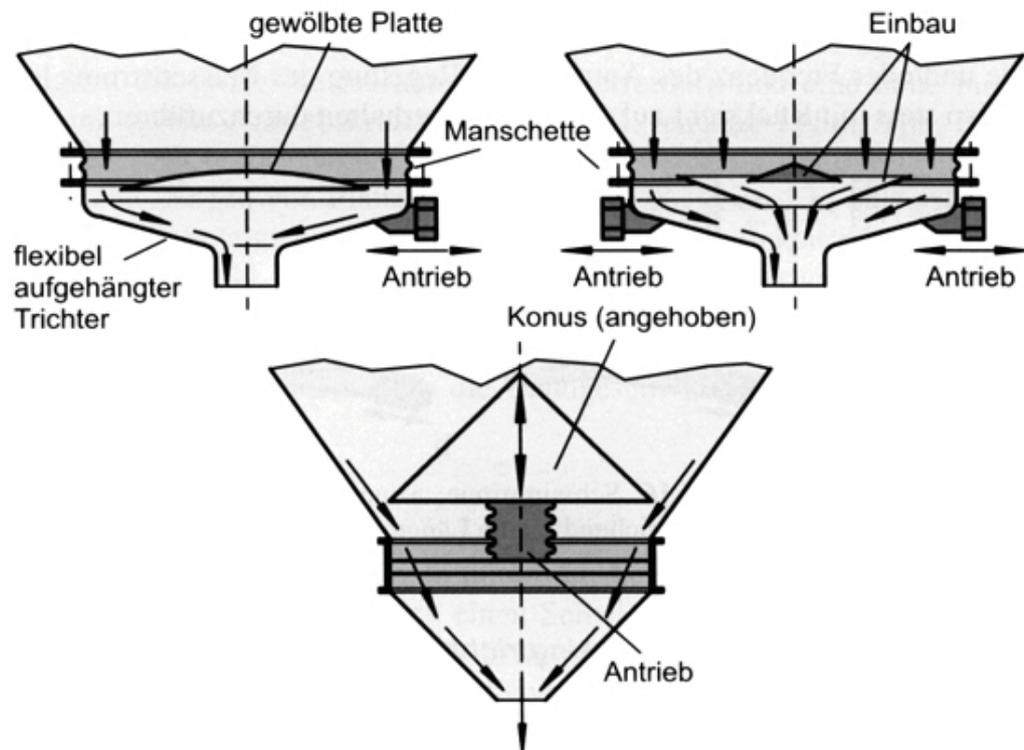


Abb. 2-50: Schwingtrichterausführungen [13]

Feinkörnige kohäsive Schüttgüter, die ohne Vibrationseinwirkung zur Brückenbildung neigen, lassen sich mit einem Schwingtrichter gut austragen. Das Schüttgut wird durch die Schwingungen über den gesamten Auslaufquerschnitt in Bewegung versetzt. Über die Schlitzbreite und die Intensität der Vibration lassen sich die Mengenströme regeln. [7]

2.3.9 Drehbalkenboden

Dieses Art des Austragsorgan lässt sich mit dem Schwingrost Typ Hogan in Abb. 2-49b vergleichen, nur mit dem Unterschied, dass nicht Schwingungen für den Austrag sorgen sondern nur das gleichsinnige Hin- und Zurückdrehen der Balken. Die Abb. 2-51a zeigt ein System mit Drehbalkenboden in Ruhestellung und in Abb. 2-51b beim Schüttgutaustrag. Dieses System eignet sich nicht nur für gut fließende Schüttgüter, sondern auch für kohäsive, anbackende Schüttgüter und schwer handhabbare Produkte wie Folienschnitzel. Auch, wenn bei Folienschnitzel darauf geachtet werden muss, dass sich im unter den Drehbalken liegenden Sammeltrichter keine Fließprobleme ergeben, so sind doch schon Abmessungen von 5 x 6,5 Metern realisiert worden. [13]

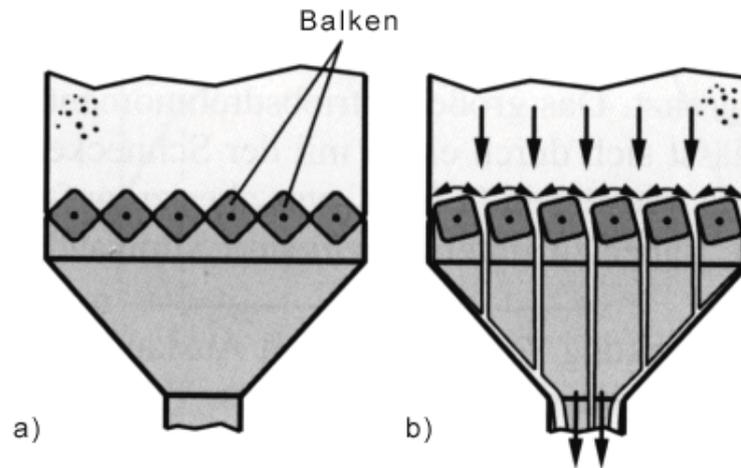


Abb. 2-51: Drehbalkenboden a) in Ruhestellung b) beim Schüttgutaustrag [13]

2.3.10 Schubaufgeber

Diese Art der Aufgeber ist besonders robust gebaut. Die Grundstellung ist meistens schräg, um höhere Beschleunigungskräfte erzielen zu können. Neben den Beschleunigungskräften spielt die Hubzahl und die Hublänge eine Rolle für die Fördergutmenge. Abb. 2-52 zeigt anschaulich die Funktion eines Schubaufgebers. Wenn sich die beiden beweglichen Segmente in der kompaktesten Form befinden kann Material nachrutschen. Dieses Material wird dann bei der Expansion der Segmente weiter geschoben. Beim Zurückziehen der Segmente kann das Gut nicht mit zurück, weil dies durch das nachfolgende Gut aus dem Behälter verhindert wird.

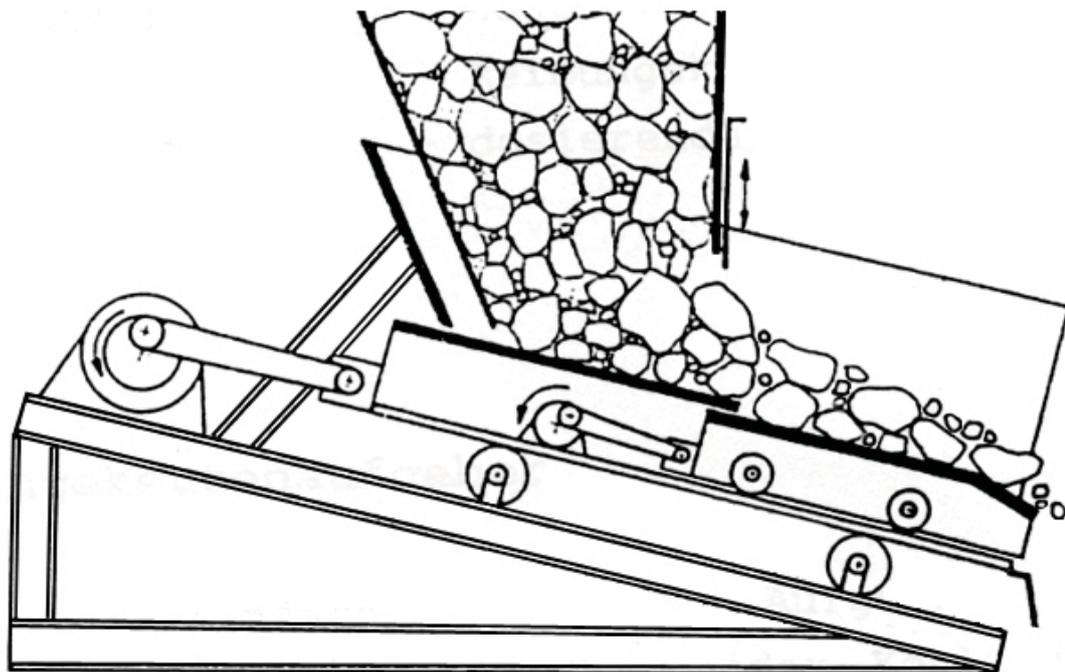


Abb. 2-52: Schubaufgeber [11]

Als Antriebe kommen Kurbelantriebe und hydraulische Antriebe zum Einsatz. Überwiegend werden Schubaufgeber für grobkörnige Schüttgüter eingesetzt da sich bei feinkörnigen Schüttgütern Schwingrinnen durchgesetzt haben. [5,11]

2.3.11 Zellenradschleusen

Durch die Rotation eines Zellenrades um eine Achse werden die einzelnen Kammern kontinuierlich nacheinander gefüllt und entleert. Die Achse kann horizontal (siehe Abb. 2-53a) und vertikal (siehe Abb. 2-53b) liegen, wobei bei vertikalem Einbau zusätzlich ein Rührwerk vorgesehen werden muss um tote Zonen zu verhindern. Zellenradschleusen eignen sich gut zum Einspeisen in Räume mit anderen Druckverhältnissen und zum Dosieren der Austragsmenge. Wichtig für einen Einsatz zur Dosierungszwecken ist, dass ab einer bestimmten Drehzahl der ausgetragene Massenstrom nicht weiter linear mit der Drehzahl steigt. [6]

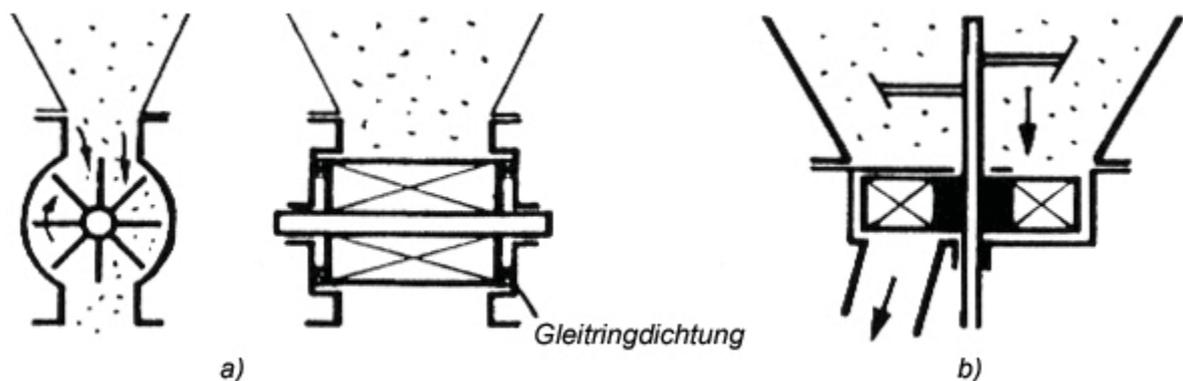


Abb. 2-53: Ausführungen von Zellenradschleusen [6]

2.3.12 Walzen-/ Trommelaufgeber

Diese Art der Aufgeber ähneln der Zellenradschleusen, nur dass sie einerseits nicht dazu gedacht sind Räume mit unterschiedlichen Drücken zu trennen und dass die Zellenform nicht so stark ausgeprägt ist. Die Vertiefungen am Umfang sind je nach Art des Förderguts mehr oder weniger stark ausgebildet um eine Förderung zu gewährleisten. Das Schüttgut bösch sich auf die Walze bzw. Trommel ab. Erst bei Drehung des Aufgebers wird Material ausgetragen. Bei richtiger Konstruktion ist das Halten des Schüttgutes bei Stillstand sowie sicheres und gleichmäßiges Austragen des Gutes ohne Probleme möglich. [5]

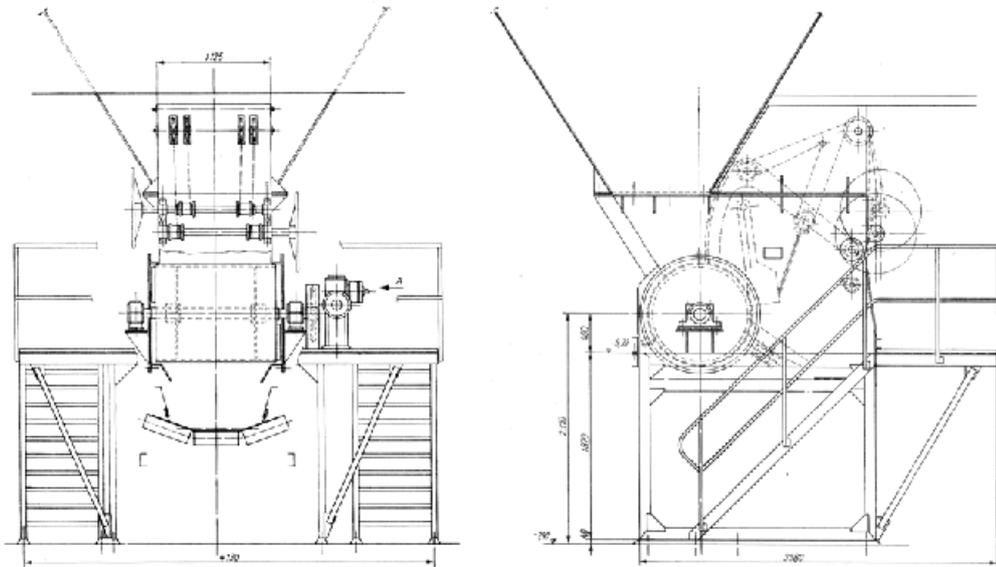


Abb. 2-54: Walzenaufgeber [12]

2.3.13 Pneumatische Systeme

Das Schüttgut wird durch das Einblasen von Luft in den Lagerraum in Bewegung versetzt. Die Systeme unterscheiden sich hinsichtlich der Einwirkung auf das Schüttgut.

2.3.13.1 Kontinuierliche Einwirkung

Die Luft wird mit kleinen Geschwindigkeiten kontinuierlich in den Lagerbehälter eingeblasen. Die Zuführung kann, wie in Abb. 2-55a dargestellt, über Trichterwände aus porösem Material erfolgen. Dabei wird auf der gesamten Fläche das Schüttgut fluidisiert. Belüftungskästen (siehe Abb. 2-55b) und Belüftungspfeifen (siehe Abb. 2-55c) beaufschlagen nur kleinere Flächen mit Druckluft. Diese werden deswegen in Nähe des Auslaufs angebracht wo die meisten Austragsprobleme auftreten. Mit steigender Partikelgröße reduziert sich der Durchströmwiderstand und damit steigen wiederum die Luftmengen und deren Geschwindigkeit um eine gleich bleibende Wirkung erzielen zu können. Der sinnvolle Einsatzbereich liegt also bei feinkörnigen Schüttgütern mit einer maximalen Korngröße von etwa 300 μm . [6,14]

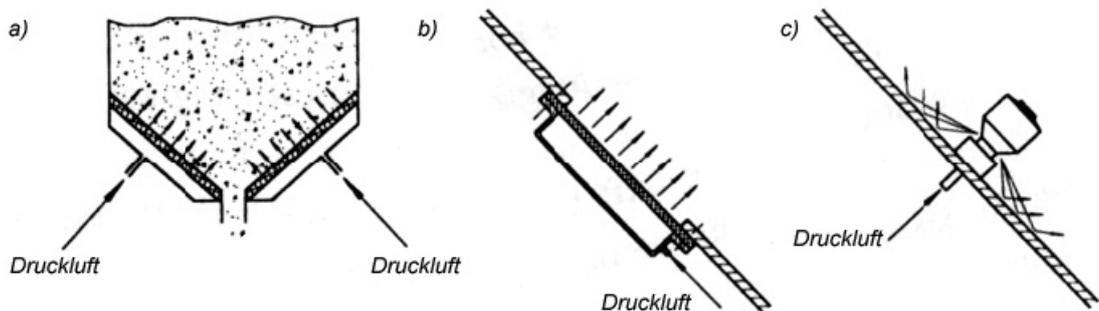


Abb. 2-55: kontinuierlich arbeitende pneumatische Systeme [14]

2.3.13.2 Temporäre Einwirkung

Geräte für einen derartigen Einsatz werden Luftkanonen oder Luftstoßgeräte (siehe Abb. 2-56) genannt.

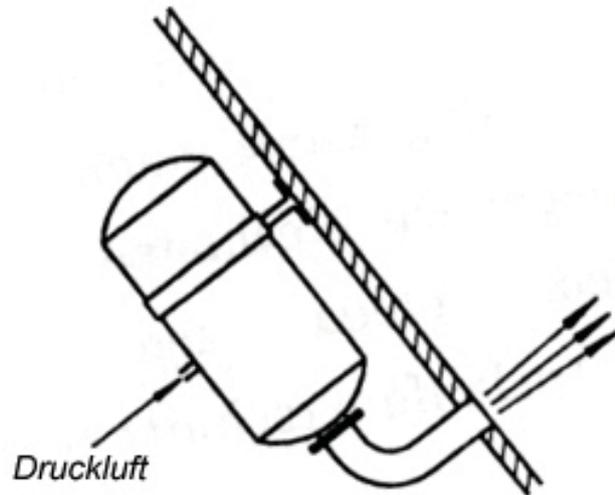


Abb. 2-56: Luftkanone [14]

Durch schlagartige Einleitung von auf bis zu ca. 10 bar komprimierter Luft in den Lagerbehälter werden Schächte und Schüttgutbrücken zerstört. Um eine zusätzliche Verfestigung des Schüttgutes zu vermeiden dürfen Luftkanonen nur während des Schüttgutaustrags betätigt werden. Häufig werden dazu mehrere Luftkanonen, die in unterschiedlichen Höhen an der Bunkerwand verteilt sind, zum Einsatz (siehe Abb. 2-57).

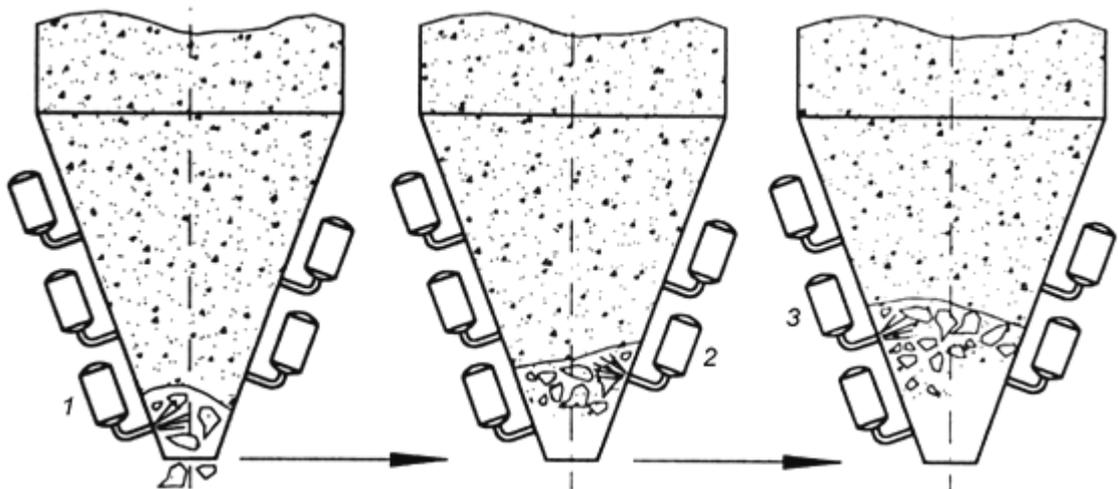


Abb. 2-57: Einsatzablauf von Luftkanonen [14]

Weitere Probleme, die auftreten können, beim Einsatz von Luftkanonen sind z.B. die Staubentwicklung wegen der großen Luftmengen und stellenweise eine höhere Beanspruchung der Behälterwände. [14]

2.3.13.3 Indirekte Einwirkung

Die Luft wird nicht direkt dem Schüttgut zugeführt, sondern so genannten Bunkerkissen (siehe Abb. 2-58) die aus hochelastischem Weichgummi gefertigt werden. Diese Kissen lassen sich zu einer Halbkugel aufblasen die Schüttgutbrücken in der Nähe zum Einsturz bringt. Als zusätzliche Möglichkeit zum einfachen Aufblasen bietet sich eine Beaufschlagung mit pulsierender Druckluft an, die das Kissen in Schwingung versetzt. Bunkerkissen werden an kritischen Stellen asymmetrisch verteilt im Lagerbehälter angebracht. [7, 14]

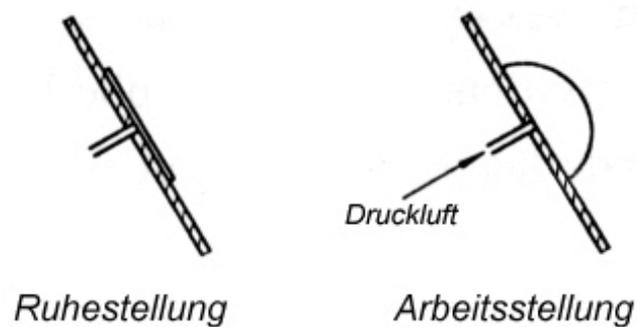


Abb. 2-58: Bunkerkissen [14]

2.4 Grundlagen der Kunststoffkunde

Dieses Kapitel liefert einen kleinen Überblick über die Kunststoffe um ein besseres Verständnis für das zu lagernde Schüttgut und seine Komplexität zu bekommen. Jene Kunststoffgruppen, zu denen die zu lagernden Recyclate zählen erfahren eine ausführlichere Betrachtung. Dabei zeigt sich vor allem dass selbst in der gleichen Kunststoffgruppe die Kennwerte stark variieren können. Daraus resultiert auch die Variation der Schüttguteigenschaften, die eine Vorhersage des Verhaltens erschwert.

2.4.1 Einteilung nach der Bildungsreaktion

Kunststoffe lassen sich anhand der Bildungsreaktion in folgende Gruppen einteilen:

- Abgewandelte Naturstoffe
- Synthetische Kunststoffe

darunter fallen:

- Polymerisate
- Polykondensate
- Polyaddukte

Abb. 2-59 liefert eine grobe Übersicht wo die einzelnen Kunststoffe anzusiedeln sind. [15]

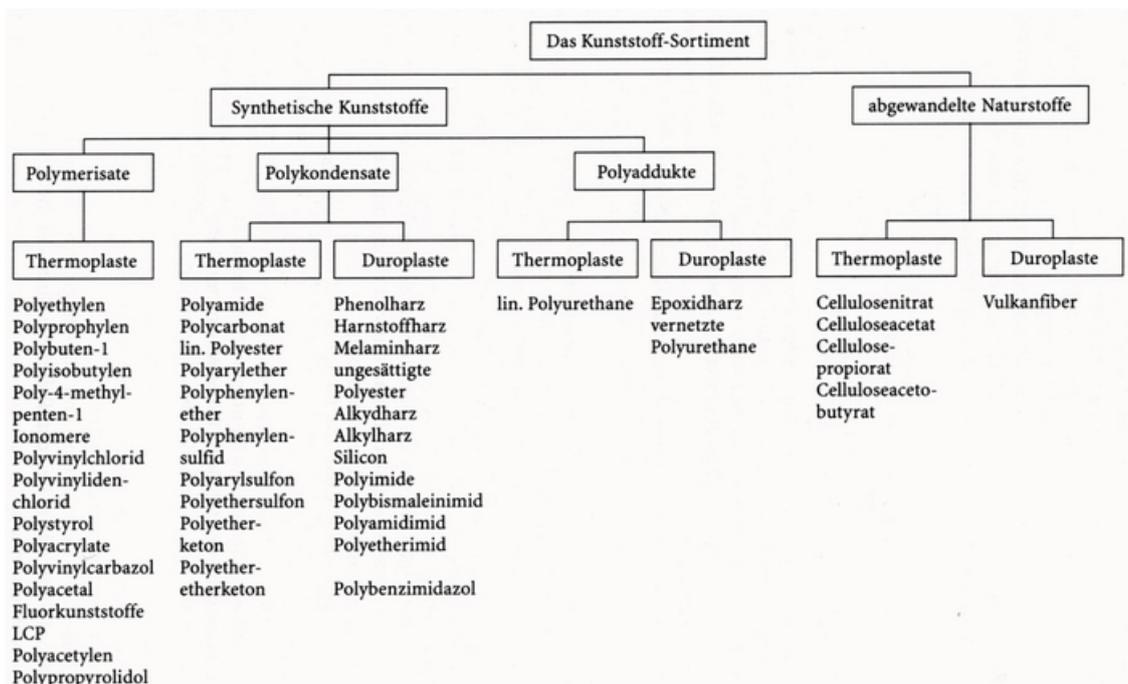


Abb. 2-59: Übersicht Kunststoffe [15]

2.4.2 Einteilung der molekularen Struktur

Eine Unterscheidung der Kunststoffe nach der Bildungsreaktion ist nicht ausreichend, da dies nicht genug über die Eigenschaften und Verarbeitbarkeit der jeweiligen Kunststoffe aussagt. Die molekulare Struktur liefert hier mehr Information.

Es erfolgt eine Einteilung in

- Thermoplaste
- Duroplaste und
- Elastomere. [15]

2.4.2.1 Thermoplaste

Thermoplaste haben lineare und verzweigte (siehe Abb. 2-60) Fadenmoleküle.

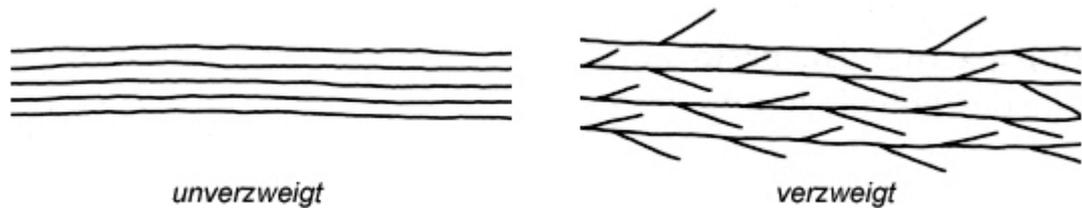


Abb. 2-60: Arten der Fadenmoleküle bei Thermoplasten [15]

Des Weiteren können Kunststoffe dieser Gruppe amorph oder teilkristallin (siehe Abb. 2-61) sein. [15, 16]

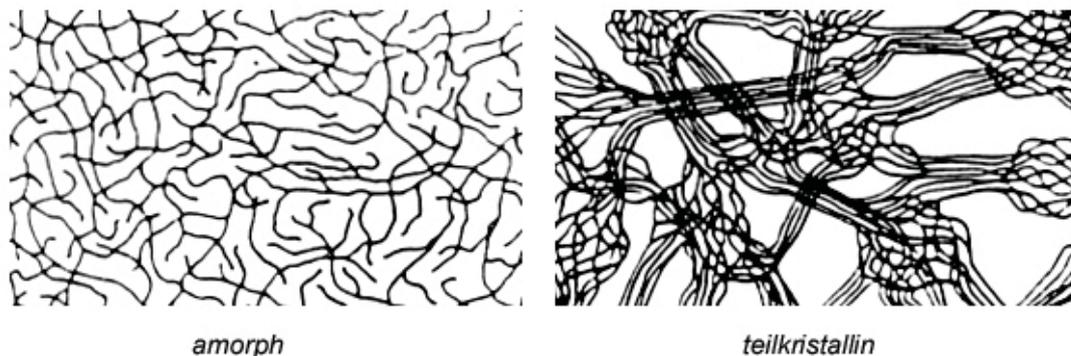


Abb. 2-61: Anordnungen der Fadenmoleküle bei Thermoplasten [15]

Thermoplaste sind löslich und schmelzbar. Somit können Kunststoffe dieser Gruppe wiederholt geschmolzen und gelöst werden um sie neuerlich einem Formgebungsprozess zuzuführen.

Ein besseres Verständnis für die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe liefern Darstellungen, die einen Bezug zur Temperatur liefern. Wichtig sind dabei die

Glasübergangstemperatur T_g und die Schmelztemperatur T_s sowie die Bereiche die sie markieren. Abb. 2-62 zeigt dies für amorphe Thermoplaste.

- Bereich I: Energieelastisches Verhalten (Glaszustand). Anwendungsbereich des Kunststoffes.
- T_g^* : Glasübergangstemperatur, Einfrieretemperatur. Übergang in den thermoelastischen Bereich.
- Bereich II: Entropieelastisches Verhalten (quasi-gummi-elastisch). Bereich der Warmumformung.
- Bereich III: Viskoses Fließverhalten. Bereich der Thermoplastizität: Urformen und Schweißen. Übergang von II–III allmählich,

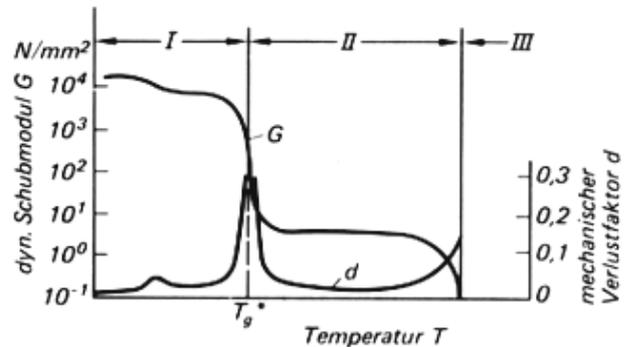


Abb. 2-62: mechanisches Verhalten von amorphen Thermoplasten [15]

Teilkristalline Thermoplaste sind in Abb. 2-63 dargestellt.

- Bereich I: Glaszustand, amorphe Bereiche eingefroren, Kunststoff spröde.
- T_g^* : Glasübergangstemperatur für die amorphen Anteile.
- Bereich Ia: Amorphe Anteile thermoelastisch, kristalline Anteile starr. Üblicher Anwendungsbereich.
- T_s^* : Kristallitschmelztemperatur.
- Bereich II: Bereich der aufschmelzenden Kristallite, Kunststoff wird warmumformbar (enger Temperaturbereich).
- Bereich III: Viskoses Fließverhalten, Bereich der Thermoplastizität; Urformen und Schweißen.

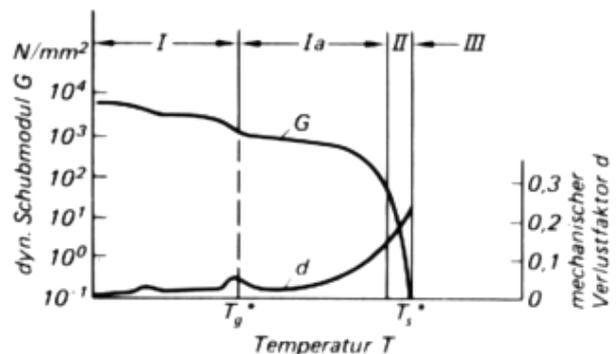


Abb. 2-63: mechanisches Verhalten von teilkristallinen Thermoplasten [15]

2.4.2.2 Duroplaste

Die Duroplaste verfügen über einen engmaschig vernetzten Aufbau wie in Abb. 2-64b zu sehen. Dadurch sind sie bei Raumtemperatur hart und spröde. Eine Formgebung für Kunststoffe aus dieser Gruppe muss vor dem Aushärten erfolgen. Der Grund dafür ist, dass Duroplaste nicht schmelzbar und nicht löslich sind. [15]

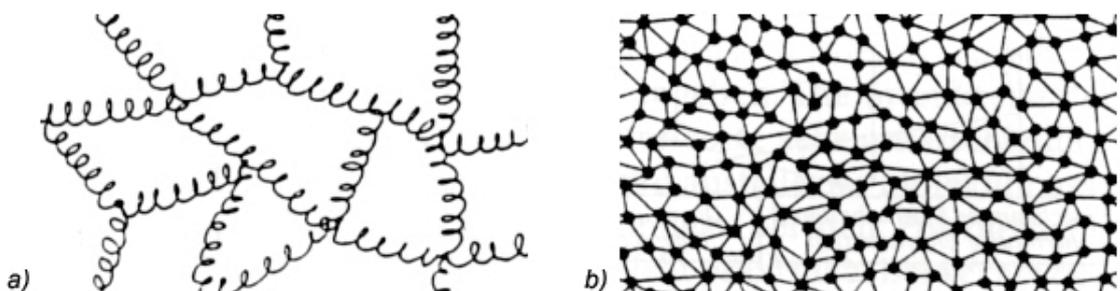


Abb. 2-64: Anordnungen vernetzter Moleküle [15]

Abb. 2-65 zeigt das mechanische Verhalten über die Temperatur um einen Vergleich mit Abb. 2-62, Abb. 2-63 und Abb. 2-66 zu ermöglichen.

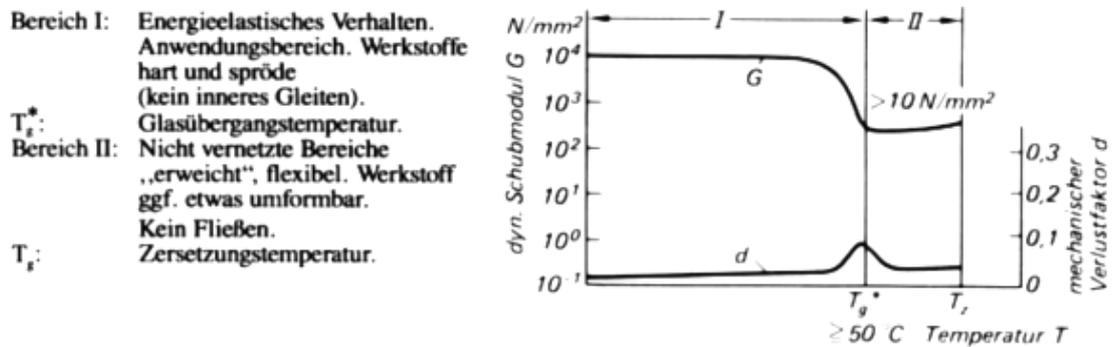


Abb. 2-65: mechanisches Verhalten von Duroplasten [15]

2.4.2.3 Elastomere

Die Molekülketten sind bei den Elastomeren weitmaschig vernetzt (siehe Abb. 2-64a). Dieser Aufbau führt dazu dass sie bei jeder Temperatur, die sie ohne sich zu zersetzen ertragen, gummielastisch sind. Wie auch die Duroplaste sind Elastomere nicht schmelzbar und nicht löslich.

Abb. 2-66, mit dem Diagramm für Elastomere, vervollständigt die Übersicht über die thermische Abhängigkeit des mechanischen Verhaltens der Kunststoffe. [15]

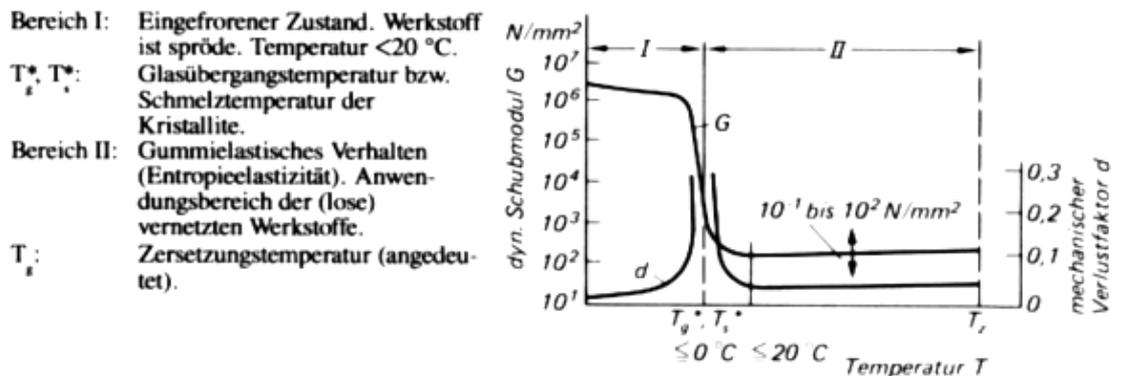


Abb. 2-66: mechanisches Verhalten von Elastomeren [15]

2.4.3 Die zu lagernden Kunststoffarten

2.4.3.1 PE

Die Vielfalt der Typen ist bei Polyethylen, das zur Gruppe der Polyolefine gehört, sehr groß. Unabhängig von ihrem strukturellen Aufbau sind alle Arten des Polyethylens von folgenden Eigenschaften gekennzeichnet:

- Vergleichsweise niedrige Dichte

- Hohe Zähigkeit und Reißdehnung
 - Sehr gute elektrische und dielektrische Eigenschaften
 - Sehr geringe Wasseraufnahme
 - Hohe Beständigkeit gegen den Angriff durch Chemikalien
 - Gute Ver- und Bearbeitbarkeit
- etc.

In Tab. 2-10 ist eine kleine Übersicht über gängige Polyethylenpolymere und ihren spezifischen Eigenschaften:

Eigenschaften	Einheit	Polyethylen- und Ethylen-Copolymere					
		PE-LD	PE-LLD	PE-HD	PE-HD GF 20	PE-HD HWM	PE-HD UHMW
Dichte bei 23°C	g/cm ³	≤0,920	0,918–0,935	≤0,954	1,09	0,942–0,954	0,94
Schmelzindex 190/2,16	g/10 min	25–0,5	25–0,5	17–0,35	–	0,45	–
190/5	g/10 min	88–0,4	–	60–<0,1	10	2,–0,3	–
190/21,6	g/10 min	–	–	–	–	18–10	<0,01
Kristallit-Schmelzbereich	°C	105–110	122–124	130–135	130–132	125–132	125–135
<i>mechanische</i>							
Streckspannung bei 23°C	N/mm ²	8–15	10–30	20–30	30	22–24	22
Dehnung bei Streckspannung	%	20	–	12	–	12–16	–
Reißdehnung	%	≈ 600	100–900	400–800	30	> 800	> 600
3,5-%-Biegespannung	N/mm ²	7–10	–	30–40	60	16–28	14
Torsionssteifheit	N/mm ²	60–90	–	≈ 400	340	230–240	250
Schubmodul bei 23°C	N/mm ²	100–200	–	700–> 1000	–	–	≈ 300
bei 50°C	N/mm ²	30–100	–	400–900	–	–	≈ 150
bei 100°C	N/mm ²	< 10	–	80–200	–	–	–
Kugeldruckhärte, 30-s-Wert	N/mm ²	≈ 15	–	≈ 50	63	36–40	38
Schlagzähigkeit bei 20°C	kJ/m ²	o.Br.	o.Br.	–	o.Br.	–	o.Br.
bei –20°C	kJ/m ²	o.Br.	≈ 4	≈ 5	45	–	–
Kerbschlagzähigkeit bei 20°C	kJ/m ²	o.Br.	o.Br.	6–o.Br.	6	18–o.Br.	o.Br.
bei –20°C	kJ/m ²	o.Br.	≈ 4	> 5	–	15–o.Br.	o.Br.
Izod impact (3,1-mm-Probe)	ft/lb inch o.n.	o.Br.	1,09–9,0	0,4–4,0	–	3,2–4,5	o.Br.
<i>thermische</i>							
Gebrauchstemperatur ohne mech. Beanspruchung in Luft	°C	80–90	90–115	90–120	120	90–120	–268–+450
kurzzeitig	°C	60–75	70–95	70–80	85	–	100
dauernd	°C	–	–	–	–	–	–
Formbeständigkeit i.d. Wärme nach Vicat, Methode B	°C	40	115 (A)	60–65	77	–	–
nach ISO/R75, Methode A	°C	≈ 35	–	50	121	–	43–49
Methode B	°C	≈ 45	–	75	130	66–68	67–82
linearer Ausdehnungskoeffizient (zwischen 20°C und 80°C)	K ⁻¹	1,7 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻⁴	0,35–0,6 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻⁴
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	≈ 0,35	–	≈ 0,43	≈ 0,50	–	–
Wasseraufnahme (96 h)	mg	<0,5	–	<0,5	–	<0,5	<0,5
Wasseraufnahme n. ASTM D 570 (24 h)	%	–	0,01	–	0,02	–	–

Tab. 2-10: Kennwerte für Formmassen aus Polyethylen [15]

Zu den in der Tab. 2-10 aufgelisteten Kennwerte sind noch die nachfolgenden Reibwerte auf Stahl hinzuzufügen. [15]

PE-HD (hochmolekular)	0,29
PE-HD (niedrigmolekular)	0,25
PE-LD	0,58

2.4.3.2 PA

Auch hinter dem Begriff Polyamid verbirgt sich eine große Vielfalt von verschiedenen Typen. Alle teilen die folgenden Eigenschaften:

- Hohe Festigkeit, Steifigkeit und Härte
 - Hohe Formbeständigkeit in der Wärme
 - Sehr gutes elektrisches Isoliervermögen
 - Hoher Verschleißwiderstand
 - Gute Gleit- und Notlaufeigenschaften
 - Hohes Dämpfungsvermögen
 - Hohe Beständigkeit gegen Lösungsmittel, Kraftstoffe und Schmiermittel
 - Gesundheitliche Unbedenklichkeit
 - Wirtschaftliche Verarbeitbarkeit
- etc.

In Tab. 2-11 ist eine kleine Übersicht über gängige Polyethylenpolymere und ihren spezifischen Eigenschaften zu sehen:

Eigenschaften	Einheit	PA 6	PA 6-GF30	PA 66	PA 66- GF 35	PA 610	PA 11	PA 12
Dichte	g/cm ³	1,13	1,36	1,14	1,4	1,08	1,04	1,02
Wasseraufnahme								
Normalklima 23/50 (Sättigung)	%	2,5–3,5	1,6–2,2	2,5–3,1	1,5–1,9	1,2–1,6	0,8–1,2	0,7–1,1
Wasserlagerung 23 °C (Sättig.)	%	9 und 10	5,7–6,3	8–9	4,7–5,3	3,0–3,6	1,6–2,0	1,3–1,7
<i>mechanische</i>								
Streckspannung/Reißfestigkeit	N/mm ²	40	100	65	160	40	50	45
Reißdehnung	%	200	–	150	5	500	500	300
E-Modul	N/mm ²	1400	5000	2000	10000	1500	1000	1600
Grenzbiegespannung	N/mm ²	50	130	50	200	40	70	650
Kugeldruckhärte (60-s-Wert)	N/mm ²	70	110	90	170	70	50	70
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	o. Br.	40	o. Br.	40	o. Br.	o. Br.	o. Br.
Kerbschlagzähigkeit bei 20 °C	kJ/m ²	25–o. Br.	17	20	14	13	40	10–20
bei – 40 °C	kJ/m ²	3	–	2	–	3	5–20	6–10
<i>thermische</i>								
Gebrauchstemperatur ohne mechanische Beanspruchung in Luft								
kurzzeitig	°C	140–180	180–220	170–200	190–240	140–180	140–150	140–150
dauernd	°C	80–100	100–130	80–120	100–130	80–110	70–80	70–80
Schmelztemperatur	°C	220	220	255	255	215	185	180
Formbeständigkeit i.d. Wärme								
nach Martens	°C	55	190	60	–	50	–	45
nach Vicat/B	°C	180	200	200	–	170	–	165
ISO/R 75A: 1,85 N/mm ²	°C	80	200	105	200	95	55	50
B: 0,45 N/mm ²	°C	190	215	200	200	195	150	140
linearer Ausdehnungs- koeffizient	K ⁻¹ · 10 ⁶	80	30	80	20	100	130	150
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,29	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
spezifische Wärmekapazität	kJ/kgK	1,8	1,7	1,7	1,4	1,8	2,4	2,4

Tab. 2-11: Kennwerte gängiger Polyamide [15]

Zu den in der Tab. 2-11 aufgelisteten Kennwerte sind noch die nachfolgenden Reibwerte auf Einsatzstahl hinzuzufügen. [15]

PA 66	0,25.....0,42
PA 6	0,38.....0,45
PA 610	0,36.....0,44
PA 11	0,32.....0,38
PA 66 – GF 35	0,32.....0,36

2.4.3.3 PET

Das teilkristalline Polyethylenterephthalat hat folgende kennzeichnende Merkmale:

- hohe Festigkeit
 - hohe Steifheit
 - günstiges Zeitstandverhalten
 - harte und polierfähige Oberfläche
 - hohe Maßbeständigkeit
 - günstiges Gleit- und Verschleißverhalten
 - gute elektrische Eigenschaften
 - mittelmäßige dielektrische Eigenschaften
 - hohe Chemikalienbeständigkeit
- etc.

Vom PET gibt es auch Arten mit amorphen Modifikationen. Bei diesen Modifikationen handelt es sich um den Einbau von sperrigen Bausteinen wie Isophthalsäure und/oder CHDM. Diese PET – Arten werden verwendet wenn es besonders auf folgende Eigenschaften ankommt:

- hohe Transparenz
 - hohe Zähigkeit
 - günstiges Zeitstandverhalten
 - günstiges Gleit- und Verschleißverhalten
 - Beständigkeit gegen Spannungsrissbildung
 - geringe Schwindung
 - hohe Maßbeständigkeit
- etc.

In Tab. 2-12 ist eine kleine Übersicht über gängige Polyethylenterephthalate und ihren spezifischen Eigenschaften dargestellt:

Eigenschaften	Einheit	Polyethylenterephthalat (PET)				
		unverstärkt	GF-33 SST 35	Rynite	amorph	Mylar-Folie 6 µm
Dichte	g/cm ³	1,38	1,52	1,51	1,34	1,40
Wasseraufnahme (23/50, 24 h)	%	0,1	0,04	-	0,16	0,1
<i>mechanische</i>						
Streckspannung	N/mm ²	81	-	-	55	-
Dehnung an der Streckgrenze	%	4	-	-	3,5	-
Reißfestigkeit	N/mm ²	42	165	103	38	220
Reißdehnung	%	70	2	6	300	110
Zug-E-Modul	N/mm ²	2800	1150	6500	2200	4500
Schlagzähigkeit 23°C	kJ/m ²	o.Br.	o.Br.	o.Br.	o.Br.	-
Kerbschlagzähigkeit 23°C	kJ/m ²	3	7,5	235 (J/m)	2,5	-
- 40°C	J/m	-	-	160	-	-
Kugeldruckhärte (30-s-Wert)	N/mm ²	150	240	-	97	-
<i>thermische</i>						
Gebrauchstemperatur						
kurzzeitig	°C	200	220	220	180	180
dauernd	°C	100	100	100	100	- 60 bis + 150
Glastemperatur DTA	°C	73 bis 79	73-79	73-79	68-77	73-79
Glasübergangstemperatur	°C	98	98	98	86	98
Schmelzbereich	°C	255	255	250	255	250-265
Vicat-Erweichungstemperatur	°C					
VST/B/120	°C	185	225	-	73	-
Formbeständigkeit i.d. Wärme						
Methode A	°C	80	230	220	70	-
Methode B	°C	115	> 250	-	72	-
linearer Ausdehnungskoeffizient	K ⁻¹	70 · 10 ⁻⁶	20 · 10 ⁻⁶	30 · 10 ⁻⁶	80 · 10 ⁻⁶	17 · 10 ⁻⁶
spezif. Wärmekapazität	kJ/kgK	1,2	0,9	-	1,3	1,32
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,29	0,33	0,29	0,24	0,38

Tab. 2-12: Kennwerte einiger Polyethylenterephthalate [15]

Zu den in der Tab. 2-12 aufgelisteten Kennwerte ist noch ein Reibwert von 0,54 auf Einsatzstahl hinzuzufügen. [15]

2.4.3.4 PC

Die weiteste Verbreitung unter der Vielzahl an möglichen Polycarbonaten hat Bisphenyl-A-Polycarbonat. Wegen seiner ausgewogenen Kombination anwendungstechnisch wertvoller Eigenschaften steht es mengenmäßig an zweiter Stelle der technischen Kunststoffe. Zu diesen Eigenschaften zählen:

- hohe Festigkeit, Steifheit, Härte und Zähigkeit in einem Temperaturbereich von -150 bis +135°C
- glasklare Transparenz
- hoher Oberflächenglanz
- hohe Maßbeständigkeit
- gute elektrische Isolierfähigkeit
- hohe Witterungsbeständigkeit bei Wanddicken von mehr als 75 mm
- hohe Beständigkeit gegen energiereiche Strahlung

- von selbst erlöschend nach Entfernen der Zündquelle
 - Kerbempfindlichkeit
 - Anfällig gegen Spannungsrisssbildung
 - begrenzte Chemikalienbeständigkeit
- etc.

Tab. 2-13 zeigt eine kleine Übersicht über gängige Polycarbonate und ihre spezifischen Eigenschaften:

Eigenschaften	Einheit	PC-Standardtyp	PC-GF 30	Bayblend T 65 MN
Dichte	g/cm ³	1,2	1,44	1,13
Schmelzindex (MFI 300/1,2)	g/10 min	9-13	-	-
Wasseraufnahme 23/50, 24 h	%	0,15	0,13	0,2
<i>mechanische</i>				
Streckspannung	N/mm ²	> 55	75	50
Dehnung an der Streckgrenze	%	6	3	4,5
Reißfestigkeit	N/mm ²	> 65	70	45
Reißdehnung	%	110	3,5	80
Quetschspannung	N/mm ²	> 80	110	-
Stauchung	%	7	4,5	-
Zug-E-Modul	N/mm ²	2300	5500	2100
Schlagzähigkeit				
+ 23°C	kJ/m ²	o. Br.	30	o. Br.
- 40°C	kJ/m ²	o. Br.	30	o. Br.
Kerbschlagzähigkeit				
+ 23°C	kJ/m ²	> 30	6	35
- 40°C	kJ/m ²	-	-	35
Kugeldruckhärte (30-s-Wert)	N/mm ²	110	145	80
<i>thermische</i>				
Gebrauchstemperatur ohne mechan. Beanspruchung in Luft				
kurzzeitig	°C	- 115 bis + 150	- 135 bis + 170	100
dauernd	°C	- 115 bis + 130	- 115 bis + 150	90
Glasübergangstemperatur	°C	150	150	140
Schmelzbereich	°C	220 bis 260	220 bis 260	220 bis 260
Vicat-Erweichungstemperatur VST/B/120	°C	148	150	122
Formbeständigkeit in der Wärme				
Methode A	°C	138	147	105
Methode B	°C	142	153	125

Tab. 2-13: Kennwerte einiger Polycarbonate [15]

[15]

2.5 Vergleichende Betrachtung

Obwohl im Kapitel 2.4 nur vier verschiedene Kunststoffgruppen erläutert werden, so sieht man anhand der Tabellen wie weit die Kennwerte allein schon innerhalb einer Gruppe streuen.

Während PE-LD und PE-LLD einen Reibwert auf Stahl von um die 0,25 aufweisen, so ist bei PE-HD der Reibwert doppelt so hoch. Anhand aller bisher erwähnten Reibwerte der Kunststoffe auf Stahl ergibt sich ein Bereich von 0,25 bis 0,58. Für den ungünstigsten Fall ergibt das einen Reibwinkel von etwa 30° . Für ein Stück eines Kunststoffes reicht also prinzipiell ein Winkel von über 30° damit er auf einer geneigten Eben abrutscht. Diese idealistische Vorstellung beinhaltet natürlich nicht Effekte wie die Brückenbildung und Effekte die auf die Partikelform zurückzuführen sind.

Viel kritischer als die Reibung zwischen den Kunststoffen und dem Stahl ist der Reibbeiwert der Reibpaarung Kunststoff/Kunststoff. Dies erklärt sich am besten mittels eines Prüfverfahrens das bereits unter Kapitel 2.1.5.6 in ähnlicher Form erwähnt wurde. Ein besonders wichtiger Aspekt des Prüfungsvorganges ist, dass die Belastung, die zum Verdichten verwendet wurde, auch während des Prüfungsvorgangs aufrechterhalten wird. Bei diesem Art der Prüfung mittels eines Drucktopfs (siehe Abb. 2-67) werden zwar nur qualitative Werte ermittelt, aber es eignet sich gut dafür die Gründe für die Austragsprobleme von Folienschnitzel zu erklären. Zusätzlich können auch Aussagen getroffen werden welche Materialcharakteristiken für den Austrag erschweren bzw. welche ihn verbessern. [13, 17]

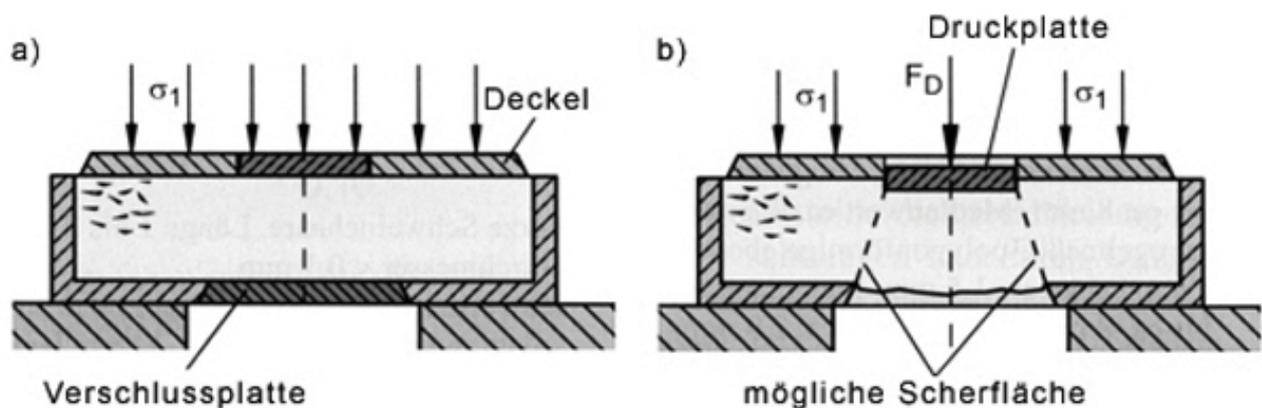


Abb. 2-67: a) Verdichten und b) Prüfung mittels Drucktopf [13]

In Abb. 2-67a wird die Schüttgutprobe bei noch eingesetzter Verschlussplatte verdichtet und erfolgt der Prüfungsvorgang unter Beibehaltung der Verdichtungslast (siehe Abb. 2-67b). In Abb. 2-68 ist nun schematisch dargestellt wie sich ein Schüttgut, das aus plättchenförmigen Partikeln besteht, beim Verdichtungsprozess verhält. Die Partikel überlappen sich gegenseitig intensiver und dies erhöht die zwischen den Partikeln übertragbaren Reibkräfte. [13, 17]

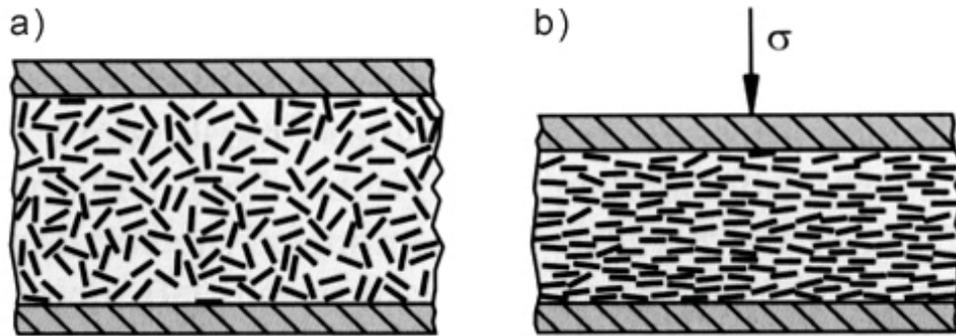


Abb. 2-68: Lage der plättchenförmigen Partikel a) unbelastet und b) belastet [13]

Nach dem Verdichtungsvorgang wird nun der Schervorgang unter die Lupe genommen. Damit sich eine ähnliche Scherfläche ausbilden kann, wie jene die in Abb. 2-67b schematisch dargestellt ist, müssen sich die Partikel umorientieren und sich entlang der Richtung der Scherbewegung umordnen. Der Vorgang der Umorientierung bildet sich bei steifen Partikeln anders aus (siehe Abb. 2-69b) als bei verformbaren (siehe Abb. 2-69c). Verformbare Partikel unterstützen die Bildung von Scherflächen was tendenziell zu einer einfacheren Handhabung im Vergleich zu steiferen Partikeln führt. [13, 17]

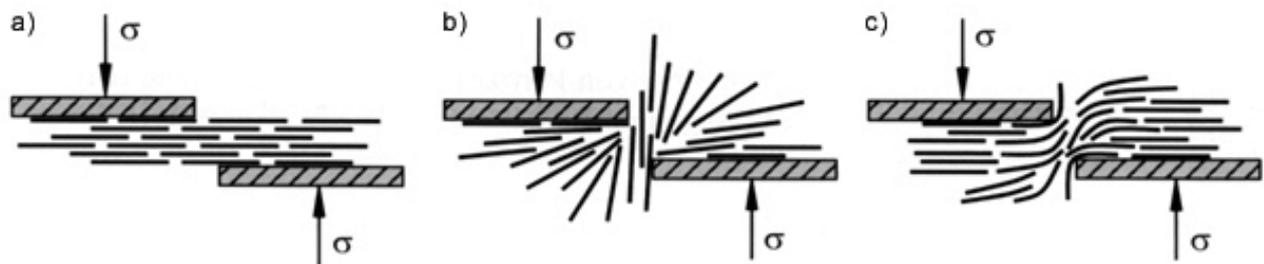


Abb. 2-69: Ausrichtung der Partikel entlang der Scherfläche a) vor und während des Schervorgangs bei b) steifen und c) verformbaren Partikeln [13]

Bei beiden Mechanismen müssen die Partikel bei der Bewegung die Reibung überwinden. Folgende Punkte haben einen erschwerenden Einfluss auf die Ausrichtung der Partikel:

- Das Schüttgut wird durch den begrenzten Raum daran gehindert sich auszudehnen um Raum für die Umorientierung zu schaffen.
- Die aufgebrachte Vertikallast presst die Partikel aufeinander, was die Reibungskraft erhöht.
- Wegen der beiden bisher genannten Effekte muss durch die Druckplatte eine höhere Kraft aufgebracht werden um den Schervorgang fortsetzen zu können. Dies bewirkt eine stärkere Verdichtung die wiederum höhere Kräfte notwendig macht. Die für den Schervorgang notwendige Kraft schaukelt sich so zu hohen Werten auf.

Aufgrund der bisherigen Erläuterungen sind folgende Aussagen über das Maß der zu erwartenden Probleme in Abhängigkeit der Eigenschaften zu treffen:

Es gibt umso mehr Probleme und eine umso größere Abweichung vom Verhalten typischer Schüttgüter zu erwarten,

- desto größer das Verhältnis von Partikellänge zu Partikeldicke ist;
- desto größer der zwischen den Partikeloberflächen wirkende Reibungskoeffizient ist
- desto kleiner die Porosität ist,
- und desto größer die Partikellänge im Verhältnis zur Verformbarkeit der Schüttung bei Belastung (relative Längenänderung bei Belastung) ist.

Die experimentell ermittelten Ergebnisse und die dazugehörigen Modellverstellungen zeigen, dass Schüttgüter die aus faserigen oder plättchenförmigen Partikeln bestehen nur schwer charakterisierbar sind. Bei der Handhabung und beim Transport derartiger Schüttgüter ist besonders darauf zu achten, dass sich Scherflächen weitgehend ungehindert ausbilden können. Um dies zu ermöglichen ist es notwendig genügend Raum für die Umlagerung der Partikel, z.B. in Form einer lockeren Packung bei kleinen Spannungen, einzuplanen. [13, 17]

Bei der vorliegenden Aufgabenstellung ergeben sich in dieser Hinsicht zwei Ansatzpunkte. Der erste Punkt ist, dass bevor das Austragsorgan in Betrieb genommen wird die Austragsöffnung von der Transportschnecke leer gefördert wurde. Der etwas schwerer zu erfüllende zweite Punkt beinhaltet die Reduktion der Gewichtsbelastung auf das Schüttgut das sich im unmittelbaren Bereich der Austragsöffnung befindet.

Im Versuchsaufbau wurde die Belastung durch eine Druckplatte aufgebracht, doch in einem Bunker oder Silo entsteht die Belastung durch das Gewicht der Schüttgutsäule. Bei gleicher Partikelform stellt die Dichte des gelagerten Materials den entscheidenden Faktor dar. Die Gruppe der Polyethylene ist jene mit der geringsten Dichte aller behandelten Kunststoffe. Ausgehend von den Tabellen in Kapitel 2.4.3 folgen mit zunehmender Dichte auf die Polyethylene die Polyamide, dann die Polycarbonate und zum Schluss die Polyethylenterephthalate.

Zum Temperatureinfluss auf die behandelten Schüttgüter ist zu sagen dass dieser mit dem Gewicht der Schüttgutsäule im Zusammenhang steht. Je größer die Belastung, desto mehr Kraft ist erforderlich um die Reibung zu überwinden und desto mehr Wärme entsteht dabei. Hohe Temperaturen wiederum bewirken dass der Kunststoff erweicht und die einzelnen Partikel aneinander zu haften beginnen. Als kritischer Bereich für ein Aneinanderhaften der Partikel amorpher Thermoplaste ist in Abb. 2-62 der Bereich II und leicht darunter anzusehen. Bei teilkristallinen Thermoplasten in Abb. 2-63 ist die Abgrenzung ebenfalls der Bereich II und leicht darunter zu erkennen. Beim großen Teil der Kunststoffsorten, die zu den betrachteten

Kunststoffgruppen gehören, sind keine Probleme bezüglich dem Aneinanderhaften bis zu einer Temperatur von ca. 90 Grad Celsius zu erwarten.

Bei dem Material aus dem die CDs/DVDs bestehen, dem Polycarbonat, sind auch die Werte für die Festigkeit zu berücksichtigen, da aufgrund der großen „Partikelabmessungen“ leichter Klemmungen auftreten können. Dabei sind nicht einzelne CDs oder DVDs ein Problem sondern das Auftreten als Paket.

3 Übersicht über mögliche Ausführungen

Dieses Kapitel soll einen groben Überblick über viel versprechende Ausführungen geben. Bei der bisherigen Konstruktion wurde viel Energie investiert, die nicht direkt zu einem Austrag führte, sondern primär für eine Bewegung des Schüttguts sorgte, damit keine Brückenbildung auftrat. Der Rührbalken erzeugte bei diesem „in Bewegung halten“ durch die Reibung eine beträchtliche Wärme. Temperaturen von bis zu 97° Celsius sind dokumentiert worden. Temperaturen in diesem Bereich führen bei vielen Kunststoffen dazu dass sie so stark erweichen, dass die Folienschnitzel miteinander verkleben. Im Falle von BOPA – Schnitzel führte dieser Vorgang dazu, dass die Widerstandskraft des Schüttgutes so stark anstieg, dass der Rührbalken verbogen wurde.

Die folgenden Vorschläge sind deswegen, im Gegensatz zum bisherigen System, möglichst so ausgelegt, dass die Energie, die investiert wird, schnellstmöglich zu einem Austrag führt. Die Schüttgutpartikel sind nur kurz in Kontakt mit der Austragshilfe und haben so keine Möglichkeit, Reibungswärme über einen längeren Zeitraum anzusammeln.

Des Weiteren stützen sich die Vorschläge auf grundsätzliche Erfahrungswerte, wobei dies nicht nur auf das Fehlen von Schüttgutproben zurückzuführen ist. Selbst in aktuellsten Büchern wird eindeutig darauf hingewiesen, dass derartiges Schüttgut mit vielen geläufigen Prüfmethoden nicht realitätsgetreu erfassbar ist. Begründet wird diese Aussage mit dem Hinweis, dass diese Produkte bei lockerer Schüttung gut fließen aber bei zunehmender Belastung ein immer ungünstigeres Verhalten annehmen. In diesem Zusammenhang ist besonders auf die Abb. 3-1 hinzuweisen. Das Schüttgut wird zur Austragsöffnung hin verdichtet und die einzelnen Partikeln packen sich der längs nach zusammen. Durch diesen Vorgang erhöht sich die notwendige Austragskraft unzulässig. Mittels konstruktiver Änderungen, die die Belastung im Schüttgut reduziert, ist dies zu verhindern. [13, 17]

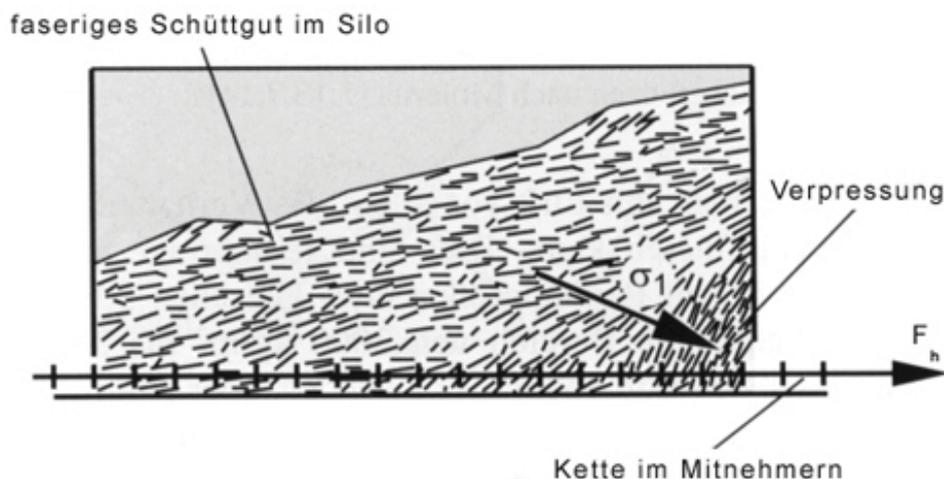


Abb. 3-1: Verpressung beim Austrag mittels Kettenförderer [13]

Der Erfahrung nach lässt sich jedes Schüttgut zunächst einmal in eine von den vier definierten Gruppen einteilen:

- Schlammig:

Nimmt man derartiges Schüttgut in die Hand, presste es mit ihr zusammen und es quillt zwischen den Fingern heraus, dann zählt es zu der schlammigen Schüttgutsorte. Solch ein Material wird ähnlich wie Flüssigkeit gehandhabt. Das Austragssystem hat die Aufgabe unkontrollierten Fluss zu verhindern und den gewünschten Austrag zu gewährleisten. Für diese Aufgabe empfehlen sich:

 - Zellenrad/Trommelrad
 - Doppelschneckensysteme

- Leicht fließend:

Presst man ein Schüttgut dieser Sorte mit einer Hand, so quillt kein Material zwischen den Fingern heraus. Nach dem Öffnen der Hand bleibt kein geformter Körper sondern ein lockerer Schüttguthaufen zurück. Prinzipiell kann zum Austrag eines Schüttgutes dieser Gruppe jedes Austragssystem eingesetzt werden.

- Schwer fließend:

Sehr oft ist es möglich ein Schüttgut mit bloßem Blick in diese Kategorie einzuordnen. Vor allem fasrige, bandförmige, fadenförmige, geschredderte, etc. Schüttgüter fallen darunter. Die folgenden Austragssysteme eignen sich besonders gut für diese Aufgabe:

 - Vibrationsförderer
 - Zellenrad/Trommelrad
 - Einzelschnecke mit speziellen Modifikationen
 - Doppelschneckenausführungen
 - Flügelrad/rotierender Räumarm

- Klebrig, pappig, kohäsiv:

Nach dem Pressen mit der Hand bleibt ein geformter Körper zurück. Erst durch eine weitere Krafteinwirkung zerfällt dieser wieder. Je höher die Kraft ist, desto mehr Probleme bereitet das Schüttgut beim Austrag. Geeignete Austragssysteme sind:

 - Doppelschneckenausführungen
 - Zellenrad/Trommelrad

- Bandförderer mit speziellen Modifikationen
- Spezialsysteme wie Drehteller

[18]

Nach dieser Einteilung lässt sich das vorliegende Schüttgut aus PE und PA Schnitzeln sowie PET Flakes in die Gruppe der schwer fließenden Schüttgüter einordnen. Wegen den teils recht schwierigen Eigenschaften des betrachteten Materials, unter anderem wegen der vergleichsweise niedrigen Schmelztemperaturen sind die Vorschläge aus der letzten Kategorie ebenfalls zu berücksichtigen.

3.1 Förderband

Abb. 3-2 zeigt eine Ausführung mit einem Förderband, auf dem die Schüttgutsäule ruht. Überschlagsmäßig hat diese Ausführung ein Gewicht von 2800kg.

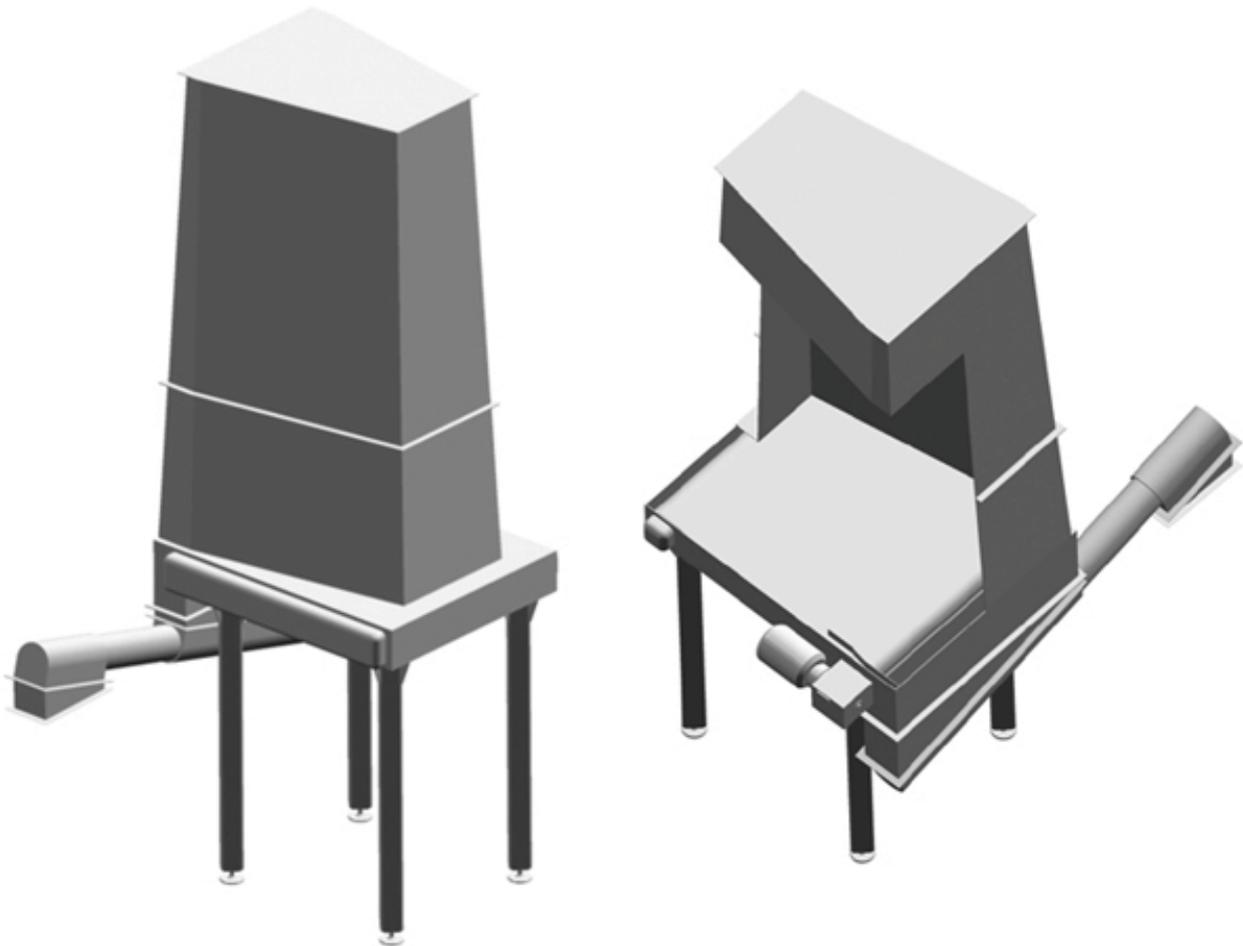


Abb. 3-2: Bunker mit einem Förderband als Austragsorgan

Die Bunkerwände sind wie bisher mit einer negativen Neigung ausgeführt. Die äußere Form des Bunkers verhindert weitgehend die Bildung toter Zonen nach dem Prinzip der zunehmenden Transportleistung beim Austrag. Für eine bessere Aufnahme des Gewichts der

Schüttgutsäule sind unter dem Band Stützrollen angebracht. Statt Stützrollen können aber auch Gleitbahnen zum Einsatz kommen, wenn die auf das Band wirkende Belastung reduziert wird. Die Aufnahme des Gewichts der Schüttgutsäule mittels Stützrollen stellt bei entsprechender Ausführung kein Problem dar, da Bunkerabzugsbänder mit bedeutend höherer Belastung als der vorliegenden dokumentiert sind. [19]

Eine Ausführung mit zwei versetzt übereinander liegenden Bändern zeigt Abb. 3-3. Ein Vorteil dieser Konstruktion wäre, dass zu Beginn nur das untere Band allein betrieben werden kann, und somit der Energiebedarf geringer wäre. Als Nachteile sind der größere Aufwand für einen zweiten Antriebsstrang und das höhere Gewicht von etwas 2250 kg anzuführen

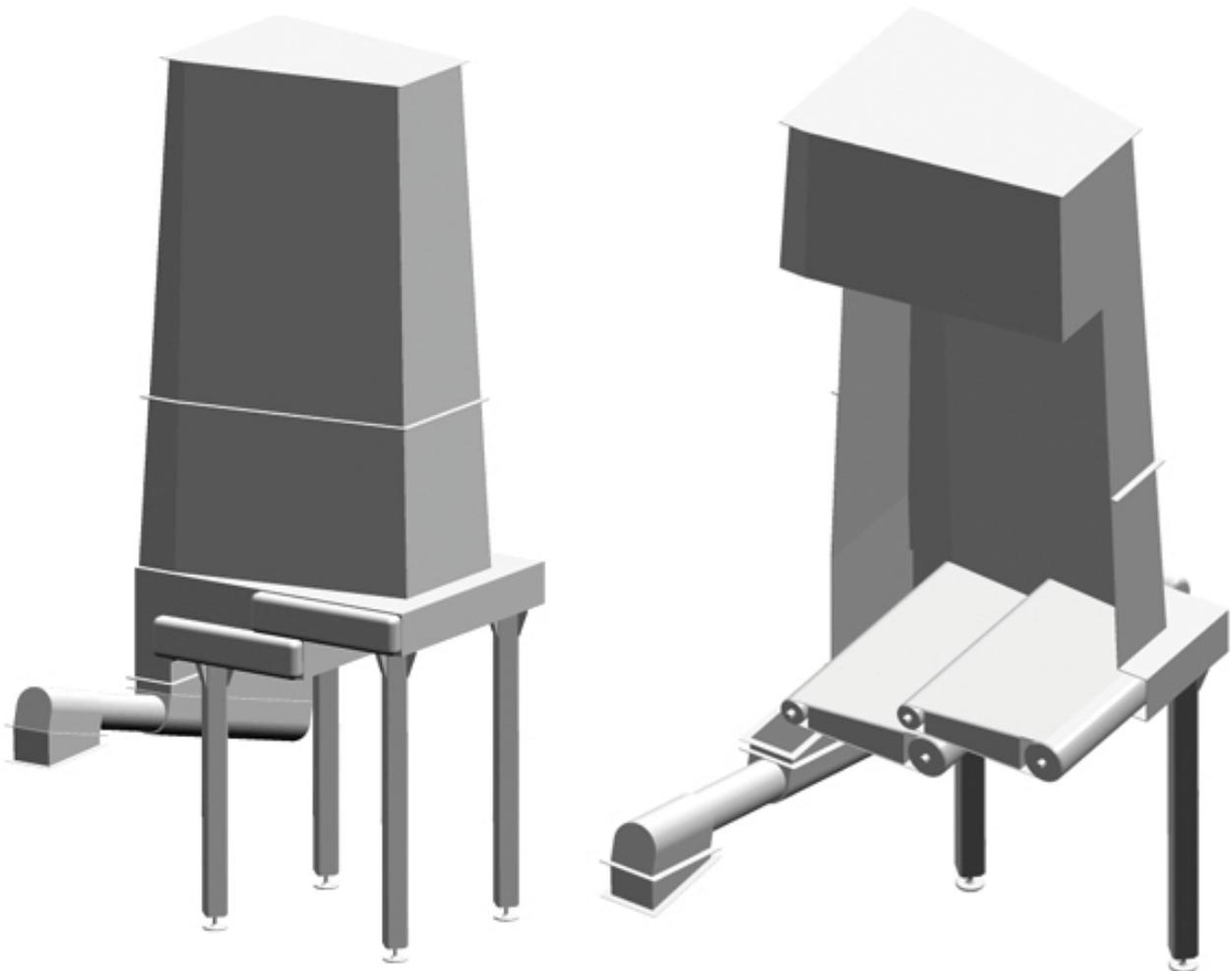


Abb. 3-3: Bunker mit zwei Förderbänder als Austragsorgan

Bei beiden Versionen kann durch eine Veränderung der Förderbänder selbst, hinsichtlich des Materials und der Profilierung, das Austragsverhalten verändert werden.

PET – Flakes sind mit diesen Ausführungen ebenfalls austragbar, da bei diesem Schüttgut etwas weniger Probleme hinsichtlich der Austrageigenschaften erwartet werden können. Hinsichtlich der CDs und DVDs kann von einem Austrag ausgegangen werden, wobei aber konstruktive Änderungen notwendig sind. Bei diesen Änderungen geht es vor allem um

eine Entlastung des Übergabeteils zur Förderschnecke. Entweder versetzt man diesen Teil weiter nach außen und lässt die Abmessungen der Bunkerwände gleich oder die Bunkerwand über dem Übergabeteil wird weiter nach innen versetzt, was aber das Volumen verringert.

Eine weitere und genauere Betrachtung dieser beiden Ausführungen hinsichtlich der Wartung und Konstruktion erfolgt im Kapitel 4.

3.2 Rotierender Räumarm

Bei der in Abb. 3-4 dargestellten Ausführung rotiert die gesamte, aus Räumarm, Konus, Übergabetrichter und Lagerung bestehende Austragseinheit. Die Maße der gezeigten Austragseinheit entsprechen, soweit angegeben, einer Standardausführung des Modells Rotex der Firma Altmayer (Anhang A). Nach Einholung von Preisinformationen bei der Firma wird ein Zukauf der Austragseinheit nur in Ausnahmefällen in Erwägung gezogen.

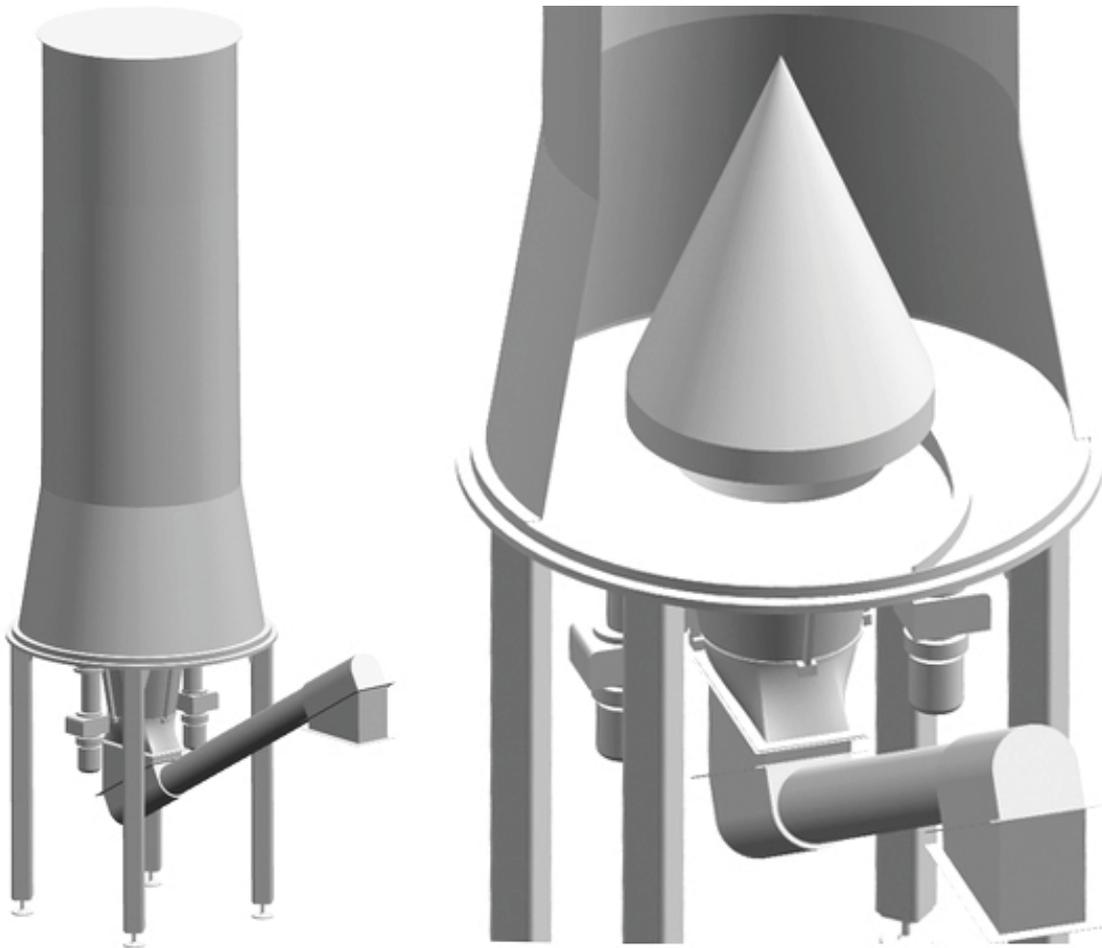


Abb. 3-4: Bunker mit rotierendem Räumarm

Aus patentrechtlicher Sicht gibt es keine Probleme wenn eine Eigenkonstruktion eines Räumarmsystems erfolgt, weil das Grundprinzip dieses Systems bereits seit langem bekannt ist. [6 ,7 , 14, 20]

Bei einer Eigenkonstruktion werden weniger maschinenbauliche sondern wirtschaftliche Probleme im Vordergrund stehen. Speziell die Gebiete Lagerung, Abdichtung und Antrieb stellen die Hauptschwierigkeiten auf der Kostenseite dar.

Eine weitere und genauere Betrachtung dieser Ausführung hinsichtlich der Wartung und Konstruktion erfolgt im Kapitel 4.

3.3 Rotierender Schneckenarm

Anstatt eines starren Austragsteils wie der Räumarm kommt hier eine Schnecke zum Einsatz die um ihre Achse rotiert und selbst wiederum um die Achse des Silos rotiert. Wie in Abb. 3-5 zu sehen sind Ausführungen möglich, die sehr wenig Raum vom maximal möglichen Lagervolumen abziehen. Der relativ schnörkellose Aufbau führt zu einem Gewicht von etwa 2100 kg.

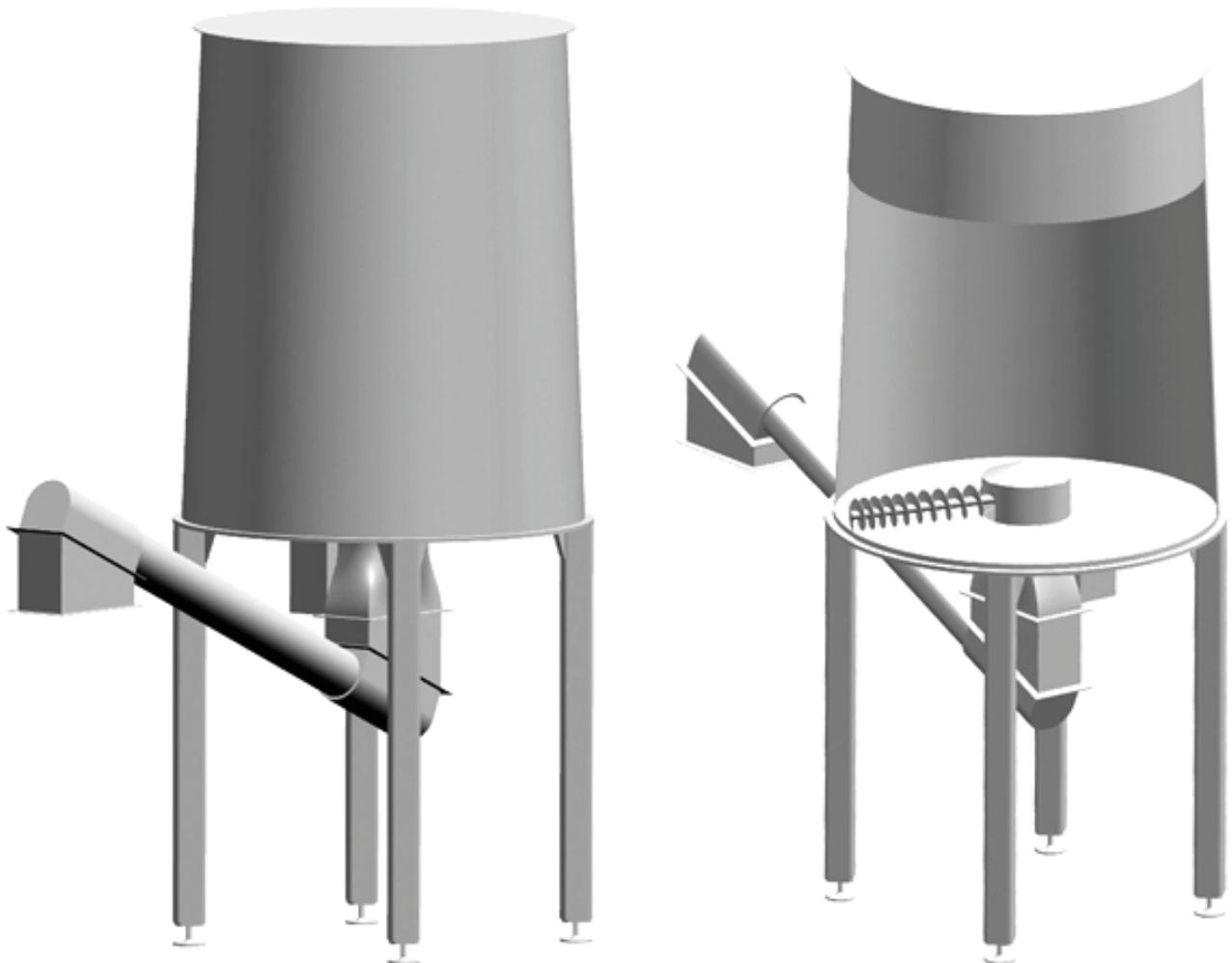


Abb. 3-5: Bunker mit rotierendem Schneckenarm

Wie beim rotierenden Räumarm sind aus patentrechtlicher Sicht keine Probleme bei einer Eigenkonstruktion zu erwarten da das Grundprinzip schon lange bekannt ist. [6, 7, 14, 20]

Eine weitere und genauere Betrachtung dieser Ausführung hinsichtlich Wartung und Konstruktion erfolgt im Kapitel 4.

3.4 Schneckenbatterie

Anstatt wie bei dem rotierenden Schneckenarm nur eine Schnecke für den Aufrag einzusetzen, werden, wie in Abb. 3-6 gezeigt, gleich vier verwendet, um den gesamten Querschnitt des Bunkerbodenbereichs abzudecken. Die Schnecken sind mit einem abnehmenden Kerndurchmesser ausgerüstet um die Bildung toter Zonen zu verhindern. Das Bodenblech ist in der förderlichsten Form dargestellt.

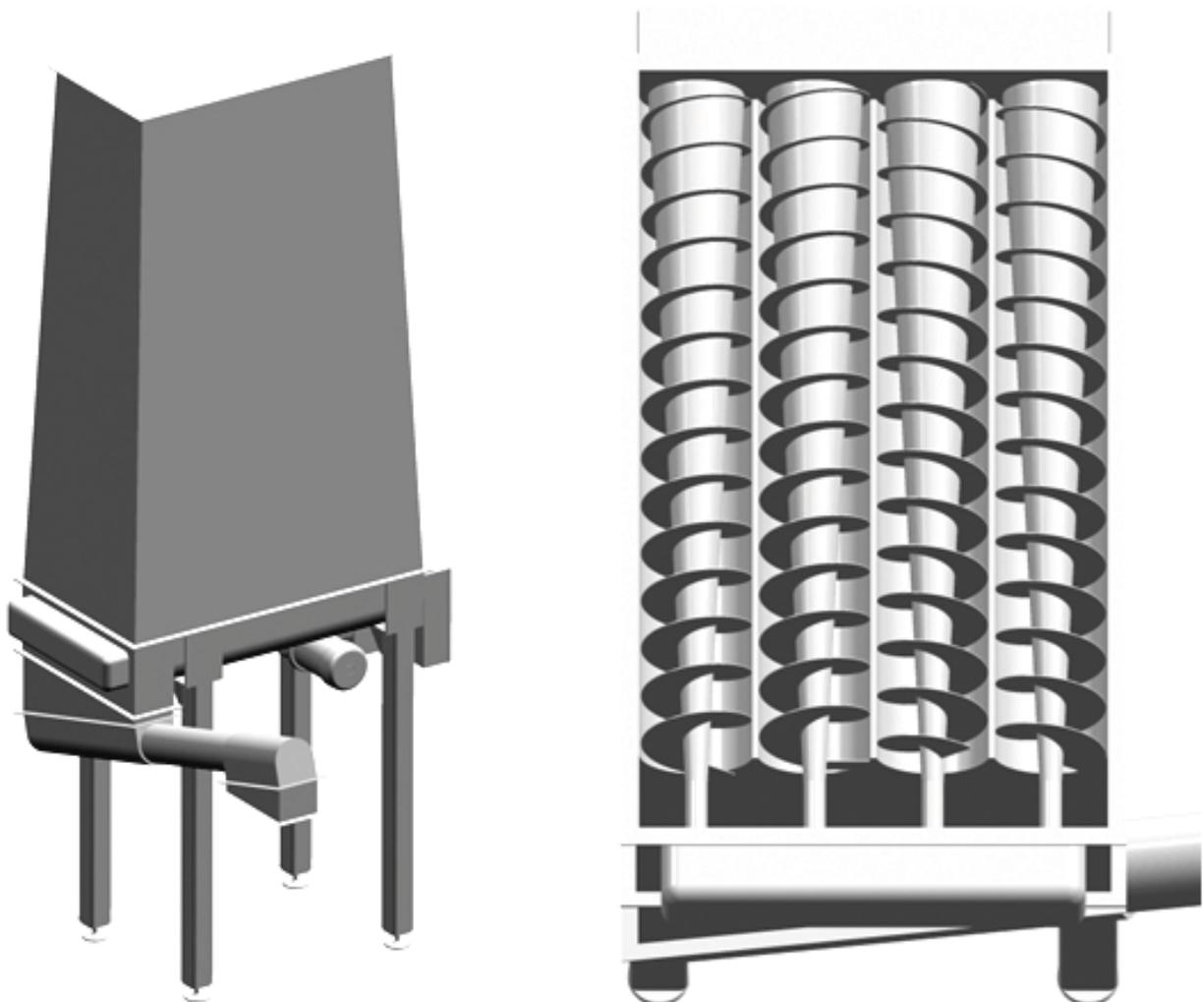


Abb. 3-6: Bunker mit Schneckenbatterie

Die Möglichkeit mit dieser Ausführung viele unterschiedliche Schüttgüter sicher austragen zu können muss mit einem hohen Energiebedarf und einer aufwändigeren Kopplung der vier Schnecken erkauft werden. Hinzu kommt auch noch ein vergleichsweise hohes Gewicht von ca. 3100 kg.

PET – Flakes und CDs/DVDs sind mit diesem System sicher auszutragen, wobei erstere einen etwas niedrigeren Energiebedarf als die Folienschnitzel haben und letztere eine angepasste Schneckensteigung erfordern.

Eine weitere und genauere Betrachtung dieser Ausführung hinsichtlich Wartung und Konstruktion erfolgt im Kapitel 4.

3.5 Drehteller

In Abb. 3-7 ist eine Bunkerausführung gezeigt, bei der sich die gesamte Bodenplatte dreht. Diese vergleichsweise große Ausführung eines Drehtellers ist nötig da bei den gegebenen Abmessungen das notwendige Lagervolumen erreicht werden muss und wegen der Neigung des Schüttgutes zur Brückenbildung kein Trichter in Frage kommt. Das Gesamtgewicht der Ausführung liegt bei etwa 2800 kg.

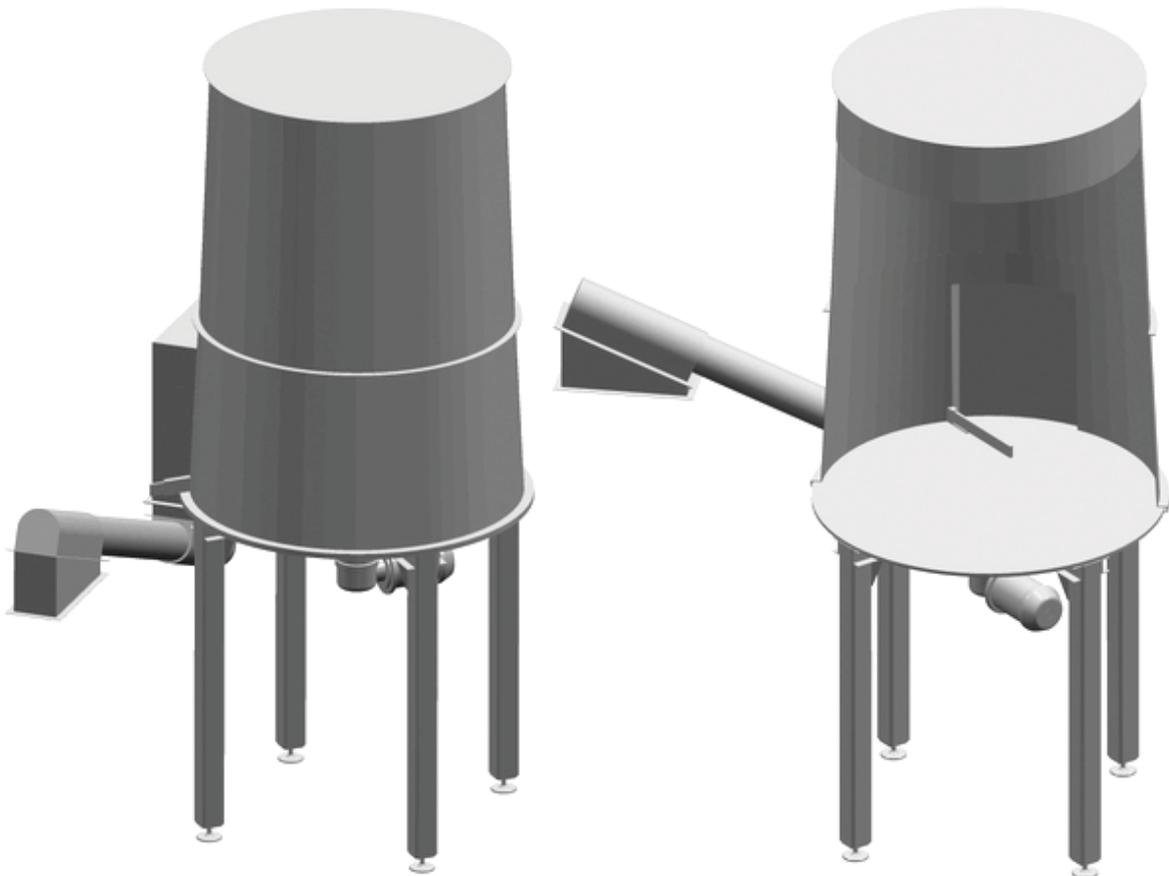


Abb. 3-7: Bunker mit Drehteller als Bodenplatte

Zu den bereits in der Theorie erörterten Nachteilen kommen bei dieser Ausführung noch die Probleme bei der Abdichtung und der Lagerung der Platte hinzu. Des Weiteren sind wie in Abb. 3-8 zu sehen starke Verstreibungen erforderlich um die Schüttgutsäule, und die drehende Bodenplatte samt Motor aufnehmen zu können.

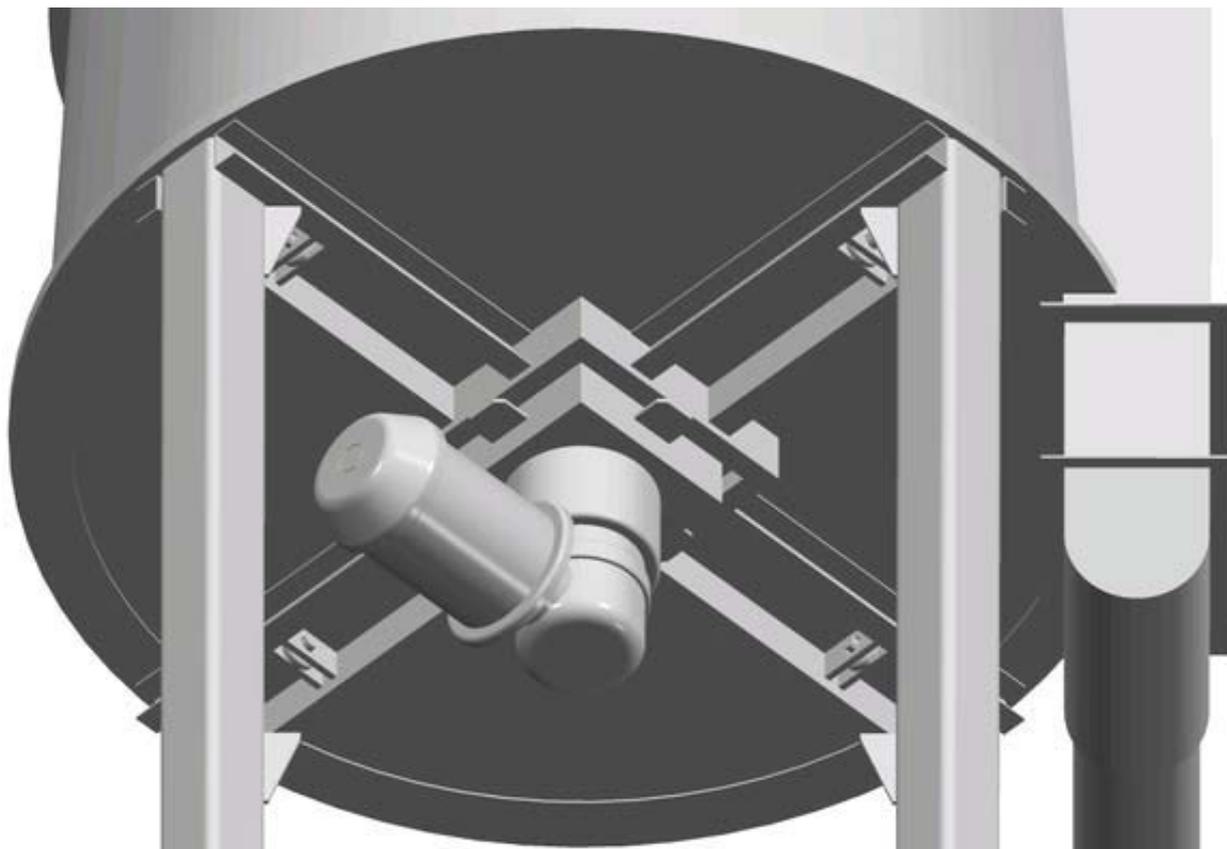


Abb. 3-8: Verstrebungen an der Unterseite

Der Drehteller eignet sich für PET – Flakes besser als für die Kunststoffschmitzel, da die Abdichtung aufgrund der größeren Abmessungen der Flakes leichter fällt. Auch bei CDs und DVDs sind gute Ergebnisse zu erwarten. Dafür sollte aber der Durchmesser des Silos reduziert werden um das Gewicht besser auffangen zu können. CDs bzw. DVDs haben eine vergleichsweise hohe Schüttgutdichte, vor allem wenn sie etwas geordneter, also in kleinen Stapeln, vorliegen.

3.6 Walzenaufgeber

Normalerweise sind Walzenaufgeber so konzipiert, dass sich nur über einen kleinen Querschnitt das Schüttgut auf der Walze abböscht, wie in Abb. 2-54 sehr schön zu sehen ist. Eine derartige Konstruktion ist aber wegen der Eigenschaften des gegebenen Schüttgutes nicht möglich. Wie schon bei der vorangegangenen Variante des Drehtellers müssen auch bei den Ausführungen des Walzenaufgebers die Austragsorgane einen Grossteil des Schüttgutgewichts tragen.

Bei der ersten Ausführung, die in Abb. 3-9 dargestellt ist, werden zwei Walzen mit leichter Profilierung eingesetzt. Vor allem wegen des hohen Gewichtes der beiden Walzen ist bei dieser Ausführung das Gesamtgewicht bei über 3700 kg anzusetzen.

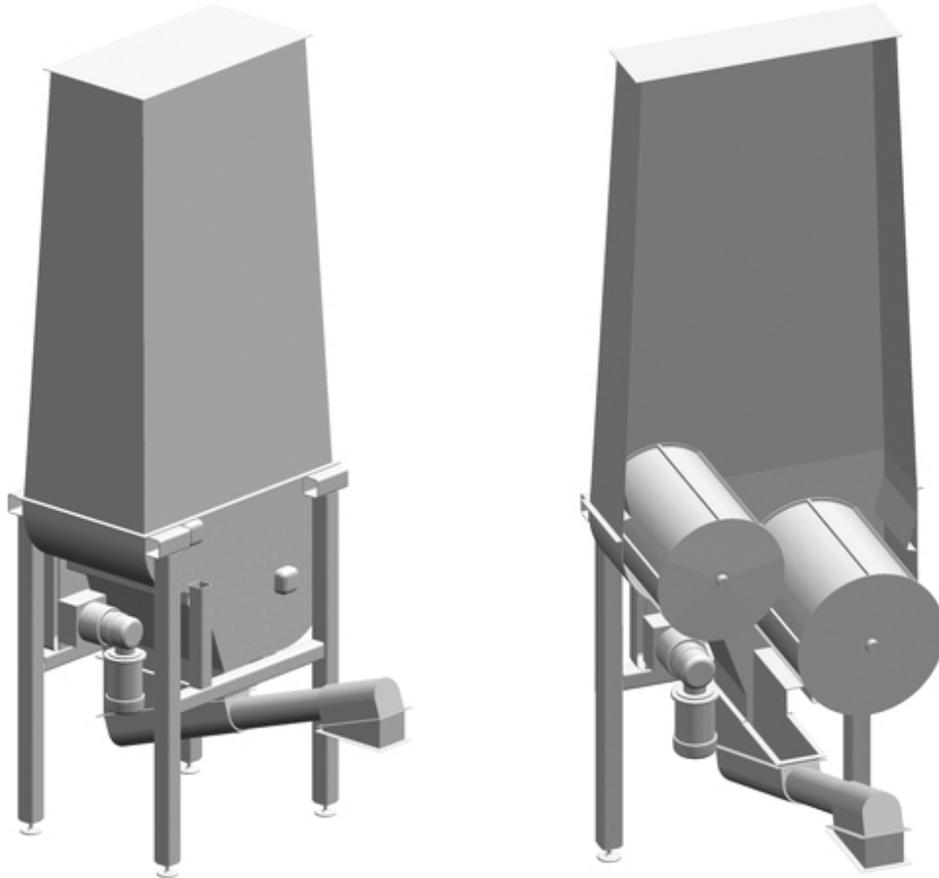


Abb. 3-9: Bunker mit zwei Walzen als Austragssystem

Wie in Abb. 3-10 deutlicher zu sehen ist, sind die Walzen unterschiedlich groß und nicht in der gleichen Höhe angeordnet. Das Schüttgut „bösch“ sich sozusagen von der kleineren Walze auf die größere Walze ab. Die beiden Walzen werden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten angetrieben damit über den Bunkerquerschnitt, den die beiden Walzen abdecken, die gleiche Austragsleistung auftritt.

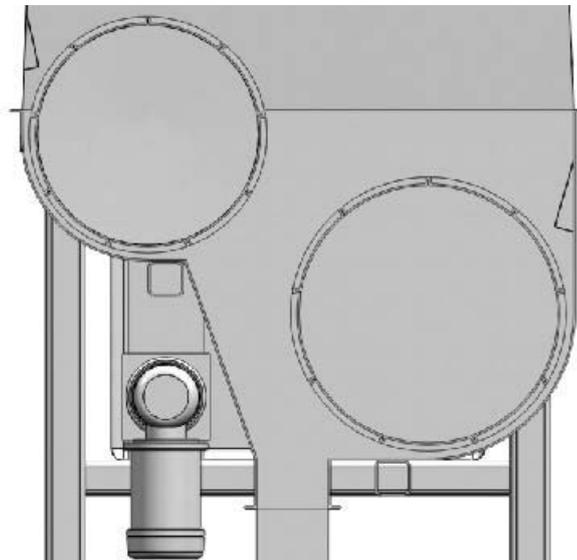


Abb. 3-10: Detail der Anordnung der Walzen für Schnitzel und Flakes

Um das Gewicht und die Kosten für das Antriebs- und Austragssystem zu senken besteht die Möglichkeit nur eine einzige, aber etwas größere Walze (siehe Abb. 3-11) zu verwenden. Auf diese Weise kann das Gesamtgewicht im Vergleich mit dem 2-Walzen-System um etwa 300 kg reduziert werden.

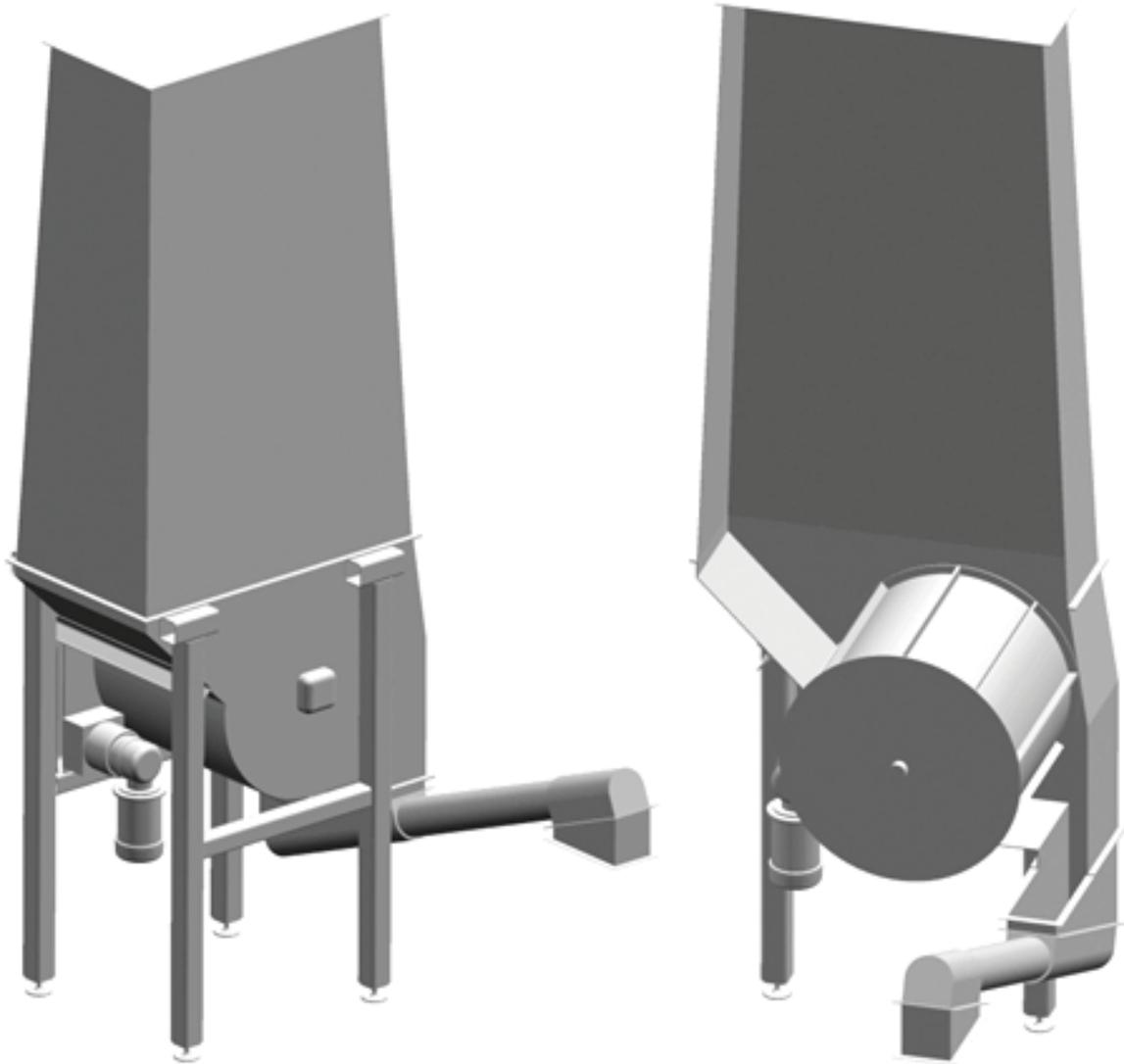


Abb. 3-11: Bunker mit einer Walze für den Austrag

Wie in der Detailbetrachtung in Abb. 3-12 zu sehen, birgt diese Konstruktion ein Risiko. Dabei geht es weniger um den kleinen Trichteransatz, sondern vielmehr um eine zu starke Verdichtung des Schüttgutes bevor der Austrag stattfindet. Eine Entschärfung dieses Problems hängt vor allem von einer Verbreiterung des Übergabestutzens zur Förderschnecke hin und einer Reduzierung der Belastung des Austragsbereichs durch die Schüttgutsäule ab. Der Trichteransatz ist insofern unproblematisch, weil wegen der sich bewegenden Walze eine Brückenbildung nicht möglich ist. Des Weiteren ist der Winkel mit 45° ausreichend steil um eine vollkommene Entleerung des Bunkers zu gewährleisten.

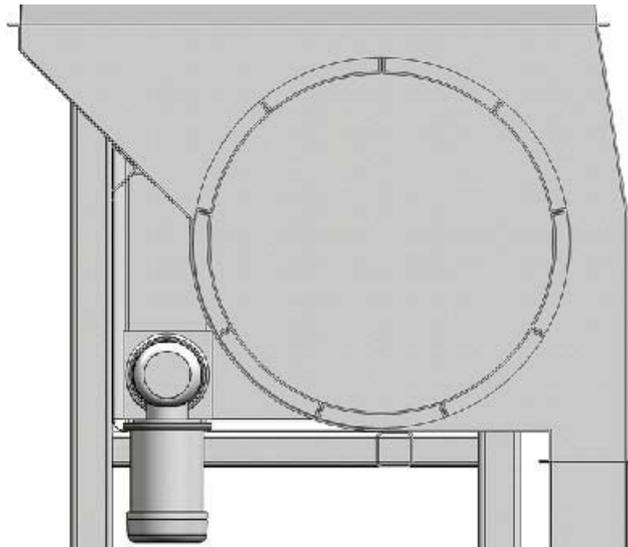


Abb. 3-12: Detail der Konstruktion mit einer Walze für Schnitzel und Flakes

Beide Ausführungen eignen sich gut um PET – Flakes auszutragen. Bei passender Abstimmung der Geschwindigkeiten der beiden Walzen, Einplanung von Schutzvorrichtungen, die verhindern, dass sich mehrere CDs/DVDs gestapelt im fördererfreien Bereich verklemmen, und einer Verringerung der Tiefe der Walzenstege ermöglicht einen Einsatz der ersten Ausführung auch für CDs und DVDs. Bei den Schutzvorrichtungen handelt es sich um zusätzlich Bleche, die eine Verlängerung des Übergabeschachtes bis zur Walze hin gewährleisten (siehe Abb. 3-13). Derartige Schutzbleche können auch bei Ausführungen für Folienschnitzel und Flakes angebracht werden, sie sind dort aber weniger effektiv wegen der größeren Tiefe der Stege und sind nicht zwangsweise notwendig um die Funktion zu gewährleisten.

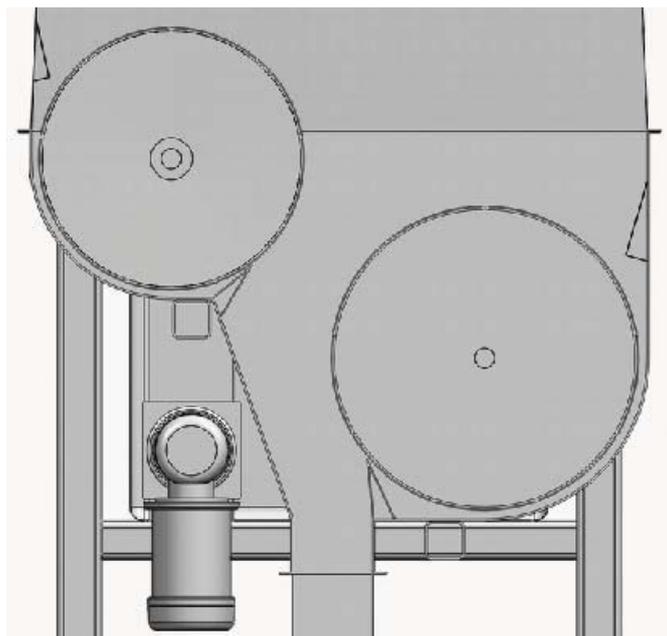


Abb. 3-13: Detail der Konstruktion mit zwei Walzen für DVDs bzw. CDs

Das System mit einer Walze bedarf einer größeren Umkonstruktion um für CDs und DVDs eingesetzt werden zu können. Dies liegt vor allem an der erhöhten Gefahr des Verklemmens bzw. der unzulässigen Zunahme der Kraft die nötig ist um den Austrag aufrecht zu erhalten.

3.7 Senkrechte Schnecke

In Abb. 3-14 ist eine Ausführung mit einer senkrechten Schnecke zu sehen die ein Gesamtgewicht von ca. 2300 kg aufweist. Der Winkel des Trichters beträgt 45°. Die Austragswirkung der Schnecke setzt oberhalb der Trichteroberkante ein. Durch den abnehmenden Kerndurchmesser werden die Entstehung von toten Zonen sowie eine unzulässige Verdichtung des Schüttgutes verhindert. Da der Antrieb für die Schnecke oben auf der Deckplatte des Bunkers sitzt, sind Verstärkungen der Struktur notwendig. Zu diesem Zweck wird die Dicke des Blechs für die Abdeckung erhöht und entlang der Bunkerwände Profile angeschweißt.

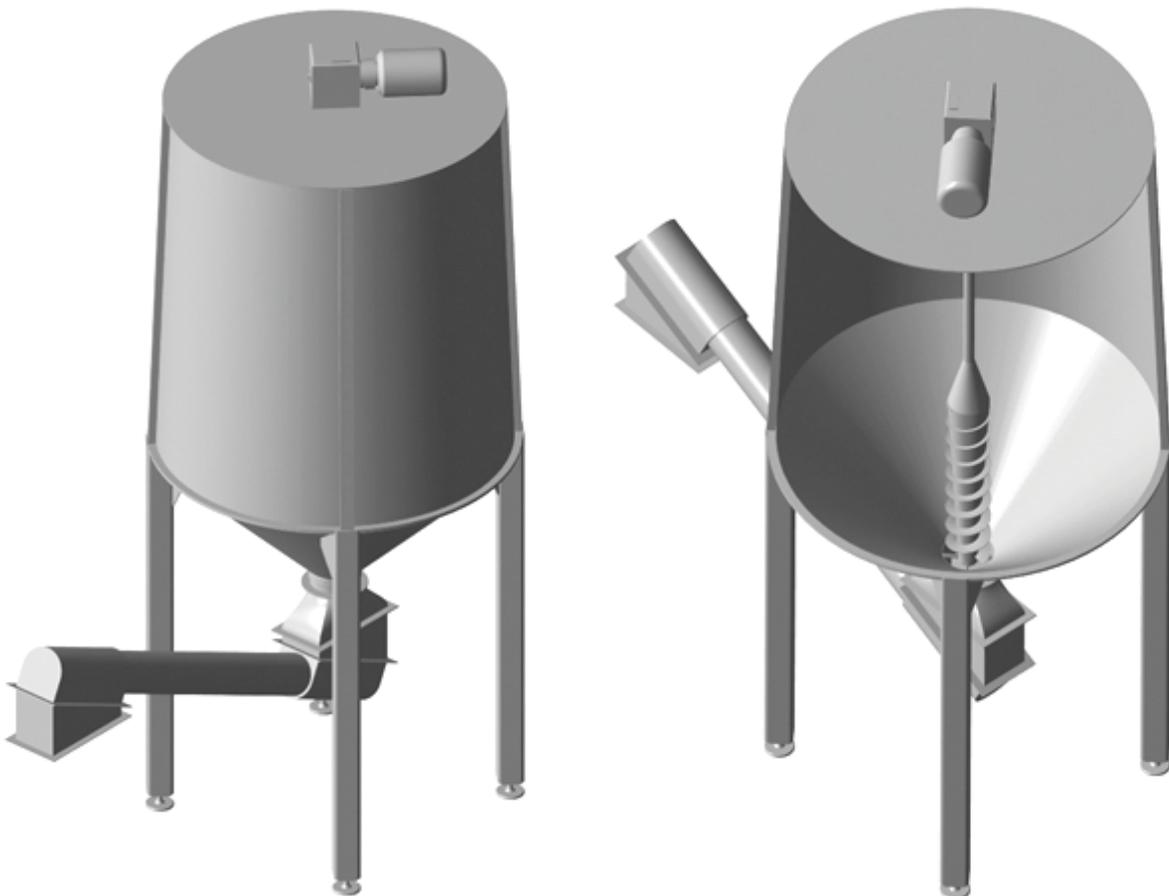


Abb. 3-14: Bunker mit einer senkrechten Schnecke als Austragsorgan

Die dargestellte Ausführung eignet sich ohne weiteres für Folienschnitzel und PET – Flakes. Im Falle der CDs/DVDs muss leider festgestellt werden, dass die Konstruktion nur schwerlich einsetzbar ist. Das Problem liegt an der Stelle wo die Schnecke und die

Austragsöffnung die geringste Entfernung voneinander haben. Wenn sich hier ein Stapel von CDs/DVDs verklemmt, dann kann es sehr leicht dazu kommen, dass der Antrieb nicht mehr genug Kraft aufbringt um den Stapel abzuscheren. Wenn die entsprechenden Sicherheitseinrichtungen vorhanden sind schaltet sich der Antrieb ab und der Austrag wird gestoppt.

Um das Austragsvolumen zu erhöhen kann zwar die Schneckengeschwindigkeit erhöht werden, jedoch dem sind Grenzen gesetzt. Andere Möglichkeiten sind die Vergrößerung des Durchmessers und/oder die Verwendung von mehreren Schnecken. Die Möglichkeiten, die der Einsatz mehrerer Schnecken bietet, sind vielfältig. Drei Schnecken lassen sowohl in einer Reihe als auch in einer Dreiecksform (siehe Abb. 3-15a) anordnen. Ebenso funktioniert dies mit vier Schnecken, nur anstatt der Dreiecks- ergibt sich eine Rechtecksform (siehe Abb. 3-15b). Je mehr Schnecken für den Austrag eingesetzt werden umso besser ist das Verhalten dieser Ausführungsart. Dies liegt vor allem darin, dass so auf jedem Höhenniveau mehr Material nachsacken kann wenn mehr Schnecken am Austrag beteiligt sind und dies wiederum lockert das Schüttgut auf was zu besseren Fließeigenschaften führt.

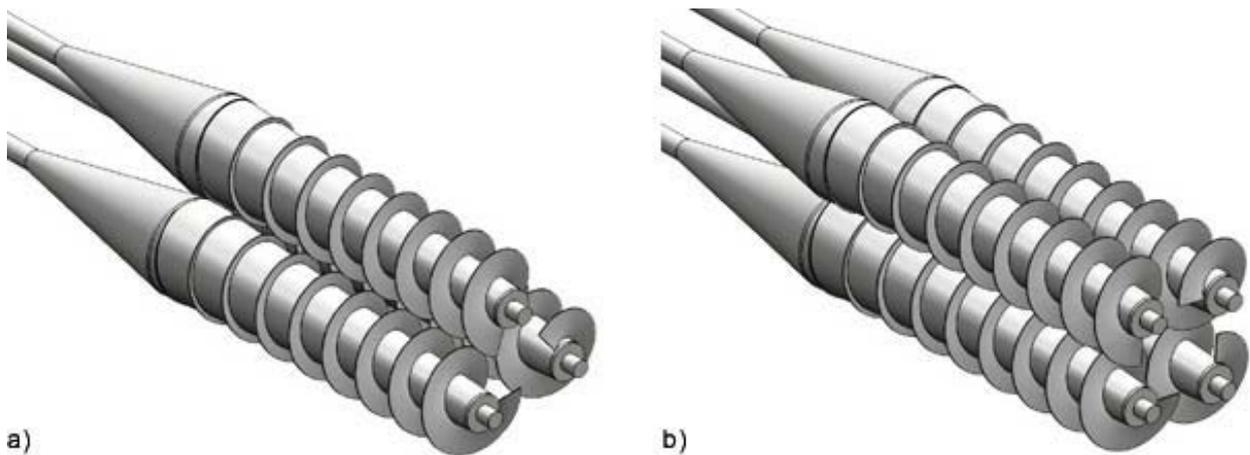


Abb. 3-15: mögliche Anordnungen von mehreren Schnecken

Die drei- und die rechteckigen Anordnungen bedingen aber weitere Überlegungen hinsichtlich der Ausführung der unteren Lagerung und des Übergabestutzens. Auch die Struktur des Bunkers muss verstärkt werden, damit der leistungsfähigere Antrieb und das größere Getriebe aufgenommen werden kann.

Eine Ausführung mit zwei Schnecken mit einem Gewicht von etwa 2800 kg ist in Abb. 3-16 dargestellt. Die Schnecken haben die gleiche Gängigkeit und sind miteinander gekoppelt ausgeführt. Im Vergleich zur Ausführung mit einer Schnecke werden auch hier, wie bei allen Systemen mit mehreren Schnecken, ein stärkerer Antrieb und ein aufwändigeres Getriebe benötigt.

Auch hier ist die Eignung für Folienschnitzel und PET – Flakes gegeben. Genauso ist aber auch der Einsatz bei der Lagerung von CDs bzw. DVDs nicht anzuraten.

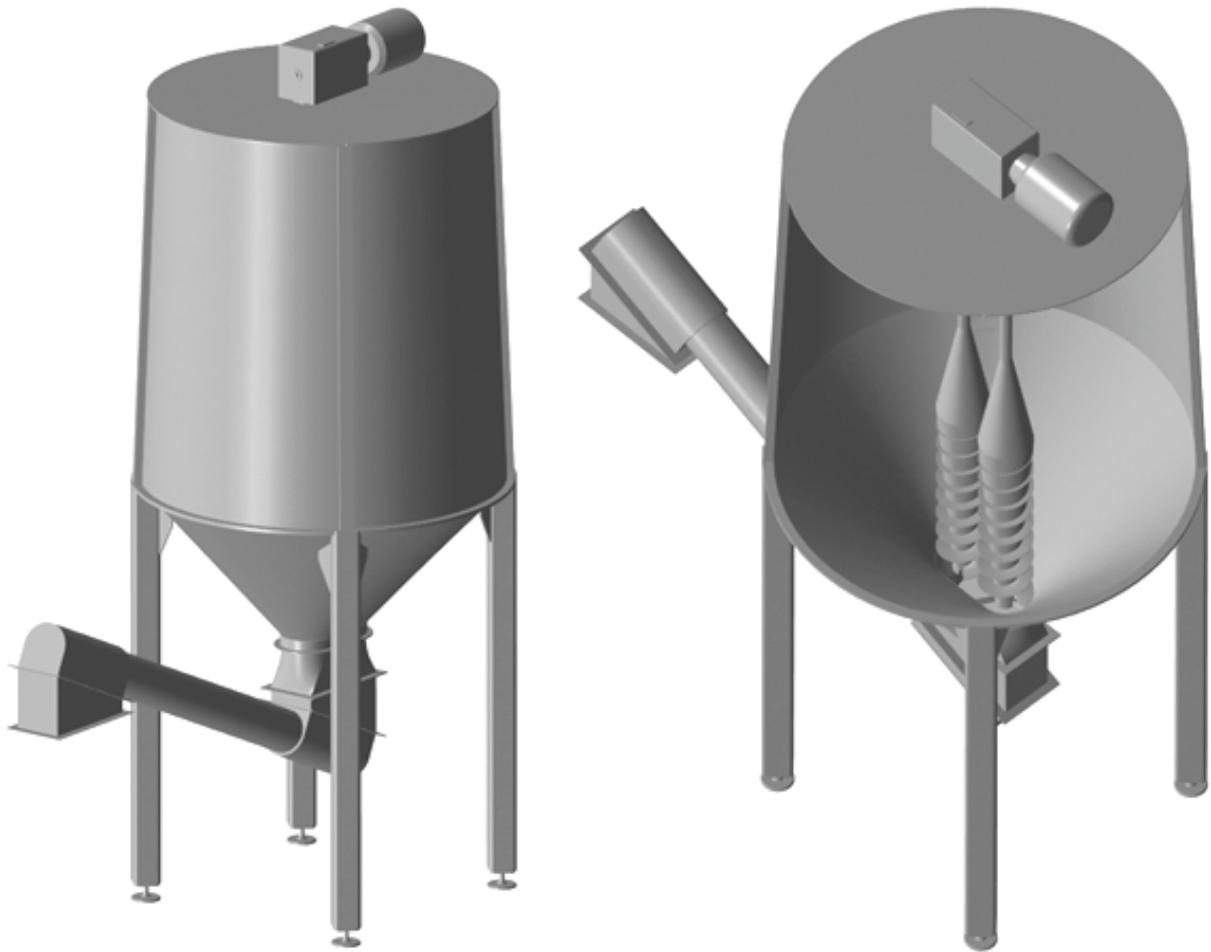


Abb. 3-16: Bunker mit zwei senkrechten Schnecken als Austragssystem

3.8 Schwingförderer

In der Literatur werden Schwingförderer durchaus als geeignet eingestuft mit schwer fließendem Schüttgut zurechtzukommen. [18, 20, 21, 22]

Eine Ausführung, wie in Abb. 2-48 abgebildet, eignet sich sowohl für Folienschnitzel als auch für Flakes und CDs bzw. DVDs. Da aber bei Schwingförderern immer die Gefahr besteht, dass sich Schwingungen unerwünscht ausbreiten, wurde von einem Ausführungsvorschlag abgesehen.

3.9 Drehbalkenboden

Eine Ausführung mit Drehbalkenboden ist für den vorliegenden Fall nur dann sicher vor Betriebsstörung wenn unterhalb eine Vorrichtung angebracht wird die den Austrag zur Transportschnecke hin gewährleistet.

Bei der Verwendung eines Sammeltrichters wie es in Abb. 2-51 zu sehen ist, wäre ein einfacher, nur gering motorisierter Rührer ausreichend. Dies gilt aber nur, wenn die

Abstimmung zwischen Drehbalkenboden und Transportschnecke stimmig ist und so immer nur wenig Schüttgut im Sammeltrichter vorhanden ist.

Der Sammeltrichter lässt sich aber auch durch ein Förderband ersetzen. Dieses müsste dann nicht dahingehend ausgelegt werden die Schüttgutsäule tragen zu können und wäre somit kostengünstiger produzierbar als die Bänder die unter Kapitel 3.1 zum Einsatz kommen.

Auch wenn ein System mit Drehbalkenboden prinzipiell für Folienschnitzel, Flakes und CDs bzw. DVDs einsetzbar ist, so wirft doch die Notwendigkeit der Installation eines zweiten Austragsorgans für einen sicheren Austrag die Frage der Wirtschaftlichkeit auf.

3.10 Schubaufgeber

Eine angepasste Ausführung des in Abb. 2-52 dargestellten Schubaufgebers würde sich ebenfalls dafür eignen die drei vorliegenden Arten von Schüttgut auszutragen. Ein Kurbelantrieb benötigt aber einigen Platz neben dem Bunker und dieser steht nicht zur Verfügung. Des Weiteren initiiert ein solcher Antrieb ein nicht unerhebliches Maß an Schwingungen.

Beide Probleme ließen sich mit einem hydraulischen Antrieb in den Griff bekommen, doch dieser ist vergleichsweise teuer.

Prinzipiell eignet sich eine derartige Austragsvorrichtung für Folienschnitzel, Flakes und CDs bzw. DVDs gleichermaßen.

4 Detailbetrachtungen

In diesem Kapitel werden einige der im 3. Kapitel vorgestellten Ausführungen hinsichtlich Konstruktion und Wartung genauer untersucht. Zusätzlich wird anfangs noch eine Vorrichtung für eine schnellere Entleerung des Bunkers bei einer Betriebsstörung erläutert. Dieses Hilfsmittel kann in angepasster Form bei jeder Ausführung zum Einsatz kommen.

Wenn bisher eine Betriebsstörung auftrat, die eine vollkommene Entleerung des Bunkers notwendig machte, so musste eine Person das gelagerte Schüttgut herausschaufeln. Um eine allfällige Entleerung des Bunkers ohne Austragsorgan schnell gewährleisten zu können ist eine Vorrichtung, so wie in Abb. 4-1b zu sehen ist, sehr nützlich. Es handelt sich dabei um eine Modifikation und Erweiterung der standardmäßig eingebauten Bunkerzugangstür. Im normalen Betrieb sind die meisten Teile nicht in Gebrauch und können separat gelagert werden. Somit sind von der Vorrichtung nur der Rahmen, die um das Scharnier schwenkbare Klappe mit den Schrauben und die Schieber für die seitliche Verriegelung zu sehen (siehe Abb. 4-1a). Erst wenn die Vorrichtung gebraucht werden die einzelnen Teile zusammengesetzt (siehe Abb. 4-1b) und ein Big-Bag an den Seitenteilen eingehängt. Die Vorrichtung kommt auf ein Gesamtgewicht von etwa 180 kg bei einem höchsten Anbaueinzelteilgewicht von ca. 30 kg.



Abb. 4-1: Bunkertür (a) nur mit Rahmen, (b) im Zusammenbau für Entleerung

Je nach Füllstand des Bunkers kann die Klappe und der Schieber für die Entleerung unterschiedlich weit geöffnet werden (siehe Abb. 4-2 a und b). Dies verhindert dass zuviel Schüttgut auf einmal austritt und somit der Wechsel des Big-Bags erschwert wird.

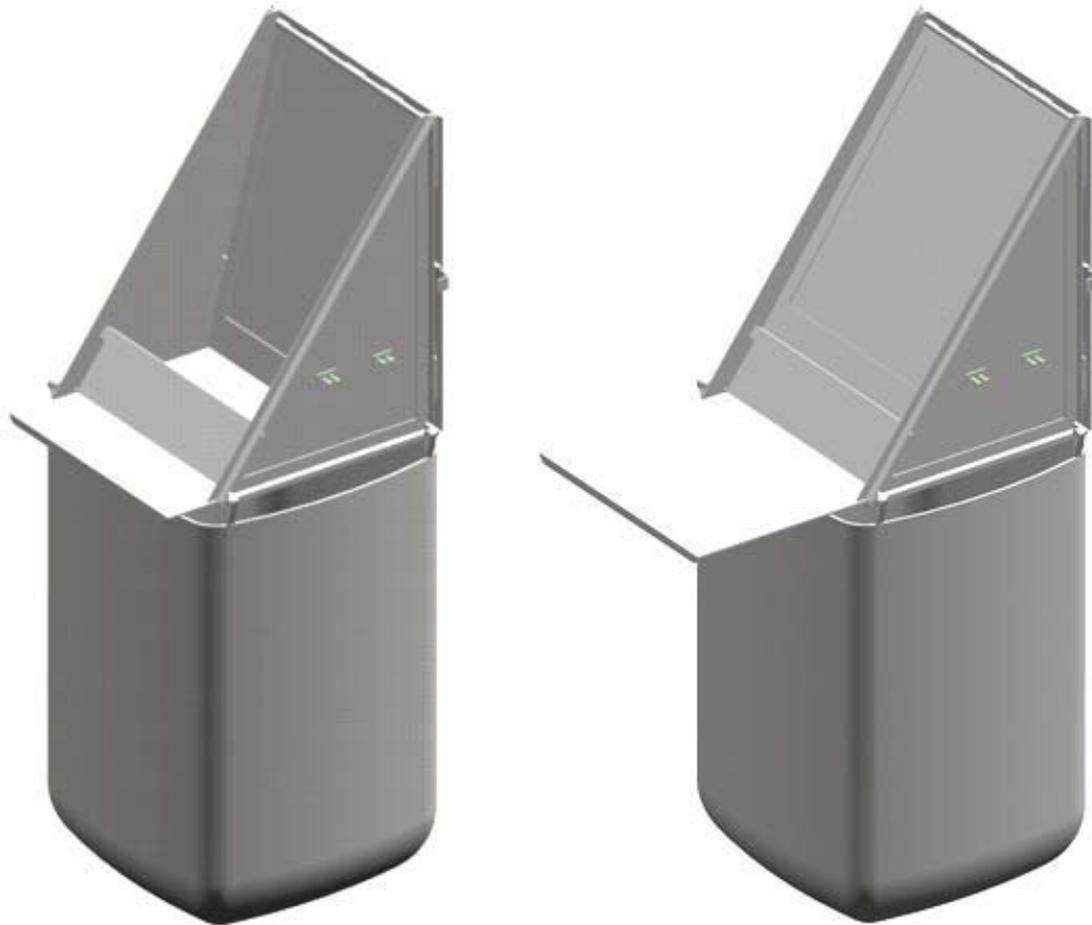


Abb. 4-2: Unterschiedliche Einstellungen für Klappe und Schieber

Die Entscheidung für die Implementierung dieser Vorrichtung hängt davon ab, wie viel die Herstellung kostet, wie oft der Bunker manuell geleert werden muss, wie hoch die Personalkosten sind und wie viele Stunden sich für eine Entleerung einsparen lassen.

4.1 Förderband

Bei den Konzepten mit Förderband bzw. Förderbändern ist es besonders wichtig, dass das gelagerte Schüttgut beim Austrag nicht bzw. nur in geringen Mengen an sensible Stellen gelangt. Zu diesen Stellen gehören die Lagerung der Wellen, der Bereich zwischen den Förderwalzen und dem Band sowie der Bereich unterhalb des Austragssystems.

Ein Vorschlag für die Lagerung der Walzen ist in Abb. 4-3 zu sehen. Bei der Lagerung der angetriebenen Walze treten nur geringe Unterschiede zur dargestellten Konstruktion auf. Alle Unterschiede treten beim Festlager auf, da dort die Krafteinleitung vom Antriebsstrang erfolgt.

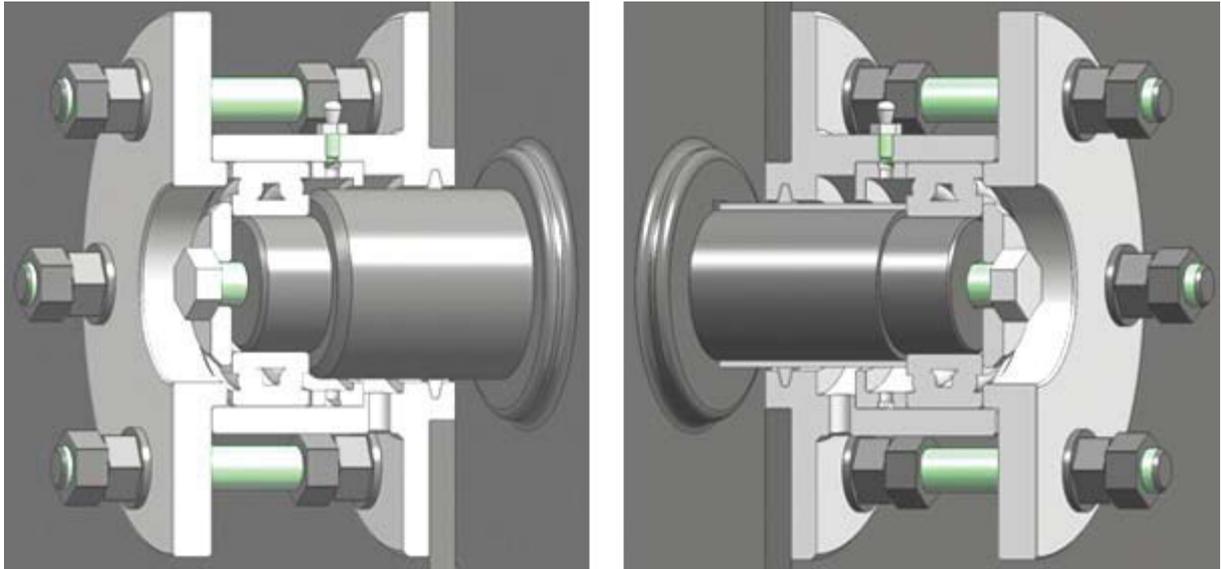


Abb. 4-3: Los- und Festlager der nicht angetriebenen Walze

In Abb. 4-4 ist zu sehen welche Funktion der Schmiernippel und die beiden Hohlräume zwischen Lager und Behälterwand erfüllen. Dringt aus dem Bunkerinneren trotz der Dichtung Schmutz in die Lagerhalterung ein, so gelangt er in den ersten Hohlraum. In den zweiten Hohlraum kann er nicht mehr gelangen da dieser mit Schmierfett gefüllt ist. In gewissen Wartungsintervallen wird über den Schmiernippel zusätzliches Schmierfett in diesen Hohlraum gedrückt. Dabei wird einerseits das Lager mit neuem Fett versorgt und andererseits Fett in den Hohlraum mit dem Schmutz gedrückt. Wenn dieser Raum voll ist tritt überschüssiges Fett aus dem dafür vorgesehenen Loch aus.

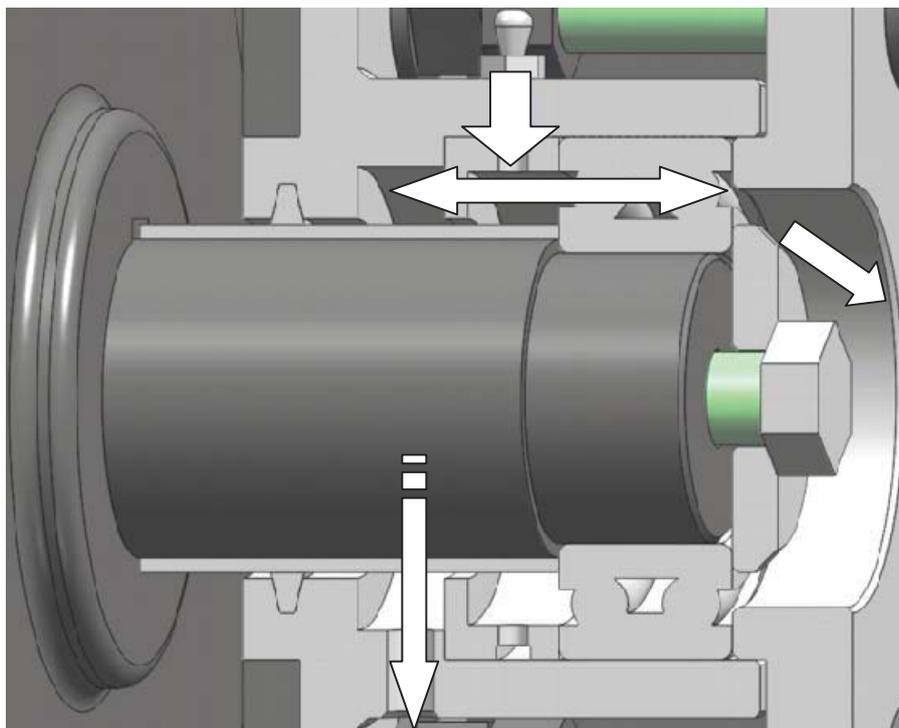


Abb. 4-4: Schmierstofffluss bei Nachfüllung

Die angetriebene Welle überträgt ihre Kraft mittels Passfedern an die Walzen. Diese Art der Kraftübertragung wurde gewählt um einen Ausbau der Welle zu erleichtern. Die Öffnung auf der Loslagerseite ist groß genug um die ganze Welle über diese auszubauen. Dies kann natürlich erst nach dem Ausbau des Lagers auf der Festlagerseite erfolgen. Die Walzen lassen sich dann über die Wartungsklappe an der Unterseite (siehe Abb. 4-5) entnehmen. Um die Lager, die Wellen und die Walzen auch bei gefülltem Bunker austauschen zu können ist eine Führung oberhalb des Förderbandes vorgesehen, in die sich ein Blech einschieben lässt. Je nach Füllungsgrad des Bunkers gestaltet sich dies unterschiedlich schwer. Ein Einschieben des Bleches wird durch ein laufendes Band erleichtert, da das Schüttgut knapp oberhalb des Bandes und vor der Kante des Bleches sich in einem lockereren Zustand befindet.

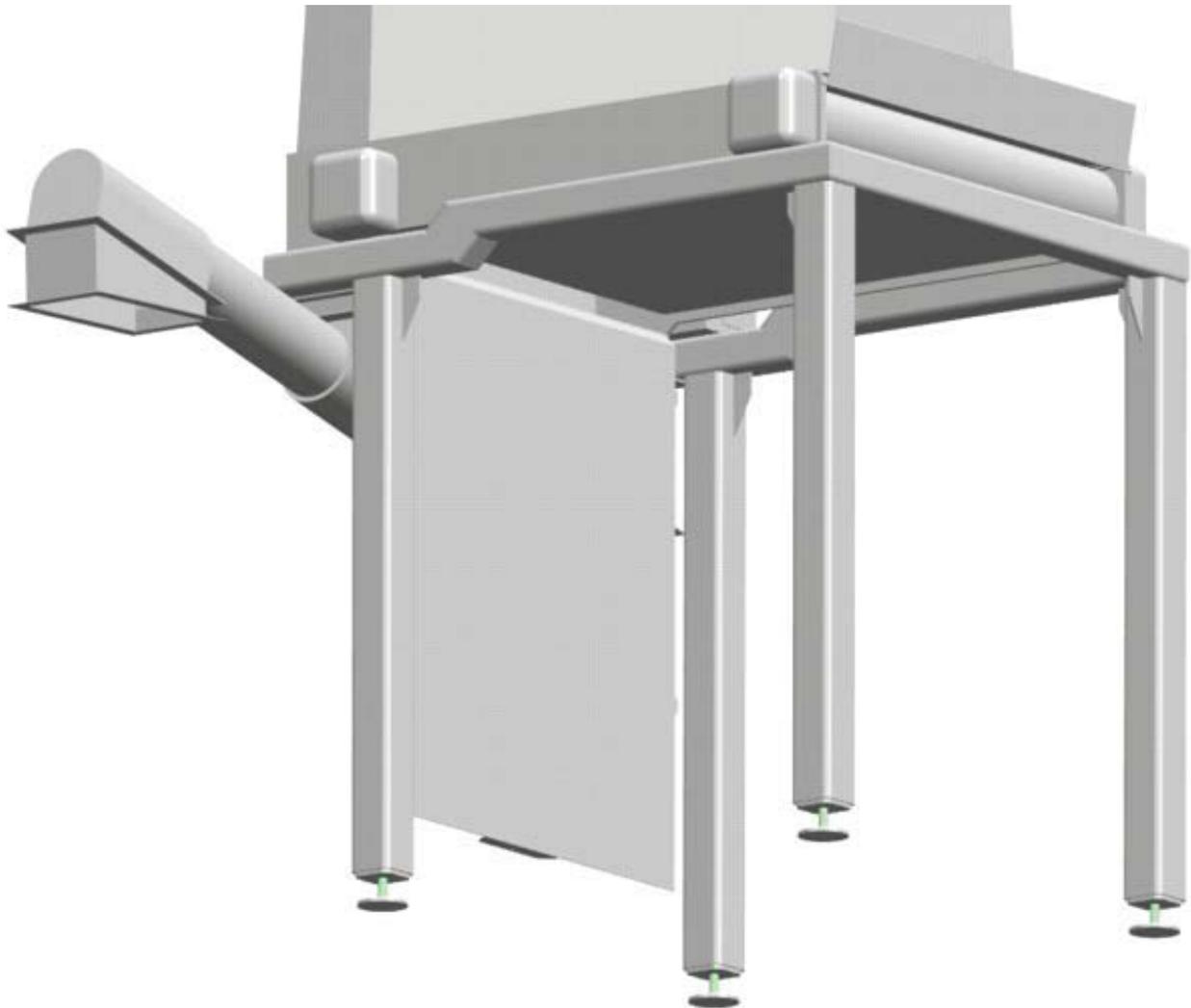


Abb. 4-5: Wartungsklappe an der Unterseite

Einen besseren Blick auf die Blechkonstruktion, deren Steifigkeit der Schlüssel für die Stabilität des gesamten Bunkers ist, liefert Abb. 4-6. Die Seitenwände sind mit einer höheren Materialstärke versehen. Um den Verlust an Steifigkeit durch die diversen Wartungsklappen auszugleichen sind innen zusätzliche Profile angeschweißt.

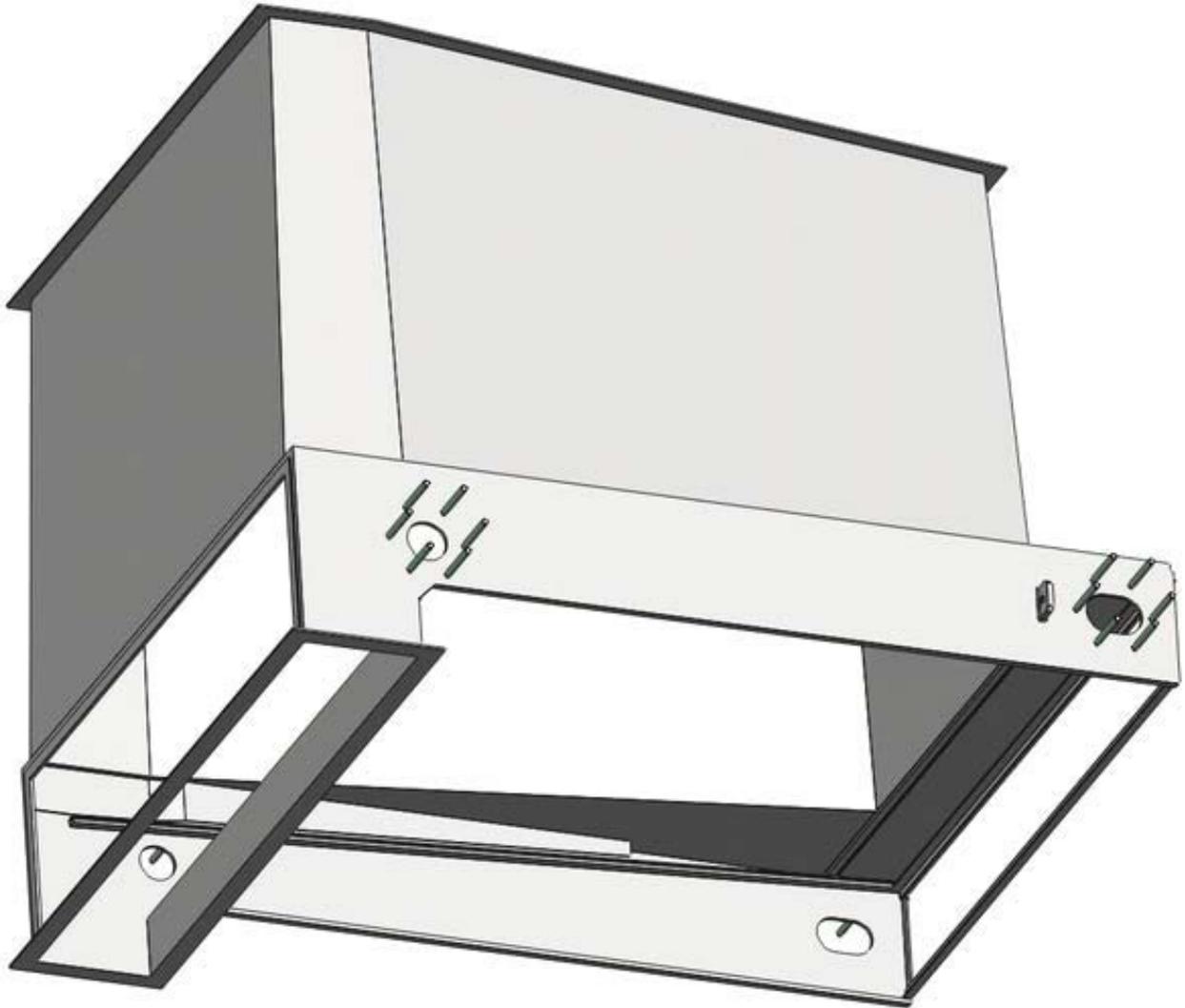


Abb. 4-6: untere Blechkonstruktion

Aufgrund der geringen Länge des Bandes wird als Gurtart ein Gewebegurt empfohlen. Bei einem Stahlseilgurt müsste zu viel Energie für die Umlenkung aufgewendet werden. Die optische Kontrolle des Gurtes kann problemlos während des normalen Betriebes über die hintere Wartungsklappe erfolgen. Eine derartige Kontrolle sollte regelmäßig durchgeführt werden um das Risiko eines Bandrisses zu minimieren. Sollte dieser Fall dennoch eintreten erfordert die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft einen ungleich höheren Aufwand, da das Schüttgut überall hingelangt wo es im normalen Betrieb nur in geringen Mengen auftritt. Bei einem Bandriss ist eine manuelle komplette Entleerung fast unumgänglich. Wird ein Gurt-schaden jedoch rechtzeitig erkannt, so kann der Gurtwechsel wie folgend beschreiben durchgeführt werden. Nachdem der Schieber über dem Band platziert worden ist wird das Band in einer Position angehalten in der das Gurtschloss über die untere große Wartungsklappe zugänglich ist. Nun kann die Gurtspannung gelöst werden. Nach dem Öffnen des Gurtschlusses wird ein Ende des alten Gurtes mit einem Ende des neuen Gurtes verbunden.

Daraufhin fährt man mit langsamer Antriebsgeschwindigkeit das alte Band aus und das neue ein. Mit dem Abhängen des alten Bandes, dem Verschließen des Gurtschlosses des neuen Bandes und des erneuten Aufbringens der Gurtspannung ist der Vorgang abgeschlossen.

Bei den Stützrollen des Bandes hängt es von der Konstruktion ab wie die Wartung erfolgen kann. Prinzipiell bietet sich an die Rollen zu Rollensätzen zusammenzufassen und in ein oder mehrere Rollenkästen anzubringen um Stabilität und Einfachheit zu gewährleisten (siehe Abb. 4-7). Die Lagerungen der Rollen und deren Schutz vor Schmutz sollten auf eine hohe Lebensdauer und Wartungsfreiheit ausgelegt sein. Bei der einfachsten Art der Anbringung der Rollenkästen kann eine Wartung nur nach Öffnen des Gurtschlosses erfolgen. Erst dann können die Schrauben gelöst werden und der Kasten lässt sich herausnehmen.

Für höheren Wartungskomfort besteht die Möglichkeit den Seitenteilen Öffnungen vorzusehen und Schienen anzubringen so dass ein Rollenkasten nach dem Lösen einiger Schrauben seitlich herausgezogen werden kann. Die Schwächung der tragenden Struktur muss aber durch Verstrebungen ausgeglichen werden. Die zweite Variante stellt somit insgesamt einen höheren Aufwand bei der Produktion dar und dies schlägt sich auf die Kosten nieder.



Abb. 4-7: Rollenkasten für die Gurtstützung

4.2 Rotierender Räumarm

Das angefragte Modell Rotex der Firma Altmayer, welches in Abb. 3-4 entsprechend den Randbedingungen dargestellt ist, weist eine kostspielige Konstruktion auf. Diese Konstruktion ist wohl darauf zurückzuführen, dass mit einem Einbau in einem Silo gerechnet wird. Besinnt man sich nun aber auf das Grundprinzip und verbindet dies mit der vergleichsweise niedrigen Höhe des vorliegenden Bunkers, so führt dies zu einer Ausführung wie es in Abb. 4-8 zu sehen ist.

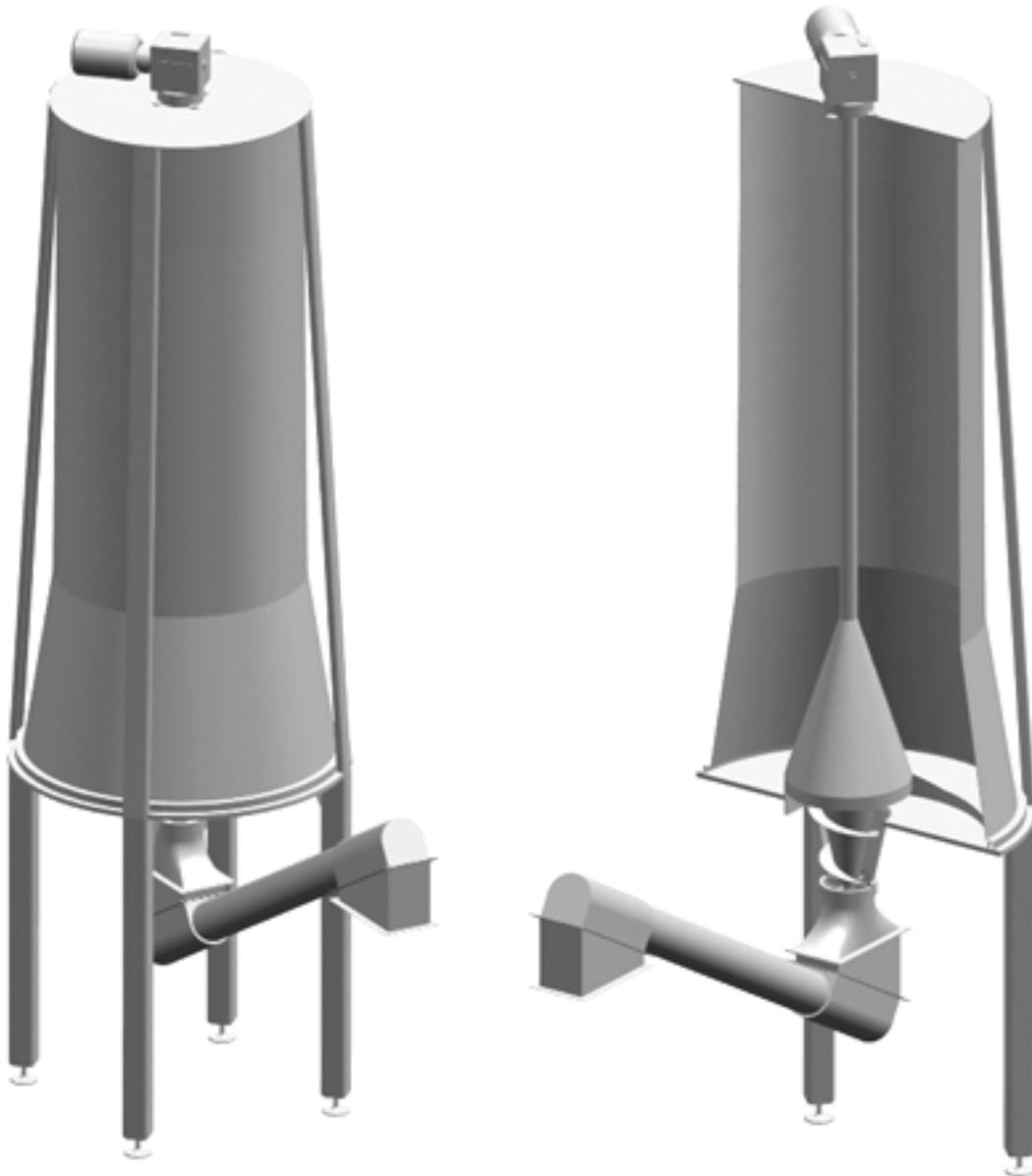


Abb. 4-8: rotierender Räumarm mit neuer Konzeption

Wie schon bei der Ausführung mit einer senkrechten Schnecke und jene mit mehreren senkrechten Schnecken, ist der Antriebsstrang oberhalb angebracht. Natürlich muss aus Gründen der Steifigkeit die Bunkerstruktur nach oben hin verstärkt werden. Wegen des nicht unerheblichen Kraftbedarfs fallen die Versteifungen stärker aus als bei den anderen bisher vorgestellten Ausführungen mit einem oberhalb angebrachten Antriebssystem. Dies wirkt sich natürlich negativ auf das Gesamtgewicht aus, welches bei etwa 3150 kg liegt.

Für ein besseres Austragsverhalten der Ausführung sollte die Austragsöffnung groß sein. Dem gegenüber steht, dass der Anschluss zur Förderschnecke hin relativ klein ist. Ein Trichter ohne Hilfseinrichtungen würde zur Brückenbildung neigen, besonders wegen den Streben die zur unteren Lagerhalterung gehören. Aus diesem Grund ist für diesen Bereich eine Schnecke mit großer Steigung vorgesehen (siehe Abb. 4-9). Die Schnecke muss an die Förderleistung

des Räumarmes angepasst sein um den Austrag effektiv zu gestalten. Zusätzlich muss die Förderleistung der Schnecke im gesamten Bereich des Trichters konstant bleiben. Würde die Förderleistung zur Lagerhalterung hin abnehmen, würde es zu einer Kompression und Erwärmung des Schüttgutes kommen.



Abb. 4-9: Schnecke im Bereich zwischen Räumarmaustrag und Lagerhalterung

Eine Vergrößerung des Anschlusses zur nachfolgenden Förderschnecke bringt bei dieser Ausführungsart einige Vorteile die beim Vergleich von Abb. 4-10 mit Abb. 4-9 zu erkennen sind.

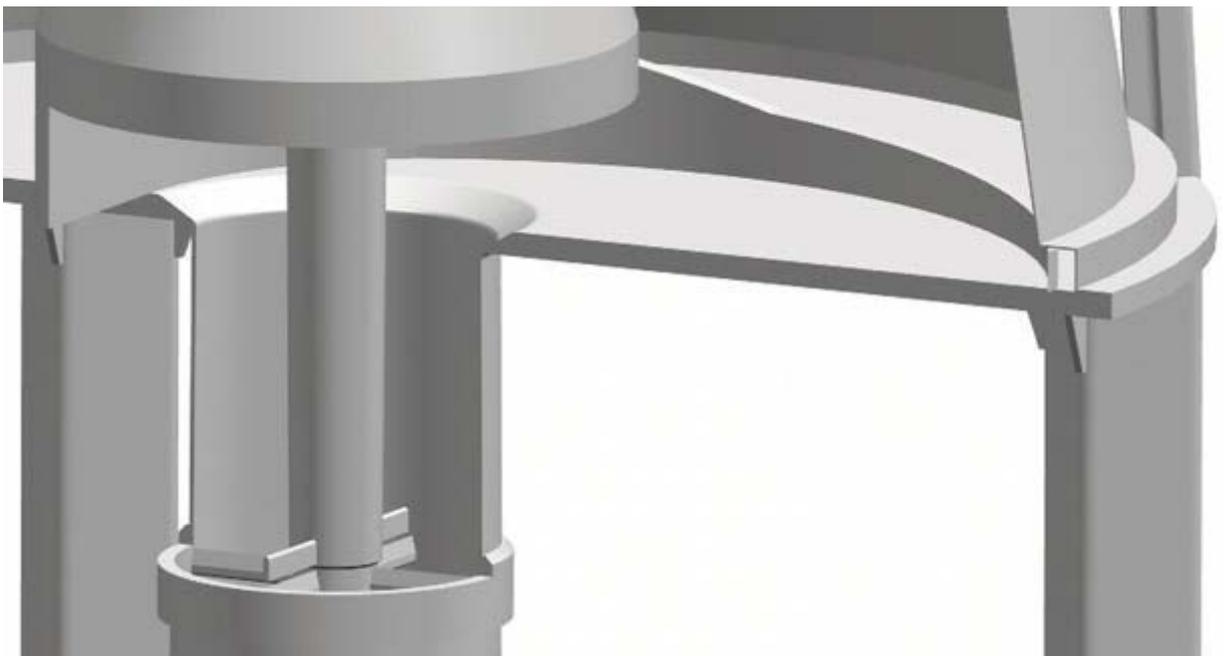


Abb. 4-10: modifizierter Austragsbereich

Zum einen kann die Schnecke durch einen kleinen, einfachen Rührbalken der sich knapp oberhalb der Lagerhalterungsstreben angebracht wird ersetzt werden. Der Balken und die Stützstreben für das Lager lassen sich als Schneidsystem ausführen um ein umwickeln des Balkens durch lange Folienschnitzel zu verhindern. Des Weiteren kann die innere Verkleidung in Konusform, welche für die Konstanz der Förderleistung im Bereich der Schnecke sorgt, durch eine Verkleidung in einer nahezu zylindrischen Form ersetzt werden.

Die untere Lagerhalterung selbst ist in Abb. 4-11 dargestellt. Als Lager ist ein doppelreihiges Schrägkugellager zu sehen. Dieses Lager soll aber primär ausschließlich radiale und nur in Ausnahmefällen zusätzlich axiale Kräfte aufnehmen. Die gesamte axiale Kraft muss wegen der beengten Platzverhältnisse bei der unteren Lagerung oben am Deckel aufgenommen werden. Dort sind auch die Möglichkeiten für die Wartung besser. Die Position des unteren Lagers erfordert es, dass es ohne Wartung auszukommen hat. Deswegen ist eine gekapselte Ausführung mit Lebensdauerschmierung anzuraten.

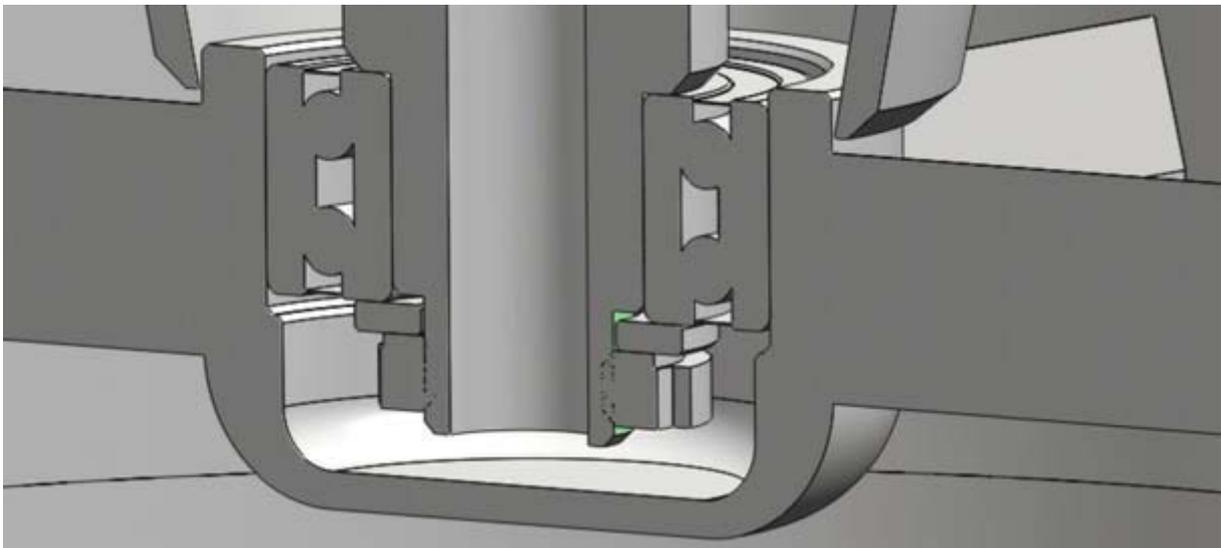


Abb. 4-11: Schnitt durch die untere Lagerung

Insgesamt ist diese Ausführung wenig wartungsintensiv, da es nur einen großen drehenden Teil gibt. Der Nachteil der Ausführung ist aber, dass bei einer schweren Betriebsstörung, wie beim Verklemmen von Teilen oder dem Bruch eines Teiles der Bunker manuell entleert werden muss. Erst dann ist das Abmontieren des Räumarmes und in weitere Folge ist das Herausheben der Welle mit Konus möglich.

Um die notwendige Antriebskraft deutlich zu senken könnte der Konus auch als separates Bauteil ausgeführt werden. Dies lässt sich auf mehrere Arten realisieren. Eine Möglichkeit ist die Anbringung von Streben die der Konus mit der Bunkerwand verbinden. Neben der Gefahr der Brückenbildung führt eine derartige Konstruktion auch zu einem höheren Aufwand bei Reparaturarbeiten. An Stelle von Streben ließe sich auch eine Hohlwelle, die vom Konus zum Deckel geht und in dessen inneren die Antriebswelle Platz findet, einsetzen. Diese Konstruktion

bietet eine einfache Lösung bei der die zusätzliche Hohlwelle das Gewicht der Anlage nur relativ geringfügig erhöht. Eine andere Lösung ist den Konus mit zwei Lagern auf die entsprechend vorbereitete Antriebswelle zu setzen. Bei diesem Vorschlag muss genau überlegt werden wie auf der langen Antriebswelle die Abstufungen für die richtige Platzierung der beiden Lager hergestellt werden. Die Lager selbst sind gekapselt und mit einer Lebensdauerschmierung ausgestattet.

4.3 Rotierender Schneckenarm

Wirft man einen Blick auf die Abb. 3-5 so wirkt eine Ausführung mit einem rotierenden Schneckenarm einfach und somit leicht zu produzieren. Doch der Schein trügt, denn unter der Verkleidung aus der die Schnecke herausragt sind auf engstem Raum alle notwendigen Systeme für die Funktion der Austrageeinrichtung untergebracht. In Abb. 4-12 ist ein erster Einblick in eine Ausführung mit zwei Schnecken zu sehen.



Abb. 4-12: Bunker mit zwei rotierende Schneckenarmen

Eine genauere Darstellung der Austragseinrichtung mit einem möglichen Antriebskonzept ohne Hydraulik ist in Abb. 4-13 zu sehen. Der Verzicht auf einen hydraulischen Antrieb lässt die Abmessungen der Austragseinrichtungen zunehmen wodurch die Abdeckung, die in den Bunkerraum ragt, nicht mehr mit einem stumpfen Winkel ausgeführt werden kann. Die heller eingefärbten Teile sind fix und die dunkler eingefärbten führen eine Bewegung aus.

Bei dieser Ausführung ist die Bewegung des Schneckenarmes zwangsgeführt, somit ist eine steife und stabile Konstruktion notwendig. Besonders kritisch ist die Ausführung einer solchen stabilen und steifen Konstruktion bei der Befestigung der gesamten mittleren Sektion. Die Befestigung kann nur über die vier Streben erfolgen, wobei eine in ihrem Inneren die Stromversorgung beherbergt.

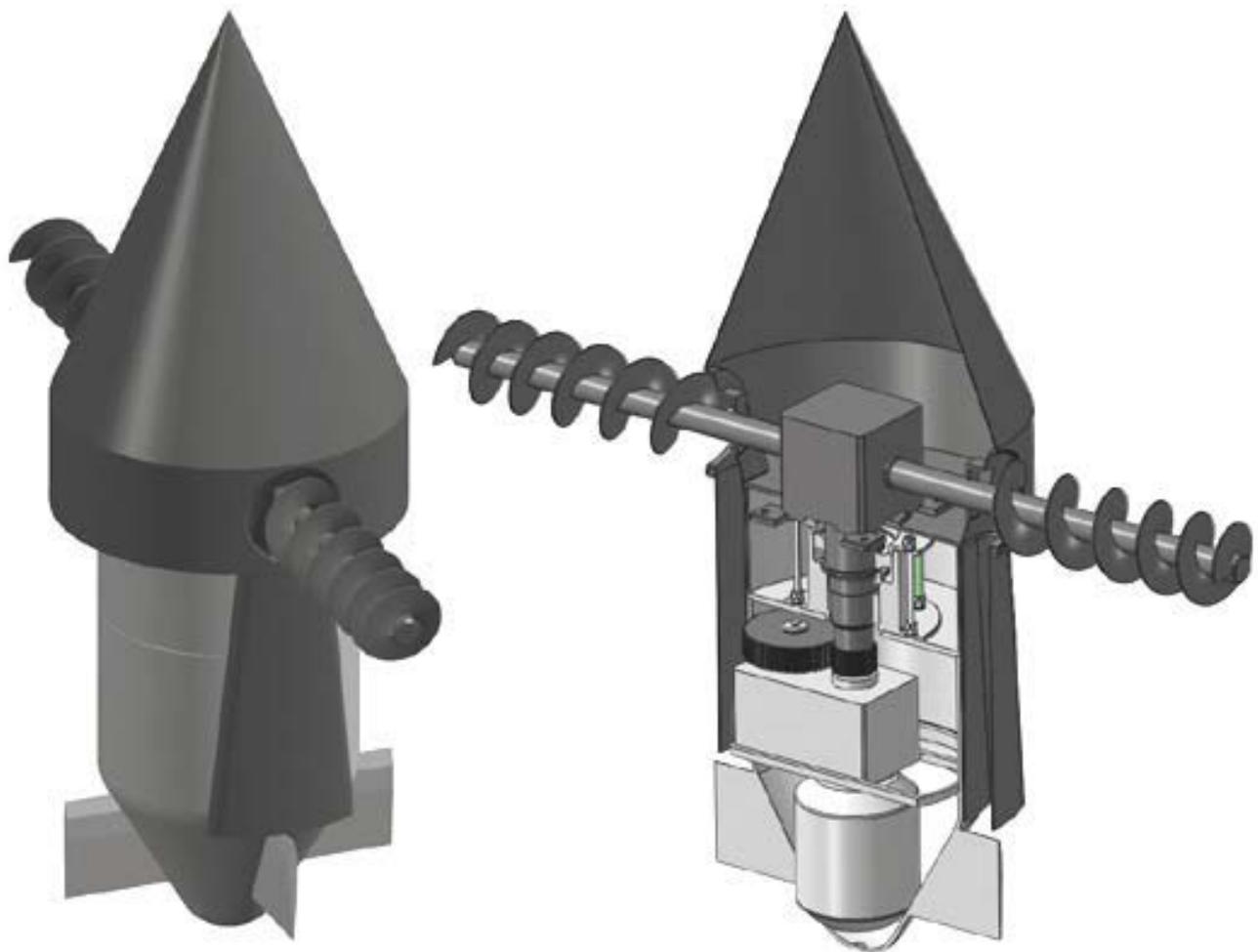


Abb. 4-13: Antriebskonzept des Austragsorgans

Abb. 4-14 liefert einen besseren Blick auf die Lagerung der Hauptwelle welche den gesamten beweglichen Aufbau trägt. Die Lagerung der Hauptwelle erfolgt beim Festlager mittels eines Axiallagers und eines Kegellagers und beim Loslager mittels eines Nadellagers. In der Hauptwelle befindet sich eine weitere Welle die mit dem Getriebe auf der Trägerplattform verbunden ist.

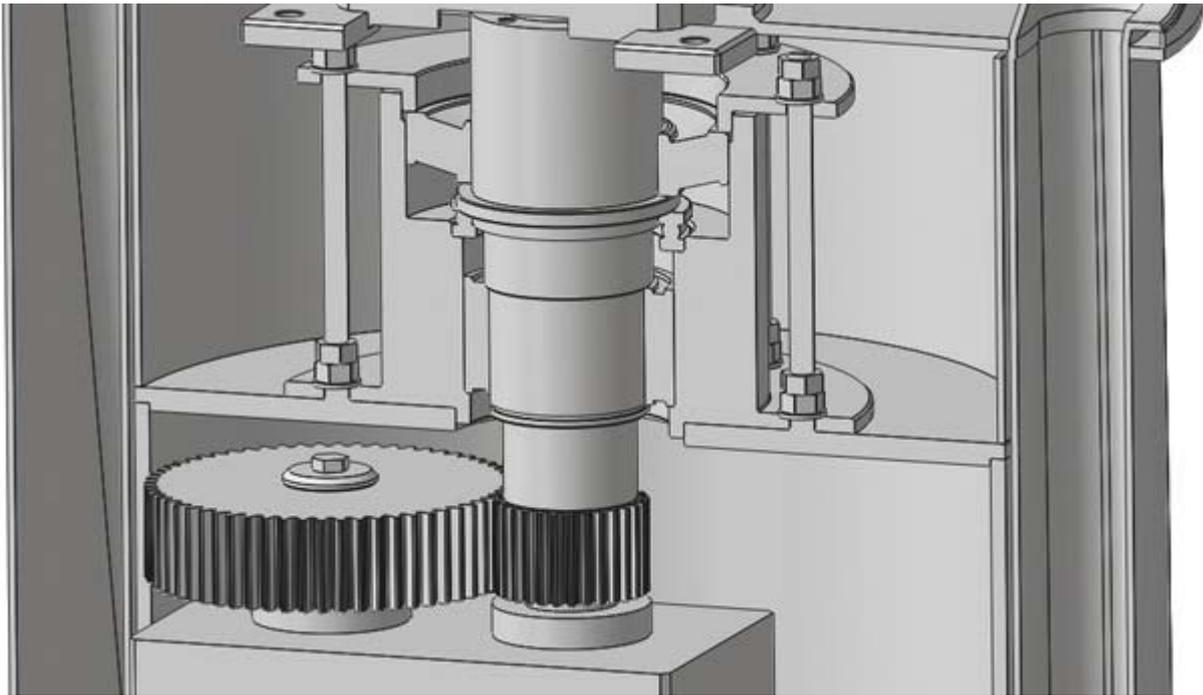


Abb. 4-14: Detail des Antriebssystems

Die Trägerplattform selbst ist, wie in Abb. 4-15 zu sehen, mittels Schrauben mit der Hauptwelle verbunden.



Abb. 4-15: Detail der Verbindung der Tragplattform mit der Hauptwelle

An den bisherigen Erläuterungen und Bildern ist zu erkennen wie aufwändig die Produktion und der Zusammenbau sind. Die Wartung gestaltet sich ebenfalls schwierig, da alle

beweglichen Teile von außen nicht oder nur in begrenztem Umfang über Wartungsklappen erreichbar sind. Bei entsprechender Konstruktion ist aber nur von minimalen Wartungsarbeiten auszugehen. Problematischer gestaltet sich aber der Wechsel des Motors und des Getriebes. In diesem Fall ist eine Entleerung des Bunkers und eine weitgehende Demontage der Austrageinheit unumgebar.

Wie beim rotierenden Räumarm so ist auch hier eine manuelle Entleerung erforderlich wenn sich Teile verklemmen. Eine leichte Störung, die z.B. mit einem Hammer leicht zu beheben ist, kann im Übergabestück auftreten. Aufgrund des großen Unterschieds zwischen dem äußeren Durchmesser der Austrageinrichtung und der Abmessung der schmalen Seite des Schneckenrohrs kann es hier zu einer Brückenbildung kommen wenn die Austragsleistung der beiden Schneckenarme höher ist als die der Transportschnecke und sich deswegen Material anhäuft. Wie auch beim rotierenden Räumarm führt hier eine Vergrößerung des Durchmessers der Förderschnecke zu einer Verbesserung des Gesamtkonzepts.

4.4 Schneckenbatterie

Schnecken sind sehr robuste Fördereinrichtungen mit vielfältigen Anwendungsgebieten aber auch einem hohen Kraftbedarf. Bei der Schneckenbatterie liegen die Probleme bzw. Herausforderungen bei der Lagerung mit den dazugehörigen Abdichtungsmaßnahmen gegen das Schüttgut, bei der ausreichend steifen Ausführung des Blechrahmens der die Schnecken aufnimmt und bei der Gestaltung des Antriebssystems.

In Abb. 4-16a ist die Blechkonstruktion des Bodenrahmens aus Abb. 3-6 zu sehen mit ihrer optimalen Form für den Aufrag. Diese ist aber sehr aufwendig und kostenintensiv in der Fertigung. Eine vereinfachte, kostengünstigere Konstruktion, die nur zu einer geringen Verschlechterung beim Aufrag führt, ist in Abb. 4-16b dargestellt.

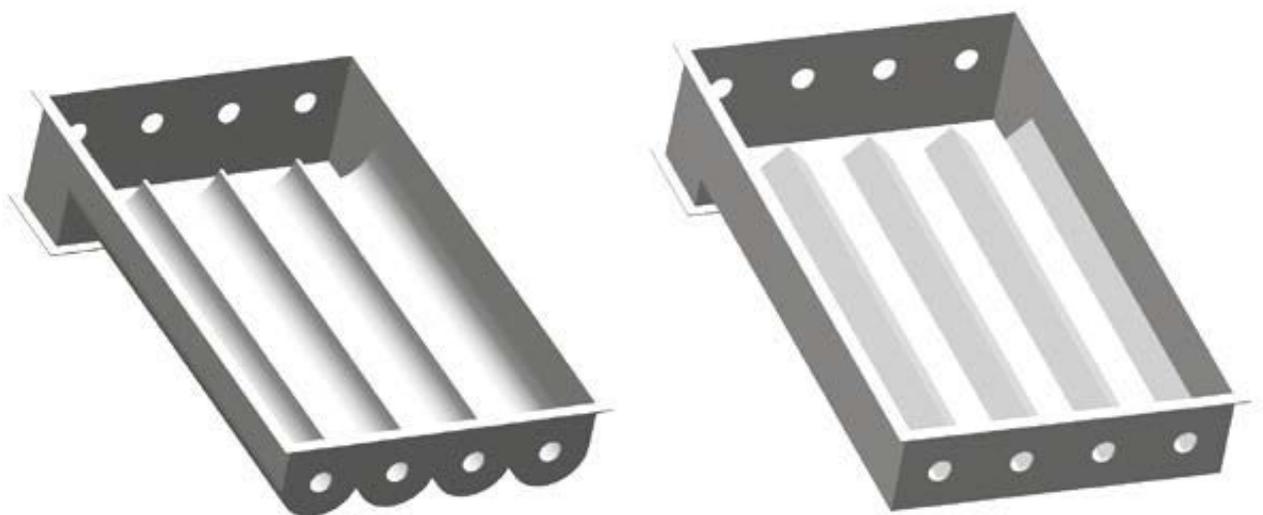


Abb. 4-16: Blechkonstruktion des Bodenrahmens

Die in Abb. 4-17 gezeigte Konstruktion ist eine Möglichkeit für die Konstruktion des Festlagers welches sich auf der Seite der Austragsöffnung befindet. Die Halterung für die Lager wird über im Gehäuse angeschweißte Gewindestangen befestigt. Über diese Stangen wird auch die Vorspannung der beiden Kegelrollenlager vorgenommen. Um zu verhindern, dass Schüttgut in die Lager gelangt kommt der gleiche Aufbau wie in Abb. 4-3 zum Einsatz.

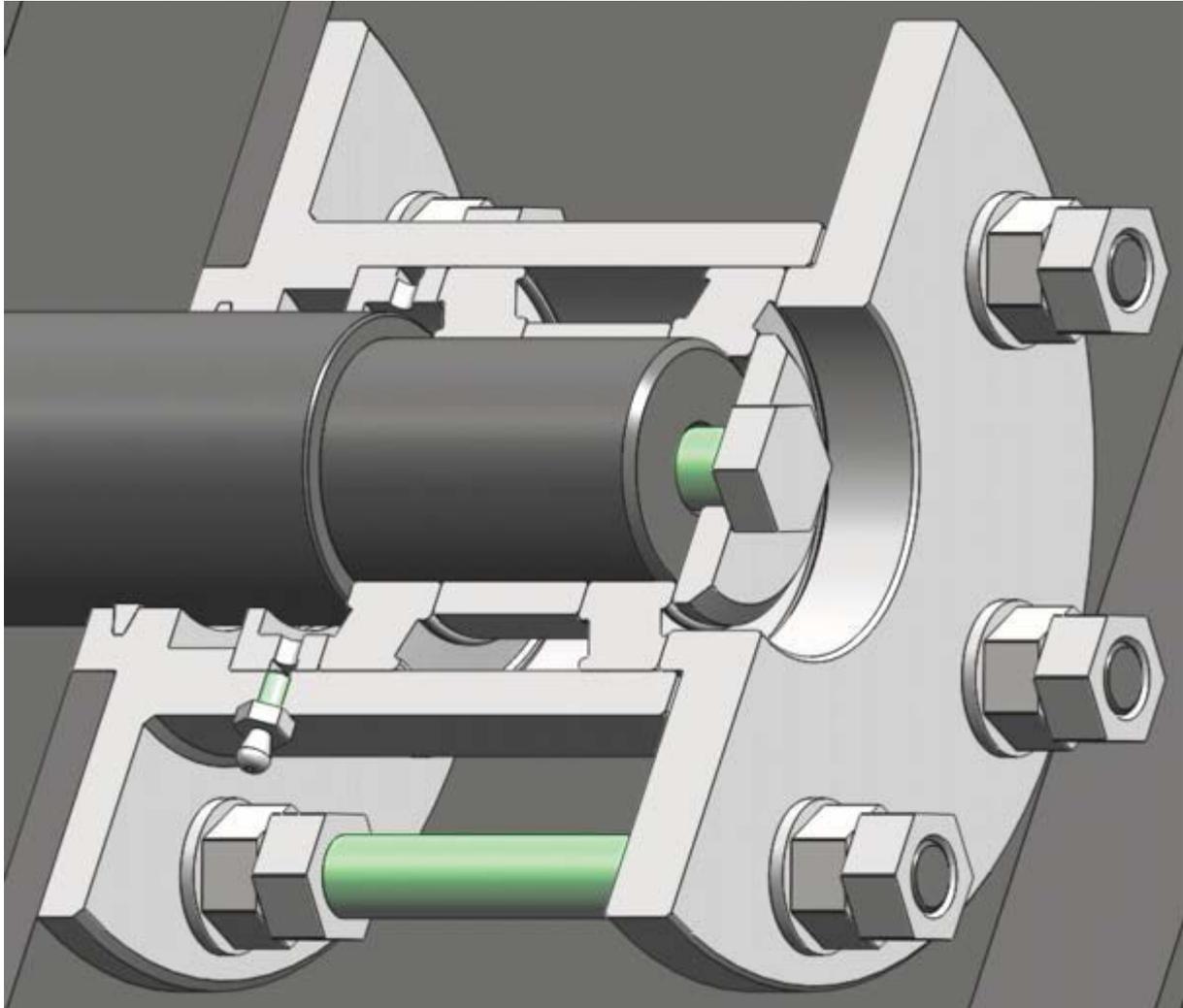


Abb. 4-17: Festlager bestehend aus zwei Kegelrollenlager

Das Antriebssystem kann auf mehrere Arten ausgelegt werden. Entweder es kommt ein starker Motor mit dazugehörigem Getriebe zum Einsatz oder zwei schwächere Motoren mit je einem Getriebe. Bei Verwendung eines Motors muss entweder gleich im nachfolgenden Getriebe oder nach diesem dafür gesorgt werden, dass jeder der beiden zusammengesetzten Schneckensätze mit der vorgesehenen Drehrichtung versorgt wird. Die Aufteilung der Drehrichtung gestaltet sich bei zwei Antriebssträngen natürlich einfacher. Außerdem kann beim Ausfall eines Stranges mit dem anderen Strang der Austrag im begrenzten Umfang aufrechterhalten werden, sofern es sich bei dem Schüttgut nicht um CDs/DVDs handelt. Bei diesem Schüttgut besteht die Gefahr, dass sich zwischen einer funktionsfähigen Schnecke und

einer stillstehenden Schnecke einige CDs bzw. DVDs verkeilen und es so zu einem Totalausfall des Austragsorgans kommt.

Der in Abb. 3-6 vorgestellte Aufbau einer Schneckenbatterie kann bei besonders schwierig zu handhabenden Schüttgütern, wie eben die CDs/DVDs, modifiziert werden. In Abb. 4-18 ist eine einfache und sehr effektive Modifikation dargestellt, die die Belastung, die die Schüttgutsäule auf den Bereich nahe der Austragsöffnung hervorruft, stark vermindert. Ähnlich lässt sich auch mit den Ausführungen verfahren die ein Förderband bzw. -bänder als Austragsorgan/-e nutzen.

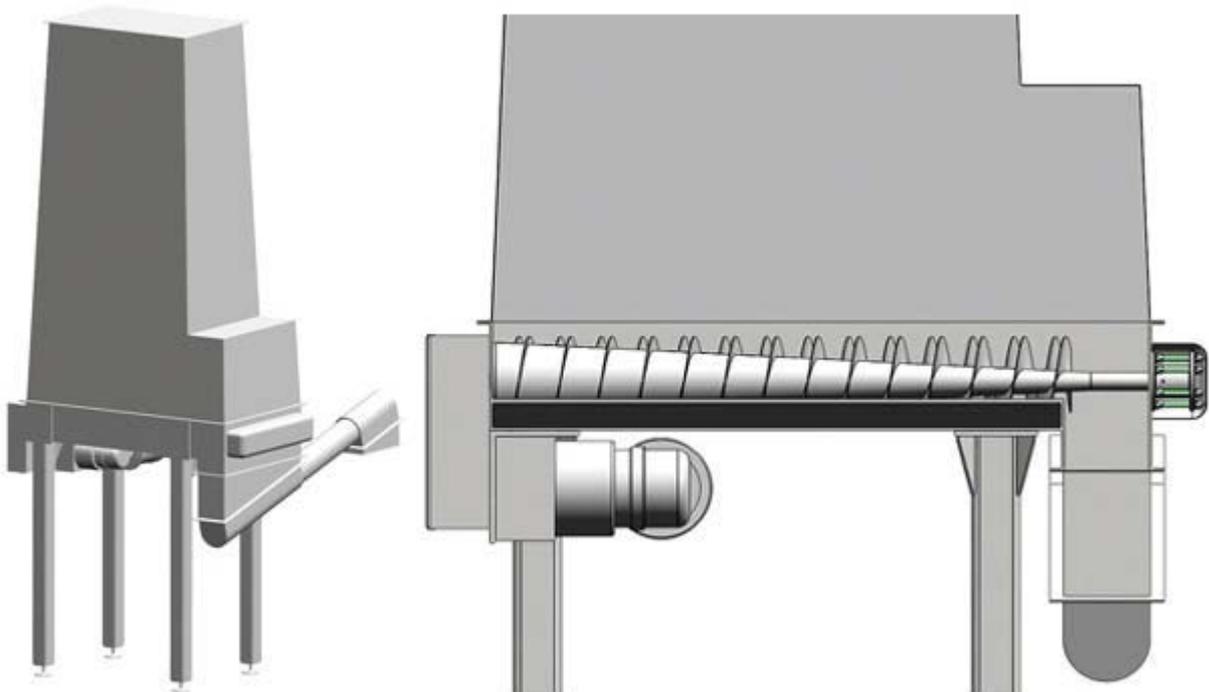


Abb. 4-18: modifizierter Bunker mit Schneckenbatterie

Die Schneckenbatterie ist ein robustes und wartungsarmes System für einen gesicherten Austrag verschiedenster Schüttgüter. Da die zu wartenden Teile leicht zugänglich sind hält sich der Aufwand für die Wartung in Grenzen.

Auch bei diesem System kann es zu einer Betriebsstörung kommen, wenn sich bei den Schnecken etwas verkeilt. In diesem Fall steht nur die manuelle Entleerung des Bunkers zur Auswahl.

5 Zusammenfassung

Das Kapitel 2 liefert einen umfassenden Überblick über die grundlegende Theorie der Schüttgutmechanik, der Prüfung von Schüttgütern, der Thematik der Schüttgutlagerung, den Austrag von Schüttgütern, die Grundlagen der Kunststoffe und die Eigenschaften des zu lagernden Schüttgutes.

Im Kapitel 3 wird gezeigt welche Austragsvorrichtung für welche Art der zu betrachtenden Schüttgüter geeignet ist. Mittels maßstabsgetreuer Computermodelle erfolgt eine Visualisierung wie das Austragsorgan für die vorgegebenen Platzverhältnisse realisiert werden kann. Dieses Kapitel umfasst auch eine erste Abschätzung des zu erwartenden Gewichts einer jeden Konstruktion. Die Brauchbarkeit dieser Abschätzung ist durch einen Vergleich des Computermodells des bestehenden Bunkers mit dem Originalgewicht des selbigen bestätigt worden. Bei den Modellen im Kapitel 3 geht es primär darum einen generellen Überblick über taugliche Lösungen zu schaffen.

In Kapitel 4 wurden vier Ausführungen durch detaillierte Modelle genauer dargestellt sowie Wartungsmaßnahmen und Worst-Case Szenarien betrachtet. Zusätzlich wird eine Konstruktion vorgestellt die bei schweren Betriebsstörungen die Entleerung des Bunkers ohne Austragsorgan erleichtert. Jede der vier genauer ausgeführten Varianten verfügt über ein Eigenschaftsprofil welches das optimale Einsatzgebiet festlegt. Eine Zusammenfassung der Eigenschaften auf die wichtigsten Hauptpunkte liefert Tab. 5-1. Version 1 steht für den Austrag mittels eines Bandförderers, Version 2 für die Ausführung mit rotierendem Räumarm, 3 weist auf den rotierenden Schneckenarm mit Zwangssteuerung sowie elektrischem Antrieb hin und 4 enthält die Bewertung für den Austrag mittels einer Schneckenbatterie.

Version	Wartungs- aufwand	Gewicht	Aufwand für eine komplette Demontage (z.B. bei schwerer Betriebsstörung)	Materialeignung		
				CDs/DVDs	Schnitzel	Flakes
1	mittel	3000 kg	mittel bis hoch	mittel	gut	sehr gut
2	gering	3200 kg	mittel	schlecht	gut	gut
3	gering	2900 kg	hoch bis sehr hoch	schlecht	gut	gut
4	gering	3500 kg	mittel	gut	sehr gut	sehr gut

Tab. 5-1: Übersicht über das Eigenschaftsspektrum der vier Versionen

Bei der Materialeignung wird von der prinzipiellen Eignung des Systems ausgegangen, auch wenn von Material zu Material Modifikationen in der Bunkergestaltung notwendig sind um den Austrag ohne Störung zu gewährleisten.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass diese Arbeit eine umfassende Entscheidungshilfe für die Auswahl von Austragsorganen samt passender Gestaltung des Bunkers bietet um die optimale Handhabung von Folienschnitzeln, Flakes und DVDs/CDs zu ermöglichen. Der Theorieteil dieser Arbeit liefert dafür einen Einblick in das umfangreiche Gebiet der mechanischen Verfahrenstechnik sowie der Förder- und Materialflusstechnik. Dies wiederum bildet, gemeinsam mit einer Charakterisierung der Kunststoffe, die Basis um genauer auf die Problematik der Lagerung von Kunststoffrecyclaten eingehen zu können. Wissenschaftliche Arbeiten die sich speziell mit der Lagerung von Kunststoffrecyclaten auseinandersetzen sind sehr rar und Anmerkungen in Büchern zu diesem Thema gestalten sich kurz. Diese Arbeit fügt die diversen Fragmente zusammen und stellt sie in den Kontext mit der vorliegenden Aufgabenstellung. Damit dient diese Arbeit zweierlei Zielen – zum einen kann die Firma Majer nun optimierte Bunkerausführungen herstellen und zum anderen kann auf diese Arbeit aufgebaut werden um die Lücke an Literatur in diesem Themengebiet zu schließen.

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: bisherige Bunkerkonstruktion.....	1
Abb. 2-1: Unterschied zwischen Schüttgut und Flüssigkeit [6].....	3
Abb. 2-2: Methoden zur Bestimmung des Böschungswinkels [6].....	4
Abb. 2-3: Modellvorstellung zur Definition des Fließkriteriums [6].....	5
Abb. 2-4: Fließkriterium nach Mohr - Coulomb für ein kohäsionsloses Schüttgut [6].....	6
Abb. 2-5: Fließkriterium nach Mohr – Coulomb für ein kohäsives Schüttgut [6].....	7
Abb. 2-6: Einfluss der Schüttgutdichte auf die Fließsorte [6]	8
Abb. 2-7: Vorgänge beim Scherversuch [2].....	9
Abb. 2-8: Scherzelle des Jenike Gerätes [6]	10
Abb. 2-9: Ausführungen von Torsionsschergeräten [13].....	11
Abb. 2-10: Ringscherzelle [3]	12
Abb. 2-11: Ermittlung der Wandreibung [4]	12
Abb. 2-12: Messprinzipien zur Ermittlung des Fließindex nach Carr [13]	14
Abb. 2-13: Rührer im Schüttgut [13]	14
Abb. 2-14: a) einfache Verdichtbarkeitsmessung b) Stampfvolumeter [13]	15
Abb. 2-15: a) Warren S. Bradford Cohesion Tester, b) Flowability Test [13]	16
Abb. 2-16: Penetration Test [13].....	16
Abb. 2-17: a) Johanson Hang-up Indiciser™, b) Drucktopf [13].....	17
Abb. 2-18: Prinzip des zweiachsigen Druckversuchs [13].....	18
Abb. 2-19: Auslaufstörungen aus einem Silo/Bunker [8].....	21
Abb. 2-20: Schüttgutverhalten bei zentrischer, mechanischer Befüllung [7]	22
Abb. 2-21: Schüttgutverhalten bei zentrischer, pneumatischer Befüllung [7]	22
Abb. 2-22: Schüttgutverhalten bei tangentialer, pneumatischer Befüllung [7].....	23
Abb. 2-23: Verweilzeitverteilung bei Bunkern und Silos [6]	25
Abb. 2-24: Fließprofile in Silos und Bunkern [6]	25
Abb. 2-25: einige Grundformen von Bunkern [10]	28
Abb. 2-26: Schlitzbunkerausführungen [12]	29
Abb. 2-27: Behälter und Ausflussweiten in Abhängigkeit vom Schüttgut [10].....	29
Abb. 2-28: Visualisierung des Unterschieds von Austragsorganen und -hilfen [6].....	30
Abb. 2-29: Aufbau eines Gurtförderers [21].....	31
Abb. 2-30: Falsche (a) und verbesserte (b) Ausführung eines Bandförderers [7]	32

Abb. 2-31: Möglichkeiten der Abstützung der Schüttgutsäule [11].....	33
Abb. 2-32: Bauarten von Kratzerförderern [5]	33
Abb. 2-33: Kratzerförderer [5].....	34
Abb. 2-34: Beispiele für Trogketten [5].....	34
Abb. 2-35: Möglichkeiten der Förderstromführung [5].....	35
Abb. 2-36: Trogkettenförderer als Austragsorgan [7]	36
Abb. 2-37: a) Fließprofil ohne Maßnahmen, b) mögliche Verbesserung [13].....	36
Abb. 2-38: Schnecke in einem U - Trog mit Fördergut [12].....	37
Abb. 2-39: Schneckenausführungen [5]	37
Abb. 2-40: Bewegungsfäden des Gutes bei verschiedenen Füllungsgraden [12].....	38
Abb. 2-41: Beeinflussung des Fließprofils durch Schneckenaustragsorgane [6]	39
Abb. 2-42: rotierende Räumleinrichtungen [6]	40
Abb. 2-43: rotierende Fließzone beim Abzug mit einer rotierenden Schnecke [13].....	40
Abb. 2-44: Drehtelleraufgeber [5]	41
Abb. 2-45: Drehteller mit einer Manschette für zunehmende Böschung [14].....	42
Abb. 2-46: Grundaufbau eines Schwingförderers [12]	43
Abb. 2-47: Schwingrinne in hängender Bauweise [5].....	44
Abb. 2-48: Schwingroste [7]	44
Abb. 2-49: Schwingtrichterausführungen [13]	45
Abb. 2-50: Drehbalkenboden a) in Ruhestellung b) beim Schüttgutaustrag [13]	46
Abb. 2-51: Schubaufgeber [11].....	46
Abb. 2-52: Ausführungen von Zellenradschleusen [6]	47
Abb. 2-53: Walzenaufgeber [12].....	48
Abb. 2-54: kontinuierlich arbeitende pneumatische Systeme [14]	48
Abb. 2-55: Luftkanone [14]	49
Abb. 2-56: Einsatzablauf von Luftkanonen [14].....	49
Abb. 2-57: Bunkerkissen [14]	50
Abb. 2-58: Übersicht Kunststoffe [15].....	51
Abb. 2-59: Arten der Fadenmoleküle bei Thermoplasten [15].....	52
Abb. 2-60: Anordnungen der Fadenmoleküle bei Thermoplasten [15].....	52
Abb. 2-61: mechanisches Verhalten von amorphen Thermoplasten [15]	53
Abb. 2-62: mechanisches Verhalten von teilkristallinen Thermoplasten [15]	53
Abb. 2-63: Anordnungen vernetzter Moleküle [15].....	53
Abb. 2-64: mechanisches Verhalten von Duroplasten [15]	54

Abb. 2-65: mechanisches Verhalten von Elastomeren [15]	54
Abb. 2-66: a) Verdichten und b) Prüfung mittels Drucktopf [13]	60
Abb. 2-67: Lage der plättchenförmigen Partikel a) unbelastet und b) belastet [13]	61
Abb. 2-68: Ausrichtung der Partikel entlang der Scherfläche a) vor und während des Schervorgangs bei b) steifen und c) verformbaren Partikeln [13]	61
Abb. 3-1: Verpressung beim Austrag mittels Kettenförderer [13]	64
Abb. 3-2: Bunker mit einem Förderband als Austragsorgan	66
Abb. 3-3: Bunker mit zwei Förderbänder als Austragsorgan	67
Abb. 3-4: Bunker mit rotierendem Räumarm	68
Abb. 3-5: Bunker mit rotierendem Schneckenarm	69
Abb. 3-6: Bunker mit Schneckenbatterie	70
Abb. 3-7: Bunker mit Drehteller als Bodenplatte	71
Abb. 3-8: Verstrebungen an der Unterseite	72
Abb. 3-9: Bunker mit zwei Walzen als Austragssystem	73
Abb. 3-10: Detail der Anordnung der Walzen für Schnitzel und Flakes	73
Abb. 3-11: Bunker mit einer Walze für den Austrag	74
Abb. 3-12: Detail der Konstruktion mit einer Walze für Schnitzel und Flakes	75
Abb. 3-13: Detail der Konstruktion mit zwei Walzen für DVDs bzw. CDs	75
Abb. 3-14: Bunker mit einer senkrechten Schnecke als Austragsorgan	76
Abb. 3-15: mögliche Anordnungen von mehreren Schnecken	77
Abb. 3-16: Bunker mit zwei senkrechten Schnecken als Austragssystem	78
Abb. 4-1: Bunkertür (a) nur mit Rahmen, (b) im Zusammenbau für Entleerung	80
Abb. 4-2: Unterschiedliche Einstellungen für Klappe und Schieber	81
Abb. 4-3: Los- und Festlager der nicht angetriebenen Walze	82
Abb. 4-4: Schmierstofffluss bei Nachfüllung	82
Abb. 4-5: Wartungsklappe an der Unterseite	83
Abb. 4-6: untere Blechkonstruktion	84
Abb. 4-7: Rollenkasten für die Gurtstützung	85
Abb. 4-8: rotierender Räumarm mit neuer Konzeption	86
Abb. 4-9: Schnecke im Bereich zwischen Räumarmaustrag und Lagerhalterung	87
Abb. 4-10: modifizierter Austragsbereich	87
Abb. 4-11: Schnitt durch die untere Lagerung	88
Abb. 4-12: Bunker mit zwei rotierende Schneckenarmen	89
Abb. 4-13: Antriebskonzept des Austragsorgans	90

Abb. 4-14: Detail des Antriebssystems.....	91
Abb. 4-15: Detail der Verbindung der Tragplattform mit der Hauptwelle.....	91
Abb. 4-16: Blechkonstruktion des Bodenrahmens	92
Abb. 4-17: Festlager bestehend aus zwei Kegelrollenlager	93
Abb. 4-18: modifizierter Bunker mit Schneckenbatterie	94

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Bewertung des Fließfähigkeitsindex nach Carr [13].....	14
Tab. 2-2: Bewertung des Rührers [13]	15
Tab. 2-3: Bewertung der Verdichtbarkeitsmessung [13]	15
Tab. 2-4: Bewertung Cohesion Tester und Flowability Test [13].....	16
Tab. 2-5: Bewertung für Penetration Test [13]	17
Tab. 2-6: Bewertung des Johanson Hang-up Indiciser™, ähnliche Prinzipien [13].....	18
Tab. 2-7: Bewertung des zweiachsigen Druckversuchs [13].....	18
Tab. 2-8: Schwierigkeitsgrade nach Taubmann, zus. mit Böschungswinkel und Austragsvorschlag [5].....	19
Tab. 2-9: Auszug über die Einsetzbarkeit von Doppelschneckenausführungen [18]	38
Tab. 2-10: Kennwerte für Formmassen aus Polyethylen [15]	55
Tab. 2-11: Kennwerte gängiger Polyamide [15]	56
Tab. 2-12: Kennwerte einiger Polyethylenterephthalate [15]	58
Tab. 2-13: Kennwerte einiger Polycarbonate [15]	59
Tab. 5-1: Übersicht über das Eigenschaftsspektrum der vier Versionen	95

8 Literaturverzeichnis

- [1] Rumpf, H.: Mechanische Verfahrenstechnik, Carl Hanser Verlag München Wien 1975
- [2] Schulze, D.: Fließverhalten von Pulvern und Schüttgütern (Grundlagen), www.dietmar-schulze.de/grld1.html, August 2006
- [3] Schulze, D.: Fließeigenschaften von Schüttgütern und verfahrenstechnische Siloauslegung, www.dietmar-schulze.de/powtvd.pdf, August 2006
- [4] Molerus, O.: Schüttgutmechanik; Grundlagen u. Anwendungen in d. Verfahrenstechnik, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo 1985
- [5] Aumund, H., F. Mechthold: Hebe- und Förderanlagen 4. Auflage, Springer Verlag Berlin/Heidelberg 1969
- [6] M. H. Pahl, R. Ernst, H. Wilms: Lagern, Fördern und Dosieren von Schüttgütern – Praxwissen Verfahrenstechnik 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig 1993
- [7] Martens, P. (Hrsg): Silo – Handbuch, Wilhelm Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften Berlin 1988
- [8] Wolters, L. (Hrsg.): Kunststoff – Recycling, Grundlagen – Verfahren – Praxisbeispiele, Carl Hanser Verlag München Wien 1997
- [9] Michaeli, W., M. Bittner, L. Wolters: Stoffliches Kunststoff – Recycling, Anlagen – Komponenten - Hersteller, Carl Hanser Verlag München Wien 1993
- [10] Zillich, E.: Fördertechnik für Studium und Praxis Band 3 – Strömungsförderer, Flurförderer, Lager- und Materialflusstechnik, Werner Verlag Düsseldorf 1973
- [11] Svoboda, U.: Diplomarbeit „Vergleichende Betrachtung von Bunkern und Bunkerabzugsorganen in Abhängigkeit vom Schüttgut“, Montanuniversität Leoben 1994
- [12] Kurth, F., G. Pajer, H. Kuhnt: Stetigförderer 4. Auflage (Buchreihe Fördertechnik), VEB Verlag Technik Berlin 1983
- [13] Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter – Fließeigenschaften und Handhabung, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [14] GVC VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): Agglomerations- und schüttguttechnik, Preprints der Vortrags- und Diskussionstagung November 1991
- [15] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften 5. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Barcelona Budapest Hongkong London Mailand Paris Santa Clara Singapur Tokio 1998
- [16] Menges, G.: Werkstoffkunde Kunststoffe 4. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien 1998
- [17] Schulze, D.: Fließeigenschaften von Schüttgütern mit faser- und plättchenförmigen Partikeln, Seite 538 - 546 Schüttgut 8 2002
- [18] Wilson, D. H.: Feeding technology for plastics processing, Carl Hanser Verlag München 1998
- [19] Salzer, G. (Gesamtbearbeiter): Schüttgutförderer, Krauskopf Verlag Mainz 1968

- [20] Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern, Verlag Chemie Weinheim, 1968
- [21] VDI Kunststofftechnik (Hrsg.): Fördern und Klassieren beim Aufbereiten und Verarbeiten von Kunststoffen, Tagung Baden-Baden, VDI Verlag Düsseldorf 1985
- [22] VDI Kunststofftechnik (Hrsg.): Schüttguttechnik in der Kunststoffindustrie - Neues und Bewährtes, 24. Jahrestagung Aufbereitungstechnik, VDI Verlag Düsseldorf 1998