

Silohupen – Ein nicht alltägliches, dafür aber sehr interessantes, akustisches Phänomen

Korbinian Grüner¹, Helmut Venghaus²

¹ ACCON GmbH, Gewerbering 5, 86926 Greifenberg, Germany, E-Mail: korbinian.gruener@accon.de

² ACCON GmbH, Gewerbering 5, 86926 Greifenberg, Germany, E-Mail: helmut.venghaus@accon.de

Einleitung

Dünnwandige Silos können bei der Materialentnahme von bestimmten Schüttgütern dadurch auffallen, dass sie durch einen kurzzeitigen, jedoch sehr intensiven Hupton – ähnlich einer Lkw-Hupe – die Nachbarschaft belästigen. Diese hörbaren Schwingungen werden im Allgemeinen als Silohupen bezeichnet und können im Abstand von 12 m zur Aussenhaut des Silos Schallpegel in Höhe von bis zu 105 dB(A) erzeugen. Im Folgenden sollen mögliche Ursachen, eigene Erfahrungen aus messtechnischen Untersuchungen sowie Lösungsvorschläge zur Geräuschvermeidung vorgestellt werden.

Ursachen für Silohupen

Verursacht wird das Silohupen durch dynamische Effekte, welche bei Entnahme des Schüttgutes auftreten können. Dabei kann es durch Schüttgutfluss im Silo zu einer Wechselwirkung mit der Silostruktur kommen. Das Material erfährt bei Entnahme ein schlagartiges Fließen und Abbremsen, oftmals nur in einem Teilbereich der Schüttgutfüllung. Insbesondere beim Abbremsen des Schüttgutes kommt es je nach Masse des abzubremsenden Materials durch die nach unten wirkende Trägheitskraft zur Wechselwirkung mit der Silowand. Grundsätzlich gilt, dass in größeren Silos und höheren Füllständen des Silos während der Materialentnahme Schwankungen im Massenfluß entstehen, bei dem größere Massen beschleunigt und abgebremst werden müssen, weshalb dann stärkere Erschütterungen auftreten.

Der sogenannte Stick-Slip-Effekt¹ (selbsterregte Reibschwingung der Wand des Siloschaftes mit dem Schüttgut) kann ebenfalls Silohupen verursachen. Die Reibung nimmt dabei mit zunehmender Relativgeschwindigkeit ab (Gleitreibung kleiner als Haftreibung). Dabei kommt es zu einer ruckartigen Entlastung. Wird die Silostruktur dabei zu Schwingungen in ihrer Eigenfrequenz angeregt, kann sich ein kurzzeitiges, abklingendes Hupgeräusch ergeben. Auch Schwingungen der oberhalb des Schüttgutes befindlichen Luftsäule können eine Ursache für Silohupen sein. Hierbei wird die Luftsäule durch das ruckartige Absinken der Schüttgutoberfläche angeregt. Die Frequenz der hörbaren Luftschwingungen entspricht der Resonanzfrequenz der Luftsäule oberhalb der

Schüttgutoberfläche und ist demnach von der Füllhöhe abhängig.

Beim pulsierenden Fließen im Schüttgut kommt es zur Bildung von Scherzonen innerhalb des Schüttgutes (s. Bild 1). Als Folge ergeben sich Ungleichmäßigkeiten im Fließprofil und es bilden sich Zonen mit geringerer und höherer Dichte. Beim Überschreiten einer kritischen Spannung kommt es zu einer ruckartigen Beschleunigung und Abbremsen der Masse, deren Trägheitskraft und negative Beschleunigung auf die Silostruktur wirkt und so das Silo zum Schwingen anregt.

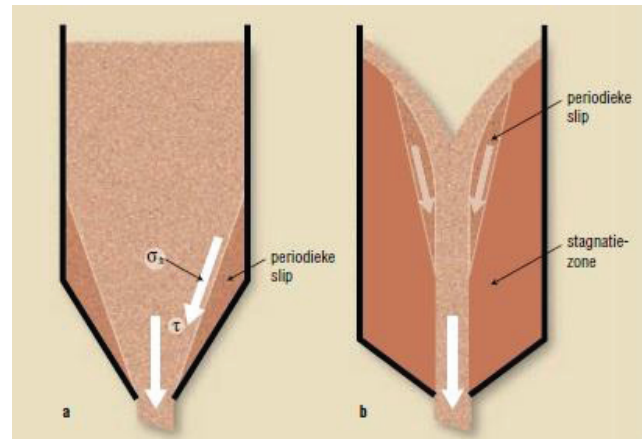


Bild 1: Darstellung unterschiedlicher Scherzonen in Silos, Quelle [1]

Der Stick-Slip-Effekt ist vergleichbar mit dem sägezahnartigen Oszillieren der Scherspannung (s. Bild 2). Voraussetzung hierfür ist, dass das System Schwingungen zulassen und elastische Energie speichern kann. Desweiteren muss die Reibung mit zunehmender Relativgeschwindigkeit abnehmen [3], damit ein Stick-Slip-Effekt auftreten kann. Man kann zwischen einem inneren Stick-Slip-Effekt (Wechselwirkung der Teilchen untereinander) und dem Wand-Stick-Slip-Effekt (Wechselwirkung zwischen Teilchen und Silowand) unterscheiden. Einflussgrößen auf den Effekt sind der Spannungszustand, die Schergeschwindigkeit, der Oberflächenzustand des Wandmaterials, die Schüttgutvorgeschichte (Zeitverfestigung), die Schüttguteigenschaften (Form, Partikelrauheit, Fließeigenschaften u.a.) und die Umgebung (Temperatur, Luftfeuchte etc.) [3].

¹ Der Effekt beruht darauf, dass sich zwei Oberflächen verhaken (stick) und es nach Überschreiten einer kritischen Spannung zu einer ruckartigen Entlastung (slip) kommt.

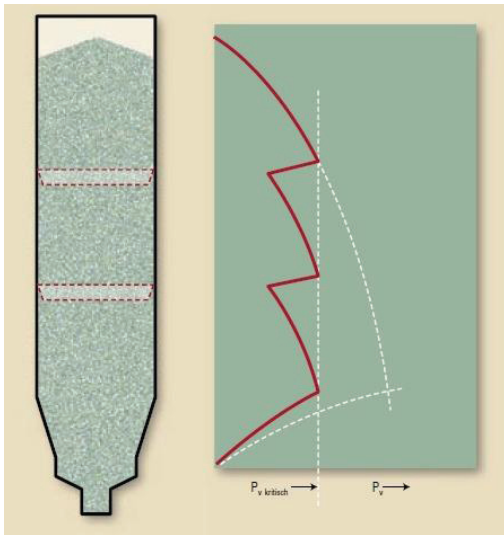


Bild 2: Sägezahnartige Oszillation beim Stick-Slip-Effekt, Quelle [1]

Eigene Untersuchungen zum Silohupen

Im Kundenauftrag wurden an einem ausgewählten Silo, bei welchem Silohupen auftritt, messtechnische Untersuchungen zum besseren Verständnis und zur Entwicklung von Lösungsansätzen zur Vermeidung von Silohupen durchgeführt. Hierzu wurden an der Siloaußenwand acht Beschleunigungsaufnehmer in vertikaler Richtung zur Ortung der Erschütterungsquelle montiert sowie zwei Messmikrofone zur Erfassung des Luftschalls in unterschiedlicher Höhe im Nahbereich aufgebaut. Schall- und Schwingungsmessungen erfolgten bei Materialentnahme mit einer Füllstandshöhe des Silos von ca. 85 % bis ca. 60 %. Nach Angaben des Silobetreibers tritt außerhalb dieses Füllstandsbereiches kein Hupen auf. Während der Untersuchungen zeigte sich, dass Hupengeräusche überwiegend im Füllstandsbereich von 75 % bis 70 % auftreten (s. Bild 3).

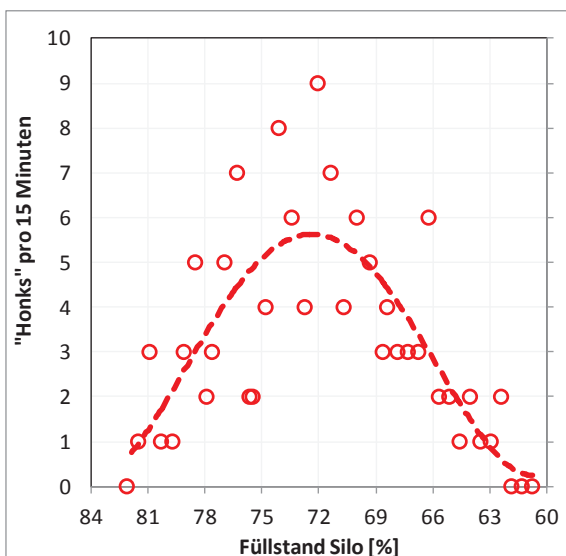


Bild 3: Häufigkeit Silohupen in Abhängigkeit der Füllstandshöhe

Die mit Beschleunigungsaufnehmern erfassten Messdaten zeigen, dass die Quelle der Erschütterungen im Bereich des Übergangs vom Schaft zum Trichter anzusiedeln ist und sich von dort nach oben hin ausbreitet. Im Bereich der Luftsäule treten hierbei erwartungsgemäß die höchsten Schwingamplituden auf, da die Aussenhaut des Silos in diesem Bereich die geringste Dämpfung wegen des fehlenden Schüttguts erfährt (s. Bild 4).

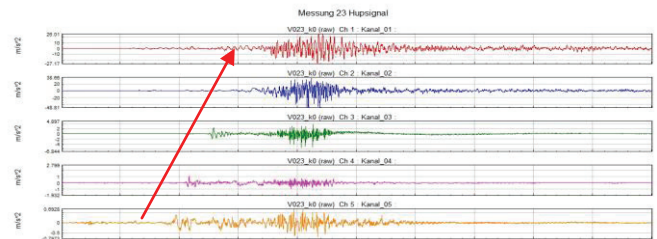


Bild 4: Pegel-Zeit-Verlauf Hupesignal an unterschiedlichen Messpositionen

Das dargestellte Frequenzspektrum der Messmikrofone zeigt deutliche Pegelspitzen bei ca. 100 Hz, 200 Hz und 300 Hz (s. Bild 5). Berechnungen zu den Biegeeigenfrequenzen und der Ringdehnfrequenz des Silos (Zylinder) sowie deren harmonischen Oberwellen zeigen hierzu sehr gute Übereinstimmungen. Bei der Überlagerung der Biegeeigen- und Ringdehnfrequenz kommt es zu überhöhten Schwingungen am Silomantel (Resonanzfall).

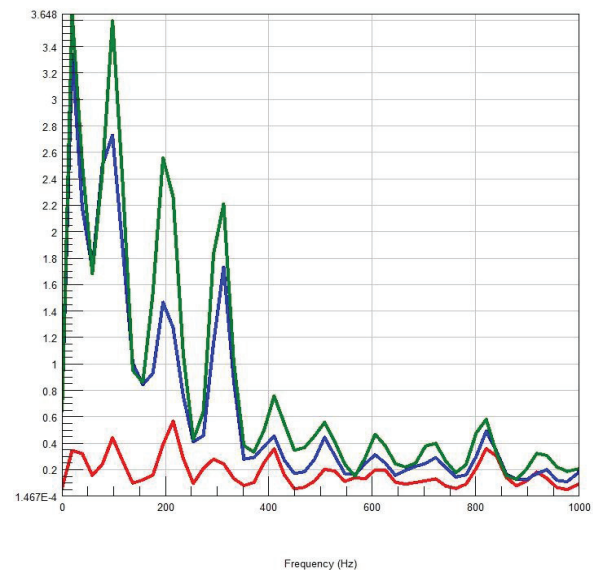


Bild 5: Frequenzspektrum Hupesignal Messmikrofone 1 + 2 und Beschleunigungsaufnehmer

Aus den Messdaten wird ersichtlich, dass sich die Erschütterungswellen vom Übergang Schaft-Trichter nach oben hin ausbreiten. Da kein kontinuierlicher Fließvorgang stattfindet, kommt es innerhalb des Schüttgutes zu Zonen höherer und geringerer Dichte. Infolgedessen rutscht das Schüttgut daraufhin stoßweise nach. Daraus resultiert auf Grund der Reibungskräfte zwischen Silowand und Schüttgut ein Stick-Slip-Effekt. Die Messungen zeigen auch, dass bei

ausreichend großer nachrutschender bzw. abzubremsender Masse (Füllstandshöhenbereich ca. 80 % - 65 %) die Silowand in ihren Eigenmoden derart angeregt wird, dass daraus resultierende, überhöhte Schwingungen zum Silohupen führen. Auf Grund der starken Dämpfung des Systems ist das Hup-Signal von sehr kurzer Zeitdauer (~0,2 s). Die Messungen konnten zudem bestätigen, dass bei abnehmender Füllstandshöhe weniger Eigenmoden angeregt werden bis bei geringeren Füllstandshöhen schließlich keine hörbaren Eigenmoden mehr angeregt werden. Ergebnisse zeigen, dass bei Schüttgutentnahme nach Erreichen einer kritischen Füllstandshöhe von ca. 65 % die Masse des bewegten Schüttgutes zu gering ist, um das Silo in ihren hörbaren Eigenmoden anzuregen.

Lösungsansätze

In der Literatur werden unterschiedliche Lösungsansätze zur Vermeidung von Silohupen präsentiert. Aufgrund vieler Einflussfaktoren gibt es allerdings kein Patentrezept. Fließstörungen im Schüttgut können daher bei der Auslegung einer Anlage nur in unzureichendem Maße abgeschätzt werden. Gebräuchliche Maßnahmen sind:

- Einbauten
Einbauten innerhalb des Silos können eine Verringerung der beschleunigten Masse bzw. einen kontinuierlichen Masseabtrag bewirken. Hier sind sog. Entleerungsrohre zu erwähnen, welche einen Schüttgutabtrag dicht an der Schüttgutoberfläche im Silo bewirken. Diese Methode ist jedoch stark von den Fließeigenschaften des Schüttgutes abhängig.
- Externes Auslösen von Erschütterungen
Durch das externe Auslösen von Erschütterungen können die Spannungen im Schüttgut verringert werden. Die Anregung kann z. B. mittels Rüttler oder Luftkanonen erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass die Energie der Anregung ausreichend dimensioniert ist, um das Schüttgut auch in der kritischen Füllstandshöhe aufzulockern.
- Erhöhung der Wandrauigkeit
Bei zunehmender Wandrauigkeit ist mit weniger starken Silovibrationen zu rechnen. Der Stick-Slip-Effekt kann unterbunden werden. Der Einbau rauerer Wandsegmente, z. B. Waffelbleche, dient dabei der Ausbildung dickerer Scherzonen an der Wand. Es ist ausreichend diesen Teil des Silos mit Waffelblechen auszukleiden, wo die größten Spannungen zu erwarten sind.
- Isolierung
Eine Isolierung der Siloaußenhaut kann zu einer Absorption der Schallemission führen. Hierbei ist auf mehrschichtiges Isoliermaterial (sog. constrained layer) zu achten, da diese Schwingungen nicht auf die äußere Ummantelung abgeben. Die Ursache des Silohupens wird hierbei

zwar nicht unterbunden, jedoch wird der Luftschall entsprechend absorbiert, sodass keine Geräusche mehr wahrnehmbar sind.

- Konusförmige Struktur
Durch einen konusförmigen Siloaufbau kann die Haftreibung deutlich herabgesenkt werden, sodass davon auszugehen ist, dass der Stick-Slip-Effekt unterbunden wird. Eine Umsetzung bei Kunststoff-Silos scheint auf Grund des Herstellungsprozesses realisierbar.
- Reduzierung Füllstandshöhe
Bei geringerer Füllstandshöhe sind die auftretenden Trägheitskräfte und somit die Spannungen im Schüttgut geringer. Das Silo wird nicht mehr in seinen hörbaren Eigenmoden angeregt.

Zusammenfassung

Beim Fließen von Schüttgut in Silos kann es zu Erschütterungen und selbsterregten Schwingungen kommen. Entstehende hörbare Schwingungen werden dabei als Silohupen bezeichnet. Das Phänomen tritt insbesondere bei hohen Füllständen in dünnwandigen, schlanken Silos mit hohen Auslaufraten auf. Ursache ist die Anregung der Silowand in ihren Eigenmoden.

Eigene Untersuchungen an einem Silo mit auftretendem Silohupen führten zu dem Ergebnis, dass innerhalb des Silos kein kontinuierlicher Fließvorgang vorhanden ist und sich somit Bereiche mit höherer und geringerer Dichte ausbilden, was zu einem stoßweisen Nachrutschen des Schüttgutes führt.

Derzeit ist es nicht möglich, das Auftreten von Silohupen bereits bei der Anlagenplanung sicher auszuschließen, weil viele Einflussfaktoren (Schüttgutzusammensetzung, Haftreibung,...) einwirken. Verschiedene Maßnahmen zur Vermeidung von Silohupen sind bekannt und müssen einzelfallbezogen geprüft werden..

Referenzen

- [1] Gerard Haaker und Piet van der Kooi, Schockende, trillende en toeterende Silo's, Solids Processing Nr. 6 (Dez. 2006), Nr. 1 (Jan. 2007), Nr. 2 (Apr. 2007)
- [2] Dietmar Schulze, Pulver und Schüttgüter – Fließeigenschaften und Handhabung, 3., ergänzte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014
- [3] Schlussbericht der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik, Einfluss des Slip-Stick-Effekts bei der Wandreibung von Schüttgütern auf Silovibrationen, Dezember 2012