

Alternative Silokonzepte für die Zuckerlagerung*

Alternative concepts for sugar silos

Das Silokonzept als Ideallösung für jeden Bedarfsfall ist noch nicht erfunden worden. Eine generelle Empfehlung für eine bestimmte Silobauweise existiert nicht, da Anforderungen und vorliegende Gegebenheiten je nach Standort variieren. Allerdings kann mit Hilfe einer Entscheidungsmatrix eine passende Lösung erarbeitet werden, die u.a. die Integration des Silos in die Gesamtanlage, den Einsatz von Personal und dessen Sicherheit, die Höhe der Investitionen und Betriebskosten und natürlich nicht zuletzt die schonende Behandlung des Zuckers berücksichtigt. Ziel ist dabei die Qualitätssicherung, d.h. die lange Lagerfähigkeit des Zuckers bei minimalen Verlusten ohne Verkrustungen oder Verklumpungen und bei Erhalt der vermischten Kristallgrößen (Kornspektren). Bewährt haben sich in der Praxis Silos für bis zu 80 000 t Zucker, für die eine Beheizung des Wandaufbaus empfohlen wird. Die o.a. Entmischung der verschiedenen Kristallgrößen kann bereits mit der richtigen Auswahl des Verteilers für das Befüllen des Silos reduziert werden, für die Entleerung des Silos ist ein Trichter-Konzept überlegenswert. Schwingungsböden zur Entleerung – wie z.B. bei Schüttgut-schiffen – wären eine Alternative, finden aber bisher noch wenig Anwendung in der Zuckerindustrie.

Schlagwörter: Zucker, Lagerung, Silo

The ideal “silo concept” as a solution for every application has not yet been invented. A general reference for specific silo design and construction does not exist, as circumstances and requirements vary according to location. A suitable solution can be developed, however, with the help of a decision matrix that includes the integration of the silo into the overall system, the use of personnel and security, the amount of investment and operating costs and, of course, taking treatment of the sugar into consideration. The goal is quality assurance, i.e. a long shelf life of the sugar with minimal loss, a lack of crusts or lumps and upon receipt of mixed crystal sizes (particle spectra).

Silos of up to 80,000 t of sugar have proven successful, in practice, for which heating of the wall construction is recommended. The above-cited mixing of different crystal sizes may be reduced with right choice of dispenser for filling the silo, a “hopper concept” for emptying the silo is also worth considering. Vibrating floors for emptying – such as for bulk cargo ships – would be an alternative, but still have found few applications in the sugar industry, thus far.

Key words: sugar, storage, silo

1 Arbeitssicherheit in Lagersilos

Zucker wird als Schüttgut in speziell für dieses Produkt entwickelten Silos lose gelagert. Die Ansprüche an die Silokonstruktion variieren mit dem physikalischen Zustand der einzubringenden Ware – trocken/konditioniert und unkonditioniert.

1.1 Arbeitssicherheit

In den vergangenen 3 Jahren haben sich leider in Europa wieder tödliche Unfälle bei der Begehung von Lagersilos in der Zuckerindustrie ereignet. In der Vorschrift der Berufsgenossenschaft „Behälter, Silos und enge Räume: Arbeiten in Behältern, Silos und engen Räumen“ [1] werden alle wesentlichen Regeln für eine sichere Arbeit im Silo aufgeführt. Ziel bei der Planung eines neuen Silos sollte u.a. die Vermeidung einer Begehung des Silos vor dessen endgültiger Entleerung sein. Die wesentlichen Gefahren bei der Begehung eines nicht entleerten Zuckersilos sind in der Abbildung 1 dargestellt.

1.2 Betriebssicherheit

Ziel bei der Planung eines Silos ist neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein sicherer, weitgehend automatisierter Betrieb. Um Gefahren für das Personal zu minimieren, sind an die Konstruktion des Silos, an die technische Ausrüstung sowie an das Lagergut besondere Anforderungen zu stellen.

Um die Notwendigkeit einer Begehung eines nicht entleerten Silos zu vermeiden, sollte das Silo ohne äußere Hilfe vollständig entleert werden können.

Vor der Begehung eines entleerten Silos sind entsprechende Maßnahmen zu treffen; so sind technische Einrichtungen, die eine Gefahr für das Personal bedeuten können, vor der Begehung zu schalten bzw. zu verriegeln.

Durch eine gewissenhafte Konzeption und Konstruktion der Anlagentechnik ist diese Anforderung gut zu erfüllen.

* Vortrag von der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Zuckertechniker (VDZ), 15.–16. Mai 2012 in Magdeburg.

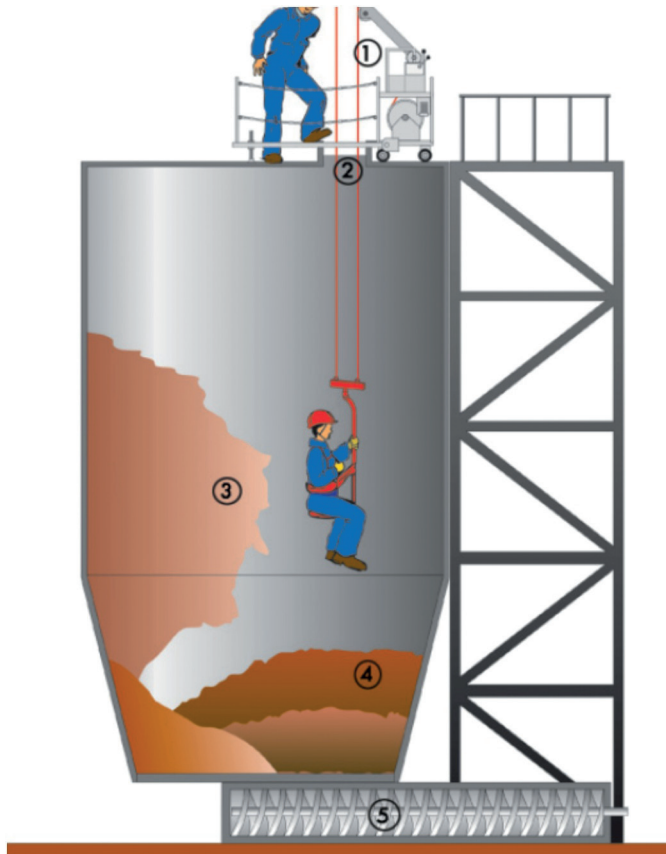


Abb. 1: Mögliche Gefährdungen beim Arbeiten in Behältern und engen Räumen (Quelle: [1])

1 Unzureichende Rettung, mangelnde Absturzsicherung. 2 Zu enge Zugangsöffnungen, ungünstige Rettungswege. 3 Gefahr des Verschüttens. 4 Gefahr des Versinkens im Schüttgut. 5 Gefahrstellen von Maschinen

Eine komplette Entleerung des Silos ohne notwendige Begehung hingegen stellt komplexere Ansprüche an das Silo, für die es unterschiedlichste Lösungsansätze gibt.

2 Anforderungen an das Silo

2.1 Schwerpunkte

Zu den wichtigen Punkten eines jeden Siloprojektes zählen:

- schonende Behandlung des Produktes;
- Berücksichtigung der ATEX-Richtlinien;
- Erfüllung der hygienischen Anforderungen;
- gute Integration in die Gesamtanlage;
- Einsatz von Personal und dessen Sicherheit;
- notwendige Aufwendungen für die Sicherheit des Objektes und der Umgebung;
- Höhe der Investition und der Betriebskosten.

Diese Betrachtungen haben zu den verschiedensten Silo-Bauformen geführt. Bei jeder Planung werden dabei eigene Schwerpunkte gesetzt und oft auch Kompromisse eingegangen. Die wichtigsten Anforderungen sind:

- Der Zucker soll lange Zeit lagerfähig sein.
- Die Verluste (Rework) sollen minimal sein, am besten gar nicht anfallen.
- Das Kristallgrößenspektrum soll in seiner Vermischung erhalten bleiben; also keine Entmischungen durch den Eintrag, Lagerung und Austrag, besonders bei Spezialsortenproduktionen.

- Der Personaleinsatz sollte so gering wie möglich gehalten werden, die Sicherheit für das Personal im Vordergrund stehen. Da im 3-Schichtbetrieb und 7 Tage/Woche ein erheblicher Personalbedarf besteht, dem sich das Werk nicht immer problemlos anpassen kann, sind hier besondere Überlegungen anzustellen.

2.2 Qualitätssicherung

Zucker muss zur Lagerung vorbereitet werden. Aus diesem Grund wird der Zucker nach der Produktion bzw. nach dem ersten Trocknungsvorgang in der Produktion auf einen Wassergehalt von ca. 0,02 % konditioniert, um ihn rieselfähig zu halten. Bei unzureichender Konditionierung bilden sich in der Schüttung Zusammenbackungen der Kristalle zu Klumpen, die unter Umständen einen ungestörten Austrag behindern können und im Ausnahmefall so weit führen können, dass der Zucker ‚bergmännisch‘ im Silo abgebaut werden muss. Für die Konditionierung, deren Prozess erfahrungsgemäß in 72 h bis zu 98 % abgeschlossen ist, sind den Lagersilos so genannte Konditioniersilos vorgeschaltet, die dementsprechend ein Volumen von drei Tagesproduktionen (72 h) haben sollten, zuzüglich einer Pufferkapazität von circa ein bis zwei Tagesproduktionen, um Störungen aufzufangen, die im nachfolgenden Förderprozess auftreten können.

Fabriken mit eigener Zuckerherstellung und Verteilung investieren vorwiegend in Lagersilos mit eingebauter Konditionierung. Hier wird der Zucker in der Kampagne hergestellt und teilweise bis zu 10 Monate gelagert.

Lagersilos mit Kapazitäten bis zu 80 000 t für Zucker haben sich als wirtschaftliche Investitionen bewährt. Die Größe bzw. die Kapazität der Silos ist im Allgemeinen begrenzt durch den vorhandenen Aufstellplatz, die Entfernung zur Produktion, baurechtliche und bauphysikalische Zweckmäßigkeiten und wirtschaftliche Betrachtungen.

3 Silovarianten

Durch die gewonnenen Erfahrungen aus dem Betrieb verschiedener Silovarianten haben sich einige Bauformen und Verfahren zur Zuckerlagerung herausgebildet, die den formulierten Anforderungen entsprechen (Abb. 2, Tab. 1).

Im Folgenden sind fünf Silotypen dargestellt, die sich verfahrensmäßig und konstruktiv in der Betriebsweise und im Aufbau unterscheiden, aber alle gekennzeichnet sind durch Geometrie, Wandaufbau, Bedarfsanpassung und Kostenbewertung.

Tab. 1: Größe der Silovarianten

	Gesamthöhe ohne Keller in m	Durchmesser in m	Zylinderhöhe in m
Variante 1	61,2	44,5	57,0
Variante 2	67,4	44,5	53,5
Variante 3	64,0	44,5	50,2
Variante 4	40,8	74,0	–
Variante 5	47,8	56,0	15,0

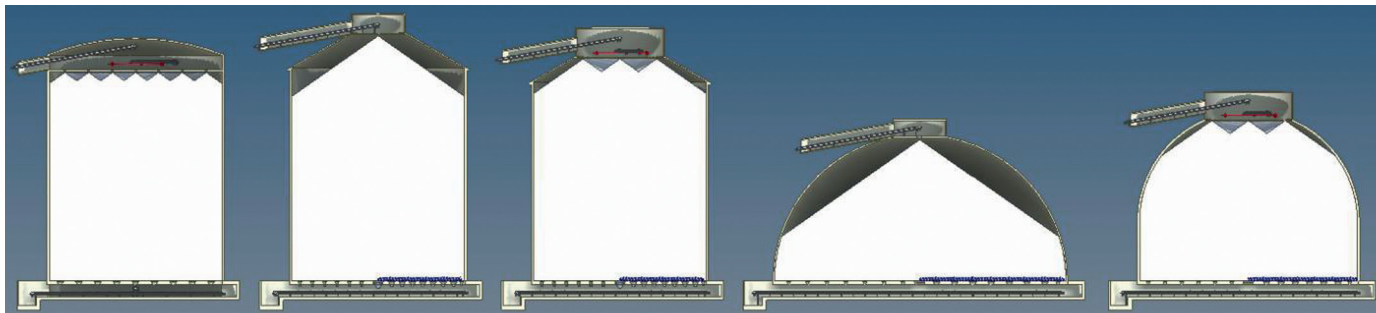


Abb. 2: Silovarianten (v.l.nr.): Zylindersilo mit Zwischendecke, Kegeldach, Kegelstumpfdach, Dome – hemisphärisch (Kugel), Dome – zylindrisch

a) Die Silos haben eine kreisrunde Grundfläche und einen Mantel in zylindrischer oder kugelförmiger Form. Der Kreis entspricht der natürlichen Fußform von frei aufgetragenem Schüttgut. Bei der Beschickung und Lagerung sind dadurch eindeutige statische Verhältnisse vorhanden. An den Wänden gibt es keine Ecken, in denen Produktreste verbleiben können oder die schlecht zu belüften sind.

Der zylindrische oder kugelförmige Mantelaufbau bietet beste Voraussetzungen, den durch das Füllgut entstehenden Innendruck gleichmäßig auf den Baukörper zu übertragen.

b) Wandaufbau – Silowandheizung aufgrund von Taupunktunterschreitungen: Schüttgut lässt sich nicht stapeln, es sei denn, die natürliche Ausbreitung des Fußes wird durch eine Wand (Silowand) begrenzt. Die Silowand trennt auch das Produkt von der Umgebung und schützt vor Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Trennung bzw. Angleichung der Temperatur im Lagerprodukt zur Temperatur der Umgebung. In Mitteleuropa besteht zwischen dem einzubringenden Produkt mit $>35^\circ\text{C}$ und der Umgebung des Silos

mit $<35^\circ\text{C}$ ein erheblicher Temperaturunterschied. Über die Silowand findet ein Temperatúraustausch statt, der dazu führt, dass sich das im Produkt befindliche Wasser in Richtung kalter Silowand bewegt und hier kondensiert. Das führt zu Zusammenbackungen der Zuckerkristalle und Anhaftungen an der Silowand. Um diesem Vorgang entgegenzuwirken, wird die Silowand beheizt und mit Isolierelementen versehen (Abb. 3–6). Zum Teil – je nach geographischer Lage und Schutz gegen auskühlenden Wind – reicht eine gute Isolierung aus, um den Temperaturanforderungen zu genügen.

c) Der Durchmesser und die Bauhöhe der Silos sind anzupassen:

- dem Bedarf an Lagervolumen,
- der Integrationsmöglichkeit in die Gesamtanlage, sowie
- den bauphysikalischen und maschinellen Möglichkeiten.

Für die Auswahl verfügbarer Silokonzepte sind Kosten zu bewerten:

- für die Investition gesamt,
- je m^3 effektives Lagervolumen,
- je m^3 Zucker für die Einlagerung, Lagerung und Auslagerung (bestehend aus Energie- und Personalkosten).

Die Investitionskosten im zylindrischen Silobereich bis zum Siloboden sind bei den u.a. fünf Silokonzepten annähernd gleich zu bewerten, da auch die Anforderungen ver-

gleichbar sind. Allerdings stellen sich die Gesamtkosten/ m^3 Zucker mit zunehmendem Zuckervolumen zum Gesamtvolumen des umbauten Raumes unterschiedlich dar.

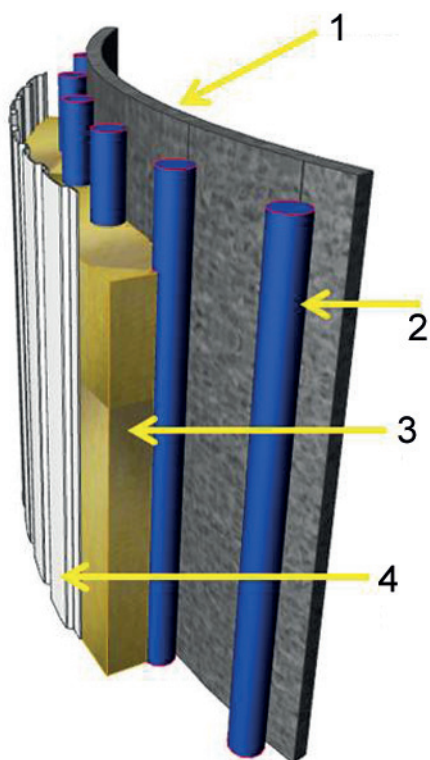


Abb. 3: Beheizung der Silowand, Möglichkeit I. 1 Silowand. 2 Heizrohr. 3 Dämmung. 4 Verkleidung.

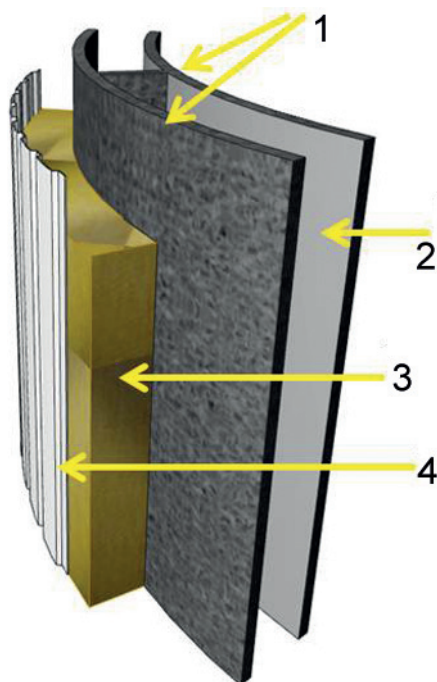


Abb. 4: Beheizung der Silowand, Möglichkeit II. 1 Doppelwand. 2 Heizraum. 3 Dämmung. 4 Verkleidung.

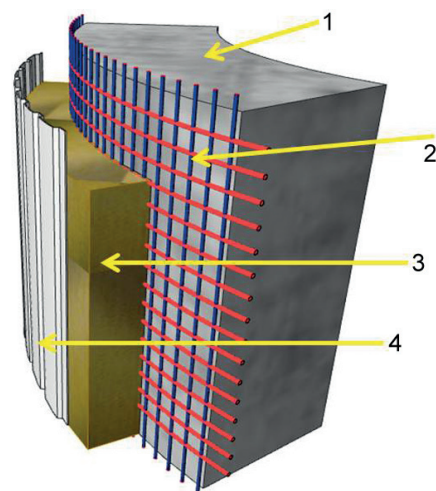


Abb. 5: Beheizung der Silowand, Möglichkeit III. 1 Beton. 2 Elektrische Heizung. 3 Dämmung. 4 Verkleidung.

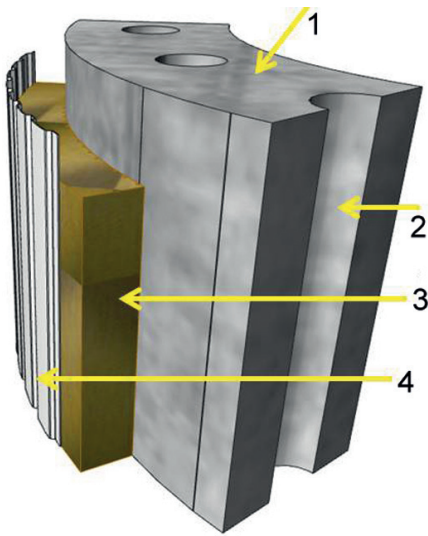


Abb. 6: Beheizung der Silowand, Möglichkeit IV.
1 Beton. 2 Warmluft. 3 Dämmung.
4 Verkleidung.

3.1 Silokonzepte

3.1.1 Silotyp I: Zylindersilo mit Zwischendecke

Aus den in der Vergangenheit ausgeführten Silobauwerken mit den verschiedenen Austragsselementen haben sich die folgenden Konzepte I–V als die interessantesten Varianten ergeben. Silotyp I (s. Abb. 2, ganz links) steht in den meisten europäischen Zuckerfabriken und wurde schon vor Jahrzehnten als moderne Variante zu den damals bekannten Zuckerhallen – Grubensilos und Silozellen – entwickelt. Dieser Silotyp wird als Stahlsilo oder in Betonkonstruktion errichtet.

Dieses Silo besitzt einen Entleerungskeller, abgetrennt durch eine Betondecke zum Zuckerlagerraum (Siloraum). Der Siloraum wird durch eine Decke nach oben zum Beschickungsboden (Silodachraum) abgeschlossen.

Vom Silodachraum aus wird das Silo mit Zucker befüllt. Mit einem Förderband wird der Zucker zentrisch auf den Beschickungsboden angedient und durch eine mittige Öffnung in den Zuckerlagerraum abgeworfen. Es sind weitere Einwurföffnungen im Silodachboden vorhanden, die – mittels manuell verschiebbarer Gestelle mit Gurtförderern – von der zentralen Abwurfstelle aus bedient werden können. Wenn das Silo gefüllt ist (die Kegelspitze der Zuckerschüttung hat den höchsten Punkt erreicht), kann über die anderen Einwurföffnungen weiterer Siloraum mit Zucker gefüllt werden, um einen möglichst hohen Füllgrad zu erreichen.

Das Silodach und die Silodecke sind freigespannt, wodurch ein relativ großer umbauter Raum entsteht. Der wirtschaftliche Durchmesser ist durch die freigespannte Konstruktion von Dach und Decke begrenzt. Im Falle des 2011 errichteten Silos in Tulln, Österreich, wurde mit Leimholzbindern eine wirtschaftliche Lösung für einen erhöhten Durchmesser mit freitragender Deckenkonstruktion realisiert.

Der Siloraum wird durch den Abstand zwischen Silodachboden und Silokellerdecke gebildet. Der zylindrische Teil wird anhand des benötigten Lagervolumens berechnet und durch bau- und geophysikalische Maßnahmen beschränkt. Der Silokeller entspricht im Durchmesser ungefähr dem Innendurchmesser des Siloraumes.

Die Silokellerdecke ist für den Austrag des Zuckers mit mehreren angeordneten Entnahmeöffnungen versehen, die mit Schiebern verschlossen sind. Die Entnahme beginnt mit der zentrischen Öffnung auf einen Stetigförderer.

Wenn sich der Zuckerspiegel soweit gesenkt hat, dass aufgrund des Schüttwinkels gravimetrisch kein Zucker mehr ausläuft, wird über die anderen Bodenöffnungen das Silo weiter entleert. Dazu werden Gurtförderer manuell unter die jeweilige Öffnung gestellt und der Zucker auf den Austragsförderer geleitet. Bei dieser Handhabung ist darauf zu achten, dass die Abzugsöffnungen im Wechsel bedient werden, um ein einigermaßen gleichmäßiges Absenken des Zuckerspiegels zu erreichen. Es soll vermieden werden, dass sich im Silo eine einseitige Böschung bildet, deren Rücken sich zur Silowand abstützt, wenn der Silozyylinder nicht für diese Belastung ausgelegt ist.

Die Silokellerdecke ist nicht freigespannt, sie stützt sich mit Gebäudestützen auf den Kellerboden ab. Dadurch ist der Bewegungsraum für fördertechnische Anlagen stark eingeschränkt. Mechanisierte Abzugeinrichtungen, die entwickelt wurden, sind sehr kosten- und wartungsintensiv. Die Arbeiten müssen ansonsten manuell mit den erwähnten Hilfsmitteln durchgeführt werden. Die endgültige Restentleerung wird manuell durchgeführt, dazu muss das Personal in den Zuckerlagerraum eingeschleust werden. Der Restzucker wird durch die Entnahmeöffnungen per Hand geschaufelt.

Sowohl bei der Beschickung als auch bei der Entnahme mit den genannten Hilfsmitteln kommt es zu erheblichen Staubbelastungen und Produktverlusten.

3.1.2 Silotyp II: Kegeldach

Dieser Silotyp (s. Abb. 2, 2. von links) ist als Nachfolger zu Silotyp I zu sehen. Den Zielen

- möglichst großer Raumnutzungsgrad,
- automatisierbare Bewirtschaftung,
- Reduzierung von Staubanfall und
- Vermeidung von Materialverlust

wird hier Rechnung getragen. Bei dieser Bauweise ist das „Arbeiten unter Staubeinwirkung – ohne freie Sicht durch Fenster, teilweise allein, ohne Personalbegleitung“ nicht notwendig. Das Personal kann wirkungsvoller, für die Person und den Betrieb interessanteren Tätigkeiten zugeführt werden. Das Silodach (siehe Silotyp I) und die Siloraumdecke entfallen in der ursprünglichen Form. Der zylindrische Siloraummantel wird in kegelförmiger Form bis zur Silokrone, in der die Fördertechnik zum Befüllen des Silos untergebracht ist, weitergeführt. Der Kegelmantel (Dach) hat eine geringere Neigung als der zu erwartende Böschungswinkel des Lagergutes, damit die Anschlusskonstruktion ‚Zylinder – Kegel‘ die Schüttung nicht berührt. Der zylindrische Teil des Siloraums wird in Stahl oder Beton ausgeführt, der kegelförmige Teil ‚Dach‘ des Silos wird in Stahl und Holzbinderkonstruktion angefertigt.

Die Silokrone ist in Stahlkonstruktion mit Isolierbeplankung aufgebaut. Im Zentrum des Fußbodens der Silokrone befindet sich eine Füllöffnung, über die der Siloraum kontinuierlich befüllt wird.

Durch den kegelförmigen Aufbau der Dachkonstruktion ist es mög-

lich, größere Silodurchmesser als beim Typ I zu realisieren. Zurzeit wird der maximal sinnvolle Durchmesser von der Konstruktion der mechanischen Einrichtung „Resträumschnecke“ begrenzt.

Die Höhe des Zylindermantels richtet sich nach dem gewünschten Lagervolumen sowie nach den geophysikalischen und bauphysikalischen Maßstäben.

Der Siloraumboden „Kellerdecke“ ist mit in Linie angeordneten Abzugsöffnungen versehen, durch die der Zucker aus dem Silo entnommen wird. Bedingt durch die Konstruktion der Abzugstechnik besteht der Silokeller lediglich aus einem Kanal für den Förderer mit der Möglichkeit der Begehung.

Der Zucker wird mittels Schwerkraft zunächst über die zentrisch angeordnete Abzugsöffnung entleert, bis sich die Böschung des Zuckertrichters soweit dem Ablauf genähert hat, dass kein selbsttätiger Austrag mehr zu erwarten ist. Danach werden die in Linie angeordneten Abzugsöffnungen nach einem vorgegebenen System nacheinander geöffnet (mit Rücksicht auf die Gebäudestatik), bis zwei Böschungskeile als Restfüllung im Silo zurückbleiben. Der Restbestand des Siloinhaltes wird mit einer Resträumschnecke, die horizontal kreisförmig über den Siloboden geführt wird, zu den Auslauföffnungen geführt.

Dieser Silotyp wurde mehrfach ausgeführt, bisher bis zu einer Füllmenge von 80 000 t (100 000 m³), und hat sich im Betrieb bewährt.

3.1.3 Silotyp III: Kegelstumpfdach

Dieser Silotyp (s. Abb. 2, Mitte) entstand aus den Überlegungen, alle Vorteile des Silotyps II zu nutzen und den Rauminhalt und die Struktur des Lagergutes zu optimieren.

Es hat sich gezeigt, dass durch das mittige Abwerfen des Zuckers beim Einfüllen eine Entmischung der Ware nach Kristallgröße auftreten kann. Je stärker die Differenz von Fein- zu Mittel- und Grobkristall ist, desto eher werden die großen Kristalle gemäß den physikalischen Regeln (Fliehkraft und Rollwiderstand) in Richtung Böschungsfuß rollen. Dadurch ergibt sich eine Entmischung von außen nach innen, von grob zu fein (Abb. 7).

Beim Austrag des Zuckers werden bis zur Trichterbildung zunächst weniger grobe Kristalle in der ausgetragenen Masse anfallen. Zum Ende des Siloaustrags fallen naturgemäß mehr grobe Kristalle an. Das beeinflusst nicht die Qualität des Zuckers als solchen, wirkt jedoch bei der Weiterbearbeitung „Siebung und Fertigproduktion“ störend. Zum Teil können

bestimmte Fraktionen nicht in der gewünschten Menge angeboten werden.

Um dem entgegenzuwirken, ist beim Silotyp III der Abwurf kreisförmig gestaltet. Auf dem Boden der Silokrone dreht sich kontinuierlich horizontal ein Förderband unterhalb des Zubringerförderers. Dieses Förderband übernimmt den Zucker vom Zubringerförderer und füllt den Zucker ringförmig durch einen Deckenschlitz kontinuierlich ein. Die Restbefüllung erfolgt über eine zentrisch angeordnete Einfüllöffnung. Die Nutzung des umbauten Raumes wird durch den höheren Füllgrad optimiert.

Es hat sich gezeigt, dass durch den stetig wandernden ringförmigen Einwurf die Kristallverteilung im Schüttgut erhalten bleibt bzw. sich nicht in störender Form verändert. Gleichzeitig wird durch die ringförmige Verteilung der Siloboden bei Füllbeginn eher mit Zucker bedeckt, was als Vorteil für den Vorgang der Konditionierung anzusehen ist.

Die Mehrkosten der geänderten Silokrone stehen dem Mehrnutzen des umbauten Siloraumes sowie der verbesserten Produktionssicherheit hinsichtlich Siebung und Verpackung entgegen.

3.1.4 Silotyp IV: Dome – hemisphärisch (Kugel)

Dieser Silotyp (s. Abb. 2, 2. von rechts) ist in seiner Funktion dem Silo II entsprechend. Der konstruktive Aufbau entspricht einer Halbkugel. Der Silomantel und das Silodach sind zu einer Einheit übergangslos aneinander gefügt. Die tragende Konstruktion besteht aus stahlarmiertem Beton, ist mit Polyurethanschäum gedämmt und einer wasserdichten Folie nach außen versiegelt.

Die Silokrone entspricht der Bauart und dem Betrieb gemäß Silotyp II und besteht aus einer Stahlkonstruktion. Der Siloraumboden entspricht den Silotypen II und III mit dem darunter liegendem Abzugskanal. Dieser Silotyp ist ebenfalls seit einigen Jahrzehnten bekannt und wurde in Europa und Übersee vielfach realisiert. Im Laufe der Jahre wurden Änderungen an der Konditionier- und Abzugstechnik vorgenommen.

Interessant ist diese Bauart – neben den geringen Investitionskosten – besonders hinsichtlich des Lagervolumens bei relativ niedriger Bauart: Gesamthöhe $\sim \frac{1}{2}$ Durchmesser + Höhe der Silokrone. Der Durchmesser des Silobodens und damit das Lagervolumen sind zurzeit durch die derzeitigen Mittel der Abzugstechnik beschränkt. Hinsichtlich der Kristallgrößenverteilung beim Produkteinwurf entspricht die Schüttung den Silotypen I und II.

3.1.5 Silotyp V: Dome – zylindrisch

Dieser Silotyp (s. Abb. 2, ganz rechts) ist eine Antwort auf die Frage des Lagervolumens bei vorgegebenem Durchmesser des Siloraumbodens.

Der Vorteil der Silotypen II und III gegenüber Silotyp IV wird hier durch das Untersetzen eines zylindrischen Silomantels unter das Wand/Dach-System gemäß Silotyp IV übernommen. Vom Übergang Zylinder–Kugel nimmt der Siloinhalt mit der Höhe des Zylindermantels zu.

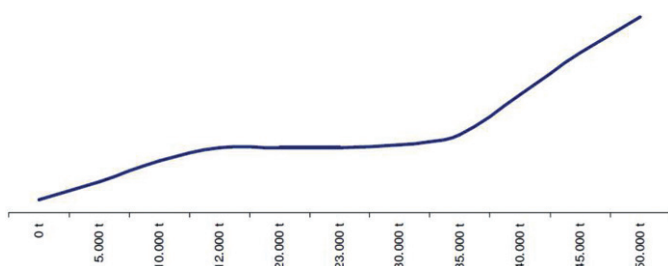


Abb. 7: Verlauf des mittleren Kristalldurchmessers bei Entleerung eines Silos mit zentrischer Befüllung (schematisch) [2]

Es gibt zwischen Silomantel und Kugeldom keinen Absatz. Die Silohülle wird vom Silofuß aus übergangslos stoßfrei bis zur Silokrone ‚aus einem Guss‘ gefertigt.

Die Funktion dieses Silotyps entspricht dem des Silos II, jedoch mit den konstruktiven Merkmalen des kugeligen Siloaufbaues, den kurzen Bauzeiten, die auch weitgehend witterungsunabhängig sind, und den relativ günstigen Investitionskosten. Mit zunehmendem zylindrischen Anteil des Silos erhöhen sich jedoch die Baukosten.

Um weitere Verbesserungen zu erzielen, könnte die Silokrone gemäß Silotyp III zur Anwendung kommen. Dadurch würde sich die Kristallgrößenverteilung beim Befüllen besser einstellen und beim Siloabzug auch eine homogene Schüttung zu erzielen sein. Der Nutzinhalt Schüttfuß bis Silokrone erhöht sich zusätzlich durch die dezentrale Aufgabe des Schüttguts.

Bei der Bauform der Dome-Silos wurden in letzter Zeit verstärkt die mögliche Rissweite des Betons und die Begrenzung der Rissweiten diskutiert. Da diese Bauform üblicherweise nicht vorgespannt wird, ergeben sich größere Rissweiten als bei vorgespannten Silos. Die Hersteller weisen allerdings die Einhaltung der Vorschriften des Eurocodes (0,4 mm) nach.

Inwieweit ein Unterschied in der Rissweite von 0,2 mm bei einem Bauwerk der Expositionsklasse eines Zuckersilos überhaupt eine bautechnisch relevante Auswirkung hat, wird in der nächsten Zeit mit einer technischen Fakultät geklärt. („Risse im Beton sind kein Schaden, wenn die Rissbreiten bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten“ [3].)

3.2 Konditionierung

Je höher die Reinheit des Produkts ist, desto geringer ist der zum Erhalt der Gleichgewichtsfeuchte notwendige Wassergehalt.

- Mit sinkender relativer Luftfeuchtigkeit (z.B. durch steigende Lagertemperatur) wird das Produkt „nachtrocknen“, dadurch besteht Verkrustungs-/Verblockungsgefahr.
- Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit (z.B. durch Abkühlung beim Transport zum Kunden) steigt die Durchfeuchtungsgefahr.
- Gleichbleibende Bedingungen von Trocknung bis Ablieferung beim Kunden sichern die Schüttgutqualität (Rieselfähigkeit) [4].

3.2.1 Betrieb der Konditionierungsanlagen

Vorwärmphase (Silo-Belüftung ca. 30 °C): Zum Anwärmen sind erfahrungsgemäß 2–3 Tage ausreichend. Die zugeführte Luft sollte bereits konditioniert sein, also die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit erreichen, die beim Konditioniervorgang genutzt werden.

Befüllphase (Siloumluft bei ca. 25–30 °C, max. 30% relative Luftfeuchtigkeit): Die Regelung der Umluftmenge erfolgt durch Anpassen der Ventilatorumdrehzahl, bei wachsender Füllhöhe muss die Ventilatorumdrehzahl solange entsprechend dem Druckverlust der Zuckerschicht erhöht werden, bis die gewünschte Zuluftmenge erreicht ist.

Während der Befüllung des Silos und bis 72 h nach Ende des

Befüllvorgangs wird die Luft entsprechend der oben genannten Werte konditioniert. Hiermit wird das Risiko von so genannten Feuchtenestern im Zucker minimiert. Der Taupunkt wird nirgendwo unterschritten und der Konditionierprozess bis zum geforderten Restwassergehalt des Zuckers vorangetrieben. Nach dem Konditioniervorgang sollte der Wassergehalt der Zuckerkrystalle stabil bleiben.

Nachkonditionierung: Wenn der Zucker bereits getrocknet ist und kein neuer Zucker in das Silo eingefüllt wird, kann die Luftmenge reduziert werden. Bei entsprechenden Wetterbedingungen kann auch bis zu 100 % Frischluft zugeführt werden.

Nach der Befüllung und Konditionierung sollte das Silo regelmäßig belüftet werden. Bei der Belüftung sollte darauf geachtet werden, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Silo nicht zu sehr sinkt, um das Risiko statischer Entladungen zu minimieren.

Neben der Luftaufbereitung (Abb. 8) ist die Luftverteilung ein wichtiger Aspekt guter Konditionierung. Geringe Luftgeschwindigkeiten und große Ausströmoberflächen verbessern die Verteilung der Luft im Haufwerk und vermeiden so genannte Nester, in denen der Zucker nicht ausreichend konditioniert wird.

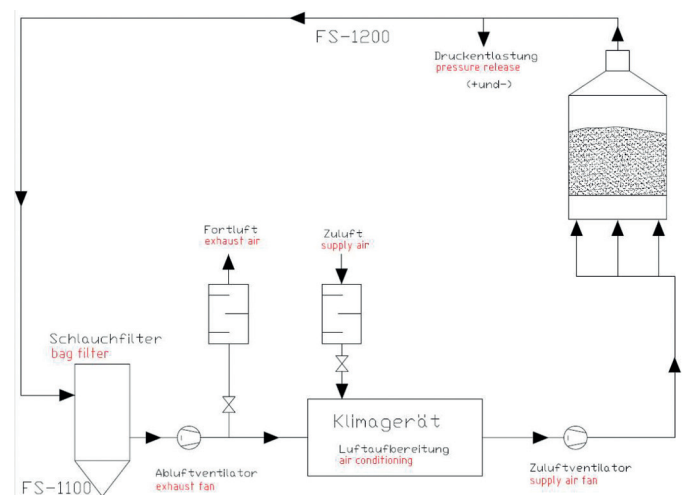


Abb. 8: Luftaufbereitung und Luftverteilung

Auch die Einhaltung einer ausreichenden Temperatur der Silowand spielt eine wesentliche Rolle, um eine Kondensation im Wandbereich zu vermeiden. Dies wird durch die o.g. Silowandheizung erreicht oder über ein entsprechendes Design der Luftverteilungskanäle.

3.3 Austragstechnik

Neben den Voraussetzungen für ein stabiles Lagergut durch die entsprechende Qualität des Eingangsprodukts und die gute Verteilung sowie Konditionierung des Zuckers ist der restarme Austrag des Zuckers von großer Bedeutung.

Der Austrag bei den Silos der Variante I ist nach dem Prinzip in den Abbildungen 9 und 10 gebaut, jedoch verbleiben zwischen den Austragstrichtern noch so große Zuckermengen, dass ein Einstieg in das Silo erforderlich wird. Weiterhin ist der Personaleinsatz beim Verfahren der Abzugsförderer im Silokeller erheblich und das Austragsmanagement muss gesichert sein, um Schieflagen in der Zuckerschüttung zu begrenzen.

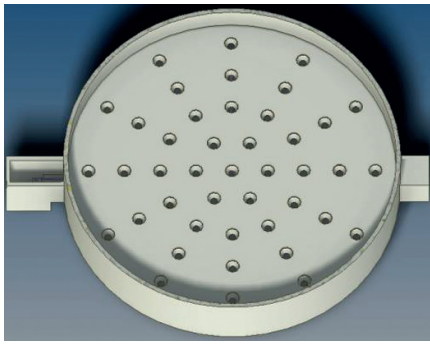


Abb. 9: Prinzip des restarmen Austrags (I)

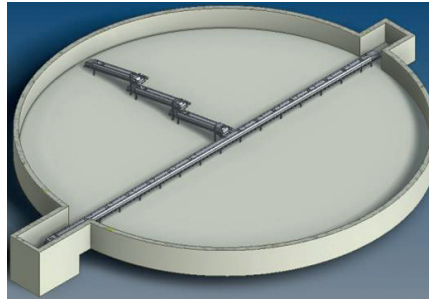


Abb. 10: Prinzip des restarmen Austrags (II)

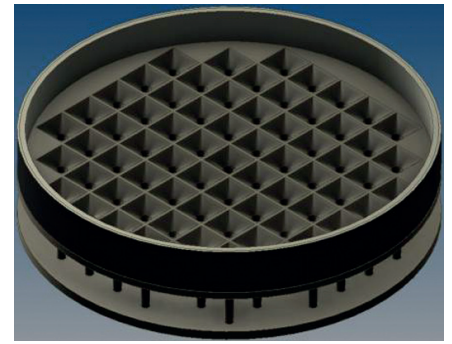


Abb. 11: Siloboden besteht komplett aus Austragsöffnungen

Ein System, bei dem der komplette Siloboden aus Austragsöffnungen besteht, verdeutlicht die Abbildung 11. Zwischen den Austragskonen verbleiben lediglich minimale Reste auf der Tragkonstruktion, die bei Begehung des Silos ohne wesentliche Risiken für die Mitarbeiter entfernt werden können. Nachteil der Lösung sind allerdings erhebliche Mehrkosten für den Siloboden und die darunter befindliche Fördertechnik. Aus der Schifffahrtsbranche kommt eine Lösung, die in Schüttgutschiffen eingesetzt wird und ebenfalls eine nahezu restfreie Entleerung ermöglicht (Abb. 12 und 13). Hierzu werden Schwingböden eingesetzt, bei denen eine Schwingplatte in einem Stahlrahmen durch Unwuchtmotoren bewegt wird. Die Schwingböden bestehen aus Einzelmodulen, zwischen denen auch die Konditionierungsluftrinnen montiert werden können. Der Aufbau mit einer relativ geringen Bodenneigung ermöglicht einen Einsatz dieser Lösung auch für Lagersilos größerer Bauart.

Der Austrag der Restmengen mit einer Räumtschnecke hat sich in den letzten Jahren bei vielen Siloprojekten durchgesetzt (Abb. 14 und 15). Nachdem die Technik mittlerweile



Abb. 13: Einzelmodule der Schwingböden

zuverlässig funktioniert, bietet sie mit den geringen Anforderungen an den Silokeller und ihren Anschaffungskosten einen Kompromiss, der bei der Abwägung von Arbeitssicherheit/Hygiene/Wirtschaftlichkeit/Zuverlässigkeit oftmals den Vorrang erhält.

4 Schlussfolgerung

Eine endgültige Empfehlung für das richtige Silokzept muss unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen und Anfor-

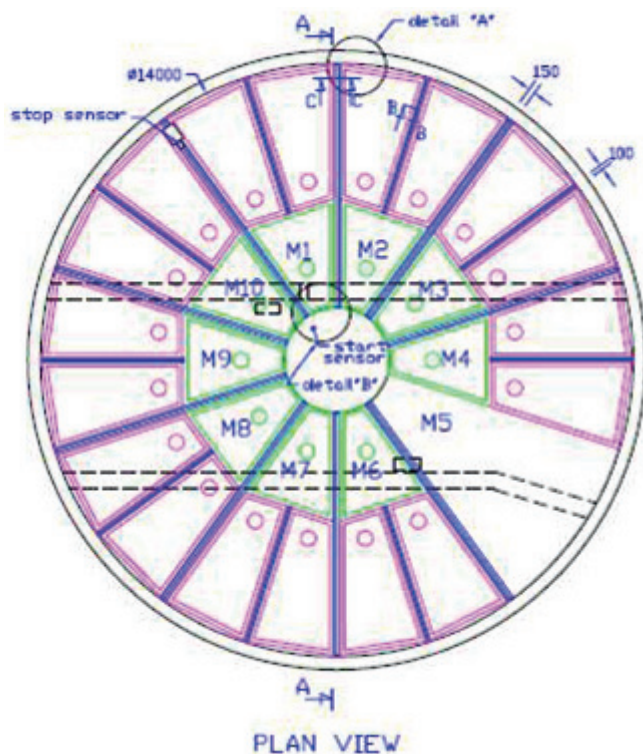
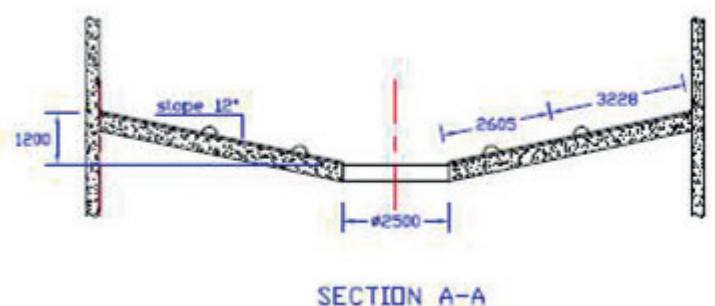


Abb. 12: Schwingböden für eine restfreie Entleerung



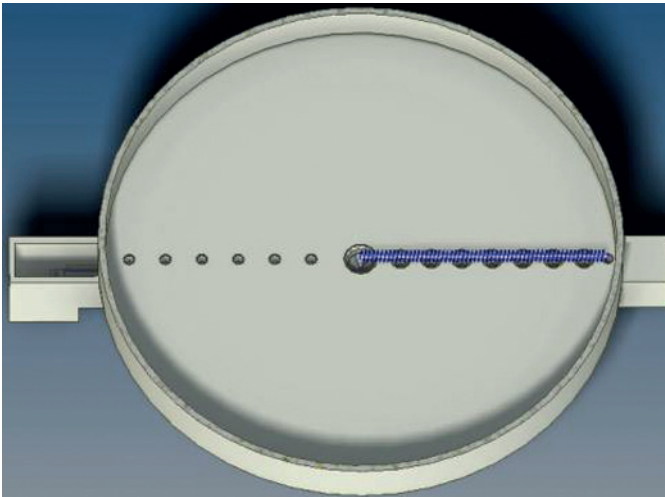


Abb. 14: Räumschnecke für den Austrag

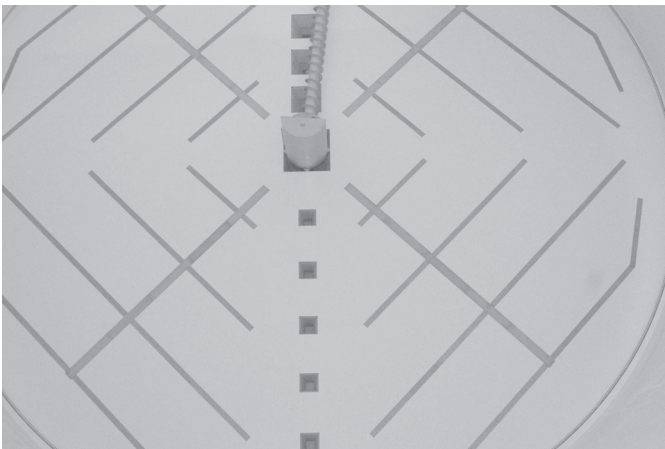


Abb. 15: Prinzip der Räumschnecke

derungen an den Betrieb erfolgen. Jedes Projekt hat seine eigenen Restriktionen, die die Entscheidung beeinflussen. Letztendlich muss unter den gegebenen Umständen das Konzept gefunden werden, das die beste Betriebssicherheit – und damit Arbeitssicherheit – bei wirtschaftlich vertretbaren Kosten und Erfüllung der Anforderungen an Produktsicherheit und -qualität erfüllt.

Eine gewissenhafte Vorbereitung bei der Entscheidung für ein Silokzept ist aus technischer und kaufmännischer Sicht Pflicht bei einer Anlage, die eine derartig lange Lebensdauer hat und so wichtig im Gesamtprozess der Zuckerzeugung und -veredelung ist.

Literatur

- 1 BGR 117-1 (2005): Behälter, Silos und enge Räume – Teil 1: Arbeiten in Behältern, Silos und engen Räumen. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Berlin
- 2 Mörle-Heynisch, T. (2011): Ingenieur-Weiterbildung, S. 28
- 3 Baumgart, R. (2012): Begrenzung der Rissbreiten. Darmstadt
- 4 Mörle-Heynisch, T. (2011): Ingenieur-Weiterbildung, S. 13

Anschrift des Verfassers: Dr. *Peter-Dirk Bergerhoff*, IKB Industrieplanung GmbH, Nachtigallenstraße 15, 57589 Pracht, Deutschland; e-Mail: peter-dirk.bergerhoff@ikb-planung.de