

Extraction of bulk materials
Abzug von Schüttgütern

Investigations into the extraction characteristics of bulk materials from silos

Part 2: Experimental results

Luigi Di Matteo¹, Jörg Schwedes²

¹ DI MATTEO Förderanlagen GmbH & Co. KG, Beckum/Germany

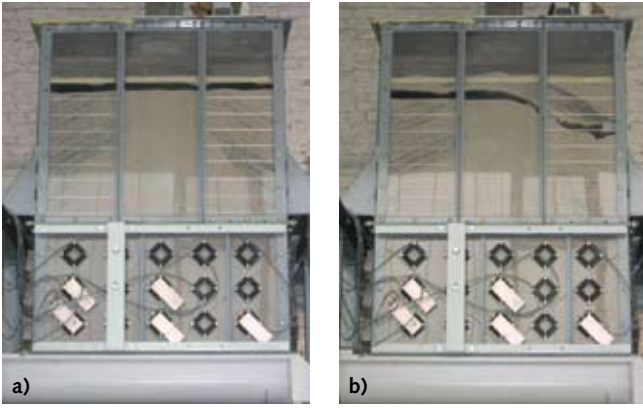
² Institut für Partikeltechnik, Technische Universität Braunschweig/Germany

Summary: As part of this work experimental investigations were carried out with a rectangular silo. The main focus was on the stress states during emptying by two silo extraction screws and the relationships between the wall normal stresses, the flow profiles and the torques required for the extraction screws. Among other things it was established that the wall normal stresses are lower in moving zones than in stationary zones. The findings and relationships that were discovered can be applied reliably to industrial plants. Part 2 of the article presents the experimental results.

Austragverhalten von Schüttgütern aus einem Silo

Teil 2: Ergebnisse der Experimente

Zusammenfassung: Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen an einem rechteckigen Silo durchgeführt. Im Vordergrund standen die Spannungszustände beim Entleeren mittels zweier Siloabzugschnecken sowie die Zusammenhänge zwischen den Wandnormalspannungen, den Fließprofilen und den erforderlichen Drehmomenten für die Abzugschnecken. Es konnte unter anderem festgestellt werden, dass die Wandnormalspannungen in bewegten Zonen niedriger ausfallen als in ruhenden Zonen. Die gewonnenen Erkenntnisse und Zusammenhänge ermöglichen eine zuverlässigere Übertragung auf Industrieanlagen. Teil 2 des Beitrages stellt die Ergebnisse der Experimente vor.



10 Procedure for determining the flow profiles based on the example of test series
Vorgehensweise zur Ermittlung der Fließprofile am Beispiel der Versuchssreihe 1

4 Test results

The test results for test series 1 and 4 are given below (**Table 1**). A complete evaluation can be found in [18].

4.1 Flow profiles

Knowledge of the flow profiles is very important for explaining and interpreting the stresses that occur in silos. The relationship between the flow profiles and the corresponding stresses is known from mass flow and funnel flow silos [6]. During the trials to determine the flow profiles the test silo described in Part 1 was first filled uniformly up to the specified mark. The sloping surface of the bulk material caused by the central filling was then levelled off and covered with a layer of black plastic pellets (**Fig. 10a**). This procedure for recording flow profiles is often used in the literature, sometimes in modified form, for observing emptying processes [19, 21, 22]. The bulk material was then extracted and immediately returned again to the top of the test silo. The surface of the bulk material was continuously levelled (**Fig. 10b**) in order to prevent the sloping surface of the bulk material from influencing the flow profile. **Figure 11** shows a diagrammatic representation of the flow profile that was obtained during test series 1. The screw geometry used had a constant pitch and did not lead to a uniform extraction rate over the intake length of the screw. As expected, the extraction took place principally from the rear section. This confirmed the supposition that in each case the first flight of the screw in the rear part fills with bulk material and essentially no more bulk material is extracted over the rest of the intake length. This results in a dead zone in the front part of the silo that hardly moves at all. Funnel flow is established. The flow profiles for screw geometry S2 (**Fig. 8**), i. e. with graduated progression, were measured in test series 4 and 5. **Figure 12** shows the flow profile that was obtained in test series 4. The screw geometry used had a graduated, uniform, extraction rate over the entire intake length. In contrast to the flow profile of test series 1 (**Fig. 11**) no dead zone is formed and the bulk material flow extends over the entire cross-section of the silo. With the flow profile of test series 1 there were significant differences in movement between the front wall and the rear wall, but this did not occur in test series 4. The bulk material sinks down virtually identically at the front and rear walls. The extraction of the bulk material also takes place uniformly over the width of the silo. Mass flow is established.

4 Versuchsergebnisse

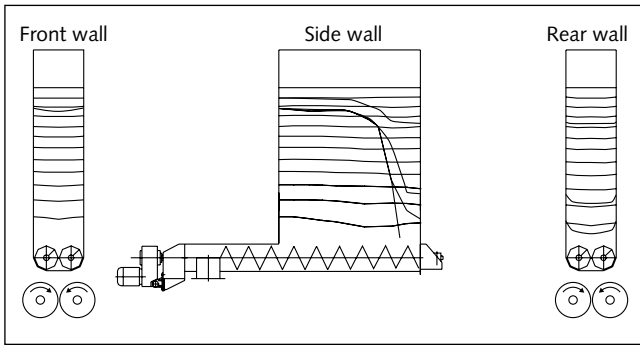
Nachfolgend sind die Versuchsergebnisse für die Versuchssreihen 1 und 4 aufgeführt (**Tabelle 1**). Eine vollständige Auswertung kann [18] entnommen werden.

4.1 Fließprofile

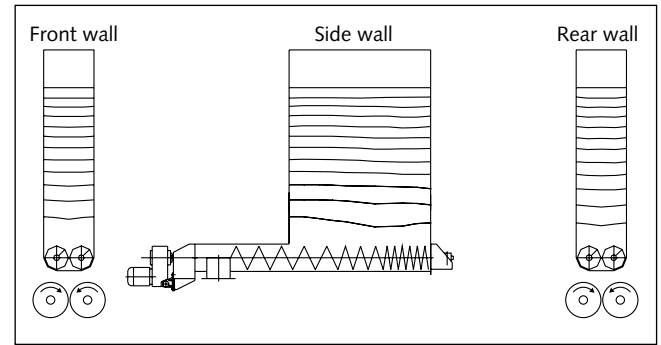
Die Kenntnis von Fließprofilen ist für die Deutung und Interpretation der in Silos auftretenden Spannungen von großer Bedeutung. Der Zusammenhang zwischen den Fließprofilen und den entsprechenden Spannungen ist von Massenfluss- und Kernflusssilos her bekannt [6]. Bei den Versuchen zur Ermittlung der Fließprofile wurde das oben beschriebene Versuchssilo zunächst bis zur definierten Markierung gleichmäßig gefüllt. Im nächsten Schritt wurde der durch die mittige Befüllung entstandene, abgeböschte Schüttgutspiegel eingeebnet und mit einer Schüttgutschicht von schwarzen Kunststoffpellets bedeckt (**Bild 10a**). Diese Vorgehensweise zur Aufnahme von Fließprofilen wird in der Literatur, teilweise in abgewandelter Form, häufig zur Beobachtung von Entleerungsvorgängen eingesetzt [19, 21, 22]. Anschließend erfolgten der Schüttgutabzug und die direkte Rückführung des abgezogenen Schüttguts oben in das Versuchssilo. Um eine Beeinflussung der Fließprofile durch den abgeböschten Schüttgutspiegel ausschließen zu können, wurde der Schüttgutspiegel permanent eingeebnet (**Bild 10b**). **Bild 11** zeigt das grafisch aufbereitete Fließprofil, welches sich bei der Versuchssreihe 1 einstellt. Die eingesetzten Schnecken-geometrien haben eine konstante Steigung und führen, über die Einzugslänge betrachtet, nicht zu einer gleichmäßigen Abzugsrate. Erwartungsgemäß erfolgt der Abzug vornehmlich aus dem hinteren Bereich. Dies bestätigt die Vermutung, dass sich im hinteren Bereich der Schnecken jeweils die erste Flügelsteigung mit Schüttgut füllt und über die weitere Einzugslänge im Wesentlichen kein weiteres Schüttgut mehr abgezogen wird. Damit ergibt sich im vorderen Silobereich eine tote Zone, die nur unwesentlich in Bewegung kommt. Es stellt sich Kernfluss ein. Die Fließprofile für die Schnecken-geometrie S2 (**Bild 8**), also mit abgestufter Progression, sind in den Versuchssreihen 4 und 5 ermittelt worden. **Bild 12** zeigt das Fließprofil, welches sich bei der Versuchssreihe 4 einstellt. Die eingesetzten Schnecken-geometrien verfügen über die gesamte Einzugslänge über eine abgestufte, gleichmäßige Abzugsrate. Dementsprechend erfolgt der Abzug gleichmäßig über die gesamte Abzugslänge. Im Gegensatz zum Fließprofil der Versuchssreihe 1 (**Bild 11**) bildet sich keine tote Zone, sondern der Schüttgutfluss erstreckt sich über den gesamten Siloquerschnitt. Während bei dem Fließprofil der Versuchssreihe 1 deutliche Unterschiede in der Bewegung zwischen Vorder- und Rückwand auftreten, gilt dies für die Versuchssreihe 4 nicht. Das Schüttgut sinkt an Vorder- und Rückwand nahezu identisch ab. Auch über die Silobreite erfolgt der Schüttgutabzug gleichmäßig. Es stellt sich Massenfluss ein.

4.2 Wandnormalspannungen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen wurden beim Entleerungsvorgang aus dem Versuchssilo durchgeführt. Die Messungen erfolgten im stationären Entleerungszustand, das heißt, das ausgetragene Schüttgut wurde im Kreislauf direkt oben wieder in das Versuchssilo gefördert. Auf diese Weise wurde der Füllstand im Silo auf konstanter Höhe gehalten. Um eine Beeinflussung des abgeböschten Schüttgutspiegels ausschließen zu können, wurde der Schüttgutspiegel permanent eingeebnet. Als stationärer Entleerungszustand wird nachfolgend der Zustand definiert, bei welchem sich die ge-



11 Diagrammatic representation of the flow profile of test series 1 – screw geometry with constant pitch
Schematisches Fließprofil der Versuchsreihe 1 – Schneckengeometrie mit konstanter Steigung



12 Diagrammatic representation of the flow profile of test series 4 – screw geometry with progressive pitch
Schematisches Fließprofil der Versuchsreihe 4 – Schneckengeometrie mit progressiver Steigung

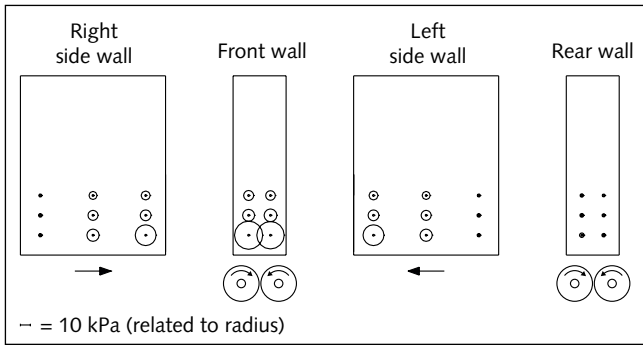
4.2 Wall normal stresses

The investigations described in this section were carried out during the emptying process from the test silo. The measurements were made during the steady-state emptying condition, i.e. the bulk material that had been extracted was immediately recycled back to the top of the test silo. This kept the level of material in the silo at a constant height. The surface of the bulk material was constantly levelled to exclude any influence of the sloping surface. The steady-state emptying condition is defined as the state at which there are no more substantial changes in the measured wall normal stresses. After the first test series it was apparent that varying the screw rotational speeds had no significant effect on the measured wall normal stresses. The rest of the investigations were therefore carried out at constant screw speed. As expected, however, the screw geometry and screw pairing were seen to have an effect. Each of the trials was ended when the measured wall normal stresses no longer changed with time.

The measured wall normal stresses in the steady-state emptying condition for extraction screws with constant flight pitch (test series 1) are shown in **Figure 13**. As shown in Figure 7, the front wall is the end at which the bulk material is extracted. The rear wall of the test silo is shown in the right. The wall normal stresses on the two side walls are also shown. The radii of the circles are proportional to the stresses. The centre point of each circle shows the respective positions of the stress measuring cells. The stress distribution for test series 1 can be reconstructed with the aid of the observed flow profiles (see Section 4.1). Uneven extraction of the bulk material was obtained for the extraction screws with constant flight pitch, as already described in Section 4.1. The flow profile for test series 1 shown in Figure 11 confirms the uneven extraction of bulk material. The convergent flow of bulk material in the rear part of the silo means that an effectively radial stress field is formed there. The moving bulk material is supported on the static bulk material and causes additional loading of the static bulk material. As a result, larger wall normal stresses are formed at the dead zones than at the moving zones [5, 8]. This relationship is reflected in the wall normal stresses. The bulk material is only extracted from the rear, so very small stresses are formed at the rear wall and the rear part of the two side walls. The wall normal stresses rise sharply in the direction of transport. The largest stresses occur at the lower part of the front wall. This is caused partly by the formation of dead zones, where the stresses are always larger than in moving regions. A second effect, however,

gemessenen Wandnormalspannungen nicht mehr wesentlich ändern. Nach den ersten Versuchsreihen zeigte sich, dass die Variation der Schneckendrehzahl keinen wesentlichen Einfluss auf die gemessenen Wandnormalspannungen hatte. Daher wurden die weiteren Untersuchungen mit einer konstanten Drehzahl durchgeführt. Erwartungsgemäß konnte jedoch ein Einfluss der Schneckengeometrien und Schneckenpaarung beobachtet werden. Die Versuche wurden jeweils beendet, wenn die gemessenen Wandnormalspannungen sich zeitlich nicht mehr weiter veränderten.

In **Bild 13** sind die gemessenen Wandnormalspannungen im stationären Entleerungszustand für die Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung (Versuchsreihe 1) dargestellt. In Anlehnung an Bild 7 ist die Vorderwand die Stirnseite, an der das Schüttgut ausgetragen wird. Rechts ist die Rückwand des Versuchssilos dargestellt. Die Wandnormalspannungen an den beiden Seitenwänden sind ebenfalls dargestellt. Dabei sind die Radien der Kreise proportional zu den Spannungen. Die Mittelpunkte der Kreise zeigen jeweils die Positionen der Spannungsmesszellen an. Die Spannungsverteilung lässt sich mithilfe der beobachteten Fließprofile (siehe Abschnitt 4.1) für die Versuchsreihe 1 nachvollziehen. Wie bereits in Abschnitt 4.1 dargestellt, ergab sich für die Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung ein ungleichmäßiger Schüttgutabzug. Das Fließprofil für die Versuchsreihe 1 in Bild 11 belegt den ungleichmäßigen Schüttgutabzug: Durch den konvergenten Schüttgutfluss im hinteren Silobereich bildet sich dort ein quasi radiales Spannungsfeld aus. Das bewegte Schüttgut stützt sich auf dem ruhenden Schüttgut ab; dadurch wird das ruhende Schüttgut zusätzlich belastet. Folglich bilden sich im Bereich toter Zonen größere Wandnormalspannungen aus als im Bereich der bewegten Zonen [5, 8]. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in den Wandnormalspannungen wider. Da der Schüttgutabzug ausschließlich von hinten erfolgt, bilden sich an der Rückwand und an dem hinteren Bereich der beiden Seitenwände sehr kleine Spannungen aus. In Förderrichtung steigen die Wandnormalspannungen stark an. Die größten Spannungen treten im unteren Bereich an der Vorderwand auf. Zum einen wird dies durch die ausgebildeten toten Zonen hervorgerufen, in denen die Spannungen immer größer sind als in bewegten Bereichen. Ein zweiter Effekt jedoch wird durch die Abzugschnecken hervorgerufen: Aufgrund des Kräftegleichgewichtes werden durch die Schneckenrotation in Förderrichtung wirkende Schubspannungen auf das über den Schnecken befindliche Schüttgut übertragen. Dadurch steigen in Förderrichtung die Wandnormalspannungen zunehmend an.



13 Wall normal stresses for extraction screws with constant pitch (screw geometry S1) – test series 1

Wandnormalspannungen für Abzugschnecke mit konstanter Flügelsteigung (Schneckengeometrie S1) – Versuchsreihe 1

is caused by the extraction screws. The equilibrium of forces means that shear stresses acting in the direction of transport due to the rotation of the screws are transmitted to the bulk material located above the screws. This causes the wall normal stresses to increase continuously in the direction of transport. The shear forces are governed by the transport angle, which is obtained through the pitch.

The measured wall normal stresses are shown in **Figure 14** for the steady-state emptying condition using extraction screws with progressive pitch (test series 4). As already described for the test series in the previous section, the stress distribution for the test series using extraction screws with progressive pitch can also be explained with the aid of the observed flow profiles (Fig. 12). It can be seen from the flow profile that the bulk material is extracted evenly over the entire length of the silo. This explains the more uniform stress distribution throughout the silo. This becomes particularly clear at the side walls in Figure 14. The measured wall normal stresses are of the same order of magnitude, especially in the two upper measuring levels.

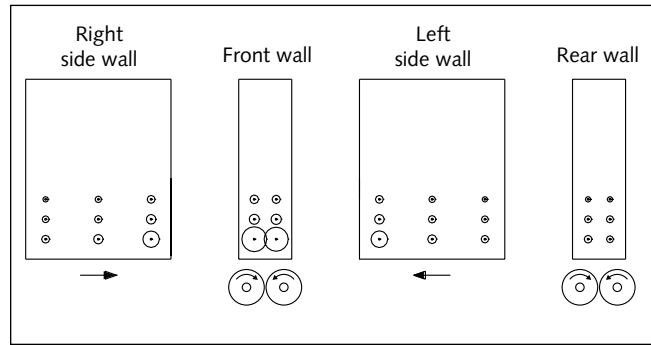
What cannot be explained by the flow profiles are the substantially higher wall normal stresses at the front wall and the front corners of the two side walls (Fig. 14). Although no dead zones are formed, progressively higher wall normal stresses than in the rear part of the silo occur in the direction of transport. This relationship can be explained by the shear stresses that act in the direction of transport due to the rotation of the screws. Because of the equilibrium of forces the shear stresses acting in the direction of transport due to the rotation of the screws are transmitted to the bulk material located above the screws. This causes the wall normal stresses to increase continuously in the direction of transport. The shear forces are governed by the transport angle, which is obtained through the pitch. The dimensionless wall normal stress S is shown below as a function of distance from the front wall. Only the lowest level of measuring cells is taken into account. The dimensionless normal stress S is defined as follows:

$$S = \frac{\sigma_w}{\sigma_f} \quad (1)$$

where:

σ_w = wall normal stress in the steady-state emptying condition

σ_f = wall normal stress in the filling state



14 Wall normal stresses for extraction screws with progressive pitch (screw geometry S2) – test series 4

Wandnormalspannungen für Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung (Schneckengeometrien S2) – Versuchsreihe 4

Die Scherkräfte bilden sich entsprechend dem Förderwinkel aus, welcher sich durch die Flügelsteigung ergibt.

In **Bild 14** sind die gemessenen Wandnormalspannungen im stationären Entleerungszustand für die Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung (Versuchsreihe 4) wiedergegeben. Wie bereits bei den Versuchsreihen im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, lässt sich auch bei den Versuchsreihen mit Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung die Spannungsverteilung unter Zuhilfenahme der beobachteten Fließprofile (Bild 12) erklären. Dem Fließprofil kann man entnehmen, dass der Schüttgutabzug gleichmäßig über die gesamte Silolänge erfolgt. Dies erklärt die gleichmäßigere Spannungsverteilung im gesamten Silo. Besonders deutlich wird dies an den Seitenwänden in Bild 14. Insbesondere in den oberen beiden Messebenen liegen die gemessenen Wandnormalspannungen in derselben Größenordnung.

Was nicht mit den Fließprofilen erklärt werden kann, sind die wesentlich höheren Wandnormalspannungen an der Vorderwand und den vorderen Ecken der beiden Seitenwände (Bild 14). Obwohl sich keine toten Zonen bilden, treten in Förderrichtung zunehmend höhere Wandnormalspannungen als im hinteren Silobereich auf. Dieser Zusammenhang lässt sich mit den durch die Schneckenrotation in Förderrichtung wirkenden Schubspannungen erklären. Aufgrund des Kräftegleichgewichtes werden durch die Schneckenrotation in Förderrichtung wirkende Schubspannungen auf das über den Schnecken befindliche Schüttgut übertragen. Dadurch steigen in Förderrichtung die Wandnormalspannungen zunehmend an. Die Scherkräfte bilden sich entsprechend dem Förderwinkel aus, welcher sich durch die Flügelsteigung ergibt. Nachfolgend ist die dimensionslose Wandnormalspannung S in Abhängigkeit vom Abstand zur Vorderwand aufgetragen. Dabei wird nur die unterste Messzellenebene betrachtet. Die dimensionslose Normalspannung S ist wie folgt definiert:

$$S = \frac{\sigma_w}{\sigma_f} \quad (1)$$

mit:

σ_w = Wandnormalspannung im stationären Entleerungszustand

σ_f = Wandnormalspannung im Füllzustand

In **Bild 15** sind die dimensionslosen Wandnormalspannungen der Versuchsreihen 1 und 4 gegenübergestellt. Die horizontale Gerade, die die Ordinate bei dem Wert 1 schneidet, ent-

The dimensionless wall normal stresses for test series 1 and 4 are compared in **Figure 15**. The horizontal straight line, which intersects the ordinate at the value 1, corresponds to the filling state. The values at distances 0 mm and 1500 mm correspond to the wall normal stresses at the front wall and rear wall respectively. By referring the stress values to the filling state it can be seen clearly from Figure 15 that the bulk material is extracted from the rear. In test series 1, i. e. using extraction screws with constant pitch, the wall normal stresses drop to values that are about 50 % below the wall normal stresses in the filling state. The wall normal stresses increase again with decreasing distance from the front wall and at both side walls eventually reach about 2.5-times the stresses in the filling state. At the front wall the wall normal stresses in the steady-state emptying condition are actually 3.25-times the stresses in the filling state.

The dimensionless wall normal stress for test series 4 basically follows a similar pattern. The difference, however, is that the stress curve is flatter from back to front. In the rear part of the silo the stresses do not drop as far as in test series 1. In fact the wall normal stress in the steady-state emptying condition remains at virtually the same order of magnitude as the stress in the filling state. As already explained, this is because with extraction screws with constant pitch an effectively radial stress field (passive stress state) is obtained in the rear part of the silo. For the extraction screws with progressive pitch the bulk material is extracted over the entire length of the silo. No passive stress state is obtained and the active stress state is retained even during extraction of the bulk material.

4.3 Characteristic torque curve

When dimensioning silo extraction systems the determination of the size of the drive is the most important criterion alongside the consideration of the process engineering aspects. The determining parameters when selecting the drive are the rotational speed and the torque. The rotational speed is dictated by the process engineering requirements, but the requisite torque is a parameter that is specific to the plant and the bulk material. All the torque curves shown exhibit basically the same features. After the extraction screw has been switched on the torque rises directly to the maximum value and then drops immediately again to a lower, steady-state, value. During the rest of the test period the torque remains close to this steady-state value (**Figs. 16, 17**). The initial torque peak is termed the start-up torque and characterizes the peak value when the plant is started up or switched on. The start-up torque is usually given as a multiple of the subsequent, ideally constant, torque:

$$\chi_{S/A} = \frac{M_{\text{start-up}}}{M_{\text{average}}} \quad (2)$$

The start-up torque phenomenon has also been observed by Schumacher [23] and Bortolamasi & Fottner [24]. As explained by Schwedes and Schulze [6], the reason lies essentially in the changeover from active to passive stress state that occurs during the first start-up after the filling. The greatest vertical stress σ_v occurs after a silo has been filled, as explained in [13] for a silo with cone. After the emptying has started the active stress state that is present changes over to the passive stress state and the vertical stress at the outlet cross-section drops abruptly. There is a corresponding abrupt drop in the extraction force F_h for the extraction device, which initially has to overcome the large vertical stress after the filling. The start-up peak can be as much as 10-times the steady-state value [5, 6]. This changeover is due

spricht dem Füllzustand. Die Werte bei den Abständen 0 mm bzw. 1500 mm entsprechen den Wandnormalspannungen an der Vorder- bzw. Rückwand. Durch den Bezug der Spannungswerte auf den Füllzustand geht aus Bild 15 anschaulich hervor, dass das Schüttgut von hinten abgezogen wird. Bei der Versuchsreihe 1, d. h. Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung, sinken die Wandnormalspannungen auf Werte ab, welche etwa 50 % unterhalb der Wandnormalspannungen im Füllzustand liegen. Mit abnehmendem Abstand zur Vorderwand nehmen die Wandnormalspannungen wieder zu und erreichen an den beiden Seitenwänden schließlich das ca. 2,5-fache der Spannungen im Füllzustand. An der Vorderwand liegen die Wandnormalspannungen im stationären Entleerungszustand sogar bei dem 3,25-fachen.

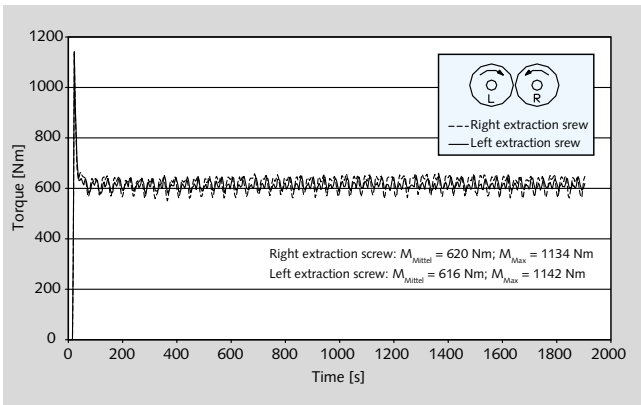
Für die Versuchsreihe 4 verläuft die dimensionslose Wandnormalspannung grundsätzlich ähnlich. Abweichend fällt jedoch auf, dass der Spannungsverlauf von hinten nach vorne flacher ist: Im hinteren Silobereich sinken die Spannungen nicht so stark ab wie bei der Versuchsreihe 1. Vielmehr verbleibt die Wandnormalspannung im stationären Entleerungszustand nahezu in der Größenordnung der Spannung im Füllzustand. Wie bereits erläutert, ist dies darauf zurückzuführen, dass sich bei den Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung im hinteren Silobereich quasi ein radiales Spannungsfeld einstellt (passiver Spannungszustand). Bei den Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung wird das Schüttgut über die gesamte Silolänge abgezogen. Es stellt sich kein passiver Spannungszustand ein, sondern der aktive Spannungszustand bleibt auch während des Schüttgutabzuges erhalten.

4.3 Drehmomentcharakteristik

Bei der Dimensionierung von Siloaustragsystemen ist neben der Berücksichtigung der verfahrenstechnischen Aspekte die Bestimmung der Größe des Antriebes das wichtigste Kriterium. Bei der Auswahl des Antriebes sind die Drehzahl und das Drehmoment die bestimmenden Kenngrößen. Während sich die Drehzahl aus den verfahrenstechnischen Erfordernissen ergibt, ist das erforderliche Drehmoment eine anlagen- und schüttgutspezifische Kenngröße. Sämtliche aufgezeichnete Drehmomentverläufe weisen grundsätzlich die gleichen Merkmale auf: Das auftretende Drehmoment steigt nach dem Einschalten der Abzugschnecke direkt auf einen Maximalwert an und fällt dann sofort auf einen tiefer liegenden, stationären Wert wieder ab. Während der restlichen Versuchsdauer verbleibt das Drehmoment praktisch auf diesem stationären Wert (**Bilder 16, 17**). Die anfängliche Drehmomentenspitze wird als Anfahr-drehmoment bezeichnet und kennzeichnet den Peak beim Anfahren oder Einschalten. Üblicherweise wird das Anfahr-drehmoment als Vielfaches vom anschließenden, idealerweise konstanten Drehmoment angegeben:

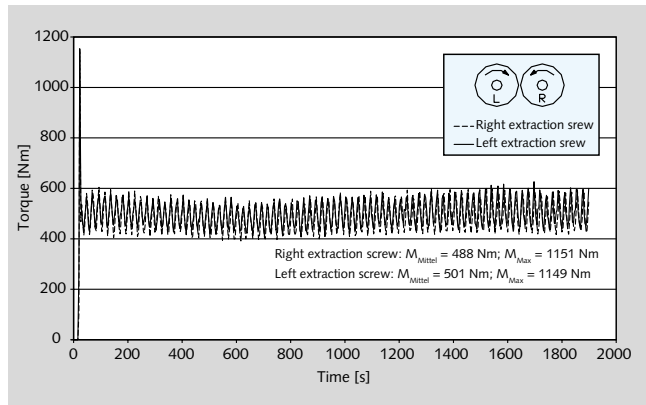
$$\chi_{A/M} = \frac{M_{\text{Anfahr}}}{M_{\text{Mittel}}} \quad (2)$$

Das Phänomen des Anfahr-drehmomentes wurde auch von Schumacher [23] und Bortolamasi und Fottner [24] beobachtet. Die Ursache liegt, wie von Schwedes und Schulze [6] erläutert, im Wesentlichen im Umschlag vom aktiven in den passiven Spannungszustand begründet, welcher beim ersten Anfahren nach dem Befüllen auftritt. Wie in [13] für einen Silo mit Trichter erläutert, liegen nach dem Befüllen eines Silos die größten Vertikalspannungen σ_v vor. Nach Beginn des Entleerens schlägt der vorliegende aktive Spannungszustand in den



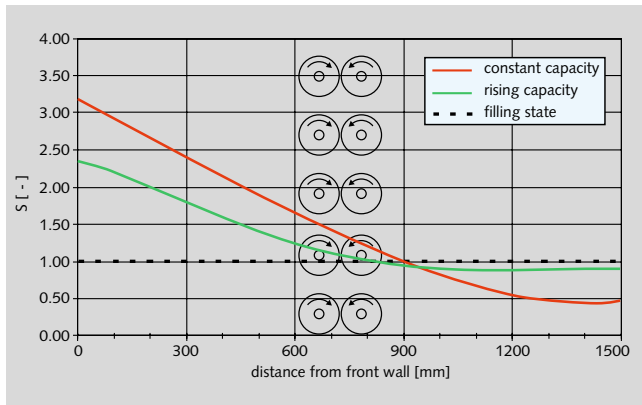
16 Torque curves for test series 1 (extraction screws with constant pitch)
Drehmomentverläufe für die Versuchsreihe 1 (Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung)

to the transition from the active to the passive stress field and therefore always occurs in silos with conical bases. There is actually no cone in the rectangular test silo used but, as explained above, there is a convergent flow of bulk material in the rear part of the silo when using extraction screws with constant pitch, so that the bulk material forms a cone there. This also explains the increased start-up torque for the extraction screws with constant pitch (test series 1 to 3) when compared with steady-state operation. An oscillation, which is caused by the high measurement rate, is superimposed on the torque curve (Fig. 16). This superimposed oscillation is a result of the rotation of the extraction screws. Tests with different rotational speeds confirm that the frequency is directly proportional to the screw rotational speed. Figure 16 shows the torque curve for test series 1, i.e. when the two extraction screws with constant pitch rotate towards the centre. The short-term torque peak after the start-up and the subsequent drop in torque to a steady-state value are clearly recognizable. If the start-up torque is correlated with the average, steady-state, torque then a value of 1.83-times the steady-state torque is obtained for the right-hand extraction screw and 1.85-times for the left-hand extraction screw. If the steady-state torque is correlated with the start-up torque then values of 55 % and 54 % respectively are obtained for the steady-state torques of the two extraction screws. The torque curves for test series 4, using extraction screws with progressive pitch, are shown in Figure 17. The two extraction screws rotate towards the centre. Torque peaks can also be detected here at the start, followed by a drop to steady-state torques. These torque peaks are attributable to the initial changeover from the active to the passive stress state in the same way as for the explanations given above for the extraction screws with constant pitch. The superimposed oscillations that also occur and are caused by the rotation of the extraction screws each exhibit relatively large amplitudes and, as with test series 1, are in phase with each other. The relatively large amplitudes are attributable to the vertical movement of the bulk material in the extraction screws over the entire length of the silo. The symmetrical loading of the two extraction screws leads to virtually identical values. The start-up torque of the right-hand extraction screw is 2.36-times its steady-state torque and that of the left-hand extraction screw is 2.29-times its steady-state torque. If the steady-state torque is correlated with the start-up torque then values of 42.4 % and 43.6 % respectively are obtained for the steady-state torques of the two extraction screws.



17 Torque curves for test series 4 (extraction screws with progressive pitch)
Drehmomentverläufe für die Versuchsreihe 4 (Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung)

passiven Spannungszustand um und die Vertikalspannung im Auslaufquerschnitt fällt schlagartig ab. Entsprechend sinkt die Abzugskraft F_h für das Austragorgan, die zunächst die große Vertikalspannung nach dem Füllen überwinden muss, schlagartig ab. Die Anfahrspitze kann bis zum 10-fachen des stationären Wertes betragen [5, 6]. Dieser Umschlag ist durch den Übergang vom aktiven in das passive Spannungsfeld bedingt und tritt somit immer bei Silos mit trichterförmigem Unterteil auf. Zwar ist bei dem verwendeten rechteckigen Versuchssilo grundsätzlich kein Trichter vorhanden. Wie jedoch oben erläutert, ergibt sich bei den Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung ein konvergenter Schüttgutfluss im hinteren Silobereich, sodass sich dort ein schüttgutbedingter Trichter einstellt. Damit ist auch bei den Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung (Versuchsreihen 1 bis 3) das gegenüber dem stationären Betrieb erhöhte Anfahr Drehmoment zu erklären. Der Drehmomentkurve ist eine Schwingung überlagert (Bild 16), die durch die hohe Messrate bedingt ist. Diese überlagerte Oberschwingung resultiert aus der Drehung der Abzugschnecke. Versuche mit unterschiedlichen Drehzahlen belegen, dass die Frequenz direkt proportional zur Schneckendrehzahl ist. In Bild 17 ist der Drehmomentverlauf für die Versuchsreihe 1 dargestellt, das heißt wenn beide Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung zur Mitte drehen. Man kann deutlich die kurzzeitige Drehmomentspitze nach dem Anfahren und den anschließenden Drehmomentabfall auf einen stationären Wert erkennen. Bezieht man das Anfahr Drehmoment auf das mittlere, stationäre Drehmoment, so erhält man für die rechte Abzugschnecke das 1,83-fache vom stationären Drehmoment und für die linke Abzugschnecke das 1,85-fache. Bezieht man das stationäre Drehmoment auf das Anfahr Drehmoment, so ergeben sich für die stationären Drehmomente der beiden Abzugschnecken Werte von 55 % bzw. 54 %. In Bild 17 sind die Drehmomentverläufe für die Versuchsreihe 4, Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung, dargestellt. Beide Abzugschnecken drehen zur Mitte. Auch hier sind Drehmomentspitzen zu Beginn und ein anschließender Abfall auf stationäre Drehmomente festzustellen. Diese Drehmomentspitzen sind, adäquat zu den oben aufgeführten Erläuterungen für die Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung, auf den anfänglichen Umschlag vom aktiven in den passiven Spannungszustand zurückzuführen. Die ebenfalls auftretenden Oberschwingungen, verursacht durch die Rotation der Abzugschnecken, weisen jeweils relativ große Amplituden auf und verlaufen, wie auch bei der Ver-



15 Dimensionless stress S as a function of the distance from the front wall for test series 1 and 4
 Dimensionslose Spannung S als Funktion des Abstandes zur Vorderwand für die Versuchsreihen 1 und 4

Comparison of the torque curves in Figures 16 and 17 leads to the following conclusions:

- If funnel flow is present (test series 1), then the steady-state torques are larger than for mass flow (test series 4)
- The large amplitudes of the superimposed oscillations for mass flow are attributable to the fact that the shearing at the screw flight/outlet edge area is subject to greater fluctuations when the bulk material flows into this area from above
- The differences between mass flow and funnel flow are greater when the silo consists of a vertical shaft and cone and/or if the working length of the screw is greater [18]

5 Conclusions

Experimental investigations were carried out with a rectangular silo as part of this work. The focus was on the stress states during emptying by two silo extraction screws and the relationships between the wall normal stresses, the flow profiles and the requisite torques of the extraction screws. Series of tests were carried out in the test silo using different extraction screws. Extraction screws with and without progression in the direction of transport were used, in which the progression was obtained by changing the pitch. The direction of rotation of the extraction screws in the test series was also varied. At first the two extraction screws both rotated towards the centre and then they both rotated towards the outside. For the extraction screws with constant pitch a test series was also carried out with both extraction screws rotating in the same direction. When determining the flow profiles it was established that for the extraction screws with constant pitch the bulk material was, as expected, extracted almost exclusively from the rear. The convergent bulk material flow observed in the rear part of the silo corresponds to the classical funnel flow profile and is independent of the direction of rotation of the extraction screws. The direction of rotation of the extraction screws only affects the bottom part of the silo. With the extraction screws with progressive pitch the bulk material was extracted over the entire length of the silo, thereby ensuring mass flow.

In agreement with the measured flow profiles it was established that the wall normal stresses are lower in the moving zones than in the static zones. For the extraction screws with constant

suchsreihe 1, phasengleich. Die relativ großen Amplituden sind auf die vertikale Schüttgutbewegung in die Abzugschnecken über die gesamte Silolänge zurückzuführen. Die symmetrische Belastung beider Abzugschnecken führt zu nahezu identischen Werten. Das Anfahrtdrehmoment der rechten Abzugschnecke beträgt das 2,36-fache und das der linken Abzugschnecke das 2,29-fache vom jeweiligen stationären Drehmoment. Bezieht man das stationäre Drehmoment auf das Anfahrtdrehmoment, so ergeben sich für die stationären Drehmomente der beiden Abzugschnecken Werte von 42,4 % bzw. 43,6 %.

Ein Vergleich der Drehmomentverläufe in den Bildern 16 und 17 führt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Liegt Kernfluss vor (Versuchsreihe 1), sind die stationären Drehmomente größer als bei Massenfluss (Versuchsreihe 4)
- Die größeren Amplituden der Oberschwingungen bei Massenfluss sind darauf zurückzuführen, dass das Abscheren im Bereich der Schneckenflügel/Austrittskante größeren Schwankungen unterliegt, wenn in diesem Bereich Schüttgut von oben nachfließt
- Die Unterschiede zwischen Massenfluss und Kernfluss werden größer ausfallen, wenn das Silo aus vertikalem Schaft und Trichter besteht und/oder wenn die Eingriffslänge der Schnecken größer ist [18]

5 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen an einem rechteckigen Silo durchgeführt. Im Vordergrund standen die Spannungszustände beim Entleeren mittels zweier Siloabzugschnecken sowie die Zusammenhänge zwischen den Wandnormalspannungen, den Fließprofilen und den erforderlichen Drehmomenten für die Abzugschnecken. Am Versuchssilo wurden Versuchsreihen mit verschiedenen Abzugschnecken durchgeführt. Es wurden Abzugschnecken ohne und mit Progression in Förderrichtung eingesetzt, wobei die Progression durch die Veränderung der Flügelsteigung bewirkt wurde. Des Weiteren wurde in den Versuchsreihen die Drehrichtung der Abzugschnecken variiert. Zum einen drehten die Abzugschnecken beide zur Mitte hin, zum anderen drehten beide Abzugschnecken nach außen. Zusätzlich wurde mit den Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung eine Versuchsreihe mit gleichsinnig drehenden Abzugschnecken durchgeführt. Bei der Ermittlung der Fließprofile konnte festgestellt werden, dass bei den Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung das Schüttgut erwartungsgemäß nahezu ausschließlich von hinten abgezogen wird. Der zu beobachtende konvergente Schüttgutfluss im hinteren Silobereich entspricht dabei dem klassischen Kernflussprofil und ist unabhängig vom Drehsinn der Abzugschnecken. Der Drehsinn der Abzugschnecken wirkt sich erst im unteren Silobereich aus. Bei den Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung erfolgt der Schüttgutabzug über die gesamte Silolänge, womit Massenfluss gewährleistet ist.

Übereinstimmend mit den ermittelten Fließprofilen konnte für die auftretenden Wandnormalspannungen festgestellt werden, dass in bewegten Zonen die Wandnormalspannungen niedriger ausfallen als in ruhenden Zonen. Für die Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung, bei denen der Schüttgutabzug hauptsächlich im hinteren Bereich des Silos erfolgt, ist dies mit dem sich dort ausbildenden radialen Spannungsfeld zu erklären.

pitch, with which the bulk material is extracted mainly from the rear part of the silo, this can be explained by the radial stress field that is formed there. The moving bulk material is supported on the static bulk material and therefore causes additional loading on the static bulk material. Rising wall normal stresses in the direction of transport were observed for all test series. Shear stresses acting in the direction of rotation are transferred to the bulk material above the screws by the rotation of the screws. This causes a progressive increase in the wall normal stresses in the direction of rotation. The shear forces acting at the outer circumference of the extraction screws are formed in accordance with the transport angle (determined by the pitch). As a result the direction of rotation of the extraction screws has an influence on the stress distribution in the front part of the silo.

Qualitative und quantitative information about the increases in stress in the test silo caused by the extraction by the two extraction screws were derived from the measurements of the wall normal stresses in the test silo. The expected stress changes caused by the extraction are shown qualitatively in [18] for other silo geometries. During the determination of the torques it was shown that the extraction screws with constant pitch, which cause funnel flow, basically require a higher torque than the extraction screws with progressive pitch that lead to mass flow. A dependence on the direction of rotation was also established for all extraction screws. The extraction screws rotating towards the centre required higher torques than the extraction screws rotating towards the outside.

Further investigations have already been carried out with other bulk materials. In particular, the investigations included bulk materials with poor flow characteristics, such as sewage sludge and secondary fuels that had been processed in different ways. The findings and relationships obtained can be applied reliably to industrial plants.

Das bewegte Schüttgut stützt sich auf dem ruhenden Schüttgut ab und belastet somit dort das ruhende Schüttgut zusätzlich. Für alle Versuchsreihen konnten in Förderrichtung steigende Wandnormalspannungen beobachtet werden. Durch die Schneckenrotation werden in Förderrichtung wirkende Schubspannungen auf das über den Schnecken befindliche Schüttgut übertragen. Dadurch steigen, in Förderrichtung zunehmend, die Wandnormalspannungen an. Die dabei am Außenumfang der Abzugschnecken wirkenden Scherkräfte bilden sich entsprechend dem Förderwinkel (bestimmt durch die Flügelsteigung) aus. Folglich beeinflusst die Drehrichtung der Abzugschnecken die Spannungsverteilung im vorderen Silobereich.

Die Messungen der Wandnormalspannungen am Versuchssilo erlauben qualitative und quantitative Aussagen über die Spannungserhöhungen im Versuchssilo, die durch den Abzug über die beiden Abzugschnecken bedingt wird. Für andere Silogeometrien sind in [18] die zu erwartenden Spannungsveränderungen durch den Abzug qualitativ aufgezeigt. Bei der Ermittlung der Drehmomente konnte aufgezeigt werden, dass die Abzugschnecken mit konstanter Flügelsteigung, die Kernfluss verursachen, grundsätzlich ein höheres Drehmoment benötigen als die Abzugschnecken mit progressiver Flügelsteigung, die zu Massenfluss führen. Weiterhin konnte bei allen Abzugschnecken eine Abhängigkeit von der Drehrichtung festgestellt werden. Die zur Mitte drehenden Abzugschnecken erfordern höhere Drehmomente als die nach außen drehenden Abzugschnecken.

Weitere Untersuchungen mit anderen Schüttgütern wurden bereits durchgeführt. Dabei wurden insbesondere schwer fließende Schüttgüter wie beispielsweise unterschiedlich aufbereitete Sekundärbrennstoffe und Klärschlämme untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse und Zusammenhänge ermöglichen eine zuverlässigere Übertragung auf Industrieanlagen.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Janssen, H. A.: Versuche über den Getreidedruck in Silozellen, VDI-Z. 39 (1895), pp. 1045.
- [2] Jenike, A. W.: Gravity flow of bulk solids, Bulletin No. 108, Utah Eng. Exp. Station, Univ. of Utah, Salt Lake City, 1961.
- [3] Jenike, A. W.: Storage and flow of solids, Bulletin No. 123, Utah Eng. Exp. Station, Univ. of Utah, Salt Lake City, 1964.
- [4] Schwedes, J.: Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern, Verlag Chemie, Weinheim (1968)
- [5] Schulze, D.: Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragorgan, Dissertation, TU Braunschweig (1991).
- [6] Schwedes, J.; Schulze, D.: Lagern von Schüttgütern, H. Schubert (Hrsg.), Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik, Band 2, Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2003), pp. 1137–1253
- [7] Motzkus, U.: Belastung von Siloböden und Auslaufrichtern durch körnige Schüttgüter, Dissertation, TU Braunschweig (1974).
- [8] Hampe, E.: Silos, Band 1 (Grundlagen), VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1987).
- [9] Schwedes, J.: Fließigenschaften von Schüttgütern, P. Martens (Hrsg.), Wilms, H.: Silo-Handbuch, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin (1988), pp. 39–58.
- [10] Hoormann, W.: Zuteiler für Zerkleinerungsmaschinen, Aufbereitungstechnik Nr. 8 (1966), S. 510–523.
- [11] Reisner, W. v. Eisenhart; Rothe, M.: Silos und Bunker für die Schüttgutspeicherung, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld (1971).
- [12] Breucker, T.: Volumetrische Dosiergeräte, technische Mitteilungen 77. Jahrgang Heft 12 (1984).
- [13] Mazza, M.: Bunkerabzugsvorrichtungen, Deutsche Hebe- und Fördertechnik 8 (1961) 5, pp. 208–212.
- [14] Möller, H.: Siloabzug und lose Verladung von staubförmigem und feinkörnigem Schüttgut, Aufbereitungstechnik 6 (1965) 2, pp. 65–72.
- [15] John, P.: Neue Austragvorrichtungen zum Dosieren von Schüttgut in Aufbereitungsanlagen, Aufbereitungstechnik 6 (1965) 9, S. 536–543.
- [16] Reed, A. R.: A review of hopper discharge aids, Bulk solids handling 3. Duffell, C. H. (1983) 1, pp. 149–156.
- [17] Kaldenhoff, M.: Schäden an Silos mit großen Entleerungsexzentrizitäten, Schütte, J., Bauingenieur, Band 79 (2004), pp. 560–567.
- [18] Di Matteo, Luigi: Austragverhalten von Doppelschnecken aus einem Silo, Dissertation, TU Braunschweig (2006).
- [19] Hardow, B.: Spannungsschwankungen im Schüttgut beim Entleeren in einem Silo, Dissertation, TU Braunschweig (1999).
- [20] Schulze, D.: Fließigenschaften von Schüttgütern und verfahrenstechnische Siloauslegung [online], erhältlich im Internet unter: <http://www.dietmar-schulze.de/fr.html>, Dokument „Dr_Dietmar Schulze_powtvd“, PDF-Format [Stand: 28.10.2005].
- [21] Geißler, D.: Untersuchungen zum Schüttgutaustrag aus einem Bunker mittels Schneckenförderer, Dissertation, Dresden (1973).
- [22] Strusch, J.: Wandnormalspannungen in einem Silo mit Einbauten und Kräfte auf Einbauten, Dissertation, TU Braunschweig (1996).
- [23] Schumacher, W.: Zum Förderverhalten von Bunkerabzugschnecken mit Vollblattwendeln, Dissertation, RWTH Aachen (1987).
- [24] Bortolamasi, M., Fottner, J.: Design and sizing of screw feeders, International congress, for particle technology PARTEC, Nürnberg, 2001.