

„Vom Agrarrohstoff zu neuen
Produkten – Verfahren-
technische Forschung im
Nacherntebereich“

Ehrenkolloquium anlässlich des
65. Geburtstages
von

Prof. Dr.-Ing. habil.
Christian Füll

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 65

Potsdam-Bornim 2009

„Vom Agrarrohstoff zu neuen Produkten
– Verfahrens-technische Forschung im
Nacherntebereich“

Ehrenkolloquium anlässlich des
65. Geburtstages
von

Prof. Dr.-Ing. habil.
Christian Fürll

16. Mai 2008

BORNIMER AGRARTECHNISCHE BERICHTE

Heft 65

Potsdam-Bornim 2009

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam-Bornim

☎ (0331)-5699-0
Fax.: (0331)-5699-849
E-mail: atb@atb-potsdam.de
Internet: <http://www.atb-potsdam.de>

Mai 2009

Redaktion:

Dr. rer. agr. Thomas Hoffmann

Typografische Gestaltung:

Christine Bronowski
Andrea Gabbert

Die in diesem Band enthaltenen Beiträge wurden anlässlich eines Workshops zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Fürll am 16. Mai 2008 am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim vorgestellt.

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung dieses Berichtes oder von Teilen davon ist nur unter Quellenangabe bzw. mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), 2009

Inhaltsverzeichnis	Seite <i>page</i>
Vorwort	5
Verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich der Landwirtschaft	11
<i>Processing research in the post-harvest area of agriculture</i> Christian Fürll	
Modellierung der Fließeigenschaften von feinen kohäsiven Schüttgütern	32
<i>Modelling of the flow properties of fine cohesive powders</i> Jürgen Tomas	
Optimization of Inserts in Silos	60
<i>Optimierung von Siloeinbauten</i> Gisle G. Enstad	
Untersuchungen zur Auslegung von Mischsilos	82
<i>Investigations enhancing the design of gravity mixers</i> Günter Dau	
Konservieren von Halmgütern und Getreide als Futterstoffe für die Tierhaltung	95
<i>Preservation of crop and grain as animal feed for livestock</i> Christine Idler, Christian Fürll, Thomas Hoffmann	
Neuere Forschungen des ATB zur landwirtschaftlichen Trocknungstechnik	116
<i>Recent research on agricultural drying technology at ATB</i> Jochen Mellmann	
Modellrechnungen von Strömungsvorgängen in der Agrartechnik	134
<i>Computational Fluid Dynamics in Agricultural Engineering</i> Klaus Gottschalk	
Natural fibres and their potential in diversified applications	157
<i>Naturfasern und ihr Potential in verschiedenen Anwendungen</i> Ryszard Kozłowski	
Aktuelle Ernteverfahren für Industriefaserpflanzen	171
<i>Recent developments in harvesting systems for bast fibre crops</i> Hans-Jörg Gusovius	

**Pilot plant for the production of high value fibre boards from wet preserved
hemp 185**

*Pilotanlage zur Herstellung hochwertiger Faserwerkstoffplatten aus feucht-konserviertem
Hanf*

Ralf Pecenka, Christian Fürll, Christine Idler, Ljubomir Radosavljevic, Philipp Grundmann,
Detlef Ehlert

Fließeigenschaften von Schüttgütern aus dem Faserpflanzenaufschluss 194

Flow properties of bulk material from fibre decortication

Jürgen Runge, Steffen Schmidt

Neue Werkstoffe aus Naturfasern 210

New materials of natural fibres

Thomas Hoffmann, Dana Barthel



Vorwort

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Füll feierte am 16. Mai 2008 seinen 65. Geburtstag. Mit diesem Datum endete die fast 40 jährige aktive wissenschaftliche Tätigkeit von Christian Füll.

Nach dem Studium der Landtechnik an der Technischen Universität Rostock begann Christian Füll 1972 seine wissenschaftliche Laufbahn mit seiner Promotion A zum Thema „Ein Beitrag zum Berechnen von Dichten und Horizontaldrücken bei der Lagerung landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern“. Ab 1974 war Christian Füll Mitarbeiter in Bornim, dem damalige Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft und widmete sich zunächst dem Lagern landwirtschaftlicher Schüttgüter. Zu diesem Themenkomplex verteidigte er 1985 seine Promotion B. Das Institut in Bornim sollte bis zum Mai 2008 Mittelpunkt seines wissenschaftlichen Wirkens bleiben.

Zwölf Jahre lang, von 1996 bis 2008, leitete Christian Füll in Bornim die Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung. Unter seiner Leitung ist ein breitgefächertes Aufgabengebiet im Nacherntebereich bearbeitet worden, u.a. der Materialfluss in Hochsilos, das Schälen von Kartoffeln, die Klimatisierung von Lagerhäusern, das Trocknen von Getreide und Arzneipflanzen, Anbau und Ernte schnellwachsender Gehölze, die Aufbereitung von Faserpflanzen oder das Verdichten von Futterpflanzen im Silo. Stets war Christian Füll an einer ingenieurtechnischen Problemlösung interessiert und hat dahingehend seine Mitarbeiter gefordert und motiviert.

Viel Aufmerksamkeit widmete Christian Füll der Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen. Studienaufenthalte in Schweden, Norwegen, Russland, Kanada und Australien bildeten den Ausgangspunkt zu gemeinsamen Projekten.

Richtungweisend waren die Forderungen von Christian Füll nach Forschungsergebnissen, die zu einer Anwendung und damit zu einer Wertschöpfung in industriellen Unternehmen oder im ländlichen Raum führten.

Die Ausbildung und Förderung junger Menschen lag ihm immer am Herzen. Seit 1998 hatte Christian Füll eine Professur an der technischen Universität Rostock inne und lehrte darüber hinaus an der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus. Zahlreiche Diplomarbeiten und Dissertationen sind Zeugnis seiner erfolgreichen Tätigkeit.

Christian Füll hatte immer einen Blick für die Sorgen und Probleme seiner Mitarbeiter. In einer leistungsorientierten Gesellschaft keine Selbstverständlichkeit.

In Würdigung der Verdienste von Christian Füll wurde ihm dieses Ehrenkolloquium gewidmet. Die Referenten waren langjährige Fachkollegen. Das Kolloquium war der Versuch, die Spannweite eines erfüllten Berufslebens wiederzugeben.

Thomas Hoffmann

Laudatio

Lieber Christian,

es bereitet mir Freude, anlässlich Deines 65. Geburtstages eine Würdigung Deines Wirkens vorzunehmen.

Du stammst aus einer Bauernfamilie, die seit Generationen erfolgreich einen Bauernhof bewirtschaftet. Dein Großvater war nicht nur ein tüchtiger Landwirt, sondern auch ein technisch interessierter Mensch, der Inhaber mehrerer Patente für die Weiterentwicklung der Raussendorf-Strohpresen war. Vielleicht wurde dadurch bereits Dein Interesse an der Landtechnik geweckt.

Nach Abschluss des Landtechnikstudiums und der Promotion zum Thema:

„Beitrag zum Berechnen von Dichten und Horizontaldrücken bei der Lagerung landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern“

an der Universität Rostock im Jahr 1972 nahmst Du am 1. September 1974 eine Tätigkeit im Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft Potsdam-Bornim, Fachgebiet „Verdichten und Lagern“ des Bereiches Technik in der Tierproduktion auf.

Forschungsaufgaben zur Erhöhung der Funktionssicherheit und Qualitätssicherung von Trockenmischfuttersilos bildeten über viele Jahre die Arbeitsschwerpunkte von Dir. Nur wenigen ist es vergönnt, über so viele Jahre ein Arbeitsgebiet zu prägen. Mit Erfolg hast du unter anderem an der Verbesserung von Translations- und Ringschergeräten zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von Futterstoffen gearbeitet. Damit wurden die Grundlagen für eine optimale fließtechnische Dimensionierung von Trockenmischfuttersilos geschaffen.

Mit Deinen Forschungsergebnissen konnten wesentliche Verbesserungen in der Funktionssicherheit und Qualitätssicherung (Dosiergenauigkeit, Verminderung der Entmischung) von Trockenmischfuttersilos erreicht werden. Deine Ergebnisse waren in der Industrie gefragt. Mit der Arbeit „Lagern landwirtschaftlicher Schüttgüter in Behältern“ habilitierst Du Dich 1985 an der Universität Rostock, Sektion Landtechnik, in Vorträgen im Rahmen der KdT und in Kolloquien hast Du umfangreich Deine Forschungsergebnisse vorgetragen.

In den verschiedenen Entwicklungsphasen im Bornimer Institut nach der politischen Wende hast Du Dich aktiv für die Durchsetzung demokratischer Grundsätze eingesetzt. Wie zum Beispiel

- Bildung eines Direktoriums
- Vertrauensfrage der Leiter nach einheitlichen Grundsätzen
- Grundfragen der Verselbstständigung des Teiles Bornim des FZM

Du warst weiterhin Verbindungsperson zur Universität Hohenheim.

Entscheidend hast Du den Geist der künftigen Zusammenarbeit in Bornim mit geprägt, der von

Wahrhaftigkeit,
Vertrauen und
Verantwortungsbewusstsein

getragen war, so wie von der Bereitschaft, alle Kräfte für einen Fortbestand der landtechnischen Forschung in Bornim zu mobilisieren und an der Tradition des Hauses Bornim anzuknüpfen.

Christian, dafür danken wir Dir.

Untersuchungen zur Verminderung der Entmischung in Trockenmischfuttersilos waren auch nach der politischen Wende Gegenstand weiterer Untersuchungen in Zusammenarbeit mit ausländischen Kooperationspartnern. 1996 übernahmst Du die Leitung der Abteilung „Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung“ und stelltest Dich für die Arbeit im Vorstand des ATB zur Verfügung. Damit übernahmst Du Leitungsverantwortung nicht nur für die weitere Ausrichtung und Konsolidierung Deiner Abteilung, sondern des gesamten Instituts.

In Anerkennung Deiner Leistungen in Forschung und Lehre erfolgte im Februar 1998 die Berufung zum Professor durch die Universität Rostock.

Neue zukunftssträchtige Forschungsprojekte bestimmten zunehmend das Profil des ATB. Ein Schwerpunkt bildet darin die Naturfaserproduktion, dem Du als Programmverantwortlicher vorstehst. So konnten Forschungsarbeiten zum Thema „Trockenaufschluss von Naturfasern“ bis zur Errichtung von Pilotanlagen geführt werden.

Lieber Christian, ich erinnere mich gern an unsere jahrelange Zusammenarbeit, die durch Vertrauen, Kollegialität und menschliches Verständnis geprägt war.

Wir hatten viele gemeinsame Erlebnisse, an die ich gern zurück denke und die im beruflichen Alltag bemerkenswert geblieben sind.

Ich wünsche Dir und deiner Frau eine mit mancher Freude ausgefüllte Zeit.

Dein Georg Otto

Verehrte Festversammlung,

lieber Herr Prof. Fürll,

liebes Geburtstagskind!

Als Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirats gratuliere ich Ihnen heute sehr herzlich zu Ihrem Geburtstag und überbringe auch die Glückwünsche des wiss. Beirates.

„65 Jahre und kein bisschen alt“ muss und darf man sagen. Davon der größte Teil des Berufslebens in Bornim mit allen Höhen und Tiefen, mit der Wende und dem Neuanfang bis hin zur heutigen Situation des ATB.

- Sie Herr Fürll haben all das miterlebt, mit gestaltet und mitgetragen!
- Sie haben immer versucht Leistung zu bringen und zu fordern!
- Sie haben immer kritisch den Weg des Instituts hinterfragt und Sie waren unbequem, wenn Sie Zweifel an der Richtigkeit des Weges und der Entscheidungen hatten.
- Sie haben sich ganz und gar eingebracht. Ich kann mich eigentlich nicht erinnern, dass Sie an einer Sitzung des wiss. Beirates nicht teilgenommen hätten. Ich kann mich auch nicht erinnern, dass Sie an diesen Sitzungen nicht auch Ihre Stimme erhoben hätten. Vielmehr kamen auch dabei Ihre Beiträge und Ihre Ermahnungen immer zur richtigen Zeit.

Für all dies danken wir Ihnen, auch wenn es manchmal „unbequem“ war, sehr herzlich. Wir, der wiss. Beirat, brauchen diese Beiträge und diese Hinweise, denn das ATB hat eine schwierige Zeit bis zur nächsten Evaluierung vor sich und wir können diese nur gemeinsam meistern und anforderungsgerecht ausfüllen.

Ihnen und Ihrer Familie alles Gute, Gesundheit und Neugier auf das was kommt!

Nochmals herzlichen Dank und alles alles Gute!

Danke!

H. Auernhammer

Prof. i. R. Dr. Hermann Auernhammer
Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik
Technische Universität München
Am Staudengarten 2
85354 Freising-Weihenstephan

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Füll
Leibniz-Institut für Agrartechnik
Potsdam-Bornim e.V

On the occasion of your 65th anniversary and ending career please accept – on behalf of the Institute of Natural Fibres team and myself – our congratulations and thanks for your efforts and work on fibrous plants and processing of natural fibres. We are positive that your expertise and achievements in implementing technological improvements in agriculture will set the direction for the experts in this area for future progress. We take the opportunity to thank you, Professor, for long and always friendly cooperation with the Institute of Natural Fibres in Poznan. We thank you for your commitment to the scientific field that is so important for us. We sincerely hope that our cooperation will continue.

On this celebration we wish you long life in good health and prosperity, joy and happiness.

With our best regards

Prof. Dr. Ryszard Kozłowski
General Director
Institute of Natural Fibres

and his team

Verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich der Landwirtschaft

Processing research in the post-harvest area of agriculture

Christian Füll

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100
E-Mail: cfuerll@atb-potsdam.de

Kurzfassung

Die verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich der Landwirtschaft leistet neben dem Erarbeiten neuer kosten- und energieeffizienter Verfahren einen wichtigen Beitrag für das Erschließen zusätzlicher Einkommensquellen im ländlichen Raum. Es genügt nicht mehr, Agrarprodukte nur qualitätsgerecht bis zum Verbrauch zu lagern. Die durchgeführten Untersuchungen liefern Ergebnisse für die Verarbeitung zu verschiedenen Endprodukten im Lebensmittelbereich und neuer Werkstoffe und Energieträger.

Methodisch werden immer die Grundsätze der interdisziplinären Zusammenarbeit sowie die Einheit von Bestimmen der Eigenschaftsfunktionen der Agrarprodukte, Erarbeiten prozesstechnischer Grundlagen und Konzipieren neuer Verfahren verfolgt.

1 Einführung

Die Aufgabe der Landwirtschaft im klassischen Sinn bestand in der Vergangenheit vor allem in der Produktion von Agrarprodukten mit möglichst hohen Erträgen und niedrigen Kosten für die Weiterverarbeitung zu Nahrungsmitteln. Dies war für die Existenz der Betriebe meist ausreichend, wobei unternehmerische Fähigkeiten schon immer von Bedeutung waren. Der Landwirt ist gezwungen, für seine Produkte Abnehmer zu finden. Damit erlangt die Qualität der Produkte eine äußerst bestimmende Wertigkeit. Nur qualitativ gute und sehr gute Produkte lassen sich verkaufen. Ohne an dieser Stelle den Qualitätsbegriff näher erklären zu wollen, können die Qualitätskriterien vielleicht in eine Gruppe mit den Merkmalen Aussehen, Frische u. dergl. sowie in eine Gruppe mit den Merkmalen unbedenklicher Inhaltsstoffe unterteilt werden. Durch entsprechende Grenzwerte müssen gesundheitliche Risiken bei Mensch und Tier ausgeschlossen werden. Dies bedeutet neben dem Einhalten der Grenzwerte an schädlichen Inhaltsstoffen während der Wachstumsphase vor allem das Vermeiden von Verderbvorgängen, die zur Entwicklung von Pilzen und Toxinen führen, in der Zeit von der Ernte bis zum Verbrauch.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass der Landwirt zur Sicherung seiner Existenz Agrarprodukte mit hohen Erträgen zu möglichst niedrigen Kosten, geringen Verlusten, gesundheitlich unbedenklich und zu verkaufsorientierter Qualität erzeugen muss. Aber auch dies alles ist gegenwärtig nicht immer ausreichend. Um eine hohe Wertschöpfung zu bekommen, ist der Landwirt immer mehr gezwungen, die Agrarprodukte zu verkaufsfähigen Endprodukten weiter zu verarbeiten. Dies können sowohl Nahrungsmittel wie auch Energieträger aus Biomasse oder neue Werkstoffe sein. Um diese wichtige Aufgabe lösen zu können, muss der Landwirt mehr als in der Vergangenheit neben den wissenschaftlichen und praktischen Grundlagen der Landwirtschaft allgemeine und spezielle Verfahrenstechniken (Technologien) beherrschen. Dies hatte schon JOHANN BECKMANN (1739–1811) erkannt. Er gilt als der Begründer der allgemeinen Technologie als ganzheitliche Wissenschaft von der Technik und ihren Einsatzmöglichkeiten. Er gilt auch als Vater der Agrarwissenschaft und der Warenkunde. Mit dem Begriff Technologie (griech.: die Herstellungs- bzw. Verarbeitungslehre) werden alle Verfahren zur Produktion und Distribution von Waren und Dienstleistungen zusammengefasst. Der Begriff Technik bezeichnet die Anwendung einer Methode oder eines Prinzips. Die Technologie hingegen macht Aussagen über die Anwendung der verfügbaren Techniken (*"Was mache ich mit der Technik, wobei und wie setze ich sie ein?"*). Der Begriff "Technologie" bezeichnet also eine *Prozessorientierung* (BECKERT 1983)

Die Abteilung „Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung“ hat sich vor allem seit Gründung des Leibniz-Institutes für Agrartechnik mit den wissenschaftlichen Grundlagen der Verfahrenstechnik im Nacherntebereich der Landwirtschaft beschäftigt. Dazu gehören Untersuchungen zum Quantifizieren der Stoffeigenschaften von Agrarprodukten, die wissenschaftliche Durchdringung der Prozesse und das Ausarbeiten und Erproben neuer Verfahren.

2 Motivation

Optimierte und neue Verfahren im Nacherntebereich sind nicht nur hinsichtlich Qualitätssicherung und Verbesserung der Effektivität wichtig. Sie sind auch von essentieller Bedeutung für das Lösen von Problemen, die sich in den ländlichen Räumen eingestellt haben. Die geringer werdende Anzahl von Arbeitsplätzen in der Primärproduktion des Pflanzenbaus und der Tierhaltung hat zur Folge, dass aus dem ländlichen Raum immer mehr abwandern. Damit geht ein Kulturräum langsam verloren (N.N. 2007). Um dies zu verhindern, müssen zukünftig neben einem attraktiven Tourismus neue Einkommensquellen erschlossen werden (**Bild 1**).

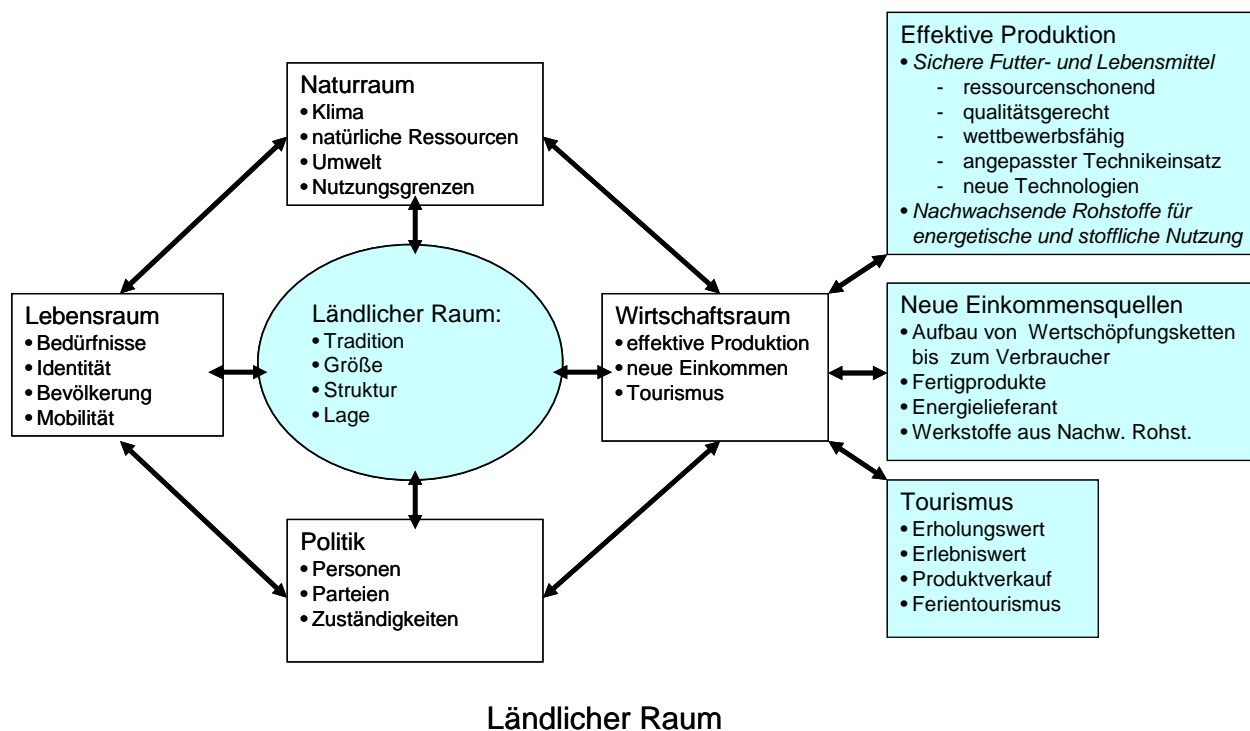


Bild 1: Der Ländliche Raum

Hierzu gehören vor allem der Aufbau neuer Wertschöpfungsketten mit neuen Fertigprodukten sowie das Erschließen biogener Rohstoffe für die Energiewandlung und für neue Werkstoffe. Damit kann die Landwirtschaft auch einen wichtigen Beitrag zum Lösen der Klimaproblematik leisten. Die Politik hat dies erkannt. Zu erwähnen ist allerdings, dass mit der Energiewandlung aus Biomasse bestenfalls 20 % des derzeitigen Energiebedarfs erschlossen werden können. Dringend notwendig ist deshalb die Verbesserung der Energieeffizienz in allen Prozessen. Hier liegen die weit größeren Reserven. Dies führt auch zu der Schlussfolgerung, dass Biomasse vor allem für die stoffliche Wandlung zu nutzen ist.

Aus all dem ergibt sich für die landtechnische Forschung im Nacherntebereich eine große Zahl von neu zu bearbeitenden Problemen und Aufgabenstellungen.

3 Methodische Grundsätze

Am Beginn aller Vorhaben sind kreative Ideen für neue verfahrenstechnische Lösungen zu finden. Schon hier muss interdisziplinär zusammengearbeitet werden. Kriterien für neue Verfahren sind nicht nur das Einsparen von Ressourcen, sondern auch Aspekte des Marktes und verbraucherorientierte Forderungen. Werden in dieser ersten Phase auch Fragen der Technikbewertung und Technikfolgeabschätzung positiv beantwortet, kann mit der technischen Forschung begonnen werden. Sehr oft sind dann zunächst die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften der Agrarprodukte und ihren pro-

zess- und verfahrenstechnisch bezogenen Produkteigenschaften zu bestimmen. Nach RUMPF (SCHUBERT 2003) werden diese Zusammenhänge als Eigenschaftsfunktionen bezeichnet. Parallel oder im Anschluss daran erfolgt die technische Forschung zu neuen prozesstechnischen Lösungen. Hier ist darauf zu achten, dass die Einordnung in das spätere Verfahren gesichert wird. Für die theoretische Durchdringung werden zunehmend moderne Werkzeuge verwendet. Das sind beispielsweise die Methode der Finiten Elemente (FEM), die diskrete Elemente Methode (DEM), numerische Verfahren der Strömungssimulation (CFD) und schließlich moderne 3-D-Konstruktionsmethoden. Die Untersuchung und Erprobung neuer Lösungen erfolgt sowohl im Labor wie auch unter Praxisbedingungen. Nach positiven technischen Untersuchungsergebnissen kann dann die Praxiseinführung geschehen. In der gesamten Bearbeitung muss ein ständiger interdisziplinärer Kontakt zur Technikbewertung und Technikfolgeabschätzung vorhanden sein.

4 Eigenschaften von Agrarprodukten

Eine wichtige Aufgabe für die Forschung im Nacherntebereich der Landwirtschaft sind Untersuchungen zu den vielfältigen Eigenschaften von Agrarprodukten. Nur auf dieser Grundlage können Verfahren optimiert und neue Verfahren ausgearbeitet werden. Rumpf (SCHUBERT 2003) hat den Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften von Stoffsystemen und deren Produkteigenschaften als Eigenschaftsfunktionen definiert (**Bild 2**).

Produkteigenschaften = f (Physikalische Eigenschaften)

$$PE = f (E_{i \text{ phys.}})$$

$$E_{i \text{ chem.}} = \text{const.}$$

Produkteigenschaften PE

Verarbeitung PE₁

- Filtrierbarkeit
- Ausformbarkeit
- Agglomerationsverhalten

Anwendung PE₂

- Farbe
- Wirkung
- Geschmack

Physikalische Eigenschaften E_{i phys.}

Dispersitätseigenschaften DE

- Größe
- Form
- Porosität
- Festigkeit
- Modifikation
- Grenzflächeneigenschaften

Bild 2: Eigenschaftsfunktionen nach RUMPF (zitiert in (SCHUBERT 2003))

Im Folgenden werden einige Eigenschaftsfunktionen von Agrarprodukten erläutert. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde stets Wert darauf gelegt, dass sie immer nur im Zusammenhang mit dem Optimieren oder Ausarbeiten von Prozessen und Verfahren vorgenommen wurden.

4.1 Verdichtungseigenschaften landwirtschaftlicher Halmgüter

Die Verdichtungseigenschaften landwirtschaftlicher Halmgüter sind nicht nur für die Entwicklung von Heu- und Stroh- oder Brikettierpressen wichtig. In Verfahren der Silagebereitung können mit der Kenntnis der Zusammenhänge zwischen den physikalischen Eigenschaften der Siliergüter und den Prozessparametern die Lagerungsdichte und die Druckverhältnisse in Silos berechnet werden.

Von der Lagerungsdichte wiederum hängen der Verlauf der Silierung und die Silagequalität ab. In den Versuchen wurde ein Presstopf benutzt, mit dem die Retardationseigenschaften wie auch die Horizontaldrücke bestimmt werden können (**Bild 3**).

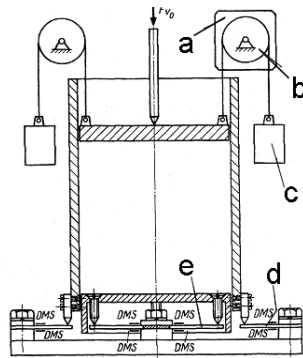
4.2 Fließeigenschaften von zerkleinertem Getreide

Kenntnisse zu den Fließeigenschaften von zerkleinertem Getreide werden für die fließtechnische und statische Berechnung von Silos für die Lagerung von Trockenmischfutter benötigt. So hängt das Ausfließen aus Silos, in Massenfluss oder Kernfluss, von den inneren Reibungsparametern und vom Wandreibungswinkel ab. Ebenso müssen für das Dimensionieren der Öffnungsgeometrie nach der Methode von JENIKE die Fließparameter des Stoffsystems bekannt sein. Neben der Zuverlässigkeit des Ausfließens ist das Vermeiden von unzulässig hoher Entmischung der Futterinhaltsstoffe während der Entnahme zu beachten. Werden Grenzwerte überschritten, hat dies Auswirkung auf die Tierleistung und evtl. auch auf die Tiergesundheit. Die Fließeigenschaften können nach der Methode von JENIKE mit einem Translationsschergerät gemessen werden. Für Getreideschrot ist aber eine Ringscherzelle besser geeignet (**Bild 4**).

Dichte = f (Physikalische Eigenschaften)

- Geometrie von Blättern und Stängeln
- Blatt/Stängel-Verhältnis
- Rohfasergehalt
- Trockenmassegehalt
- Biegefestigkeit der Halme und Blätter

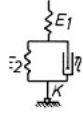
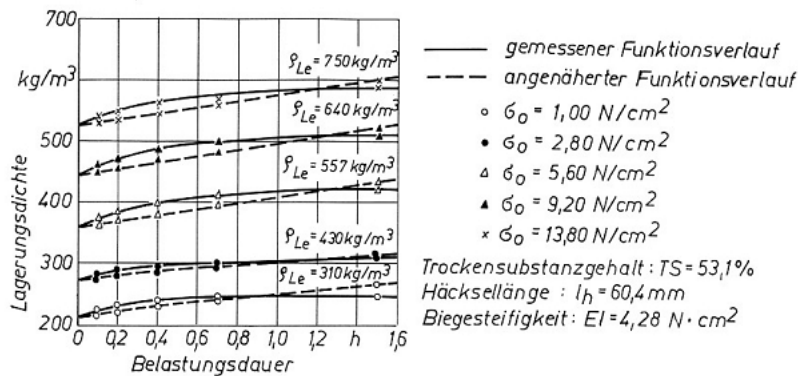
Methode



- a- Potentiometer
- b- Umlenkrolle
- c- Ausgleichmasse
- d- Reibkraftbiegebalken
- e- Bodendruckbiegebalken

Presstopf für einaxiale Verdichtungsversuche

Ergebnisse



σ_0 N/cm ²	E2 N/cm ²	η N · s /cm ²	E1 + K N/cm ²
1,0	12,7	$61,5 \cdot 10^3$	1,33
2,8	40,6	$512,0 \cdot 10^3$	3,45
5,6	107,1	$856,8 \cdot 10^3$	6,54
9,2	255,0	$2040,0 \cdot 10^3$	10,40
13,8	466,0	$4890,0 \cdot 10^3$	15,30

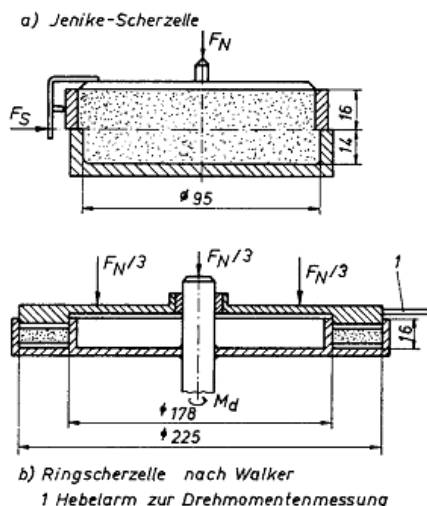
Retardationsverlauf für angewelktes Wiesengras

Bild 3: Retardationseigenschaften von angewelktem Wiesengras (FÜRLL 1972, FÜRLL 2007 a)

Fließeigenschaften = f (Physikalische Eigenschaften)

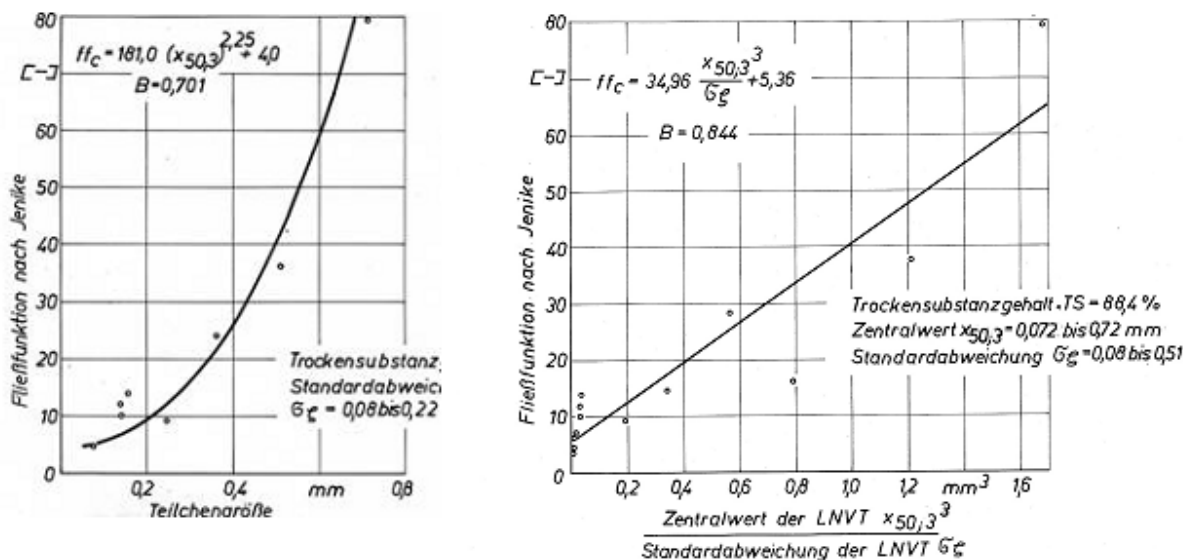
- Partikelgröße
- Partikelverteilung
- Partikelform
- Feingutanteil

Methode



Scherzelle

Ergebnisse



Fließfunktion nach JENIKE für Getreideschrot

Bild 4: Fließeigenschaften von zerkleinertem Getreide (FÜRL 1985,FÜRL 2007 b)

Die Fließeigenschaften, hier ausgedrückt durch die Fließfunktion nach JENIKE, werden vor allem beeinflusst durch die Teilchengröße und die Teilchengrößenverteilung (FÜRL 1985, FÜRL 2007 b).

Für die Berechnung der Fließ- und Druckverhältnisse mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) müssen weitere physikalische Eigenschaften bestimmt werden. Dies ist durch Triaxialversuche möglich (**Bild 5**) (SCHURICHT 2004, SCHURICHT & FÜRL 2008). Aus diesen Untersuchungen können vor allem exakte Spannungs-Dehnungsbeziehungen bei Erst- und Wiederbelastung gemessen werden. Sie dienen als Grundlage für das Formulieren von Fließfunktionen mit oder ohne Fließkappe.

4.3 Rheologische Eigenschaften von Kartoffeln

Die rheologischen Eigenschaften von Kartoffeln sind für viele Prozesse und Verfahren von Interesse. Beispielsweise existieren Zusammenhänge zwischen der Stoßempfindlichkeit und der Schwarzfleckigkeit. Grundlegende Untersuchungen wurden durchgeführt, um mit Hilfe der visko-elastischen Eigenschaften von Kartoffeln das Sprungverhalten beim mechanischen Schälen in einer Schälmaschine modellieren zu können (WINKELMANN 1999) (**Bild 6**). Hierzu wurden die rheologischen Eigenschaften der äußeren Umhüllung der Kartoffel mit Hilfe parallelgeschalteter Kelvinmodelle nachgebildet. Das Quantifizieren der Parameter der Strukturmodelle erfolgte in statischen und dynamischen Grundversuchen mit Hilfe eines Schwingtisches. Mit den ermittelten Eigenschaften kann die Aufprallstelle der Kartoffel nach erfolgtem Sprung auf der Schälplatte einer mechanischen Schälmaschine errechnet werden. Mit Hilfe eines Schnittmodells ist dann die Berechnung der Schältiefe möglich. In Abhängigkeit von den rheologischen Eigenschaften der Kartoffel und den Betriebsparametern der Schälmaschine wird schließlich die Schältiefe für jeden Punkt der Kartoffeloberfläche berechnet. Eine gleichmäßige Verteilung der Schältiefe bei möglichst geringer Schältiefe ist durch das Optimieren der Betriebsparameter der Schälmaschine möglich (WINKELMANN 1999, WINKELMANN *et al.* 2000).

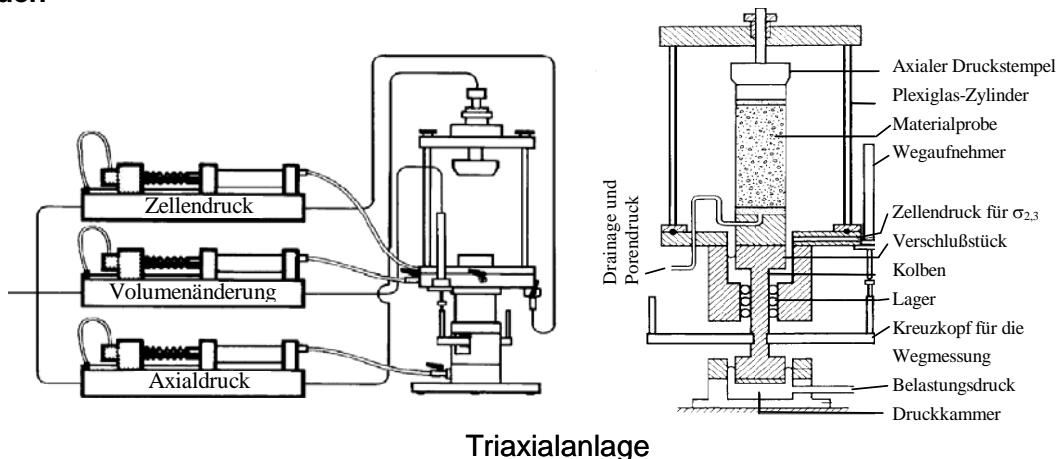
5 Grundlagen für das Optimieren von Prozessen im Nacherntebereich

Kenntnisse zu den Prozessen sind erforderlich, um neue komplette Verfahren erarbeiten zu können. Daraus ergibt sich, dass die Forschung an prozesstechnischen Lösungen immer nur dann erfolgte, wenn neue Verfahren im Nacherntebereich konzipiert werden sollten. So wurden in den vergangenen Jahren vor allem Prozesse für das Lagern, Verdichten, Zerkleinern, Klassieren, Trennen, Trocknen und Klimatisieren untersucht. Eine Auswahl an Ergebnissen soll nachfolgend erläutert werden.

σ, ε - Beziehung = f (Physikalische Eigenschaften)

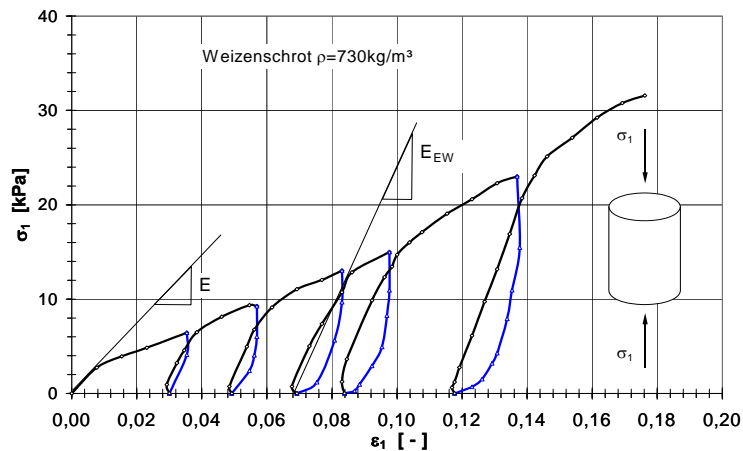
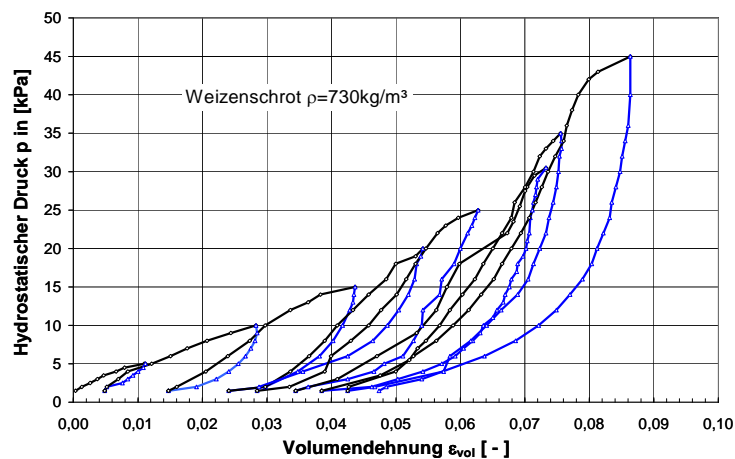
- Elastische Eigenschaften
- Plastische Eigenschaften
- Visko-elastische Eigenschaften

Methoden



Triaxialanlage

Ergebnisse



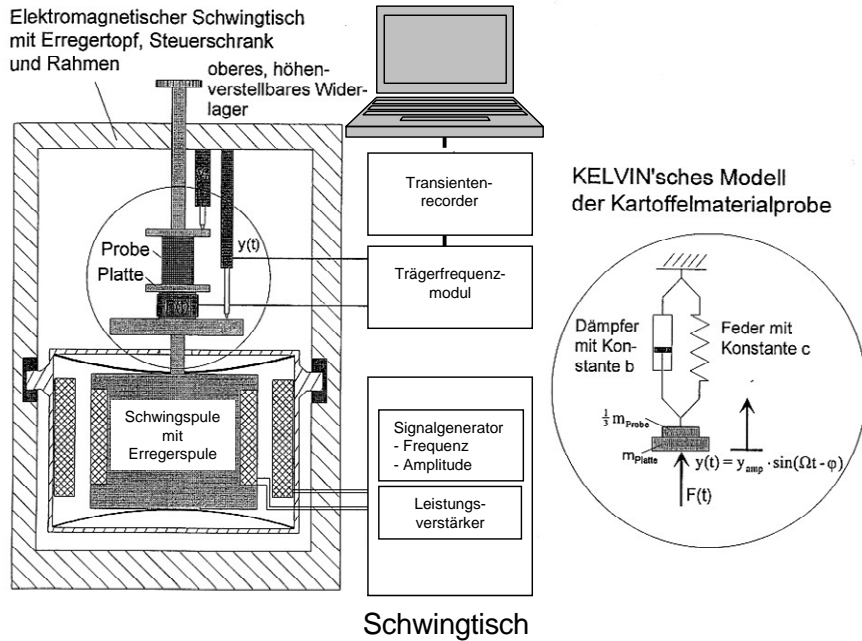
Kompressionsmodul und Elastizitätsmodul

Bild 5: Spannungs-Dehnungsbeziehungen von zerkleinertem Getreide in Abhängigkeit von den physikalischen Eigenschaften (SCHURICHT 2004)

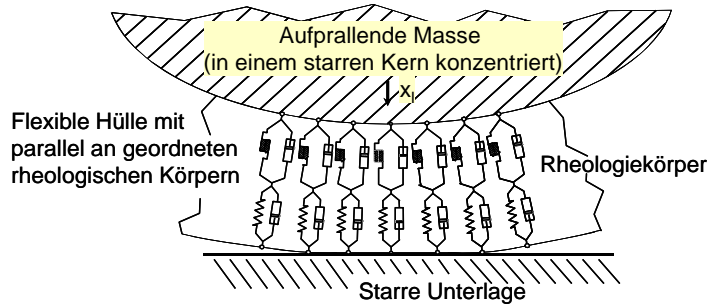
Stoßeigenschaften = f (Rheologische Eigenschaften)

- Elastische Eigenschaften
- Plastische Eigenschaften
- Dämpfungseigenschaften

Methode



Ergebnisse



Modellglied	Kraft-Bewegungs-Abhängigkeit
Plastizität I	$F_{P,I} = \begin{cases} c_p \cdot (x_{II} - x_I) & \text{für } \dot{x}_{II} < \dot{x}_I \\ 0 & \text{für } \dot{x}_{II} \geq \dot{x}_I \end{cases} \quad (4.22)$ <p>mit: c_p - Plastizierungskonstante</p>
Viskosität I	$F_{D,I} = b_I \cdot (\dot{x}_{II} - \dot{x}_I) \quad (4.23)$ <p>mit: b_I - Dämpfungskonstante I</p>
Elastizität II	$F_{E,II} = c_E \cdot (x_{III} - x_{II})^2 \cdot \text{sgn}(x_{III} - x_{II}) \quad (4.24)$ <p>mit: c_E - Elastizitätskonstante</p>
Viskosität II	$F_{D,II} = b_{II} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(b_{II,S} \cdot (\dot{x}_{III} - \dot{x}_{II})) \cdot x_{III} - x_{II} \quad (4.25)$ <p>mit: b_{II} - Dämpfungskonstante II</p> <p>$b_{II,S}$ - konstanter Stauchungsfaktor¹, $0 < b_{II,S} < \infty$</p>

Kraftgesetze für die rheologische Modellierung

Bild 6: Modellierung der Stoßeigenschaften von Kartoffeln (WINKELMANN 1999)

5.1 Optimale Anordnung von Siloeinbauten

In der Vergangenheit wurden in Unkenntnis der Fließeigenschaften von Schüttgütern weltweit Silos für Trockenmischfutter gebaut, die kein störungsfreies Ausfließen und keine entmischungsrduzierte Entnahme garantierten. Diese Probleme können durch das nachträgliche Installieren von Einbauten in den Siloauslauftrichtern nahezu behoben werden. Das Optimieren von kegligen Siloeinbauten erfolgte durch theoretische Betrachtungen, Modelluntersuchungen und in großtechnischen Untersuchungen (Scholz 1987). Das Umströmen der Kegel bewirkt ein Verbreitern des Fließprofils bis zum Massenfluss (**Bild 7** und **8**).

Kegeleinbauten mit der Spitze nach oben bewirken allerdings bei nicht exakter Montage und nicht symmetrischer Verteilung der Fließeigenschaften des Schüttgutes im Silo ein asymmetrisches Ausfließen. Diese Erscheinung wurde in Modell- und großtechnischen Untersuchungen mit Einbautrichtern nach dem „cone in cone“-Prinzip nicht beobachtet (**Bild 9**).

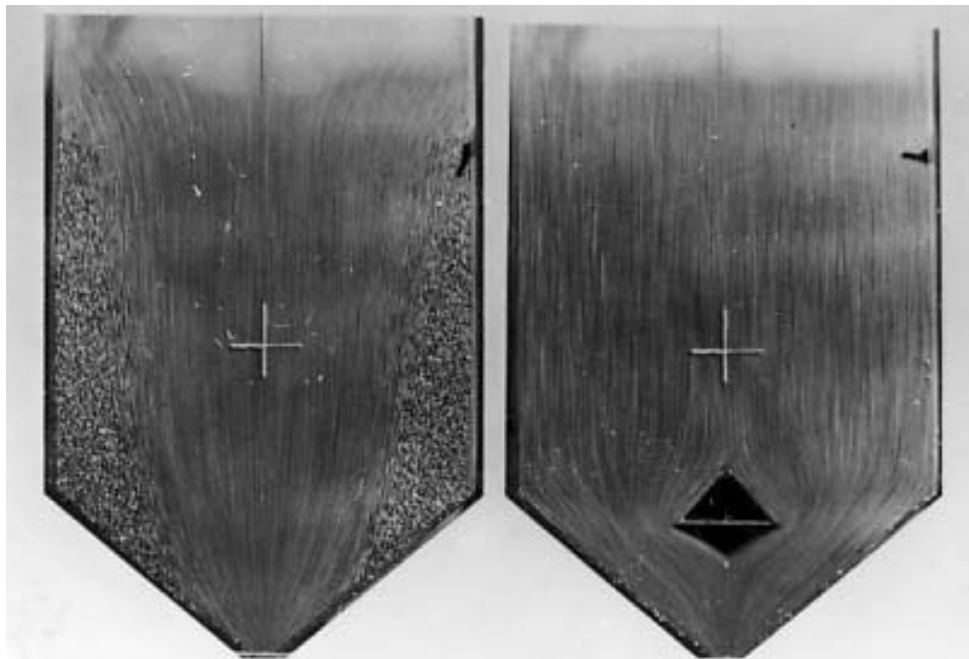


Bild 7: Optimieren des Fließprofils beim Ausfließen von Trockenmischfutter mit Hilfe von Kegeleinbauten (SCHOLZ 1987)

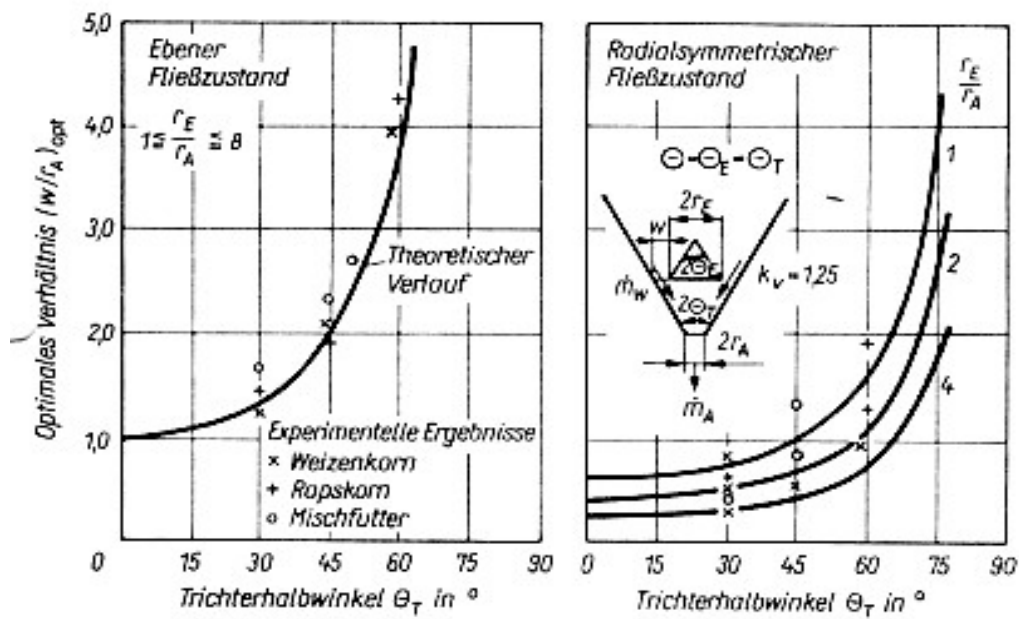


Bild 8: Optimale Geometrieparameter von Kegeleinbauten in Siloausläufen für Massenfluss bei der Entnahme von Trockenmischfutter, Weizen und Raps (SCHOLZ 1987)

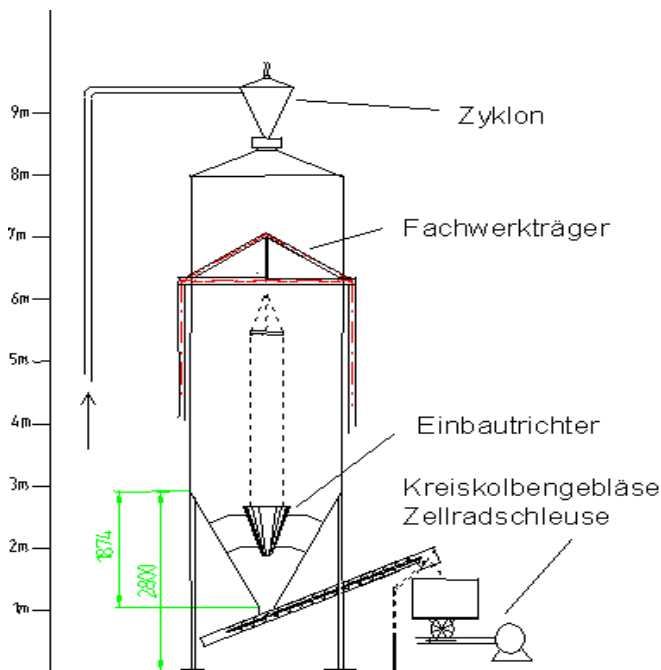
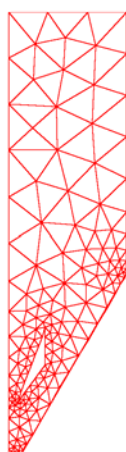
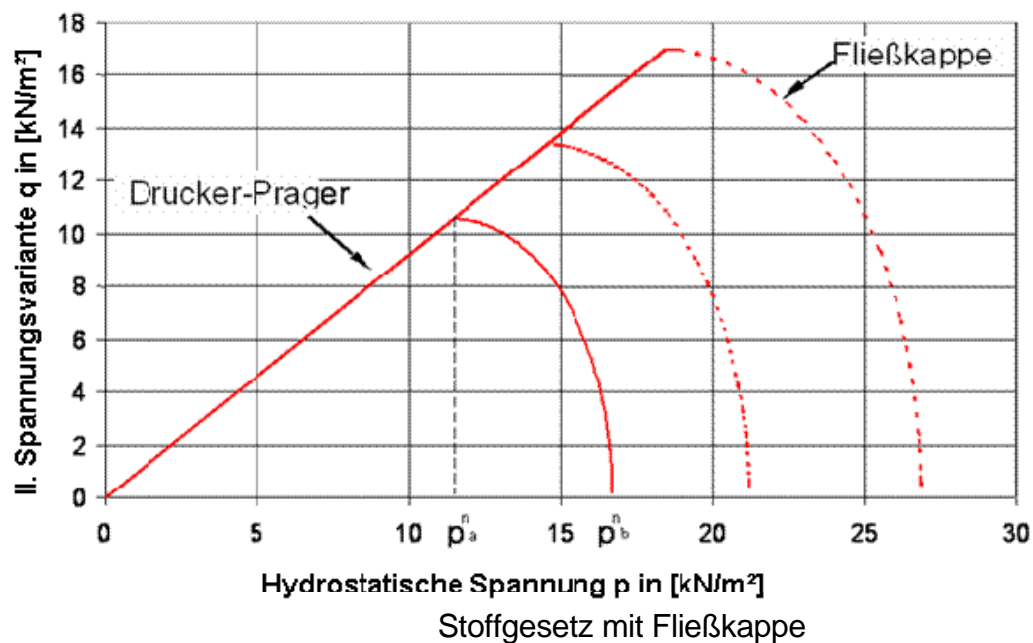
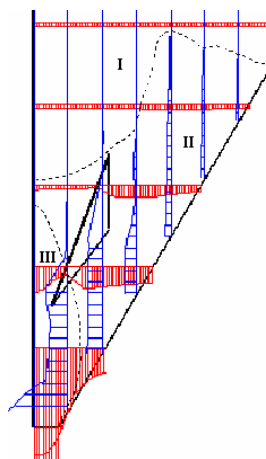


Bild 9: Großtechnische Untersuchungen zur optimalen Anordnung von „cone in cone“-Einbauten in Siloausläufen (HJORTAAS et al. 1997, SCHURICHT et al. 1999)

Die Berechnung des Fließprofils und der Silodrücke ist mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente und experimentell bestimmten Guteigenschaften möglich (**Bild 10**) (SCHURICHT 2004).



FEM – Netz



Berechnetes Geschwindigkeitsprofil

Bild 10: Berechnetes Fließprofil mit Hilfe der FEM-Methode und einem Stoffgesetz mit Fließkappe (SCHURICHT 2004)

5.2 Energiesparendes Zerkleinern von Getreide

Unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen müssen auch im Nacherntebereich unbedingt neue Lösungen für energieeffiziente Prozesse erarbeitet werden. Für die Getreidezerkleinerung erfolgt das Zerkleinern derzeit fast ausschließlich mit Hammermühlen, die

durch das Prallprinzip im Vergleich zu Walzenstühlen fast den 3-fachen Energiebedarf benötigen (FÜRLI *et al.* 1997). Sie haben den Vorteil des größeren Massestromes, sind aber für feuchtes, erntefrisches Getreide nahezu ungeeignet. Deshalb wurden Untersuchungen mit einer neuen Zerkleinerungsmethode nach dem Reibschneidscheibenprinzip durchgeführt mit der bei hohen Masseströmen ein mehr als die Hälfte geringerer Energiebedarf erzielt werden soll (**Bild 11**).

Die Ergebnisse zeigen, dass der Energiebedarf und der Ganzkornanteil beim Reibschneidscheibenprinzip tatsächlich geringer als bei Hammermühlen sind. Der Massestrom beträgt bei einem geringen maschinentechnischen Aufwand über 30 t/h. Die mittlere Korngröße ist allerdings momentan in einem Bereich, wo das Futter nur für die Rinderfütterung optimal ist. Für die Schweinefütterung muss dieses Prinzip weiter verbessert werden.

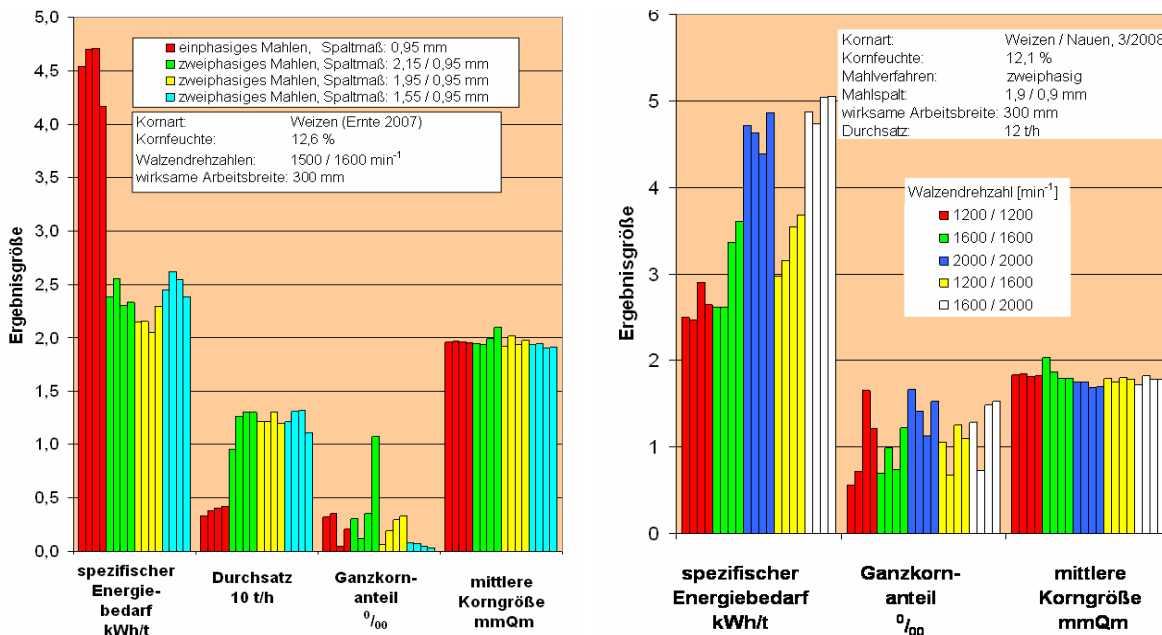
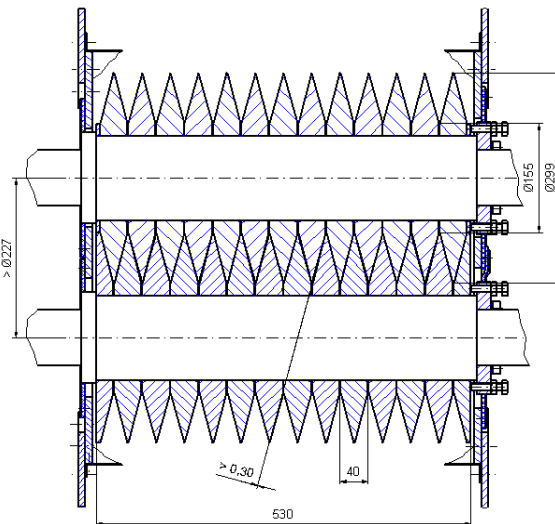


Bild 11: Ergebnisse aus Zerkleinerungsversuchen mit dem Reibschneidscheiben – Prinzip

5.3 Gewinnung von Naturfasern nach dem Prinzip des Prallaufschlusses

Naturfasern aus Hanf und Flachs eignen sich sehr gut für das Herstellen neuer Werk- und Dämmstoffe. Die textile Nutzung kommt ebenfalls in Frage, ist aber gegenwärtig nur von geringer Bedeutung. Die Vorteile liegen vor allem im geringen Primärenergiebedarf in der Herstellungsphase, bei Dämmstoffen z.T. nur 5%, in der geringen Eigenmasse und in der ausgeglichenen CO₂ – Bilanz. Die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe sind mit denen etablierter nahezu gleich. Im Bereich der Landwirtschaft existieren kaum Probleme. Hanf besitzt hervorragende bodenverbessernde Wirkungen. Der Aufwand an Dünger ist gering, Pflanzenschutzmittel werden überhaupt nicht benötigt. Probleme gibt es bei der Fasergewinnung aus dem Stroh. Die bisher üblichen Verfahren erfordern überwiegend eine Röste, die wiederum ungünstig für die Einordnung im Landwirtschaftsbetrieb und für die Qualität der Fasern ist. Es wurde deshalb intensiv an einem neuen Prinzip nach dem Prallaufschlussprinzip gearbeitet (**Bild 12**) (FÜRL & HEMPEL 1999).

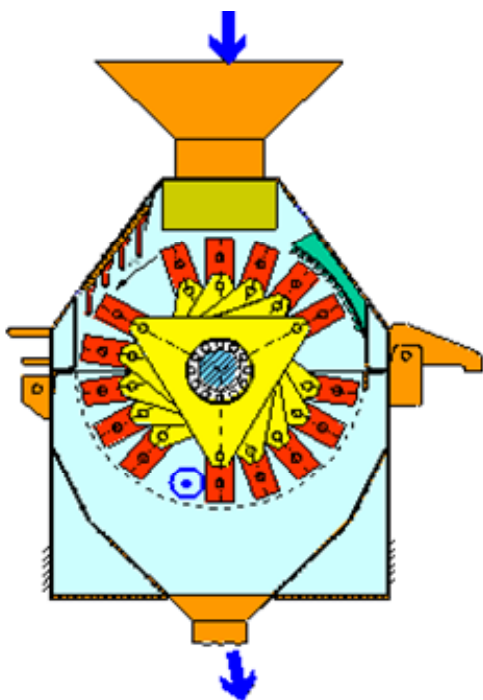


Bild 12: Faseraufschlussmaschine nach dem Prinzip des Prallaufschlusses (FÜRL & HEMPEL 1999)

Die Vorteile dieser neu entwickelten Maschine liegen vor allem im Verarbeiten auch von ungeröstetem Stroh, in der hohen Faserreinheit von < 4% Schäbenanteil und im gleichzeitigen Abscheiden von etwa 40% der gesamten Schäben in der Aufschlussmaschine (**Bild 13**).

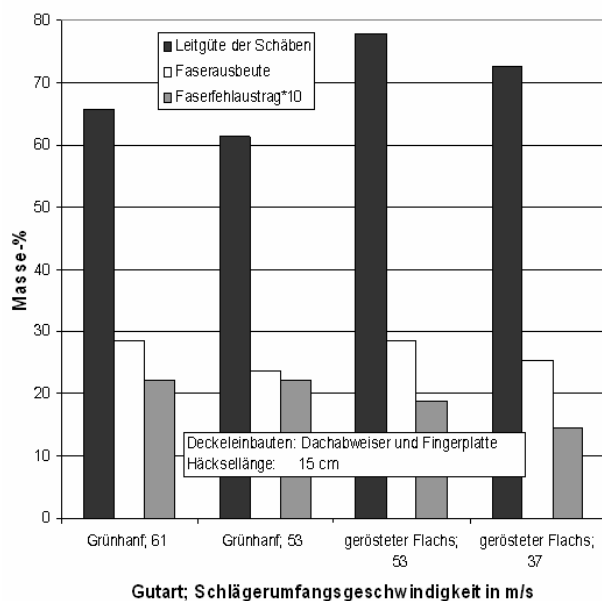


Bild 13: Faserausbeute, Leitgüte der Schäben, und den Faserfehlaustrag (Grünhanf, Flachs) beim Faseraufschluss nach dem Prallprinzip

6 Beispiele für neu entwickelte Verfahren

Mit der Kenntnis der physikalischen Eigenschaften der Agrarprodukte und neuer Erkenntnisse zu den Prozessgrundlagen können neue Verfahren konzipiert werden. Parallel dazu sind in interdisziplinärer Zusammenarbeit die Wettbewerbschancen der betreffenden Endprodukte zu untersuchen, um entsprechende Anlagen im landwirtschaftlichen Raum einordnen zu können.

In den vergangenen Jahren wurden vor allem neue Verfahren der Getreide- und Grobfuttermittellagerung und -konservierung, der Naturfasergewinnung, für neue biogene Werkstoffe und die Bereitstellung von Biomasse für die Energiewandlung untersucht. Über eine Auswahl an Ergebnissen soll im Folgenden berichtet werden.

6.1 Verfahren zur Konservierung von ertefeuchtem Getreide

Seit vielen Jahren werden etwa 70% des geernteten Getreides als Futtergetreide in der Tierhaltung eingesetzt. Der überwiegende Teil verbleibt davon im landwirtschaftlichen Betrieb und muss vor Verderb geschützt werden. Um Energie und Kosten zu sparen, erfolgt das Konservieren immer mehr ohne Trocknung. Die Feuchtkonservierung kann problemlos und ohne nennenswertes Risiko mit Konservierungsmitteln durchgeführt werden. Eine weitere Einsparung an Energie und Kosten ist möglich, wenn keine Konservierungsmittel verwendet werden und das während der Lagerung aus der Stärkeumsetzung entstehende CO₂ genutzt wird. Dazu wird das ertefeuchte Getreide unmittelbar nach der Ernte zer-

kleinert, in Silos eingelagert, verdichtet und luftdicht zugedeckt (**Bild 14**) (HOFFMANN 1998, FÜRLI *et al.* 1997).

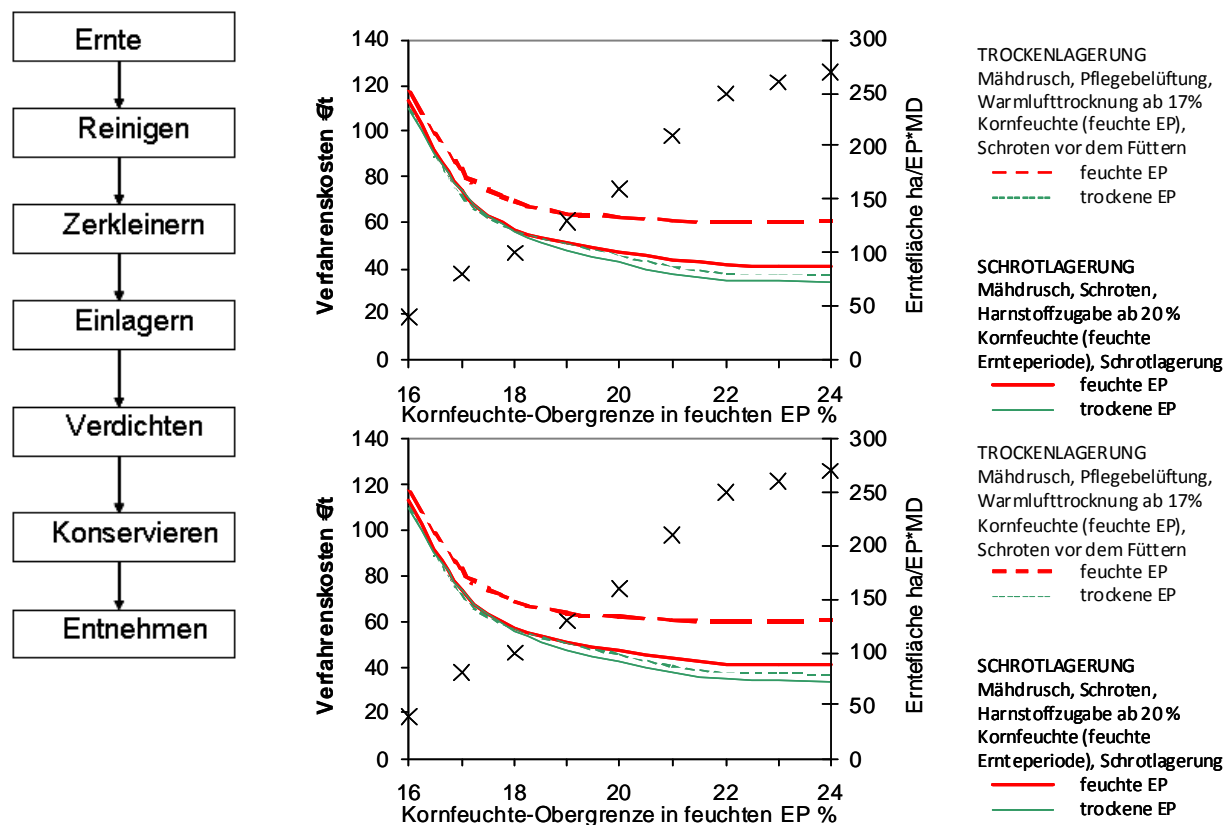
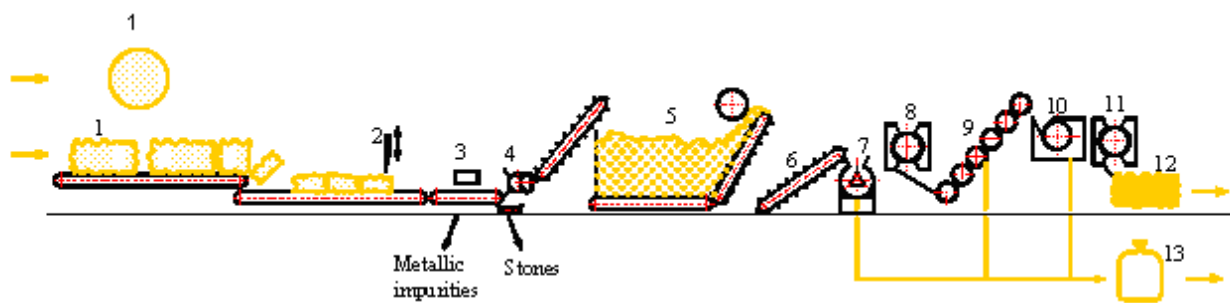


Bild 14: Verfahrensablauf und Ergebnisse zum Konservieren von ertefeuchtem Getreide ohne Konservierungsmittel (HOFFMANN 1997, FÜRLI *et al.* 1997)

Aus den durchgeführten Untersuchungen erhält man als Ergebnis, dass mit diesem Verfahren etwa 30% der Verfahrenskosten und mehr als 50% des Energiebedarfs gegenüber der Getreidetrocknung eingespart werden können.

6.2 Verfahren zum Gewinnen von Naturfasern

Mit der Renaissance der Naturfasern in den neunziger Jahren fehlte es vor allem für Hanf an effektiv arbeitenden Anlagen für die Fasergewinnung. Seitdem die Naturfasern durch die synthetischen Fasern vor mehr als 30 Jahren verdrängt wurden, gab es auf diesem Gebiet kaum noch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Zunächst wurden deshalb am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim die Prozessgrundlagen für den Faseraufschluss durch Prallbeanspruchung geschaffen. In den Folgejahren ist dann eine Anlage zum Aufschluss von Hanf- und Flachsfasern im Praxismaßstab entwickelt und erprobt worden (**Bild 15**) (MUNDER *et al.* 2004).



Anlagenschema



2-Ballenschneider



5-Dosierer



7-Aufschlussmaschine



9,10-Reinigung

Bild 15: Anlage zur Gewinnung von Naturfasern (MUNDER *et al.* 2004)

Die Anlage wurde in letzter Zeit durch eine effektive Schäbenreinigung ergänzt.

Die wesentlichen und in vielen Versuchen verifizierten Ergebnisse sind:

- Massestrom: 2,5...3,0 t/h
- Restschäbengehalt: Hanf/ Flachs/ Öllein: <2/4/6 %
- geeignet für geröstetes und ungeröstetes Stroh
- Kosten der Faserbereitstellung: ca. 50 ct/kg

Die Anlage arbeitet inzwischen in einem Landwirtschaftsbetrieb in Mecklenburg-Vorpommern.

6.3 Verfahren der Silagebereitung bei hohen Erntemasseströmen

Durch die Entwicklung neuer Erntemaschinen sind Masseströme bis zu 300 t/h bei der Ernte möglich. Dies erfordert eine sorgfältige logistische Planung für die gesamte Kette von der Ernte auf dem Feld bis zum Einlagern und Verdichten im Silo. Von primärer Bedeutung ist im gesamten Verfahren die Silagequalität. Verluste sind zu minimieren und das Entstehen von Pilze und Toxinen ist unbedingt zu vermeiden. Toxine sind Lebensmittelgifte. Sie sind in der Tierfütterung und über das Tier in den Nahrungsmitteln für die menschliche Ernährung auszuschließen. In Grundlagenuntersuchungen hat sich erwiesen, dass neben den Inhaltsstoffen bei der Ernte und einer luftdichten Zudeckung die La-

gerungsdichte nach dem Einlagern und Verdichten den größten Einfluss ausübt (**Bild 16**) (SCHMERBAUCH 1999, SCHMERBAUCH *et al.* 2006).

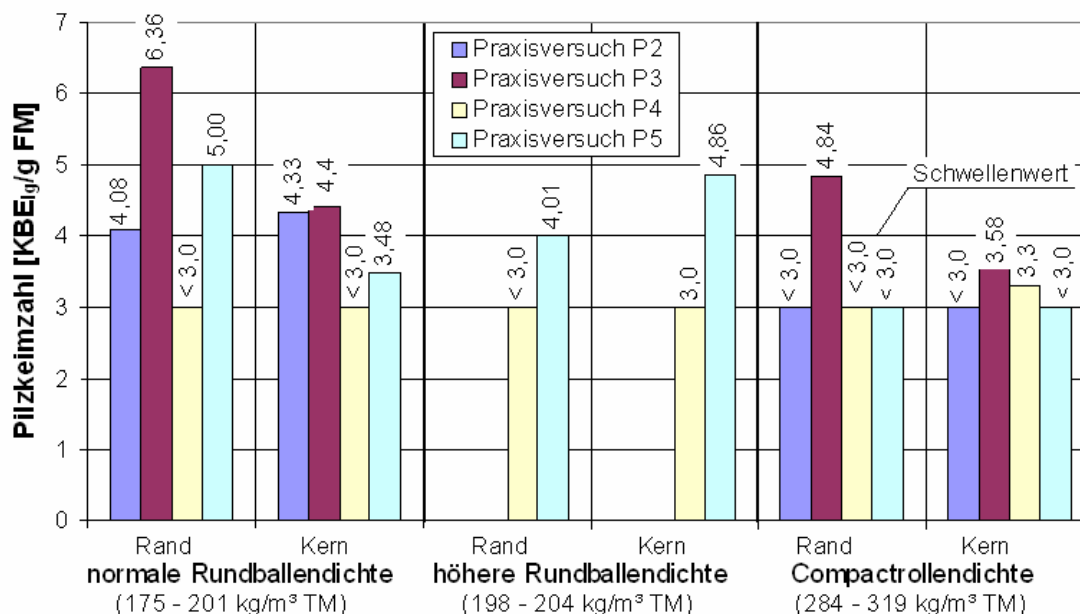


Bild 16: Pilzkeimzahl in Ballen-Silagen mit erhöhtem Rohfasergehalt in Abhängigkeit von der Ballendichte (SCHMERBAUCH 1999, SCHMERBAUCH *et al.* 2006)

Die geforderte Lagerungsdichte kann beim Einlagern in Horizontalsilos und Verdichten mit Traktoren aber nur erreicht werden, wenn entsprechende Verdichtungszeiten, bemessen in Traktorenminuten je t Originalsubstanz Siliergut [Trmin/t OS] aufgewendet werden. Danach müssen sich die Masseströme im gesamten Verfahren richten (**Tabelle 1**) (FÜRLL *et al.* 2007).

Tabelle 1: Notwendige Verdichtungseinheiten (Traktoren) beim Einlagern und Verdichten von Siliergut in Abhängigkeit vom Erntemassestrom und vom Trockenmassegehalt (FÜRLL *et al.* 2007)

Trockenmasse [%]	20	25	30	35	40	45
Verdichtungsaufwand [Tr-min./t OS]	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
Massestrom je Verdichtungseinheiten [t/h]	60	60	40	40	40	40
Verdichtungseinheiten [St.]						
100 t/h	2	2	3	3	3	3
200 t/h	4	4	5	5	5	5
300 t/h	6	6	8	8	8	8

7 Zusammenfassung

In der Vergangenheit wurden die geernteten Agrarprodukte in den Landwirtschaftsbetrieben vor allem verlustarm und qualitätsgerecht bevorratet, um sie in der eigenen Tierhaltung als Futterstoffe einzusetzen oder für die Nahrungsmittelherstellung an Unternehmen außerhalb der Landwirtschaft zu verkaufen. Damit entging ein bedeutender Teil der Wertschöpfung. Gegenwärtig gibt es zielgerichtete Bemühungen die Agrarprodukte mit einem gesteigerten Qualitätsanspruch selbst zu Nahrungsmitteln zu verarbeiten oder aus den agrarischen Rohstoffen neue Werkstoffe und Energieträger für die Energiebereitstellung herzustellen. Mit dem Aufbau neuer Wertschöpfungsketten sollen neue Einnahmen erschlossen werden, was entscheidend zu einer Belebung der ländlichen Räume beiträgt. In den vergangenen Jahren wurde deshalb intensiv an neuen Verfahren für die Herstellung wettbewerbsfähiger Endprodukte gearbeitet. Methodisch gliederte sich die wissenschaftliche Bearbeitung in das Bestimmen prozess- und verfahrensorientierter Eigenschaftsfunktionen von Agrarprodukten, in das Untersuchen kosten- und energieeffizienterer Prozesse und in Aufbau und Erproben neuer Verfahren im Nacherntebereich. Schwerpunkte waren Verfahren der Futterkonservierung, der Lagerung und Verarbeitung von Kartoffeln, der Herstellung neuer Werkstoffe aus Naturfasern und der Bereitstellung von Biomasse für die Energiewandlung.

8 Literatur

- BECKERT M. (1983):** Johann Beckmann. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner Band 68
- FÜRL CH. (1972):** Ein Beitrag zum Berechnen von Dichten und Horizontaldrücken bei der Lagerung landwirtschaftlicher Halmgüter in Behältern. Dissertation, Universität Rostock
- FÜRL CH. (1985):** Lagern landwirtschaftlicher Schüttgüter in Behältern. Dissertation B, Universität Rostock
- FÜRL CH., HOFFMANN TH., CH. IDLER (1997):** Untersuchungen zu Verfahren der Konservierung von erntefeuchtem, grobgeschrotetem Getreide. Agrartechnische Forschung 3 H.1: 67-77
- FÜRL CH., HEMPEL H. (1999):** Aufschluss von Hanffasern durch Prall. Landtechnik 54 (5): 286-287
- FÜRL CH. (2007 a):** Einaxiale Verdichtungsversuche für landwirtschaftliche Stoffe. Landtechnik 62: 148-149
- FÜRL CH. (2007 b):** Influence of the Granulometric Condition on the Flow properties of Crushed Grain Products. Bulk Solids & Powder Science & Technology (2): 55-62
- FÜRL CH., SCHEMEL H., IDLER CH., SCHOLZ V. (2007):** Anforderungen an die Logistik zur Sicherung hoher Silagequalitäten. Agrartechnische Forschung (Agricultural Engineering Research) 13 (6): 214-220
- HJORTAAS T., FÜRL CH., ENSTAD G.G. (1997):** Full Scale Silo Tests of the Cone in Cone Concept for Obtaining Mass Flow. The First European Congress on Chemical Engineering, Florence, May,4-7, Proceedings Vol. 2: 923-924

- HOFFMANN TH. (1998):** Gestaltung von Verfahren für die Ernte und Konservierung von Getreide auf der Grundlage witterungsbedingter Kornfeuchten. Dissertation Humboldt-Universität zu Berlin
- MUNDER F., FÜRL CH., HEMPEL H. (2004):** Advanced Decortication Technology for not retted Bast Fibres, Journal of Natural Fibers, The Haworth Press, English / Hazleton, PA (1): 49-65
- N.N. (2007):** Ein Dorf wird aufgegeben, wenn der Letzte wegzieht. Potsdamer Neueste Nachrichten. 22.Oktober 2007
- SCHMERBAUCH K.J. (1999):** Gärqualität und Schimmelpilzwachstum in Silagen in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und äußerem Luftabschluss. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin
- SCHMERBAUCH K.J., KAISER E., FÜRL CH., IDLER CH. (2006):** Einflüsse durch das Verdichten und den äußeren Luftabschluss auf die Qualität von Grassilagen - Ergebnisse und Anforderungen. Agrartechnische Forschung (Agricultural Engineering Research) 12 (12): 19-29
- SCHOLZ V. (1987):** Untersuchungen zur Anordnung koaxialer Einbauten in Schüttgutbehältern, Dissertation, Universität Rostock
- SCHUBERT H. (2003):** Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Weinheim
- SCHURICHT TH., FÜRL CH., ENSTAD G.G. (1999):** Full Scale Silo Tests of the "Cone in Cone" Concept for Mass Flow. Proceedings at the International Symposium "Reliable Flow of Particulate Solids III, 11-13. August 1999, Porsgrunn, Norway
- SCHURICHT TH. (2004):** Analysen des Fließverhaltens von Schüttgut in einem Kernflusssilo mit Einbautrichter. Dissertation TU Braunschweig, Braunschweig
- SCHURICHT TH., FÜRL CH. (2008):** Determining the bulk Material Stresses in an Orinally Core Flow Silo with subsequently installed Cone-in Cones. Bulk Solids & Powder – Science & Technology Vol. 3 No. 2: 89-96
- WINKELMANN J. (1999):** Untersuchungen zur Optimierung eines mechanischen Kartoffelschälers mit räumlich schwingender Messerplatte. Dissertation, Universität Rostock
- WINKELMANN J, FÜRL CH., SCHLOTTMANN G. (2000):** Modellierung der Stosseigenschaften von Kartoffeln. Landtechnik 55 (2): 154-155

Modellierung der Fließeigenschaften von feinen kohäsiven Schüttgütern

Modelling of the flow properties of fine cohesive powders

Jürgen Tomas

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Mechanische Verfahrenstechnik
Universitätsplatz 2, D - 39106 Magdeburg
E-Mail: juergen.tomas@ovgu.de

Zusammenfassung

Es gibt nur wenige Zweige einer Volkswirtschaft, in der nicht in irgendeiner Form Schüttgüter erzeugt, transportiert, umgeschlagen, gelagert, gewandelt, verarbeitet oder verbraucht werden. In der Partikeltechnik (z.B. chemische und pharmazeutische Technik, Landwirtschaft, Lebensmitteltechnik, Werkstofftechnik) wird der energiesparenden Erzeugung gezielter physikalisch-chemischer Produkteigenschaften besondere Beachtung geschenkt.

Zunächst werden die neuen Methoden in der mechanischen Verfahrenstechnik, denen sich auch der Jubilar verpflichtet fühlte, als Übersicht vorgestellt und diskutiert. Danach wird mit Hilfe des neuen Modells *steife Partikel* mit *weichen Kontakten* die elastisch-plastische Repulsion bei Normalbelastung eines glatten Kugelkontaktes erläutert. Die anziehenden van der Waals-Kräfte lassen sich mit einem Kugel-Kugel-Modell ohne jegliche Kontaktdeformation und zusätzlich mit einem Platte-Platte-Modell für weiche inelastische Kontakte beschreiben. Die Kraft-Weg- und Moment-Winkel-Pfade des elastisch-plastischen und reibungsbehaftetes Kontaktgleitens, -rollens und -verdrehens (Torsion) mit lastabhängiger Haftung für Belastung, Entlastung, Wiederbelastung und Kontaktablösung werden vergleichend diskutiert.

Davon ausgehend werden die drei Fließbedingungen eines Pulverkontinuums (beginnendes und stationäres Fließen, Verfestigung) auf partikelmechanischer Grundlage formuliert. Damit ist der unmittelbare Einfluss des Kontaktverhaltens auf das Fließverhalten analytisch darstellbar. Damit können die Zusammenhänge zwischen Kontaktnachgiebigkeit, Haftkraftverstärkung und Pulverfließfähigkeit auf physikalischer Grundlage beurteilt werden.

Mehr als 30 Jahre praktische Erfahrungen zeigen, dass sich die mechanischen Eigenschaften feiner Partikelkollektive und ihre Antwortfunktionen auf extreme Beanspruchungs- und Fließzustände bei verfahrenstechnischen Prozessen, Lager- und Fördervorgängen ausgezeichnet beurteilen lassen.

Schlüsselwörter: Schüttgut, Fließverhalten, Kontaktmechanik, Haftkräfte, Stoffgesetze

1 Einleitung und Problemstellung

Es gibt nur wenige Zweige einer Volkswirtschaft, in der nicht in irgendeiner Form disperse Feststoffe (Schüttgüter, Partikelkollektive) erzeugt, transportiert, umgeschlagen, gelagert, verfahrenstechnisch gewandelt, verarbeitet oder verbraucht werden. Bei den wichtigsten mechanischen Prozessen, wie Trennen und Mischen, Zerkleinern und Agglomerieren, aber auch bei thermischen Prozessen, wie z.B. Kristallisieren, Trocknen oder bei den Partikelsynthesen in der chemischen Industrie bzw. Grundstoffindustrie, Pharmazie, Landwirtschaft, Leicht- und Lebensmittelindustrie, Metallurgie, Glas- und Keramikindustrie, Baustoffindustrie, Energiewirtschaft sowie den modernen Technologien in der Umweltschutztechnik, Werkstofftechnik, Biotechnik und selbst auch in der Elektronik müssen disperse Feststoffe gelagert, gefördert und dosiert werden. Die Anzahl der in einer hochentwickelten Volkswirtschaft als Rohstoffe, Hilfsstoffe, Zwischenprodukte und Fertigerzeugnisse vorkommenden dispersen Feststoffe dürfte vielleicht einige Hunderttausend, wenn nicht sogar Millionen, erreichen, und nahezu täglich erhöht sich deren Zahl, da entsprechend den Marktanforderungen immer speziellere Kundenwünsche zu befriedigen sind.

Dieses Querschnittsgebiet wird innerhalb Verfahrenstechnik als *Partikeltechnik* oder *Partikeltechnologie* bezeichnet und umfasst im engeren Sinne die chemische und pharmazeutische Technik, Werkstofftechnik und Lebensmitteltechnik. Die Partikeltechnik als Bestandteil der technischen Wissenschaften versteht sich als Mittler zwischen den Natur- und Stoffwissenschaften (Physik, Chemie und Biologie) auf der Nano- und/oder Mikroskala und dem praktischen Maschinen- und Anlagenbau auf der Makroebene. Die Partikeltechnik hat sowohl die Untersuchung der physikalischen Grundlagen der Wechselwirkungen von Partikeln untereinander zum Ziel als auch das Verstehen des mechanischen Verhaltens *disperser Partikelkollektive* beim Erzeugen, Mischen, Trennen, Umwandeln, Verpressen, Formulieren, Anwenden oder beim Verbrauchen. Dies beinhaltet Partikel aller Größen, die man gewöhnlich in die Stoffklassen *Schüttgut* (typischer Durchmesser $d > 100 \mu\text{m}$), *feindisperse* ($d < 100 \mu\text{m}$), *ultrafeine* oder *hochdisperse* ($d < 10 \mu\text{m}$) und *nanodisperse* ($1 < d < 100 \text{nm}$) Partikelkollektive oder Partikelkollektive unterteilt.

Die überwiegende Zahl mineralischer Rohstoffe und Konzentrate, Hilfsstoffe, landwirtschaftlicher und synthetischer disperser Feststoffprodukte wird in Partikelgrößen kleiner als $100 \mu\text{m}$ erzeugt.

Diese Stoffsysteme weisen eine Reihe recht problematischer Produkteigenschaften auf (BORHO 1991). Die interpartikulären Haftkräfte (van der Waals-Kräfte) feindisperser Partikelkollektive übersteigen die Gewichtskräfte um mehrere Größenordnungen, siehe **Tabelle 1** zweite Zeile. Das führt zur der unerwünschten Haftung von Staub- oder Schmutzpartikeln. Wenn Partikel auf eine feste Unterlage angepresst werden, steigen ihre Haftkräfte um ein Vielfaches an, **Tabelle 1**, dritte Zeile. Das Bedrucken von Papieroberflächen mit Farbpartikeln ist ein altbekanntes Beispiel eines gewünschten Haftvorganges. Diese Haftkräfte sind prozessbestimmend bei einer Vielzahl industrieller Stoffwandlungsprozesse, makroskopischer Förder-, Transport- und Handhabungsvorgänge und bei den Produktanwendungen.

Tabelle 1: Übersicht über die Eigenschaftsfunktionen. Prozess- und Handhabungsprobleme kohäsiver Pulver

Eigenschaft, Probleme	Physikalisches Wirkprinzip	Physikalischer Bewertungsmaßstab der Produktqualität			Partikelgrößen d in µm
		Physikalisches Gesetz	Bewertungsgröße	Werte-bereich	
Großes Haftvermögen (RUMPF 1974)		$\frac{F_{H0}}{F_G} = \frac{C_{H,sls}}{2\pi g \cdot a_0^2 \cdot \rho_s \cdot d^2}$	$\frac{\text{Haftkraft}}{\text{Gewicht}} \approx \frac{(100 \mu\text{m})^2}{d^2}$	1 - 100 100 - 10 ⁴ 10 ⁴ - 10 ⁸	10 - 100 1 - 10 0,01 - 1
Große Haftkraftverstärkung (TOMAS 2004)		$k = \frac{k_p}{k_A - k_p}$	Kontaktverfestigungskoeffizient κ durch Deformation	0,1 - 0,3 0,3 - 0,77 > 0,77	< 10 < 1 < 0,1
Schlechte Fließfähigkeit (TOMAS 2004)		$ff_c = \frac{\sigma_1}{\sigma_c}$	Fließfunktion ff _c	2 - 4 1 - 2 < 1	< 100 < 10 < 0,1
Große Kompressibilität (TOMAS 2004)		$\frac{\rho_b}{\rho_{b,0}} = \left(1 + \frac{\sigma_{M,sl}}{\sigma_0}\right)^n$	Kompressibilitätsindex n	0,05 - 0,1 0,1 - 1	< 100 < 10
Geringe Permeabilität (FÖRSTER 1986, TERZAGHI et al. 1996)		$u = k_f \cdot \frac{\Delta h_w}{\Delta h_b}$	Permeabilität k _f in m/s	< 10 ⁻⁹ 10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁵	< 1 1 - 10 10 - 100
Schlechte Fluidisierbarkeit (GELDART 1982, MOLERUS 1982)		$\Delta p = f(u(d_{\text{pore}}))$	Druckverlust Δp (Kanalarbildung)	> ρ _s g · Δh _B	< 10

Ein feines Partikelkollektiv verhält sich kohäsiv (bindig) wie ein ziemlich unvollkommener Festkörper, **Tabelle 1** vierte Zeile. Es kann verhärtet (salzhaltige Gewürzmischung), ist in der Regel kompressibel (wie ein Schneeball) und kann deshalb wie ein Gas verdichtet werden, **Tabelle 1** fünfte Zeile. Allerdings verbleibt das Pulver nach seiner vollständigen Entlastung beharrlich in einem Zustand hoher Dichte und Verfestigung. Dieses inelastische Verhalten wird als Vorverfestigung bezeichnet, was typisch für das mechanische Verhalten eines kohäsiven Pulvers ist. Die Folge ist eine enorme Verstärkung der Haftwirkungen der Partikelkontakte durch äußere eingeprägte Kräfte, die beispielsweise beim Bedrucken von Papier, beim Brikettieren oder beim Tablettieren pharmazeutischer Wirkstoffe ausgenutzt wird.

Allerdings weist schon ein gering bis moderat vorverfestigtes Pulver einen sehr hohen Durchströmungswiderstand auf, **Tabelle 1** sechste Zeile. Es ist deshalb auch nur sehr schwer fluidisierbar und zeigt eine ausgeprägte Kanalbildung (Schwachstellen in der Packung), **Tabelle 1** siebente Zeile.

Beim beginnenden Fließen dehnt sich jedoch eine Partikelpackung wieder aus (Dilatanz) (ROWE 1962, HORNE 1969). Kurzzeitig wird in der Packung ein Porenunterdruck erzeugt und in die sich vergrößernden Porenräume kann entweder umgebendes Wasser oder Luft eingesaugt werden. Bei anschließender Verdichtung (kurzzeitiger Porenüberdruck) werden unter Umständen die stabilisierenden Haft- und Reibungskräfte zwischen den Partikelkontakten aufgehoben. Die möglicherweise schlimmste Folge ist in der Natur ein völlig unkontrollierbares und lawinenartiges Fließen ähnlich einer niedrigviskosen Flüssigkeit (Schlamm- oder Schneelawinen). Oftmals zeigen kohäsive Schüttgüter gerade die Fließphänomene, die gerade am wenigsten erwartet werden, und die sowohl in der technischen Praxis als auch in der Natur zu den meisten Problemen führen.

Diese insbesondere verfahrenstechnischen Probleme treten praktisch leider ziemlich häufig auf. Sie führen zu schwerwiegenden funktionellen Problemen durch Fließstörungen infolge Anbackungen, Selbstfluidisierung oder Lawinenbildung, schwankende Mengenströme, Entmischungen, zu breite Verweilzeitverteilungen verbunden mit der Gefahr von Zeitverfestigungen, von unerwünschten Stoffumwandlungen, der Explosionsgefahr oder der Verderbgefahr. Mangelhafte Mengenstrom- bzw. Qualitätskontrolle sowie Havariegefahr durch Verschleiß und Überlastungen der Konstruktion der Schüttgutförderer sind weitere ernste Probleme. Letzte Konsequenz sind Produktionsausfälle und schließlich die mangelhafte Verfügbarkeit des Verfahrens bzw. der gesamten Anlage.

2 Problemlösung mit neuen Modellierungs- und Simulationsmethoden

Eine tiefgründige Betrachtung zur Lösung der im Vorstehenden genannten vielfältigen technologischen Probleme erscheint aus der Sicht einer methodisch zweckmäßigen Kom-

bination von Partikel- und Kontinuumsmechanik sowohl wissenschaftlich als auch praktisch angewandt, als ausgesprochen lohnenswert.

2.1 Multiskalige hierarchische Ordnung in der Partikeltechnik

In den siebziger und achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde in Freiberg und Merseburg Bahnbrechendes zur Entwicklung neuer hierarchischer – heute sagt man – multiskaliger Modellierungsmethoden in der Verfahrenstechnik geleistet, siehe Schubert u.a. (SCHUBERT 1980).

Zielrichtung der Forschungsarbeiten in der Partikeltechnik ist eine anspruchsvolle Palette praktisch relevanter physikalischer und chemischer Stoffwandlungsprozesse. In Anbetracht des erreichten Entwicklungsstandes gilt es als sicher, dass signifikante Produktivitätssteigerungen insbesondere auf der Basis einer ganzheitlichen und systemorientierten Analyse aller ein Gesamtverfahren ausmachenden Prozesselemente möglich sein werden. Dazu müssen, abweichend vom klassischen Prinzip der Grundoperationen, alle für eine zielgerichtete Stoffwandlung relevanten Ebenen – von subnanoskaligen Molekülen, funktionellen Gruppen und Mikroporen, Partikel, Schwärme, Schichten, Filme und Apparatzonen, verschaltete Prozesse und Verfahren, Verfahrensketten bis hin zu den globalen Stoffkreisläufen und Stoffverbundsystemen – gemeinsam und in ihrem komplexen Zusammenwirken betrachtet werden (**Bild 1**).

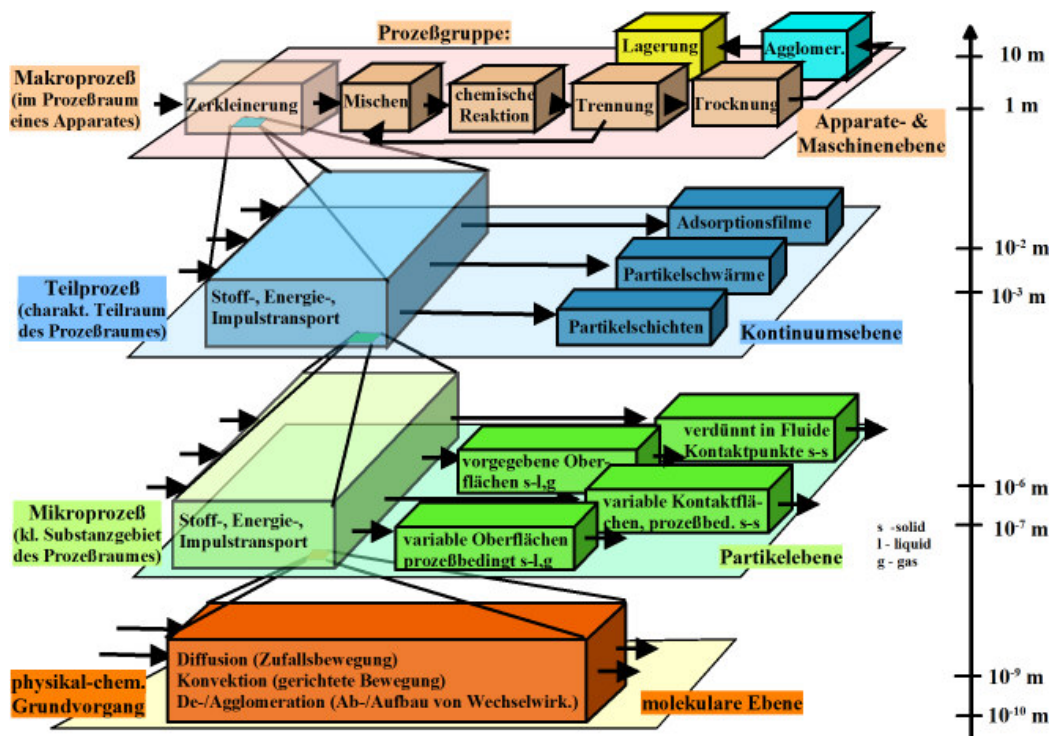


Bild 1: Typische multiskalige Struktur der Untersuchungsmethoden der verfahrenstechnischen Wandlung disperser Partikelkollektive und ihrer hierarchischen Untergliederung in physikalisch-chemische Grundvorgänge, Mikro-, Teil- und Makroprozesse sowie Prozessgruppen.

Ausgangspunkt hierfür muss ein detailliertes Verständnis der physikalisch-chemischen Grundvorgänge sein. Darauf aufbauend kann eine verbesserte quantitative Beschreibung, Modellierung und Simulation einzelner Prozesse und Apparate erreicht werden. Zur Analyse der Wechselwirkungen und Kombinationen bei der komplexen Verschaltung mehrerer Prozesselemente und -gruppen ist eine ganzheitliche Betrachtung notwendig, die das moderne Profil der Partikeltechnik im Allgemeinen und der Mechanischen Verfahrenstechnik im Besonderen prägen wird.

2.2 Neue Methoden in der Mechanischen Verfahrenstechnik

In der Mechanischen Verfahrenstechnik wurde die mikromechanische Betrachtungsweise des Fließens kohäsiver Pulver zuerst von MOLERUS 1975 und 1985 eingeführt und danach vom Autor (TOMAS 1983 und 1991) konsequent weitergeführt, ergänzt und deutlich erweitert (TOMAS 1997, TOMAS 2004a)

Unabhängig davon wurde in der Physik die *Molekulardynamik* (MD) von ALDER u.a. (ALDER 1959 und 1980) und in der Gebirgsmechanik die *Diskrete-Elemente-Methode* (DEM) von CUNDALL und STRACK (CUNDALL & STRACK 1979) entwickelt. Die *Mikromechanik* des schnellen und kollisionsbehafteten Fließens kohäsionsloser (d.h. nicht-haftender, rieselfähiger bzw. freifließender) Partikel wurde beispielsweise von SATAKE & JENKINS 1988 und NEDDERMAN 1982 und 1992 modelliert. TARDOS 1997 diskutierte wiederum das langsame reibungsbehaftete Fließen und den Übergangsbereich (intermediate flow) zum schnellen Fließen kompressibler kohäsionsloser Pulver (TARDOS *et al.* 2003) aus der Sicht der *Fluid-dynamik*. Kürzlich wurde eine Vielzahl an Beiträgen zum *Fließen granularer Medien* in Büchern zusammengestellt (HINRICHSSEN & WOLF 2004 und WALZEL *et al.* 2006). Erste Ansätze zur multiskaligen Modellierung in der Nanomechanik wurden ebenfalls bekannt, bei der die Methoden der Molekulardynamik, *Thermodynamik* und der *Finite-Elemente-Methode* (FEM) kombiniert werden (LIU *et al.* 2006).

Kontinuumsmechanische Methoden werden bei der phänomenologischen Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Böden und Lockergesteinen bevorzugt (TERZAGHI *et al.* 1996, FÖSTER 1986, KOLYMBAS 1988). Charakteristisch für die Betrachtungsweise der *Bodenmechanik* innerhalb des Bauwesens ist, dass Grenzzustände, die die Stabilität von Böden und Untergrund von Gebäuden gefährden und zum inelastischen Fließen führen, äußerst unbeliebt sind. Bei den Auslegungsrechnungen ist folglich der Baustatiker bestrebt, die Belastungen so zu gestalten, dass die Fließgrenzen der Böden mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit unterschritten werden.

Demgegenüber müssen in der Verfahrenstechnik die Schüttgüter bei Lagerung, Transport und Handhabung *sicher* zum *Fließen* gebracht werden. Deshalb müssen diese Grenzzustände des Fließens hier sehr genau untersucht werden. Diesbezügliche zusammenfassende Darstellungen des jeweiligen Standes des Wissens der Kontinuumsmechanik kohäsiver Schüttgüter finden sich beispielsweise bei SCHWEDES 1970 und 2003 oder SCHULZE 2006 und 2008.

Parallel dazu haben sich in jüngster Zeit die *diskreten Partikelmethode* stürmisch entwickelt. Neben klassischen Methoden zur Bestimmung der physikalischen Partikeleigenschaften – die hier nicht wiederholt werden müssen – sind in den letzten Jahren neue Methoden entwickelt worden und haben das Verständnis des physikalischen Verhaltens von Partikeln deutlich vertieft. Dazu gehören beispielsweise hochauflösende Messmethoden auf atomar kleinsten Skalen, wie die Rasterkraftmikroskopie und auf der Partikelebene die Röntgenmikrotomografie, Mechanolumineszenz oder Neutronenstreuung.

Mit den Simulationen in der theoretischen Physik (Molekulardynamik MD) und Mechanik (Diskrete-Elemente-Methode DEM, Finite-Elemente-Methode FEM, computer-gestützte Fluidodynamik CFD, *Mehrkörpersysteme* MKS) stehen heute *numerische Werkzeuge* zur Verfügung, die immer mehr Anwendung in der Mechanischen Verfahrenstechnik finden.

Zwischen der mikroskopischen Betrachtungsweise des Partikelkontakts in Form der atomaren und molekularen Grenzflächen auf der einen Seite, siehe im **Bild 2**, III. Ebene, und der Beschreibung von technischen Prozessen auf der anderen Seite, sind die sog. makroskopischen Methoden und Modelle angesiedelt.

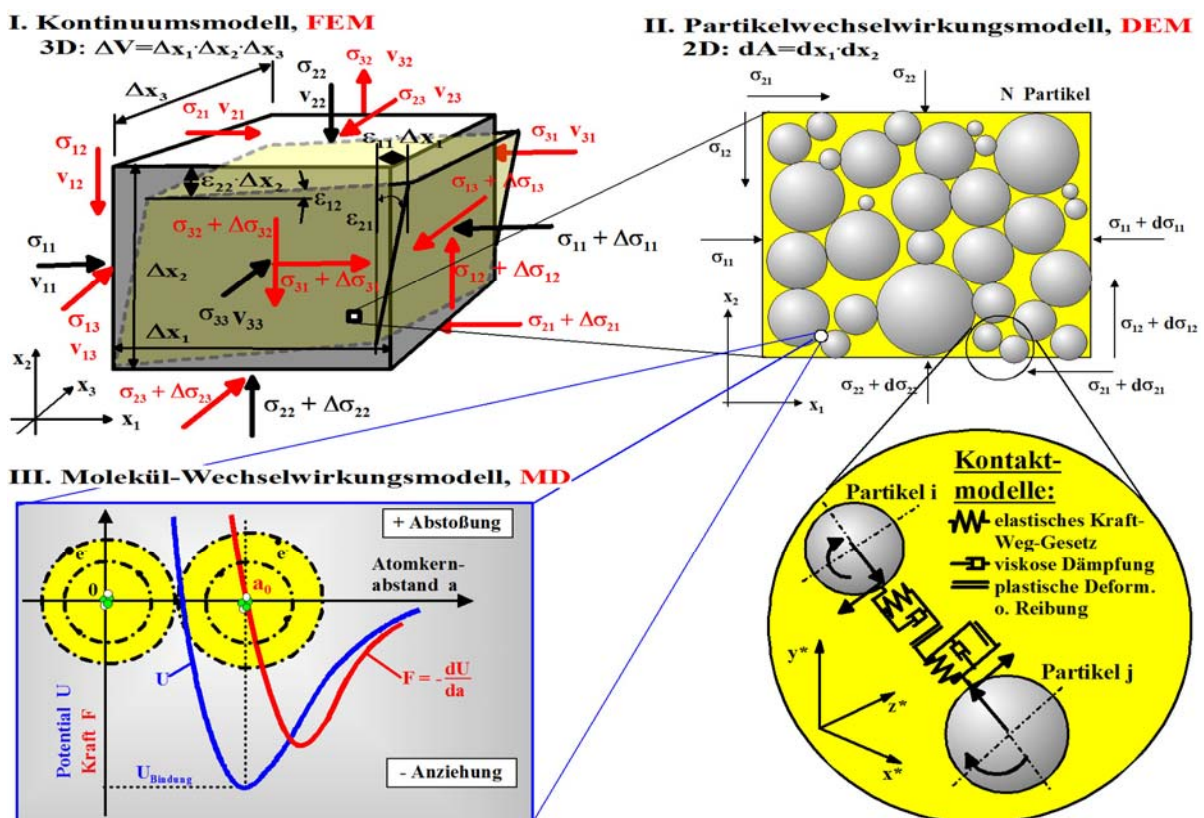


Bild 2: Multiskalige Methoden der I. Kontinuumsmechanik (Finite-Elemente-Methode FEM), II. Mikromechanik (Diskrete-Elemente-Methode DEM, Mehrkörperdynamik) und III. Molekulardynamik (MD).

Diese mechanischen Kontinua werden mittels Tensorgleichungen mit den räumlich verteilten Spannungen, Verzerrungen und Verzerrungsgeschwindigkeiten σ_{ij} , ε_{ij} , v_{ij} beschrieben, siehe im Bild I. Ebene. Auf der kleineren II. Ebene im Bild I werden die Wechselwirkungen innerhalb der jeweiligen Volumenelemente betrachtet. Hier befinden sich die Partikel mit hoher Wahrscheinlichkeit im Kontakt bzw. es werden bei der Deformation/Stoffwandlung neue Kontakte erzeugt oder aufgelöst. Die physikalischen Kontaktmodelle oder mikroskopischen *Stoffgesetze* (Ursache-Wirkung-Antwort-Beziehungen) stellen die mechanischen Grundlagen dar und lassen sich in ihrer Gesamtheit als *Mikromechanik* subsumieren. Die zeitliche Kinetik und lokale Dynamik physikalisch-chemischer Stoffwandlungen (z.B. chemische Reaktionen, Sintern) innerhalb der nanoskaligen Partikelkontaktzone werden als *Mikroprozesse* bezeichnet. Eine große Herausforderung in der zukünftigen wissenschaftlichen Entwicklung der Mechanischen Verfahrenstechnik wird darin bestehen, methodisch die Wechselwirkungen zwischen den

- physikalischen Grundvorgängen (atomare/molekulare Skalen: $d < 1$ nm),
- Partikelwechselwirkungen und Mikroprozessen (Partikelskalen: $d < 100$ μ m),
- Partikelkollektive (Agglomerate, Aggregate, Granulate, Partikelschichten) und den
- Kontinua auf der Makroebene (Apparateskalen: $D < 1$ m)

zusammen als Einheit zu betrachten und zu untersuchen. Relevante Größen- und Zeitskalen sind beispielsweise Subnanometer bis einige Nanometer für Kontaktdeformationen, Mikrometer für Partikelgrößen, Piko-/Nanosekunden für die Ausbreitung elastischer Stoßwellen innerhalb der Partikel, Mikrosekunden für Stoßzeiten und Millisekunden für chemische Reaktionskinetiken auf den Oberflächen. Makroskopischen Zeitskalen von Tagen, Monaten bis Jahren sind ebenfalls Gegenstände der Betrachtungen der Prozessdynamik in den Apparaten und Maschinen der industriellen Stoffwandlungen.

2.3 Beanspruchungsvorgeschichte und Gedächtnis eines dispersen Partikelsystems

Während sich Festkörper oder Stückgüter und Fluide vergleichsweise bequem handhaben lassen, hängt das mechanische Verhalten eines Pulvers oder eines Granulates (BORHO 1991, RUMPF 1974 und 1958, SCHUBERT 1979) unmittelbar von seiner *Beanspruchungsvorgeschichte* ab. Die lässt sich wohl am einfachsten mit einem Neigungsversuch eines Transportbehälters für diese Medien verdeutlichen (KALMANN 2002). Je nachdem, ob das Pulver in den Behälter eingefüllt, geneigt und wieder zurück bewegt wurde, wird sich eine jeweils andere Form der Schüttoberfläche einstellen (**Bild 3**).

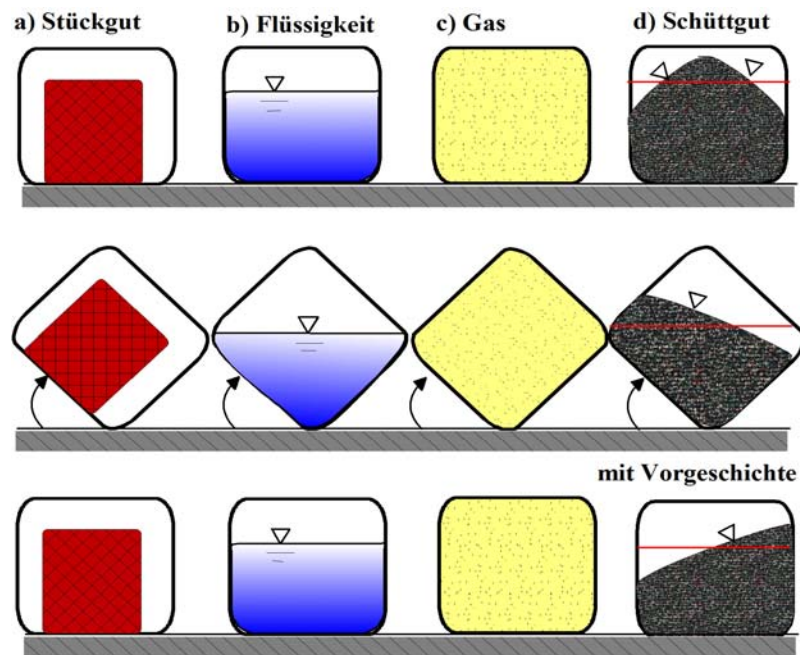


Bild 3: Lagerung in Behältern - Mechanisches Verhalten von Stückgut, Flüssigkeit, Gas und Schüttgut, gemäß KALMAN (2002)

Bild 3 zeigt ebenfalls, dass das Pulver ein *Gedächtnis* hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften hat. Dies trifft insbesondere auf die physikalischen und chemischen Produkteigenschaften von dispersen Feststoffen zu. Im Falle mineralischen Ursprunges eines Partikelsystems umfasst dies durchaus erdgeschichtliche Zeiträume. Diesen Eigentümlichkeiten eines Partikelsystems, insbesondere denen eines kohäsiven Pulvers, die mit seinem nahezu unergründlichen *eigenen Willen* zum Fließen oder auch Nichtfließen verknüpft sind, wollen wir in dieser Schrift nun auf den Grund gehen.

3 Mikromechanik der Partikelhaftung

Nach kurzen Übersichten des Standes des Wissens in den benachbarten Fachgebieten Physik, Physikalische Chemie und Mechanik wird die vom Autor entwickelte neue Theorie der mikroskopischen Partikelhaftung mit Gedächtnis diskutiert. Zunächst werden die physikalischen Grundlagen der Partikelhaftung vorgestellt. Danach wird das mikromechanische Kontaktverhalten haftender Partikel bezüglich der jeweils drei Freiheitsgrade der Translation und Rotation zusammenfassend erläutert.

3.1 Übersicht über die Haftkräfte zwischen feinen Partikeln

Die Partikelhaftung wird durch Oberflächen- und Feldkräfte (van der Waals-Kräfte, elektrostatische und magnetische Kräfte), Materialbrücken zwischen den Partikeloberflächen (Flüssigkeits- und Festkörperbrücken, Flockungsmittel) und durch formschlüssige Bindungen hervorgerufen, siehe z.B. RUMPF (1974 und 1958), SCHUBERT (1979), SCHUBERT (2003), KRUPP (1967) oder ISRAELACHVILI (1992) (**Bild 4**):

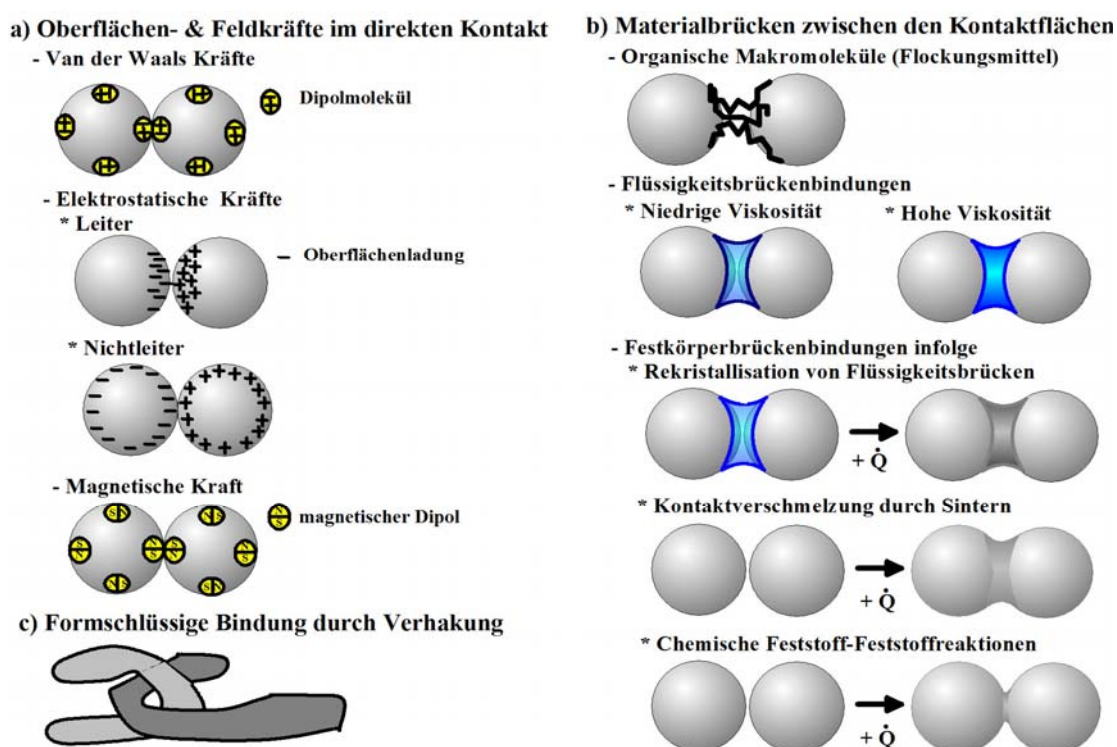


Bild 4: Partikelhaftung und physikalisch-chemische Mikroprozesse der Partikelbindung. Der Pfeil mit $+ \dot{Q}$ bedeutet die Zufuhr eines äußeren Wärmestromes in den Kontaktbereich.

- a) Oberflächen- und Feldkräfte im direkten Kontakt:
- Van der Waals-Kräfte (alle trockenen Pulver),
 - Elektrostatische Kräfte,
 - Elektrischer Leiter (Metallpulver),
 - Elektrischer Isolator (Polymerpulver, pharmazeutische Wirkstoffe, Waschmittel),
 - Magnetische Kraft (Eisenpulver);
- b) Materialbrücken zwischen den Partikeloberflächen:
- Wasserstoffbrückenbindungen adsorbierter Wassermoleküle (alle Pulver in feuchter Umgebungsluft),
 - Organische Makromoleküle als Flockungsmittel der Schmutzpartikel in Abwasser

- Flüssigkeitsbrückenbindungen infolge
 - Niedrigviskoser benetzender Flüssigkeiten durch kapillarem Unterdruck und Oberflächenspannung am Flüssigkeitsrand (feuchter Sand, feuchte Erde),
 - Hochviskoser Bindemittel (heißer Asphalt, Ölsand);
- Festkörperbrückenbindungen infolge
 - Trocknung und Rekristallisation von Flüssigkeitsbrücken die gelöste Stoffe enthalten (Salz, Zucker, Gewürzmischungen),
 - Trocknung und Verfestigung gequollener ultrafeiner Gelpartikel (Ton, Stärke),
 - Anfriren von Flüssigkeitsbrückenbindungen (gefrorene Erde, Schnee),
 - Chemische Reaktionen mit oberflächlich adsorbierten Wasserschichten (Zement-Hydratation),
 - Chemische Reaktionen mit Porenwasser (Abbinden von Beton und Kalkmörtel),
 - Verhärtung hochviskoser Bindemittel (abgekühlter Asphalt),
 - Kontaktverschmelzung durch Sintern (Nanopartikel-Aggregate, Keramik),
- Chemische Feststoff-Feststoffreaktionen (Glasgemenge, mechanisch aktivierte Metalllegierungen);
- c) Formschlüssige Bindungen durch Verhakung von Makromolekülen und extremen Partikel- und Agglomeratformen;
 - Verhakung der Verzweigungen von Makromolekülketten (Proteine),
 - Verhakung durch Überlappung ausgeprägter Oberflächenrauigkeiten (raue Partikel),
 - Verhakung von Partikeln und Agglomeraten extremer Form (Faser, fraktale kettenförmige Agglomerate mit Verzweigungen, Knäule).

Wenn sie sich Partikel jeglicher chemisch-biologischer oder mineralogischer Zusammensetzung genügend nahe gekommen sind (Oberflächenabstand etwa $a < 10$ nm) werden die van der Waals-Kräfte wirksam. Sie resultieren aus der kurzen Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkungen polarer und unpolarer Moleküle oder induzierter molekularer Dipole und sind der Hauptgegenstand dieser Schrift.

Die Grundlagen dieser molekularen Anziehungspotentiale und der Elastomechanik der Haftung wurden beispielsweise von KRUPP (1967), ISRAELACHVILI (1992 und 1973), TABOR (1977), MAUGIS (1999) und KENDALL (2001) behandelt. Kontaktmechanik (JOHNSON 1985, FISCHER 2000) und Stoßmechanik (STRONGE 2000, SZABO 2001) wurden jedoch bisher ohne die für feine Partikel sehr wesentliche Partikelhaftung beschrieben.

3.2 Stoffgesetze des elastisch-plastischen, adhäsiven und reibungsbehafteten Partikelkontaktes

Die Lücken bisheriger Theorien, vergleiche TOMAS 2003b und 2007, waren der Ausgangspunkt für eine umfassende Modellanalyse und anschließende Synthese neuer physikalisch begründeter Modelle, die sich insbesondere auf die Mikromechanik der Haftung feiner Partikel konzentrieren.

3.2.1 Ein Partikelkontakt unter Normalbelastung mit variabler Haftung

Die wesentlichen Kraft-Weg- und Moment-Winkel-Beziehungen eines adhäsiven Kontaktes feiner Partikel sind im **Bild 5** zusammengestellt worden.

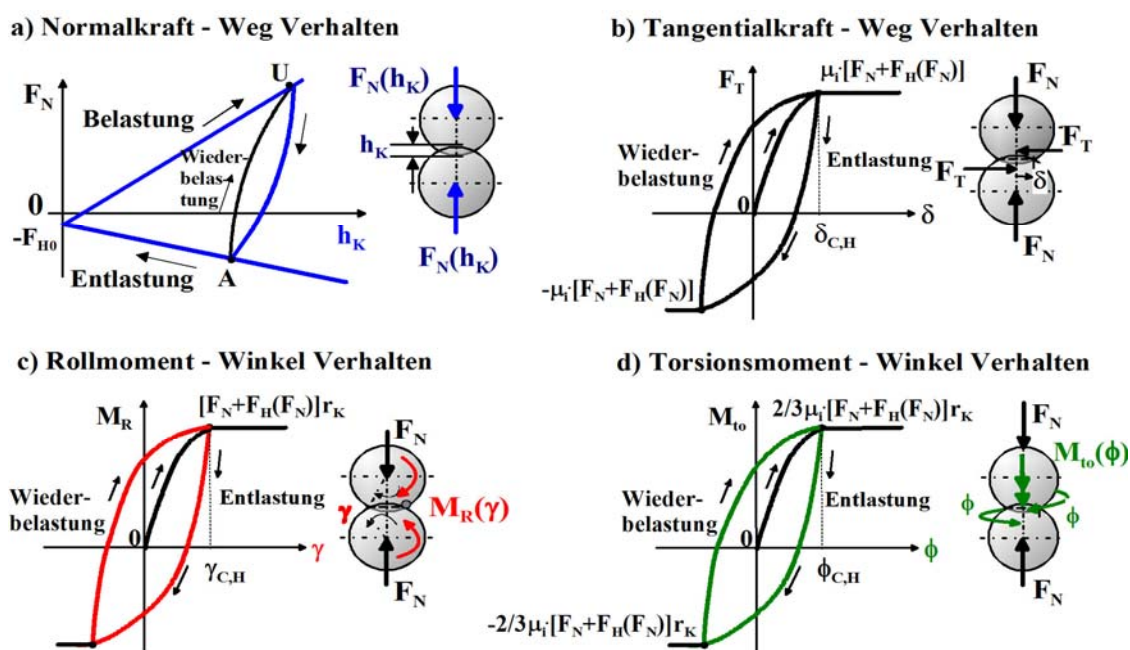


Bild 5: Übersicht über die Kraft-Weg- und Moment-Winkel-Beziehungen zur Modellierung eines adhäsiven Kontaktes feiner, glatter kugelförmiger Partikel für die jeweils drei Freiheitsgrade der Translation und Rotation

Während der alleinigen Anziehung aufgrund der kurzreichweitigen van der Waals-Haftung F_{H0} nähern sich beide Partikel an und erzeugen eine elastische Kontaktdeformation als Antwort der Haftkraft F_{H0} . Bei weiterführender Normalbelastung F_N , z.B. durch das Eigengewicht einer Aufschüttung in Apparaten oder Maschinen, wird bald der Fließpunkt erreicht und überschritten. Die Drücke innerhalb der Kontaktfläche können bis zu einigen hundert MPa betragen und übersteigen deutlich die makroskopische Druckfestigkeit der Festkörpers. Auf eine zunehmende äußere Druckkraft F_N folgt eine zunehmende Abplattungshöhe h_K als Antwort und umgekehrt. Diese Ursache-Antwort-Beziehung lässt sich bequem mittels einer charakteristischen Geraden, der sog. *elastisch-plastischen Fließ-*

grenze, beschreiben, (**Bild 5a**). Aufgrund der Geometrie des Kugelkontaktes behält dieser bei Druckbeanspruchung und elastisch-plastischer Deformation als Antwort eine gewisse Steifigkeit, die jedoch geringer ausfällt als die elastische Kontaktsteifigkeit. Der Anstieg dieser Geraden dF_N/dh_K kennzeichnet folglich die elastisch-plastische Kontaktsteifigkeit. Ein geringer Anstieg bedeutet weiches oder nachgiebiges, und umgekehrt, ein großer Anstieg steifes Kontaktverhalten. Dieser Anstieg verhält sich proportional zur Partikelgröße. Neben der hohen spezifischen Oberfläche von *Nanopartikeln* ist die abnehmende Kontaktsteifigkeit mit abnehmender Partikelgröße die Hauptursache für zahlreiche Adhäsions-effekte. Deshalb war es zweckmäßig, die Modellvorstellung *steife Partikel* mit *weichen Kontakten* einzuführen. Steife Partikel deswegen, weil mit den nanoskaligen Kontaktabplattungen $h_K < 0,5$ nm bzw. Kontaktkreisradien $r_K < 10$ nm keine nennenswerte Änderung der Partikelform verbunden sein sollte.

Bei sehr großer Kontaktsteifigkeit kommt es erst gar nicht zu einer plastischen Deformation. Der Kontakt verhält sich elastisch. Das ist bei vergleichsweise groben Partikeln von etwa $d > 100$ μm der Fall. Man möge hier nur das *makroskopische* mechanische Verhalten eines rieselfähigen Ostseesandes mit dem eines kohäsiven Mahlproduktes gleicher chemisch-mineralogischer Zusammensetzung vergleichen.

Das Gebiet des elastischen Kontaktverhaltens wird unten durch die sogenannte *Haftgrenze* beschränkt. Bei *Entlastung* an einem beliebigen Punkt U wird nun dieser elastische Anteil der Kontaktabplattung verschwinden. Eine weitere Entlastung lässt sich nur durch Anwendung von Zugkräften erzeugen, der direkte Kontakt würde sich am Punkt A ablösen (versagen). Entlang der Kurve A-U kann aber der Kontakt *wieder belastet* werden. Die linsenförmige Fläche zwischen den Wiederbelastungs- und Entlastungskurven kennzeichnet die Energieabsorption (TOMAS 2001a und 2007a) während eines Zyklus. Unser Kontakt zeigt also eine typische Hysterese und damit im Falle von dynamischen Belastungs-/Entlastungszyklen (Oszillationen) eine Dämpfung als Antwort, die hier - und das ist für das langsame Fließen von Partikelpackungen besonders bedeutsam - unabhängig von der angewandten Deformationsgeschwindigkeit dh_K/dt ist.

Die Elimination der Abplattungshöhe h_K der Belastungs- und Entlastungsfunktionen, liefert näherungsweise einen linearen Zusammenhang zwischen der nun positiv definierten Kontaktablösekraft $F_H = -F_N(h_{K,A})$ am Ablösepunkt A und einer eingepprägten Normalkraft $F_N(h_{K,U})$ am Punkt U, die eine Vorverfestigung als Vorgeschichte des Kontaktes bewirkt hatte:

$$F_H(F_N) = (1 + \kappa) \cdot F_{H0} + \kappa \cdot F_N \quad (1)$$

Der dimensionslose *elastisch-plastische Kontaktverfestigungskoeffizient* κ kennzeichnet die momentane Kontaktsteifigkeit und den Anstieg der Haftkraft F_H bei Einwirkung einer Vorverfestigungskraft F_N . Ein geringer Anstieg κ bedeutet steifes Kontaktverhalten mit gering ausgeprägtem Haftvermögen $F_H \approx F_{H0}$. Mit einem großen Anstieg ist jedoch ein nachgiebiger Kontakt mit großem Haftvermögen verbunden. Das ist typisch für das makrosko-

pische Verfestigungsverhalten eines trockenen kohäsiven bis sehr kohäsiven Partikelkollektivs.

3.2.2 Ein Partikelkontakt unter Tangentialbelastung mit lastabhängiger Haftung

Nachfolgend soll die erste Phase der *Belastung* eines vorverfestigten, d.h. abgeplatteten elastisch-plastischen Kontaktes in tangentialer Richtung betrachtet werden. Normalerweise erwartet man ein linear elastisches Verhalten des Kontaktes beim langsamen tangentialen Verschieben. Allerdings wird durch das Zusammenpressen der beiden Kontaktflächen ein zusätzlicher Beitrag zur Haftkraft erzeugt, da die inneren Drücke bis zu einigen hundert MPa betragen können. Dieses partielle innere Haften und Gleiten (microstick-microslip) hat einen zusätzlichen Scherwiderstand zur Folge. Das wiederum führt bei der *Erstbelastung* zu einem nichtlinearen elastischen Kraft-Verschiebungsweg-Verhalten $F_T(\delta)$ des Kugelkontaktes, (**Bild 5 b**).

Das nichtlineare elastische Verhalten wird nach oben durch eine Reibungsgrenze eingeschränkt, die makroskopisch einer Grenzspannungsfunktion (Fließort) entspricht. Diese mikroskopische Coulomb-Reibungsgrenze (Index C) der Tangentialkraft $F_{T,C,H}(F_N)$ wird mit einem Koeffizienten der inneren Reibung ausgedrückt μ_i und ergibt nach Addition der positiven *lastabhängigen Haftkraftfunktion* gemäß Gl: (1)

$$F_{T,C,H}(F_N) = \mu_i \cdot [F_N + F_H(F_N)] = \mu_i \cdot (1 + \kappa) \cdot (F_{H0} + F_N) \quad (2)$$

Der Index H wird hier benutzt, um den variablen haftenden Partikelkontakt besonders zu kennzeichnen. Dieser Reibungswiderstand kann nicht überschritten werden und ist jenseits von $\delta_{C,H}$ konstant, waagerechte Linien im **Bild 5 b**). Eine höhere Beanspruchungsintensität bedeutet hier nicht mehr eine Zunahme der Gleitreibungskraft. Sehr wohl verlängert sich jedoch deutlich der Verschiebungsweg $\delta > \delta_{C,H}$. An diesem Übergangspunkt ($\delta_{C,H}$, $F_{T,C,H}$) verliert der Kontakt seine Steifigkeit $dF_T/d\delta = 0$ und es setzt das voll entwickelte Kontaktgleiten ein.

Bei Umkehr der Scherrichtung wird der Kontakt teilweise *entlastet* und kann bei erneuter Richtungsumkehr *wiederbelastet* werden. Insgesamt spricht man hier von einem kombinierten elastisch-plastischen und *reibungsbehafteten* Verhalten des Kugelkontaktes mit lastabhängiger Haftung. Denn jenseits der Reibungsgrenze $\delta > \delta_{C,H}$ wird die eingetragene mechanische Energie durch die Kontaktreibung absorbiert und in andere Energieformen umgewandelt, z.B. in Reibungswärme dissipiert (TOMAS 2007a).

3.2.3 Der Roll- und Torsionswiderstand eines Partikelkontaktes mit lastabhängiger Haftung

Ursachen für den Rollwiderstand von Kugeln stellen die Mikrorauhigkeiten, die Kontaktdeformationen aufgrund einer Normallast und insbesondere partielles Haften in den abgeplatteten Kontaktflächen dar. Deshalb beinhaltet das neue Rollmoment-Rollwinkel-Gesetz $M_R(\gamma)$ einen nichtlinearen elastischen Anteil für partielles lastabhängiges Haften $F_H(F_N)$ innerhalb der abrollenden Kontaktfläche beider Kontaktpartner (**Bild 5 c**).

Auch hier ergibt sich für elastisch-plastische Kontaktdeformation in Normalrichtung und der lastabhängigen Haftkraft Gl. (1) eine *Reibungsgrenze* (Index C) des Rollmomentes und des Rollwinkels $\gamma = \gamma_{C,H}$ (der Index H kennzeichnet wiederum einen haftenden Kontakt).

Diese Grenze des Rollmomentes kann nicht überschritten werden, waagerechte Linie im **Bild 5 c**. An dieser Grenze verliert der Kontakt seine Steifigkeit $dM_R/d\gamma = 0$.

Neben den Normal- und Tangentialbelastungen und dem Rollen kann ein Partikelkontakt um seine Hauptachse rotieren. Diese Verdrehen (Spinnen, Twisten) beider Kontaktpartner schließt einen nichtlinearen Anteil für partielles lastabhängiges Haften $F_H(F_N)$ innerhalb der in Normalrichtung elastisch-plastisch deformierten Kontaktfläche ein. Auch hier wird für die elastische *Erstbelastungskurve* ein nichtlineares Torsionsmoment-Drehwinkel-Gesetz $M_{to}(\phi)$ erhalten (**Bild 5 d**), das wiederum durch die Reibungsgrenze eingeschränkt wird. Diese Grenze des Torsionsmomentes kann nicht überschritten werden und der Kontakt verliert seine Steifigkeit $dM_{to}/d\phi = 0$, wenn die *Reibungsgrenze des Drehwinkels* einen kritischen Wert $\phi = \phi_{C,H}$ erreicht. Diese Reibungsgrenze hängt nicht von der Normallast ab und ist nur eine Funktion der mechanischen Partikeleigenschaften (TOMAS 2007).

Bei Umkehr der Roll- oder Torsionsrichtung wird der Kontakt partiell *entlastet* und kann bei erneuter Richtungsumkehr *wiederbelastet* werden (**Bild 5 c** und **d**). Wie bei der tangentialen Kontaktverschiebung entsprechen diese Kurven ebenfalls dem kombinierten elastisch-plastischen und *reibungsbehafteten* Kontaktverhalten mit lastabhängiger Haftung.

Wenn die Partikel gegenseitig abrollen oder verdrehen, kann im Gegensatz zum Vorstehenden (Abschnitte 3.2.1 und 3.2.2) der Kontakt nicht abgelöst werden (versagen). Deshalb sind diese beiden Beanspruchungsarten eines *mikroskopischen* Kontaktes für die folgende Beschreibung der *makroskopischen* Grenzspannungsfunktionen des reibungsbehafteten Fließens kohäsiver Pulver weniger bedeutsam.

4 Das langsame reibungsbehaftete Fließen kohäsiver Pulver

Nur das *langsame reibungsbehaftete Fließen* (non-rapid frictional flow) einer Partikelpackung mit einer Fließ- oder Schergeschwindigkeit deutlich unter $v_S < 1$ m/s soll hier betrachtet werden. Zur Kennzeichnung dieses Fließregimes wird ein Verhältnis einer trei-

benden Trägheitskraft zum Reibungswiderstand eingeführt, der die Bewegung oder das Fließen behindert. Diese dimensionslose Kenngröße entspricht somit einer äquivalenten *Schüttgut-Reynoldszahl* Re_b und ist für $\tau > 1$ kPa kleiner als Eins ($\rho_b = m_s/V$ Schüttgutdichte):

$$Re_b = \frac{v_s^2 \cdot \rho_b}{\tau} = \frac{1 \text{ m}^2 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3}{\text{s}^2 \cdot 1 \text{ kPa}} = 1 \quad (3)$$

Der Scherwiderstand durch Festkörperreibung des fließenden Pulvers ist in unserem betrachteten Wertebereich $Re_b < 1$ unabhängig von der Schergeschwindigkeit $\tau \neq f(v_s)$. Ein zusätzlicher Scherspannungsanteil durch elastische und inelastische Partikelstöße infolge turbulent-analogen Impulsaustauschs wird somit vernachlässigt. Demgegenüber muss für das *schnelle kollisionsbehaftete Fließen* (rapid collisional flow) eine Schüttgut-Reynoldszahl deutlich größer als Eins gelten. Geschwindigkeitsabhängige viskose Scherwiderstände werden ausgeschlossen. Wechselwirkungen mit umgebenden Flüssigkeiten oder Gasen, wie z. B. Porenströmungen, die durch die Partikelbewegung induziert werden, sollen hier ebenfalls vernachlässigt werden.

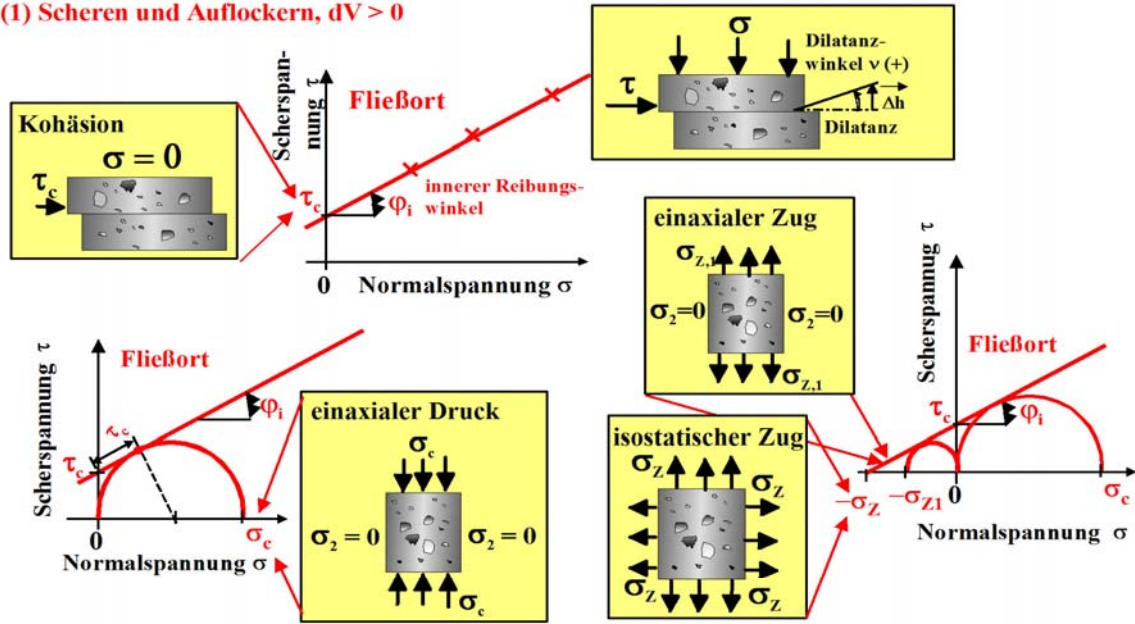
Der Scherwiderstand eines ultrafeinen kohäsiven Pulvers wird im Wesentlichen auf die Coulomb-Reibung zwischen den haftenden Partikelkontakten zurückgeführt. Folglich hängt die Scherspannung τ insbesondere von der angewandten Normalspannung σ und der eingepprägten Vorverfestigung ab (MOLERUS 1975, 1978, TOMAS 1991, 1997).

4.1 Zweiachsige Spannungszustände in einer fließenden Partikelpackung

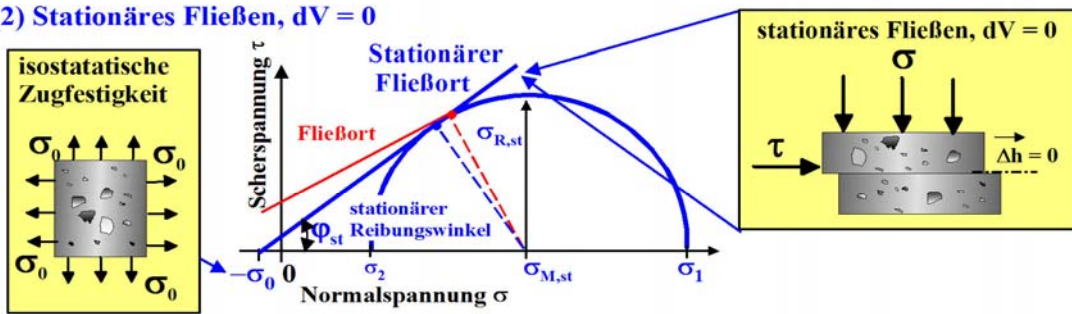
Einführend sollen die wichtigsten Kennwerte des Fließverhaltens erläutert werden (MOLERUS 1985, SCHWEDES 1988, JENIKE 1964). Im Gegensatz zu anderen Ingenieurdisziplinen ist man in der Verfahrenstechnik insbesondere am Transport, d.h. am Fließen der Partikelpackungen oder zäher Fluide in der Rheologie (BUGGISCH 1996) interessiert. Dieses Fließen ist durch irreversible Schervorgänge gekennzeichnet. Sie können mittels direkter Scherversuche Punkt für Punkt ausgemessen werden, (**Bild 6** (1) oben). Die Verbindungslinie der Punkte ergibt unter festgelegten Beanspruchungsbedingungen eine *Grenzspannungsfunktion*, den sog. *Fließort*, die nicht überschritten werden kann. Der Fließort hat den Anstiegswinkel φ_i , der auch als *innerer Reibungswinkel* bezeichnet wird; $\mu_i = \tan\varphi_i$ ist der innere Reibungskoeffizient. Er kennzeichnet das Kontaktversagen beim tangentialen Abgleiten der Partikel in der Scherzone.

Es ist nun eine typische Eigenart einer gescherten Partikelpackung oder Schüttung, dass das Fließen hier unter *Volumenausdehnung* stattfinden kann, und zwar dann, wenn die geometrisch vorgegebene, makroskopische Scherebene nicht mit den mittleren oder charakteristischen Tangentialebenen der Partikelkontakte einer Scherzone übereinstimmt. Die Partikel werden sozusagen bergauf über die unten liegende Schicht verschoben, und als Antwort dehnt sich die Scherzone aus $dV > 0$, (**Bild 6** (1) oben rechts).

(1) Scheren und Auflockern, $dV > 0$



(2) Stationäres Fließen, $dV = 0$



(3) Scheren und Verdichten, $dV < 0$

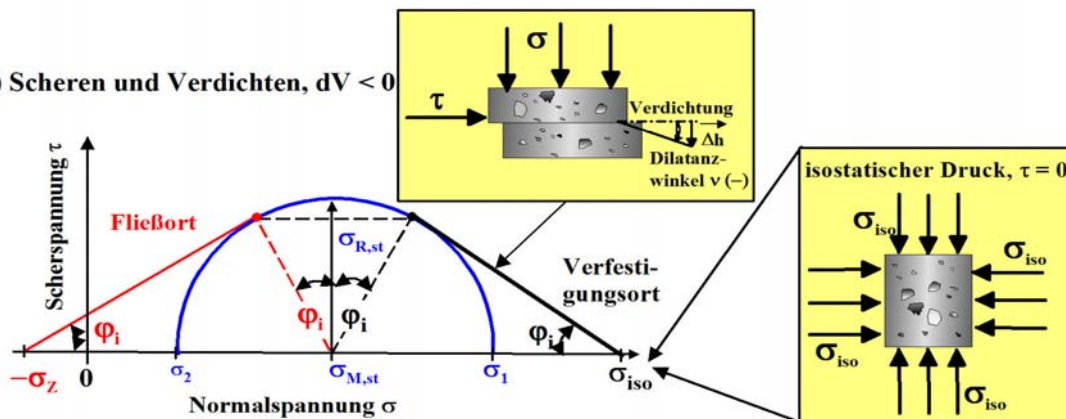


Bild 6: Zweiachsige Grenzspannungszustände im Scherspannungs-Normalspannungs-Diagramm einer auf Scherung beanspruchten Partikelpackung: (1) Scheren und Auflockern $dV > 0$, Fließort mit Kohäsion, einaxiale Druck- und Zugfestigkeit, isostatische Zugfestigkeit, (2) stationäres Fließen $dV = 0$, stationärer Fließort mit isostatischer Zugfestigkeit einer lockeren Packung, (3) Scheren und Verdichten $dV < 0$, Verfestigungsort mit isostatischem Druck. Wegen der Dominanz der Drücke in der Praxis der Schüttguthandhabung werden im Gegensatz zur Werkstoffmechanik die Druckspannungen positiv und die Zugspannungen negativ aufgetragen.

Das wird auch als *Dilatanz* bezeichnet (ROWE 1962, HORNE 1969). Sie kennzeichnet das Scherverhalten einer vorverfestigten Packung. Der charakteristische Dilatanzwinkel ν ist positiv im mathematisch positiven Drehsinn (entgegen dem Uhrzeiger) definiert. Der Ordinatenabschnitt des Fließortes wird als *Kohäsion* τ_c bezeichnet und stellt den Scherwiderstand bei äußerer Normalspannung $\sigma = 0$ dar. Dieser merkbare Widerstand wird allein durch die Wirkung der Kontaktdeformationen und resultierenden Haftkraftverstärkungen einer vorherigen Verfestigung erzeugt (**Bild 6** (1)). Damit wird ein innerer Druck $-\sigma_z$ in den Kontakten erzeugt, der zur äußerer Normalspannung ($\sigma + \sigma_z$) als Absolutbetrag zu addieren ist. Die Folge davon sind wiederum die *einaxiale Druckfestigkeit* σ_c der Packung (Mohrkreis rechts der Ordinate mit der kleineren Hauptspannung $\sigma_2 = 0$) und die *einaxiale Zugfestigkeit* $\sigma_{z,1}$ (Mohrkreis links mit der hier absolut betrachteten, kleineren Hauptspannung $\sigma_2 = 0$). Der Schnittpunkt des Fließortes im Negativen mit der Abszisse bei verschwindender Scherspannung $\tau = 0$ stellt somit eine zweiachsige bzw. *isostatische Zugfestigkeit* σ_z dar, die bei einem linearisierten Fließort betragsmäßig etwas größer ausfällt als die einaxiale Zugfestigkeit $\sigma_{z,1}$, (**Bild 6** (1) mittig).

Wird nun eine kritisch vorverfestigte Schüttung geschert, fließt sie stationär unter *Volumenkonstanz* $dV = 0$ (**Bild 6** (2)). Mikroskopische Dilatanz (Auflockerung) und Verdichtung befinden sich im dynamischen Gleichgewicht und heben sich im Mittel auf. Die zugehörige Grenzspannungsfunktion wird *stationärer Fließort* genannt. Dessen Anstiegswinkel wird durch den *stationären* (inneren) *Reibungswinkel* φ_{st} gebildet. Er kennzeichnet das stationäre Gleichgewicht aus Kontaktannäherung, -bildung, Kontaktversagen und Partikelablösung. Der Schnittpunkt des stationären Fließortes im Negativen mit der Abszisse bei verschwindender Scherspannung $\tau = 0$ stellt die *isostatische Zugfestigkeit* σ_0 der *unverfestigten Kontakte* dar (**Bild 6** (2)). Damit stellt sich ein metastabiler Nichtgleichgewichtszustand ein, bei dem sich gerade die Partikel berühren, ohne sich jedoch zu überlappen oder zu durchdringen.

Dieser Punkt wird durch die lineare Extrapolation des stationären Fließortes auf die σ -Achse quantifiziert. Beim Anlegen dieser isostatischen Spannung σ_0 würden die Kontaktketten mit nanoskaligen Dehnungen versagen. Das entspricht einer sehr geringen makroskopischen Volumenänderung von praktisch $dV = 0$.

Die *Mittelpunktsspannung* σ_M , z. B. des größten Kreises in der Bildmitte, wird aus dem Mittelwert der beiden, scherspannungsfreien Hauptnormalspannungen σ_1 , σ_2 des zweiachsigen Spannungszustandes gebildet (Kugeltensor im dreiachsigen Spannungsraum) (GÖLDENER 1992). Während die *Radiusspannung* σ_R aus der Differenz der beiden Hauptnormalspannungen σ_1 , σ_2 des zweiachsigen Spannungszustandes besteht (Deviator im dreiachsigen Spannungsraum) (GÖLDENER 1992). Sie charakterisiert das Scherspannungsniveau, das zum Fließen führt (**Bild 6** (2)).

Wird nun eine unterverfestigte Schüttung geschert, fließt sie unter ständiger *Volumenabnahme* $dV < 0$ bis zum Erreichen des kritischen Verfestigungszustandes, (**Bild 6** (3) un-

ten). Der Dilatanzwinkel ist hier also negativ (Verdichtung). Die Partikel werden sozusagen bergab gegeneinander verschoben und füllen die noch freien Porenräume aus. Das Diagramm wird durch den äußersten rechten Punkt den *isostatische Druck* σ_{iso} begrenzt. Er stellt den maximal möglichen Druckwert in den drei Raumrichtungen dar, bei dem alle Schubspannungen verschwinden $\tau = 0$. Die Verbindungslinie zwischen dem isostatischen Druck σ_{iso} und dem Mohrkreis des stationären Fließens wird auch als *Verfestigungsort* bezeichnet. Dessen Neigung muss ebenfalls durch die Verhältnisse der Tangentialkräfte zu den Normalkräften in den versagenden Partikelkontakten bestimmt werden. Folglich kennzeichnet der innere Reibungswinkel φ_i auch beim Verfestigen das Abgleiten der Partikelkontakte in der Scherzone.

4.2 Grenzspannungsfunktionen für Verfestigung, beginnendes und stationäres Fließen

Scherspannungen τ haben Winkeländerungen $\gamma = ds/dh_{\text{SZ}}$ (Scherverzerrungen) zur Folge, die zunächst reversibel, d.h. elastisch verlaufen. In der Verfahrenstechnik und Fördertechnik interessiert vorrangig das mechanische Verhalten des fließenden Pulvers. Die Scherspannungen erreichen eine Fließspannung bzw. Grenzspannungsfunktion und folglich werden *irreversible Scherverzerrungen* in einer *Scherzone* erzeugt. Im Mikroskopischen bedeutet dies immer vielfaches Kontaktversagen.

Mit einem analytischen *Mikro-Makro-Übergang*, siehe TOMAS (2001b, 2004a), als physikalisch begründete, theoretische Vorbereitung lassen sich die direkten Scherversuche ausgesprochen bequem auswerten (**Bild 7**).

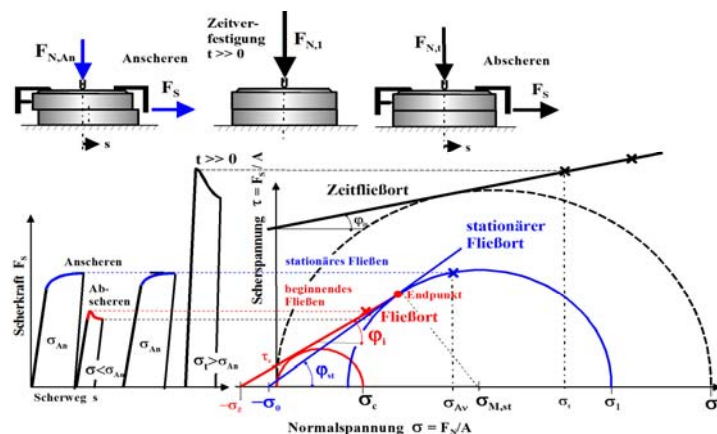


Bild 7: Direkter Scherversuch mit beginnender Verfestigung, beginnendem Fließen und stationärem Fließen mit den Kennwerten: σ_1 Verfestigungsspannung, σ_c einaxiale Druckfestigkeit, φ_i innere Reibungswinkel, φ_{st} stationärer (innerer) Reibungswinkel. Das Pulver wird in der Scherzelle durch eine auszuwählende Last vorverfestigt. Jeder Fließort wird nach dieser Vorverfestigung mit einer vorher festgelegten Anscherslast σ_{An} gemessen. Damit wird je nach Fließverhalten die mittlere Spannung beim stationären Fließen $\sigma_{M,st}$ als Scharparameter festgelegt, die wiederum einer bestimmten mittleren Schüttgutdichte ρ_b in der Scherzelle entspricht.

Die wesentlichen Fließkennwerte sind nunmehr in einem Satz überschaubarer linearer Gleichungen enthalten (TOMAS 2004a) und zwar für die momentane Verfestigung, der sog. Verfestigungsort,

$$\sigma_R = \sin \varphi_i \cdot (-\sigma_M + \sigma_{M,st}) + \sigma_{R,st}, \quad (4)$$

für das beginnende Fließen, der Fließort,

$$\sigma_R = \sin \varphi_i \cdot (\sigma_M - \sigma_{M,st}) + \sigma_{R,st} \quad (5)$$

und für das stationäre Fließen der stationärer Fließort, (**Bild 7**):

$$\sigma_{R,st} = \sin \varphi_{st} \cdot (\sigma_{M,st} + \sigma_0) \quad (6)$$

Wie man diesen drei Grenzspannungsfunktionen unmittelbar entnimmt, lassen sich Verfestigung, beginnendes und stationäres Fließen mit nur drei physikalisch begründeten Parametern hinreichend beschreiben (MOLERUS 1975, TOMAS 2001b, 2004a):

- (1) Der *innere Reibungswinkel* kennzeichnet die Coulomb-Reibung (mikroskopische Gleitreibung) versagender Partikelkontakte.
- (2) Der *stationäre innere Reibungswinkel* kennzeichnet das stationäres Gleichgewicht der makroskopischen Scherwiderstände zwischen versagenden und sich simultan neu bildenden Partikelkontakten. Dieser Reibungswiderstand φ_{st} ist bei einem kohäsiven Pulver deutlich größer als φ_i und zwar infolge der Wirkung der verfestigenden äußeren Kräfte und der elastisch-plastischen Kontaktdeformationen als Antwort.
- (3) Die *dreiaxiale Zugfestigkeit* des unverfestigten Pulvers kennzeichnet die innere Haftspannung, die aus den Partikelhaftkräften ohne jegliche Kontaktdeformationen resultiert.

Als wichtigster Parameter der Vorgeschichte wird der *äußere mittlere Druck* (Verfestigungsspannung) $\sigma_{M,st}$ beim stationären Fließen eingeführt. Äquivalent dazu könnte man auch die Normalspannungen des Endkreises, d.h. die Anschernormalspannung σ_{An} oder die größte Hauptspannung σ_1 nutzen (**Bild 7**). Letztere wird unmittelbar für die Trichter-auslegung benötigt und drückt im Wesentlichen einen scheinbaren einaxialen Spannungszustand oder eine Vergleichsspannung aus.

Die beiden Kennwerte des stationären Fließens φ_{st} und σ_0 lassen sich direkt mit Hilfe der linearen Gleichung (6) des stationären Fließortes ermitteln. Dazu wird eine Ausgleichsgerade mit den $\sigma_{R,st}(\sigma_{M,st})$ -Punkten in einem $\sigma_R = f(\sigma_M)$ Diagramm berechnet. Die Genauigkeit der Extrapolation dieser Geraden, die zur isostatischen Zugfestigkeit σ_0 führt, hängt insbesondere von der Genauigkeit der Messwerte des stationären Fließens ab. Unterverfestigte oder irgendwie geringfügig vorentlastete Proben führen hier zu physikalisch falschen Aussagen. Einen Spezialfall des kohäsiven stationären Fließens stellt das phänomenologisch vereinfachte, kohäsionslose stationäre Fließen dar, das nach JENIKE (1964) durch den *effektiven Fließort* beschrieben wird:

$$\sigma_{R,st} = \sin \varphi_e \cdot \sigma_{M,st} \quad (7)$$

Den Zusammenhang zwischen dem druckabhängigen effektiven Reibungswinkel φ_e und dem konstanten stationären Reibungswinkel φ_{st} als Stoffwert findet man durch Gleichsetzen beider Gln. (6) und (7):

$$\sin \varphi_e = \sin \varphi_{st} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_{M,st}} \right) \quad (8)$$

Für große mittlere Spannungen $\sigma_{M,st}$ nähern sich folglich beide Winkel $\varphi_e \rightarrow \varphi_{st}$ an. Dieser überschaubare Zusammenhang steht in völliger Übereinstimmung mit den experimentellen Erfahrungen bei Schertests. In der Bodenmechanik wird eine dem stationären Fließort zumindest adäquate Scherspannungsfunktion mit einem wirksamen Reibungswinkel ϕ' verwendet (FÖRSTER 1996), die der Verbindungslinie der jeweiligen Anscherpunkte der individuellen Fließorte entspricht.

Für die Messung der Fließkennwerte kohäsiver Schüttgüter können alle direkten oder indirekten Schergeräte benutzt werden (SCHWEDES 1990, 2003a). Für eine zuverlässige Messung von Zeitverfestigungen (TOMAS 1997, KOLLMANN *et al.* 2001a) bei extremen Umgebungsbedingungen von $\theta = -20^\circ\text{C}$ bis 1300°C und Luftfeuchten φ_L bis 95 % hat sich die Translationsscherzelle als sehr brauchbar herausgestellt. Diese Bedingungen können in einem Klimaschrank bzw. Heizofen mit eingeschränkter Grundfläche für eine ausreichende Zellenzahl realisiert werden. Deshalb wurde ein neues Translationsschergerät gebaut, das zwecks bequemer Handhabung bei der Versuchsdurchführung mit einem Hubsystem versehen und auf einem Laborwagen befestigt wurde (**Bild 8**).

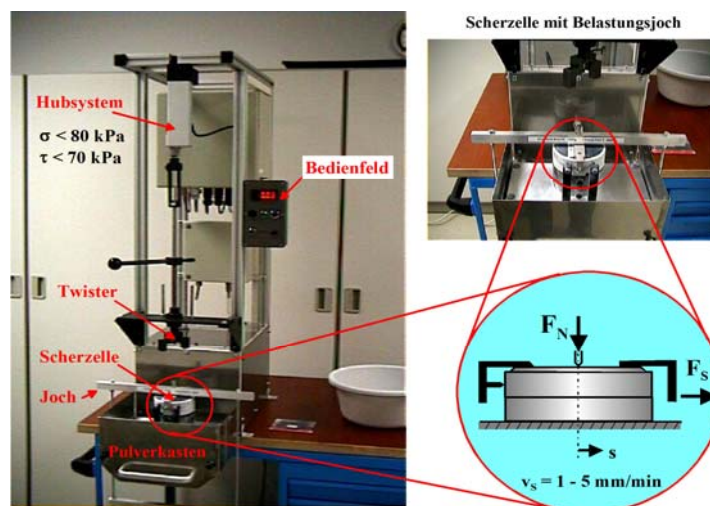


Bild 8: Translationsschergerät mit Hubsystem für größere Normallasten $\sigma < 70 \text{ kPa}$, Bedienfeld mit Anzeige der Schergeschwindigkeit, Scherzelle und Belastungsjoch, montiert auf einem Laborwagen mit Aufnahme des Zubehörs. Die Gestaltung der Vorverfestigungseinrichtung (Twister) lehnt sich an das Schergerät gemäß SCHWEDES (1990) an. Zur Erleichterung eines sanften Auf- und Absetzens vergleichsweise hoher Verfestigungslasten ($> 100 \text{ N}$) wurde eine elektrische Hubeinrichtung mit Rahmen gebaut. Der Scherring wird gezogen anstatt geschoben (KRAMBROCK 1983). Dies führt zu einem selbständigen Ausfluchtungseffekt des mechanischen Systems (CARSON 2006). Damit werden die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen verbessert.

Für die Überprüfung der Fließkennwerte bei Einleitung von Schwingungen unmittelbar in die Scherzone wird ein zweites Translationsschergerät genutzt (KOLLMANN & TOMAS 2001 und 2002). Bei längeren Scherwegen sowie bei höheren Belastungen im Zentrifugalkraftfeld oder im Mitteldruckbereich von etwa 50 bis 1000 kPa können wir zusätzlich eine robust ausgelegte Ringscherzelle anwenden (REICHMANN & TOMAS 2001, GROSSMANN & TOMAS 2006). Mit einer Press-Scherzelle vermessen wir das Fließverhalten von vorgepressten, drainierten und undrainierten Filterkuchen (REICHMANN & TOMAS 2001, MLADENCHEV & TOMAS 2008).

Das vorgestellte Gleichungssystem leistet seit mehr als 20 Jahren gute Dienste bei der physikalisch begründeten Versuchsauswertung der genannten Schergeräte (TOMAS 1991 und 2002a, MLADENCHEV & TOMAS 2008).

4.3 Kompressionsfunktionen eines kohäsiven Pulvers

Das Kompressionsverhalten eines kohäsiven Pulvers ist durch die Druckabhängigkeit der Packungsdichte gekennzeichnet. Es steht im unmittelbaren Zusammenhang zum Fließverhalten und wird von folgenden Mikrovorgängen beeinflusst:

- Umlagerung steifer Partikel mit steifen Kontakten zu einer dichteren Zufallspackung,
- Deformation weicher Kontakte von harten (mineralischen) Partikeln und
- Deformation weicher Partikel (z.B. Polymerpartikel, Biozellen).

Bei der Beurteilung eines Pulvers bezüglich seiner Tablettier- oder Brikettierfähigkeit unter hohem Druck sind außerdem zu unterscheiden:

- seine *Kompressibilität*, d.h. das Vermögen zur Volumenreduktion unter Druck, und
- die *Verpressbarkeit*, d. h. das Vermögen, unter Druck einen Preßling mit genügen der Festigkeit zu bilden.

Genau diese beiden Eigenschaften eines kohäsiven Pulvers werden auch in einem Scherversuch überprüft, und zwar die Kompression beim Vorverfestigen/Anscheren und anschließend die erzeugte Festigkeit durch das Abscheren (**Bild 7**). Diese direkt gemessenen Scherfestigkeiten lassen sich in die Druck- und Zugfestigkeiten umrechnen (**Bild 6**). Demzufolge sind Scherversuche, durchgeführt zumindest in einem mittelgroßen Druckbereich von etwa 50 bis 1000 kPa, ebenfalls geeignet, diese Eigenschaftsfunktionen zu quantifizieren.

Meist wird die einaxiale Kompression einer Partikelpackung bevorzugt, bei der schrittweise der Druck σ gesteigert wird und die Weg- oder Höhenänderung der Probe Δh bei Belastung und Entlastung gemessen wird (**Bild 9 1**). Nur bei groben freifließenden Schüttgütern beobachtet man näherungsweise ein linear *elastisches* Verhalten, bei dem die Kurven für Be- und Entlastung nahezu zusammenfallen (**Bild 9 1a**). Der Kompressionsdruck wird mikroskopisch über die elastischen Partikelkontakte verteilt. Es finden keine nennenswerten Platzwechsel der Partikel statt.

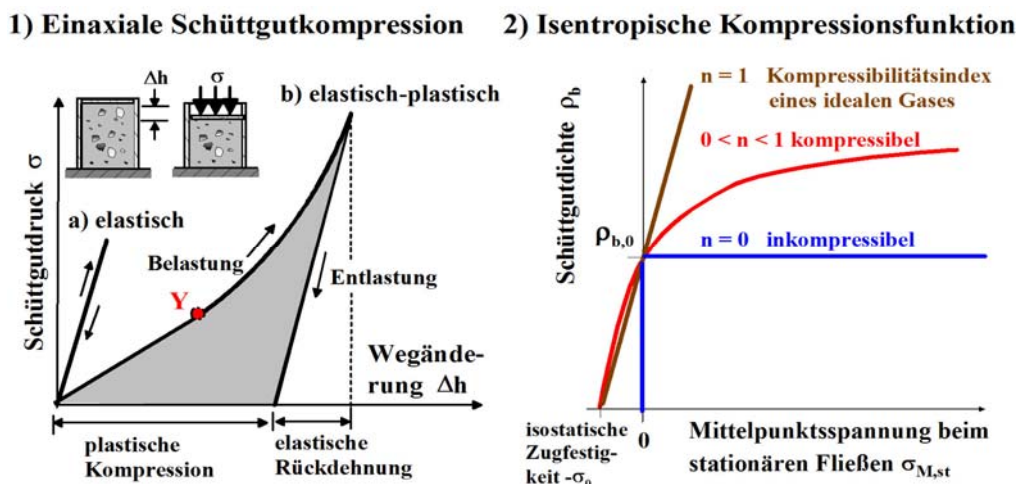


Bild 9: Verdichtung eines kohäsiven Pulvers: 1) Einaxiale Kompression mit 1a) elastischem und 1b) elastisch-plastischem Verhalten und 2) isentropische Kompressionsfunktion (TOMAS 2004)

Realistischer ist dagegen für feine kohäsive Pulver das makroskopische *elastisch-plastische Kompressionsverhalten* (**Bild 9 1b**). Ab dem Fließpunkt Y geht das reversible elastische Verhalten in das irreversible elastisch-plastische Verhalten über. Dies ist mikroskopisch sowohl durch elastisch-plastische Kontaktdeformationen als auch durch Platzwechsel der Partikel verbunden mit vollständig mobilisierter Coulomb-Reibung zwischen den

Kontaktflächen gekennzeichnet. Auf Grund der Vorverfestigung der Kontakte durch eingeprägte Druckkräfte ist die makroskopische Probensteifigkeit $d\sigma/d(h/h_0)$ beim Entlasten deutlich größer als beim Belasten, vergleiche dazu die unterschiedlichen Anstiege der Geraden im **Bild 9 1b**. Die grau unterlegte Fläche zwischen der Belastungs- und Entlastungskurve im **Bild 9 1b** entspricht der volumenbezogenen Kompressionsarbeit. Dieser Arbeitsaufwand wird von der Partikelpackung absorbiert und im Mikroskopischen innerhalb der Kontaktreibungsvorgänge dissipiert.

Beim Mittel- bis Hochdruckpressen kann sich gegebenenfalls der Kompressibilitätsindex (TOMAS 2004, GROSSMANN & TOMAS 2006) ändern. Verantwortlich dafür ist ein Wechsel der prozessbestimmenden Mikrovorgänge, z.B. der Übergang der Kontaktdeformationen zu einer dominanten Partikeldeformation. Mögliche Partikelabrasion und Partikelbrüche sowie das Ausfüllen der noch freien Porenräume mit den Bruchstücken sind ebenfalls dafür verantwortlich (GROSSMANN *et.al.* 2004, GROSSMANN & TOMAS 2006).

Darüber hinaus werden die Partikel häufig unter vergleichsweise großen Drücken beansprucht, wie z.B. bei der Pressfiltration ($\sigma > 1$ MPa), siehe Reichmann (REICHMANN & TOMAS 2001 und MLADENCHEV (2008), oder bei der Pressagglomeration von Pulvern, GROSSMANN (2004 und 2006). Deren hohe Energieeinträge von 0.01 - 100 J/g werden absorbiert und beim stationärem Fließen in enorme inelastische Kontaktdeformationen, Gefügeversetzungen, Reibungswärme, Partikel- und Wandabrasion oder sogar Partikelbrüche umgewandelt.

5 Schlussfolgerungen

Eine überschaubare Formulierung der Grenzspannungsfunktionen des Fließverhaltens kohäsiver Partikelkollektive enthält tatsächlich nur 3 Stoffparameter. Für die Grenzspannungsfunktionen des Fließens auf physikalischer Grundlage, Gln. (4) bis (6), werden die isostatische Zugfestigkeit σ_0 , der innere und stationäre Reibungswinkel φ_i , φ_{st} benötigt. Mit diesen drei Stoffparametern lassen sich die momentane Verfestigung, das beginnende und das stationäre Fließen vollständig beschreiben. Der mittlere Druck beim stationären Fließen $\sigma_{M,st}$ kennzeichnet als Scharparameter die Vorgeschichte der Verfestigung. Zwei weitere Stoffwerte, die Schüttgutdichte $\rho_{b,0}$ der lockeren Packung und der Kompressibilitätsindex n beschreiben hinreichend das Kompressionsverhalten des kohäsiven Pulvers (TOMAS 2004).

Weiches und nachgiebiges Kontaktverhalten, lässt sich anhand des Normalkraft-Weg-Gesetzes beurteilen. Infolge der weichen Kontaktabplattung folgt daraus ein deutlicher Haftkraftzuwachs. Das hat wiederum einen vergleichsweise hohen Anstieg des stationären Fließortes zur Folge. Die partikelmechanischen Modellvorstellungen werden beispielsweise genutzt, um den Einfluss von mechanischen Schwingungen (KOLLMANN & TOMAS 2001, HAACK *et al.* 2004) oder das Auspressen von wassergesättigten Filterkuchen

unter hohem Druck (REICHMANN & TOMAS 2001, TOMAS & REICHMANN 2002, MLADENCHEV & TOMAS 2008) physikalisch besser zu verstehen.

Mikroskopisch wird die beim Fließen eingetragene mechanische Energie in inelastische Kontaktdeformationen, Erzeugung von Reibungswärme, Emission von Licht (Mechanolumineszenz), siehe AMAN (AMAN & TOMAS 2004, 2005), Gefügeversetzungen der Kristallphasen, Erzeugung von Gitterfehlstellen, Einleitung von Mikrorissen, Abrasion von oberflächlichen Mikrorauhigkeiten, bis hin zu Partikelbrüchen umgewandelt. Dies sollte bei der Beurteilung von Produktschädigungen, Staubentstehung und Partikelbruch während der praktischen Transport- und Lagervorgänge berücksichtigt werden, siehe auch ANTONYUK (2006).

Mehr als 30 Jahre praktische Erfahrungen zeigen, dass sich die mechanischen Eigenschaften feiner Partikelkollektive und ihre Antwortfunktionen auf extreme Beanspruchungs- und Fließzustände bei verfahrenstechnischen Prozessen, Lager- und Fördervorgängen ausgezeichnet beurteilen lassen. Selbstverständlich werden damit auch zweckmäßige Schlussfolgerungen für die marktgerechte Produktgestaltung in der stoffwandelnden Industrie gezogen.

6 Literatur

- ALDER B.J., T.E. WAINWRIGHT (1959):** Studies in molecular dynamics. I. General method, Journal of Chemical Physics 31: 459-466
- AMAN S., TOMAS J. (2004):** Mechanoluminescence of quartz particles during grinding in stirred media mills. Powder Technology 146: 147-153
- AMAN S, TOMAS J. (2005):** On-line determination of particle size during fine grinding based on luminescence properties of solid. International Journal of Mineral Processing 74: 345-353
- ANTONYUK S. (2006):** Deformations- und Bruchverhalten von kugelförmigen Granulaten bei Druck- und Stoßbeanspruchung. Dissertation, docupoint, Magdeburg.
- ANTONYUK S., TOMAS J. HEINRICH S., MÖRL L. (2005):** Breakage behaviour of spherical granulates by compression. *Chemical Engineering Science*, 60: 4031-4044
- BORHO K., POLKE R., WINTERMANTEL K., SCHUBERT H., K. SOMMER (1991):** Produkteigenschaften und Verfahrenstechnik. Chemie Ingenieur Technik 63: 792-808
- BUGGISCH H. (1996):** Rheologische Charakterisierung disperser Systeme. Hochschulkurs, Universität Karlsruhe: 1-33
- CARSON J.W., WILMS H. (2006):** Development of an international standard for shear testing. Powder Technology 167: 1-9
- CUNDALL P.A., STRACK, O.D.L. (1979):** A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 29: 47-65
- FISCHER-CRIPPS A.C. (2000):** *Introduction to Contact Mechanics*. Springer, Heidelberg
- FÖRSTER W. (1986):** Bodenmechanik - Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine. Lehrbriefe, Bergakademie Freiberg

- GARCIA-ROJO R., HERRMANN H.J., MCNAMARA S. (Eds.) (2005)** *Powder and Grains 2005*. Vol. 1 & 2, A.A. Balkema Publ., Leiden
- GELDART D. (1973)**: Types of Gas Fluidization. *Powder Technology* 7: 285-292.
- GÖLDENER H. (1992)**: Lehrbuch höhere Festigkeitslehre. Vols. 1 und 2, Fachbuchverlag, Leipzig
- GROSSMANN, L., TOMAS J. (2006)**: Flow properties of cohesive powders tested by a Press Shear Cell. *Particulate Science & Technology* 24: 353-367
- GROSSMANN L., TOMAS J., B. CSÖKE B. (2004)**: Compressibility and Flow Properties of a Cohesive Limestone Powder in a Medium Pressure Range. *Granular Matter* 6: 103-109
- H. RUMPF H. (1974)**: Die Wissenschaft des Agglomerierens. *Chem. Ing. Tech.*: 46: 1-11
- HAACK A., KOLLMANN, TH., TOMAS J. (2004)**: Schwingungsinduziertes Fließen und Dämpfungsverhalten kohäsiver Pulver. *Schüttgut* 10 1: 86-95
- HINRICHSEN H., WOLF D.E. (Eds.) (2004)**: *The Physics of Granular Media*. Wiley-VCH Berlin
- HORNE M.R. (1969)**: The behaviour of an assembly of rotund, rigid, cohesionless particles. *Proceedings of Royal Society A* 286 part I 62-78 and part II 79-97; part III 360: 21-34
- ISRAELACHVILI J.N. (1992)**: *Intermolecular and Surface Forces*. Academic Press, London
- ISRAELACHVILI J.N., TABOR, D., VAN DER WAALS FORCES (1973)**: Theory and Experiment. *Progress of Surface and Membrane Science* 7: 1-55
- JENIKE A. W. (1964)**: Storage and flow of solids. *Engng. Exp. Station, Bull. No. 123*, Univ. Utah
- JOHNSON K.L. (1985)**: *Contact Mechanics*. Cambridge University Press
- KALMAN H. (2002)**: Vortrag, Verfahrenstechnisches Kolloquium, Magdeburg
- Kendall K. (2001)**: *Molecular Adhesion and its Application*. Kluwer Academic/Plenum Publ., New York
- KOLLMANN TH., TOMAS J (2001)**: Vibrational Flow of Cohesive Powders. In: Levy, A. and Kalman, H., *Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids*, Elsevier, Amsterdam: 45-56
- KOLLMANN TH., TOMAS, J. (2002)**: Effect of Applied Vibrations on Silo Hopper Design. *Particulate Science & Technology* 20: 15-31
- KOLLMANN TH., REICHMANN, B., TOMAS J. (2001)**: Time consolidation and caking behaviour of soluble particulate solids. *bulk solids handling* 21: 431-434
- KOLYMBAS D. (1988)**: Eine konstitutive Theorie für Böden und andere körnige Stoffe. Habilitation, Universität Karlsruhe
- KRAMBROCK W. (1983)**: Translationsschergerät zur Auslegung von Silos und Bunkern. *Aufbereitungs-Technik* 24: 55-56
- KRUPP H. (1967)**: Particle adhesion – Theory and experiment. *Advances Colloid Interface Science* 1: 111-239
- LIU W.K. KARPOV, E.G., PARK H.S. (2006)**: *Nano Mechanics and Materials: Theory, Multiscale Methods and Applications*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester
- MAUGIS D. (1999)**: *Contact. Adhesion and Rupture of Elastic Solids*, Springer, Berlin
- MLADENCHEV T., TOMAS J. (2008)**: Dewatering and flow behaviour of fine limestone particle packings. *Proceedings 10th World Filtration Congress*, Vol. 1: p. 336-340, Leipzig
- MOLERUS O. (1975)**: Theory of yield of cohesive powders. *Powder Technology*, 12: 259-275
- MOLERUS O. (1978)**: Effect of interparticle cohesive forces on the flow behaviour of powders. *Powder Technology*, 20: 161-175

- MOLERUS O. (1982):** Fluid-Feststoff-Strömungen. Springer, Heidelberg
- MOLERUS O. (1985):** Schüttgutmechanik - Grundlagen und Anwendungen in der Verfahrenstechnik. Springer Verlag, Berlin
- NEDDERMAN R. M., TÜZÜN, V., SAVAGE, S. B., HOULSBY, S.T. (1983):** The flow of granular materials - I Discharge rates from hoppers. *Chemical Engineering Science* 37 (1982) 1597-1609; - II Velocity distributions in slow flow, *Chem. Engng. Sci.* 37 (1982) 1691-1709; - III Rapid shear flow, *Chem. Engng. Sci.* 38 189-195
- NEDDERMAN R.M. (1992):** Statics and Kinematics of Granular Materials. Cambridge University Press, Cambridge
- PÖSCHEL T., SCHWAGER T. (2005):** Computational Granular Dynamics. Springer Berlin
- REICHMANN B., TOMAS J. (2001):** Expression behaviour of fine particle suspensions and the consolidated cake strength. *Powder Technology* 121: 182-189
- ROWE P.W. (1962):** The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of Royal Society A* 269: 500-527
- RUMPF H. (1958):** Grundlagen und Methoden des Granulierens. *Chemie Ingenieur Technik*, 30: 144-158.
- SATAKE M., JENKINS, J.T. (1988):** Micromechanics of Granular Materials. Elsevier, Amsterdam
- SCHUBERT H. (1979):** Grundlagen des Agglomerierens. *Chemie Ingenieur Technik* 51 266-277
- SCHUBERT HEINRICH (2003):** Wechselwirkungen in grobdispersen Systemen. In: Schubert, Heinrich (Ed.), *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*, Wiley-VCH Weinheim: 213-270
- SCHUBERT HEINRICH, FRATSCHER, W., KIND R. (1980):** Zur Herausbildung einer einheitlichen Modellierungsstrategie in der Verfahrenstechnik. *Chemische Technik* 35 335-342
- SCHULZE D. (2006):** Pulver und Schüttgüter. Fließeigenschaften und Handhabung, Springer
- SCHULZE D. (2008):** Powders and Bulk Solids: Behaviour, Characterization and Flow, Springer
- SCHWEDES J. (1970):** Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern. Verlag Chemie Weinheim
- SCHWEDES J. (2003):** Review on testers for measuring flow properties of bulk solids. *Granular Matter* 5: 1-43
- SCHWEDES J., SCHULZE, D. (1990):** Measurement of Flow Properties of Bulk Solids. *Powder Technology* 61: 59-68
- SCHWEDES J., D. SCHULZE (2003):** Lagern von Schüttgütern. In: Schubert, Heinrich (Ed.), *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*, Wiley-VCH Weinheim: 1137-1253
- Schwedes J., Wilms H. (1988):** Fließeigenschaften von Schüttgütern. 39-57, in: P. Martens (Ed.), *Silo – Handbuch*, Ernst & Sohn, Berlin
- STRONGE W.J. (2000):** Impact mechanics. Cambridge University Press
- SZABO I.(2001):** Höhere Technische Mechanik. Springer Verlag, Berlin
- TABOR D. (1977):** Surface Forces and Surface Interaction. *Journal of Colloid and Interface Science* 58: 2-23
- TARDOS G.I. (1997):** A fluid mechanistic approach to slow, frictional flow of powders. *Powder Technology* 92: 61-74
- TARDOS G.I., MCNAMARA, S., TALU, I. (2003):** Slow and intermediate flow of a frictional bulk powder in the Couette geometry. *Powder Technology* 131: 23-39
- TERZAGHI K., PECK R. B., MESRI G. (1996):** Soil mechanics in engineering practice, Wiley, New York

- TOMAS J. (1983):** Untersuchungen zum Fließverhalten von feuchten und leichtlöslichen Schüttgütern. *Freiberger Forschungsheft A* 677: 1-133
- TOMAS J. (1997):** Zum Verfestigungsprozess von Schüttgütern - Mikroprozesse, Kinetikmodelle und Anwendungen. *Chemie Ingenieur Technik* 69: 455-467
- TOMAS J. (2000):** Particle Adhesion Fundamentals and Bulk Powder Consolidation. *KONA – Powder and Particle* 18: 157-169
- TOMAS J. (2001):** Assessment of mechanical properties of cohesive particulate solids – part 1: particle contact constitutive model. *Particulate Science & Technology* 19: 95-110
- TOMAS J. (2001):** Assessment of mechanical properties of cohesive particulate solids – part 2: powder flow criteria. *Particulate Science & Technology* 19: 111-129
- TOMAS J. (2002):** Zur Mechanik trockener kohäsiver Schüttgüter. *Schüttgut* 8: 522–537
- TOMAS J. (2003):** Mechanics of Nanoparticle Adhesion – a Continuum Approach. In: K.L. Mittal, *Particles on Surfaces 8: Detection, Adhesion and Removal*, VSP Utrecht: 183-229
- TOMAS J. (2003):** The mechanics of dry, cohesive powders. *powder handling & processing* 15: 296-314
- TOMAS J. (2003):** Zur Produktgestaltung kohäsiver Pulver – mechanische Eigenschaften, Kompressions- und Fließverhalten,. *Chemie Ingenieur Technik* 75: 651–661
- TOMAS J. (2004):** Fundamentals of Cohesive Powder Consolidation and Flow. *Granular Matter* 6: 75-86.
- TOMAS J. (2004):** Product Design of Cohesive Powders - Mechanical Properties, Compression and Flow Behavior *Chemical Engineering & Technology*, 27:605-618
- TOMAS J. (2007):** Adhesion of ultrafine particles - a micromechanical approach. *Chemical Engineering Science* 62: 1997-2010
- TOMAS J. (2007):** Adhesion of ultrafine particles – Energy absorption at contact. *Chemical Engineering Science* 62: 5925–5939
- TOMAS J., REICHMANN B. (2002):** Compression, permeation and flow behaviour of wet nanoparticle cakes, in-situ tested with a press-shear-cell. *Chemical Engineering & Technology* 25: 1053–1060
- TOMAS J.(2000):** Particle Adhesion Fundamentals and Bulk Powder Consolidation. *powder handling & processing* 12: 131-138
- TOMAS J., (1991):** Modellierung des Fließverhaltens von Schüttgütern auf der Grundlage der Wechselwirkungskräfte zwischen den Partikeln und Anwendung bei der Auslegung von Bunkeranlagen. Diss. B (Habilitation), TU Bergakademie Freiberg.
- TYKHONIUK R., TOMAS J., LUDING S., KAPPL M., HEIM, L., BUTT H.-J. (2007):** Ultrafine cohesive powders: from interparticle contacts to continuum behaviour. *Chemical Engineering Science* 62: 2843-2865
- WALZEL P., LINZ S., KRÜLLE C., GROCHOWSKI R. (Eds.) (2006):** Behaviour of granular media. Shaker Aachen
- YOUNG D.A., ALDER B.J. (1980):** Studies in molecular dynamics. XVIII. The square-well phase diagram. *Journal of Chemical Physics* 73: 2430-2434
- ZIEGLER F. (1985):** Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper. Springer Verlag, Wien

Optimization of Inserts in Silos

Optimierung von Siloeinbauten

Gisle G. Enstad

Telemark University College and Tel-Tek, dept. POSTEC Porsgrunn, Norway
E-Mail: Gisle.Enstad@hit.no

Abstract

Silos are used for storage of particulate solids, and are known for causing a number of problems during discharge, like arching, rat-holing, hang-ups, flooding, segregation, incomplete emptying and difficult level control. As identified by Jenike and his co-workers, two types of flow are possible in silos, mass and funnel flow. Most silo problems are associated with funnel flow, and by ensuring mass flow most of the common silo problems are avoided. To obtain mass flow the walls of the hopper have to be steeper than a minimum requirement, depending on the powder, the friction between the powder and the walls, and the hopper geometry. The critical design parameters for mass flow can be determined by means of the Jenike method. Unfortunately traditional mass flow hoppers often require very steep hopper walls. That is one of the reasons why funnel flow silos are still far too common. By the use of inserts, mass flow may be obtained with considerably less steep hopper walls, provided the inserts are designed in a suitable way. By means of experimental and theoretical work some design criteria of inserts for mass flow have been established.

Key words: Powders, silos, hoppers, mass flow, funnel flow, inserts, design criteria

1 Background

Silos are used to store particulate materials, and can vary in size from less than 1 m³ to several 1000 m³. There are numerous possible shapes of silos. Some of the most common ones are shown in **Figure 1**. The simplest one is perhaps the cylindrical silo with a flat bottom seen to the far right, a geometry that is quite common, although it is clear that with a central opening in the flat bottom the free discharge by gravity alone will stop long before the silo is completely empty, and a lot of material will always remain in the silo if no extra equipment is installed in order to sweep the rest of material out of the silo. If the silo is to empty completely by gravity alone without any extra equipment, a converging part as seen in the example to the far left in Figure 1 is needed, bringing all the material to the out-

let opening. This converging part is usually called the hopper. The hopper is a very important part of the silo, since the hopper is decisive for how the silo is going to work.

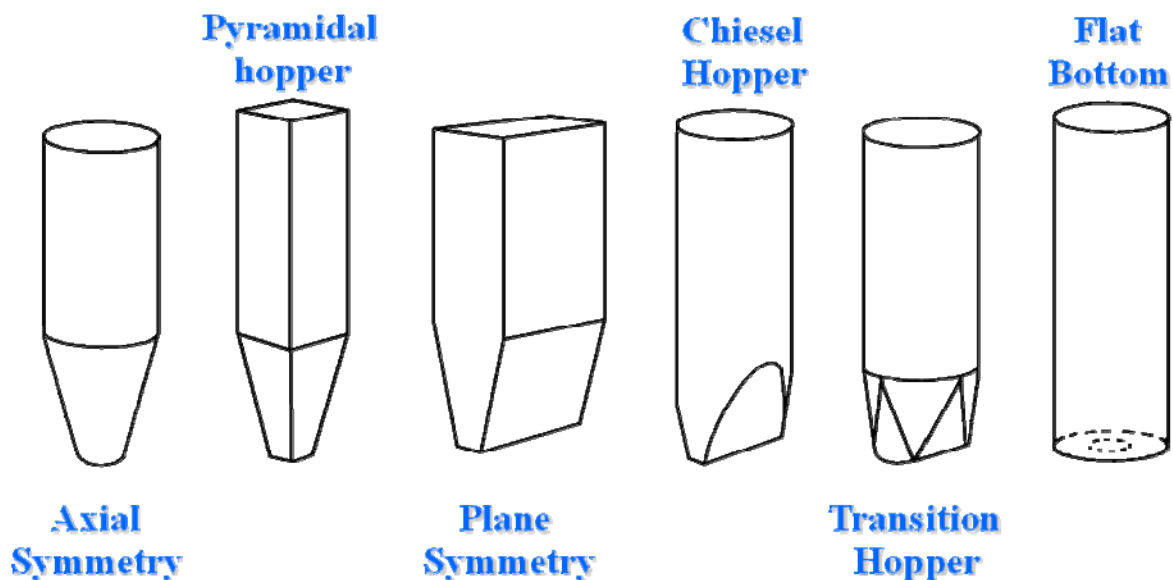


Figure 1: Possible shapes of silos

If the hopper is not correctly designed for the material that is going to be stored in the silo, a number of special silo problems may be experienced. Some quite common examples of flow obstructions are shown in **Figure 2**. Arching across an outlet that is too small is shown to the left in **Figure 2**. The powder gains enough strength to sustain an arch across the outlet, preventing any further flow from the silo. In such situations the operator usually will hit the hopper wall with a hammer to make the flow recommence, a vibrator may be used, or sometimes also aeration or other discharge aids may be applied in order to ensure further flow from the silo.

The example shown in the middle of **Figure 2** is named rat-holing, where the powder directly above the outlet is discharged from the silo, whereas the powder around forms stable walls, preventing further discharge. Also in this case further discharge may be achieved by the same remedies as used for the case of arching.

The third example in **Figure 2** shows a hang up, where most of the powder in the hopper has been discharged, but a self sustained arch is formed across the silo at the top of the hopper. This happens with very cohesive powders usually after some storage time, and it may happen in big silos many meters in diameter. In fact this is a dangerous situation, where the whole silo may collapse when thousands of tons of material fall down into the hopper once the arch suddenly fails. If the hopper is not strong enough to withstand the considerable impact forces, the hopper will collapse. As the powder falls like a piston air is sucked in through far too small ventilation openings in the roof, causing a sudden build up of a strong under pressure in the top of the silo, which may be sucked in, since the silo

was made to withstand an over pressure from the inside, not an under pressure. Silos have collapsed in this way in a number of occasions. Such situations should therefore be avoided by all means.

Flow obstructions

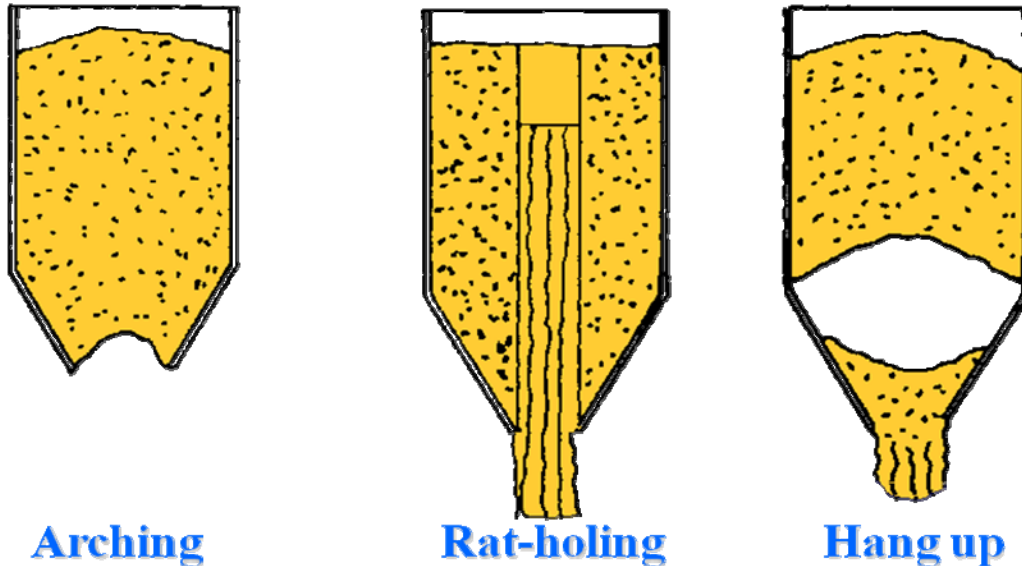


Figure 2: Common silo problems, flow obstructions

However, as indicated to the left in **Figure 3**, there are also occasions where the powder flows too well from a silo. For some reasons the powder may pick up air and get aerated. When aerated the powder behaves more like a liquid than a solid, and it flows like a fluid through the smallest openings, making the discharge impossible to control. The silo is emptied completely very fast, causing a lot of mess. It may even be dangerous to be close to a big silo when it is flooding, as there are records that people standing nearby such a silo have been drowned by powder.

Segregation is also a phenomenon that may cause severe process problems, if not as dramatic as flooding. Segregation causes particles of different properties like size, shape and density, to collect at different parts of the silo. Usually coarse and very fine particles are collected near the walls, whereas the intermediate particles are collected around the centre of the heap that is formed during filling of the silo. Often the fine material in the centre of the silo is discharged first, then the coarse material close to the walls, reducing the homogeneity of the material after discharge of the silo to an extent that often can cause problems for the processes to follow.

Furthermore, a simple level control may not be enough to determine how much a silo contains at any time, as illustrated on the right hand side of **Figure 3**. If the level is measured close to the walls, the silo is full, if it is measured in the centre, it is empty. Neither is really correct, although perhaps it may be correct to state that the silo is empty, since all the ma-

material that can be emptied by gravity alone has been discharged. What is left, can only be discharged if some artificial discharge aids are being used, as a stable rat hole obviously has developed in this silo.

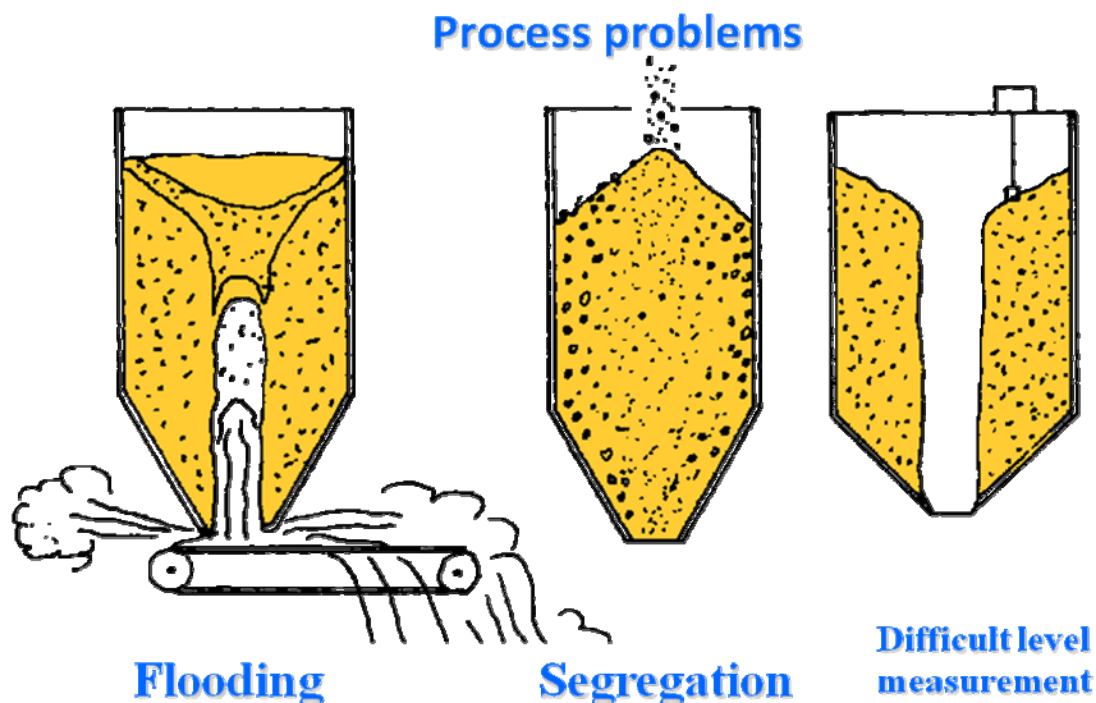


Figure 3: Common silo problems, flow obstructions

The problems illustrated in **Figures 2** and **3** are still all too common, although scientific solutions were developed by Andrew Jenike and his coworkers at the University of Utah when they carried out their famous pioneering work (A. W. JENIKE) in the period between 1952 and 1962. The main conclusions were that 2 basic flow modes in silos are possible as illustrated in **Figure 4**. There is either mass flow, where flow takes place across the whole cross section of the silo, simultaneously including the whole silo content, as shown on the left hand side of **Figure 4**, or there is funnel flow, where flow only takes place in a vertical flow channel directly above the outlet, as indicated on the right hand side of **Figure 4**. The notion mass flow was probably chosen because it includes the whole mass contained in the silo, and funnel flow was chosen since a funnel develops in the top surface, where material slides from the walls towards the flow channel during discharge. Nearly all the silo problems shown in **Figures 2** and **3** are associated with funnel flow. The key to solving silo problems is therefore to be able to design the silo for the desired flow mode. The inclination of the hopper walls are decisive of what flow mode there will be in a silo. For each combination of powder and wall material there is a critical inclination. If the hopper wall is steeper than the critical inclination, there will be mass flow, if it is less steep, there will be funnel flow.

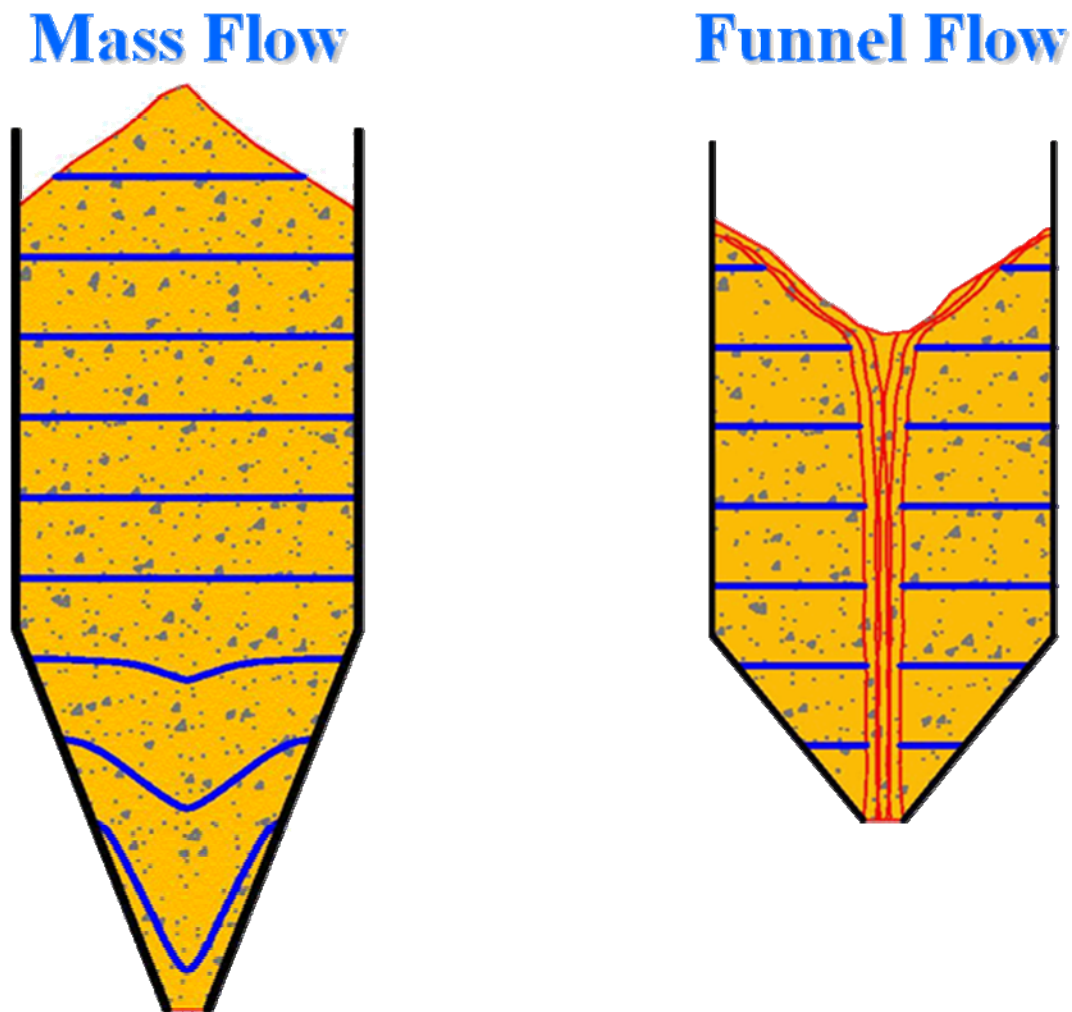


Figure 4: The two flow patterns that are possible in silos

JENIKE (1961, 1964) and his co-workers developed a method for designing silos to work reliably in the desired mode of flow. By measuring the flow properties of the powder to be stored, the critical silo parameters can be determined, like critical outlet size to avoid flow obstructions, and critical hopper inclinations to ensure mass flow. Unfortunately the critical inclination for mass flow often is so small that it becomes impossible to get the required storage volume within the available headroom. That is one reason why funnel flow is chosen more often than desirable, with the result that many still experience the problems illustrated in **Figures 2** and **3**, although it could have been avoided by choosing mass flow. Ways to get mass flow with less steep hopper walls is therefore clearly desirable, and the use of hopper inserts as illustrated in Figure 5 is one option for achieving this.

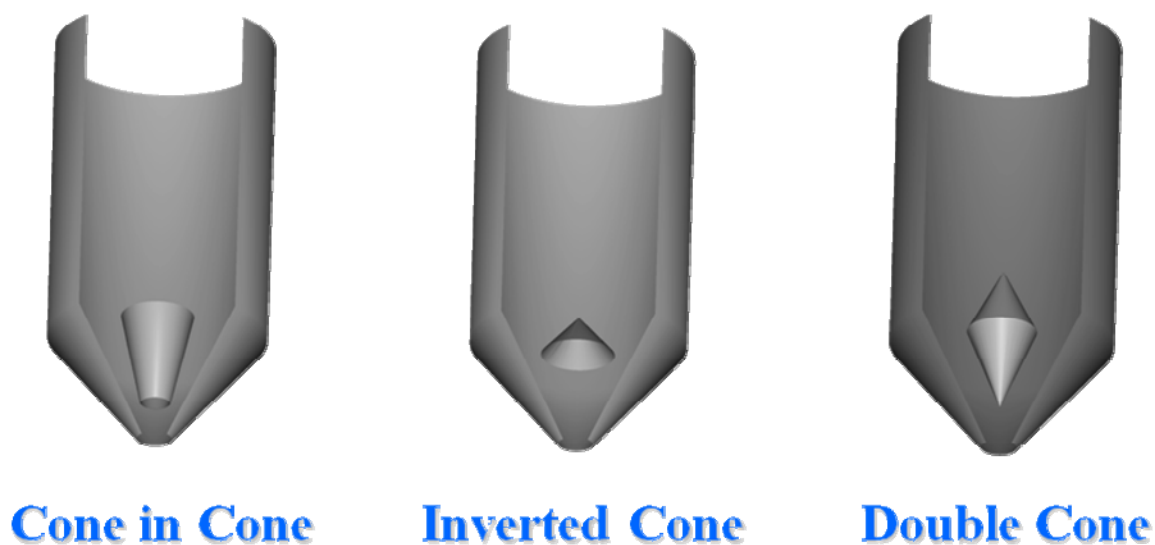


Figure 5: Inserts for obtaining mass flow with less steep hopper walls

The cone in cone insert to the left in **Figure 5** is based on the Binsert concept invented by Jenike's co-worker Jerry Johanson in the late 1970-ies. The inverted cone in the middle is an old concept that has been in use for around 100 years, with very unclear effects, whereas the double cone to the far right is a combination of the two other concepts. A lot of experimental work has been carried out in order to find criteria that have to be met in order to achieve mass flow in hoppers less steep than traditional hoppers by using inserts as shown in **Figure 5**.

2 Small scale tests on the use of inserts in conical and plane flow hoppers

Small scale tests in cylindrical and plane flow silos were carried out in the 1990-ies by master students mainly from Telemark University College (TUC), but also by students from other places in Europe, who came to Tel-Tek, dept. POSTEC to carry out their final year project on experimenting with one or more of the types of inserts shown in **Figure 5**. The first master student was EIKSAA (1994) from TUC, who investigated the cone in cone concept both in plane and axial symmetry. His work led to a preliminary design concept that formed the base for most of the following workers, and a preliminary design criterion for designing cone in cone inserts was derived.

The worker to follow EIKSAA was DÜRR (1995), who did more thorough work on the same type of inserts, and spent a lot more on the analysis of the experimental results, and derived a more accurate design criterion. Unfortunately this was a lot more complicated than the previous version, and since the design criterion in no cases was very accurate, the previous version remained in focus.

A lower grade project on the use of inserts in a plane flow hopper was carried out by JOHANSEN and KLONTEIG (1996), who in addition to the wedge in wedge, corresponding to the cone in cone in axial symmetry, also tested the inverted wedge, corresponding to the inverted cone in axial symmetry. It was confirmed that the hopper in hopper concept in plane symmetry worked in a similar way as the cone in cone concept in axial symmetry, and with a similar design criterion. The inverted wedge resulted in mass flow if properly designed and positioned, but a serious problem with this type of insert was that uneven flow so easily occurred. If the insert was slightly off center, the flow would take place only on one side of the insert, with no flow on the other side.

KLONTEIG (1997) continued the work on plane flow hoppers in his master thesis, where he investigated inverted wedges and double wedges, corresponding to inverted and double cones in axial symmetry. His work showed that mass flow could be achieved, and he arrived at some simple design criterions, but at the same time the problem with uneven flow on the sides of the insert proved to be a problem for both the inverted and the double wedges.

KARLSEN (1998) did his master thesis on the use of double cones in conical hoppers, and he arrived at a similar conclusion as Klonteig had reached for plane flow. When correctly designed and positioned the double cone could give nearly perfect mass flow, but skewed flow was hard to avoid, also in axial flow. WELCH (2000) continued the work Karlsen had started on double cones in axial hoppers, and confirmed the results obtained by Karlsen. Some tests were also carried out on inverted cones, and it was seen that the problem to obtain symmetric flow in the silo was equally difficult with the single inverted cone as with the double cone. At the same time it was also confirmed that mass flow could be obtained also with an inverted cone.

3 Full scale tests on the use of inserts in conical hoppers

There are no reliable ways of scaling up in powder technology. Taking into use results from small scale laboratory tests is therefore quite risky. Confirmation by full scale tests was therefore necessary before the use of inserts could be recommended in industry. During the international symposium RelPowFlo II organized by POSTEC in Oslo in 1993, contact was established between Institut für Agrartechnik Bornim (ATB) by CHR. FÜRLL and Tel-Tek, dept. POSTEC by G. G. Enstad. Since ATB had some full scale experimental silos, see **Figure 6**, full scale testing of inserts to obtain mass flow would be possible in a co-operation between ATB and POSTEC. The co-operation was easily established, and in 1996 a student from TUC, T. HJORTAAS, did his main project for his master degree on full scale tests of the cone in cone concept, using the silo in the middle in **Figure 6**. Animal feed flour was also used as test material. The idea was to test in full scale the results we already at that time had got from the small scale tests in Porsgrunn. All the local guidance,

equipment and technical assistance were provided by ATB in Potsdam, whereas the student and some distant guidance came from Porsgrunn (HJORTAAS 1996).



Figure 6: Full scale experimental silos at ATB Bornim (HJORTAAS 1996)

The technical arrangements are shown in **Figure 7**. An external frame was built for support of the insert, as the walls would hardly be strong enough to withstand the forces acting on the insert. One consequence of this arrangement was that only about half the filling height could be used, but this was quite sufficient to study the flow patterns. As indicated the frame went through the walls, and the insert was hung from the frame in a weighing cell, enabling the measurement of the vertical force acting on the internal cone. To keep the insert in place horizontally, supports to the hopper walls were installed. These supports could only take up horizontal forces, without interfering with the vertical force. The insert was well centered, and the vertical position could easily be varied.

To bring the internal cone in place, a temporary opening was made in the silo wall. To limit the size of the opening the insert was made considerable smaller than what would correspond to what had been tested so far in small scale in Porsgrunn, where the height of the internal cone was nearly the same as for the silo hopper.

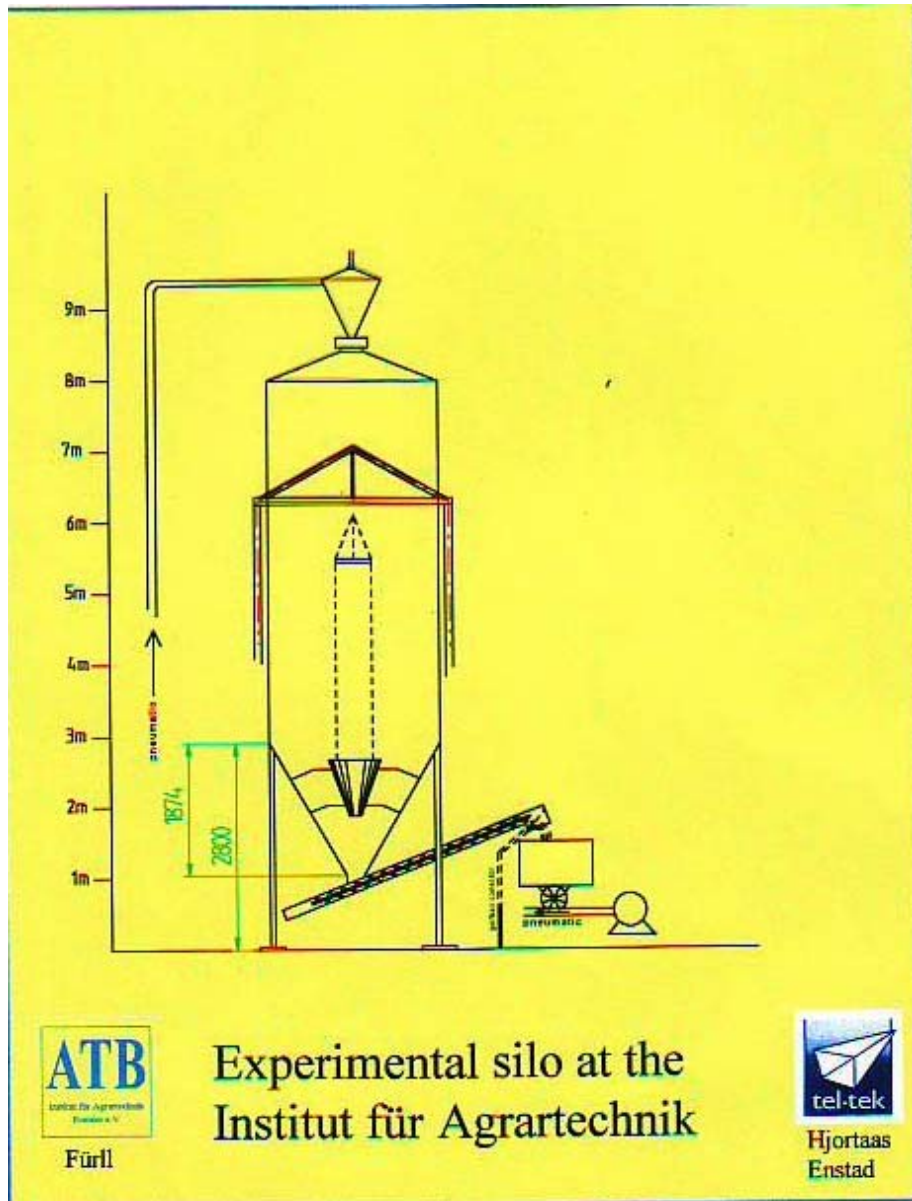


Figure 7: Technical installations for full scale testing of cone in cone insert (HJORTAAS 1996)

In order to check the flow pattern the flour was seeded with golf balls during filling. The golf balls were all numbered and placed in accurate positions. By monitoring the times of exit for all the balls, the flow pattern during discharge could be deducted, and it was possible to determine whether there had been mass or funnel flow. The discharge was controlled by a screw conveyor as seen in **Figure 8**. At the exit from the screw conveyor there was a sieve. The flour easily went through the sieve, but the golf balls were caught, and rolled

down into a vertical tube, where they all were collected in the order they were discharged. On its way to the vertical tube, the golf balls activated a micro switch that gave a signal to a computer, where the accurate time was recorded. This system made it very easy to monitor the discharge of the golf balls, and the operator could make other observations during the test. Some pictures were made during discharge, like the one in **Figure 8** where the interior of the silo is seen after the silo has been emptied as completely as possible before the insert was installed. The frame for hanging the insert is seen, but the insert is not there. As seen there is a lot of flour sticking to the walls after the discharge by gravity has stopped. This is quite typical for a funnel flow silo, where complete discharge often is impossible to achieve by means of gravity alone.

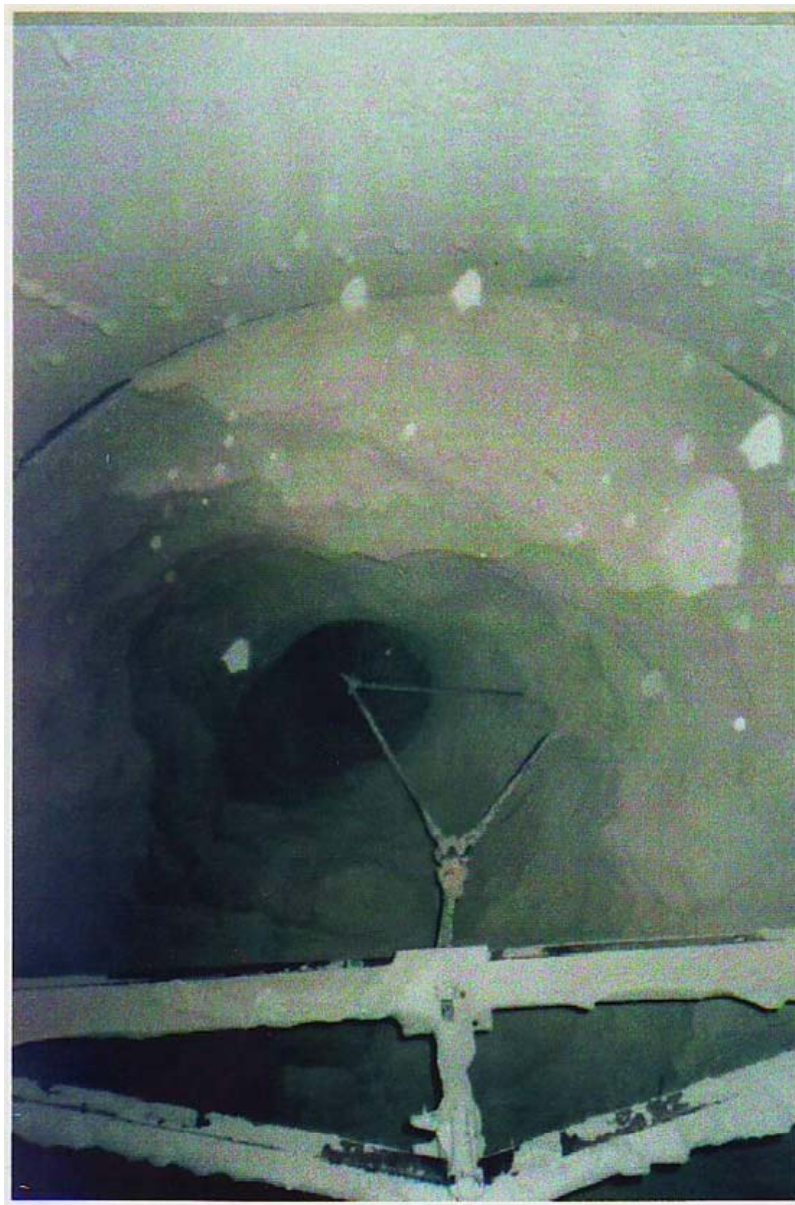


Figure 8: The silo interior after complete emptying by gravity alone without insert (HJORTAAS 1996)

The contrast between mass and funnel flow becomes clear when comparing the two pictures shown in **Figures 8** and **9**. **Figure 9** shows a picture made of the interior of the silo with the insert in place when there is still some material left in the hopper. It is clearly seen where the level of the material was before discharge started. Above this level the walls are dusty, whereas below they are clean, as the material has been sliding along the walls during discharge, which is typical for mass flow.

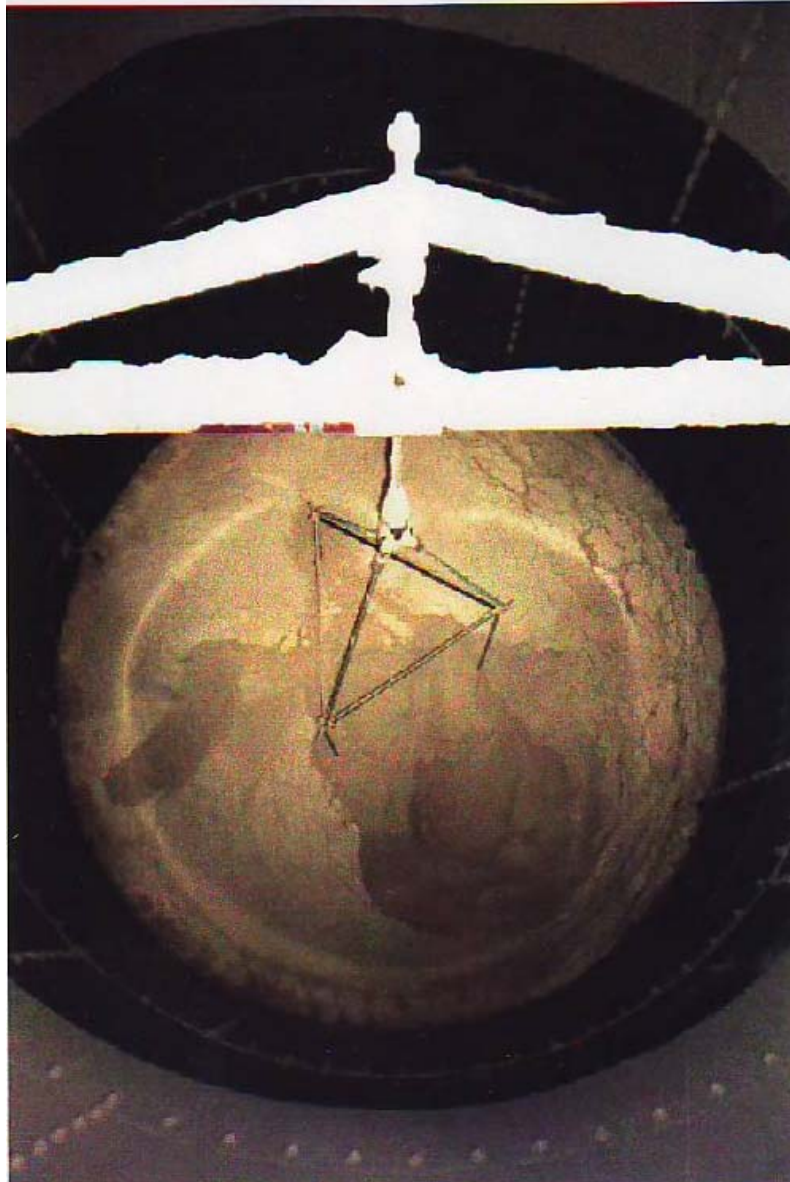


Figure 9: The interior of the silo emptied down to the hopper in mass flow (HJORTAAS 1996)

Figure 9 is a clear proof that mass flow was achieved when the insert was installed and put in an optimal position, although it was considerably smaller than what corresponded to the previous small scale tests. Mass flow was also confirmed by the analysis of the exit times of the golf balls, and the silo was emptied completely in mass flow, with no material left in the hopper, although some uneven flow in the hopper was observed, as also can be seen in **Figure 9**.

However, uneven flow in the hopper is quite normal also in mass flow silos, but there is always movement along the walls, and the hopper empties completely by gravity alone. The conclusion of the work carried out by HJORTAAS confirmed the results from the small scale tests in Porsgrunn. By the use of cone in cone inserts ideal mass flow could be obtained with considerably less steep hopper walls than with traditional hoppers. This was later confirmed by the master project carried out by L. TORMODSRUD (2000) on the same silo, and further work, including computer simulations were also carried out by T. SCHURICHT (2004), who did his PhD-work on this system. The co-operation between ATB and POSTEC was a milestone in the development of inserts for mass flow silos (HJORTAAS *et al.* 1997, SCHURICHT *et al.* 2001).

POSTEC got its own full scale silos in co-operation with TUC, one plane and one axially symmetric, as seen in **Figure 10**. S. R. DE SILVA was the driving force behind the erection of this silo battery, but unfortunately he did not live long enough to see it in full use. A number of workers have been working on this installation, funded by the Norwegian Research Council and EU Marie Curie scholarships. So far it has formed the basis for 2 PhDs (DING 2004, HÄRTL 2008), and one more is expected.



Figure 10: Full scale silos at POSTEC

Dry sand was used as test material, and tests were carried out in the cylindrical silo. The plane flow silo was only used for storage when emptying the cylindrical silo. The technique of seeding markers has been used also for this silo, and the positions of the markers are shown in **Figure 11**. Markers were placed in similar positions in the vertical plane through the silo axis at 90° to the ones shown here.

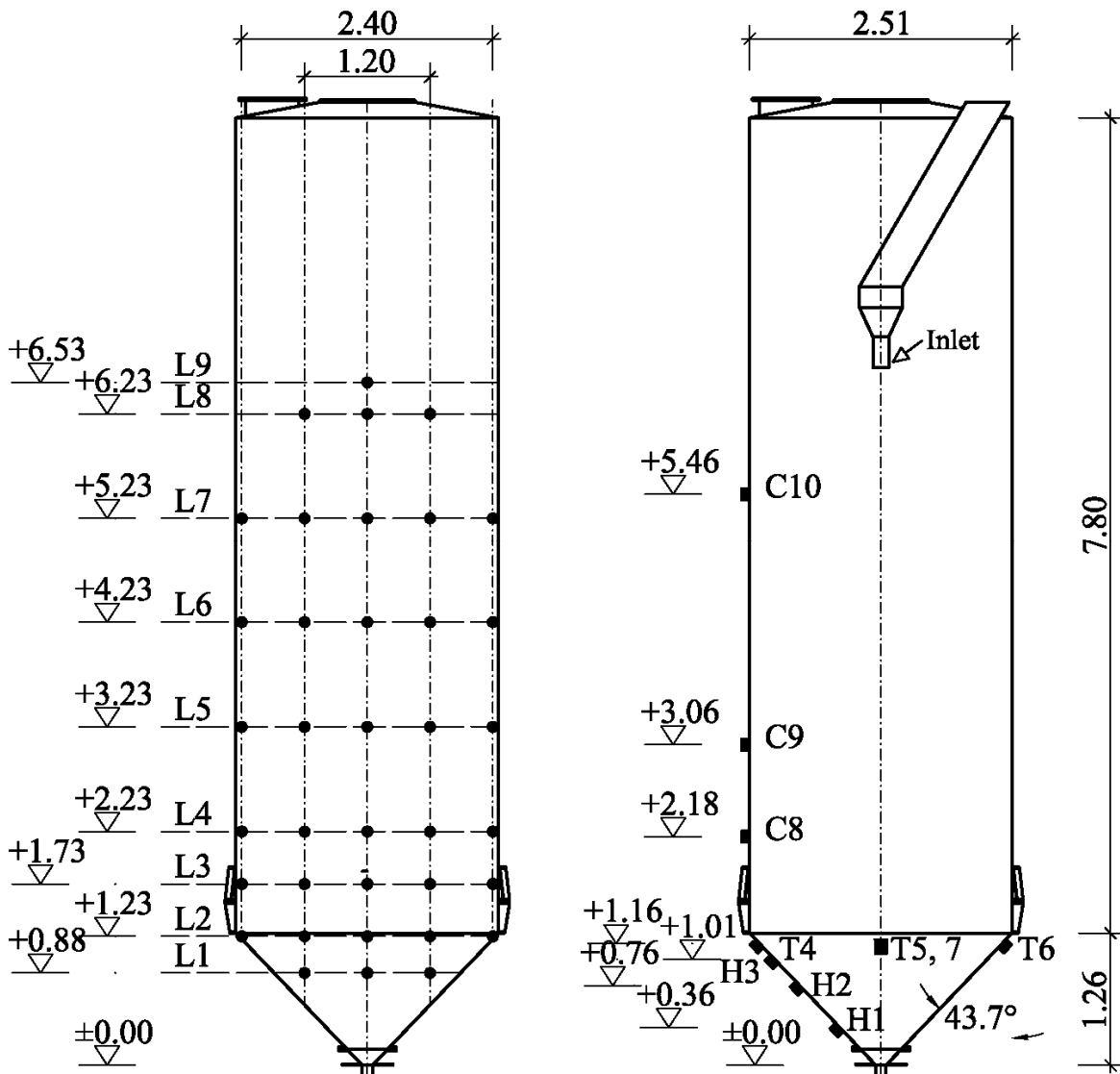


Figure 11: Placing of markers during filling, and arrangement for central filling (HÄRTL *et al.* 2008)

Controlled central filling was achieved by the filling tube seen to the right in **Figure 11**. A number of different types of inserts were tested. Most tests were carried out with double cones, but also inverted cones as well as cone in cone and even some combinations of more than one insert at the same time have been tested. An overview of the most recent inserts is shown in **Figure 12**.

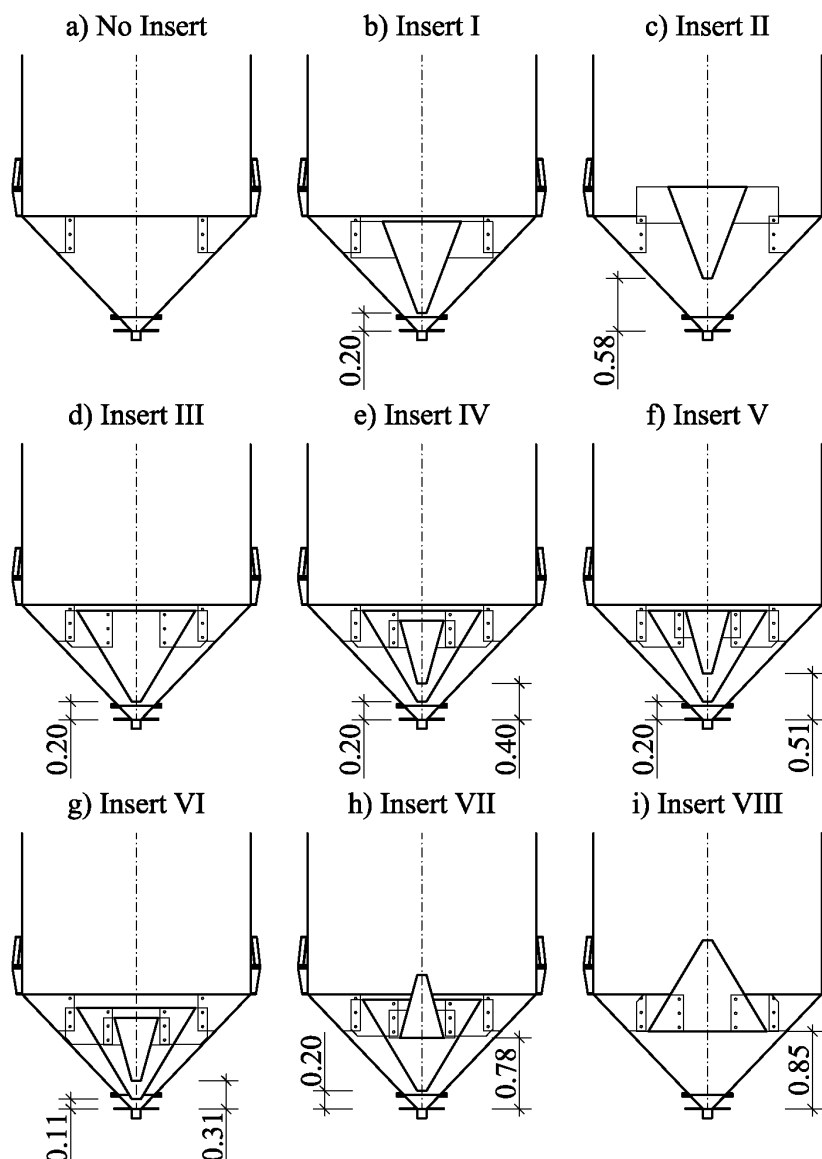


Figure 12: Overview of the most recent inserts tested in the cylindrical silo (HÄRTL *et al.* 2008)

To see the effect of the use of inserts, the results of discharge with markers without using insert are shown in **Figure 13**, giving the initial height of the markers as a function of the time from starting the discharge until the markers passed through the outlet (HÄRTL *et al.* 2008). As seen all the markers placed in the centerline of the silo, Pos R0, came out first, and the upper markers placed half way between the centre and the walls, Pos RM1-RM4, came out nearly simultaneously with the top central marker, showing that flow takes place in a central channel. Then the markers at the walls, Pos RW5-RW8, at the highest level came out, strangely enough before the markers closer to the centre at the same level. The explanation is that the flow channel widens a bit upwards, so the markers closer to the centre have moved a bit down before the markers at the walls slides towards the flow channel on the surface along the funnel that forms in the surface, as will be explained more below.

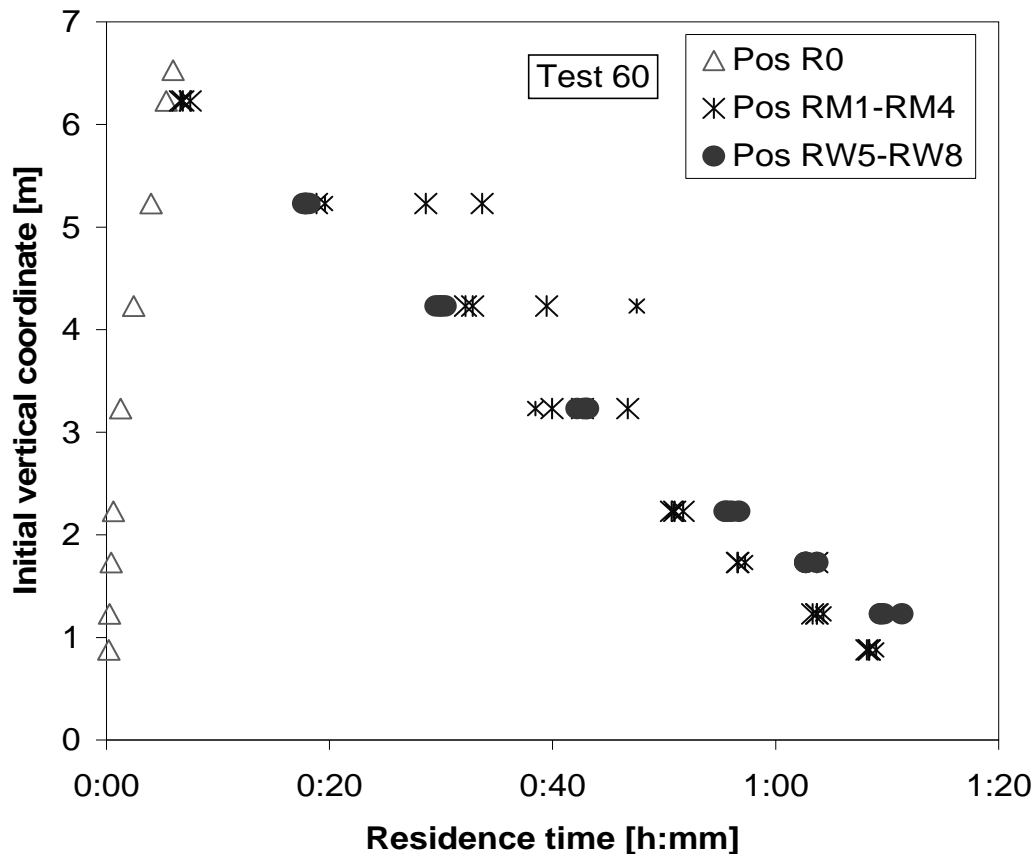


Figure 13: Initial vertical positions of markers as a function of the exit time in the silo without insert (Härtl et al. 2008)

Having installed the cone in cone insert III, see **Figure 12**, the diagram shown in **Figure 14** was obtained. Still the central markers came out as the first ones, but also many of the markers between the walls and the centerline came out quite early, indicating that there still was funnel flow, but the insert had widened the flow channel somewhat. Still the markers at the walls were the last ones to be discharged, and with a few exceptions the lower the positions, the longer the residence times.

Insert IV is the same cone in cone as insert III, but in addition a steeper cone has been installed inside the first cone. The resulting diagram with insert IV is shown in **Figure 15**. Here it is clear that the flow channel has been widened a lot, the central markers come out over considerably longer time duration, nearly all the markers between the centre and the walls, and even some wall markers have come out before all the central markers have been discharged. In addition to a wider flow channel, it is also clear that the flow is not symmetric, since wall markers at the same level have widely different residence times. The same is also the case for markers half way between centre and walls. Further explanations of how the results shown in **Figures 13 – 15** can be interpreted are given in **Figure 16** (HÄRTL *et al.* 2008). By the use of inserts the flow channel is considerably expanded, but true mass flow was not obtained.

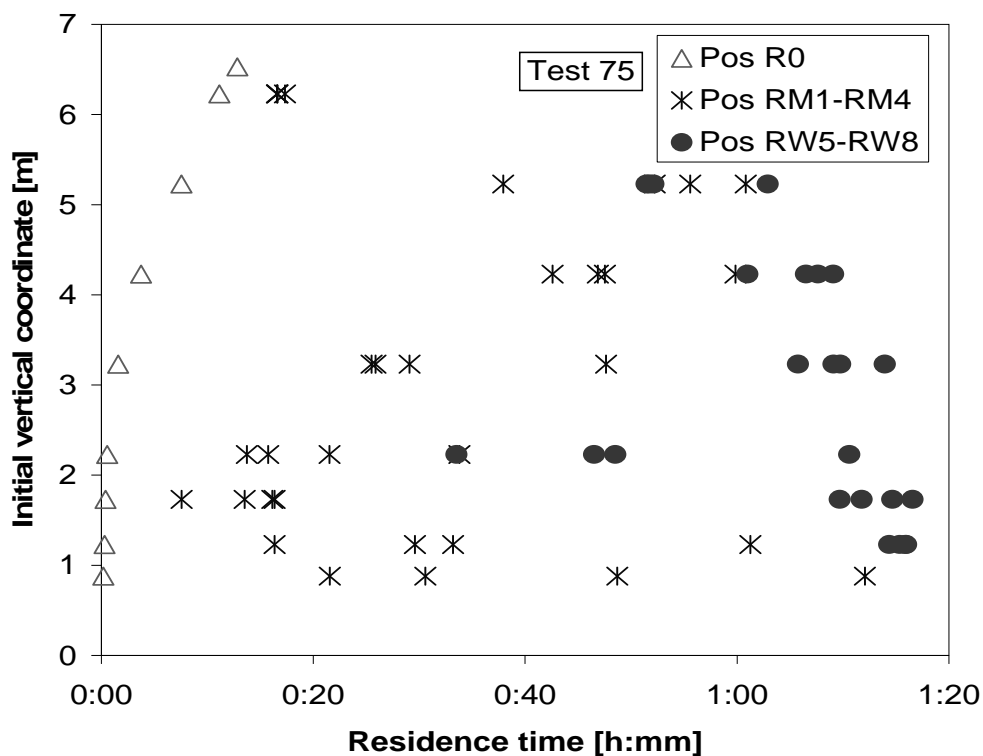


Figure 14: Initial vertical positions of markers as function of exit time in silo with insert III (HÄRTL *et al.* 2008)

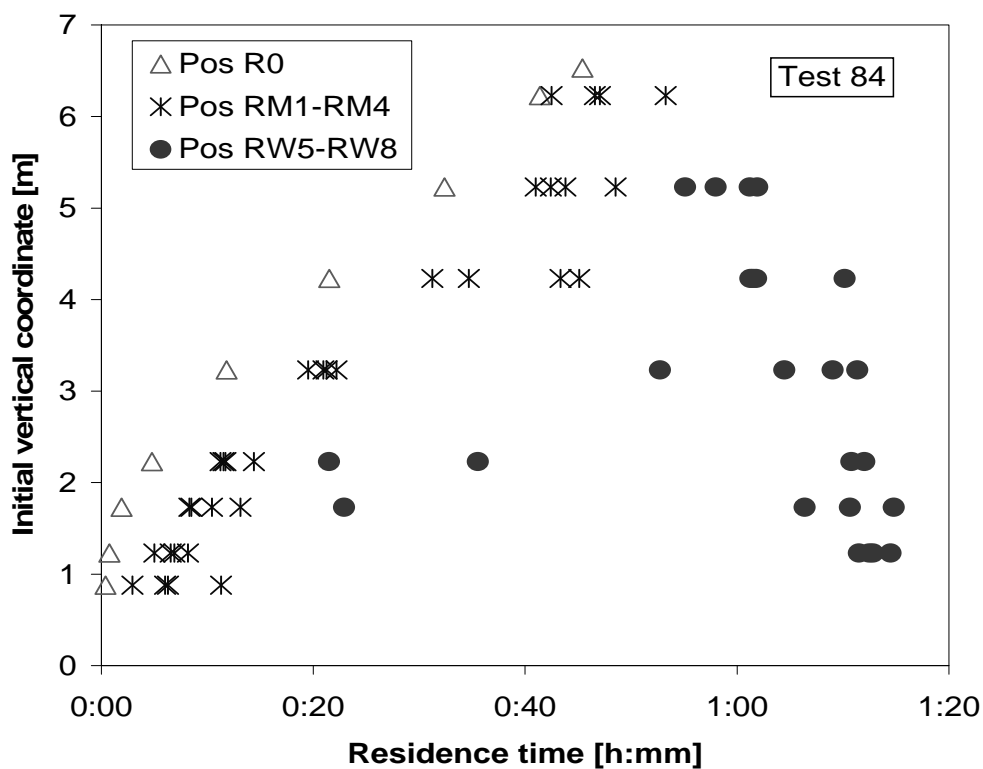


Figure 15: Initial vertical positions of markers as function of exit time in silo with insert IV (HÄRTL *et al.* 2008)

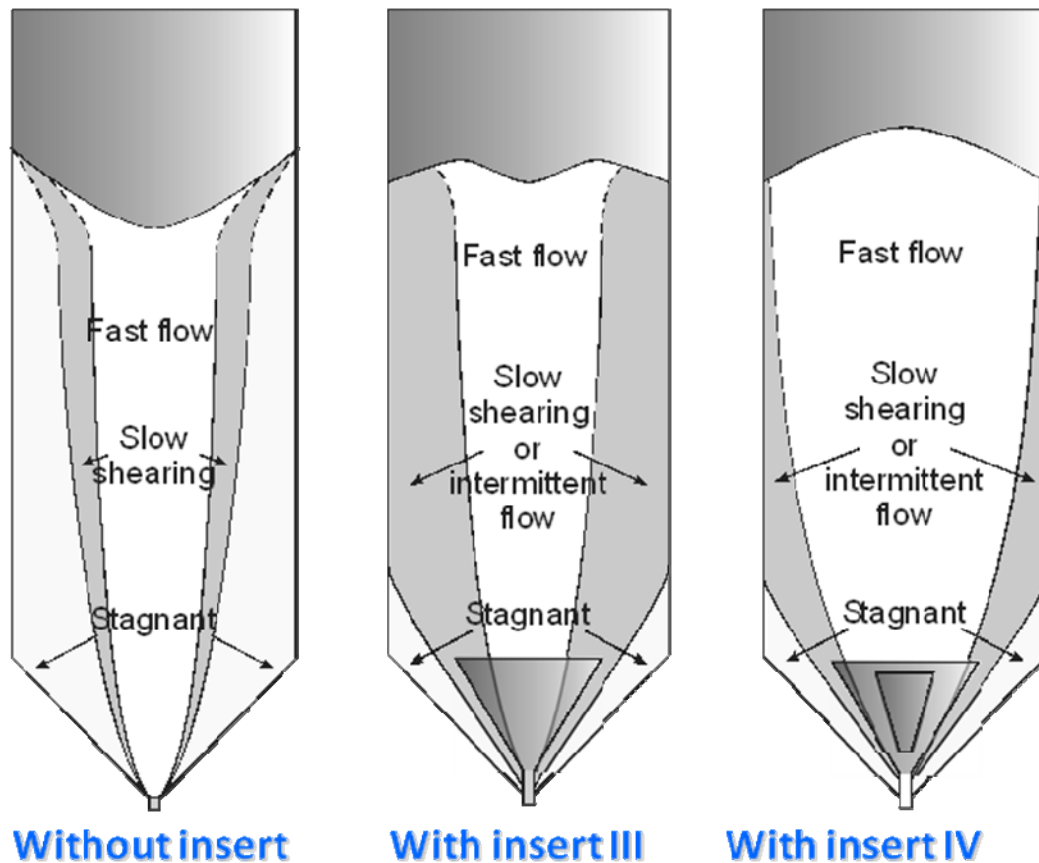


Figure 16: Interpretations of results given in **Figures 13 – 15** (HÄRTL *et al.* 2008)

Between the fast flowing central channel and the silo walls, there is a slow flowing zone, which also is widened when the inserts are used. When the inserts are used, the completely stagnant zones are considerably reduced. The dry sand used for the tests reported in **Figures 13 – 15** is a free flowing material. The results would most likely be different with cohesive materials, where probably the possible slow flowing zones may become considerably less wide than what is shown in **Figure 16**.

In spite of the large number of inserts that were tested in the cylindrical silo, ideal mass flow was never achieved. It seems that with a conical hopper in stainless steel of an inclination of nearly 45° , it is not possible to get true mass flow with this type of sand, although in some cases the stagnant zones seemed nearly negligible.

Based on the many small scale tests that have been carried out, in addition to the full scale tests carried out at ATB, it is clear that ideal mass flow can be achieved by the use of inserts with considerably less steep hopper walls than in traditional hoppers. On the other hand, there seems to be an upper limit of the inclination angle above which mass flow is not possible, regardless what type of insert is used.

4 Design of Optimal Inserts

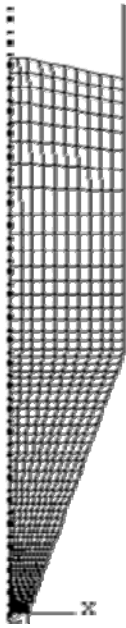
Some preliminary design criteria have been derived and tested, mainly based on the original design criteria derived by Jenike and his co-workers, with some adaptations. However, the design criteria are mainly in the form of thumb rules, and apply only to special cases, and still a lot of experience and personal judgments have to be included for each case, although the design of cone in cone inserts can be made with a fair degree of certainty.

More accurate design covering a wider range of possible solutions has to be based on modern computer technology, and a development in that direction started already 20 – 30 years ago. Over the years a number of computer codes based on the FEM have been developed for the calculation of storage and flow of particulate solids in silos, mainly with the aim at determining the loads on the silo walls, but also with the intention of describing flow patterns (EIBL & ROMBACH 1987).

A Nordic co-operation with the aim at developing a computer code for designing mass flow hoppers of the traditional type as well as with inserts, for determining wall stresses and flow patterns, was initiated in 1986, and included POSTEC in Norway, Chalmers University of Technology in Sweden and the University of Technology in Denmark. When the co-operation ended in 1993, the main outcome was an FEM based computer code named SILO, calculating stresses and flow patterns in silos (KARLSSON *et al.* 1998). However, in spite of all the efforts in developing the SILO code, it was based more on fluid analogies than on powder mechanics, resulting in parameters hard to measure physically, and the code had not been verified experimentally. Later on the computer code has been improved by DING (2004) and SCHURICHT (2004).

DING also used the commercial code named ABAQUS, developed to calculate stresses and loads in solid constructions, and he was able to modify the code in such a way that it could be used to describe large deformations as during flow in silos. By mesh generation and assumptions as shown in **Figure 17**, he was able to calculate flow patterns as shown in **Figures 18** and **19**, demonstrating the resulting flow pattern in a funnel flow hopper without insert, and mass flow in the same hopper after installation of a double cone insert (DING *et al.* 2003). The advantage is that in this case the parameters needed for the material model that is used, is based on realistic parameters that can be measured, describing the properties of the powder.

These examples show that it is possible to calculate realistic flow patterns by means of modern computer methods. What are still missing are experimental verifications. Furthermore, more realistic and simpler constitutive laws, based on characteristic parameters that can be measured have to be developed. In that respect ABAQUS, based on the Lagrangian approach, is more promising than FEM, mainly based on the Eulerian approach, using fluid analogies. One problem with ABAQUS is that it is a very expensive commercial code.



- Lagrangian Boundary Region
- Adaptive Mesh Domain
- Eulerian Boundary Region + Adaptive Mesh Constraint
- Partitions for designing better meshes / Adding Tracers / Rounding

Figure 17: Mesh and assumptions for simulation of flow by means of ABAQUS

151.step, time = 3 s. Date: 12-Oct-2000

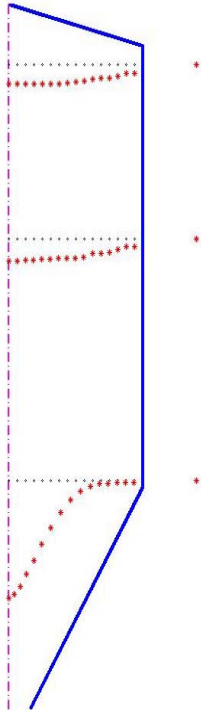


Figure 18: Flow pattern in funnel flow hopper without insert

151.step, time = 3 s. Date: 12-Oct-2000

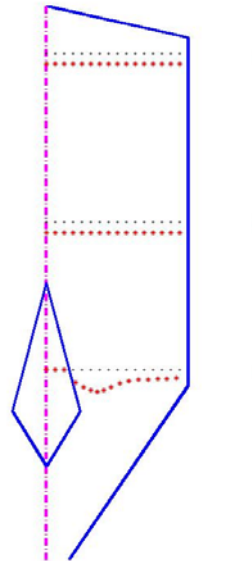


Figure 19: Flow pattern in the same hopper as in previous figure, but after installation of a double cone insert

5 Conclusions

It has been shown experimentally in small scale that by optimal use of inserts mass flow can be obtained in hoppers with inclinations considerably larger than the critical inclinations for traditional hoppers. This has been confirmed for cone in cone inserts by full scale tests at ATB.

Small scale tests also shows that mass flow can be obtained by means of inverted cones and double cones, but with this type of inserts the flow easily gets asymmetric.

A number of full scale tests with many types of inserts have been carried out in the full scale silos at POSTEC, with dry free flowing sand, in a conical hopper in stainless steel and close to 45° in inclination. Although the flowing zone in some cases included nearly all the material in the silo, there were always some dead zones left, indicating that inserts only can give mass flow in hoppers with inclinations below an upper limit, which in the case of the silo used by POSTEC was below 45° .

Only preliminary design criteria for inserts have been tested so far, mainly based on the original design criteria derived by JENIKE for traditional hoppers. Although it is now possible to design inserts for mass flow with a high degree of confidence, more work is still needed before any design criteria can be published.

By the means of suitable computer codes, versatile methods for designing mass flow silos may be developed. A lot of work has been carried out that shows that this is possible, but a lot more work is needed to verify and improve the methods before it can be used for reliable design of inserts for mass flow.

Acknowledgement

The author is grateful to Chr. Fülll at ATB for the co-operation in the past, which led to the only full scale test mentioned here that gave true mass flow with the cone in cone insert, for the invitation to the colloquium and celebration of May 16 in 2008, for all the nice hospitality, and for providing the opportunity to produce this publication.

6 References

- DING S. (2004):** Investigations of Flow and Pressures in Silos During Filling and Discharging in Presence of Inserts. PhD Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh 2004
- DING S., ENSTAD G. G., DE SILVA, S. R. (2003):** Effect of passive inserts on the granular flow from silos using numerical solutions. Particulate Science and Technology 21(3), pp. 211 – 226, 2003

- DÜRR M. (1995):** Control of Flow of Bulk Materials in Silos by Means of Inserts. Tel-Tek, dept. POSTEC, Porsgrunn/Universität Karlsruhe, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik. Tel-Tek Report no. 410015-1, 1995
- EIBL J., ROMBACH, G. (1987):** Stress and Velocity Fields at Discharging of Silos. Proceedings of NUMETA Conference, Swansea, pp. D1 – D12, 1987
- EIKSAA O. E. (1994):** Use of BINSERT™ in Silos (In Norwegian). Master Thesis, Telemark University College, Porsgrunn 1994
- ENSTAD G. G., EIKSAA O. E., MOSBY J. (1995):** Experimental Investigations on the Use of Inserts in Order to obtain Mass Flow in Silos. Proceedings of the Powder & Bulk Solids Conference, Reed Exhibition Companies, pp. 517-526, 1995
- HÄRTL J. (2008):** A study of granular solids in silos with and without an insert. PhD Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh 2008
- HÄRTL J., OOI J. Y., ENSTAD G. G. (2008):** An Experimental Study of Cone in Cone Inserts Configurations in a Full Scale Silo. Proceedings Reliable Flow of Particulate Solids IV, Tromsø 2008
- HJORTAAS T. (1996):** Full Scale Silo Tests of the Cone in Cone Concept for obtaining Mass Flow. Tel-Tek, dept. POSTEC, Porsgrunn/Institut für Agrartechnik Bornim, Potsdam. Master Thesis Telemark University College, Porsgrunn 1996
- HJORTAAS T., FÜLL CHR., ENSTAD G. G. (1997):** Full Scale Silo Tests of the Cone in Cone Concept for obtaining Mass Flow. Proceedings of the First European Congress on Chemical Engineering, Florence 1997
- JENIKE A. W. (1961):** Gravity Flow of Bulk Solids. Bul. 108, Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City, Utah, Oct. 1961
- JENIKE A. W. (1964):** Storage and Flow of Solids. Bul. 123, Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City, Utah, Nov. 1964
- JOHANSEN O., KLONTEIG J. G. 1996:** Use of internal Structures in Silos to achieve Mass Flow (In Norwegian). Thesis, Telemark University College, Porsgrunn 1996
- JOHANSON J. R.:** BINSERT™ Patent, U. S. patent 44.286.883
- KARLSSON T., KLISINSKI M., RUNESSON K. (1998):** Finite Element Simulation of Granular Material Flow in Plane Silos with Complicated Geometry. Powder Technology, 99(1), pp. 29 – 39, 1998
- KARLSEN A. (1998):** Use of Inserts for Controlling Flow Patterns in Silos (In Norwegian). Master Thesis, Telemark University College, Porsgrunn 1998
- KLONTEIG J. (1997):** Control of Flow Patterns in Silos by using internal Structures in the Hopper (In Norwegian). Master Thesis, Telemark University College, Porsgrunn 1997
- SCHURICHT T., FÜLL CHR., ENSTAD G.G. (2001):** Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids (Handbook of Powder Technology ed.). Volume 10, Chapter 2, Full scale silo tests and numerical simulations of the cone in cone concept for mass flow, pp.175 – 180, Elsevier Science, Editor: Levy, A. and Kalman , H., Amsterdam-London-New York-Oxford-Paris-Shannon-Tokyo 2001
- SCHURICHT T. (2004):** Analysis of Flow Patterns of a Powder in a Funnel Flow Silo with Insert. Doctoral Thesis, Braunschweig 2004

TORMODSRUD L. E. (2000): Full Scale Experimental Investigations on the Use of Inserts to obtain Mass Flow. Tel-Tek, dept. POSTEC, Porsgrunn/Institut für Agrartechnik Bornim, Potsdam. Master Thesis Telemark University College, Porsgrunn 2000

WELCH R. (2000): Use of Silo Inserts in order to obtain Mass Flow (In Norwegian). Master Thesis, Telemark University College, Porsgrunn 2000

Untersuchungen zur Auslegung von Mischsilos

Investigations enhancing the design of gravity mixers

Günter Dau

TU-Kaiserslautern, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik,
Gottlieb Daimler Straße, 44
67663 Kaiserslautern
E-Mail: dau@mv.uni-kl.de

Kurzfassung

Mischsilos haben die Aufgabe, Schüttgutschichten unterschiedlicher Eigenschaften während ihres Durchlaufs durch den Mischer oder durch mehrfaches Umwälzen des Mischerinhalts möglichst wirtschaftlich auf einen vorgegebenen Mischzustand zu bringen. Welcher Mischer für eine vorgegebene Mischaufgabe der beste ist, kann durch aufwändige Mischversuche herausgefunden werden. Weniger aufwändig ist die Bestimmung der Verweilzeitverteilung an halbtechnischen Mixern und nachfolgende Berechnung des Mischerfolgs mit Hilfe des sog. Faltungsintegrals. Noch besser ist es, wenn mit Hilfe der Diskrete Element Methode (DEM) Verweilzeitverteilungen unter Variation von apparativen und betrieblichen Parametern berechnet werden und daraus die Optimierung der Auslegung von Silomischern folgt.

Der Artikel beschreibt die videobasierte Konzentrationsmessmethode, die es erlaubt, online die Konzentration unterschiedlich gefärbter Teilchen am Mischerausgang zu bestimmen. Damit kann entweder der Mischverlauf eines Mischversuchs oder die Verweilzeitverteilung eines Mixers bestimmt werden. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe der Verweilzeitverteilung das Ergebnis von diskontinuierlichen und kontinuierlichen Mischaufgaben vorhergesagt werden kann. Abschließend wird der Stand der Untersuchungen dargestellt, wie mit Hilfe der DEM ebenfalls Verweilzeitverteilungen für Silomischer berechnet werden können.

Schlüsselwörter: Silomischen, Feststoffmischen, Mischsilos, Schwerkraftmischer, videobasierte Konzentrationsmessmethode, Verweilzeitverteilung, Diskrete Element Methode, Impulsversuch

Einleitung

Mischsilos werden schwerpunktmäßig zum Mischen und Homogenisieren von Kunststoffgranulaten eingesetzt. Ihre Auslegung bezüglich des Mischerfolgs basiert häufig auf Erfah-

rungswerten der Herstellerfirmen. Andererseits beruht die funktionsgerechte Auslegung in Anlehnung an die Siloauslegung, da die Sicherstellung von Massenfluss eine unabdingbare Voraussetzung für das Funktionieren eines Mischsilos darstellt. Darüber hinaus stellen die Bauart und die Abmessungen des Mixers, die verwendeten Mischereinbauten sowie die Fließeigenschaften der zu mischenden Schüttgutkomponenten die Haupteinflussgrößen auf die erzielbare Mischwirkung dar.

Der Einfluss dieser verschiedenen Parameter auf den Mischerfolg bzw. auf die notwendige Mischdauer ist in der Regel nur unzureichend bekannt. Auch im laufenden Betrieb von Mischanlagen kommt es insbesondere bei Produktwechseln zu Problemen, da bereits kleine Änderungen der Betriebsparameter große Auswirkungen auf die Mischleistung haben können. Dies betrifft insbesondere Änderungen der Fließeigenschaften des Mischgutes, zu denen die innere Reibung und die Wandreibung zählen.

Die Arbeiten am Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik zu dieser Thematik beschäftigen sich schwerpunktmäßig mit zwei Themen, erstens der Entwicklung einer schnellen Online-Messtechnik zur Ermittlung des Misch- bzw. Konzentrationsverlaufs am Ausgang eines Mixers und einer darauf aufbauenden Berechnungsmethode zur Vorhersage von Mischergebnissen für eine zugrunde gelegte Mischaufgabe und zweitens dem Einsatz der Diskrete Element Methode (DEM) zur Modellierung des Bewegungsverhaltens aller Partikel eines Mixers. Die Verfolgung beider Themen zielt darauf ab, die Auslegung von Schwerkraftmischern zu objektivieren und sicherer zu machen.

Bauarten und Betriebsweisen von Mischsilos

Eine Auswahl der auf dem Markt befindlichen Bauarten von Mischsilos zeigt **Bild 1**. In Konusmischern wird das Schüttgut längs der Symmetrieachse durch einen im unteren Bereich des Mixers angebrachten Innenkonus beschleunigt oder verzögert, während es in der Nähe der Außenwand verzögert oder beschleunigt wird. Eine Erweiterung dieses Konzepts stellt der Combiflow-Mischer dar. Bei dieser Bauart wird der innere Trichter mit zylindrischem Aufsatz durch zusätzliche Stege und ein mittig angeordnetes axiales Rohr in vier keilförmige Segmente und eine kreisförmige Fließzone unterteilt. Die Querschnittflächen der Segmente verjüngen oder erweitern sich in Fließrichtung, wodurch unterschiedlich große Abzugsgeschwindigkeiten erzielt werden. In Zentralrohrmischern werden die Fließvorgänge durch ein axial angebrachtes Mischrohr mit mehreren Schlucköffnungsebenen beeinflusst. Durch die oberste Öffnungsebene können Partikeln nach ihrer Einlagerung in den Mischer besonders schnell zum Auslauf gelangen, während Partikeln, die durch weiter unten gelegene Öffnungen oder durch den Ringspalt zwischen Außenkonus und Mischrohrende fließen, größere Verweilzeiten im Mischer haben. Entleerungsrohre mit Öffnungen in unterschiedlichen Höhen gewährleisten in Multipipemischern den gleichzeitigen Abzug von Schüttgut aus unterschiedlichen Bereichen. Ein Mischtopf unterhalb des Mixers führt die Materialströme in einem vorgegebenen Verhältnis zusammen. In

den bisher vorgestellten Ausführungen wird das Schüttgut in der Regel zusätzlich durch eine äußere Zirkulation umgewälzt. In der Ausführung als pneumatischer Umwälzmischer erfolgt das Mischen bzw. Homogenisieren durch innere Zirkulation bis der gewünschte Mischgrad erreicht ist.

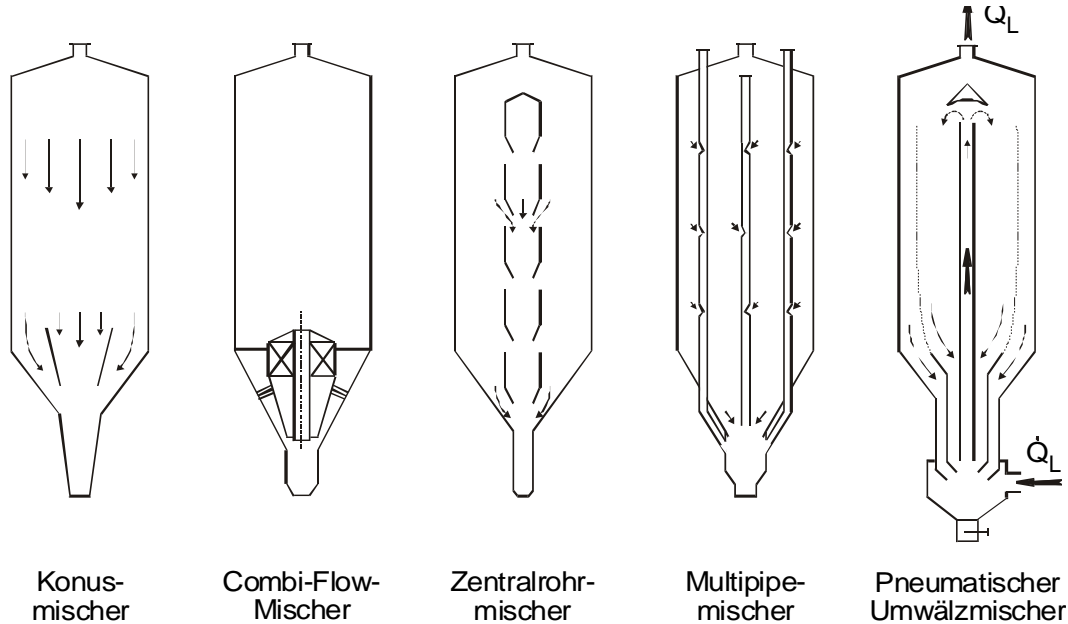


Bild 1: Bauarten von Mischsilos

Mischsilos können in zwei unterschiedlichen Betriebsarten betrieben werden: Beim diskontinuierlichen Mischen besteht der Betriebsablauf aus Befüllen, Umwälzen und Entleeren. Um die Durchsatzleistung zu erhöhen und die weiteren Vorteile einer kontinuierlichen Verfahrensweise zu nutzen, wird heute oft bei konstanter Füllhöhe im Durchlauf gemischt. Dabei kann die Intensität der Vermischung durch eine partielle Rezirkulation an das jeweilige Mischproblem individuell angepasst werden (**Bild 2**).

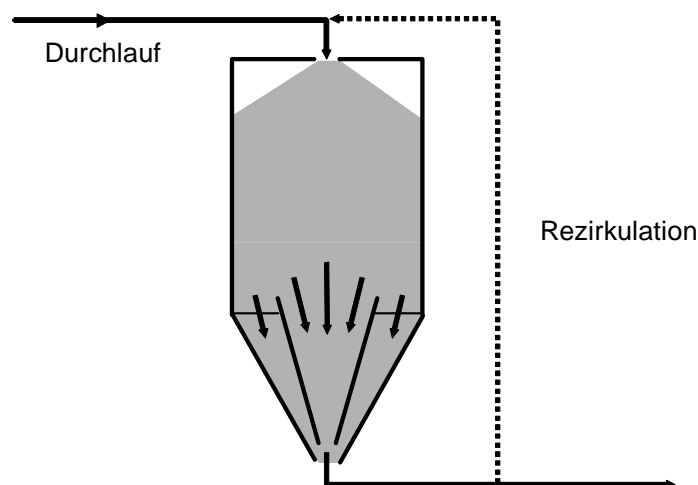


Bild 2: Kontinuierliches Mischen

Das Ziel des Silomischers besteht darin, eine vorgegebene Produktqualität mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen. Dies bedeutet das Streben nach niedrigen Apparatelkosten, nach niedrigen Energiekosten, insbesondere beim Umwälzen bzw. bezüglich der benötigten Zeit des Umwälzens, um ein vorgegebenes Mischergebnis zu erreichen, und schließlich nach niedrigen Reinigungskosten bei Produktwechsel. Zum Erreichen dieser Ziele ist es nötig, die Mischerkonstruktion an die Mischaufgabe anzupassen und eine möglichst schnelle Kontrolle der Produktqualität durchzuführen. Die Qualitätskontrolle wird häufig durch Stichprobenentnahme in definierten Zeitintervallen durchgeführt. Besser ist eine kontinuierliche Probenahme bei gleichzeitiger on-line-Analyse. Hierfür ist die am Lehrstuhl MVT entwickelte Methode der videobasierten Konzentrationsmessung besonders gut geeignet.

Videobasierte Konzentrationsanalyse für Mischungen granularer Feststoffe

Bild 3 zeigt den schematischen Aufbau der videobasierten Konzentrationsanalyse. Die Feststoffmischung, zum Beispiel aus weißen und schwarzen Kunststoffgranulaten bestehend, wird nach dem Verlassen des Mixers durch radiale Mischelemente (Typ Sulzer SMF) quervermischt, so dass die anschließende Verteilung der Partikel auf einer Vibrationsförderrinne nach dem Zufallsprinzip erfolgt. Die über der Vibrationsförderrinne angebrachte Videokamera beobachtet die homogen beleuchtete Mischung von oben.

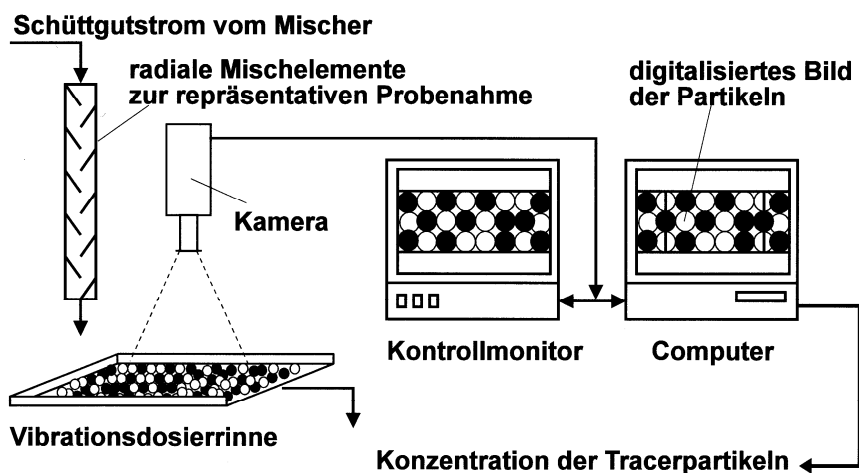


Bild 3: Videobasierte Konzentrationsanalyse

Ein computergestütztes Bildverarbeitungssystem liest in regelmäßigen Abständen Graustufenbilder der Kamera ein. Durch eine Schwellwertbetrachtung werden alle Bildpunkte, deren Grauwert heller als der Schwellwert ist, der weißen Komponente zugeordnet. Da die Partikel in einer mehrschichtigen Lage auf der Vibrationsförderrinne bewegt werden, ist der Rinnentrog vollkommen mit Partikeln bedeckt. Es können deshalb alle Bildpunkte, die nicht „weiß“ sind, dem schwarzen Mischungsbestandteil zugeordnet werden. Die Fre-

quenz des Bildnahmerhythmus ist so eingestellt, dass erst dann ein neues Bild eingelesen wird, wenn sich der Bildinhalt vollkommen erneuert hat. Dadurch wird eine statistische Abhängigkeit benachbarter Proben vermieden. Bei einem Durchsatz von 300 kg/h wird in einem Abstand von 5 s ausgewertet. Pro Bild können ca. 5.000 Partikeln erfasst werden. Das bedeutet, dass etwa 25 % aller den Silo verlassenden Partikeln in die Auswertung einbezogen werden. Der Verlauf der Konzentration wird während des Versuchs grafisch dargestellt und steht nach Versuchsende als Datei zur Verfügung.

Um die verwendeten Schüttgüter nach den Mischversuchen erneut verwenden zu können, werden sie einer Trennung zugeführt. Dazu wurden die schwarzen Tracerpartikeln vor den Versuchen eingeschmolzen und mit einer geringen Menge Eisenpulver erneut extrudiert. Mit einem Magnetscheider ist eine nahezu vollständige Trennung möglich. Diese Messmethode kann im Bereich des Feststoffmischens im zweifachen Hinsicht genutzt werden: einerseits zur Charakterisierung des Mischverlaufs bei Mischversuchen, andererseits zur Durchführung von Impulsversuchen zur Bestimmung der Verweilzeitverteilung. Die für beide Fälle eingesetzte Versuchsanordnung zeigt **Bild 4**.

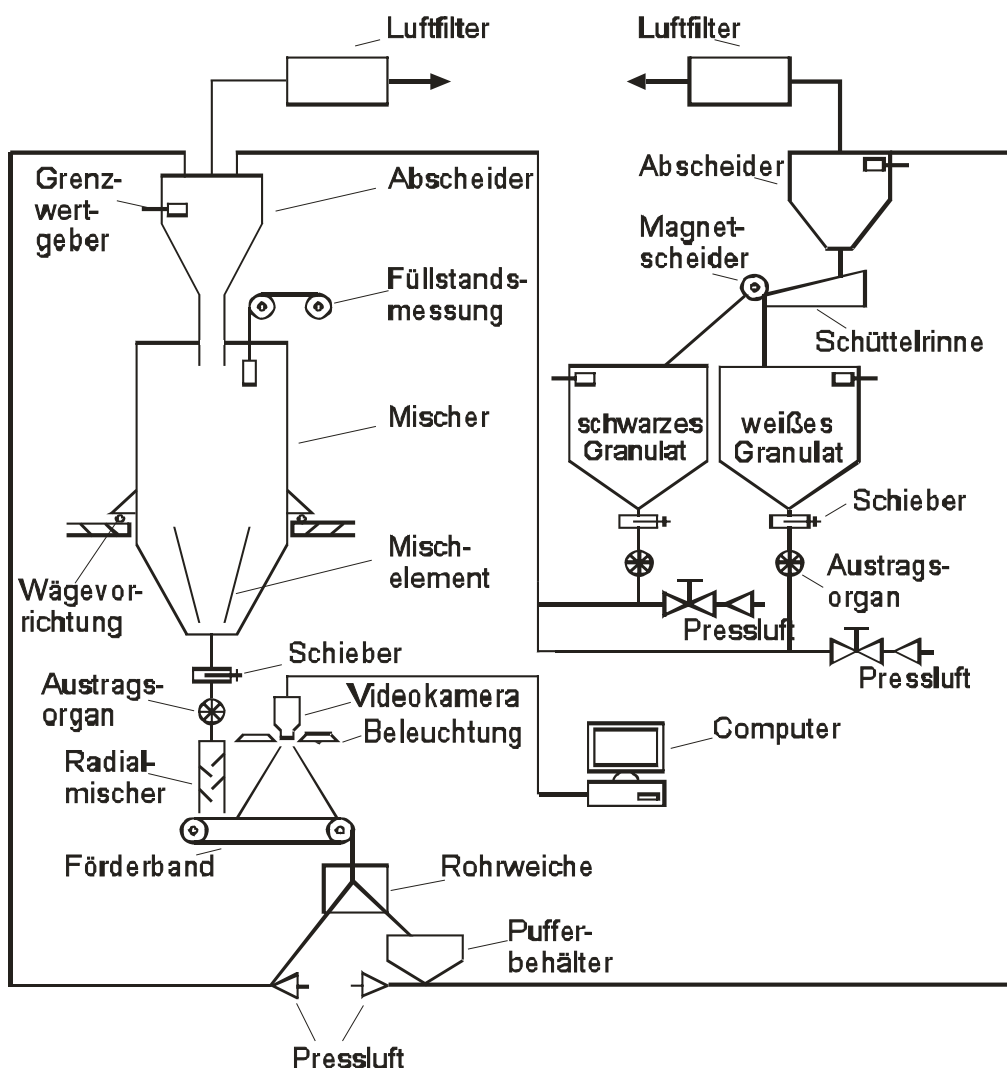


Bild 4: Versuchsanordnung für Misch- und Impulsversuche

Aus zwei Vorlagebehältern können vorgegebene Mengen schwarzes oder weißes Material pneumatisch in den Versuchsmischer gefördert werden, um eine bestimmte Mischaufgabe vorzubereiten. Nach dem Füllen wird der Schieber geöffnet und die Austragsschnecke eingeschaltet. Nach Passieren des Radialmischers wird das Mischgut auf einem Förderband ausgebreitet. Dort werden vom Gut in regelmäßigen Abständen Bilder von einer Videokamera aufgenommen, die zur Auswertung an einen PC weitergeleitet werden. Anschließend wird es pneumatisch wieder nach oben und in den Mischer gefördert. Dies geschieht solange, bis der gewünschte Mischzustand erreicht ist.

Bei Impulsversuchen (siehe weiter unten) wird das Gut erst in einen Pufferbehälter geleitet und nachfolgend pneumatisch zu einem Magnetscheider gefördert, der es wieder in Basismaterial und Tracermaterial trennt. Bei diesem Versuchsablauf wird das ausgetragene Material durch Basismaterial solange ergänzt, bis das gesamte (schwarze) Tracermaterial ausgetreten ist. Um den für eine Mischaufgabe optimalen Mischer zu finden, sind viele

Mischversuche notwendig. EICHLER (1998) hat deshalb eine Methode entwickelt, bei der durch Messung der Verweilzeitverteilung mittels eines Impulsversuchs an einem Mischer die Lösung von Mischaufgaben vorhergesagt werden kann (**Bild 5**).

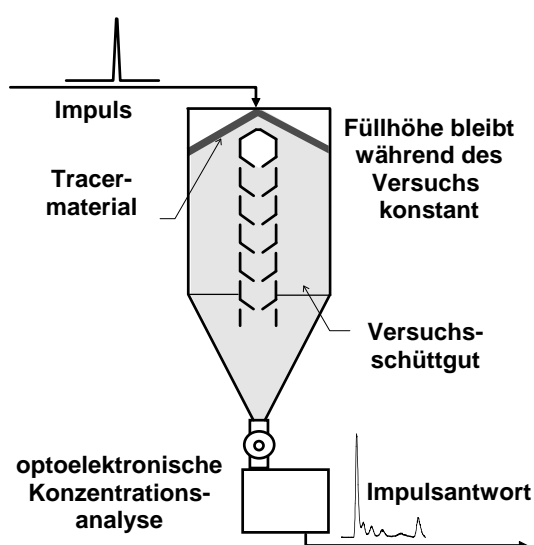


Bild 5: Aufbau eines Impulsversuchs

Die Vorgehensweise besteht darin, dass ein Mischsilo mit einem Basismaterial (weiß) gefüllt wird. Danach erfolgt die Aufgabe eines Impulssignals durch ein Tracermaterial (schwarz). Wie bei einem Mischversuch erfolgt am Ausgang des Mixers eine Konzentrationsmessung mittels der videobasierten Konzentrationsanalyse. Der gemessene Konzentrationsverlauf über der Zeit $c_{\text{aus}}(t)$ entspricht der Impulsantwort. Nachfolgend kann die Verweilzeitdichteverteilung $E(t)$ aus $c_{\text{aus}}(t)$ berechnet werden (Gl. 1). Durch Einführen der mittleren hydrodynamischen Zeit τ (Gl. 2) ergibt sich für die Verweilzeitdichteverteilung in dimensionsloser Form $E(\theta)$ (Gl. 3). Darin ist θ die dimensionslose Verweilzeit (Gl. 4). Aus

Gleichung 4 lässt sich nachfolgend die dimensionslose Verweilzeitsummenverteilung $F(\Theta)$ berechnen (Gl. 5).

$$E(t) = \frac{c_{aus}(t)}{\int_0^{\infty} c_{aus}(t) dt} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\Theta = \frac{t}{\tau} \quad \text{Gleichung 3}$$

$$E(\Theta) = \tau E(t) \quad \text{Gleichung 4}$$

$$F(\Theta) = \int_{\Theta^*=0}^{\Theta} E(\Theta^*) d\Theta^* \quad \text{Gleichung 5}$$

$$c_{aus}(\Theta) = \int_{\Theta^*=0}^{\Theta} c_{ein}(\Theta^*) E(\Theta - \Theta^*) d\Theta^* \quad \text{Gleichung 6}$$

Die zuerst von EICHLER (1998) und nachfolgend von DÜRR (2004) durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben als Parameter:

- den effektiven und den Wandreibungswinkel durch Variation der Kunststoffgranulate PP, PE, PVC und PU gegen Edelstahl,
- die Mischerbauarten Konusmischer und Zentralrohrmischer einschließlich mehrerer unterschiedlicher Einbauten,
- das Mischervolumen

$D = 0,45 \text{ m}$; $V = 0,15 \text{ m}^3$ als Halbmodell

$D = 0,6 \text{ m}$; $V = 0,8 \text{ m}^3$

$D = 0,8 \text{ m}$; $V = 2 \text{ m}^3$

Bild 6 zeigt das Ergebnis eines Umwälzversuchs an einem Konusmischer mit einer Ausgangsschichtung von 50 % weißem und 50 % schwarzem Kunststoffgranulat. Man erkennt, dass sich der Mischungszustand des austretenden Materials in Form einer gedämpften Schwingung allmählich einer Mischgüte von 50 % nähert.

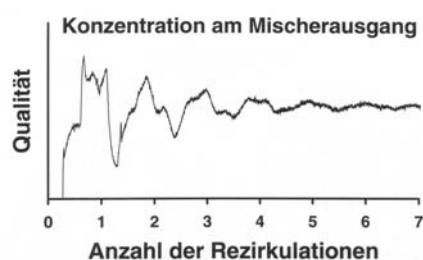


Bild 6: Ergebnis eines Mischversuchs

Bild 7 zeigt typische Verweilzeitverteilungen für einen Konusmischer und einen Zentralrohrmischer, wobei das Zentralrohr in einem Fall drei im anderen Fall sechs Schlucköffnungen aufweist. Man erkennt aus der Abbildung, dass die Geometrie des Mixers die Verweilzeitverteilungen sehr wesentlich beeinflusst, wobei die Anzahl der Peaks in der Verweilzeitverteilung in der Regel mit der Anzahl der Fließzonen im Mischer korrespondiert, die den Mischvorgang beeinflussen und typisch für die verwendete Mischerbauart sind.

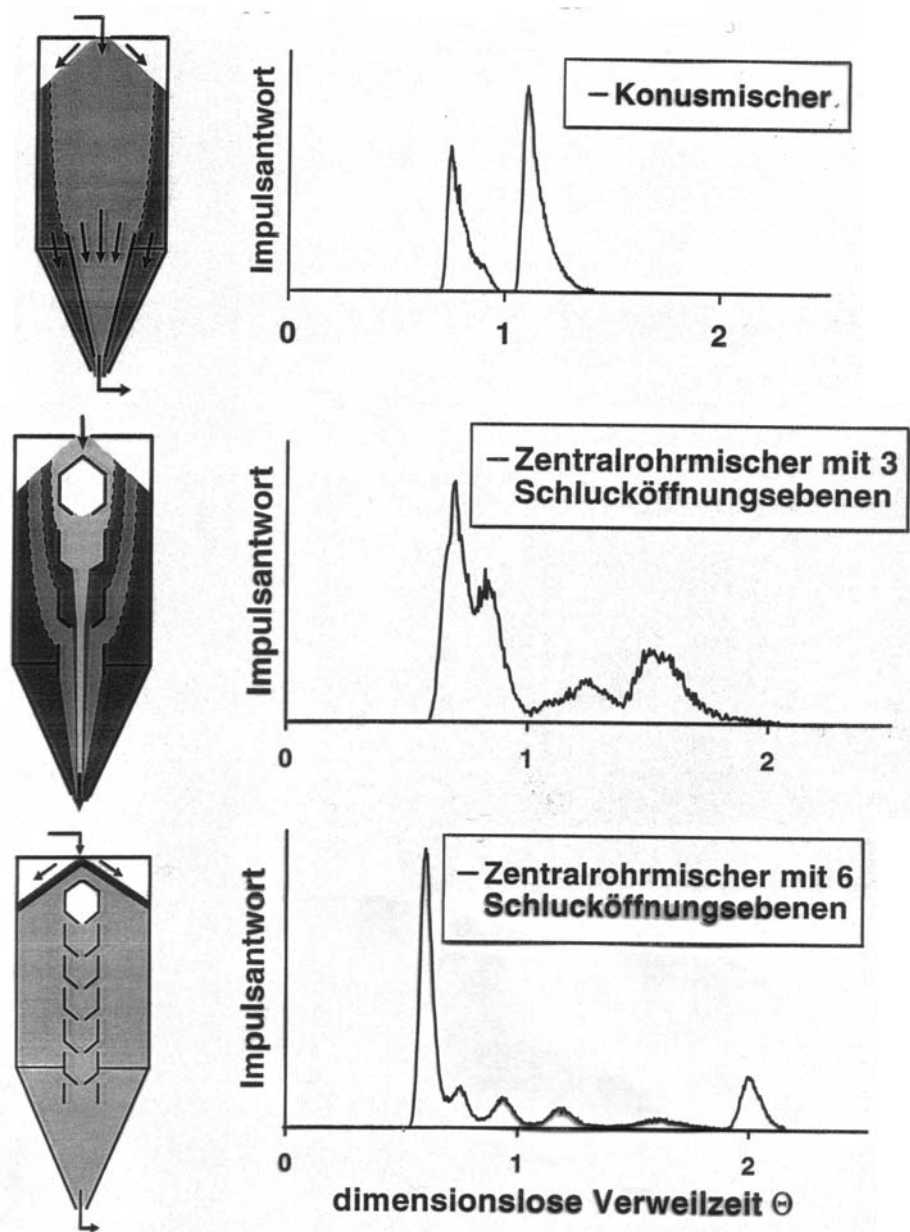


Bild 7: Typische Verweilzeitverteilungen

Vorhersage von Mischgüteverläufen mittels Faltungsintegral

Die Kenntnis der Verweilzeitverteilung eines Mixers ist deswegen wichtig, weil mit ihrer Hilfe Konzentrationsverläufe des austretenden Mischgutes vorausberechnet werden kön-

nen. Dies geschieht mit Hilfe des sog. Faltungsintegrals (Gleichung 6), das es gestattet, die Austrittskonzentration des Mischgutes aus seiner Eintrittskonzentration und der dimensionslosen Verweilzeitverteilung zu berechnen (EICHLER 1998).

Die **Bild 8** und **9** zeigen für Umwälzversuche an einem Konusmischer und einem Zentralrohrmischer, dass Berechnung und Messung sehr gut übereinstimmen. Auch im Fall eines Konusmischers, der kontinuierlich mit unterschiedlichen Taktfrequenzen beaufschlagt wird, ist die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung sehr gut. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang, dass einige Beaufschlagungsfrequenzen kaum, andere hingegen sehr gut weggedämpft werden.

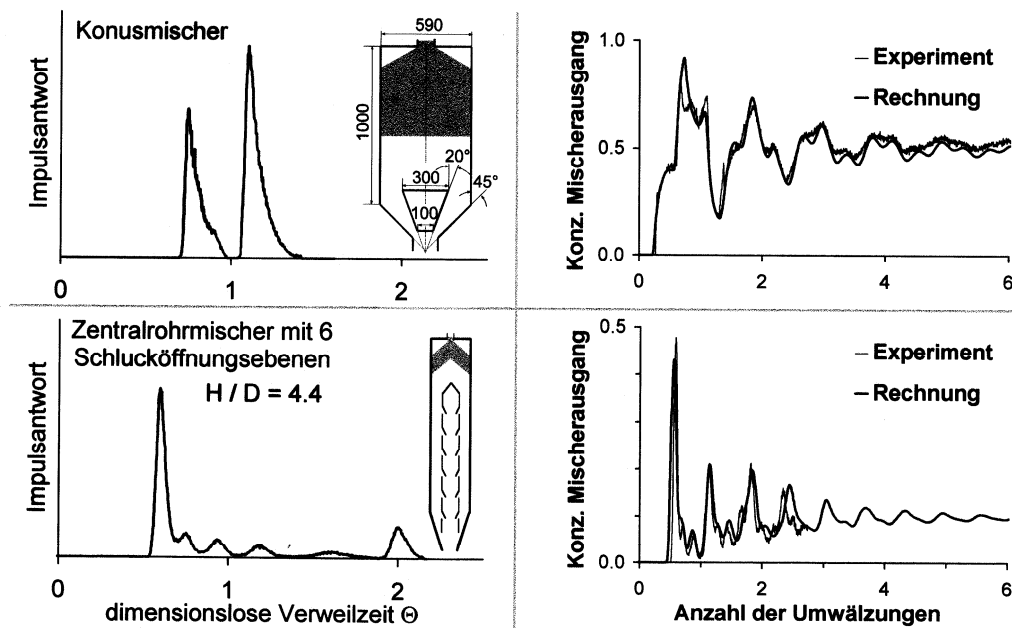


Bild 8: Diskontinuierliches Mischen - Vergleich gemessener und berechneter Mischergebnisse

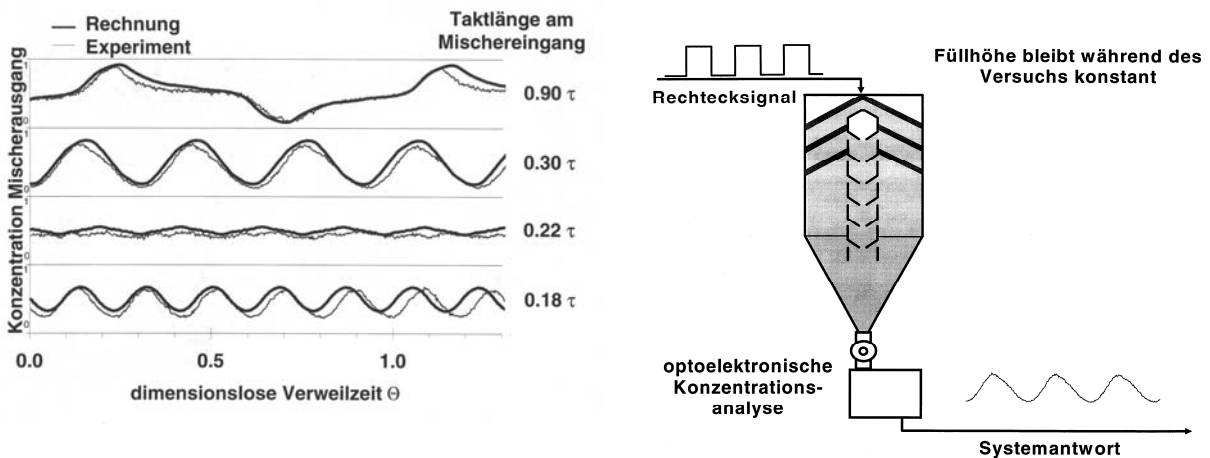


Bild 9: Kontinuierliches Mischen - Vergleich gemessener und berechneter Mischergebnisse

DEM-basierte Verweilzeitverteilungen

Die videogestützte Konzentrationsmessung liefert online sehr genaue Ergebnisse

- von Mischversuchen
- von Versuchen zur Bestimmung der Verweilzeitverteilung

Auf dieser Basis erlaubt sie die Vorhersage von Mischergebnissen unter der Voraussetzung, dass die Verweilzeitverteilung experimentell ermittelt wird. Dies bedeutet auf jeden Fall einen Impulsversuch in einem genügend großen Technikumsmischer. Werden der Produktionsmischer und die Mischeinbauten aus einem anderen Material gefertigt als der Technikumsmischer und/oder ändern sich die Fließeigenschaften des Mischgutes, werden neue Verweilzeitversuche notwendig, da in der Verweilzeitverteilung Parameter wie Mischerbauart und –material sowie die Fließeigenschaften des Mischgutes implizit enthalten sind. Folglich bedarf es immer noch einer Reihe von experimentellen Verweilzeitmessungen, um den Einfluss der verschiedensten apparativen und betrieblichen Parameter einzugrenzen, wobei die notwendige Größe des Technikumsmischers noch nicht abschließend geklärt werden konnte (DÜRR 2004).

Von daher liegt der Gedanke nahe, die Verweilzeitverteilung eines Mischers auf rechnerischem Weg mit Hilfe der Diskreten Element Methode (DEM) so zu bestimmen, dass die oben angesprochenen Einflüsse als Parameter in die Berechnung eingebracht und vergleichsweise einfach variiert werden können.

Die DEM geht auf CUNDALL & STRACK (1979) zurück und eröffnet seitdem in der Verfahrenstechnik ganz neue Möglichkeiten, die Bewegung granularer Medien in den verschiedensten Grundverfahren zu verfolgen und dadurch neue Erkenntnis bezüglich der Umwandlung von Stoffsystemen zu gewinnen. Die Methode basiert auf der Berechnung der Kräfte, die auf jedes einzelne Teilchen in einem definierten Volumen wirken. Diese Kräfte entstehen aus dem Kontakt benachbarter Teilchen oder aus dem Kontakt mit einer begrenzenden Wand. Auch Feldkräfte wie die Schwerkraft müssen berücksichtigt werden. Bei jedem Zeitschritt der Berechnung werden die Kräfte auf jedes einzelne Teilchen bilanziert. Ausgehend von diesen Kräftebilanzen wird nachfolgend die Bewegung jedes einzelnen Teilchens berechnet.

Sosehr die Idee überzeugt und der Lösungsweg machbar erscheint, so sind auf dem Weg zu akzeptablen Ergebnissen einige Hindernisse zu überwinden:

- Die Anzahl der Partikeln, die in die Berechnung eingehen können, ist - im Vergleich mit der tatsächlichen Partikelanzahl in einer technischen Mischerauführung in der Regel sehr viel kleiner.
- Die Form der Partikeln wird oft sehr vereinfacht als runde Scheiben oder Kugeln dargestellt.
- Die Kontaktmodelle zur Berechnung der Kontaktkräfte beinhalten Anpassungsparameter, die nicht notwendiger Weise physikalisch relevant sind.

- Die Rechenzeit hängt von der Anzahl der in die Rechnung eingehenden Partikeln ab und kann bei Partikelzahlen von 50.000 durchaus eine Woche oder länger betragen.

Ungeachtet dieser teilweise problematischen Randbedingungen hat DÜRR (2004) die grundsätzliche Gangbarkeit dieses Weges für die Ermittlung der Verweilzeitverteilung von Silomischern nachgewiesen. Dazu hat er sich zweier kommerzieller Programme der Firma ITASCA Consulting Group für 2D-Anwendungen (PFC2D-Code) und 3D-Anwendungen (PFC3D-Code) bedient. Als wesentliches Ergebnis der Verwendung des 2D-Codes zeigt sich, dass damit nur Bewegungsabläufe und der Einfluss von geometrischen Parametern qualitativ richtig wieder gegeben werden können.

Erst die Verwendung des 3D-Codes bringt hinsichtlich der verfolgten Fragestellung eine zufrieden stellende bis gute Wiedergabe von Bewegungsabläufen und Verweilzeitverteilungen. **Bild 10** zeigt zunächst für einen Konusmischer zu sechs verschiedenen Zeiten den Bewegungsablauf einer eingefärbten Schicht an Teilchen beim Passieren des Mixers. Daraus ist die Wirkung des Innenkonus sehr gut zu erkennen: Der Schüttgutfluss ist im Innenkonus deutlich gegenüber der Bewegung im Außenkonus verlangsamt. Dieser Vorgang ist letztlich für das Vermischen unterschiedlicher Schüttgutschichten des Mixers verantwortlich.

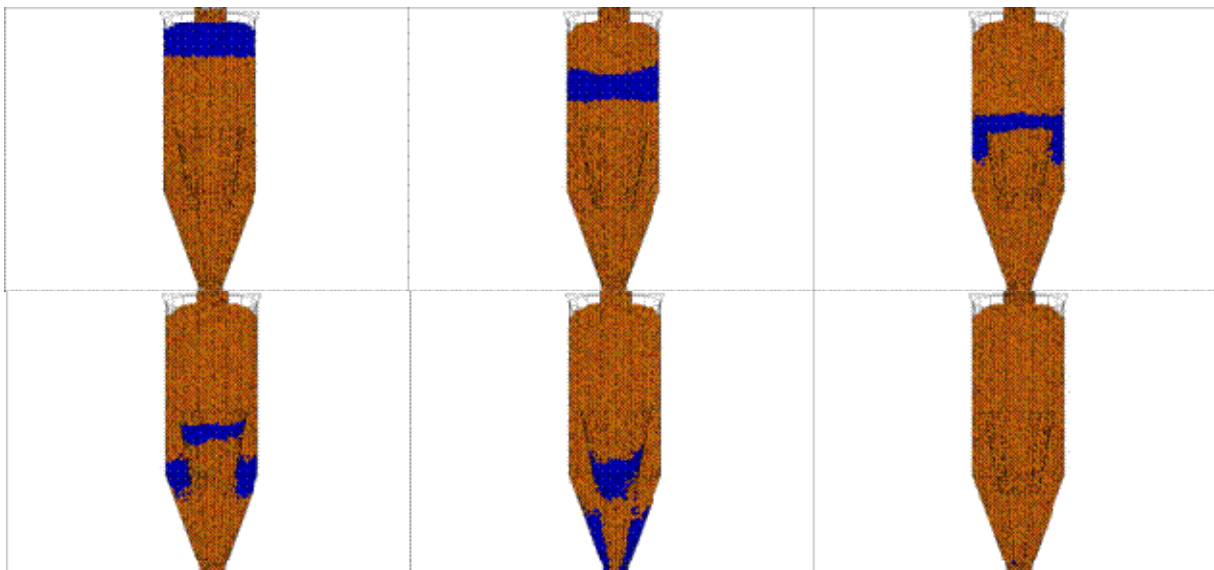


Bild 10: 3D-DEM-Berechnung des Bewegungsablaufs in einem Konusmischer

Die Einfärbung einer Partikelschicht im Kopfbereich des Silomischers erlaubt eine der videobasierten Verweilzeitmessung vergleichbare Methode zur Auswertung der Konzentration der Anzahl der eingefärbten Partikel innerhalb der Gesamtzahl der Partikel in einem vorgegebenen Austrittsvolumen. Dadurch ist es auch möglich, Verweilzeitverteilungen zu ermitteln. Entsprechende Ergebnisse sind in **Bild 11** für einen Konusmischer in Vergleich zu gemessenen Werten einander gegenüber gestellt. Es ist ersichtlich, dass die Übereinstimmung für Polyethylen-Granulat recht gut ist, während beim Polyurethan-Granulat die Übereinstimmung noch verbesserungswürdig ist. Möglichkeiten der Verbesserung bieten die bereits oben genannten Punkte als Herausforderung für zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet.

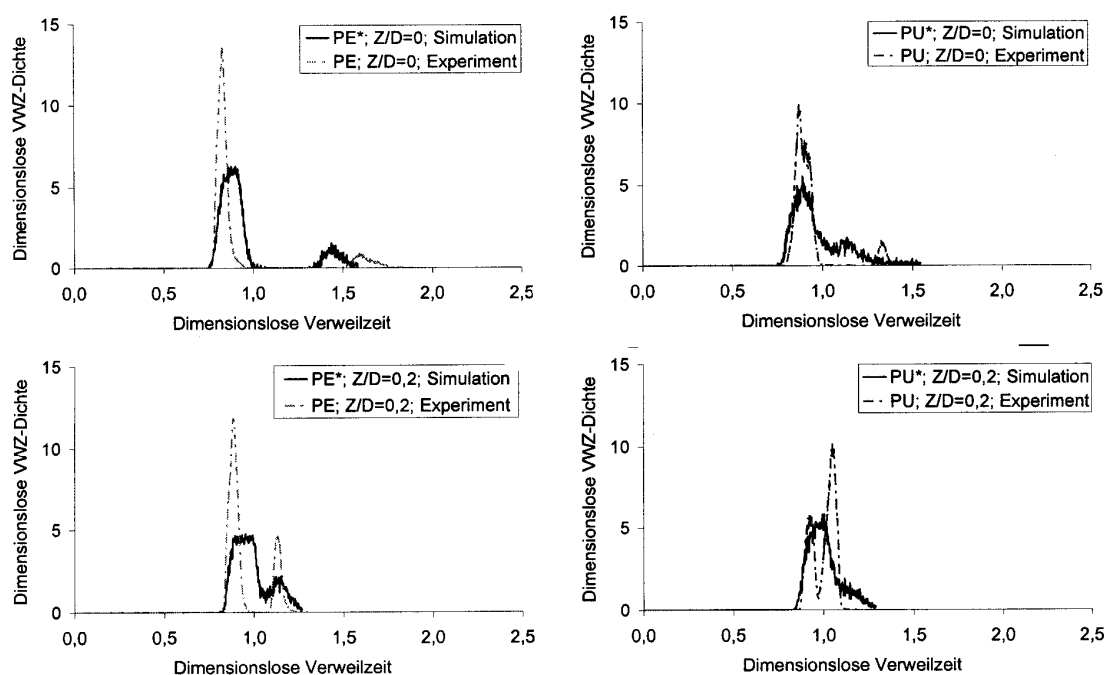


Bild 11: Vergleich 3D-DEM gerechneter und gemessener Verweilzeitverteilungen in einem Konusmischer für Polyethylen und Polyurethan

Zusammenfassung

Die videogestützte Konzentrationsmessmethode erlaubt unter Verwendung unterschiedlich gefärbter Partikel online die Bestimmung des Ergebnisses von Mischversuchen oder von Impulsversuchen zur Bestimmung der Verweilzeitverteilung von Mischsilos. Das zugehörige Versuchsinstrumentarium wird vorgestellt und es wird gezeigt, wie mit Hilfe des Faltungsintegrals aus einer Verweilzeitverteilung das Ergebnis unterschiedlicher Mischaufgaben mit sehr guter Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Weiterhin wird gezeigt, wie mit Hilfe der Diskreten Elements Methode die Bewegung jedes einzelnen Teilchens eines Mischers berechnet wird und daraus ebenfalls Verweilzeitverteilungen bestimmt

werden können. Die Übereinstimmung danach berechneter mit gemessenen Verweilzeitverteilungen stimmt optimistisch. Möglichkeiten der Verbesserung werden aufgezeigt.

Literatur

CUNDALL P.A., STRACK O.D.L. (1979): A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique 29, (1): 47-65

DÜRR V. (2004): Vergleichende Untersuchungen experimentell bestimmter und DEM-basierter Verweilzeitverteilungen von Schwerkraftmischern. Dissertation, Fortschritt-Berichte Mechanische Verfahrenstechnik und Strömungsmechanik, TU Kaiserslautern, Band 7

EICHLER P. (1998): Analyse, Modellierung und Optimierung von Schwerkraftmischern. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3 Verfahrenstechnik, Nr. 568

Konservieren von Halmgütern und Getreide als Futterstoffe für die Tierhaltung

Preservation of grass, maize and grain as feed for livestock farming

Christine Idler, Christian Fürll und Thomas Hoffmann

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100

E-Mail: cidler@atb-potsdam.de

Kurzfassung

Gras- und Maissilagen sowie Getreide bilden die Futtergrundlage für eine leistungsfähige, moderne Tierhaltung. Damit das Futter in hoher Qualität über einen längeren Zeitraum zur Verfügung steht, müssen Ernte, Transport, Aufbereitung und Konservierung aufeinander abgestimmt werden. Hierfür sind Untersuchungen notwendig zu den biologischen Grundlagen und zur Gestaltung einzelner Verfahrensabschnitte wie z.B. zum Transportieren und Verdichten von Siliergut oder zum Zerkleinern und Lagern von feuchtem Getreide.

1 Einleitung

Gras- und Maissilagen sowie Heu sind als Grundfutter eine wichtige Voraussetzung für eine hohe Leistung in der Wiederkäuerhaltung. Mit hochwertigem Grundfutter können die Konzentratanteile in der Ration auf unter 40 % gesenkt werden (NEUMANN 2007).

Für eine hohe Qualität des Grundfutters müssen Ernte und Aufbereitung der Pflanzen zum richtigen Zeitpunkt erfolgen. Anschließend ist durch eine fachgerechte Konservierung abzusichern, dass die Qualität des Futtermittels bis zum Verbrauch erhalten bleibt. Derzeit gebräuchliche Verfahrensvarianten sind Silieren in Hochsilos, in Horizontalsilos, in Folien-schläuchen und in Ballen.

Obwohl die theoretischen Grundlagen für eine fachgerechte Konservierung weitestgehend bekannt sind, zeigen Untersuchungen in der Praxis immer wieder, dass es zu Silagen mit Fehlgärung, Nacherwärmung und hohen Masseverlusten kommt (RUPPEL *et al.* 1995, SPIEKERS 2004, STEINHÖFEL 2004).

Neben den Halmgütern bildet Getreide eine zweite wichtige Säule in der Tierfütterung. In den EU-27-Staaten werden ca. 2/3 des Getreideaufkommens als Futtergetreide verwertet (ANONYM 2007). Betriebseigenes Futtergetreide ist ein kostengünstiger und stabilisierender Energieträger in der Fütterung. Voraussetzung für seinen ganzjährigen Einsatz ist eine

Konservierung ohne qualitätsmindernde Schimmelpilzentwicklung und Mykotoxinkontamination. Bei verschiedenen Erhebungen in den letzten Jahren wurden immer wieder positive Befunde bei Mycotoxinuntersuchungen festgestellt (DÄNICKE & VALENTA 1999; ANONYM 2003), woraus sich ein Forschungs- und Handlungsbedarf auf diesem Gebiet ableiten lässt.

2 Gärbiologische Grundlagen der Silierung

Die Konservierung durch anaerobe Lagerung lässt sich in vier verschiedenen Phasen gliedern, deren Gestaltung von verschiedenen Parametern beeinflusst wird (PAHLOW 2006). Die wichtigsten von ihnen sind: Trockenmassegehalt, Gehalt an Inhaltsstoffen, epiphytischer Keimbesatz, Pufferkapazität Häcksellänge, Verdichtung und Luftabschluss.

Der Silierprozess

Das Prinzip der Konservierung durch Gärung besteht darin, dass Mikroorganismen durch stoffliche Umsetzung der ihnen zugänglichen Kohlenhydrate (hauptsächlich Zucker) Säuren bilden, die Fäulnisprozesse unterbinden und somit das Grüngut haltbar machen. Bei der Silierung von Grünfutter wird aus fütterungsphysiologischen Gründen vor allem auf die Umwandlung der Zucker in Milchsäure Wert gelegt.

Nach Einlagerung und Verdichtung des Gutes sowie der Abdeckung des Silos laufen in der ersten **aerobe Phase** alle Prozesse noch unter der Wirkung von Restluft ab. Die auf den Futterpflanzen vorhandenen Organismen (Bakterien, Hefen, Schimmelpilze) können noch ihre Energie durch Atmung gewinnen und sich so vermehren. Die meisten von ihnen sind jedoch für die Silierung unerwünscht. Sobald der Sauerstoff verbraucht ist, können sich nur solche Organismen entwickeln, die ihre Energie durch Gärung gewinnen können. In erster Linie sind das die erwünschten Milchsäurebakterien und einige Hefen.

In der sich anschließenden **Hauptgärphase** stirbt das Pflanzengewebe ab. Um die dadurch freiwerdenden Inhaltsstoffe konkurrieren Enterobakterien, Listerien, Clostridien, einige Bacillusarten, Hefen und Milchsäurebakterien. Während dieser ca. eine Woche andauernden Phase setzen sich allmählich die Milchsäurebakterien durch, denn ihre Stoffwechselprodukte, neben Milchsäure vor allem Essigsäure, bewirken die Unterdrückung der Konkurrenten. In dem sich einstellenden pH-Milieu können jetzt nur noch Hefen überleben. Die Aktivität der eiweißabbauenden Enzyme wird unterbunden, so dass der notwendige Eiweißanteil in der Silage erhalten bleibt.

In der **Lagerphase** lässt die Intensität der Gärprozesse nach. Die noch aktiven säuretoleranten Enzyme bewirken einen schwachen Abbau von Speicher- und Gerüstsubstanzen und liefern so die notwendigen leicht vergärbaren Kohlenhydrate nach. In dieser Phase stirbt der größte Anteil der Milchsäurebakterien mit der Zeit ab. Solange Luftzutritt wirksam verhindert wird, verändert sich die Silage nur noch unwesentlich.

In der **Entnahmephase** strömt wieder Luft in die Silage. Werden verfahrenstechnische Richtlinien z.B. täglicher Vorschub vernachlässigt, können sich Hefen und Schimmelpilze wieder vermehren. Infolgedessen kommt es zur Erwärmung der Silage. In unzureichend verdichteten Silagen können diese Prozesse noch beschleunigter ablaufen.

Einfluss der Inhaltsstoffe

Die während der Gärung gebildete Säuremenge und damit die pH-Wertabsenkung stehen im engen Verhältnis zum Gehalt an Kohlenhydraten und zum Keimgehalt im Ausgangsmaterial. Da die an der Milchsäuregärung beteiligten Milchsäurebakterien zumeist in ungenügend hoher Anzahl im Ausgangsmaterial vorhanden sind (meist $<10^2$ KbE/g FM), ist man bereits seit einigen Jahren dazu übergegangen, diese Bakterien zum Grüngut dazuzugeben, um die Gärung zu intensivieren. Solche Zusätze sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn ausreichend Zucker vorhanden ist. Nach WIERINGA *et al.* (1961) sind mindestens 75 g Zucker/ kg TM für eine Gärung erforderlich. Die Vergärbarkeit des Futters ist jedoch nicht nur allein vom Zuckergehalt anhängig, sondern wird ebenso vom Trockenmassegehalt und von der Pufferkapazität bestimmt. Diese Parameter stehen in folgender Beziehung:

$$VK = TM + 8 Z/PK \quad (1)$$

Dabei sind:

VK Vergärbarkeitskoeffizient

TM Trockenmasse [%]

Z/PK Zuckergehalt (g/kg TS) / Pufferkapazität (g Milchsäure/ kg TS)

Eine Bewertung des Vergärbarkeitskoeffizienten wird in **Tabelle 1** gegeben. Ist der Koeffizient größer als 45, kann eine weitgehend stabile Gärung erwartet werden.

Der notwendige Mindest-Trockenmassegehalt zur Erzeugung einer stabilen Silage ist umso größer, je niedriger der Z/PK-Quotient ist.

Tabelle 1: Bewertung der Vergärbarkeitskoeffizienten (DLG, 2000)

Vergärbarkeitskoeffizient	Bewertung	Merkmale	Beispiele
< 35	Schwer silierbar	Grundfutter mit zu niedrigem Gehalt an Gärsubstrat und/oder an Trockenmasse	Gräser, Leguminosen
> 35	Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im unteren TM-Bereich ≤ 35 %	Futterarten mit ausreichendem Gärsubstrat	Gräser, Leguminosen, GPS, Silomais
> 35	Mittelschwer bis leicht silierbares Futter im oberen TM-Bereich ≥ 35 bis 50 %	Futterarten mit ausreichendem Gärsubstrat	Gräser, Leguminosen, GPS, Silomais

Für Gras werden in allgemeinen 30 bis 40 % TM und für Mais 28 bis 35 % empfohlen. Bei diesen Trockenmassegehalten kommt es einerseits nicht zur unerwünschten Sickersaftbildung, andererseits kann noch ausreichend verdichtet werden.

Die Vergärbarkeit des Futters ist darüber hinaus von vielen anderen Faktoren abhängig. Die wichtigsten neben Pflanzenart und -sorte sind die Stickstoff-Düngung, das Entwicklungsstadium zur Ernte, Verschmutzung, Unkrautbesatz und Pflanzenkrankheiten.

Einflüsse der Häcksellänge, der Verdichtung und des Luftabschlusses

Aus der Sicht der Silierbarkeit, Verdichtbarkeit und der Mischbarkeit des Futters werden kurze Häcksellängen empfohlen. Es sollten dabei jedoch sowohl die Futteraufnahme und Passage (kurze Partikel) als auch eine ausreichend lange Partikellänge für die Strukturwirkung bei der Widerkäuferfütterung beachtet werden. Für Gras werden Häcksellängen von < 4 cm und für Mais von 4-7 mm bei ausreichender Zerkleinerung der Körner empfohlen.

Für eine ausreichende Verdichtung sollte das Futter rasch und in dünnen Schichten ins Silo eingelagert werden. In Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt werden unterschiedlichen Verdichtungen empfohlen (**Tabelle 2**).

Tabelle 2: Anforderungen an die Verdichtung von Silagen in Abhängigkeit von Frischmasse- bzw. Trockenmassegehalten unterschiedlicher Futterarten (HONIG 1987)

Futterart	TM-Gehalt %	Lagerdichte kg FM/m ³	Lagerdichte kg TM/m ³
Gras	25	700	175
	30	630	190
	35	600	210
	40	570	230
Mais	30	770	230
	35	770	270
Corn-Cob-Mix	55	730	400
	60	730	440

Das Verdichten durch sorgfältiges Festwalzen des Siliergutes dient nicht in erster Linie dem „Herauspressen der Luft“, sondern der Beseitigung sämtlicher Luftkanäle im Futterstock. Dadurch kann ein Nachsickern von Sauerstoff sowohl während der Befüllung, als auch beim Öffnen weitgehend vermieden werden.

Ein anhaltender Luftabschluss und eine intensive Säurebildung aus pflanzlichen Zuckern sind die Basis für eine erfolgreiche Konservierung durch anaerobe Lagerung. Um den Gasaustausch weitestgehend zu unterbinden, wird das Siliergut nach dem Festfahren mit einer Silofolie abgedeckt. Folien aus Polyethylen werden in verschiedenen Farben, Breiten, Folienstärken und Qualitäten angeboten. Besondere Anforderungen an die Folien werden bezüglich Reißkraft, Reißfestigkeit, Dehnfähigkeit, Gasdurchlässigkeit und Säure-

beständigkeit sowie Alterungsverhalten gestellt. Der Einsatz von Unterziehfolien wird empfohlen.

Die Siloabdeckungen sollen nicht nur einen anhaltenden Luftabschluss gewährleisten, sondern darüber hinaus verhindern, dass Regenwasser eindringt. Bei Silo mit festen Wänden werden Silokiessäcke zur Beschwerung der Folien verwendet. Bei Folienschläuchen ist ein zusätzlicher Schutz vor Beschädigung durch Tiere zu verwenden.

Umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss von Verdichtung und äußerer Luftabschlussgüte auf die Qualität von Silagen aus extensiv erzeugtem Grünfutter wurden in Zusammenarbeit mit der Humboldt Universität Berlin am ATB durchgeführt. Aus den Ergebnissen von Labor- und Praxisversuchen zum Schimmelpilzwachstum in Abhängigkeit von der Silagedichte und dem äußeren Luftabschluss sind Schlussfolgerungen zum erforderlichen Verdichtungsaufwand beim Einlagern des Siliergutes abgeleitet worden.

Mittels einer Rundballen- und einer Compactrollenpresse (**Bild 1**) wurden 165 Ballen unterschiedlicher Lagerungsdichte (ca. 180 bzw. 300 kg TM/m³) aus trockensubstanzreichem Landschaftspflegegut (Gras-Klee-Gemisch) erzeugt. Verschiedene Luftabschlussgüten der Ballen konnten durch unterschiedliche Anzahl von Folienlagen (2-8) erreicht werden. Nach der Lagerung im Freien (2-6 Monate) wurden die Ballen geöffnet und Gärqualität, Pilzwachstum sowie Gehalt an Roquefortin-C ermittelt.



Bild 1: Compactrollenpresse Muster Fa. Lely-Welger/ Krone

Die Erhöhung der Lagerungsdichte in den Silagen bildete in allen Silierversuchen die primäre Grundlage für die Erzeugung eines ausreichenden Luftabschlusses. Die äußere Luftabschlussgüte besaß demgegenüber sekundären Charakter.

Aus Grüngut im Bereich zwischen 40 % und 50 % TM kann bei ausreichend hoher Lagerungsdichte (200-210 kg TM/ m³) und 6 Folienlagen, das entspricht ca. 1,7 l/m² Gasaustausch in 24 Stunden, verfütterungswürdige Silage erzeugt werden. Die ermittelten Gehalte des Mykotoxins Roquefortin-C sind bei der Verfütterung an Wiederkäuer als unkritisch einzuschätzen (SCHMERBAUCH 2000, FÜRLI *et al.* 2006).

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Silierversuche und Empfehlungen aus der Literatur lassen sich die Forderungen für die zu garantierenden Oberflächendichten ableiten. Trotz zahlreicher Empfehlungen für den zu leistenden Verdichtungsaufwand beim Einlagern des Siliergutes ist die Umsetzung unter praktischen Bedingungen nicht zuverlässig zu garantieren. Ursache sind vor allem die inzwischen gewachsenen Masseströme. Eine objektive Lösung scheint nur durch die Entwicklung von Sensoren für die kontinuierliche Dichtemessung möglich zu sein.

Einsatz von Siliermitteln

Derzeit wird für verschiedene Wirkrichtungen eine Vielzahl von Silierzusätzen angeboten. Siliertechnische Mängel können dadurch jedoch nicht ausgeglichen werden!

Durch Siliermittel können hauptsächlich folgende Parameter beeinflusst werden:

Gärverlauf, aerobe Stabilität, Gärtaftanfall, Futterwert und Tierleistung. Die dafür zur Verfügung stehen Zusätze lassen sich in fünf Gruppen einteilen: zuckerhaltige Mittel, chemische Mittel (Säuren, Salze), biologische Mittel (Milchsäurebakterien, Enzyme), Kombinationsprodukte (Säuren und Salze plus Milchsäurebakterien) und Zusätze zur Feuchtgetreidekonservierung.

Am ATB wurde für die Grassilierung ein Siliermittel (*Bornim liquid*), bestehend aus zwei Milchsäurebakterien entwickelt und unter Labor- und Praxisbedingungen getestet. Darüber hinaus wurde ein Verfahren zur Erzeugung dieses Siliermittels in Einfachtechnologie im landwirtschaftlichen Betrieb konzipiert und in einer AG in Niederschöna (Sachsen) umgesetzt (IDLER *et al.* 2002). Zur Verbesserung der aeroben Stabilität, vor allem in Maissilagen, wurde dem Siliermittel noch ein dritter Stamm (*Bornim liquid⁺*) hinzugefügt. Durch ein neues Fermentationsverfahren ist es möglich, alle Stämme kostengünstig in einer Fermentation zu erzeugen. Ein neu geschaffenes molekulargenetisches Assay ermöglicht dabei die Kontrolle der gleichsinnigen Entwicklung der drei Stämme, die sich morphologisch sehr ähnlich sind (IDLER & KLOCKE 2006).

3 Verfahrenstechnische Grundlagen für die Halmgutkonservierung

3.1 Grundsätze der Logistik

Um Qualitätssilagen zu erzeugen, müssen die Prozesse Ernte, Transport, Einlagern und Verdichten logistisch abgestimmt werden.

Ernte bzw. Bergen des Siliergutes erfolgen mit Ladewagen oder Häckslern. Ladewagen benötigen geringere Investitionen und sind besonders bei geringen Feld-Silo-Entfernungen geeignet. Die Fassungsvermögen betragen inzwischen >40m³. Durch die große Anzahl der Messer werden theoretische Häcksellängen von 34 mm erreicht. Dies ist für das Verdichten im empfohlenen Trockensubstanzbereich ausreichend, so dass gegenüber dem Häckselgut des Feldhäckslers keine schlechteren Silagequalitäten erzielt wer-

den (LATSCH *et al.* 2003). Mit Feldhäckslern sind theoretische Häcksellängen ab 4 mm möglich. Durch die hohen Motorleistungen von mehr als 500 kW sind Durchsätze von >70 t/h Anwelkgut und >200 t/h Mais erreichbar. Dadurch werden hohe Anforderungen an das logistische Management der gesamten Kette gestellt.

In der Transporttechnik für Häckselgut haben sich sowohl Ladevolumen wie auch Fahrgeschwindigkeit vergrößert (HAHN 2006). So wurden von mehreren Herstellern spezielle Selbstlade- und Dosierwagen für den Häckseltransport mit Ladevolumen von >43 m³ oder Großraumsilierwagen mit 80 m³ Ladevolumen entwickelt. Die Transportgeschwindigkeiten haben sich auf 60 km/h bis 80 km/h erhöht.

In der logistischen Kette resultiert die Anzahl der notwendigen Transporteinheiten aus der Transportentfernung und den Masseströmen der Feldhäcksler (**Bild 2**). Bei einer Transportentfernung von 10 km sind so beispielsweise je nach Häckslerleistung 10 bis 30 Transporteinheiten mit einem Ladevolumen von 40 m³ erforderlich.

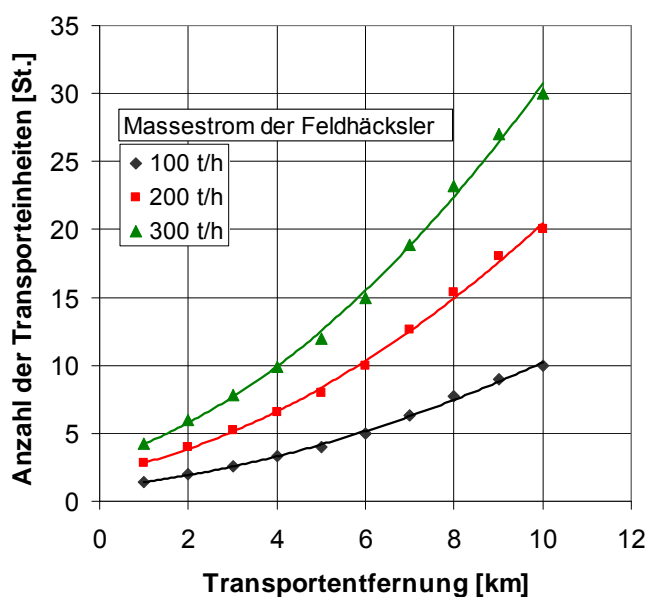


Bild 2: Notwendige Anzahl der Transporteinheiten (40 m³) in Abhängigkeit von der Leistung der Feldhäcksler (TM = 35 %)

Probleme gibt es derzeit in vielen Praxisbetrieben den von der Erntemaschine meist sehr hohen Massestrom in Horizontalsilos einzulagern und ausreichend zu verdichten. Hier ist unbedingt darauf zu achten, dass eine notwendige Anzahl von Verdichtungseinheiten zur Verfügung steht, für die wiederum eine entsprechende Silobreite vorhanden sein muss (**Tabelle 2**).

3.2 Einlagern und Verdichten

Die Dichte des Siliergutes hat beim Einlagern einen ganz wesentlichen Einfluss auf den Siliererfolg. In experimentellen Untersuchungen von (RETTIG 1972) und (WEISE *et al.* 1975) wurde der Gasaustausch untersucht und der Exponent der Geschwindigkeit des Gasaustausches α sowie der Exponent der Gasbildung im Gut α_{bio} in Abhängigkeit von der Einlagerungsdichte der Originalsubstanz (OS) bestimmt. Als Kriterium für die Höhe der Einlagerungsdichte der Originalsubstanz gilt, dass der Gasaustausch nicht größer sein darf als die Gasbildung im Siliergut, d.h. $\alpha < \alpha_{\text{bio}}$ (**Bild 3**). Dies bedeutet, dass für angewelktes Siliergut bei freier Siliergutoberfläche ohne Zudeckung eine Dichte $>750 \text{ kg OS/m}^3$ vorhanden sein müsste. Da dies in der Praxis nicht zu erreichen ist, wird der äußere Luftabschluss durch Zudecken mit Folie hergestellt. Bei ganzflächig beschwerter Folie ist nur noch eine Einlagerungsdichte von $400 - 500 \text{ kg OS/m}^3$ nötig (**Bild 3**).

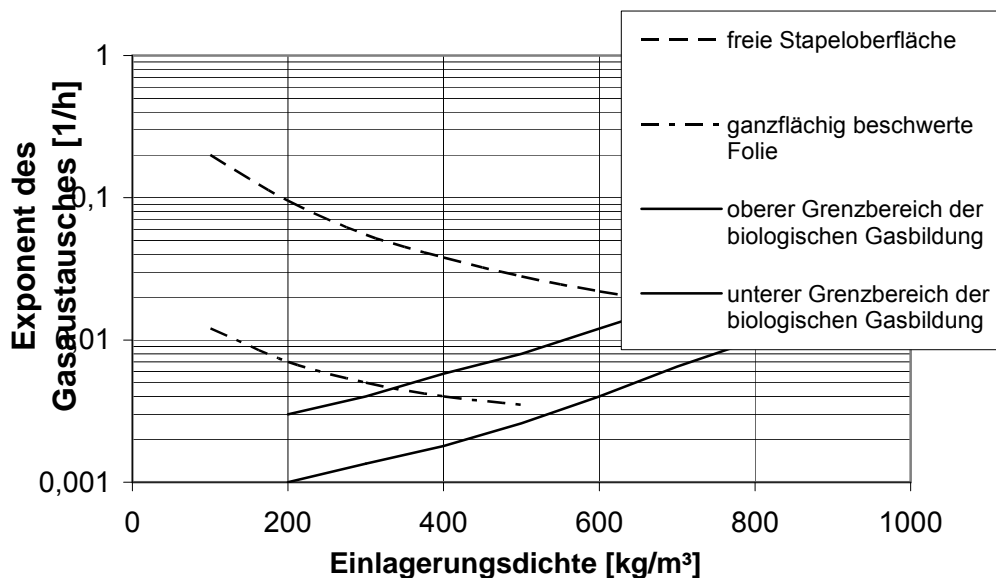


Bild 3: Exponent des Gasaustausches und der Gasbildung in Abhängigkeit von der Einlagerungsdichte der Originalsubstanz des Siliergutes bei freier und mit Folie zugedeckter Siliergutoberfläche (RETTIG 1972, WEISE *et al.* 1975)

Die Lagerungsdichten hängen vor allem von den wirkenden statischen Drücken, sowie von den physikalischen Eigenschaften des Siliergutes, d.h. vom Trockenmassegehalt TM , von der Biegesteifigkeit der Blätter und Stängel EI und von der Häcksellänge l_H , sowie von der Belastungszeit t , d.h. der Lagerdauer, ab. Für statische Belastungen lassen sich die Ergebnisse durch die folgende Verdichtungsfunktion zusammenfassen (FÜLL *et al.* 2006):

$$\rho_L = C \cdot \rho_V^m + \rho_{\text{Sch}} \quad (2)$$

ρ_L - Lagerungsdichte

ρ_V - Vertikaldruck

ρ_{Sch} - Schüttdichte

C - Verdichtungsfaktor

m - Exponent (= 0,5)

Der Verdichtungsfaktor C enthält die Einflüsse durch die Guteigenschaften Trockenmassegehalt und Biegesteifigkeit der Blätter und Stängel sowie durch die Verdichtungszeit. Da die Biegesteifigkeit in der Praxis nicht einfach bestimmbar ist, werden im Folgenden für den Verdichtungsfaktor Regressionsgleichungen für den Maximal- und den Minimalbereich in Abhängigkeit von der Lagerdauer t und vom Trockenmassegehalt TM angegeben:

$$C_{\max} = 280,3 + 43,86 \ln(t) + 31,86 TM - 0,486 TM^2 \quad B = 0,99 \quad (3)$$

$$C_{\min} = 684,4 + 21,93 \ln(t) - 0,081 TM^2 \quad B = 0,96 \quad (4)$$

Nach diesen Gleichungen hat der Vertikaldruck den größten Einfluss auf die Lagerungsdichte. Danach folgen die Einflüsse durch die Lagerungsdauer, den Trockenmassegehalt und die Biegesteifigkeit (**Bild 4**).

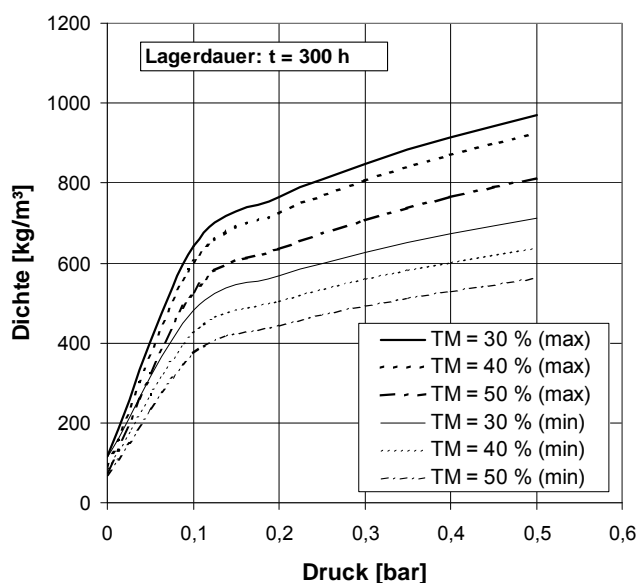


Bild 4: Verlauf der Lagerungsdichte von angewelktem Gras in Abhängigkeit vom Vertikaldruck und vom Trockenmassegehalt nach dem Einlagern ($t = 300$ h) des Siliergutes

Dagegen wirkt sich die Häcksellänge nur bei geringen Vertikaldrücken aus.

Gesetzmäßigkeiten zum Verdichten durch Traktoren wurden von (HEROLD 1970) untersucht. Aus Retardationsversuchen mit mähfrischem Wiesengras mit einer Häcksellänge $l_H = 40$ mm bei einem Trockenmassegehalt $TM = 16\%$ ergibt sich für die bleibende Deformation ε_{bl} in Abhängigkeit vom Vertikaldruck p_v und der Haltezeit t_H des Vertikaldruckes folgende Gleichung:

$$\varepsilon_{bl} = 0,345 + 0,11\rho_v + 0,022\rho_v \lg(t_H - 1) \quad B = 0,838 \quad (5)$$

Geltungsbereich: $\rho_v = 0,1 \dots 1,0$ bar

$t_H = 1,2 \dots 1200$ s

Nach Gleichung (5) hat die Höhe des Vertikaldruckes den größten Einfluss auf die bleibende Verdichtung.

Für die praktische Anwendung kann in Auswertung umfangreicher Untersuchungen am früheren Forschungszentrum für Mechanisierung Potsdam-Bornim (zitiert in: FREITAG 1983), an der Humboldt-Universität zu Berlin (EDNER 1985) und nach neuesten Untersuchungen am ATB (Füll *et al.* 2008) der Verdichtungsaufwand in Traktorenminuten je t Originalsubstanz (Tr.-min./t OS) angegeben werden (**Bild 5**).

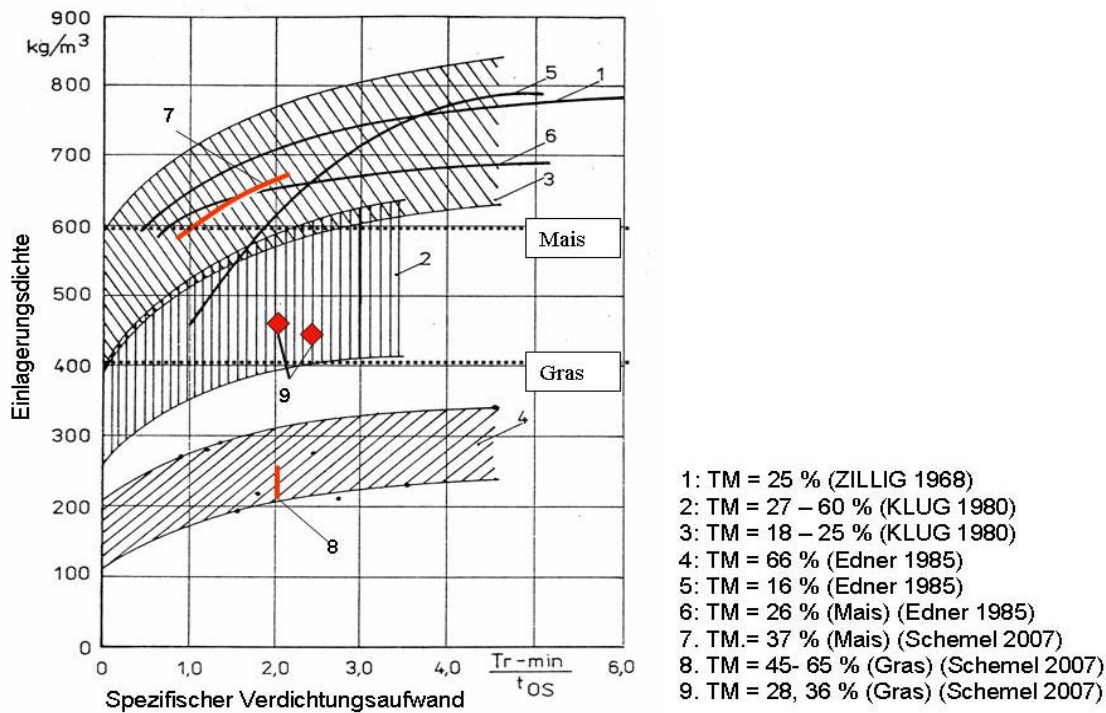


Bild 5: Oberflächendichte von Siliergut in Abhängigkeit vom spezifischen Verdichtungsaufwand

Danach sind für alle Gutarten und Trockenmassen etwa $>1,0$ bis $1,5$ Tr.-min./t OS erforderlich. So sind beispielsweise bei einer Ernteleistung von 100 t OS/h mehr als 2 Verdichtungstraktoren vorzusehen. Dafür müssen wiederum entsprechende Silobreiten vorhanden sein (**Tabelle 3**). Für Trockenmassen über 50 % werden die erforderlichen Oberflächendichten nicht mehr erreicht.

Tabelle 3: Erforderlicher Verdichtungsaufwand und notwendige Verdichtungseinheiten beim Einlagern von Siliergut in Horizontalsilos

Trockenmasse [%]	20	25	30	35	40	45
Verdichtungs- aufwand [Tr-min./ t OS]	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
Massestrom je Verdichtungs- einheit [t/h]	60	60	40	40	40	40
Verdichtungseinheiten [St.]						
100 t/h	2	2	3	3	3	3
200 t/h	4	4	5	5	5	5
300 t/h	6	6	8	8	8	8

Dichtebestimmungen erfolgen nahezu ausschließlich mit Hilfe des Wägens größerer Volumenelemente bei der Entnahme oder von Bohrkernen. Daneben sind radioaktive Meßmethoden und Online-Messverfahren entwickelt worden (SCHEMEL *et al.* 2006). Sie sind geeignet ein Dichtecontrolling während der Silierguteinlagerung vorzunehmen.

3.3 Entnahme aus Horizontalsilos

Die Futterentnahme und –verteilung ist technisch durch mehrere am Markt vorhandene Varianten gelöst. Die tägliche Entnahmemasse wird durch die Tieranzahl und die Futtermenge bestimmt. Der Siloquerschnitt muss so bemessen sein, dass eine bestimmte Mindestentnahmetiefe gesichert wird. Nach Untersuchungen am früheren Forschungszentrum für Mechanisierung Potsdam-Bornim (FREITAG 1983) wird die Verderbgefährdung an der Anschnittfläche vor allem durch die Silagedichte beeinflusst. So sind bei Grassilage Entnahmetiefen von 0,10 m/d bis 0,25 m/d und bei Maissilage von 0,20 m/d bis 0,40 m/d erforderlich. Weil die Silagequalität, bzw. das Vermeiden von Verlusten, bei der gesamten Futtermittelkonservierung eindeutig Priorität besitzen, muss die Silogeometrie nach dem vorhandenen Verbrauch, d.h. der täglichen Entnahme, bemessen werden. Daraus ergibt sich zwangsläufig die Silobreite, die wiederum Einfluss auf die einsetzbaren Verdichtungstraktoren und damit auf die möglichen Einlagerungsmasseströme ausübt (**Bild 6**).

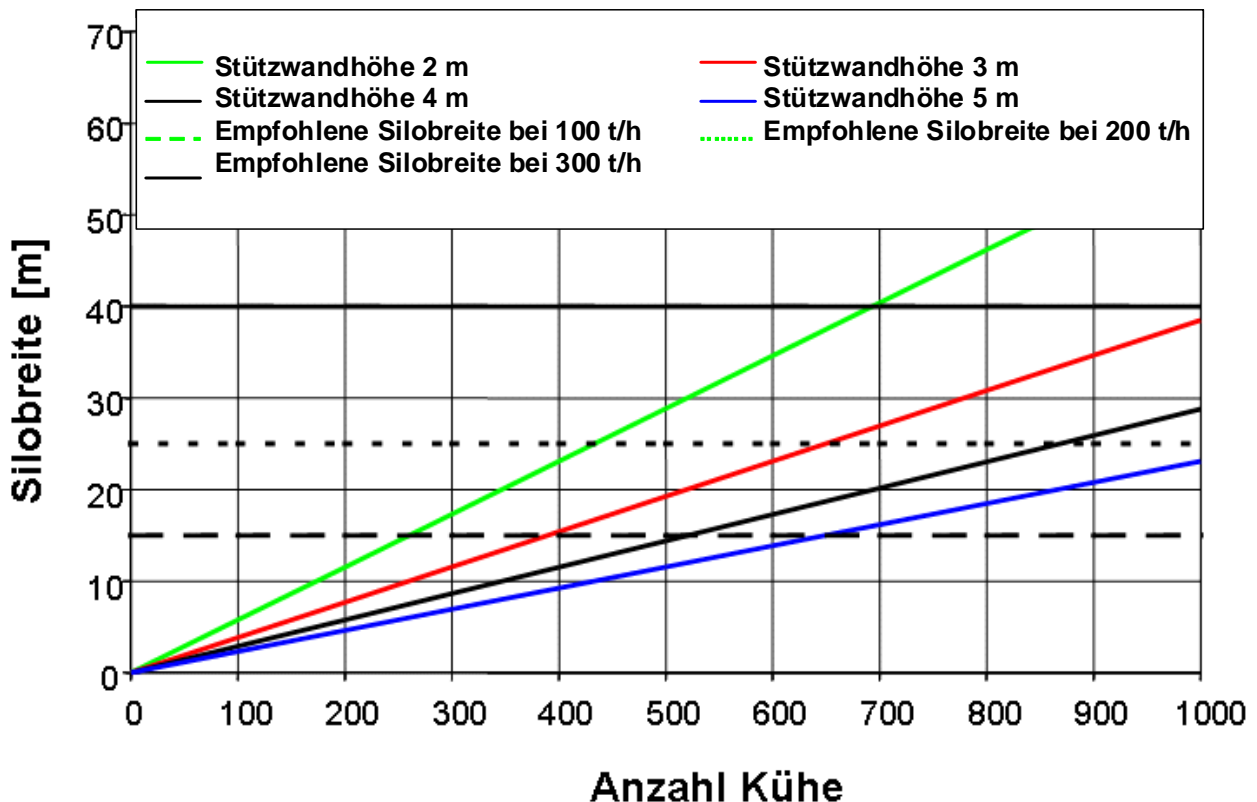


Bild 6: Silobreite und Silohöhe in Abhängigkeit von der Zahl der Kühe und der Häckslleistungen (einseitige Entnahme, tägl. Vorschub: 0,4 m)

3.4 Silierverfahren

3.4.1 Hochsilos

Gärfutterhochsilos sind vor allem mit mechanisierter Entnahmetechnik arbeitswirtschaftlich sehr vorteilhaft. Von Nachteil sind die relativ hohen Investitionen für die Silos und die Entnahmetechnik. Die Verfahrenskosten sind für die Hochsilokette je nach vor- und nachgelagerter Technik um etwa 10 % bis 20 % höher als bei der Horizontalsilokette (AMMAN und FRICK 2005). Die Silagequalität wird durch die Hermetisierung und durch die infolge der Eigenbelastung erzeugte Dichte gesichert. Das Befüllen erfolgt überwiegend mit Gebläsen. Sie können sehr leistungsfähig sein, so dass Masseströme von >200 t/h bei Mais erreichbar sind.

3.4.2 Horizontalsilos

Horizontalsilos sind besonders für große Verbraucher (z.B. Biogasanlagen, Energiebetriebe, Viehbestände) geeignet. Sie sind in der Praxis in sehr unterschiedlichen Geometrien vorzufinden. Während in klein strukturierten Landwirtschaftsbetrieben Silobreiten bis etwa 10 m und Seitenwandhöhen bis zu 3 m dominieren, sind in den größeren Betrieben der neuen Bundesländer Deutschlands Silobreiten bis 24 m, Seitenwandhöhen bis 5 m und Silolängen bis 114 m vorzufinden (FÜLL 1983).

Horizontalsilos liegen in den Investitionen bei 50 % gegenüber GFK-Hochsilos aus mit Glasfasern verstärkten Kunststoffen. Die Verfahrenskosten sind für die gesamte Kette von der Ernte bis zur Futtermittelverteilung etwa in gleicher Höhe wie bei der Silierung in GFK-Silos und in Folienschläuchen (AMMAN & FRICK 2005, JÄKEL 2006). Von Nachteil ist der relativ hohe Bedarf an Traktoren und Arbeitszeit.

3.4.3 Schlauchsilierung

Die Schlauchsilierung hat in den letzten Jahren eine bemerkenswerte Verbreitung gefunden. Gründe sind in erster Linie die geringen Investitionen und die hohe Flexibilität. Das Einpressen des Siliergutes in den Folienschlauch geschieht mit Hilfe eines Pressrotors, der sich das Gut aus einer Annahmemulde entnimmt. Der Schlauch befindet sich zwischen einer Rückhalteeinrichtung und dem Traktor, die über Seile miteinander verbunden sind. Der Pressdruck kann auf diese Weise über die Bremse des Traktors reguliert werden (AMMAN & FRICK 2005, JÄKEL 2006). Der Schlauchdurchmesser beträgt gegenwärtig bis zu 3 m. Die Durchsätze liegen derzeit bei 40-60 t/h für Grassilage und 80-100 t/h für Mais (JÄKEL 2006). In den Verfahrenskosten gibt es gegenüber der Ballensilierung keine und gegenüber der Silierung in Horizontalsilos keine nennenswerten Vorteile (AMMAN & FRICK, 2005, JÄKEL 2006). Vorteilhaft ist, dass für das Verdichten keine zusätzlichen Traktoren benötigt werden und der Arbeitszeitbedarf gering ist.

Nachteilig ist besonders bei großen Tierbeständen der hohe Platzbedarf und aus Gründen des Umweltschutzes der überdurchschnittliche Folienbedarf. Die Entnahmetechnik ist nicht optimal (AMMAN & FRICK 2005).

3.4.4 Ballensilierung

Die Ballensilierung ist vor allem für kleine Verbrauchs-Masseströme von Bedeutung. Die Vorteile liegen in der hohen Flexibilität und im einfachen Handling. Von Nachteil sind der hohe Folienbedarf und die Verletzungsgefahr der Folie. Schon geringe Beschädigungen beeinträchtigen die Silagequalität. Bei der Herstellung, die überwiegend mit Press-Wickel-Kombinationen vorgenommen wird, muss auf die für die Silierung geforderte Dichte geachtet werden. Die Ballendichte hat für die Silagequalität eine größere Bedeutung als der äußere Luftabschluss durch Folienumwicklungen oder der Trockensubstanzgehalt (AMMAN & FRICK 2005), (FÜRLL *et al.* 2006). Überwiegend werden 6 Folienlagen gefordert (Fürll *et al.* 2006). In der Schweiz wurde auf der Basis einer stationär betriebenen Press-Wickel-Kombination eine Maschinenlösung entwickelt, die die Silierung von Maishäcksel in Ballen ermöglicht. Der Durchsatz beträgt 20-30 t/h (AMMAN & FRICK 2005).

4 Verfahrenstechnische Grundlagen für die Getreidekonservierung

4.1 Konservierungsverfahren für Futtergetreide

Die hofigene Konservierung, Lagerung und Aufbereitung von Futtergetreide verbessert die Wertschöpfung im landwirtschaftlichen Betrieb und garantiert Futtergetreide mit bekannter Zusammensetzung und Qualität.

Kosten, Energie und Arbeitszeit können gespart werden, wenn sich die Konservierung am Verwendungszweck des Getreides als Futtermittel orientiert. Verfahren (**Bild 7**) der Trockenkonservierung wie Warmlufttrocknung oder Belüftungstrocknung entziehen dem Getreide bis zum Erreichen der Lagerfähigkeit Wasser. Der Wasserentzug ist jedoch für die Verwertung als Futtermittel unnötig. Bei den Feuchtkonservierungsverfahren verbleibt das Wasser im Getreidekorn, ohne dass dadurch der Futterwert gemindert wird.

Unabhängig von der Konservierungsart ist das Korn vor der Fütterung zu zerkleinern. Für Schweine ist Schrot zu erzeugen, bei dem etwa 50 % der Partikel kleiner 1 mm sind. Wiederkäuer benötigen für eine gute Trockenmasse- und Stärkeverdaulichkeit ein grobes Schrot, bei dem der Kornaufbau zerstört ist (SCHRÖDER *et al.* 1998).

Abschnitt	Aufbereiten	Konservieren	Lagern	Aufbereiten
Trocken- konser- vierung	(Vorreinigen)	Warmluft- trocknung	Flach-/Hochlager	} Mahlen/ Quetschen
	(Vorreinigen)	Belüftungs- trocknung	Flachlager	
Feucht- konser- vierung	(Vorreinigen)	Kühlung	Flach-/Hochlager	
		Propionsäure Harnstoff	Flachlager Flachlager	
		Kons. im gasdichten Hochbehälter		
	Mahlen/Quetschen	Kons. im Fahrsilo		
	Mahlen und Anteigen	Flüssigkonservierung im Hochsilo		

Bild 7: Verfahren zur Konservierung von Futtergetreide (JUNGBLUTH & BECK, geändert)

4.2 Zerkleinern und Lagern von feuchtem Futtergetreide

Zum Zerkleinern eignen sich vor allem Hammer- oder Walzenmühlen (**Bild 8**). Bei Hammermühlen werden die Körner im Mahlraum durch Prallbeanspruchung von rotierenden Schlagwerkzeugen zerkleinert, bis sie die Sieböffnungen im Mahlraum passieren können.

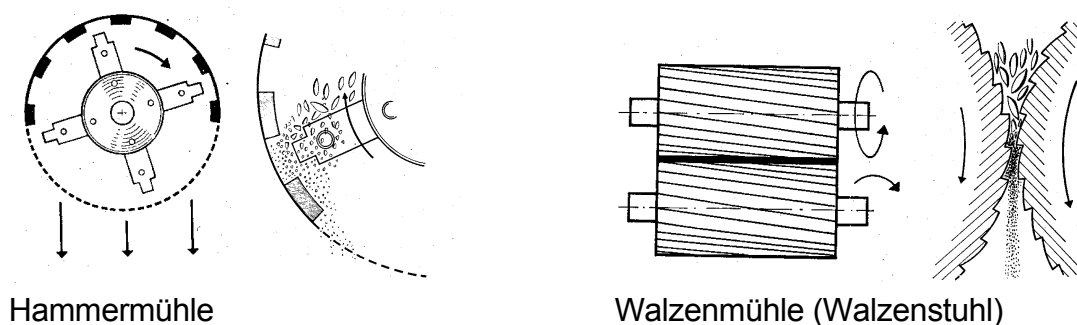


Bild 8: Werkzeuge und Arbeitsweise von Schrotmühlen (ANONYM 1990)

Die Größe der Sieböffnungen bestimmt den Zerkleinerungsgrad. Eine Walzenmühle, auch Walzenstuhl genannt, enthält rotierende, geriffelte Walzen (**Bild 8**). Im Mahlspalt zwischen den Walzen wird das Korn gequetscht und infolge der Riffelung bei unterschiedlichen Walzendrehzahlen zusätzlich geschert.

In einem landwirtschaftlichen Betrieb war zu untersuchen, ob sich ein Walzenstuhl zum Zerkleinern von erntefeuchtem Getreide für Milchkühe eignet, wie das Schroten in den Betriebsablauf einzuordnen ist und wie die Lagerung des geschroteten Getreides ohne chemische Zusätze erfolgen muss.

In fünf Untersuchungsjahren wurden jeweils 500 t Getreide für Milchkühe mit Kornfeuchten zwischen 14 % und 25 % geschrotet. Bei der angewendeten konservierenden Getreideschrotlagerung wurde erntefeuchtes Getreide geschrotet, in ein Flachlager eingelagert, mit einem Schlepper verdichtet (**Bild 9**) und mit Folie sorgfältig zugedeckt (**Bild 10**). Die Konservierung beruht auf dem Veratmen des Restsauerstoffs unter der Folie zu Kohlendioxid (CO₂). Die konservierende Schrotlagerung ist auch in trockenen Ernteperioden durchführbar, denn sie besitzt keine Mindestkornfeuchte.



Bild 9: Radschlepper beim Verdichten



Bild 10: Schrotsilo mit Folienzudeckung

Geschrotet wurde mit einem Doppelwalzenstuhl GM 421 B (**Bild 11**), der für den mobilen Einsatz an verschiedenen Lagerorten auf ein Anhängerfahrgestell montiert worden ist (**Bild 12**).

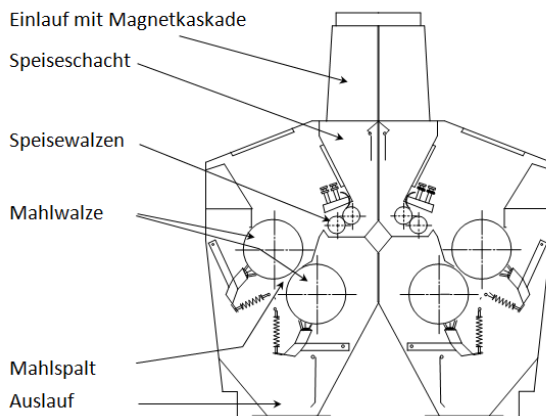


Bild 11: Doppelwalzenstuhl für das Schrotten von Futtergetreide



Bild 12: Mobiler Doppelwalzenstuhl GM 421 B

Bei 19 % Kornfeuchte ermöglicht ein Doppelwalzenstuhl mit 50 kW Antriebsleistung für die Walzenpaare und die Fördererlemente ein Massestrom von 21 t/h in der Hauptzeit, sofern ein grobes Schrot für Wiederkäuer das Ziel ist.

Zum Antrieb der beiden Walzenpaare sind 2 Elektromotoren mit je 18 kW Leistung installiert. Daraus ergibt sich ein spezifischer Antriebsenergiebedarf von 1,7 kWh/t für das Schrotten. Der Wert liegt deutlich unter dem Bedarf von Hammermühlen (**Bild 13**) bei feuchtem Korn, wobei Hammermühlen das Korn für Wiederkäuer zu fein schrotten.

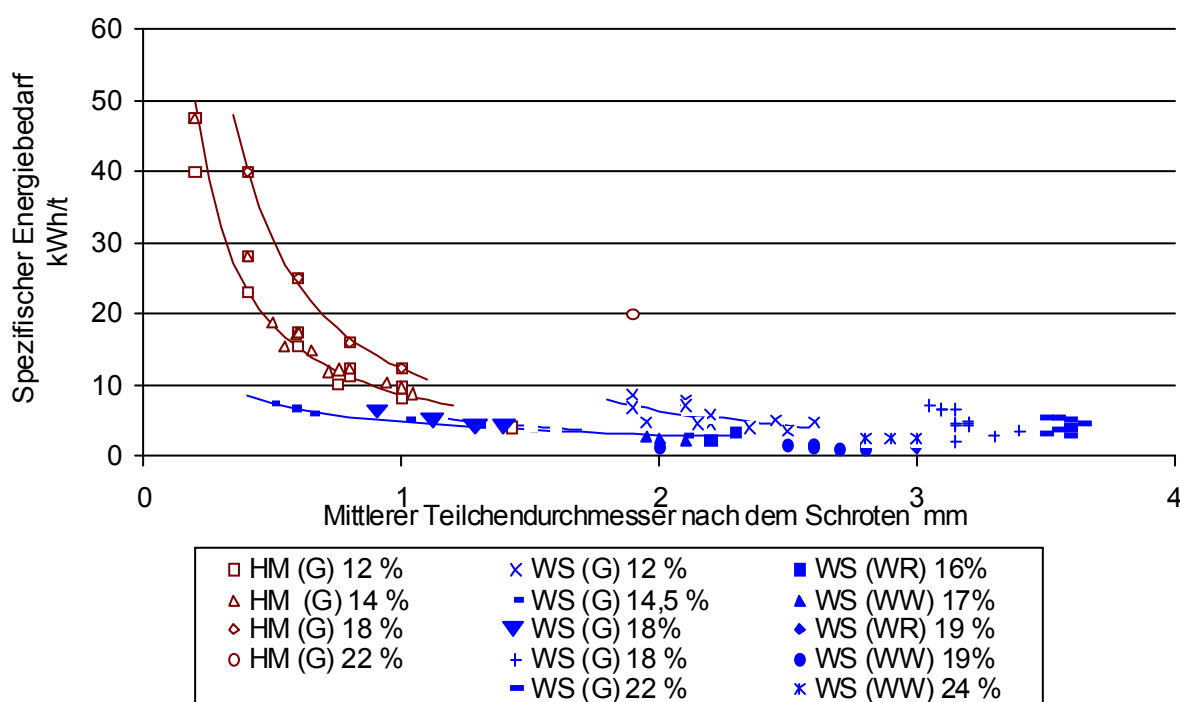


Bild 13: Spezifischer Energiebedarf beim Schrotten von Gerste (G), Winterweizen (WW) und Winterroggen (WR) mit Hammermühle (HM) und Walzenstuhl (WS) bei unterschiedlichen Kornfeuchten (FÜRLL *et al.* 1997, ergänzt)

Nach Lagerzeiten von 1 bis 10 Monaten wurden Schrotproben entnommen und untersucht. Im Kornfeuchtebereich unter 20 % zeigte sich beim überwiegenden Teil der Schrotproben eine Anzahl keimbildender Einheiten (KbE) unterhalb des Grenzwertes von 10^5 KbE/g TM für Futtergetreide. Ochratoxin A wurde bei einer Nachweisgrenze von $0,1 \mu\text{g/kg}$ TM nicht gefunden. Ab 20 % Feuchte war ein deutlicher Anstieg der Fälle mit Keimzahlen über 10^5 KbE/g TM zu verzeichnen. Aufgrund der geringen Anzahl keimbildender Einheiten bis 20 % Kornfeuchte und dem negativen Befund zu Ochratoxin A ist die Kornfeuchte für die Schrottlagerung ohne chemische Zusätze vorsorglich auf maximal 20 % zu begrenzen.

4.3 Angepasste Verfahrenskombination für die Konservierung

Das Schrotten und die konservierende Schrottlagerung waren Bestandteil einer Verfahrenskombination für einen landwirtschaftlichen Betrieb, bei der Kornfeuchte und Verwendungszweck berücksichtigt wurden (**Bild 14**, Verfahrenskombination 2).

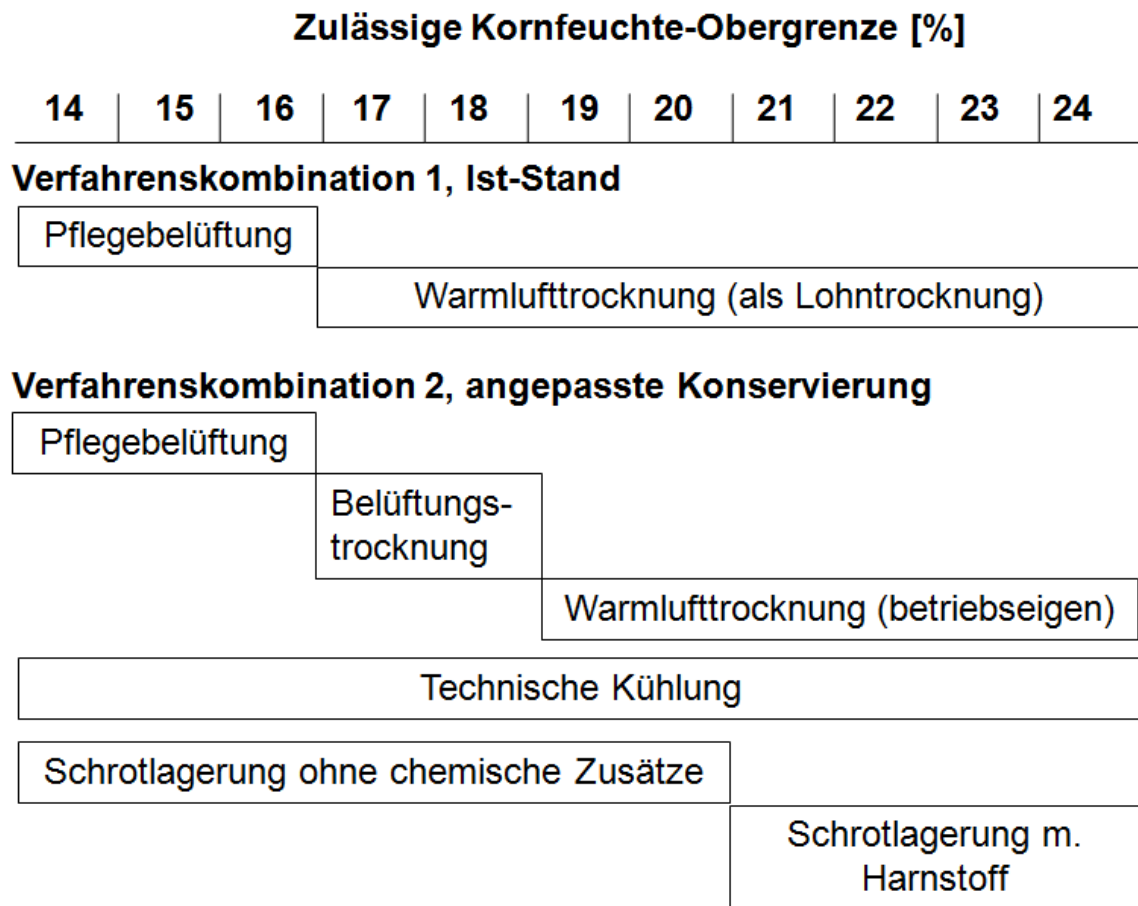


Bild 14: Kombinationen von Konservierungsverfahren

Die Verfahrensvarianten 1 und 2 (**Bild 14**) wurden modelliert und bewertet, wobei die Modellierung es erlaubte, die Kornfeuchteobergrenze schrittweise bis 24 % zu erhöhen. Als Bewertungskriterien wurden Verfahrenskosten, Energiebedarf und Arbeitszeitbedarf gewählt. Bei der Bewertung zeigte sich einen Zielkonflikt für den Landwirt. Entweder investiert der Landwirt in eine hohe Mähdruschleistung und erntet überwiegend trockenes Korn, das einen geringem Konservierungsaufwand erfordert, oder aber der Landwirt spart beim Mähdrusch, erntet mehr feuchtes Korn und hat dadurch einen höheren Konservierungsaufwand. Anhand der Modellrechnung war festzustellen, dass feuchte Ernteperioden die vorzusehende Technikausstattung bestimmen und dass es sinnvoll ist, die Verfahren bis zu einer Kornfeuchteobergrenze von 22 % auszulegen (HOFFMANN 1998). Durch eine Anpassung von Technik und Verfahren an die Kornfeuchte und an den Verwendungszweck (Verfahrenskombination 2, **Bild 14**) können die Verfahrenskosten auf 78 %, der Energiebedarf auf 70 % und der Arbeitszeitbedarf auf 73 % gegenüber der Verfahrenskombination 1 reduziert werden (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: Aufwendungen für die Verfahrenskombination 1 und die angepasste Verfahrenskombination 2 bei 22 % Kornfeuchte-Obergrenze in feuchten Ernteperioden

Kriterium		Mähdrusch und Konservierung		Konservierung	
		1	2	1	2
Verfahrenskosten	EUR/t	49	38	23	12
	%	100	78	100	52
Energiebedarf	MJ/t	885	620	656	391
	%	100	70	100	60
Arbeitszeitbedarf	AKh/100 t	49	36	35	22
	%	100	73	100	63

4.4 Schlussfolgerungen

Für den Beispielbetrieb kann eine Verfahrenskombination für die Konservierung von Getreide aufgestellt werden, die sich an der Kornfeuchte-Obergrenze und an dem Verwendungszweck des Getreides orientiert.

Die konservierende Schrottlagerung ist bis zu einer Kornfeuchteobergrenze von 20 % ein sicheres Konservierungsverfahren für Feuchtgetreide. Zum Schroten ist ein Walzenstuhl zu empfehlen. Ein Walzenstuhl erzeugt ein grobes Schrot für Wiederkäuer und benötigt gegenüber einer Hammermühle weniger Energie.

Durch eine angepasste Konservierungsstrategie können die Verfahrenskosten, der Energiebedarf und der Arbeitszeitbedarf deutlich reduziert werden. Technik und Verfahren für den Mähdrusch und die Konservierung sollten für eine Kornfeuchte-Obergrenze von 22 % ausgelegt sein.

Literaturverzeichnis

- AMMAN H., FRICK, R. (2005):** Silierverfahren im Vergleich. FAT-Berichte Nr. 627, Agroscope FAT Tänikon, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Schweiz
- ANONYM (1990):** Mahl- und Mischanlagen im landwirtschaftlichen Betrieb. AEL Heft 7, 40 S.
- ANONYM (2003):** Mykotoxine. Vorkommen und Bekämpfungsstrategien in Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (Hrsg.). 36 S.
- ANONYM (2007):** Agrarmärkte. Jahresheft 2007. Teilauszug Getreide. Mischfutter - Tabellarium. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 27 S.
- DLG (2000):** DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliemitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. DLG-Verlag, Frankfurt am Main
- FÜRLI CH., KAISER E., SCHMERBAUCH K.-J., IDLER CH. (2006):** Einflüsse durch das Verdichten und den äußeren Luftabschluss auf die Qualität von Grassilagen - Ergebnisse und Anforderungen. ATF 12(2): 19-29.

- EDNER H.-H. (1985):** Die Verdichtung von Siliergut und die Lagerungsdichte von Grünfuttersilage. Humboldt-Universität zu Berlin Diss.
- FREITAG H. (1983):** Beitrag zum Bemessen und Bewerten von Prozessen der Grünfuttersilierung. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin
- FÜLL C., IDLER C., HOFFMANN T. (1997):** Untersuchungen zu Verfahren der Konservierung von erntefeuchtem, grobgeschrotetem Getreide. Agrartechnische Forschung 3(1): 66-75.
- FÜLL CH. (1983):** Lager, Kap. 6 in: Transport, Umschlag und Lagerung in der Landwirtschaft, Verlag Technik (Berlin) 1983, Herausg.: K. Mührel
- FÜLL CH., SCHMERBAUCH K.-J., KAISER E., IDLER CH. (2006):** Einflüsse durch das Verdichten und den äußeren Luftabschluss auf die Qualität von Grassilagen – Ergebnisse und Anforderungen. Agrartechnische Forschung 12(2): 19-29
- FÜLL CH., IDLER CH., SCHEMEL H.(2008):** „Bereitstellung qualitätsgerechter Silage sowie Ermittlung der energetischen und ökonomischen Kenngrößen zur Bewertung und Optimierung des Gesamtverfahrens“, Teilbericht im Verbundvorhaben: „Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe“, Potsdam-Bornim 2008
- HAHN J. (2006):** Logistik, in: Jahrbuch Agrartechnik, 18, S.52-58, Herausg.: Harms, H.-H. und F. Meier
- HEROLD B. (1970):** Rheologische Untersuchungen an Grashäcksel. Agrartechnik 20(10): 475-476
- HOFFMANN T. (1998):** Gestaltung von Technik und Verfahren für die Ernte und Konservierung von Getreide auf der Grundlage witterungsbedingter Kornfeuchten. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin
- HONIG H. (1987):** Influence of forage type and consolidation on gas exchange and losses silo, p. 51-52 in: Summary of papers, 8th Silage Conference, Hurley (UK).
- IDLER CH., KLOCKE M. (2006):** Microbial silage additives: new strategies for development and production. Proceeding 12th international Symposium FORAGE CONSERVATION, 3-5 April, Brno (Czech republic): 235-238.
- IDLER CH., RICHTER K., PARTZSCH R., NEUBERT G., HEBER F. (2002):** Selbsterzeugung von Starterkulturen durch den Landwirt. Landtechnik, 57(5): 262-263.
- JÄKEL K. (2006):** Einsatz der Folienschlauchtechnologie. GKL-Frühjahrstagung, Tagungsband Sektion Bau und Technik „Siliererfolg auch bei großen Erntemassen“, Institut für Landtechnik, Universität Bonn, 7-8
- JUNGBLUTH T., BECK J. (keine Jahreszahl vorhanden):** Technik der Konservierung, Lagerung und Aufbereitung von Futter. Universität Hohenheim, Foliensammlung, 34 S.
- LATSCH R., PROCHNOW A., BERG W (2003):** Häckler oder Ladewagen. Neue Landwirtschaft 12(11): 54-57
- NEUMANN S. (2007):** Neue Aspekte in der Grundfütterversorgung von Milchkühen. Nutztierpraxis aktuell Rinderpraxis 22: 26-28.
- PAHLOW G. (2006):** Gärbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: Praxishandbuch Futtermittelkonservierung, 7. Aufl. 2006, DLG-Verlag.
- RETTIG H. (1972):** Untersuchung des physikalischen Gasaustausches an Konservierungsbehältern. Dissertation, AdL der DDR
- SCHEMEL H., FÜLL CH., GLÄSER M., TEWS M., RICHTER H. (2006):** Density measurement on silage. Proceedings of the 12th International Symposium “Forage Conservation, Brno, Czech Republic, April 3-5: 184-185
- SCHMERBAUCH K.-J. (2000):** Gärqualität und Schimmelpilzwachstum in Silagen in Anhängigkeit von Lagerungsdichte und äußerem Luftabschluss. Dissertation, HUB

- SCHRÖDER A., SÜDEKUM, K.-H., FÜRL C., IDLER, C. (1998):** Qualität und Futterwert für Wiederkäuer von luftdicht gelagertem Feuchtgetreide. VDLUFA-Kongress, Gießen
- SPIEKERS H. (2004):** Aktion Nacherwärmung deckt Schwachpunkte auf. top agrar 33(2): R10-R13, unter „<http://docho.st.rz.hu-berlin.de/listen/dissertationen/agrar-gesamt.html>“.
- WEISE G., RETTIG H., SUCKOW G.(1975):** Untersuchungen zur Quantifizierung des Lufteinflusses bei der Silierung. Arch. Tierernährung 25(1): 69-82
- WIERINGA G.W., HAAH S. D. (1961):** Ensilage. Wageningen, The Netherlands: Instituut voor Bewaring en Verwerking van Landbouwprodukten
- STEINHÖFEL O. (2004):** Entwicklung und Situation von Risikofaktoren der aeroben Stabilität in der sächsischen Silageerzeugung. Sächsischer Futtertag 14.April 2004, Nossen (http://www.smul.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/IfI/inhalt/download/Vortrag_Steinchoefel.pdf)
- RUPPEL K.A., PITT R.E., CHASE L.E., GALTON D.M. (1995):** Bunker Silo management and its relationship to forage preservation on dairy farms. *Dairy Sci* 78: 141-153
- DÄNICKE S., VALENTA H. (1999):** Mykotoxine im Futter Gefahr für landwirtschaftliche Nutztiere? ForschungsReport 2, Senats der Bundesforschungsanstalten: 10-13

Neuere Forschungen des ATB zur landwirtschaftlichen Trocknungstechnik

Recent research on agricultural drying technology at ATB

Jochen Mellmann

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100
E-Mail: jmellmann@atb-potsdam.de

1 Einführung

Landwirte sind zur Sicherung ihrer Existenz darauf angewiesen, ihre Agrarprodukte mit hohen Erträgen zu möglichst niedrigen Kosten, mit geringen Verlusten und in hoher Qualität zu erzeugen (FÜRL 2009). Die Produktqualität umfasst neben äußeren Merkmalen wie Aussehen und Frische insbesondere die Gehalte an wertgebenden Inhaltsstoffen, sie beinhaltet aber auch Konzentrationen gesundheitlich bedenklicher Stoffe, deren Grenzwerte einzuhalten sind. Landwirtschaftliche Produkte müssen zum Zweck ihrer ganzjährigen Verwertung (z. B. als Futtermittel) oder Weiterverarbeitung zu Lebensmitteln mit Hilfe der Konservierung in einen lagerfähigen Zustand versetzt werden. In vielen Wertschöpfungsketten bildet die Trocknung das wichtigste Konservierungsverfahren.

Unter dem Prozess Trocknung versteht man das Entfernen von Wasser oder anderen flüchtigen Stoffen (z. B. Lösungsmitteln) aus feuchten Feststoffen, Pasten, Emulsionen oder Lösungen durch Verdunsten oder Verdampfen (GNIELINSKI *et al.* 1993). In der landwirtschaftlichen Trocknung wird überwiegend Wasser aus Produkten natürlichen Ursprungs durch Verdunsten ausgetrieben. Für den Phasenwechsel des Wassers in den dampfförmigen Zustand ist Energie erforderlich, die meist in Form von Wärme zugeführt wird. Wegen des großen Energieaufwandes für das Verdunsten ist die Trocknung ein teures Verfahren. In der Agrarproduktion kann der Anteil der Trocknungsenergiekosten bis zu 50 % der gesamten Verfahrenskosten betragen. Angesichts zu erwartender Preissteigerungen bei fossilen Energieträgern rückt die Energieeffizienz der Verfahren mehr und mehr in den Vordergrund. Ein großes Potenzial zur Energieeinsparung liegt in der Vermeidung von Befeuchtungs- und damit Trocknungsvorgängen sowie in der Trockneroptimierung. Die Qualität des getrockneten Produktes bestimmt die Trocknungsbedingungen und die Behandlung des Gutes im Trockner. Häufig sind der maximalen Guttemperatur während der Trocknung Grenzen gesetzt, um eine gewünschte Produktqualität zu erhalten.

Die Forschungen zur landwirtschaftlichen Trocknungstechnik in der Abteilung Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung besitzen bereits eine lange Tradition

und sind unter anderen dokumentiert in zahlreichen Publikationen sowie Fachbüchern von MALTRY u. a. (MALTRY *et al.* 1975, MALTRY 1975). Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele aus der aktuellen Forschung im Arbeitsgebiet Trocknung vorgestellt.

2 Verfahrenstechnische Optimierung des Dächerschachttrockners

Zur Konservierung großer Massenströme von Getreide werden vorrangig Verfahren der Warmlufttrocknung angewendet. Das wichtigste konvektive Trocknungsverfahren bildet der kontinuierlich arbeitende Dächerschachttrockner. Mit Dächerschachttrocknern sind Trocknungsleistungen von 1 bis 50 t/h und mehr erreichbar. Trotz weltweiter Verbreitung besteht Bedarf an verfahrenstechnischer und wirtschaftlicher Optimierung dieses Trocknungsverfahrens. In der Praxis werden nach wie vor teils erhebliche Schwankungen der Gutfeuchte am Ende des Trocknungsprozesses festgestellt, die auf eine ungleichmäßige Trocknung zurückzuführen sind. Die Ursachen liegen in

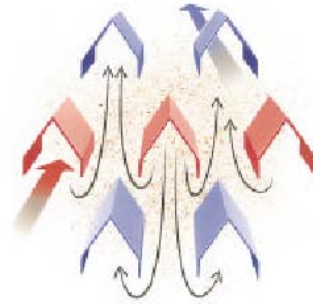
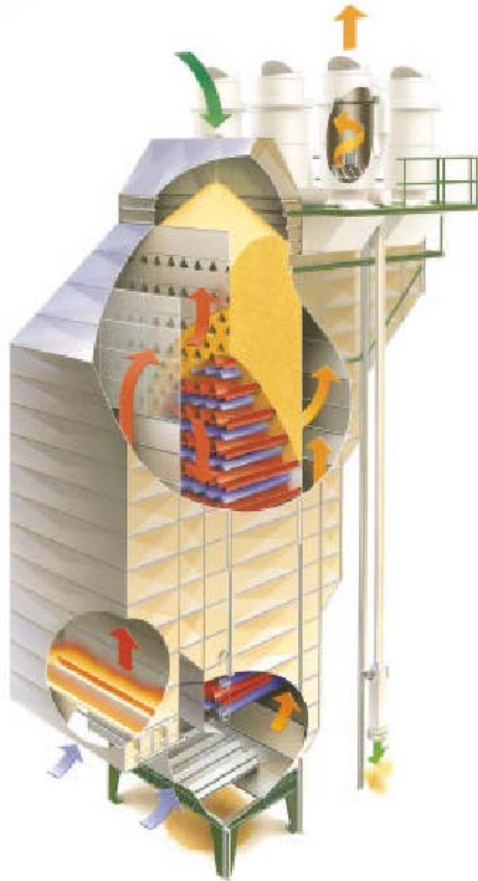
- inhomogenen Gutmassenstromverteilungen über dem Trocknerquerschnitt,
- unterschiedlichen Verweilzeiten einzelner Getreidepartien,
- ungleichmäßiger Gut-/Luftkontaktierung und unterschiedlichen Bedingungen für den Wärme- und Stoffübergang,
- mangelhafter oder veralteter Mess- und Regelungstechnik.

Die aktuellen Forschungsarbeiten sind auf die apparative und verfahrenstechnische Weiterentwicklung des Dächerschachttrockners fokussiert. Hierdurch werden die höchsten Effekte hinsichtlich Vergleichmäßigung der Trocknung und Steigerung der Energieeffizienz erwartet. Die Senkung der Gutfeuchteschwankungen am Ende der Trocknung führt gleichzeitig zu einer Erhöhung der Produktqualität. Die Entwicklung neuartiger Regelungssysteme auf der Basis innovativer Sensortechnik beinhaltet weitere Einsparpotenziale; deren Umsetzung erscheint jedoch erst nach weitgehender Optimierung des Trocknungsverfahrens als sinnvoll.

Mathematische Modellierung des Trocknungsprozesses

Grundlage der Arbeiten bildet die mathematische Modellierung des Trocknungsprozesses. Diese setzt das Verständnis der im Trockner ablaufenden Teilvorgänge voraus. Der Dächerschachttrockner besteht aus einem vertikalen Trocknerschacht, der mit dächerförmigen Kanälen für die Luftzufuhr und –abfuhr durchzogen ist, siehe **Bild 1**. Charakteristisch ist der niedrige Strömungswiderstand, der durch geringe luftdurchströmte Schichtdicken von 0,1 m bis 0,15 m erreicht wird (MÜHLBAUER 1989). Gutstrom und Trocknungsluftstrom werden in einer Mischung aus Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom durch den Trockner geführt. Dächerschachttrockner werden überwiegend quasikontinuierlich betrieben. Das Getreide wird dabei diskontinuierlich (satzweise) ausgetragen. Das Gut befindet sich nahezu über die gesamte Trocknungszeit im Ruhezustand. Die

Standzeit zwischen zwei Austrägen (Abspeisungen) variiert je nach Hersteller zwischen 0,5 und 3 Minuten. Die Austragszeit – die Zeitspanne, während der die Austrageinrichtung geöffnet ist – liegt in der Größenordnung von wenigen Sekunden.



Prinzip der Luftführung:

rot: Zuluftkanäle
blau: Abluftkanäle

Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines Dächerschachttrockners, Fa. Cimbria (www.cimbria.com)

Diese kurze Beschreibung des Trockners zeigt, wie komplex die Vorgänge der gekoppelten Wärme- und Stoffübertragung im Dächerschachttrockner sind. Zur Berechnung des Trocknungsprozesses ist daher ein gekoppeltes mathematisches Modell bestehend aus den Teilmodellen Schüttgutbewegung, Luftdurchströmung sowie Wärme- und Stoffübergang erforderlich.

Als Basis für eine modellbasierte Trocknersteuerung wurde von Mellmann et al. (MELLMANN *et al.* 2005, MELLMANN *et al.* 2007) ein vereinfachtes (eindimensionales) mathematisches Modell für den Dächerschachttrockner hergeleitet. Der Trocknungsprozess wurde während der Standzeit als Ruheschichttrocknung modelliert, die Austragszeit wurde vernachlässigt. Die Getreideschüttung wird darin als Hintereinanderschaltung einzelner Kornschichten betrachtet. Unter dieser Annahme wird jede Kornschicht mit Luft vom Austrittszustand der jeweils vorhergehenden Schicht durchströmt. Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Körner einer Schicht sich bei der Trocknung nicht gegenseitig

beeinflussen und alle das gleiche Trocknungsverhalten zeigen, wurde der Ansatz der Durchströmungstrocknung gewählt bestehend aus den Teilmodellen:

1. Dünnschichttrocknung: Beschreibung des Trocknungsverhaltens einer einzelnen Schicht durch das eines einzelnen Kornes;
2. Schüttgut-trocknung: Übergang auf die Trocknung der gesamten Schüttung durch Hintereinanderschaltung der Trocknungsvorgänge in den einzelnen Schichten.

Für die Dünnschicht- bzw. Einzelkorn-trocknung wurde das Diffusionsmodell gewählt. Zur Feuchteleitung im Einzelkorn wurde ein Kugelschalenmodell hergeleitet. Die Schüttgutbewegung im Trockner infolge der satzweisen Abspeisung des trockenen Getreides wurde vereinfacht als plug-flow modelliert. Das gekoppelte Differenzialgleichungssystem für die Schüttgut-trocknung wurde mit Hilfe eines Differenzenverfahrens numerisch gelöst. (MELLMANN *et al.* 2005)

Simulation der Schüttgutbewegung mit der Discrete Element Method (DEM)

Schüttgutprozesse wie die Lagerung in Silos oder die Gurtbandförderung, bei denen nur geringe Verformungen bei kleinen Scherraten auftreten, wurden bisher häufig und erfolgreich mit kontinuumsmechanischen Ansätzen modelliert (GRÖGER & KATTERFELD 2006]. Dieser Simulationsmethode sind jedoch Grenzen gesetzt, da wichtige Einflussgrößen wie Partikelform, Partikeleigenschaften, Packungsstruktur und somit der diskrete Charakter des Mediums Schüttgut nur unzureichend berücksichtigt werden (KATTERFELD & GRÖGER 2007). Dies ist bei wechselnden Zuständen – auch als granulare Aggregatzustände bezeichnet – der Fall wie etwa beim periodischen Wechsel zwischen ruhender und bewegter Schüttung. Typische Beispiele sind der Feststofftransport in rotierenden Zylindern (MELLMANN 2001) oder die satzweise Schüttgutbewegung in Dächerschachttrocknern.

Als aussichtsreiche numerische Berechnungsmethode wird die Discrete Element Method (DEM) angesehen, deren Grundlagen 1979 von CUNDALL und STRACK entwickelt wurden (CUNDALL & STRUCK 1979). Mit dieser Simulationsmethode – ursprünglich in der Molekulardynamik angewendet – kann die Bewegung einer großen Zahl von Teilchen berechnet werden (PÖSCHEL & SCHWAGER 2005). Seit deren Einführung hat sich dank stetig steigender Rechenleistungen moderner Computer ihr Einsatzgebiet auf Anwendungen der Geotechnik, der Partikelverfahrenstechnik und des Maschinenbaus erweitert. Zur mathematischen Modellierung und Simulation im Rahmen der Partikelverfahrenstechnik wird am ATB seit 2008 die kommerzielle DEM-Software Particle Flow Code (PFC-2D und PFC-3D) der Fa. Itasca eingesetzt.

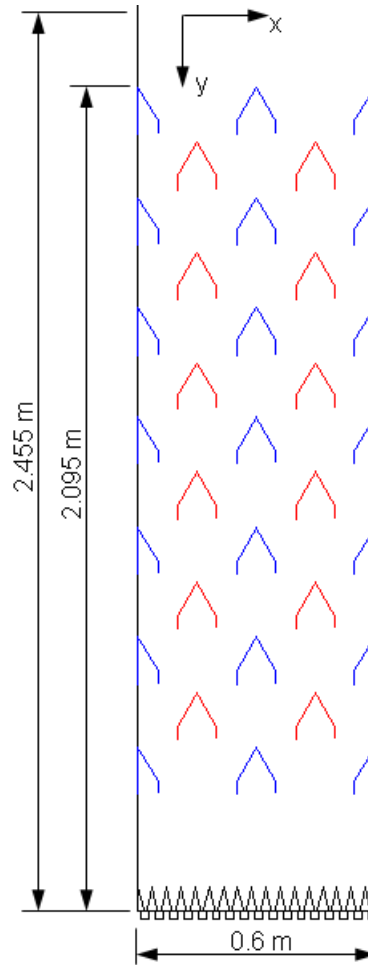
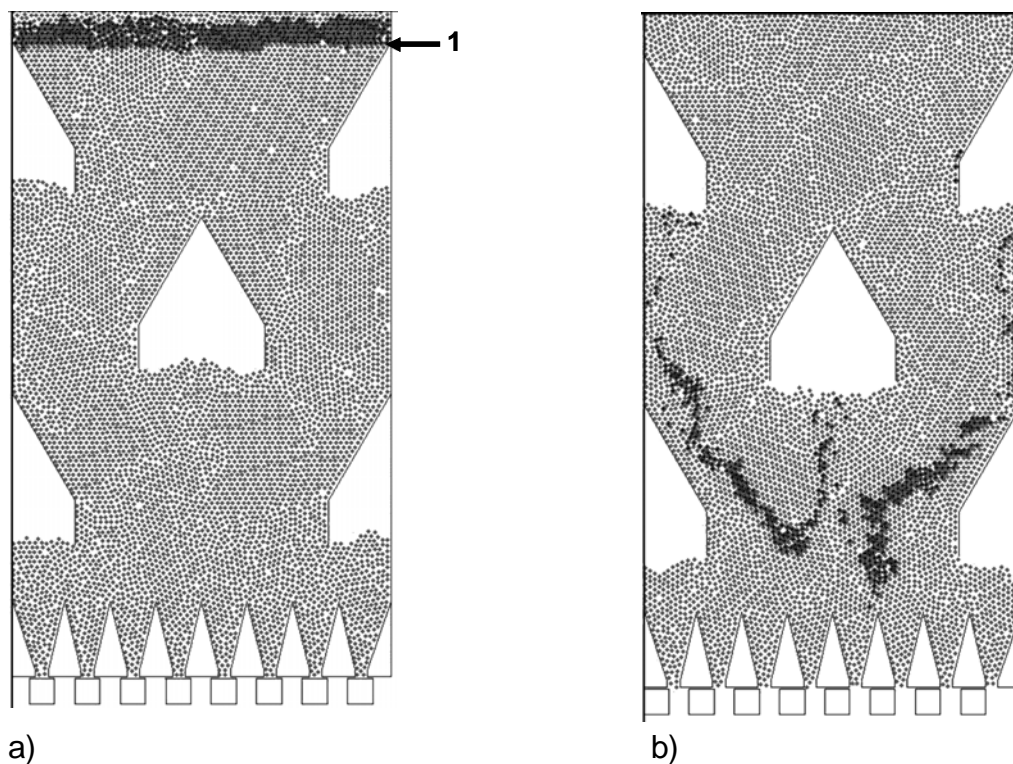


Bild 2: Foto (a) und Schema (b) der Dächerschachttrockner-Versuchsanlage

Die Simulationen zur Partikelbewegung und Verweilzeitverteilung im Dächerschachttrockner wurden mit einem zweidimensionalen DEM-Modell durchgeführt (IROBA *et al.* 2009). Dieser Ansatz wird dadurch gerechtfertigt, dass der vertikale Trocknerquerschnitt über der Trocknertiefe konstant ist. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes wurde nur ein Teil des Technikumstrockners (**Bild 2**) simuliert. Dies ist möglich, da die grundlegenden Phänomene der Partikelbewegung hierdurch nicht beeinflusst werden. Die Form des einzelnen Getreidekorns wurde durch eine volumengleiche Kugel angenähert. Zur Berechnung der interpartikulären Kräfte und Momente wurde ein einfaches, lineares Kontaktmodell verwendet. Die Ergebnisse der 2D-Simulation der Partikelbewegung und –verweilzeitverteilung zeigen **Bilder 3 und 5**. Die Entmischung der Farbpartikelschicht im Verweilzeitexperiment wird im **Bild 4** veranschaulicht.



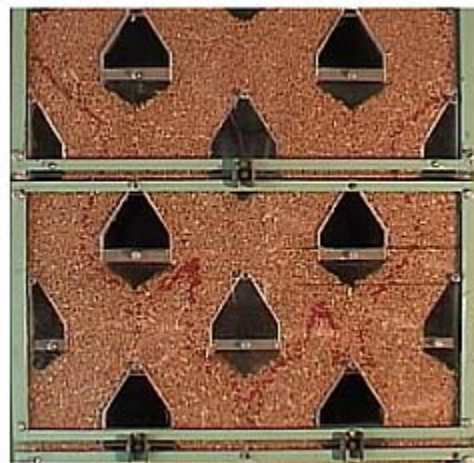
a)

b)

Bild 3: (a) Farbpartikelschicht zu Beginn der Simulation: 1 – Startposition der Tracer-Partikeln; (b) Entmischung der Schicht im Verlaufe der Simulation



a)



b)

Bild 4: (a) Farbpartikelschicht zu Beginn des Verweilzeitexperiments; (b) Entmischung der Tracer-Partikeln beim Durchlauf durch den Trockner

Zur Validierung des DEM-Modells wurden Verweilzeitexperimente am halbertechnischen Dächerschachttrockner des ATB durchgeführt. Als Versuchsgut diente feuchter, erntefrischer Weizen mit einer Gutfeuchte von ca. 18 % w. b. Der Trockneraufbau ist aus **Bild 2** ersichtlich. Der linke Trocknerschacht mit transparenter Plexiglas-Frontscheibe wurde zur Visualisierung und Untersuchung der Partikelbewegung verwendet. Der rechte, baugleiche Schacht ist als Versuchstrockner ausgeführt. Die Versuche zur Schütt-

gutbewegung umfassten Messungen der Partikelverweilzeit, der vertikalen Partikelgeschwindigkeit und der Partikelbahnen. Für die Verweilzeitmessungen wurden Getreidekörner eingefärbt und als Tracer verwendet. Die Farbpartikeln wurden als Dirac-Impuls am oberen Ende des Trockners in Form einer horizontalen Partikelschicht aufgegeben, siehe **Bild 4**. Zusätzlich sind mit Hilfe einer digitalen Videokamera die Verteilungen der Partikelgeschwindigkeit in verschiedenen Zonen des Trockners durch die transparente Plexiglaswand hindurch aufgenommen und analysiert worden.

Im **Bild 5** sind die gemessenen und berechneten Verweilzeitverteilungen für eine Versuchseinstellung (Gutart Weizen, Gutfeuchte 18 % w.b., Massenstrom 9,3 kg/s) dargestellt, die der besseren Vergleichbarkeit wegen dimensionlos gemacht wurden (IROBA *et al.* 2009). Die dimensionslose Partikelverweilzeit

$$\tau = \frac{t}{T_m} \quad (1)$$

ist das Verhältnis der Prozesszeit t zur mittleren Verweilzeit T_m . Die mittlere Verweilzeit lässt sich aus der Verweilzeitverteilung ermitteln zu

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n N_{TP,i} \cdot t_i \cdot \Delta t}{\sum_{i=1}^n N_{TP,i} \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Die Verweilzeitverteilungen im **Bild 5** sind aufgetragen über der dimensionslosen Durchflussrate der Tracerpartikeln

$$\dot{N}_{Tr} = \frac{P_n}{\Delta \tau} = \frac{N_{TP,i} \cdot T_m}{N_{TP,t} \cdot \Delta t} \quad (3)$$

mit

$$P_n = \frac{N_{TP,i}}{N_{TP,t}} \quad (4)$$

Der Term P_n kennzeichnet die Wahrscheinlichkeit, mit der Tracerteilchen in einem bestimmten Zeitintervall Δt den Trockner verlassen. Sie ist das Verhältnis der Anzahl der in

diesem Zeitintervall ausgetragenen Tracerpartikeln $N_{TP,i}$ zur Gesamtanzahl der aufgegebenen Tracerpartikeln $N_{TP,t}$.

Sind der Getreidemassenstrom \dot{M}_G und das Fassungsvermögen (hold-up) des Trockners M_G unter stationären Betriebsbedingungen bekannt, ist die mittlere Verweilzeit auch berechenbar zu

$$T_m = \frac{M_G}{\dot{M}_G} \quad (5)$$

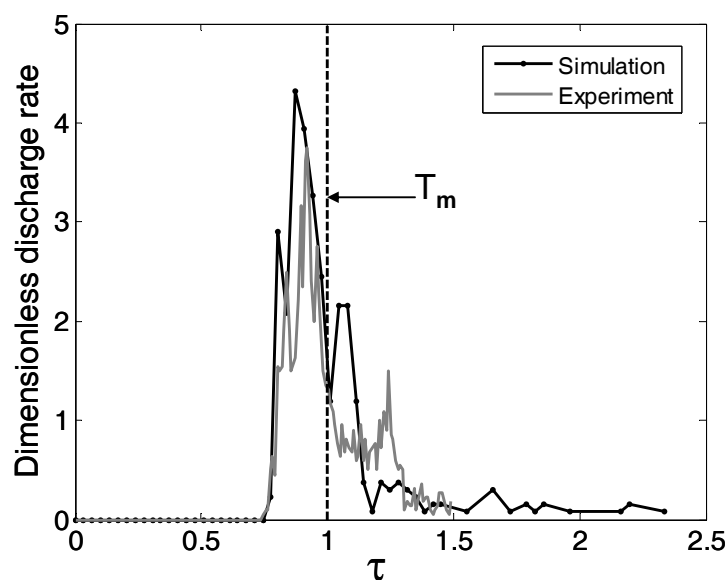


Bild 5: Dimensionslose Verweilzeitverteilung im Dächerschachttrockner: Vergleich zwischen Simulation und Experiment

Wie der Vergleich im **Bild 5** verdeutlicht, werden mit dem verwendeten zweidimensionalen DEM-Modell bereits gute Ergebnisse erzielt. Die Berechnungen erfolgten auf Basis der physikalischen Stoffeigenschaften von Weizen, die der Literatur entnommen bzw. durch eigene Messungen ermittelt wurden. Für weiterführende Untersuchungen der Schüttgutbewegung und zur vorgesehenen Kopplung des Partikelmodells mit der Gasströmung und dem Wärme- und Stofftransport werden zukünftig 3D-Modelle erarbeitet.

Mikrowellensensor zur Online-Getreidefeuchtemessung und Trocknerregelung

Die Gutfeuchteschwankungen des feuchten, erntefrischen Getreides vor der Trocknung bereiten Herstellern und Betreibern kontinuierlicher Getreidetrockner nach wie vor erhebliche regelungstechnische Probleme. Bisherige Steuerungssysteme sind oft nicht in der Lage, diese Feuchteschwankungen während der Trocknung auszugleichen und das Gut auf einheitliche Zielfeuchte zu trocknen. Unter- bzw. Übertrocknung sind häufig die Folgen

verbunden mit Qualitätseinbußen und wirtschaftlichen Verlusten. Für die Prozesssteuerung werden zunehmend Sensoren zur direkten Online-Messung der Gutfeuchte verwendet. Bisher am Markt verfügbare Sensoren sind für eine dichteunabhängige Messung der Gutfeuchte nicht geeignet oder nicht flexibel an mehreren Messstellen einsetzbar.

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes des Leibniz-Institutes für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit der Fa. TEWS Elektronik, Hamburg, wurde ein neuartiger Mikrowellensensor zur Online-Gutfeuchtemessung in Getreide entwickelt. Ziel war der Einsatz dieser Feuchtesensoren an verschiedenen Messpositionen in Getreidetrocknern, wie z. B. am Guteintrag und -austrag. Die Feuchtesignale sollen zur Steuerung von Dächer-schachtrocknern geeignet sein. Als Messmethode wurde das Mikrowellen-Resonator-Verfahren gewählt, mit dem Feuchte und Dichte (Schüttdichte) des Gutes unabhängig voneinander gemessen werden können (HERRMANN & SIKORA 1997, HAUSCHILD 2005). Der Gutwassergehalt wird dabei über die Verstimmung und Dämpfung der Resonanzfrequenz des Resonators ermittelt. **Bild 6a** zeigt eine Resonanzkurve, die durch zwei Parameter charakterisiert wird: die Resonanzfrequenz und die Halbwertsbreite der Resonanzkurve. Wird der Resonator mit Messgut gefüllt, verändern sich die beiden Kenngrößen, siehe **Bild 6b**.

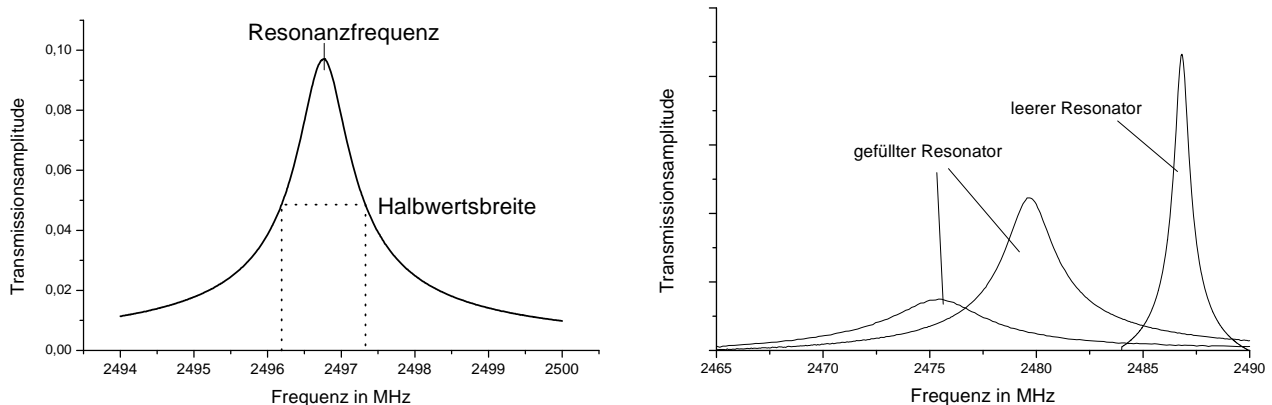


Bild 6: Resonanzkurven eines Mikrowellenresonators: (a) Parameter der Resonanzkurve. (b) Resonanzkurven des leeren und des gefüllten Resonators

Zur Auswertung des Messsignals wird der dichteunabhängige Mikrowellen-Feuchtwert Φ verwendet, der berechnet wird zu

$$\Phi = \arctan \frac{B}{A} \quad (6)$$

In Gleichung (6) bedeuten A die Resonanzfrequenz-Verschiebung in Hz und B die Vergrößerung der Halbwertsbreite in Hz.

Nach der Entwicklung geeigneter Sensor-Prototypen erfolgte zunächst eine Kalibration der Feuchtemessungen am Beispiel von Weizen (KOC SIS *et al.* 2008). Ausgangspunkt bil-

dete der Standard- Resonator P68-2, der in **Bild 7** in der Ausführung als Planarsensor zu sehen ist.



Bild 7: Standard-Resonator P68-2 (TEWS Elektronik).

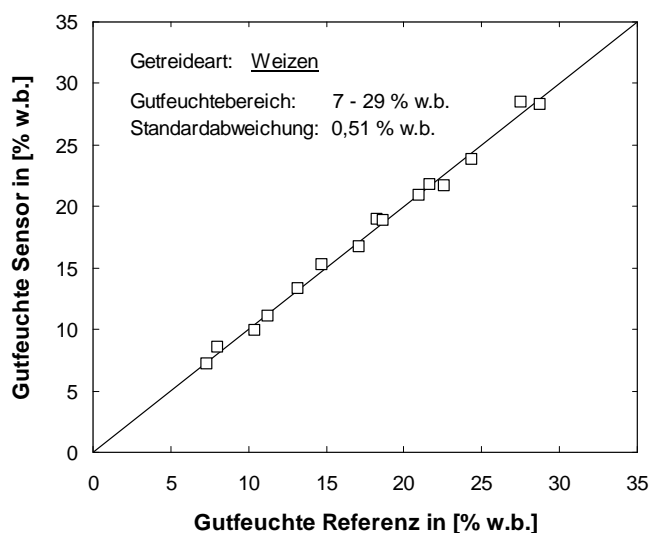


Bild 8: Kalibration des Mikrowellensensor-Prototyps P68-2, 2, 81 GHz: Mit dem Sensor gemessene Gutfeuchte als Funktion der im Trockenschrank nach DIN 10350 ermittelten Referenz-Gutfeuchte

Die Kalibrationsmessungen wurden in einem Feuchtebereich von 7 % w. b. bis 29 % w. b. durchgeführt. Die Referenzfeuchten wurden durch Ofentrocknung nach DIN 10350 bzw. ISO 712 bestimmt. **Bild 8** zeigt die Ergebnisse von insgesamt drei Labormessreihen mit dem Mikrowellensensor P68-2, der bei einer Messfrequenz von 2,81 GHz arbeitet. Dargestellt ist die mit dem Mikrowellensensor gemessene Gutfeuchte in Abhängigkeit von der Referenzgutfeuchte. Die Messpunkte wurden jeweils durch Mittelwertbildung aus den Einzelmessungen bestimmt. Wie die Grafik verdeutlicht, wird mit diesem Sensor bereits eine hohe Messgenauigkeit erzielt; die Standardabweichung beträgt 0,51 % w.b.

Die kalibrierten Sensoren wurden einem Praxistest im Technikumsmaßstab unterzogen (SCHLEMM *et al.* 2008). Hierzu wurden Langzeit-Trocknungsversuche am Dächerschacht-trockner des ATB mit dem Versuchsgut Weizen bei wechselnden Eintrittsfeuchten mess-

technisch begleitet. Diese Versuche dienten gleichzeitig der Ermittlung des dynamischen Antwortverhaltens auf Sprungfunktionen am Eingang des Trockners (MELLMANN *et al.* 2008). Die Mikrowellenresonatoren wurden am Trocknereintrag und -austrag installiert. Bei dem Versuch wurde eine starke Inhomogenität der Getreidefeuchte über dem Trocknerquerschnitt am Austrag festgestellt. Da das durch den Mikrowellenresonator erfasste Messgut – bedingt durch die Probenahme – nicht dasselbe war, wie das, welches für die Referenzmessung verwendet wurde, ergab sich eine größere Abweichung zwischen Mikrowellenmessungen und Referenzmessungen am Trockneraustrag als am Trocknereintrag. Die Standardabweichungen betragen am Trocknereintrag 0,22 % w. b. und am Trockneraustrag 0,55 % w. b. Es konnte jedoch gezeigt werden, daß die Mikrowellenmessung für den Praxiseinsatz an einem Getreidetrockner sehr gut geeignet ist. Eine Feuchtemessung ist am Trocknereintrag und -austrag mit hoher Meßgenauigkeit möglich.

3 Neues Verfahren zur Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen mit Wärmepumpen

In Deutschland werden auf einer Gesamtanbaufläche von jährlich ca. 10 000 ha über 100 verschiedene Arten von Arznei- und Gewürzpflanzen angebaut; 22 Arten davon sind wirtschaftlich bedeutend. Der gegenwärtige Anteil einheimischer Drogen am Gesamtbedarf Deutschlands dürfte bei 10% liegen, nach Expertenschätzungen ließe sich dieser Anteil jedoch ohne Weiteres verdoppeln (HOPPE 2003). Die spezialisierten Agrarbetriebe geben ihre hochwertigen Produkte überwiegend als getrocknete Ware an Verarbeiter ab. Aufgrund der Artenvielfalt gibt es keine einheitliche Trocknungstechnologie für Arznei- und Gewürzpflanzen. Blüten, Früchte und Wurzeln werden häufig in Horden- oder Bandtrocknern getrocknet. Krautige Pflanzen werden als Ganzpflanzen in Satz- bzw. Flächentrocknern oder nach einem Schneid- und Windsichtprozess als Blätter auf Bandtrocknern weiterverarbeitet. In mittelständischen Betrieben ist meist nur eine Trocknerbauart vorhanden. Mit diesem Verfahren werden dann die unterschiedlichen Güter nach Erfahrungswerten getrocknet.

Die klassische Flächentrocknung

Ein solches Mehrzweck-Trocknungsverfahren stellt die Flächentrocknung dar, die in den 60er Jahren aus der Heubelüftungstrocknung hervorging (BUSCHBECK 1975). Diese Art der Satzrocknung spielt aufgrund der hohen Qualitätsansprüche der Abnehmer unzerkleinerter Pflanzenbestandteile eine bedeutende Rolle. Die Hauptvorteile der Flächentrocknung gegenüber anderen Trocknungsverfahren sind die schonende Trocknung aufgrund der ruhenden Gutschicht und die vergleichsweise niedrigen Trocknungstemperaturen. Weitere Vorteile sind ein geringer Arbeitskräftebedarf durch Satzbetrieb, relativ geringe Investitionskosten und die Möglichkeit, verschiedene Gutarten in einer Anlage trocknen zu können. Die Nachteile sind der im Vergleich zu anderen Trocknungsverfahren relativ hohe Energieverbrauch sowie die langen Trocknungszeiten.

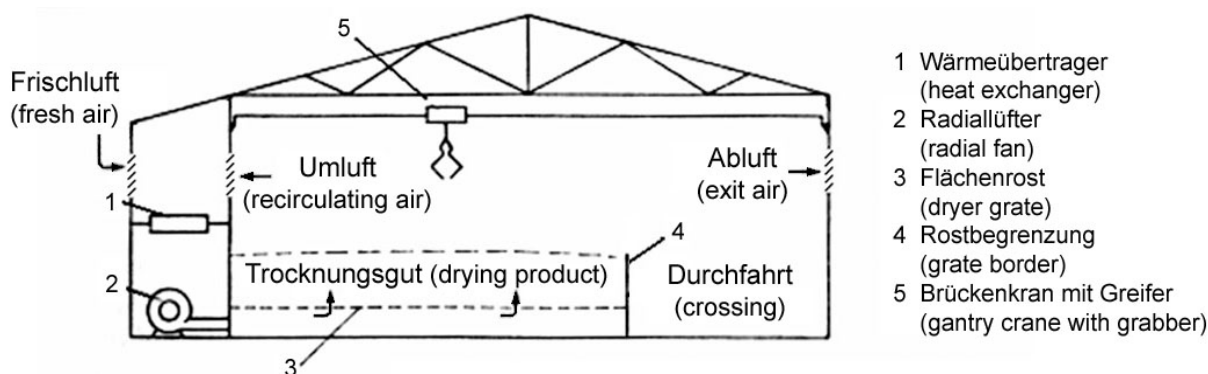


Bild 9: Schema eines Flächentrockners (BUSCHBECK 1975)

In **Bild 9** ist der Aufbau eines Flächentrockners dargestellt. Das geerntete Frischgut wird in Anhängern zur Trocknungsanlage transportiert und vor den Rosten abgekippt. Bei Krautdrogen wird eine Ganzpflanzentrocknung durchgeführt, bei Blüten- und Wurzeldrogen ist eine Aufbereitung vorgeschaltet. Das Gut wird mit Hilfe eines Deckenkranes gleichmäßig auf dem Rost verteilt. Dabei müssen lokale Gutverfestigungen vermieden werden, um die Bildung von Feuchtenestern während der Trocknung zu vermeiden. Die Trocknungsdauer liegt je nach Gutart und Anfangsfeuchtegehalt zwischen drei und vier Tagen. Mit Flächentrocknern können hohe Durchsätze bei guter Qualität erzielt werden. Daher wird dieses Verfahren bereits seit Jahrzehnten in den meisten Anbaubetrieben der östlichen Bundesländer angewendet.

Motivation und Zielsetzung

Der derzeitige Stand der Technik bei Flächentrocknern ist jedoch allgemein durch einen zu hohen Energieaufwand für die Trocknung gekennzeichnet. Nach neuesten Untersuchungen liegt der spezifische Heizenergieverbrauch ostdeutscher Flächentrocknungsanlagen zwischen 8,5 und 12,5 MJ pro kg entzogenem Wasser (MELLMANN & FÜRL 2008). Umgerechnet auf Heizöl und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Feuchtegehalte liegt der spezifische Brennstoffenergieverbrauch bei ca. 0,9 bis 1,0 Liter Heizöl pro kg Trockenware. Die Ursachen liegen in inhomogenen Strömungsverteilungen der Luft, ungleichmäßigen Gutverteilungen auf den Trocknungsrosten, mangelhafter Umluffführung bzw. ineffizienter Nutzung des Trocknungspotenzials der Abluft sowie in hohen Wärmeverlusten durch nicht isolierte Luftleitungen und Anlagenteile. Hinzu kommen häufig unzureichende Messtechnik und weitgehend manuelle Trocknersteuerungen. Ungleichmäßige Trocknung, hoher spezifischer Energiebedarf und schließlich hohe Trocknungskosten sind die Folgen.

Bei weiter steigenden Energiekosten wird die Wirtschaftlichkeit der Produktion von Arznei- und Gewürzpflanzen deshalb entscheidend von der Energieeffizienz beeinflusst. Die umfassende Nutzung aller möglichen Energieeinsparpotentiale ist zwingend erforderlich, um die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Agrarbetriebe zu sichern. Hierbei kommt der Trocknung besondere Bedeutung zu, da sie den mit Abstand energie- und kostenintensivsten

Verfahrensschritt in der Prozesskette darstellt (MÜLLER & HEINDL 2006). Der Anteil der Energiekosten an den Verfahrenskosten variiert zwischen 30 % und 55 %, wovon allein etwa 85 % auf den Brennstoffverbrauch entfallen (MELLMANN & FÜRL 2008).

Flächentrocknung mit Wärmepumpen

Ein vielversprechendes Anlagenkonzept für die chargenweise Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen ist die Kombination von Wärmepumpen mit konventioneller Lufterwärmung mittels Gas- oder Ölheizung. Bei Trocknungstemperaturen um 40 °C können Wärmepumpen mit einem hohen Wirkungsgrad betrieben werden. Die Trocknung mit Wärmepumpen weist grundsätzlich folgende Hauptvorteile auf (CHUA *et al.* 2002, MUJUMDAR 2006):

- Hohe Energieeffizienz,
- präzise Regelbarkeit der Zustände der Trocknungsluft,
- weiter Bereich möglicher Betriebsbedingungen,
- größere Trocknungsgeschwindigkeiten bei niedrigeren Temperaturen,
- bessere Produktqualität insbesondere bei temperaturempfindlichen Produkten,
- erhöhter Durchsatz bei verringerten Betriebskosten.

Nachteilig wirken sich die höheren Investitionskosten für Wärmepumpen, ein erhöhter Wartungsaufwand und komplexere Betriebsbedingungen im Vergleich zu einfachen Konvektionstrocknern aus.

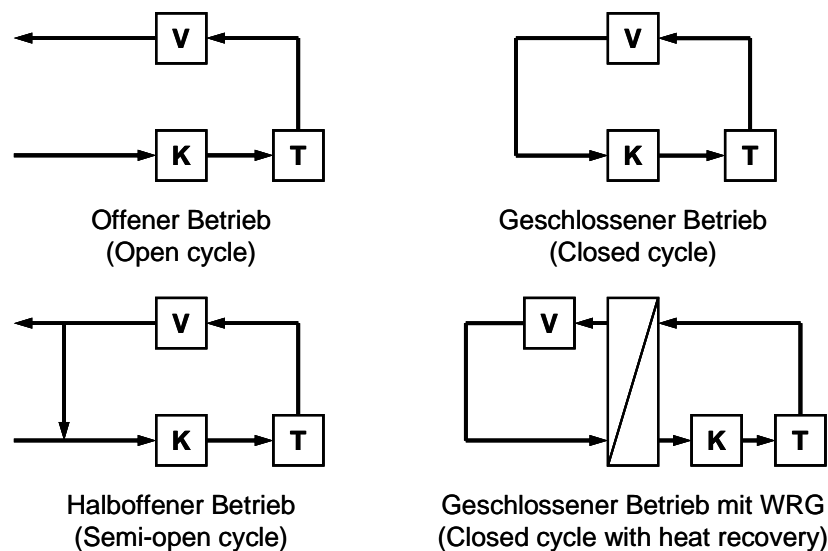


Bild 10: Schaltungsvarianten für die Wärmepumpentrocknung: Pfeile kennzeichnen den Luftweg, K = Kondensator, T = Trockner, V = Verdampfer, WRG = Wärmerückgewinnung.

Der Wärmepumpen- und der Trocknungsprozess sind energetisch eng miteinander verknüpft. Die Trocknungsluft kann vollständig oder teilweise im Kreislauf gefahren werden. Bezüglich der Luftführung gibt es eine Vielzahl möglicher Schaltungsvarianten, von denen eine Auswahl im **Bild 10** dargestellt ist. Bei allen Schaltungsvarianten wird die Trockne-

rabluft als Wärmequelle für den Verdampfer der Wärmepumpe genutzt. Im halboffenen Betrieb, bei dem nur ein Teil der Trocknerabluft im Kreislauf gefahren wird, ist die Wärmepumpentrocknung abhängig von den jeweiligen Außenluftbedingungen. Dies erschwert die Steuerung der Trocknungsanlage.

Trocknungsanlage der Agrarprodukte Ludwigshof e.G.

Eine neue Trocknungsanlage für Kamille mit einer kombinierten Beheizung der Trocknungsluft über Wärmepumpen und konventionelle Gasheizgeräte wurde 2007 bei der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. in Thüringen in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich weltweit um eine der größten Trocknungsanlagen mit Wärmepumpen. Die verfahrenstechnische Lösung für die speziellen logistischen Anforderungen der neuen Trocknungshalle wurde vom ATB und der Agrarprodukte Ludwigshof e.G. gemeinsam entwickelt (ZIEGLER & MELLMANN 2008). Grundidee dieses Verfahrenskonzeptes ist die Nutzung einer Wärmepumpe im täglichen Rhythmus für mehrere Trocknungsroste (**Bild 11**), wodurch die Investitionskosten entscheidend reduziert werden konnten.

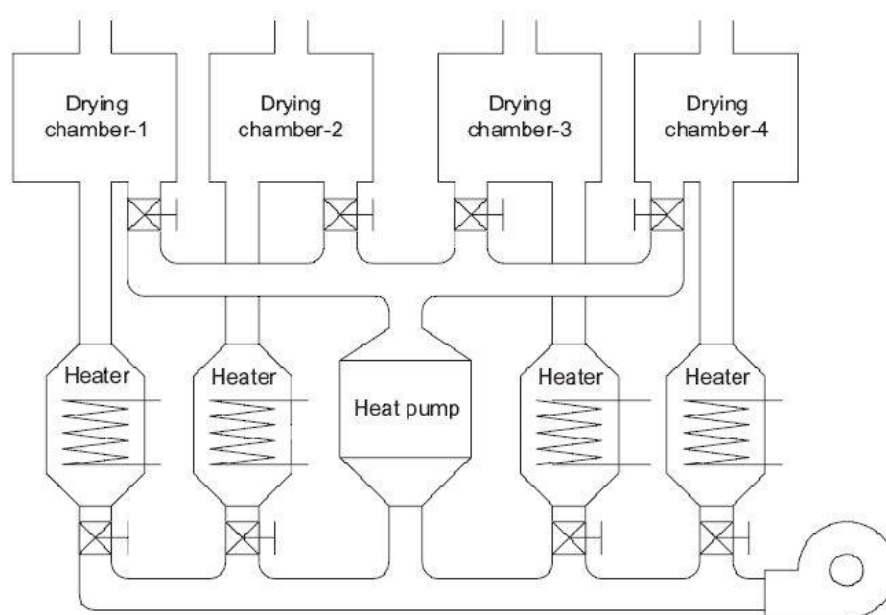


Bild 11: Anordnung zur Nutzung einer Wärmepumpe für mehrere Trockner (MUJUMDAR 2006)

Die neue Trocknungsanlage umfasst sechs Trocknungskammern mit je 50 m² Rostfläche sowie zwei Wärmepumpen für jeweils drei Trockner und insgesamt sechs Gasheizungen. Außerdem verfügt jeder Trockner über eigene Ventilatoren, und die Luftkanäle sind so angeordnet, dass die Trocknungsluft während des Wärmepumpenbetriebes im geschlossenen Kreislauf gefahren wird. Im Gasheizungsbetrieb wird Frischluft erwärmt, der ein bestimmter Umluftanteil beigemischt werden kann. Durch Einhausung jedes Trocknungsrostes in einer Trocknungskammer wurden das luftdurchströmte Volumen minimiert und damit die Wärmeverluste entscheidend gesenkt. Bereits im ersten Betriebsjahr 2007 wurden die Energiekosten um ca. 30 % reduziert (ZIEGLER & MELLMANN 2008). Durch strö-

mungstechnische und regelungstechnische Maßnahmen konnten in 2008 weitere Verbesserungen erzielt werden.

Phase der Wärmepumpentrocknung

Zu Beginn der Satzrocknung des feuchten erntefrischen Gutes werden hohe Abluftfeuchten erreicht. In dieser Trocknungsphase wird die Abluft zunächst durch den Verdampfer der Wärmepumpe unter den Taupunkt abgekühlt, dabei entfeuchtet und anschließend durch den Kondensator wieder auf die erforderliche Trocknungstemperatur erwärmt. Während der Entfeuchtung wird ein Teil der in der Trocknerabluft enthaltenen latenten Wärmeenergie (Kondensationswärme) zurück gewonnen. Je feuchter und kühler die Abluft ist, umso effektiver arbeitet die Wärmepumpe. deshalb insbesondere zu Beginn der Trocknung sehr effizient betreiben. Bei geringer Zufuhr an Elektroenergie kann ein rascher und gleichzeitig energiesparender Trocknungsprozess im niedrigen Temperaturbereich bei ca. 40 °C unterhalten werden.

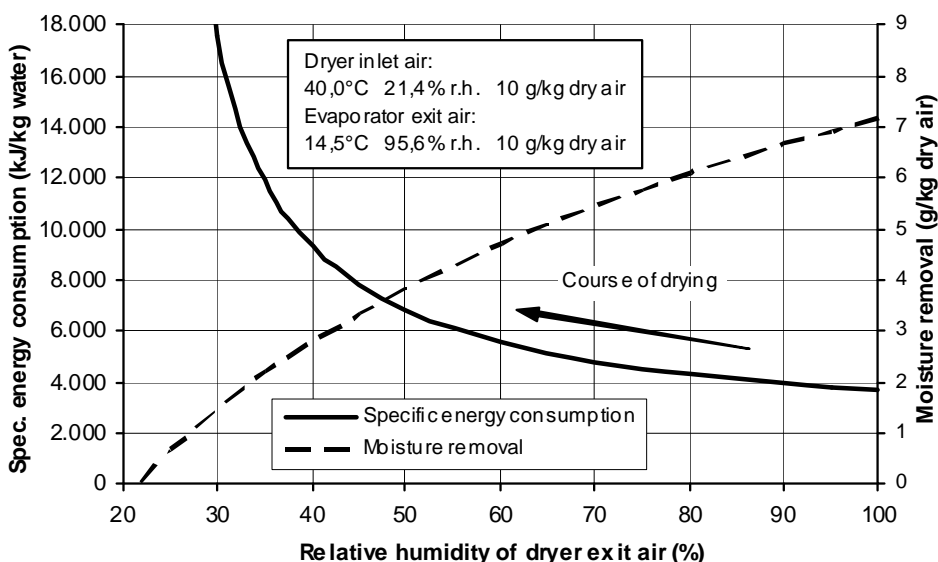


Bild 12: Spezifischer Energiebedarf (kJ/kg Wasser) und Wasserentzug (g/kg trockene Luft) bei der Trocknung mit entfeuchteter Abluft im geschlossenen Betrieb

Da der spezifische Energiebedarf im geschlossenen Betrieb mit sinkenden relativen Abluftfeuchten jedoch immer weiter steigt (**Bild 12**), sollte gegen Ende der Trocknung auf konventionelle Luftherwärmung umgeschaltet werden. Dadurch kann eine Wärmepumpe beispielsweise im täglichen Rhythmus für mehrere Trocknungsflächen eingesetzt werden, was die Investitionskosten für die gesamte Trocknungsanlage entscheidend reduziert. Der Wärmepumpen- und der Trocknungsprozess sind verfahrens- und regelungstechnisch auf komplexe Weise miteinander verknüpft. Dimensionierung und Steuerung müssen anlagen- und produktspezifisch sehr sorgfältig abgestimmt werden. Optimierte Anlagen werden zukünftig nicht nur energetisch, sondern auch wirtschaftlich der konventionellen Warmluftherzeugung überlegen sein. Im Ergebnis des Projekts wird eine weitgehend opti-

mierte Flächentrocknungsanlage vorliegen, deren Technologie auf bestehende und neu zu errichtende Trocknungsanlagen übertragbar ist.

4 Zusammenfassung

Wie anhand der gewählten Beispiele gezeigt wurde, konnten durch die Forschungsarbeiten in der Arbeitsgruppe Trocknung in den zurückliegenden Jahren wesentliche Ergebnisse im Hinblick auf die Verfahrensoptimierung und die Steigerung der Energieeffizienz erzielt werden. Die laufenden Forschungen zum Dächerschachttrockner sind auf die apparative und verfahrenstechnische Optimierung fokussiert. Hier werden allein nach Umsetzung des verbesserten apparativen Konzepts Energieeinsparungen in der Größenordnung von 10 % erwartet. Gleichzeitig wird die Produktsicherheit durch Vergleichmäßigung der Trocknung erhöht. Hierzu trägt auch der neu entwickelte Mikrowellensensor zu Online-Getreidefeuchtemessung bei. Das Verfahren der Flächentrocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen wurde zu einem neuen zweistufigen Trocknungsverfahren weiterentwickelt, bei dem die konventionelle Beheizung der Trocknungsluft mit Heizöl bzw. Erdgas mit Wärmepumpen gekoppelt wurde. Durch konsequente Reduzierung des Trocknervolumens, den Wärmepumpeneinsatz und strömungstechnische Verbesserungen konnten die Energiekosten bereits im ersten Produktionsjahr um 30 % im Vergleich zu bisherigen Anlagen gesenkt werden.

Die Steigerung der Energieeffizienz der Verfahren bei gleichzeitiger Sicherung der Produktqualität zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen wird auch weiterhin zentrales Forschungsgebiet der landwirtschaftlichen Trocknungstechnik sein. Neben den klassischen Agrarprodukten umfasst das Aufgabengebiet auch die Trocknung von Biomassen zur stofflichen oder energetischen Verwertung. Angesichts der Klimaerwärmung wird der Einsatz regenerativer Energieträger, insbesondere der Solarenergie, sowie der Wärmepumpentechnik, der Wärmerückgewinnung und –speicherung bei der Entwicklung neuer Trocknungsverfahren zu einem neuen Forschungsschwerpunkt.

5 Literatur

- BUSCHBECK E. (1975):** Trocknung von Arznei- und Gewürzpflanzen. In: Maltry W., Pötke E., Schneider B.: Landwirtschaftliche Trocknungstechnik. 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik; S. 440-450
- CHUA KJ, CHOU SK, HO JC, HAWLADER MNA (2002):** Heat pump drying: recent developments and future trends. *Drying Technology*, 20 (8):1579-1610
- CUNDALL, P.A., STRACK, O. D. A (1979):** Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, pp. 29, 47-65
- FÜRL C.:** Verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich der Landwirtschaft. *Bornimer Agrartechnische Berichte* (dieses Heft)

- GNIELINSKI V.; MERSMANN A.; THURNER F. (1993):** Verdampfung, Kristallisation, Trocknung. Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden,
- GRÖGER, T.; KATTERFELD, A. (2006):** Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik. *Schüttgut* 12 (7): S. 480-486
- HAUSCHILD T. (2005):** Density and Moisture Measurements Using Microwave Resonators. In: K. Kupfer (Ed.): Electromagnetic Aquametry, Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Springer Verlag, Heidelberg.
- HERRMANN R., SIKORA J. (1997):** Mikrowellen-Feuchtemesstechnik mit Resonatoren und ihre Anwendungen. In: K. Kupfer u. a.: Materialfeuchtemessung. Band 513, Expert Verlag, Renningen,
- HOPPE B. (2003):** Studie zum Stand des Anbaus von Arznei- und Gewürzpflanzen in Deutschland und Abschätzung der Entwicklungstrends in den Folgejahren. Forschungsbericht zum BMVEL/FNR-Projekt 22006604, Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen SALUPLANTA e.V., Bernburg, 2005.
- IROBA K.L., WEIGLER F., MELLMANN J., METZGER T., TSOTSAS, E. (2009):** Residence Time Distribution in Mixed-Flow Grain Dryers. *Drying Technology* 27, submitted
- KATTERFELD A.; GRÖGER T. (2007):** Einsatz der DEM in der Schüttguttechnik; Teil 3: Gutübergabestellen. *Schüttgut* 13 (3): S. 202-213
- KOCSIS L. SCHLEMM U., RICHTER H., MELLMANN J., FARKAS I. (2008):** On-line Microwave Measurement of the Moisture Content of Wheat. In: Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC 2008), Seoul, Korea, July 6-11, , pp. 631-635
- MALTRY W. (1975):** Wirtschaftliches Trocknen. Verlag Theodor Steinkopff, Dresden
- MALTRY W.; PÖTKE E.; SCHNEIDER B. (1975):** Landwirtschaftliche Trocknungstechnik. 2. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin
- MELLMANN J. (2001):** The transverse motion of solids in rotating cylinders – forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*, 118, pp. 251-270
- MELLMANN J., FÜRLI C. (2008):** Trocknungsanlagen für Arznei- und Gewürzpflanzen – spezifischer Energieverbrauch und Optimierungspotenzial. *Z. Arzn. Gew. Pfl.*, 13 (3),: S. 127 – 133
- MELLMANN J., KOCSIS L., FARKAS I. (2008):** Analysis of the dynamic response of a mixed-flow grain dryer on the basis of reversing experiments. In: Proceedings of the International Symposium Reliable Flow of Particulate Solids IV (RELPOWFLO IV), June 10-12, Tromsø, Arctic Norway, pp. 255-260
- MELLMANN J., RICHTER I.-G., MALTRY W. (2007):** Experiments on Hot-Air Drying of Wheat in a Semi-Technical Mixed-Flow Dryer. *Drying Technology*, 25 (7&8): pp. 1287-1295
- MELLMANN J.; RICHTER I.-G. MALTRY W. (2005):** Optimierte Steuerung von Getreideschachttrocknern. Forschungsbericht. Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Potsdam
- MÜHLBAUER W. (1989):** Trocknen von Getreide. In: Kröll, K.; Kast, W.: Trocknungstechnik. Band 3, Springer-Verlag, Berlin: S. 64-106
- MUJUMDAR AS (2006):** Some recent developments in drying technologies appropriate for postharvest processing. *Int. J. Postharvest Technology and Innovation* 1 (1):76-92
- MÜLLER J, HEINDL A. (2006):** Drying of medicinal plants. In: Bogers JB, Craker LE, Lange D, editors. Medicinal and Aromatic Plants. Proceedings of the Frontis Workshop on Medicinal and Aromatic Plants; 2005 April 17-20; Wageningen, The Netherlands. Amsterdam: Springer; p. 237-252
- PÖSCHEL T., SCHWAGER, T. (2005):** Computational Granular Dynamics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

-
- SCHLEMM U., RICHTER H., KOCSIS L., MELLMANN J. (2008):** Feuchtemessung in Weizen mit der Mikrowellen – Resonanzmethode. *Mühle + Mischfutter*, 145 23, S. 786-789
- ZIEGLER T., MELLMANN J. (2008):** Thermodynamische Wechselbeziehungen bei einem Flächentrocknungsprozess mit Wärmepumpen – Grundlagen und Anwendung. *Z. Arzn. Gew. Pfl.*, 13 4, S. 167-172

Modellrechnungen von Strömungsvorgängen in der Agrartechnik

Computational Fluid Dynamics in Agricultural Engineering

Klaus Gottschalk

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100
E-Mail: kgottschalk@atb-potsdam.de

Kurzfassung

In diesem Artikel wird zunächst eine kleine Einführung in die numerische Strömungsrechnung und ein Überblick über den Stand der Technik gegeben. Anhand von zwei Beispielen werden Anwendungsmöglichkeiten der numerischen Strömungsrechnung und Simulation in der Agrartechnik aufgezeigt. Voraussetzung für eine gute Klimaführung im Kartoffellager ist eine gut angepasste Belüftung. Untersuchungen über die Strömungsverläufe im Lagerhaus in Abhängigkeit von der Luftführung können mittels numerischer Strömungsrechnung untersucht werden und in der Simulation Möglichkeiten zur Verbesserung der Belüftung gefunden werden. Eine einfache Methode, Segregationsvorgänge bei der pneumatischen Befüllung von Getreidesilos zu untersuchen, ist die Kombination der Strömungsrechnung mit Partikelspuren.

Einführung

Die numerische Strömungsrechnung und Strömungssimulation (CFD=Computational Fluid Dynamic) ist Gegenstand der Forschung innerhalb der Angewandten Mathematik seitdem es Rechner mit den erforderlichen Rechenleistungen gibt. Die numerischen Algorithmen werden noch heute stetig weiterentwickelt, um mit der verfügbaren Rechentechnik strömungstechnische Probleme mit immer höherer Komplexität berechnen und darstellen zu können. Auf folgende Fragestellungen wird kurz eingegangen:

- Wie werden Strömungsvorgänge numerisch berechnet?
- Wie sieht ein CFD-System aus?
- Welche Werkzeuge sind notwendig, um eine Strömungssimulation durchführen zu können?
- Wie arbeitet man mit diesen Werkzeugen?
- Wo liegen die Möglichkeiten und Grenzen einer Strömungssimulation?

- Welche Anwendungen, insbesondere in der Agrartechnik, finden sich für eine numerische Strömungsrechnung?

Modellierung und Simulation

Die Simulation ist eine Vorgehensweise überwiegend zur Analyse dynamischer Systeme. Dabei werden zu Beginn oder begleitend Experimente an einem realen Modell oder einem realen System durchgeführt, um Erkenntnisse über das reale System zu gewinnen (**Bild 1**). Bei einer analytischen oder numerischen Modellierung bzw. Rechnung wird ein physikalisch-mathematisches Modell erstellt und behandelt. Im Allgemeinen ist die Modellierung ein iterativer Vorgang, bei der das Modell schrittweise entwickelt, verbessert und validiert wird, um nach als ausreichend erachteter Validierung zur Prädiktion, also zur Vorhersage (Simulation) von verschiedenen Varianten des zu untersuchenden realen System verwendet werden kann.

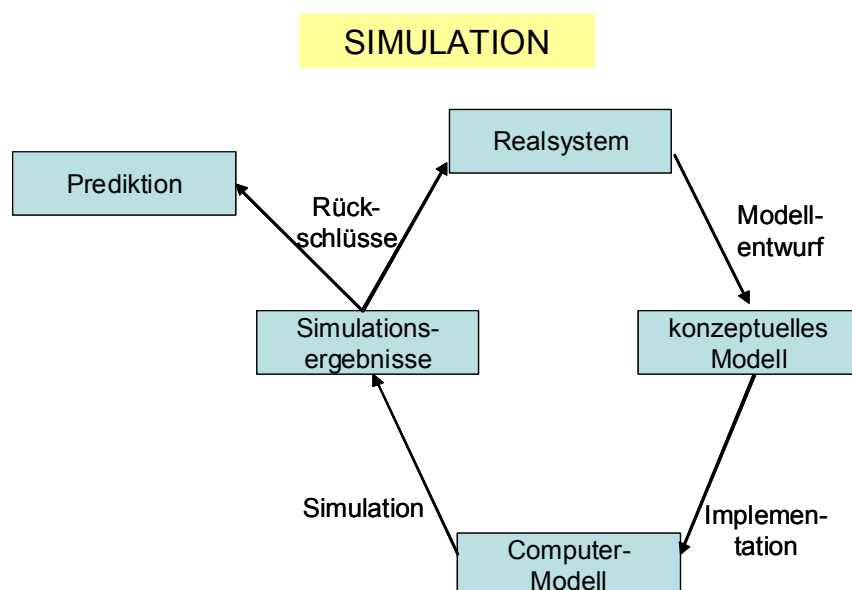


Bild 1: Schematische Darstellung der Modellbildung und Simulation

Die ‚numerische Strömungsmechanik‘ oder ‚numerische Strömungsrechnung‘ ist eine Modellierungs- und Simulationsmethode, um Strömungsvorgänge von Fluiden, das sind Flüssigkeiten oder Gase, zu berechnen und zu untersuchen. Die Modellierung von Fließvorgängen fließfähiger Mehrkomponentensysteme (Schüttgüter) bedarf anderer numerischer Berechnungsmethoden, wie z.B. die Diskrete-Elemente-Methode (DEM), PÖSCHEL & SCHWAGER 2004. Die hier behandelten Fluide sind Ein-Komponenten-Systeme, die aber inhomogen sein können, entsprechend der physikalischen und stofflichen Eigenschaften des Fluids. Die Strömungsrechnungen können 2-dimensional (2-D) oder 3-dimensional

(3-D) ausgeführt sein. Begriffsbildungen im Zusammenhang mit der Strömungsrechnung sind:

- Analytische Strömungsrechnung
- Numerische Strömungsmechanik/Strömungsrechnung
- Aerodynamik (Gase), Hydrodynamik (Flüssigkeiten)
- Fluidodynamik (allg. Fluide, ohne Festkörper, d.h. keine Suspensionen usw.)
- CFD (*computational fluid dynamics*)

Vereinfachungen:

Bei Anwendungen, insbesondere in der Agrartechnik, können in den meisten Fällen Annahmen bzgl. der Eigenschaften der Fluide getroffen werden, um die Berechnungs- und Modellierungsmethoden vereinfachen zu können. Diese sind im Wesentlichen:

Das Fluid bzw. die Strömung ist

- inkompressibel (bei Mach $< 0,3$; 1 Mach entspr. Schallgeschwindigkeit in Luft)
- laminar (Schichtenströmung, also: turbulenzfrei)
- gering oder mittelgering viskos (d.h. Zähigkeit gering; sehr gering bei Luft)
- nicht-dissipativ („Reibungsverluste“ sehr gering oder vernachlässigbar)
- instationär / stationär („stationär“: keine zeitliche Änderung; vereinfacht die Rechnung)
- Oberbeck-Boussinesq-Approximation (Vernachlässigung der Änderungen der Stoffkennwerte Viskosität, Wärmekapazität, Wärmeübergangszahl unter Einfluss von Gravitation und Temperaturdifferenzen; die Dichte hingegen ist linear von der Temperatur abhängig)

Die verbleibende Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur ermöglicht es, Auftriebskräfte zu berücksichtigen (freie Konvektion).

In Realität ist eine Luftströmung im freien Raum nicht rein laminar, sondern turbulenzbehaftet. Die Strömung besteht dann aus einer Grundströmung, der eine Turbulenz überlagert ist. Die Strömung kann in eine vollständig turbulente Strömung übergehen (überkritisch). Messungen zeigen aber, dass sich im Lagerraum eine Grundströmung einstellt, in der sich Wirbel ausbilden können, die ihrer Natur nach laminar sind.

Analytische Strömungsrechnung

Ausgangspunkt der analytischen sowie numerischen Strömungsrechnungen ist der Satz von gekoppelten partiellen Differentialgleichungen zur Berechnung der Geschwindigkeits-

vektoren bei instationären, laminaren Strömungen für inkompressible, viskose Fluide, die sog. Navier-Stokes-Gleichungen (N.-S.-Gleichungen) (BAEHR 1994):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \text{grad } \bar{u}) + \frac{1}{\rho_0} \text{grad } p = \nu \Delta \bar{u} + \bar{g} + f(\bar{u}, T, \dots) \quad (1)$$

Massenkraft + konvektive Kraft + Druckgefälle = Zähigkeit + Gravitation + ext. Kräfte
(Impuls-Erhaltungsgleichung)

mit: ρ_0 Dichte des Fluids unter Anfangsbedingung; ν kinematische Viskosität; Δ Poisson-Operator.

Da das Fluid als inkompressibel angenommen wird (bei Wasser meist sinnvoll, bei Luft unterhalb der Mach-Zahl $M < 0,3$; s.o.), braucht der Zusammenhang zwischen Druck und Dichte, die thermodynamische Zustandsgleichung $p = p(\rho)$, nicht berücksichtigt zu werden. Außerdem gilt Glg. (1) für Newtonsche Fluide.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \bar{u}) = 0 \quad (2)$$

(Kontinuitätsgleichung bzw. Masse-Erhaltungsgleichung)

Sofern das Temperaturfeld zusätzlich berechnet werden soll, ist die Energieerhaltungsgleichung notwendig.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{u} \cdot \text{grad } T = \alpha \cdot \Delta T + q \quad (3)$$

T Temperatur; α Wärmeübergangszahl; q ext. Wärmequellen/-senken; Δ Poisson-Operator.

(Energie-Erhaltungsgleichung)

Nach Annahmen der Vereinfachungen hinsichtlich der Fluid-Eigenschaften (s.o.) gilt zusätzlich:

$$\rho = \rho(T) \quad (4)$$

$$\rho(T) = \rho_\infty \cdot [1 - \beta (T(\bar{x}, t) - T_\infty)] \cdot \bar{g}$$

β Kompressionszahl; g Gravitationsbeschleunigung

(Oberbeck-Boussinesq-Approximation)

Die Navier-Stokes-Gleichungen sind die kinematischen Gleichungen zur Bilanzierung der mech. Impulse und Masse (Dichte) sowie optional die (thermische) Energie, sofern zusätzlich Temperaturfelder berechnet werden sollen. Die Bilanzgleichungen implizieren die in der klassischen Thermodynamik geforderten Erhaltungssätze von Impuls, Energie und Masse.

Die hier aufgeführten Gleichungen beschreiben die Strömungen -unter Berücksichtigung der vereinfachenden Annahmen- vollständig. Zu einer analytischen Lösung der N.-S.-

Gleichungen sind noch die Anfangs- und Randbedingungen (d.i. die Geometrie, die die Strömung einschränken) notwendig, die die hohe Zahl an möglichen analytischen Lösungen auf eine (eindeutige und vollständige) Lösung eingrenzen. Eine geschlossene analytische Lösung einer Strömungsrechnung ist jedoch nur für eine vergleichsweise geringe Anzahl klassischer, meist stark vereinfachter Probleme mit einfachen Geometrien möglich. Eine Lösung für nahezu beliebige Strömungsprobleme mit beliebigen Geometrien ist jedoch nur mit numerischer Rechnung möglich.

Die N.-S.-Gleichung (1) kann um die auf eine auf die Strömung ausgeübte Widerstandskraft bei der Durchströmung eines porösen Körpers erweitert werden; der Term für die extern ausgeübte Kraft in Glg. (1) nimmt dann die Form

$$f(|\bar{u}|) = k_p \cdot (|\bar{u}|)^n \quad (5)$$

an, mit $n \in \nabla$ und $k_p > 0$

Numerische Strömungsrechnung

Diskretisierung - Finite Differenzen-Verfahren

Damit die N.-S.-Gleichungen numerisch behandelt werden können, werden unterschiedliche Verfahren zu ihrer ‚Diskretisierung‘ verwendet. Das einfachste und grundlegende Verfahren zur Diskretisierung von Differentialquotienten (Ableitungen) ist deren Überführung in Differenzenquotienten mittels der Finite Differenzen Methode (FDM). Dies sind Approximationen erster (linearer) oder höherer Ordnung der Differentialquotienten z.B. nach Taylor-Entwicklung:

$$u(x) \approx u(x_i) + (x - x_i) \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_i + \dots \quad (6)$$

Taylorentwicklung

Daraus kann das einfache Eulersche Polygonzugverfahren zur Extrapolation z.B. einer der Geschwindigkeitskomponenten oder der Temperatur usw. gewonnen werden (hier als Beispiel in 2-D; Diskretisierung der $x_{i,j}$ - Komponente):

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j}^k \approx \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k}{x_{i+1,j}^k - x_{i,j}^k} = \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k}{\delta x} \quad (7)$$

(x Ortskoordinate; i,j Index der Ortskoordinate; k Index der Zeitkoordinate)

Eulersches Polygonzugverfahren

Ebenso sind in ähnlicher Weise die höheren Ableitungen diskretisierbar.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u^{k_{i+1,j}} - 2 \cdot u^{k_{i,j}} + u^{k_{i-1,j}}}{\delta x^2} \quad (8)$$

In Glg. (8) wird eine vorwärtsgerichtete ‚Aufwind‘-Approximation durchgeführt, bei dem auf u_{i+1} extrapoliert wird. Ebenso ist eine ‚Abwind‘-Approximation möglich bei dem die Indizierung in i um eine Stelle versetzt wird ($i+1 \rightarrow i$; $i \rightarrow i-1$). Eine höhere Approximationsgüte kann durch eine Diskretisierung 2. Ordnung erreicht werden (‚Zentraldifferenzen‘, **Bild 2**), jedoch wird der Gleichungslöser dann gelegentlich instabil. Daher ist eine ‚gemischte‘, modifizierte Zentraldifferenzen‘ Approximationen definiert, die von einem Parameter γ kontrolliert werden kann:

$$\text{modif. Zentral} = \gamma \cdot \text{Aufwind} + (1 - \gamma) \cdot \text{Abwind}$$

In der numerischen Praxis ist $\gamma \approx 0,7$ als günstiger Wert gefunden worden zur Sicherstellung einer stabilen Lösung bei guter Approximationsgüte.

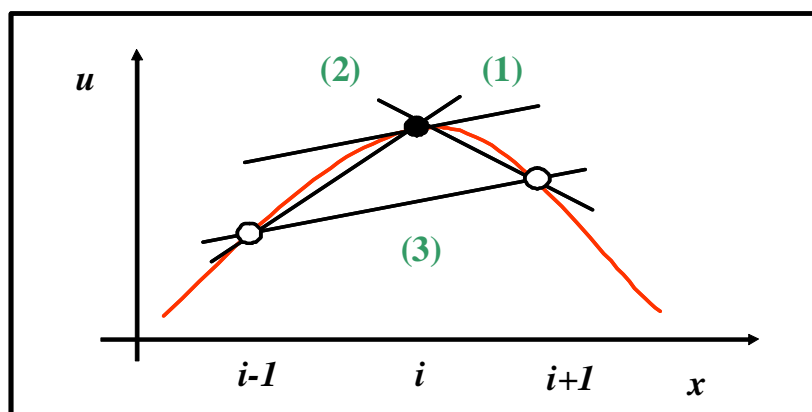


Bild 2: Finite Differenzen-Approximation: (1) Aufwind, (2) Abwind, (3) Zentral

Nach Überführung aller Differentialquotienten der N.-S.-Gleichungen in ihre entsprechenden Differenzengleichungen und Sortierung nach den gesuchten Größen ($u_{i+1,j+1}$), gewinnt man ein Gleichungssystem in Matrix-Form, z.B. für die Geschwindigkeitsvektoren u

$$\bar{u} = M \cdot \bar{b}$$

mit

$$M = \begin{pmatrix} \bullet & \circ & & & \\ \circ & \bullet & \circ & & 0 \\ & \circ & \bullet & \circ & \\ & & \circ & \bullet & \circ \\ & & & \circ & \bullet & \circ \\ 0 & & & & \circ & \bullet & \circ \\ & & & & & \circ & \bullet \end{pmatrix}$$

\bar{b} Koeffizientenvektor, M Tridiagonalmatrix,

Tridiagonalmatrix

das sich numerisch mittels des Gauß-Seidel-Verfahrens lösen lässt. Weitere Algorithmen sind entwickelt worden, die auf die jeweilige Struktur der Matrix zugeschnitten sind. Eine Besonderheit besteht bei M , dass die Hauptdiagonale (\bullet) und die beiden direkt benachbarten Nebendiagonalen mit Werten $\neq 0$ besetzt sind, wogegen alle weiteren Nebendiagonalen mit Nullen (Wert = 0) besetzt sind. Für diese Art von ‚schwach besetzten‘, Tridiagonal-Matrizen sind spezielle, besonders effiziente Lösungsverfahren entwickelt worden, wie aus dem Gauß-Seidel-Verfahren weiterentwickelte, verbesserte Verfahren, z.B. TDMA (HACKBUSCH, 1993). Als Besonderheit bei der Lösung der Impulsgleichung, Glg. (1), führt der Druckgradienten-Term zu einer separaten Lösung einer Poisson-Gleichung für den Druck, $\Delta p = f$ (Δ Poisson-Operator). Zur Lösung dieses Satzes von Gleichungen sind iterative Verfahren effizienter, wie z.B. das SOR-Verfahren und weiterentwickelte Verfahren (TUREK, 1998)

Neben dem eben beschriebenen FDM-Verfahren sind weitere Verfahren gebräuchlich, wie Finite-Elemente-Verfahren (FEM), Finite-Volumen-Verfahren (FVM), Lattice-Boltzmann-Automaten, Spektralmethoden u.a., mit ihren jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen hinsichtlich numerischer Genauigkeit, Stabilität bzw. Robustheit und Rechenleistung.

Jedem Element des Ergebnisvektors entspricht ein Wert des errechneten Ergebnisses auf einem durchindizierten Gitterpunkt $(x,y,t) \rightarrow (i,j,k)$ bzw. $(x,y,z,t) \rightarrow (i,j,k,l)$ innerhalb des Strömungsgebietes. Für alle zu berechnenden Größen (Geschwindigkeit, Druck, ggf. Temperatur usw.) werden gekoppelte Gleichungssysteme von der Form nach Glg. (7) erzeugt. Die Gitterweite entsprechen den gewählten δx_n ; $n \in \{1,2\}$ (2-D) bzw. $n \in \{1,2,3\}$ (3-D).

Das Diskretisierungsschema führt zu einem 2-dimensionalen bzw. 3-dimensionalen Rechengitter für den Strömungsraum, bei dem für jeden zu berechnenden Gitterpunkt eine Anzahl von Nachbarn in die Rechnung einbezogen wird. Um bessere Stabilität und höhere Rechengenauigkeiten zu erreichen wurden die Algorithmen für den Gleichungslöser verbessert, was zu modifizierten Gitterstrukturen führte. Da in den N.-S.- Gleichungen auch die Drücke eingehen, entstehen versetzte Gitter (‚staggered grids‘), **Bild 3**.

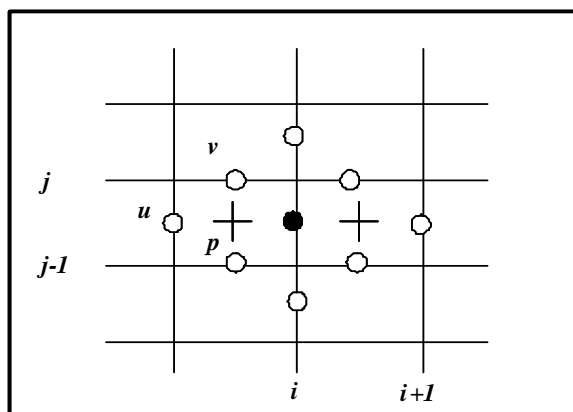


Bild 3: Versetzte Gitter zur Berechnung der Geschwindigkeiten und Drücke; 2-dimensional

Das numerische (CFD-) System

Ein CFD-System besteht aus einem Preprozessor, einem Gleichungslöser („solver“) und einem Postprozessor.

Daher teilt sich die CFD-Modellierung in die Arbeitsabschnitte

* Preprocessing

- Geometrie (CAD - Formgestaltung der Geometrie, bzw. Strömungsraum)
- Vernetzung (meshing)
- Definition der Rand- und Anfangsbedingungen
- Festlegung der Materialeigenschaften (Fluide, Rand, ...)

* Gleichungslöser („Solver“)

- Tridiagonal TDMA, Iteration SOR,

* Postprocessing

- Visualisierung - Geschwindigkeitsfeld,
Druckfeld, Stromlinien, Temperaturfeld,

Komplette Software-Pakete für numerische Strömungsrechnungen (CFD-Systeme) sind kommerziell oder frei verfügbar. Freie Software-Pakete sind als ‚open-source‘ Pakete in Internet zu finden und sind entweder von Entwicklergruppen an Universitäten oder von Firmen entwickelt worden. Frei angebotene Firmenentwicklungen sind meist Prototyp-Versionen oder veraltete oder gegenüber kommerziellen Varianten eingeschränkte Versionen. Derartige Systeme bestehen meist nur aus den Gleichungslösern („solvern“), wogegen die anderen Komponenten zur Vor- und Nachbearbeitung („preprocessing“ und „postprocessing“) aus anderen Quellen bezogen werden müssen. Die Vorgehensweisen, Quellen und Installationsanweisungen sind meist ausreichend gut dokumentiert; außer-

dem bestehen freie Foren von Anwendern und Entwicklern zum gegenseitigen Austausch von Erfahrungen, Entwicklungsvorschlägen, Problembearbeitungen usw.

Die Verwendung ‚freier‘ Software hat den Vorteil, dass die Quellcodes (Algorithmen) frei verfügbar und demzufolge modifizierbar sind. Dies ermöglicht eigene Entwicklungen, Erweiterungen und Modifikationen der Algorithmen und Module. Allerdings erfordert dies tiefgreifende Kenntnisse und Erfahren in der Algorithmenentwicklung und Softwaretechnik. Kommerzielle Systeme sind i.d.R. nicht als Quellcode verfügbar, jedoch sind meist in diese Systeme übergeordnete ‚Makrosprachen‘ zur freien Programmierbarkeit der Steuerung des Lösungsablaufs implementiert.

Während des *Preprocessings* wird zuerst die Geometrie des Strömungsgebietes festgelegt. Gegebenenfalls kann dies mittels eines CAD-Systems (‚computational aided design‘) erstellt werden. Bei kommerziellen CFD-Systemen sind grafikorientierte, interaktive Werkzeuge zur Erstellung der Geometrie vorhanden. Im Anschluss wird das Strömungsgebiet vernetzt (‚meshing‘), d.h. die Gitternetzpunkte werden in das Strömungsgebiet verteilt. Die Anzahl der Gitterpunkte (2-D oder 3-D) bestimmt einerseits die Rechengenauigkeit der Rechenergebnisse, andererseits den Speicherbedarf und die Rechenzeit. Ein feineres Gitter mit höherer Anzahl von Gitterpunkten ermöglicht eine höhere Auflösung des Strömungsfeldes, erfordert jedoch einen nichtlinearen Zuwachs an Rechenkapazität, da die Tridiagonal-Matrizen entsprechend groß werden. In der Regel ist ein automatischer Gittergenerator mit entsprechenden Kontrollparametern vorhanden. Oft wird es notwendig, das Gitter mit Hilfe einer grafikorientierten Oberfläche interaktiv manuell zu generieren. Hierfür ist einige Erfahrung erforderlich, da die Gitterstruktur weitgreifende Konsequenzen auf den Rechenverlauf des Gleichungslösers und auf das Ergebnis hat. Auch eine automatisch generierte Netzstruktur muss nicht unbedingt gut für den jeweiligen Fall geeignet sein, und Modifikationen am Gitter könnten notwendig werden.

Beim Preprocessing werden auch die Anfangs- und Randbedingungen (z.B. Ein- und Ausströmbedingungen, Wandeffekte usw.) festgelegt. Dies erfordert höchste Sorgfalt, damit die Randbedingungen wohldefiniert sind, und der Gleichungslöser die Rechnung zu einer konvergenten Lösung führen kann.

Weitere Einstellungen müssen vorgenommen werden: setzen der Materialeigenschaften (z.B. bei Luft: Dichte, Wärmekapazität, Viskosität usw.), Auswahl des Lösungsalgorithmus (Typ des Gleichungslöser, Auswahl laminare oder turbulente Strömung), setzen der Kontrollparameter für den Gleichungslöser (Steuerung der Iteration, Erzeugung der Ausgabedaten usw.), Angabe, ob eine transiente (instationäre) Lösung gefunden werden soll, usw. Auch nichtlineare Abhängigkeiten der Materialeigenschaften können in gewissem Rahmen definiert werden.

Der *Gleichungslöser* (‚solver‘) findet bei Wohldefinition der Parameter eine konvergente Lösung für die gewünschten Größen (Geschwindigkeiten, Drücke, Temperaturen usw.). Die errechneten Werte werden als Datenbank abgespeichert und können im nachfolgenden Postprocessing bearbeitet und visualisiert werden.

Beim *Postprocessing* werden die Daten verwendet, um die Ergebnisse je nach Erfordernissen auszuwerten und sichtbar zu machen. Meist werden die Strömungen als Vektorfeld sichtbar gemacht. Die Geschwindigkeitsvektoren werden als Pfeile dargestellt, wobei die Länge eines Pfeils dem Geschwindigkeitsbetrag des Vektors entsprechen kann. Jeder Pfeil ist an den zugehörigen Gitterpunkt des Netzes, für den die Größen berechnet wurden, angeheftet (**Bild 4**). Dabei ist zu beachten, dass die Visualisierung der Geschwindigkeitsvektoren auf diese Weise einen unrealistischen Eindruck über die Strömung vermitteln kann. So erscheint beispielsweise in **Bild 4** die Strömung vor dem Hindernis, an der oberen Kante sowie an der Unterseite des Hindernisses *verdichtet*, was jedoch aus Symmetriegründen nicht stimmt; vielmehr ist die Strömung (annähernd) spiegelsymmetrisch zur horizontalen Mittellinie des Hindernisses. Realistischer ist dagegen die Darstellung des Vektorfeldes für ein gleichmäßiges Gitter (**Bild 13, 14**) oder als Konturdiagramm (s.u.).

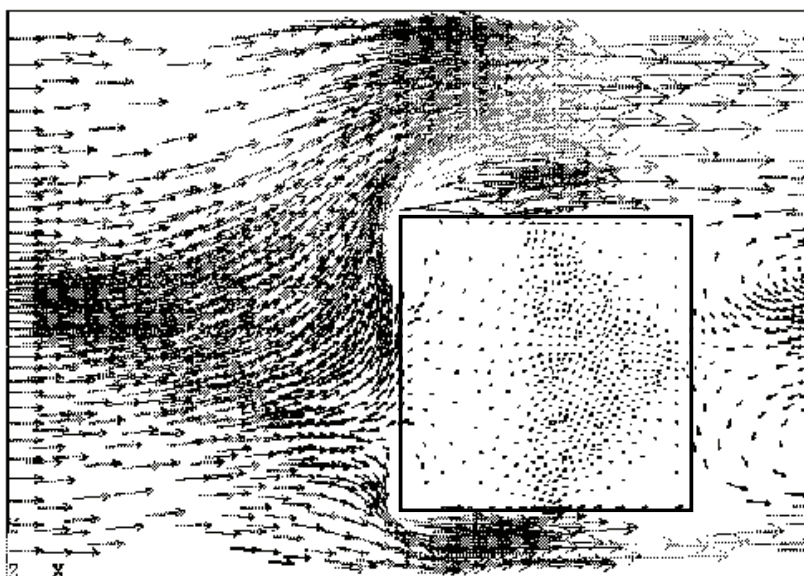


Bild 4: Vektordiagramm des Geschwindigkeitsfelds bei Anströmung eines Hindernisses aus porösem Material (Kiste gefüllt mit Schüttgut/Kartoffeln)

Weitere Darstellungsweisen sind Konturdiagramme, die für skalare Größen (Temperaturfelder, Druckfelder, Konzentrationsfelder usw.) angebracht sind. Auch die Beträge bei Geschwindigkeitsfeldern lassen sich derart darstellen (**Bild 11, 12**).

Neben der Sichtbarmachung der Strömungsverläufe mittels des Vektorfelddiagramms ist noch die Methode der Partikelspurverfolgung gebräuchlich. Dabei wird am Rand des Einströmgebietes eine ausreichend hohe Anzahl von massefreien, punktförmigen Partikeln platziert, die von der Strömung, entsprechend des Geschwindigkeitsfeldes, mitgeführt werden. Die Spuren, die diese Partikel bilden, entsprechen dann den Stromlinien der Strömung (**Bild 11**). Auf diese Weise können Verfälschungen der Eindrücke über die Strömungsverläufe, wie sie sich bei Darstellung von Vektorfeldern ergeben können (**Bild 4, s.o.**), vermieden werden.

Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Strömungssimulationen

Bei der Simulation von realen Systemen bestehen i.Allg. mehr oder weniger große Einschränkungen bzgl. folgender Eigenschaften:

- Vollständigkeit des Modells
- Exakte Abbildung der Realität
- Genauigkeit der Rechnungen (analytisch oder numerisch)
- Zutreffen von Vorhersagen („Prädiktion“, vgl. **Bild 1**)
- Übertragbarkeit der Simulation auf die realen Systeme und deren Varianten
- Stabilität des Modells gegenüber Varianten und Parameteränderungen
- Stabilität/Robustheit des (numerischen) Rechenverfahrens gegenüber Varianten- und Parameteränderungen
- Möglichkeit zu geometrischen Verfeinerungen; Erhöhung der Komplexität
- beliebig hohe Rechenleistungen und kurze Rechenzeiten
- beliebig hohe Auflösung feiner Strukturen

Die Vorteile einer Simulation liegen vor allem darin, dass z.B. vor einem Prototypenbau Varianten vorherberechnet und untersucht werden können. Das Auffinden von Betriebsparametern kann vorab ohne aufwändige Versuche durchgeführt werden. Phänomene können untersucht und erklärt werden. Geometrien können angepasst und verbessert werden, und deren Auswirkungen auf die Strömungsverläufe können untersucht werden.

Anwendungen bei der Belüftung von Kartoffellagern

Die numerische Strömungsmechanik wird in der Agrartechnik angewandt, um z.B. die Durchströmung von Kistenlagern (**Bild 5**) für Kartoffeln zu untersuchen. Dabei kann gezeigt werden, welche Maßnahmen bei der Kistenanstellung helfen, die Durchströmung der Lagerkisten zu verbessern (GOTTSCHALK 1999). Eine gleichmäßige Belüftung durch alle Kisten kann dadurch weitgehend erreicht werden. Einige prinzipielle Grundprobleme zur Erlangung einer gleichmäßigen Strömung bleiben i. d. R. dennoch bestehen. Jedenfalls kann der Feuchteverlust und die Kühlzeit nur reduziert werden, wenn eine erforderliche Luftrate durch jede Kiste erreicht wird.



Bild 5: Großkistenlager für Kartoffeln

Nach der Ernte müssen die Kartoffeln sachgerecht gelagert werden. Die Lagerung kann von einer Kurzzeitlagerung über wenige Wochen bis zu einer Langzeitlagerung über 8 Monate reichen. Während dieser Lagerungszeit sind Verluste, die durch Schwund, Keimung, Fäule und andere Krankheiten entstehen können, zu vermindern. Die Kartoffelknollen sind biologisch aktiv und unterliegen Stoffwechselvorgängen und biochemischen Veränderungen. Daher kommt der ausreichenden Belüftung im Lagerhaus eine hohe Bedeutung zu, um das Lagerklima derart herzustellen und zu halten, dass die Knollen während der gesamten geforderten Lagerzeit in Keimruhe verharren (GOTTSCHALK & EZEKIEL 2006).

Kartoffeln werden entweder in loser Schüttung oder in Behältern gelagert. Die Behälterlagerung gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung, wobei einige Nachteile bestehen, welche sind:

- je nach Standort im Lagerraum unterschiedliche Belüftung der Behälterinhalte (Kartoffeln)
- starke Abhängigkeit der Belüftung von Anzahl und Position der Behälterstapel
- Abhängigkeit der Belüftung von der verwendeten Behälterart (geschlossene Kisten oder offene Gitterboxpaletten)
- Lage der Belüftungsschlitze
- Art der Belüftungseinrichtung (Wurfbelüftung, Wandbelüftung)
- starke Abhängigkeit von der Belegung des Lagerraums.

Daher ist bei eventueller Sortenmischung eine bestangepasste Belüftung für jede jeweilige Sorte unter Umständen schwer herzustellen.

Die meisten Kartoffellager für Kisten sind mit Raumbelüftungssystemen ausgerüstet.

Zunehmend (LARSSON 1997; KERN *et al.* 2002) sind die Lager zum Teil zusätzlich mit Kühleinrichtungen versehen. Es wird berichtet, dass oftmals eine ausreichende Luftbewegung durch die Kisten nicht gewährleistet ist (STATHAM 1997). Beim Abkühlen der Kartoffeln lässt sich jedoch der Schwund (Masseverlust) sowie die Kühlzeit und die Abtrocknungszeit nur durch eine ausreichende Luftfrate durch die Kisten verringern (SCHEER 1998). Die Luftführungen durch Kistenlager müssen gewährleisten, dass alle Kisten möglichst gleichmäßig durchlüftet werden. Um die Luftströmung durch die gestapelten Kisten zu beeinflussen, müssen bei bestehenden Lagerräumen geeignete Luftführungselemente (Klappen, Wände, Bretter usw.) zusätzlich eingebaut werden.

Bevor langwierige Untersuchungen und kostspielige Konstruktionen am realen Lager durchgeführt werden, können mit Hilfe der Numerischen Strömungsmechanik die Verläufe der Luftströmung simuliert und erprobt werden.

Luftströmung durch Kartoffelschüttung

Die Kartoffelschüttung ist ein Haufwerk, das möglichst gleichmäßig von Luft durchströmt werden soll. Für die Modellierung wird es wie ein poröses, d.h. für Luftströmung durchlässiges, homogenes Material betrachtet. Ebenso kann bei Kartoffel-Kistenlagern der Kisteninhalt als loses Schüttgut betrachtet werden. Bei dieser Geometrie erhält die Durchströmung eines porösen Schüttkörpers einige strömungstechnischer Probleme:

- längs des Kanals ist -bei gleichbleibendem Querschnitt- die Strömungsgeschwindigkeit unterschiedlich verteilt, ebenso der statische Druck, was zu unterschiedlicher Durchlüftung der Kartoffeln längs des Kanals führt.
- Die Durchströmung einer gefüllten Kiste mit der sogenannten Wandbelüftung stellt sich ähnlich dar, **Bild 13, 14**.
- Der Druckverlust je Meter Strömungsweg in Kartoffeln als ‚poröses‘ Schüttgut ist nichtlinear von der Durchströmungsgeschwindigkeit abhängig, und zwar in Form einer über den Widerstandskoeffizienten ζ dargestellten potentiellen Abhängigkeit. Der Gesamtzusammenhang lässt sich wie folgt modellieren:

$$\Delta p / h = \zeta \cdot \frac{k}{d_k \cdot \varepsilon^4} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (9)$$

Aus Messungen lässt sich für Schüttungen (Kugelhaufschüttungen) der allgemeingültige Zusammenhang ableiten (BAEHR 2003):

$$\zeta = 40,6 / Re + 2,33 / Re^{0,16} \quad (10)$$

Es bedeuten:

p	Druckverlust
h	Strömungsweg (z.B. entlang Schütthöhe)
k	Stoffkonstante; bei Kartoffeln: $k = 1,4$
ζ	Widerstandskonstante der Kugelschüttung
ρ	Dichte der Luft
$ \bar{u} $	auf den leer gedachten Strömungsquerschnitt bezogene Betrag der Luftgeschwindigkeit
d_k	volumengleicher Durchmesser des Einzelkörpers (als Kugel)
ε	Porenvolumen-Anteil („Porosität“)
ν	kinematische Zähigkeit der Luft ($\nu = 13,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
Re	Reynoldszahl, definiert zu

$$\text{Re} = \frac{|\bar{u}| \cdot d_k}{\nu} \quad (11)$$

- Die tatsächliche Abhängigkeit des Strömungswiderstands vom Betrag der Strömungsgeschwindigkeit hat zur Folge, dass sich das Strömungs- und Drucklinienfeld im Kartoffelstapel mit der Höhe der Luftgeschwindigkeit verändert.
- Um den Masseverlust durch Verdunstung, den Schwund, zu minimieren, sind die Strömungswege der Luft mit so geringen Druckverlusten wie möglich zu belasten. Deshalb ist die optimale Luftrate ein Kompromiss zwischen möglichst großer Wirksamkeit an ‚Kühlleistung‘ und möglichst geringem Schwund.
- Die günstigste Form der Durchströmung wäre an sich die Parallelströmung mit einem ganzflächigen Lufteintritt. Andererseits haben örtliche Unterschiede im Stapel bezüglich Füllhöhe, Größe der Einzelknollen und Größenverteilung, Form und nicht zuletzt Beimengungsanteile (z.B. Erde, Kluten usw.) einen maßgebenden Einfluss auf die örtlich wirksame Luftrate (bzw. Luftgeschwindigkeit). Deshalb ist es unvermeidbar, dass im realen Kartoffellager ein erheblicher Anteil der Lüfterenergie allein dafür aufgewendet wird, eine möglichst gleichmäßige örtliche Luftrate zu erlangen.

Numerische Strömungsrechnung für ein Kartoffellager

Eine *numerischen Strömungsrechnung* kann für eine typische Anordnung der Kistenstapel und der Belüftungsanlage in einem Lagerhaus durchgeführt werden (GOTTSCHALK 1999) (**Bild 6, 7, 11**). Der Luftströmungsverlauf im Lagerraumquerschnitt, wie er sich etwa bei Umluftbetrieb einstellt, ist zu sehen. Die Luft strömt knapp oberhalb des Stapels mit einer Luftgeschwindigkeit von ca. 10 m/s ein. Deutlich ist zu sehen, dass sich ein „Strömungskurzschluss“ im Zwischenraum zwischen Belüftungswand und Kistenfront einstellt. Ein Großteil der Luftmenge fließt dabei ungenutzt an der Vorderfront des Kistenstapels vorbei wieder in die Belüftungsanlage zurück. Lediglich der vordere, obere Teil des Stapels wird hinreichend stark belüftet, jedoch werden insbesondere die hinteren, unteren Kisten mit weniger als 0,01 m/s Luftgeschwindigkeit schwach belüftet (**Bild 8, oben**). In den meisten

Kistenzwischenräumen, also auch in der Lücke zwischen Fußboden und Kistenstapel strömt die Luft mit einer Geschwindigkeit von bis zu mehr als 2 m/s. Der hintere, untere Bereich wird schwach belüftet. Dort besteht die Gefahr, dass dort die Kartoffeln zu Jahresbeginn als erste zu keimen beginnen. Dagegen wird der vordere, obere Bereich mit bis zu mehr als 1 m/s zu stark belüftet, was dort zu einer starken Austrocknung der Kartoffeln führt.

Anstelle von Vektorfeldern zur Visualisierung der Strömungsverläufe kann das Geschwindigkeitsfeld als Konturdiagramm dargestellt werden. Im Konturdiagramm sind aber die Strömungsverläufe nicht sichtbar. Dies muss durch ein überlagertes Stromlinienbild, etwa mittels ‚Partikelspuren‘ (s. Abschnitt zum CFD-Verfahren) überlagert werden, **Bild 11**.

Durch eine Blockierung des Kurzschlussweges kann die Durchströmung des gesamten Lagers verbessert werden (**Bild 7**). Die Strömung ist durch eine Abdeckung gezwungen, sich über den Kistenstapel hinweg auszubreiten. Deutlich zu sehen ist, dass im hinteren, unteren Bereich die Strömungsgeschwindigkeiten in den Zwischenräumen deutlich zugenommen haben. Auch hat diese einfache Maßnahme die Strömungsgeschwindigkeit in den Kisten dieses Bereichs etwas angehoben, d.h. von vorher unter 0,002 m/s auf ca. 0,03 bis max. 0,10 m/s bzw. im Mittel 0,08 m/s. Im vorderen, unteren Bereich hat sich keine wesentliche Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit durch die Kisten ergeben und erreicht dort ca. 0,05 m/s (**Bild 8, unten**).

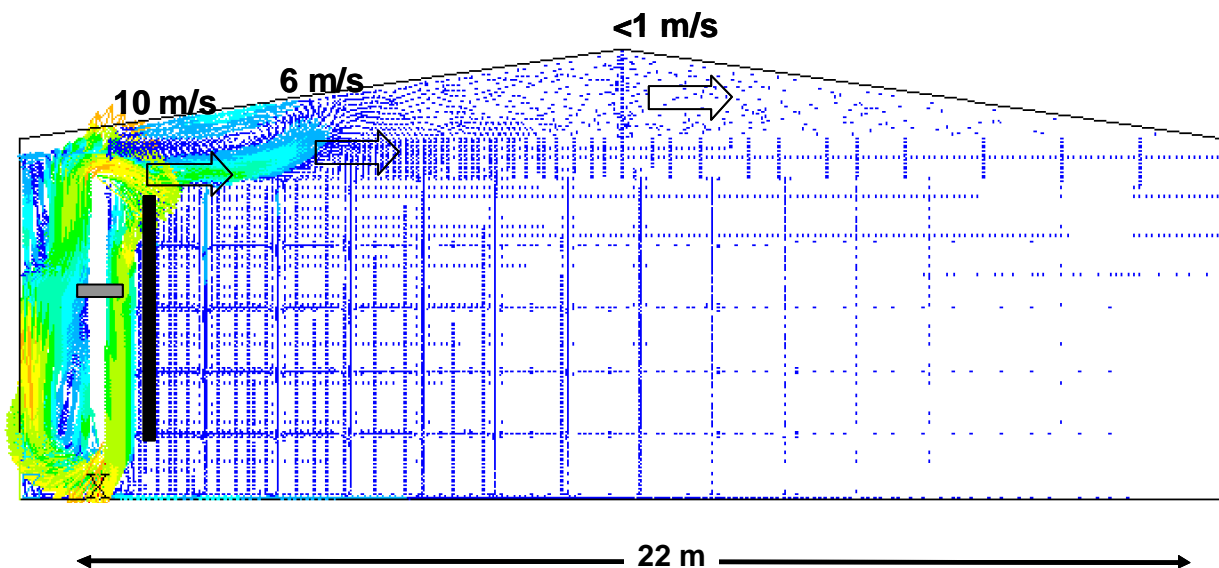


Bild 6: Geschwindigkeits-Vektordiagramm eines Kistenlagers für Kartoffeln mit Wurfbelüftung; ursprüngliche Belüftung

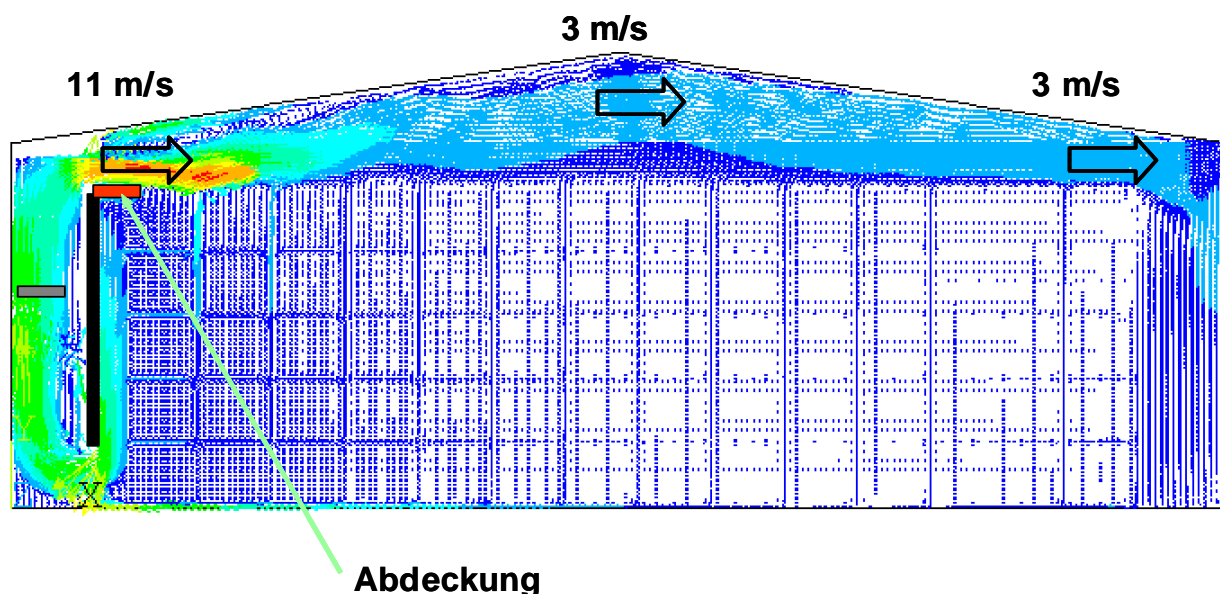


Bild 7: Geschwindigkeits-Vektordiagramm eines Kistenlagers für Kartoffeln mit Wurfbelüftung; verbesserte Belüftung

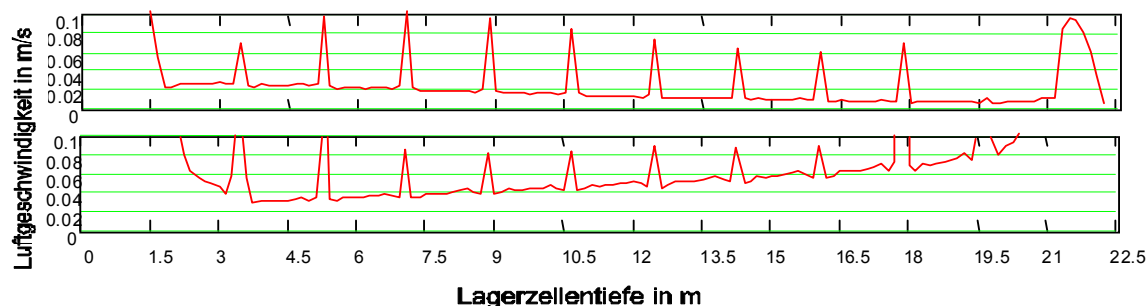


Bild 8: Berechnete Geschwindigkeitsprofile der untersten Kistenlagen; oben: ursprüngliche Belüftung gem. **Bild 6**, unten: verbesserte Belüftung gem. **Bild 7**

Die vorhergesagte Wirkung der Unterbindung der Kurschlussströmung durch Anbringen einer Folie wurde durch Messungen bestätigt, die an der KTBL-Versuchsstation Dethlingen durchgeführt wurden (GOTTSCHALK & SCHORLING 2000). Hierbei wurden zwei Sektionen eines Kistenlagers nach dem Lüftungsprinzip der Wurfbelüftung belüftet und die Temperaturverteilungen im jeweiligen Stapel verglichen. Eine Sektion wurde wie bisher betrieben, bei der anderen Sektion wurden Folien unmittelbar unterhalb der Lüftungsausritte zwischen Wand und dem obersten Rand der ersten Kistenreihe waagrecht angebracht. Die Folien haben die Strömung durch den Zwischenraum zwischen der Wand (an der Seite der Belüftungseinrichtung) und der Vorderfront der ersten Kistenreihe unterbunden. Der Vergleich der Temperaturverteilungen in den Kistenstapeln der beiden Sektionen zeigten nach jeweils 60 Stunden Belüftungszeit unterschiedliche Temperaturzonen (**Bild 9 und 10**). Bei der Sektion *ohne* Folienabdeckung (**Bild 9**) war der vordere Bereich wärmer ($>6^{\circ}\text{C}$), der hintere Bereich dagegen kälter ($<4^{\circ}\text{C}$) als der mittlere Bereich, der die gewünschte Lagertemperatur ($4\text{-}6^{\circ}\text{C}$) hatte. Bei der Sektion *mit* Folienabdeckung (**Bild 10**)

konnte auch im vorderen Bereich bis auf ein kleines Gebiet die gewünschte Temperatur (4-6°C) erreicht werden. Im hinteren Bereich hatte sich das Gebiet mit niedriger Temperatur (<4°C) etwas vergrößert, was auf eine bessere Belüftung, d.h. höhere Luftgeschwindigkeiten, in diesem Bereich schließen lässt.

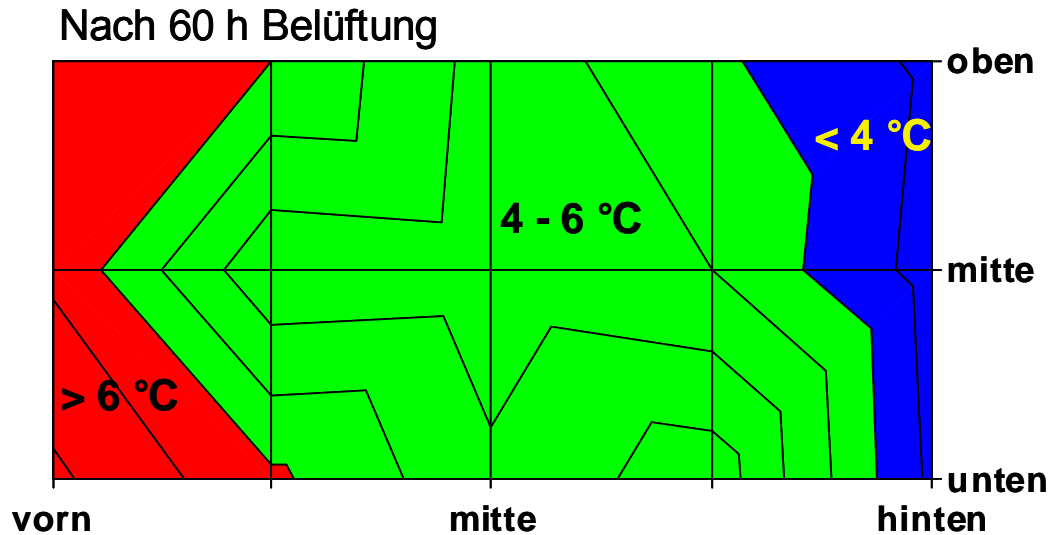


Bild 9: Temperaturverteilung im Lager mit Wurfbelüftung nach 60 Stunden Kühlagerung; *ohne* Folienabdeckung

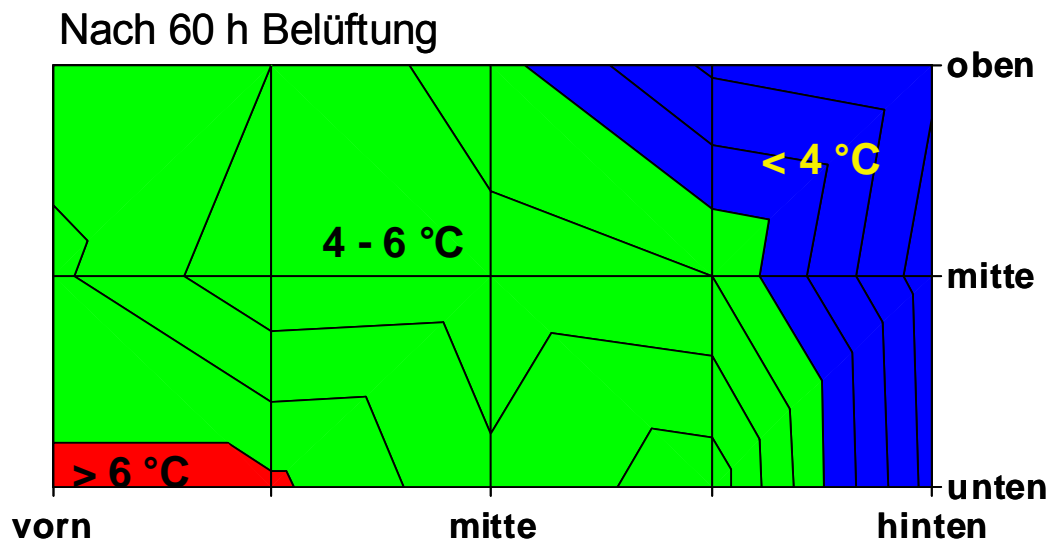


Bild 10: Temperaturverteilung im Lager mit Wurfbelüftung nach 60 Stunden Kühlagerung; *mit* Folienabdeckung

Durch einige andere einfache Maßnahmen kann die Lufrate durch die Kisten erhöht werden. Bereits durch Entnahme der obersten Kisten im Stapel findet die Zuluft genügend Raum, sich auszubreiten (**Bild 11**). Ein Strömungskurzschluss im Zuluftbereich kann weitgehend vermieden werden, und selbst die hinteren, unteren Kisten können stärker belüftet werden. Dies entspricht genau der Vorstellung einer „Wurfbelüftung“. Das heißt also, dass es zur Ausbildung der Strömung ungünstig ist, den Lagerraum vollständig mit den Kisten auszufüllen. Den gleichen Effekt kann man erreichen, indem man im hinteren Bereich durch Entfernung des Kistenstapels einen Freiraum schafft. Dann kann der hintere Raum mit der Strömung ausgefüllt werden und der Gegendruck, der zur Ausbildung des Strömungskurzschlusses führt, wird dadurch vermindert.

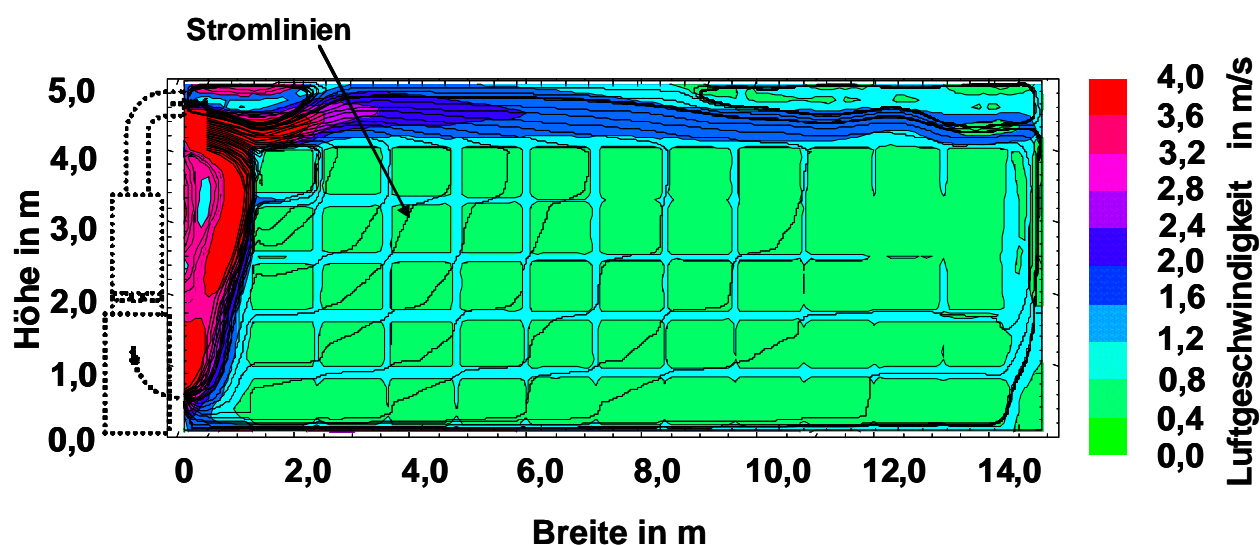


Bild 11: Berechnetes Geschwindigkeitsfeld im Kistenlager mit Stromlinien; ursprüngliche Wurfbelüftung

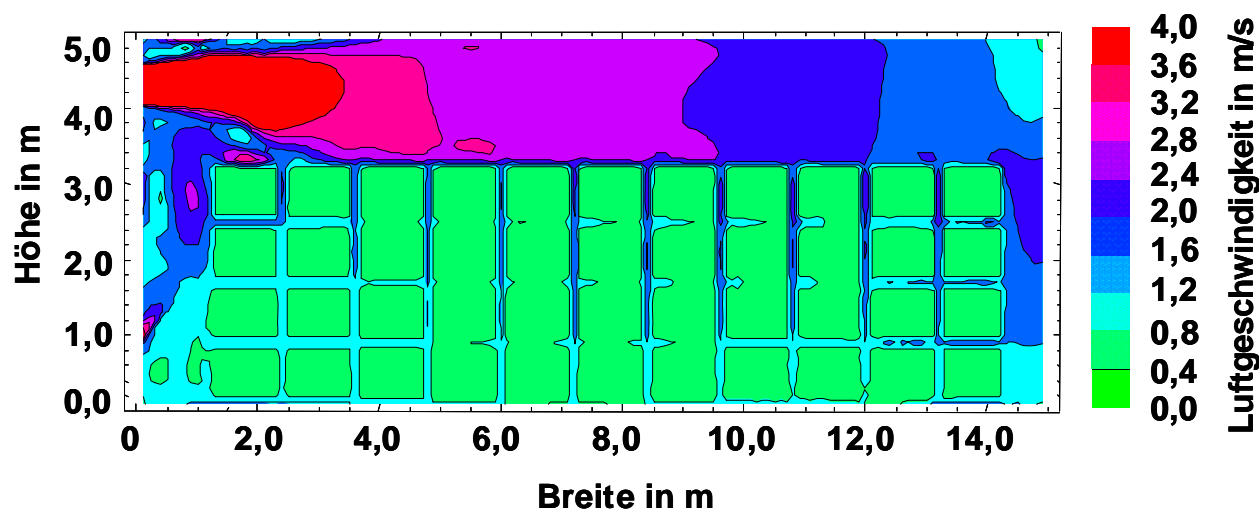


Bild 12: Berechnetes Geschwindigkeitsfeld im Kistenlager als Konturdiagramm; verbesserte Wurfbelüftung

Weitere Konfigurationen lassen sich berechnen (GOTTSCHALK 1999). Wird z.B. im Lageraum ein Gang frei gelassen, um Fahrmöglichkeiten für einen Gabelstapler zu erhalten, dann ist ein Aufstellen eines Behälterstapels zwischen Gang und der hinteren Wand, gegenüber der Belüftungseinrichtung, nicht zu empfehlen. Dieser Stapel wird unzureichend belüftet, wie die Rechnung zeigt. Sollte es allerdings nicht anders möglich sein, so kann eine Abdeckung über dem Gang Abhilfe schaffen. Im hinteren Stapel können dann wieder Luftgeschwindigkeiten von bis zu 0,05 m/s in den Kisten erreicht werden.

In den meisten Fällen ist eine Belüftungseinrichtung, bestehend aus Lüftern, Klappen und Lüftungskanälen, vorgesehen. Nur eine Zwangsbelüftung, richtig dimensioniert, kann eine ausreichende Belüftung der Kartoffeln gewährleisten. Die beste, aber auch teuerste Methode ist die Wandbelüftung, bei der die Luft durch eine geschlitzte Wand direkt in die ebenfalls passend geschlitzten Kistenstapel geleitet wird. Dabei können die ausreichend hohen Luftraten von 150 bis 300 $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, entsprechend den Luftgeschwindigkeiten von ca. 0,05 bis 0,1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ durch die Kisten eingehalten werden, die für ein rasches Abtrocknen und Abkühlen gefordert sind.

Durch Anbringen von Blockierungen an den Luft-Eintrittsschlitzten und Luft-Austrittsschlitzten der Wand und Kistenzwischenräumen können unterschiedliche Lüftungswege eingestellt werden. Entweder kann die Kiste senkrecht durchströmt werden (**Bild 13**) oder die Luft strömt waagrecht oberhalb und unterhalb der Kiste durch die Zwischenräume (**Bild 14**). Wie sich im jeweiligen Fall die Luftströmung innerhalb der Kartoffelschüttung ausbildet, kann wiederum nur die Strömungsrechnung zeigen. Bei der senkrechten Durchströmung verläuft die Strömung ‚zwangsweise‘ durch die Kiste, wie es von der Unterflurbelüftung bei Haufenlagern her bekannt ist (**Bild 14**). Es ist zu sehen, dass im Wesentlichen eine senkrechte Strömung zustande kommt; lediglich im mittleren Bereich entsteht eine Ablenkung der Strömung in Richtung des Luftaustritts. Die Kiste wird annähernd gleichmäßig mit hoher Luftrate durchströmt, was eine kurze Abkühl- bzw. Abtrocknungszeit ermöglicht.

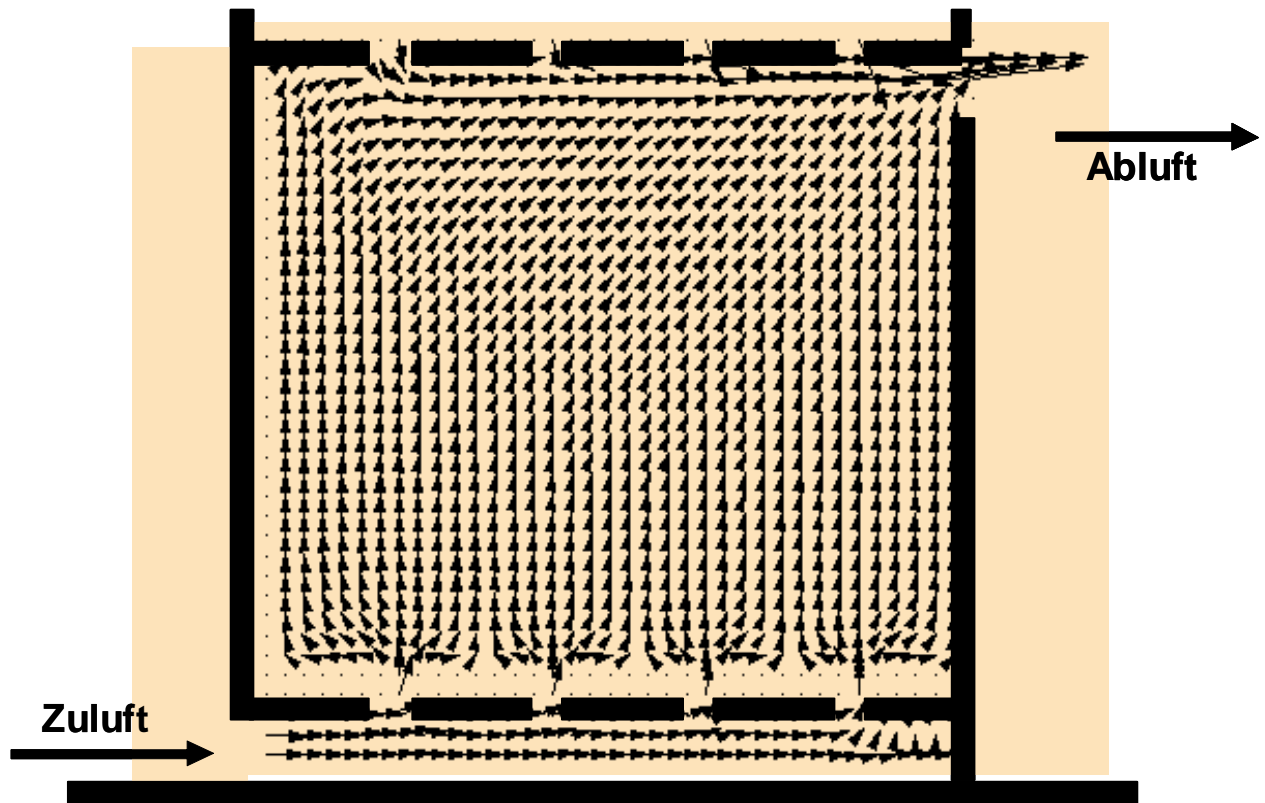


Bild 13: Geschwindigkeitsvektorfeld durch eine befüllte Lagerkiste; Zuluft unterhalb und Abluft oberhalb der Kiste

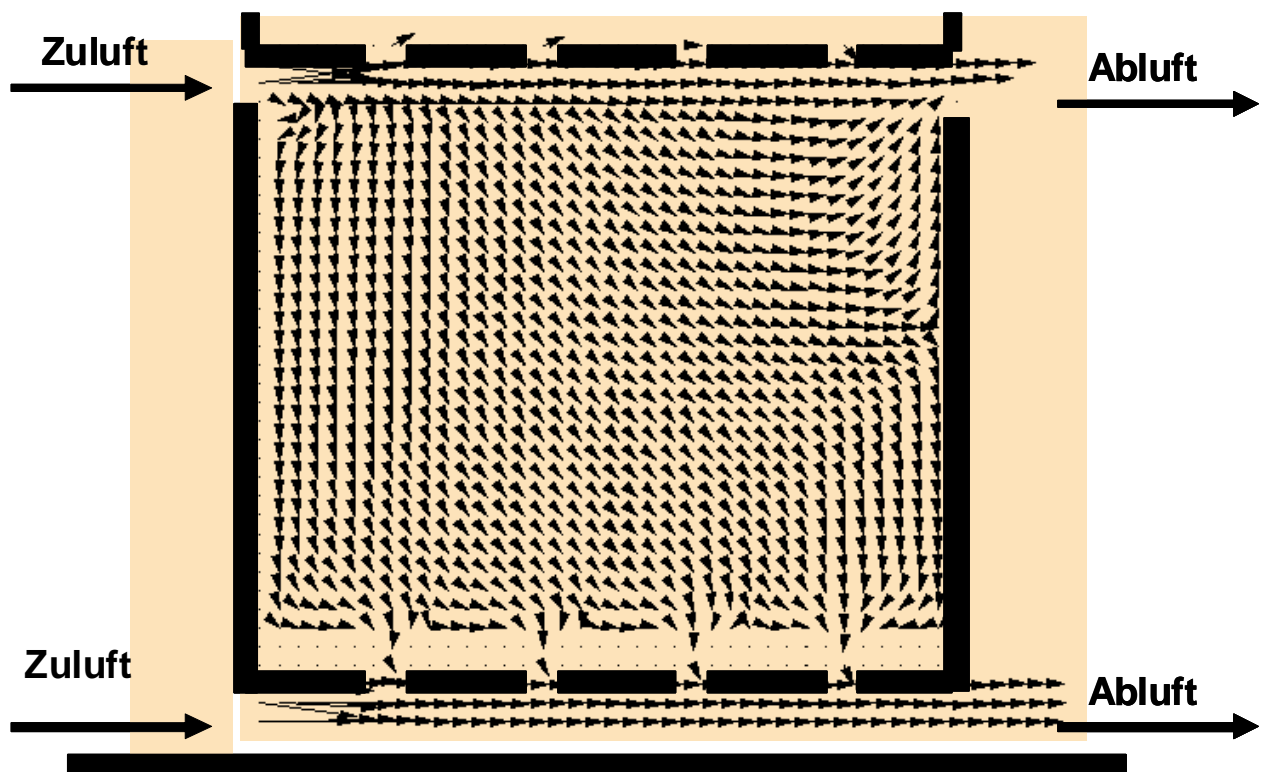


Bild 14: Geschwindigkeitsvektorfeld durch eine befüllte Lagerkiste; Zuluft und Abluft ober- und unterhalb der Kiste

Die Strömungsrechnung für die alternative Konfiguration mit waagerechter Belüftung lässt erkennen, dass die Strömung gut in die Kisten einzudringen vermag. In der rechten Hälfte tritt eine Strömungsaufteilung auf. Messungen und Berechnungen haben gezeigt, dass die Abkühl- bzw. Abtrocknungszeit ungefähr doppelt so hoch wie bei der senkrechten Durchlüftung ist, wogegen der Luftzustand für die nachfolgenden Kisten günstiger ist. Es ist folglich zu sehen, dass man mit unterschiedlicher Anordnung der Zu- und Abluftschlitze die Luftrate und damit die Abkühl- bzw. Abtrocknungszeiten beeinflussen kann.

Anwendung in der Schüttguttechnik

Die Methode der Partikelspur (**Bild 11**, s.o.) kann verwendet werden, um das Segregationsverhalten von Schüttgütern während der Befüllung von Silos zu modellieren (GOTTSCHALK & FÜRLL 2006), **Bild 15**. Bei diesem Verfahren kann auf verhältnismäßig einfache Weise eine 2-phasen-Strömung (Gas-Feststoff) modelliert werden. Dabei wird angenommen, dass wie bei einer Wirbelschichtströmung die Partikel keine Interaktion ausführen, also keine mechanischen Wechselwirkungen haben, was voraussetzt, dass die Partikel lose innerhalb einer Grundströmung mitgetragen werden, wie es bei einer pneumatischen Förderung annähernd gegeben ist. Entgegen der oben beschriebenen Methode der Partikelspur zur Sichtbarmachung der Stromlinien einer Luftströmung sind diesmal die wechselwirkungsfreien Partikel massebehaftet und unterliegen daher den Gravitations- und Trägheitskräften. Als Beispiel wird die Befüllung eines Futtermittelsilos mit einer Variante der Befüllungsanordnung aufgezeigt (**Bild 16**). Zunächst wird die Grundströmung der Luft (pneumatische Förderung) innerhalb des Silos mit den gegebenen Randbedingungen (Ein- und Abströmbedingung, Silogeometrie) mittels eines CFD-Systems berechnet. Da das Silo achsensymmetrisch bzgl. der senkrechten Mittellinie ist, genügt es, die Strömung nur für eine Hälfte des Strömungsraums zu berechnen. Als Ergebnis liegt danach das Geschwindigkeitsfeld vor. Die Partikel, entsprechend einer vorgegebenen Partikelgrößenverteilung (z.B. logarithmische Verteilung), werden dann in der Einströmöffnung eingespeist und folgen der Strömung entsprechend des Geschwindigkeitsvektorfelds, der Massenträgheit der Partikel und der Gravitation. Dies lässt sich wiederum in einem kinematisches Modell berücksichtigen (GOTTSCHALK & FÜRLL 2006). Das Ergebnis sind die schwerebehafteten Partikelspuren innerhalb des Silos. Die Segregationseffekte sind zu erkennen, indem die sich ergebenden Korngrößenverteilungen längs der Schüttkegeloberfläche berechnet werden. Verschiedene Varianten der Befüllung können so untersucht werden. Diejenige Variante kann ausgewählt werden, die möglichst eine weitgehende Gleichverteilung der Korngrößen (geringe oder keine Segregation) auf dem Schüttkegel aufweist.

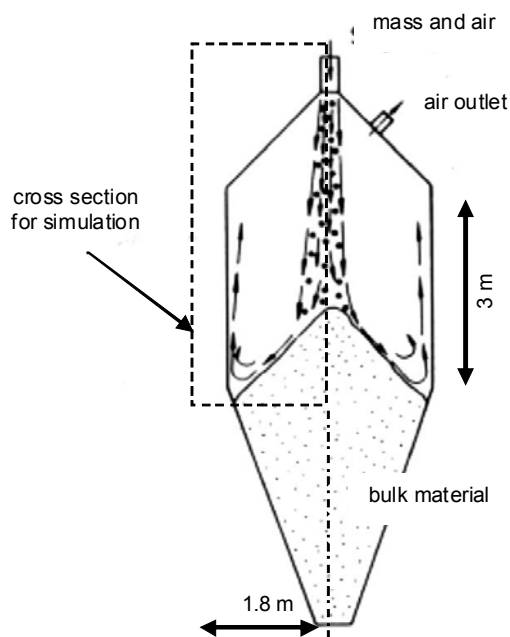


Bild 15: Befüllungsvorgang eines Silos mit Schüttgut

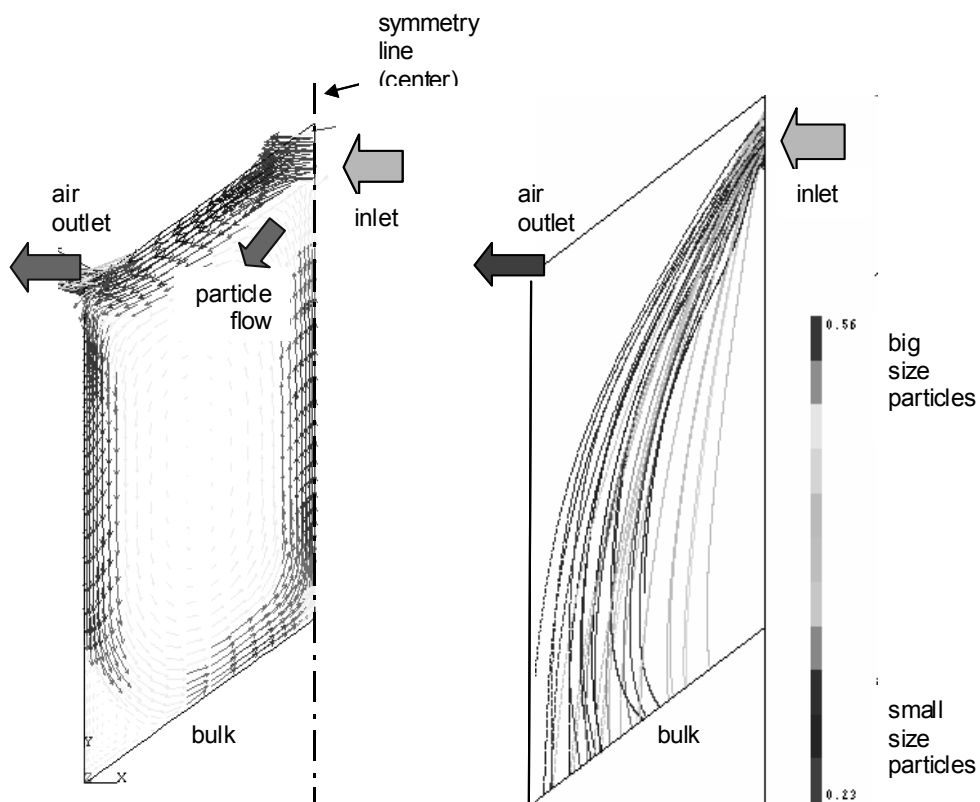


Bild 16: Berechnung des Befüllungsvorgangs eines Silos mit Schüttgut; links: Geschwindigkeitsfeld der Grundströmung; rechts: Partikelströme

Zusammenfassung

Die numerische Strömungsrechnung und Strömungssimulation ist Gegenstand der Forschung innerhalb der Angewandten Mathematik, bei der die Rechenleistungen, Robustheiten und Genauigkeiten der Algorithmen ständig erhöht werden und auf spezifische Problemstellungen angepasst werden. Innerhalb der Agrartechnik lassen sich einerseits ‚Standard‘-Probleme an kommerziellen CFD-Systemen bearbeiten, da in der Regel die Geometrien nicht sehr komplex sind. Dagegen sind häufig in der Agrartechnik zu untersuchenden Objekte biologischer Natur und zeigen stark nichtlineares und zeitvariantes Verhalten auf. Die numerischen Algorithmen müssen daher an diese Problemstellungen angepasst werden, was mit ‚offenen‘ CFD-Systemen möglich ist. Jedoch erfordert dies einen tiefen Einblick in die Numerik und Softwareentwicklung. Dennoch sind einfache Methoden möglich, um grundlegende Untersuchungen an typischen agrartechnischen Strömungsproblemen durchführen zu können. So lässt sich z.B. ein Strömungsprofil mittels eines CFD-Systems berechnen und dann entweder mit einem Wärmeübergangs-, Stoffübergangs- oder Partikelstrom überlagern.

Literatur

- BAEHR H. D., STEPHAN K. (2003):** Wärme- und Stoffübertragung. Springer, Berlin.
- GOTTSCHALK K. (1999):** Belüftung von Kartoffelschüttungen. *Landtechnik* 54, (6): 338-339
- GOTTSCHALK K. (1999):** Die Durchströmung von Kistenlagern für Kartoffeln. *Kartoffelbau* 50 (9/10): 375-377
- GOTTSCHALK K., SCHORLING E. (2000):** Optimierung der Raumbelüftung in Großkistenlagern für Kartoffeln. Tagung Landtechnik 2000 VDI-MEG, Münster, 10.-11. Okt. 2000
- GOTTSCHALK K, EZEKIEL R. (2006):** Storage. In: Handbook of Potato Production, Improvement, and Postharvest Management. Gopal, J.; Khurana, S.M.P. (Hrsg). Food Products Press, The Haworth Press Inc, Binghamton, NY, USA, 2006: 489-522
- GOTTSCHALK K, FÜRLI CH. (2006):** Proceedings: “SEGREGATION DUE TO AIR FLOW WHILE FILLING BULK MATERIAL SILOS”, 5th INTERNATIONAL CONFERENCE FOR CONVEYING AND HANDLING OF PARTICULATE SOLIDS (CHoPS-05), Sorrento, Italien
- HACKBUSCH W. (1993):** Alternative Lösung großer schwachbesetzter Gleichungssysteme. Teubner, Stuttgart
- KERN A., KRUMBIEGEL D., PÖTKE E., SCHUHMAN P. (2002):** Qualitätsschonende Lager- und Lüftungssysteme. *Der Kartoffelbau* 53: 226-233.
- LARSSON K., (1997):** Schwedische Belüftungssysteme für Großkisten. *Kartoffelbau* 48 (4)
- STATHAM O.J.H. (1997):** Kistenlagerung in Großbritannien, *Kartoffelbau*, 48 (3)
- PÖSCHEL T, SCHWAGER T (2004):** Computational Granular Dynamics. Springer, Berlin
- SCHEER A. (1998):** Vochtverlies aardappelen beperken door juiste manier van ventileren (Feuchteverlust von Kartoffeln beschränken durch richtige Art der Belüftung). *Landbouwmecanisatie*, 9,
- TUREK S. (1998):** Efficient Solvers for Incompressible Flow Problems. Springer, Berlin

NATURAL FIBRES AND THEIR POTENTIAL IN DIVERSIFIED APPLICATIONS

Naturfasern und ihr Potential in verschiedenen Anwendungen

Ryszard Kozłowski, Maria Mackiewicz-Talarczyk

The Institute of Natural Fibres & Medicinal Plants, Poznań, Poland

E-Mail: sekretar@iwn.inf.poznan.pl

1 INTRODUCTION

“GREEN LIGHTS” to renewable, biodegradable raw materials/products and to sustainable development have appeared, like a bright spot (MEADOWS *et al.* 1992) “GREEN LIGHTS” include also BAST FIBRES/BAST FIBRES PLANTS. All parts of the plants like woody core, bast, leaf, cane, straw from cereals, grass and seed can be applied for: modern eco-friendly composites used in different areas of application like building materials, particleboards, insulation boards, food feed and nourishment, friendly cosmetics, medicine and source for other bio-polymers and “fine chemicals”. They do not cause any disturbing effects of ecosystem, they can grow in different climatic zones and they recycle the carbon dioxide for the atmosphere. Resuscitation of these plants for Europe is very important because they provide better agriculture balance in this region and they will reduce a deficit of cellulosic pulp, when the population will be multiplied up to about 11.6 billion people.

Some of these green plants like flax, hemp and kenaf can be used for cleaning soil, polluted by heavy metals, by extracting and removing cadmium (Cd), lead (Pb) and copper (Cu) and others.

The share of major classes of fibers (millions of tons) is as follows: cotton 25.4; wool 1.23; other natural fibers 5.8; polyester (PES) 27.40; polyamide (PA) 4.05; polypropylene (PP) 3.0; polyacrylic (PAN) 2.5. Man-made fibers hold their relative market position at 54.8 % while cotton, wool and silk gained market shares to 37.4 % of the world textile market, other natural fibers 8 %. A world population of 6.57 billion corresponds to an average per capita consumption of 10.5 kg of fiber. The global jute, sisal, flax, and ramie output reaches 3.25 million tons a year on average. The consumption of fibers in millions of tone in 2006: man-made fibers 40.8; cotton, wool and silk 27.9; other natural fibers 5.8. The third section with kapok, ramie, flax, hemp, jute, sisal and coir is anticipated to have stagnated at 5.8 million tones. Global flax market is growing under a strong influence of linen products from China (Saurer Report 2006/2007).

Table 1: Estimated World-wide Tonnage of Fibrous Raw Materials from Agricultural Crops in Thousands Tons

Crop	Plant component	Availability
Cereals		
barley	straw	218,500
oats	straw	50,800
rice	straw	465,200
rye	straw	41,900
wheat	straw	739,700
corn	stalks	727,300
Cotton	lint	18,000
	linters	2,300
	stalks	35,900
	mote	900
Bast fibrous plants ^{*/}	straw	25,000 ^{*/}
Seed grass	straw	2,000
Oil flax	straw	3,000
Sorghum	stalks	104,700
Sugarcane [5]	Bagasse [5]	100,200
Total		2,535,400

Source (ROWELL *et al.* 1997)^{*/} Estimated by INF

Another possible sources of straw, which could be used as raw materials for e.g. composites and as energy crops are given in **table 2**.

Table 2: Fibre plants for producing raw materials

Annual ryegrass	Lupines	Sunflower
Bamboo	Meadow foxtail	Pseudocereals
Black locust	Miscanthus	Tall fescue
Broom	Rape	Timothy
Cardoon	Root chicory	Topinambur
Common reed	Rosin weed	Willow and poplar
Cordgrass	Safflower	Amaranth
Eucalyptus	Soybean	Quinoa
Giant knotweed	Salicornia	Microalgae
Giant reed		Triticale
Groundnut		

These fibres and other lignocellulosic raw materials are splendid polymers, yet given us in difficult form. They have to be extracted from plants, cleaned, refined and modified. Besides traditional technologies in use and traditional applications failed to meet demand of XXIth century.

2 FUTURE NEEDS

What needs, what recent achievements/ future applications call for the revival of the oldest known GREEN FIBRES and related products FIBROUS PLANTS can provide?

2.1 IN THE AREA OF FIBRES

One of the major natural fibres is cotton; the world area under cotton fluctuates between 30 and 36 million ha. In the season 2007/2008 the cotton cultivation area in the world decreased to 33.363 million ha. The main global reason for this reduction of area was severe competition with food/fodder as well as corn, soybean, cereals used for energy.

The production of cotton lint (fiber) in the world in this season totalled 26 247 000 tons.

The average yield of cotton lint in 2007/2008 in the world was observed 787 kg/ha.

The estimated data regarding the season 2008/2009: 31 167 775 ha of cultivated area, production of cotton lint: 24 143 000 tons and the average yield: 775 kg/ha of cotton lint.

It means a slight decrease of the estimated world cotton area, production and yield (ICAC 2009).

Production of natural fibres is expected at the level of 38 million tons – 40 million tons/year in the middle of the XXI century (KOZŁOWSKI & MANYS 1997) That demand should be responded by the rise of cotton production over 27 million tons/year, the rest being man-made cellulose and/or bast fibres, modified, modernised (JOHNSON 1996, MCINTYRE 1994). Here we have the first “green light” for expanded use of green fibres in textiles for healthy, comfortable clothing, which – after life time – will be fully recyclable/ biodegradable, nourishing the next plant/ people generations.

There are still two parallel technologies in progress:

- TYPICAL LONG STAPLE FIBRE PRODUCTION/ PROCESSING. Though difficult in handling traditional long flax/ ramie/ hemp are still produced/ processed by slightly modernised methods (KOZŁOWSKI *et al.* 1998). Especially flax/ramie provides bleached/softened in preparation/ spinning process yarns of high strength, luster and low linear mass.

These products include:

- 100% linen or ramie knitted apparels. Perfect hygiene/ comfort properties make them specially attractive for hot/ humid climates (KOZŁOWSKI & MANYS 1998)
 - 100% linen/ramie fabrics – from almost transparent to terry type, boasting high “Wash and Wear” property when finished with liquid ammonia (KOZŁOWSKI & MANYS 1996)
 - 100% linen antybedsores bedding, developed at the Institute of Natural Fibres for ill/ aged people. Tests conducted in Polish Academic Clinic showed that no bedsores occurred when such bedding was used (MANYS & MAZUR 1998.)
 - 100% linen knitted bedding – which according to the newest research – provide the deepest sleep and best mood recovery. These tests initiated by Japanese scientists are conducted at the Institute of Natural Fibres, Poznań
 - hemp/jute sport and Friday-wear (KAUSHIK & AGARWAL 1997)
 - hemp/linen hygienic, comfortable boots (shoes)
- THE NEW CHANCE for BAST FIBRES is seen in fibre adjustment to the universal, modern short/long spinning systems. To profit from immense progress in this spinning machinery green fibres must become cleaner, shorter, thinner, and softer. The finer the fibre, the narrower fineness and staple diagram the easier the processing, the higher the bast content, the better the quality of yarns/products. It is exactly as difficult as it looks simple (KESSLER & TUBACH 1994).

Some technologies start the process of bast fibrous plants modification already in the field (WEIGHT 1992 TEMAFA 1993). Some combine in technological chart mechanical/chemical treatments like new US Patent 5 666 696. A new developed by Rieter-Elitex bast breaking/ cleaning/refining machine “RČZ-120-3” combines all the three processes into very effective one (JANOSIK *et al.* 1999). The new, mainly blended bast fibre yarns differ from tradi-

tional ones. They are of lower linear mass, lower tenacity yet of higher elongation and can be spun at higher speeds.

These yarns can be used in wide ranges of woven and knitted apparels, underwear, active wear, healthy textile shoes, socks and other textile items. Some of them are attractive, because lignin play a role as excellent UV blocker. Special treatment likes enzymatic; liquid ammonia, plasma and corona treatment provides new promising features and properties of fibres and fabrics like "fineness" and crease resistance. Concluding, in textile area of application these green fibres now are better adapted to modern processing techniques, which develop new clothing/home furnishing items, biodegradable non-woven and geotextiles.

2.2 GREEN FIBRES FOR OTHER THAN TEXTILE PRODUCTS

Science and technology continue to make significant inroads in potential use of green resources and industry's interest is growing. Even the giant chemical companies have recognised this and are turning into "agrobusiness", as a future source of fibres, Eco-friendly polymers, fine chemicals and second generation of bioethanol or n-butanol.

Green fibres/ bast fibrous plants for pulp

In the cellulose industry the interest is growing in production of pulp and paper from agro-based lignocellulosic raw materials such as bagasse, bamboo, reeds, esparto, hemp, flax, abaca, sisal, grass, etc. The amount of pulp made of non-wood resources is still growing. In 1995 the capacity of non-wood pulp production was 6.8 % in total, and the in 1998 was about 11 %. The growing contribution of cellulose of agro-plant origin to the world production of pulp and paper is noticed. Further increase in the contribution of agro-plant cellulose is foreseen and it should reach about 15 % in 2010 (the total production in the mentioned year is estimated to be about 480 millions tons). In addition to cellulose, the main components of lignocellulosics are lignin, hemicelluloses, and pentosans.

A perfect example of the use of JUTE for pulp (for fibres but also suitable for non-textile applications) is given by the SOUTH INDIA VISCOSE COMPANY (KESHAVAMUTRY 1996, JAYACHANDRAN & RANA. 1999).

In the U. S. when the Department of Agriculture was searching for an economic source for agriculture fibre for paper industries KENAF and HEMP have been chosen as a prime candidate to prolong the life of North America forests (ROWELL & HARRISON 1993). Malaysia region produces high quality paper, exported to top-advanced countries and in visible rise of the production of coir, used for pulp.

Similar developments are in progress through the entire tropical zone (GUSMAN-FERRAZ 1998). Besides jute, kenaf, sisal, abaca, crops like bamboo, reeds, esparto, grass and badges are in concern (DOPPLER 1998).

The Institute of Natural Fibres developed an environmentally safe technology for producing bleached pulp from hemp grown on land polluted by metallurgic industry.

The productivity of hemp biomass is very high: 2-2.5 times higher than can be produced from the same area of forest. The new hemp cultivar can produce more than 20 ton of dry mass.

The concentration of alpha-cellulose in the raw fibre (bast), reaches the level of 90 % while the concentration of cellulose in softwood and hardwood ranges from 50-54 %.

Very promising for pulping of annual plants are advanced solvent methods like:

Acetosolve (Germany) – using solution of 93 – 85 % acetic acid and addition of 0.1 % HCL, and MILOX (Finland) – using formic acid;

- Alcell method, employing ethyl alcohol; Steam explosion pulping (SEP) (CANADA) – using chemical impregnated raw material cooked with saturated steam;
- Ethanol pulping (Egypt) – using ethanol/water, ethanol/water/NAOH solutions;
- Peroxy-compounds-using peroxymonosulphate anion (HSO_5)

Also future in cellulose industry opens before the Alcell® process - the technology of pulping developed by Repap Enterprises Inc., Canada. Trials using organic solvents to dissolve and separate wood components was first documented in early 1990's.

Green fibres/ bast fibrous plants for biocomposites, based on lignocellulosics

Biocomposites include a wide range of products for different applications ranging from construction or insulation panels made of wood pieces, particles and fibres, through special textiles (geo-textiles and non-woven textiles), to plastic products based on polymers filled with lignocellulosic particles.

Fibre plants are seen as promising lignocellulosic raw materials for different applications.

Biodegradable, recycling of these lignocellulosics is proposed, when combined with natural resin they are as strong as steel yet of lower density. Such composites may be used for vehicles, building elements, furniture, machine constructions, insulating materials, gardening/agriculture equipment, tropical housing and even grape holding structures.

Application examples of composite materials containing lignocellulosic components:

glue-lam wood, plywood, particleboard, fibreboard, MDF, OSB, lignocellulosic-mineral particleboards and composites, special functional (water, fire, bio resistant), thermosetting polymer composites, thermoplastic polymer composites, natural polymer composites (based on starch, polyhydroxy butyric and polylactic acid), non-woven, geo-textiles, absorption chemotextiles (bentonite, carbon active, silica, hydrogel, etc.).

Utilisation of bast fibres in nonwovens. Appeared in 1940s, were later developing with different dynamics in various countries. Nonwovens technology was further improved and developed, particularly concerning bonded nonwovens based on valuable chemical fibres and synthetic binding agents facilitating manufacture of better and more useful products for technical usage, clothing and household use.

The application of nonwovens is very wide ranging from furniture to the geo- and chemotextiles.

An example of special utilisation of nonwovens can be geotextile for and reinforcement earth structures like landfills, slopes and embankments like grass mats.

Prospective application of composites. Composite materials find their application in car, aircraft, railway and truck industry. Polymers have decreased the use of steel and ferric alloys in car construction from 80 % used in 1965 to 60 % in 1995. This field of polymers application has already been pioneered by Henry Ford, who designed the car body entirely in polymer, a car „made of soybean” in 1941. In 1953 a Chevrolet Corvette had many parts made of polyester resins reinforced with different fibres allowing the weight of the car to be decreased by about 85 kg and big savings connected with costs of gears.

According to Mercedes, application of natural fibres in automotive industry may be as follows: different types of fillings, reinforcing fibre and in some cases replacement of glass fibre, one of the component of hybrid composites, degradable composite of natural fibres and natural polymers. According to Mercedes-Benz Company each manufactured car consume about 5 kg on natural fibres. The great advantage of composites reinforced with fibres is that when the fibres are arranged parallel to directions of applied forces (unidirectional laminates), the possibility of utilisation of anisotropic properties of material for structure arises (crushed fibres, embroidered and 3-D weaved structures). The properties of this new material crushed, can be compared with regular glass fibre or reinforced polymers in normal conditions, for instance in automotive industry, road construction, irrigation systems, landfills, furniture industry and also in sport.

Particleboards. Composition boards, including particle board (extruded and plate-pressed), and fibre boards, especially medium-density fibre (MDF) board, are quite common in construction, furniture and interior panelling. The most common raw material used is wood, but many countries successfully use other agriculturally based residues like flax and hemp shives, jute stalks, bagasse, reed stalks, cottons stalks, grass-like *Miscanthus*, vetiver roots, rape straw, oil flax straw, small grain straw, peanut husks, rice husks, grapevine stalks and palm stalks. These cheap raw materials can be valuable in lignocellulose board production from wood particles (KOZLOWSKI & PRZEPIERA 1987, KOZLOWSKI, MIELENIAK, PRZEPIERA 1994).

Medium Density Fibre Boards (MDF board) consists 82 % of fibres from wood or annual plants, 9 % gluing amino resin, 1 % parafin and 8 % water (KOZLOWSKI & HELWIG 1996). There is growing interest in using annual plants to make boards because annual

plants are renewed each year, and produce three times more cellulose per year than ring-growth in trees.

Insulating Boards. Residues of annual plants such as rape or canola straw, oil flax straw, small grain straw, reed and reed wastes are useful for production of insulating boards for building industry, important for houses in earth-globe areas. Hemp also makes excellent insulating boards (KOZŁOWSKI & HELWIG 1997).

Bast fibrous plants as a source of food, fodder, pharmaceutical products and cosmetics. Flax and hemp seeds are perfect raw materials for agriculturally based industries such as the production and processing of food, of natural pharmaceuticals and cosmetics, or of paint varnishes.

The Institute of Natural Fibres has developed food additives based on linseed oils, which are high in lignan and unsaturated fatty acids (mainly linolenic and linolic acids) (KOZŁOWSKA & BISKUPSKI 1998). Brain, spinal cord and its branches are made up of essential fatty acids, particularly linolenic acid. We literally think with these acids – they are the brains! Linseed-based food additives also contain lignans, which seem to be capable of slowing the cell division of some tumours. Lignans also improve urinary function, helping prevent inflammation of the kidneys. Linseed proteins and mucilages are used in food products such as ice cream, powdered sauces and soups to improve smoothness and viscosity (KOZŁOWSKA & BISKUPSKI 1998).

There is a similar market potential for pharmaceutical and cosmetic products based on linseed and hemp seed, especially in the area of “natural products”, which has become a key term in marketing success. Hemp seed’s nutritional values are already well documented: it is an excellent source of balanced essential fatty acids, particularly omega-3, which is responsible for the proper growth and functioning of the body. Leaves and unripe seeds can be used to produce a fodder that is rich in protein and vitamins. The amino acid and carotenoid content of hemp fodder is similar to that of traditional fodder like Lucerne and clover green meal, but with lower levels of cellulose.

Bast fibrous plants for agro - fine chemicals. Latest discovery showed that some of these fibrous plants are rich source of not only phytoestrogens (lignans) mentioned above, but promising natural medicine cyclopeptides. In addition to cellulose, the main components of lignocellulosics are lignin, hemicellulose and pentosans. The uses of isolated lignin in the chemical industry grow continually. It is used as a substitute for phenol-formaldehyde resins in composites and as a natural polymer that has applications for agrochemicals, packaging,

laminates, moisture barriers, stiffening agents (boxboard), friction materials (brakes, pads), wood adhesives (plywood, waferboard, particle and board, fibre board), plastic moulding (automotive), foundry mould binders, antioxidants and as nano-lignin for UV-barriers.

3 CONCLUSIONS REGARDING DIVERSIFIED USES OF GREEN FIBRES

Global trends towards sustainable development have brought to light natural, renewable, biodegradable raw materials, among them bast fibres. Science and technology continue in extending their use in textile and other industries.

Recent achievements and new applications of green fibres and associated products of bast fibrous plants can form the background for following conclusions:

- Fast growing population, eco- and health awareness creates large space for future expansion of other than cottons natural cellulosic fibres.
- Present achievements in breeding/production/processing extended the use of bast fibres in textiles. To make the way for these, difficult in processing fibres, into textile products being beyond their reach for centuries, it was necessary to develop:
 - new, refined bast fibre types, adapted to modern spinning systems
 - new, softer, finer 100 % bast or bast blended yarns, amongst them knitting yarns
 - new crease resistant finishing treatments
 - new products, which could meet the needs of demanding apparel sector
- All the textile goods made on the basis of green fibres can boast high comfort/health properties and are ecological items. They can be labelled as "NATURAL" which is the key to market success.
- Green fibres/bast fibrous plants are used, thanks to research and development, in growing amounts for nonwood pulps.
- Green fibres/bast fibrous plants will also be used in growing amounts in a wide spectrum of biocomposites materials. Being lignocellulosic they can be combined with man-made or natural polymers to provide a wide range of useful composites in textiles (including geotextiles and non-woven).

Green fibrous plants provide valuable by-products like seeds, waxes, fragrances, and pigments. These may be used for food, fodder, pharmaceuticals, cosmetics, and body-care items.

4 THE POTENTIAL AND PERSPECTIVES OF THE WORLD LINEN MARKET

4.1 MAIN AREAS OF FLAX CULTIVATION AND PROCESSING

4.1.1 Fibre Flax

The leading world producers of fibre flax are France (67,000 ha) (DAENEKINDT), Belgium (12,030 ha), the Netherlands (2,500 ha) and China (110,000 ha) (Euroflax Newsletter No 29 and 30) - data for 2008. But in 2007 are noticed significant cultivated areas Russia (81,000 ha) (SURINOV), Belarus (78,500 ha) and in Ukraine (12,000 ha). Fibre flax is rarely cultivated in USA, but linseed cultivated area reached 154,500 ha in 1999 (Agricultural Statistics 1998). Brazil and India are processors of imported flax.

The total area of flax and hemp cultivation in Europe, which have been officially contracted in 2007: flax: 95 117 ha and industrial, fibrous hemp: 14 199 ha

The European Union supports heavily with a subsidy of about US\$ 800/ ha its flax farmers and scutchers.

4.1.2 Flaxseed (Linseed)

The significant linseed cultivation areas in the world are in Canada, Argentina, Chile, USA, India. Canada is the world's largest exporter of linseed for crushing. Annual planting of oilseed flax: 700,000 to 900,000 hectares. Up to 1,100,000 tons of seed/year.

4.2 LINEN PRODUCTION AND PROCESSING

Table 3: Comparison of the World Production of the Major Natural Fibres

Natural fibres share within total fibres production is around 46 % of which:	
in 2007 [tons]	
cottons lint	26,247,000
flax fibre and tow	751,000
hemp fibre and tow	83,000
total jute, kenaf and alike fibres*	2,994,520
total, hard fibres*	812,000 (where sisal 223,400)
world fibre crops primary production	30,887,520

Source: (Euroflax Newsletter No 29 and 30* FAO Statistics)

4.2.1 Flax Fibre Producers in Europe

Most of scutching mills in Europe is located in Belgium, the Netherlands and France as well as in Russian Federation, Ukraine, Belarus and Poland.

4.2.2 Linen Yarn Producers. Biggest spinning mills in Europe are located in Italy, Belarus, and Russian Federation

China grows and processes fibre flax on a large scale. The harvesting is still often conducted manually, but processing is done by big, scutching mills e.g. in China and huge linen companies.

4.2.3 Linen Fabrics Producers

Pure and blended linen fabrics are produced in many countries in the world. In Europe the main producers of fine fabrics act in Italy, Ireland, China, Russia, but also in Lithuania and Poland. It is worth to mention that Russian Federation produce almost the biggest amount of linen fabrics in Europe, and we have seen that the quality and design of pure linen fabrics including jacquard as well as in blends with e.g. silk is outstanding. The linen fabrics are produced in Poland, the Czech Republic and Rumania as well. In our country 5 linen companies produce linen fabrics for cloth and household purposes, including jacquard design.

4.3 LINEN CONSUMPTION

Structure of different linen applications in outlets is approximately as follows: cloth 54 % of outlets, household goods-20 %, technical applications-17 % and furniture coverings - 9 %. Western Europe consumption of linen is stable. After 1990 Eastern Europe experienced a sharp decline in flax growing, retail sales and consumption. In the USA consumption has increased by nearly 50 % over last decade (Flax 2000). In Latin America, particularly in Brazil, a strong rise in consumption from a low base is observed. Total world fibre consumption of all sorts and for all uses (excluding glass fibre) in the year 2000 is estimated to be 57 million tons. Textile and non-textile flax fibre output is estimated to be world-wide about 210,000 tons (max 230,000 tons). So linen consumption would represent more or less 0.4% of total textile consumption. Since flax fibres have a very high waste factor in processing the final proportion of flax in products is about 0.3 %.

4.4 INTERNATIONAL TRADE OF LINEN FIBRE AND PRODUCTS

Concerns to main four regions: Western Europe, Eastern Europe, Asia (China, Japan), and the North America. Three first regions produce and consume linen, exchanging

relevant products; the fourths zone still consume products produced by the other three zones (MACKIE G). In Europe the trade mark of linen is "L" as Lin, Lino, Linen, Leinen, and Linnen (MACKIEWICZ-TALARCZYK & MACKIE 1997). MASTERS OF LINEN is the collective trademark of the Western European linen industry. In Northern Ireland the Irish Linen industry is represented by Irish Linen Guild and their symbol is a registered mark. EURATEX it is The European Apparel and Textile Organisation, located in Brussels, Belgium.

4.4.1 Linen Export

Exporters of finished product-are mainly from Europe. European Union both imports and exports. Quotas restrict Chinese and Ex USSR exports of linen yarn and fabric into the E.U. The quota system in force in the E.U. has the effect of limiting flax and ramie yarn imports and fabrics to fewer than 10,000 tons per year. Nevertheless China shows a smooth growth in output and flax fiber usage, including exports, rose by 50 % from 1980 to 1990 (MACKIEWICZ-TALARCZYK & MACKIE 1997). During the period 1993 - 1996, Canada experienced a significant growth in demand both for flax oil and meal. The bulk of the linseed oil was exported to China and the United States. Major buyers of linseed meal are the African countries (MACKIE).

4.4.2 Linen Import

South East Asia and in particular Japan and Korea, are importers of yarn and fabrics.

About 16,000 tons a year of linen in fabrics are imported either as cloth or as finished garments by USA, because North America produces almost no linen cloth (MACKIEWICZ-TALARCZYK & MACKIE 1997).

4.5 LINEN MARKET CONDITIONS AND PERSPECTIVES

European and national programs designed to encourage an increase in flax growing succeeded in encouraging growers into the market.

Linen consumption in Europe in the household textiles sector has declined slightly, whereas demand for linen in the clothing industry continues to increase, in line with the trends for apparels to be made from 100 % natural fibres. Generally people love comfortable, healthy, eco-friendly clothes and household textiles, so we do trust in brilliant future for green fibres, especially for flax, but for industrial hemp, in which we notes rapidly growing interest in Europe and the Americas.

REFERENCES

- Agricultural Statistics (1998):** United States Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Washington
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung –Referat 321–,** Frankfurt am Main, Germany
- Daenekindt A.:** Algemeen Belgisch Vlasverbond Documents and Data, Kortrijk, Belgium
- DOPPLER W. (1998):** Farmer's Business and Participation for Sustainable Agriculture. Proc. of SATHLA Intern. Conference. 9-13 March, 1998. Rio de Janeiro, Brazil.
- Euroflax Newsletter No 29 and 30 (2008):** Institute of Natural Fibres, Poznan, Poland,
- FAO Statistics, STATISTICS TABLES ON HARD FIBERS AND JUTE, KENAF AND ALLIED FIBERS;** Document prepared by the Commodities and Trade Division of FAO/Rome
- Flax 2000:** The future of flax in the EC, Communication 429; Agricultural Economics Research Institute LEI, The Hague, The Netherlands
- Geodicke S., Kalleder A., Reinhard R., Schmidt. S. (1999):** Nanobinders for Natural Composites. Book of Abstracts of NATO Advanced Research Workshop on Polymers and Composites for Special Applications. 21-25 June, 1999. Poznan, Poland.
- GUSMAN-FERRAZ J. M. (1998):** Sustainability and Land Reform Policy. Proc. of SATHLA Intern. Conference. 9-13 March, 1998. Rio de Janeiro, Brazil.
- International Cotton Advisory Committee (ICAC) – January 2009** (data collected by Andrzej Drozd, Gdynia Cotton Association, Derdowskiego 7, 81-963 Gdynia, Poland, tel.: +48 (58) 620 75 77, www.cotton.org.pl)
- JANOSIK S., MAIXNER V., TESSAR A., MANYS S., MANYS B. MAZUR E. (1999):** New Era in Flax Processing. Proc. of Hemp, Flax and Other Bast Fibrous Plants Production, Technology and Ecology Symposium. 24-25 Sept. ,1998. Poznan, Poland.
- JAYACHANDRAN K., RANA A. K. (1999):** Jute Fibre for Reinforced Composites and its Prospects. Book of Abstracts. of the 5th Intern. Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials. 21-25 June, 1999. Poznan, Poland.
- JOHNSON T. N. F. (1996):** World Fibre Demand, 1980-2050. Textile Asia, August 1996.
- KAUSHIK R. C. D., AGARWAL D. R. (1997):** Jute – The Golden Fibre – Rediscovered. Proc. of World Textile Congress on Natural and Natural-Polymer Fibres. 9-11 July, 1997. Huddersfield. England.
- KESHAVAMUTRY G. S.(1996):** Cellulose Fibre – Indian Scenario. Proc. of the TI's 77th World Conference. 22-23 May, 1996. Tampere, Finland.
- KESSLER R. W., TUBACH M. (1994):** Interdisciplinary approach for New Flax Products. Proc. of the Fibre Flax World Congress. 22-25 May,1994. New Haven, U. S. A.
- KOZLOWSKA J., BISKUPSKI M. (1998):** Characteristic of Cannabinoid Profiles Occurring in Different Phenotypes of Cannabis. Proc. of Hemp, Flax and Other Bast Fibrous Plants. Production, Technology and Ecology Symposium. 24-25 September, 1998. Poznan, Poland.
- KOZLOWSKI R., HELWIG M. (1996):** Critical Look on Cellulose Modification. Proc. of the Intern. Symposium on Cellulose Modification. December 1996. Honolulu, U.S.A.
- KOZLOWSKI R., HELWIG M. (1997):** Lignocellulosic Polymer Composites. Proc. of 4th Intern. Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials. Cairo 1997.
- KOZLOWSKI R., MACKIEWICZ-TALARCZYK M. (2000):** Inventory of World Fibers and Involvement of FAO in Fiber Research; Proceedings of the Fifth International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials (ICFPAM) and NATO Advanced Research Workshop on Poly-

mers and Composite for Special Applications, 21-25 June 1999, Poznan, Poland (Molecular Crystals and Liquid Crystals, Special Issue. Gordon and Breach Publishers, New York, 2000), 16 p.

KOZŁOWSKI R., MANYS S. (1996): The Properties of Liquid Ammonia Treated Linen. Proc. of 212th ACSNM. 25-29 August, 1996. Orlando, U.S.A.

KOZŁOWSKI R., MANYS S. (1997): Coexistence and Competition of Natural and Man-made Fibres. Proc. of the 78th World Conference of the Textile Institute. 23-27 May, 1997. Thessaloniki, Greece.

KOZŁOWSKI R., MANYS S. (1998): Linen Knitted Apparel – Speciality for Hot Climates. Proc. of IFKT 39th Intern. Congress. 4-8 October, 1998. Busto, Italy.

KOZŁOWSKI R., MANYS S., HELWIG M., KOZŁOWSKA J. (1998) Hemp as a Source for Food and Fibre. Proc. of Intern. Conference on Meeting the Challenges of Agriculture. Canada.

Kozłowski R., Mieleniak B., Przepiera A. (1994): Plant Residues as Raw Materials for Particleboards. Proc. of the 28th Intern. Particleboards Composite Materials Symposium, W. S. U. Pullman, U. S. A.

KOZŁOWSKI R., PRZEPIERA A. (1987): Method of Continuous Production of Insulating Boards from Plant Wastes. (Metoda ciągłej produkcji płyt izolacyjnych z odpadów roślin. Prace IKWN, Rocznik XXXI. (in Polish).

LEÃO A. (1998): Tropical Natural Fibres. Proc. of Hemp, Flax and Other Bast Fibrous Plants and Ecology Symposium. 24-25 September, 1998. Poznan, Poland

MACKIE G.: International Textile Consultant, Drumbo, Lisburn, Northern Ireland

MACKIEWICZ-TALARCZYK M., MACKIE G. (1997): World Linen Market – Present Status and Future Prospects. 1997. Natural Fibers-Włókna Naturalne. Yearbook of the Institute of Natural Fibers XLI 1997, Poznan, Poland.

MANYS S., MAZUR E. (1998): Linen for aged/ ill people. Nord Flax Symposium. 10-12 August, 1998. Tampere, Finland.

MCINTYRE (1994): The future of man-made fibres. Proc. of the Intern. Symposium on Textile Science and Technology, 26-28 October, 1994. Yokohama, Japan.

MEADOWS D. H., MEADOWS D., RANDERES L. J. (1992): Beyond the Limits. Chelsea Green Publishing Company

ROWELL R. M., HARRISON S. M. (1993): Proc. of the Intern. Kenaf Conference, March 1993, Ca, U. S. A.

ROWELL R. M., YOUNG R. A. J., K. ROWELL (1997): Paper and Composites from Agro-Based Resources. 1997. Lewis Publishers, New York, London, Tokyo

Saurer Report: The Fiber Year 2006/ 2007

SURINOV A., General Director, State Committee of the Russian Federation on Statistics, (GOSKOMSTAT of Russia), Dep. of Foreign States Statistics and Intern. Cooper., Moscow, Russia

TEMAFA – FLACHS AUFBEREITUNG. (1993): Proc. of the 3rd European Workshop on Flax. 15-17 June, 1993. Bonn, Germany.

U. S. Patent 5 666 696.

WEIGHT. H. (1992): Claas Erntetechnik für Nachwachsende Rohstoffe. Proc. of the Intern. Seminar. 9 July, Harsewinkel, Germany.

Aktuelle Ernteverfahren für Industriefaserpflanzen

Recent developments in harvesting systems for bast fibre crops

Hans-Jörg Gusovius

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100
E-Mail: hjgusovius@atb-potsdam.de

Kurzfassung

Durch den gezielten Einsatz entsprechender Technologien kann neben pflanzenbaulichen Maßnahmen bereits im Verfahrensschritt der Ernte und Bereitstellung von Faserpflanzen entscheidend Einfluss auf die Auswahl und die Effektivität der Aufbereitungstechnologie sowie die Qualität der Produkte genommen werden. Daher erfolgt die Darstellung aktueller Ernte- und Bereitstellungsverfahren für Flachs bzw. Öllein sowie Hanf. Die Auswahl verdeutlicht den gegenwärtigen technischen Stand in diesem Bereich der Wertschöpfungskette. Verwiesen wird darüber hinaus auch auf einige neue Entwicklungstendenzen zur Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit.

Keywords: Ernteverfahren, Faserpflanzen, Flachs, Öllein, Hanf

1 Bereitstellungsverfahren für Flachsstroh

Da der Anbau von Faserflachs in den vergangenen Jahren in Deutschland fast vollständig zum Erliegen gekommen ist, erfolgt lediglich eine zusammenfassende Übersicht über die relevanten Ernteverfahren.

Bei der Bereitstellung von Flachsstroh zur Langfasererzeugung werden überwiegend solche Maschinen und Geräte genutzt, die sich in ihren Wirkprinzipien von konventionellen Ernteoperationen des Mähens unterscheiden. Die Gründe dafür liegen vor allem in den spezifischen Anforderungen der nachfolgenden Prozesse während des Aufschlusses und der weiteren Verarbeitung der Pflanzen zu Fasermaterialien in textiler Qualität. Da für die relevanten Aufbereitungsverfahren die Parallellage der Pflanzestängel zwingend notwendig ist, sind die Maschinen für die Ernte, das Wenden sowie Pressen in Ballen so konstruiert, dass der genannten Anforderung während der gesamten Bereitstellungsphase Rechnung getragen werden kann.

Im Gegensatz zu allen anderen Ernteverfahren für landwirtschaftliche Pflanzen wird der Flachsstängel während der ersten Ernteoperation nicht durch Schnitt von der Wurzel

getrennt, sondern während des so genannten Raufens in seiner Gesamtheit aus dem Boden gezogen. Die Raufmaschine (**Bild 1**) erhält die parallele Zuordnung der herausgezogenen Flachstängel und legt diese in geordneter Querlage auf dem Feld ab. Während der Feldliegezeit muss das Schwad entsprechend des Röst- und Trocknungsverlaufes ein- oder mehrmals unter Beibehaltung der Parallellage gewendet werden (**Bild 2**). Nach dem Erreichen des für eine effektive und qualitätsgerechte Aufbereitung des Faserstrohs notwendigen Röstgrades und bei gefordertem Feuchtegehalt wird das Material in der parallelen Stängelausrichtung in Rundballen verpresst (**Bild 3**).



Bild 1: Raufmaschine



Bild 2: Flachs-Wendemaschine



Bild 3: Flachs-Ballenpressemaschine

Da die genannten bzw. vergleichbaren Maschinen und Geräte in dieser Verfahrenslinie meist nur über eine geringe Arbeitsbreite verfügen, entstehen vergleichsweise hohe Verfahrenskosten. Dies wird jedoch durch die hohen Erlöse aus den Primär- (Stroh) bzw. Sekundärprodukten (Flachslang- und –kurzfaser) kompensiert.

In neuerer Zeit hat sich vor allem die französische Firma DeHondt zu einem leistungsfähigen Anbieter moderner Flachserntetechnik insbesondere für den textilen Verwendungsbereich entwickelt. Dabei werden nun Maschinen angeboten, die modernen Standards des Arbeitsschutzes bzw. des Fahrerkomforts entsprechen als auch eine höhere Effektivität durch die Vergrößerung der Arbeitsbreite aufweisen (DEHONDT 2009) (**Bild 4-6**).



Bild 4: Raufmaschine



Bild 5: Flachs-Wendemaschine



Bild 6: Flachs-Ballenpressemaschine

Nachdem es in den 80er und 90er Jahren einige Initiativen zur ausschließlichen technischen Nutzung von Flachs und teilweise auch des Strohanteils von Öllein gab, erforderte dies aufgrund der geringeren Ertragsmöglichkeiten für die relevanten Produkte zwangsläufig den Einsatz effektiverer und kostengünstigerer Bereitstellungstechnologien. Da für die beabsichtigte Verwendung in Form von Kurzfasern die Beibehaltung der parallelen Stängelanordnung nicht notwendig ist, kamen für die Ernte teilweise konventionelle Landtechnik sowie vereinzelt auch Spezialmaschinen zum Einsatz. Die Gründe für solche Entwicklungen ergaben sich zumeist aus der Notwendigkeit zur Effizienzsteigerung insgesamt sowie aus Zwängen zur Verringerung des witterungsbedingten Risikos der Feldtrocknung und -röste. Beispielhaft seien der Einsatz von konventionellen Schwadmähern (**Bild 7**) und die Entwicklung eines so genannten Flämmgerätes zur Verkürzung und Homogenisierung der Röste (ISENSEE *et al.* 1993) (**Bild 8**) sowie eines Vollernters zur gleichzeitigen Samengewinnung, Stängelbrechung und Kompaktierung zu Strohballen (WEIGELT 1993) (**Bild 9**) genannt.



Bild 7: Schwadmäher



Bild 8: Flämmgerät



Bild 9: Flachs-Vollernter

2 Grundsätzliches zum Mähen und Einkürzen von Faserhanf

Der europäische Hanfanbau wird bedingt durch unterschiedliche klimatische Bedingungen sowie traditionelle und regionale Besonderheiten mit verschiedenen Nutzungszielen betrieben. Dadurch werden die Entwicklung und der Einsatz hierfür erforderlicher Erntesysteme maßgeblich beeinflusst.

Ausgehend von den Anforderungen der unterschiedlichen Produktlinien an die landwirtschaftlichen Rohstoffe "Hanfstroh" und "Hanfkörner" werden an die Bereitstellungstechnik eine Vielzahl agrotechnischer Forderungen gestellt, die folgende Aspekte berücksichtigen müssen:

- effektive und gleichmäßige Trocknung sowie Röste während der Feldliegezeit
- geringe Anfälligkeit bei bestehenden Wetterrisiken durch Regenperioden
- störungsfreie Schwadbearbeitung einschließlich Schwadaufnahme beim Strohbergen bei Gewährleistung geringer Faser- und Schäbenverluste

- Sicherung von notwendigen Stoffparametern in den anschließenden Verfahrensstufen von Nachernte, Transport, Umschlag, Zwischenlagerung und Aufbereitung

Die Erfahrungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass die bestehenden Anforderungen der Hanfstrohaufbereitung nur gewährleistet werden können, wenn gleichzeitig mit dem Mähen des Hanfes auch eine ausreichende Einkürzung der bis zu 3,5 Meter langen Stängel vorgenommen wird.

Bei der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Gerätesysteme wird deutlich, dass sich in Abhängigkeit von der Art des Mähens, dem Grad der Stängелеinkürzung, der Schwadgestaltung sowie der Art der Feldaufbereitung und dem Ausmaß der Feldliegezeit gleichermaßen differenzierte Auswirkungen auf die Feldtrocknung sowie Qualitätskennwerte von Hanfstroh und den draus gewonnenen Produkten ergeben (PALLESSEN 1996, STOLZENBURG 2000, GUSOVIUS 2002, MÜSSIG & MARTENS 2003).

3 Beschreibung ausgewählter Maschinen und Geräte für die Hanfernte

3.1 Gerätesystem HempFlax - Hemp-Cut 3000 / 4500

Diese Gerätekombination, die ursprünglich von der niederländischen Firma HempFlax als Modul für Traktoren mit Rückfahreinrichtung konstruiert wurde, ist inzwischen weiterentwickelt und durch die Firma Wittrock für den Anbau an selbst fahrende Feldhäcksler unterschiedlicher Bauarten wie beispielsweise für die Baureihe Jaguar 800 der Firma Claas konzipiert worden. Das Mähen der Hanfstängel bei einer Stoppelhöhe von ca. 180 bis 200 mm erfolgt dabei mit einem reihenunabhängigen Mähwerk wie beispielsweise „Champion“ 3000 bzw. 4500 der Firma Kemper (**Bild 10**). Durch Einzugschwalzen wird das Erntegut der ca. 700 mm breiten, speziell modifizierten Ein-Messertrommel zugeführt, in der die Hanfstängel auf ca. 60 cm eingekürzt werden. Die Feldablage erfolgt dann unmittelbar unterhalb der mit dem Mähvorsatz kombinierten Häckseltrommel.



Bild 10: Gerätesystem HempFlax - Hemp-Cut 3000 / 4500

Das Wirkprinzip des Gerätesystems ist gegenwärtig eines der weitverbreitetsten Verfahren zum Mähen und Einkürzen von Hanf. Die exakte Einkürzung des Strohs unabhängig von der Bestandshöhe bringt Vorteile in allen nachfolgenden Prozessschritten sowohl bei Feldoperationen als auch in der Aufschlussanlage.

Allerdings kann es unter extremen Bedingungen sowie in überreifen Beständen durch Verstopfungen zu Schwierigkeiten beim Einsatz dieses Systems kommen, so dass ein Beernten von Flächen bei derartigen Bedingungen teilweise unmöglich wird.

3.2 Gerätesystem Blücher 02 / 03

Die Hanferntemaschine "Blücher" arbeitet nach einem völlig neuen, patentierten Verfahren. Dabei werden die Hanfpflanzen in ihrer aufrecht stehenden Form zunächst unmittelbar über dem Erdboden von zwei rotierende Schneidscheiben bei einer Stoppelhöhe von ca. 180 bis 200 mm vom Standort getrennt (**Bild 11**).



Bild 11: Gerätesystem Blücher 02 / 03

Diese Schneidscheiben sind bei grünen Beständen mit Mähmesserklingen und bei ausgereiften mit feinzahnigen Schneidsegmenten ausgerüstet. Die beiden vertikalen Transporttrommeln mit einem Durchmesser von ca. 1500 mm nehmen mit exzentergesteuerten Zinken die abgemähten Pflanzen in ihrer vertikalen Position auf. Die Stängel werden den zwischen den Trommeln angeordneten, rotierenden Schneidwerkzeugen zur Trennung in mehrere Teile zugeführt und anschließend in einem Schwad abgelegt. Infolge der geringen Bodenfreiheit des Trägerfahrzeuges kann sich das gewünschte hohe dachförmige Schwad auf ertragreichen Standorten mitunter nicht ausbilden. Zur Realisierung ergonomischer Sichtverhältnisse bei besonders hohen Beständen ist es bei den ab 2002 gefertigten Maschinen optional möglich, die Fahrerkabine zum Mähen um ca. 1000 mm anzuheben. Auf der Grundlage dieses Maschinenkonzeptes wurden von der Firma Kranemann in den Jahren 1997 - 2003 mehrere Maschinen gefertigt und unter verschiedensten Bedingungen erfolgreich eingesetzt. Je nach Kundenwunsch kamen ver-

schiedene Trägerfahrzeuge wie Traktoren mit Rückfahreinrichtung, Schwadmäher oder Feldhäcksler zum Einsatz.

3.3 Gerätesystem Stufenmähen

Ausgehend von der Forderung, beim Mähen mit gleichzeitigem Einkürzen möglichst vorhandene, praxisbewährte landtechnische Lösungen sowie universell einsetzbare Traktoren zu verwenden, die nur geringe Maschineneinsatzkosten verursachen, entstand ab Mitte 1996 das modulare Konzept zum Stufenmähen. Die in einem Projekt des ATB Potsdam-Bornim durchgeführten Entwicklungsarbeiten basierten auf dem Konzept einer starren Zuordnung und ohne einen gestaffelten Versatz des oberen Mähbalkens. In der Literatur wird dieses Traktoranbaugerät unter Bezeichnung "Zweiebenenmähwerk" beschrieben, dessen Entwicklung nach dem Nachweis der Funktionsfähigkeit beendet wurde (EHLERT 1997).

Bereits während der Hanfernte 1996 wurden mit Unterstützung der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft zwei unterschiedliche Prototypen eines gleichzeitig in Dresden entwickelten modularen Konzeptes zum Stufenmähen eingesetzt.

Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen über die Dynamik der Hanfpflanze beim Schneiden mit Doppelmessermähbalken konnte das Grundkonzept des modular aufgebauten Gerätesystems zum haspellosen Mähen und Einkürzen - "Stufenmähtechnik mit mehreren seitlich und in der Höhe versetzt angeordneten Schneidwerken" optimiert und zur Serienreife gebracht werden (**Bild 12 rechts**).



Bild 12: Hanfmähgeräte Prototyp ATB (links) sowie HMG 4-2400 ¹ (rechts)

Angesichts positiver Einsatzerfahrungen und dem günstigen Preis-Leistungsverhältnis des Gerätekonzeptes befinden sich inzwischen 8 Seriengeräte in Ausführungsvarianten zum Zwei-, Drei- und Vierfach-Schneiden (SMU-2 / SMU-3-210, HMG 4-2400) in Bay-

¹ nach der Insolvenz von AKE Innotech GmbH besitzt die Firma Huster-Maschinenbau GmbH Chemnitz die Konstruktionsträgerschaft.

ern, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen sowie in Ungarn, Tschechien, Schweden und England im Einsatz.

3.4 Weiterentwicklungen des Stufenmähprinzips

Die seit 1999 weiterentwickelten Traktoranbaugeräte zum spurversetzten Mähen und gleichzeitigen Einkürzen von Faserpflanzen stoßen bedingt durch Stabilitätsprobleme bei der Anlenkung der Messerbalken der Hochschnittmodule bei Schnittbreiten von ca. 3 m an technische Grenzen. Darüber hinaus konnten wegen der auf ca. 12 km/h beschränkten Arbeitsgeschwindigkeit beim Mähprozess unter Feldbedingungen auch Flächenleistung und Schlagkraft dieses Erntesystems kaum noch weiter gesteigert werden.

Durch eine 2005 erfolgte Neuentwicklung konnte die Leistungsfähigkeit durch das Erreichen einer Arbeitsbreite von 6 m deutlich gesteigert werden (RASCHER et al. 2005). Jedoch ergaben sich durch die Anordnung der Mähbalken an passiven Elementen, die unmittelbar in den Pflanzenbestand ragen, deutliche technologische Probleme beim Abfluss der gemähten und eingekürzten Biomasse.

Unter Beibehaltung der Zielfunktion einer größeren Arbeitsbreite erfolgte die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines Mähwagens, der wiederum dem Prinzip und den Vorzügen des spurversetzten Mähens und gleichzeitigen Einkürzens folgt (**Bild 13**).



Bild 13: Prototyp des neuartigen Anhängengerätesystems zum Mähen und gleichzeitigen Einkürzen langstängliger Faserpflanzen mit einer Schnittbreite von bis zu 5 m (HMG 4-5000)

Die Vorteile des Gerätesystems Stufenmähwerke gegenüber anderen Technologien zum Mähen und Einkürzen konnten durch umfangreiche Vergleichsuntersuchungen (GUSOVICUS 2002, MÜSSIG & MARTENS 2003) nachgewiesen werden und sind gleichermaßen für die vergleichende Einschätzung des neuen Gerätesystems zutreffend:

- Die im Breitschwad bei einer bestandskonformen Erntegutkonzentration ($EK = 1$) abgelegten gleichmäßig eingekürzten Hanfstängel bieten optimale Bedingungen für die gleichmäßige Trocknung (**Bild 14**).

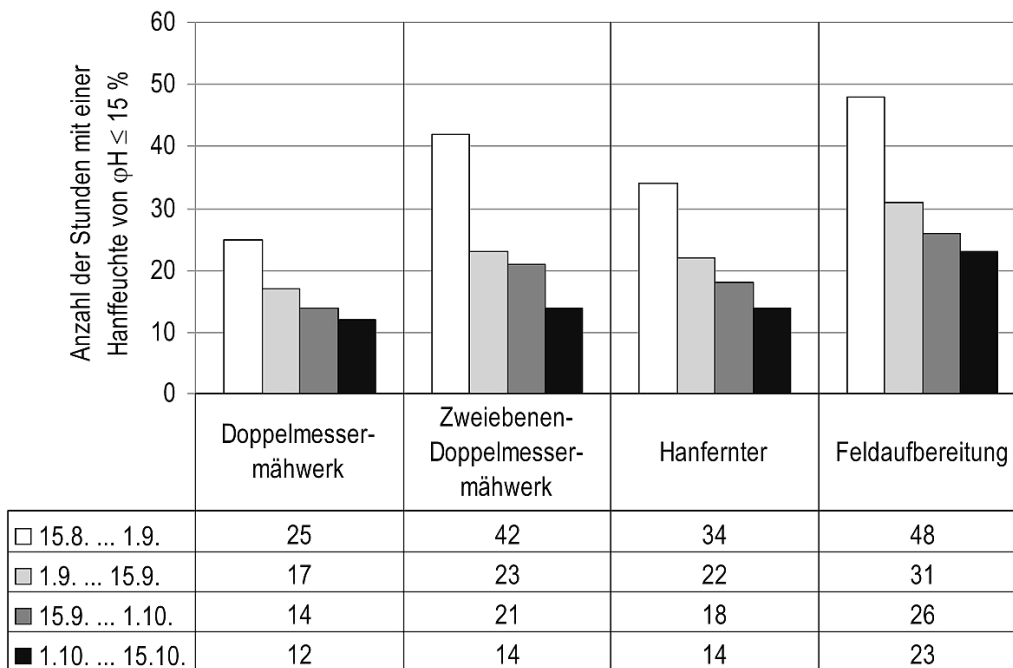


Bild 14: Einfluss der Erntetechnik auf das Abtrocknungsverhalten von Hanfstroh in Abhängigkeit unterschiedlicher Erntetechnik, (Modell: $t_{H15} = f(t_{H15V}, RLF, NDSL, SOD)$; Meteorologische Station Cottbus, 1970 ... 1994, Eintreffenswahrscheinlichkeit 80%) (GUSOVIVUS 2002)

- Durch die Breitschwad-Ablage werden ebenfalls für die Feldröste verbesserte Bedingungen ermöglicht (**Bild 15**).

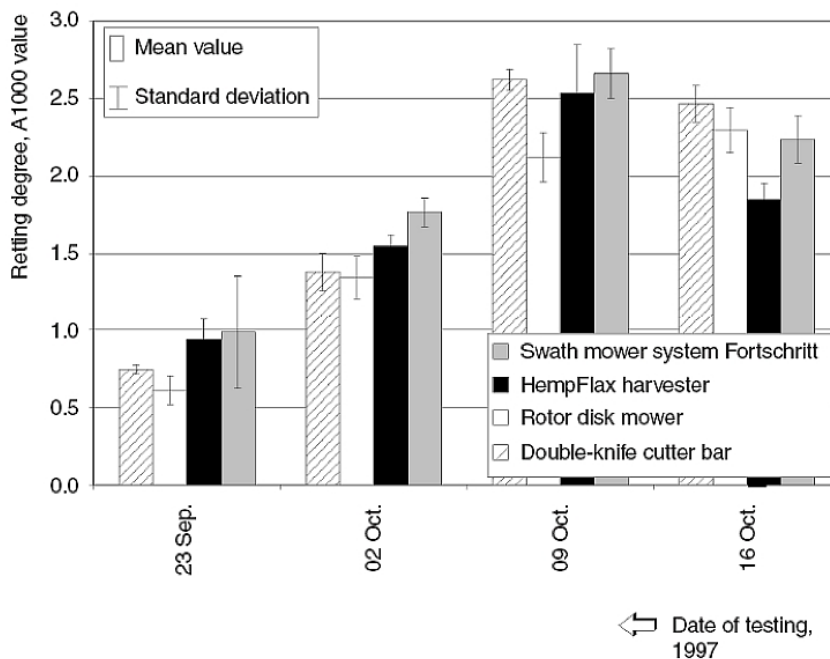


Bild 15: Einfluss der Erntetechnik auf den Röstgrad von Hanfstroh (MÜSSIG & MARTENS 2003)

- Die Funktionssicherheit der Doppelmesserbalken ist auch unter extremen Einsatzbedingungen (wie feuchte Witterung, Lagerbestände) gegeben.
- Beim Ernten mit Doppelmessermähwerken, entstehen in den folgenden Feldoperationen geringere Biomasseverluste.
- Die Schnittbreite von 5 m sichert eine Flächenleistung, die deutlich über allen bisher eingesetzten Erntesystemen liegt. Dies gewinnt vor allem durch den Umstand an Bedeutung, dass die Witterungsbedingungen während der Erntezeit für Faserpflanzen häufig eine schnelle Feldräumung erfordern. Flächenleistung von bis zu 4,0 ha/h bedeuteten eine Steigerung um durchschnittlich mehr als 50% gegenüber den etablierten Systemen (**Bild 16**).
- Die nach dem Scherenschnitt-Prinzip arbeitenden Doppelmesserschneidwerke benötigen einen wesentlich geringen spezifischen Energiebedarf.

Bild 16 verdeutlicht, dass gerade auch durch eine vergleichsweise hohe Flächenleistung in der Gesamt-Arbeitszeit (GAZ) die Verfahrenskosten gegenüber den gegenwärtig leistungsfähigsten Erntesystemen insgesamt um mehr als 50% verringert werden können.

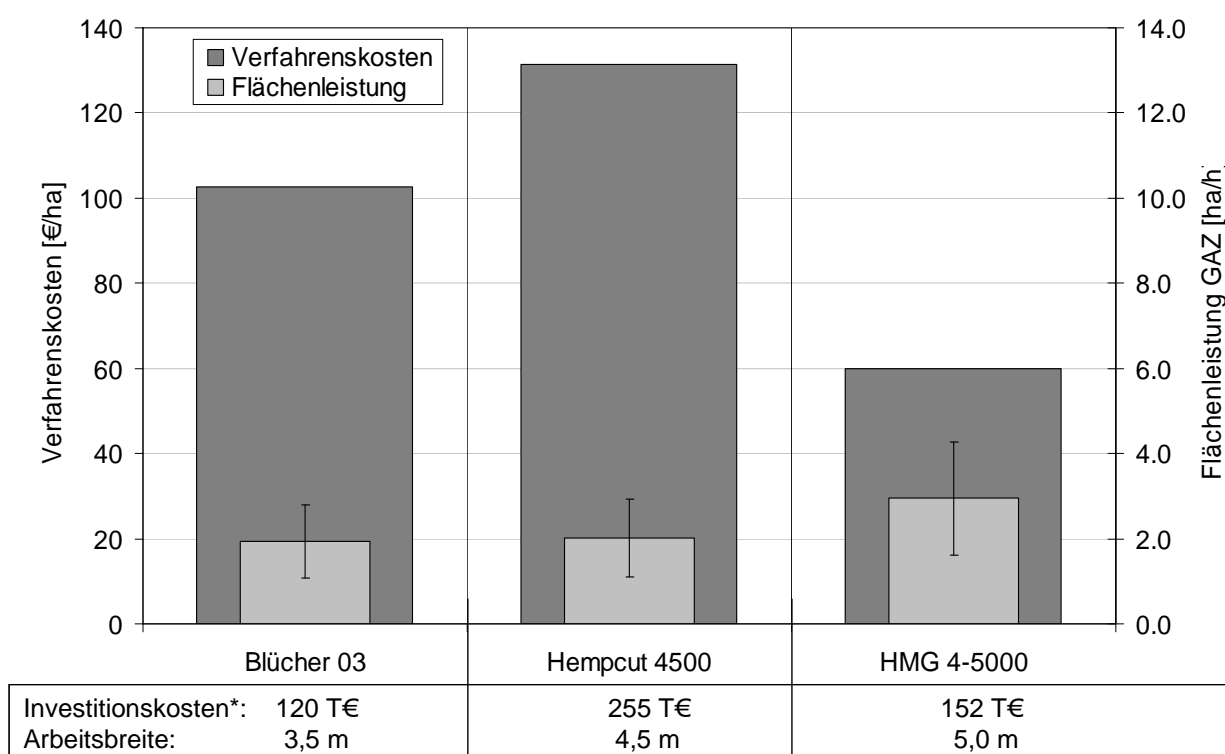


Bild 16: Verfahrenskosten und Flächenleistung verschiedener Gerätesysteme für die Mahd von Industriefaserhanf (* einschließlich Trägerfahrzeug)

Da wie bereits ausgeführt durch die schwadlose Breitablage bei günstigem Witterungsverlauf gegenüber den anderen Verfahren auf ein bis zwei Wende- bzw. Schwadevorgänge im Verlauf der Feldliegezeit verzichtet werden kann, verringern sich die Gesamt-

verfahrenskosten beim Einsatz des neuartigen Gerätesystems zur Mahd um weitere 20 ... 40 €/ha.

Vergleichbare Systeme, jedoch mit geringerer Arbeitsbreite und anderen Antriebssystemen werden auch von tschechischen und französischen Herstellern angeboten.

3.5 Maschinensystem Bafa-Vollernter zur Koppelnutzung bei der Hanfernte

Mit Förderung durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. entwickelten die Firmen Deutz-Fahr Erntesysteme GmbH (Lauingen) und die Gerhard Götz GmbH (Bühl) mit Unterstützung der Bafa GmbH (Malsch) den Prototyp eines „Hanfvollernters“ (**Bild 17**).

Durch die Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim (LAP) wurde in den Jahren 2000 und 2001 unter Praxisbedingungen geprüft, welche Arbeitsleistung und Arbeitsqualität bei der Ernte von Hanfstroh und Hanfkörnern mit dieser Maschine im Vergleich zur Hemp-Flax-Technik erzielt werden (MASTEL & STOLZENBURG 2002).

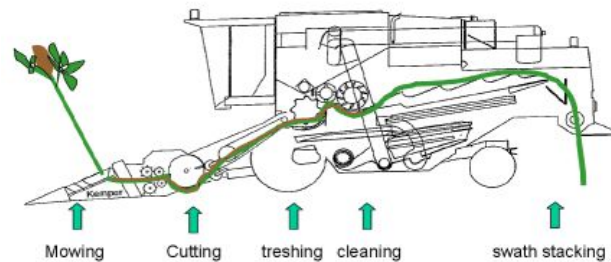


Bild 17: Maschinensystem Bafa-Vollernter

Der Hanfvollernter besteht aus einem modifizierten Mähaggregat der Firma Kemper (Champion 4500), das an einen modifizierten Mähdrescher (TOPLINER 4080 HTS der Firma Deutz-Fahr) angebaut und von diesem angetrieben wird.

Die Hanfpflanzen werden auf einer Breite von 4,50 m mit dem Mähaggregat gemäht und über Zuführwalzen zu den Vorpresswalzen im Einzugskanal geführt. Das rotierende Einmesser-Schneidaggregat kürzt die Stängel auf ca. 600 mm ein. Nach der Schneidtrommel gelangt das Pflanzenmaterial über einen Förderkanal zu den Dresch- und Wendetrommeln sowie zur weiteren Körnertrennung auf den Hordenschüttler, von dem die Stängel ausgeworfen werden.

Die vom Dreschkorb bzw. dem Schüttler abgeschiedenen Körner gelangen über Reinigungssiebe sowie Schnecken- und Kettenelevatoren in den Korntank. Zur Erzielung einer hinreichenden Lagerfähigkeit müssen die erntefrischen, meist ungleichmäßig ausgereiften Körner nachgetrocknet werden.

Die auf einer Breite von 4,50 m abgeschnittenen und anschließend eingekürzten Hanfstängel werden nach dem Dreschprozess auf einen Schwad mit ca. 1,3 m Breite abgelegt. Im Vergleich zur Hemp-Flax-Technik (3 m Arbeitsbreite) liegt ca. 50% mehr Pflanzenmasse auf einem um 0,40 m breiteren Schwad. Dieser breitere Schwad sowie die höhere Pflanzenmasse bereiteten den folgenden Bearbeitungsgängen (zweimaliges Wenden und anschließendes Pressen) keinerlei Probleme.

Beim Vergleich der Hemp-Flax-Technik (3 m) mit dem Hanfvollernter (4,5 m) sind folgende Ergebnisse hervorzuheben: (MASTEL & STOLZENBURG 2002)

- Der Hanfvollernter war trotz geringerer Arbeitsgeschwindigkeit wegen der größeren Arbeitsbreite mit einer Flächenleistung von $1,9 \text{ ha h}^{-1}$ der Hemp-Flax-Technik um $0,2 \text{ ha h}^{-1}$ überlegen.
- Von den Vollernterparzellen wurde mit durchschnittlich 8,0 t TS Stroh/ha eine um 0,8 t TS/ha geringere Strohmenge als von den Hemp-Flax-Parzellen abgefahren
- Das Hanfstroh zeigte in allen vier Versuchspartellen einen einheitlichen Trocknungsverlauf auf dem Feld.
- Das mit dem Vollernter gemähte Stroh war bei beiden untersuchten Sorten immer noch stärker geschädigt als das der Hemp-Flax-Varianten.
- Das Stroh aus den Hanfvollerntervarianten röstete wegen der stärkeren Stängelverletzungen schneller durch. Der Anteil grünen Hanfstrohs war in den Hanfvollerntervarianten geringer als bei der Hemp-Flax-Technik.
- Bei den Hanfvollernter-Parzellen war eine Verringerung des Strohertrages in Höhe von 9 % gegenüber der Hemp-Flax-Technik festzustellen.

3.6 Gerätesysteme zur Schwadbearbeitung

Nach dem Mähen ist es für die gleichmäßige Trocknung und Röste erforderlich, vor der Strohbergung insbesondere nach längeren Niederschlagsperioden eine Schwadlüftung bzw. ein Schwadverlegung vorzunehmen. Ein komplettes Wenden des gesamten Hanfstrohschwads um 180° ist maschinentechnisch bisher noch nicht praktikabel.

Für die Schwadbearbeitung werden vorzugsweise leistungsfähige traktorgezogene Doppelkreiselschwader eingesetzt, wie sie auch in der Futterwerbung Verwendung finden. Sowohl von der niederländischen Firma HempFlax als auch von der Firma Wittrock wurden Sonderkonstruktionen für den Geräteträger- bzw. den Traktorheckanbau auf der Basis von Pick-Up-Trommeln entwickelt und eingesetzt (**Bild 18**).



Bild 18: Gerätesysteme zur Schwadbearbeitung links: Speziallösung von Wittrock, rechts: Standard-Kreiselschwader

Da jede mechanische Behandlung des am Boden liegenden Stroh zu Zerfaserungen der Stängel und damit zu Schäbenverlusten sowie zum Eintrag von Bodenteilen ins Erntegut führt, wird die (mehrmalige) Schwadbearbeitung mitunter negativ eingeschätzt. Das Stroh sollte daher nach Möglichkeit erst kurz vor dem Pressen geschwadet werden. Demgegenüber zeigte sich jedoch, dass insbesondere nach der Mahd mit Maschinensystemen, die verhältnismäßig schmale und hohe Schwade erzeugen, für eine gleichmäßige Röste und Trocknung dieses gewissermaßen verdichteten Gutes meist ein zusätzlicher Schwadbearbeitungsvorgang notwendig ist (Gusovius 2002; MÜSSIG & MARTENS 2003).

3.7 Gerätesysteme zur Strohbergung / Ballengutlinie

Gepresst werden kann das Stroh, wenn ein Restfeuchtegehalt von ca. 16 bis 18% erreicht ist. Die Schwade fühlen sich dann trocken an und die Stängel lassen sich auch von Hand leicht knicken bzw. durchbrechen.

Bisher wurden insbesondere in den traditionellen Anbauregionen, wie z.B. im Bereich der Genossenschaft LCDA Bar-sur-Aube (Frankreich) mit allein rd. 5.000 ha Anbaufläche, überwiegend Rundballenpressen für die Bergung des Faserpflanzenstrohs eingesetzt (TUBACH & NEBEL 1997). Die gegenüber Quaderballenpressen deutlich geringeren Anschaffungskosten sind wesentliche Gründe für den immer noch weit verbreiteten Einsatz. Darüber hinaus sind keine bzw. lediglich sehr einfache technische Anpassung an die Spezifik der Faserpflanze erforderlich. Die Organisationsform von Anbau und Erstverarbeitung in Deutschland führte anfangs ebenfalls zu dieser Entwicklung, da die Landwirte meist eigenständig zumindest für die Bergung des Stroh zuständig waren und sich die Nutzung der betriebseigenen Technik, oft Rundballenpressen, auch für die Hanfernte anbot. Jedoch werden aus Transport- und Lagergründen zunehmend Quaderballenpressen eingesetzt. Unterstützt wird dieser Trend auch durch technische Entwicklungen der Maschinenhersteller bzw. die konstruktive Adaption von Quaderballenpressen (**Bild 19 links**) sowie der für die Logistik notwendigen Mechanisierungsmittel wie z.B. spezielle Ballenverladungen und Transportfahrzeuge (**Bild 19 rechts**).



Bild 19: Gerätesysteme zur Faserstrohbergung links: Quaderballenpresse, rechts: Spezial-Ladewagen

Für die Verladung der Großballen werden neben modernen Sammelsystemen noch immer vorwiegend Teleskoplader und Traktoren mit Fronthubgeräten eingesetzt.

Insgesamt erweisen sich die Strohbergung / Feldberäumung sowie die daran anschließenden Prozesse Transport, Zwischen- und Endlagerung auch wegen erheblicher Transportentfernungen noch immer als äußerst arbeits- und kostenintensive Arbeitsphasen innerhalb der Bereitstellungskette.

4 Zusammenfassung

Dreizehn Jahre nach der Wiederzulassung des Hanfanbaus in Deutschland stehen eine Reihe z.T. sehr leistungsfähige Maschinen und Geräte für die Ernte und Bereitstellung von Hanfstroh zur Verfügung. Bei Planung und Durchführung der jeweiligen Ernteoperationen sind jedoch in jedem Fall die Anforderungen der folgenden Prozessschritte sowie insbesondere die Anforderungen der Aufbereitungstechnik und der jeweiligen Verwendungsbereiche für die finalen Produkte Faser und Stroh zu beachten. Die richtige Auswahl der jeweiligen Mechanisierungsmittel hat einen entscheidenden Einfluss auf die wesentlichen Qualitätsparameter sowohl des Primärrohstoffes Hanfstroh als auch der daraus erzeugten Sekundärprodukte.

Weitere Optimierungspotentiale hinsichtlich der Arbeitsproduktivität sowie auch der Verfahrenskosten sind zukünftig jedoch zu eröffnen, um eine dauerhafte Wirtschaftlichkeit der gesamten Wertschöpfungskette absichern zu können. Ein weiterer Schwerpunkt ergibt sich aus der Notwendigkeit, Verluste (Fasern und Schäben bei der Mahd und Schwadbearbeitung, Körner bei der Samenernte) während der einzelnen Verfahrensschritte zu reduzieren und damit die Wertschöpfung weiter zu erhöhen. Aufgrund der steigenden Transportentfernungen sowie damit verbundener Aufwändungen sollten technologische Konzepte zur Erhöhung der Transporteffizienz entwickelt werden (z.B. höhere Ballendichte durch feldentholztes Faserpflanzenstroh bei Sicherung der dabei anfallenden Schäben).

Literatur

- DEHONDT (2009):** Informationen zum Produktprogramm. Entnommen von <http://www.dehondt-lin.com>, Januar 2009
- EHLERT D. (1997):** Zweiebenenschneidwerk für die Hanfernte, Landtechnik, H.1: 24-25
- GUSOVIUS H.-J. (2002):** Stoffwandlungen und Umwelteinflüsse in Verfahrensketten für Faserhanf. Cuvillier-Verlag Göttingen, 138 S., zgl. Dissertation Humboldt-Universität zu Berlin, 2002
- ISENSEE E., OHLS J., HEINEMANN O. (1993):** Die Standröste – Ein universelles Verfahren zur risikoarmen Flachsernte. Beitrag zum Statusseminar „Flachs, Forschung und Entwicklung“, Leipzig, 15.-16.11.1993
- MASTEL K., STOLZENBURG K. (2002):** Prüfung des Prototyps einer Maschine zur Ernte von Hanfstroh und Hanfkörnern (*Cannabis sativa* L.). Informationen für die Pflanzenproduktion (report 2/2002), Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim (Hrsg.) 32 S.
- MÜSSIG J., MARTENS R. (2003):** Quality aspects in Hemp fibre production—influence of cultivation, harvesting and retting, *J. Ind. Hemp*, 8 (1): 11-32
- PALLESEN B. (1996):** The quality of combine-harvested fibre flax for industrial purposes depends on the degree of retting. In: *Industrial Crops And Products* Vol. 5 (1): S. 65-78
- RASCHER G., PAULITZ J., GUSOVIUS H.-J. (2005):** New highly effective hemp mowing device (Neues Traktoranbaugerät zum Mähen und Einkürzen von Faserhanf). 3rd International Conference of the European Industrial Hemp Association (EIHA); 28. & 29. 11. 2005, Hürth
- STOLZENBURG K. (2000):** Vortrag zum Workshop: Sind einfache, pragmatische Faserklassifizierungen möglich?, 07.06.2000 in Bremen In: MIH-Internetdienstleistungszentrum (www.nova-institut.de/mih), 25.01.2001
- TUBACH M., NEBEL K. (1997):** Technologie der Hanfverarbeitung und die Bedeutung der Produktqualität für die Hanfverwertung. in: *Wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema "Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf"*, Teil 2, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Bd. 7, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster: S. 301-492
- WEIGELT H. (1993):** Ernte und Verwertung von Flachs als kurze Wirrfaser. Beitrag zum Statusseminar „Flachs, Forschung und Entwicklung“, Leipzig, 15.-16.11.1993

Pilot plant for the production of high value fibre boards from wet preserved hemp

Pilotanlage zur Herstellung hochwertiger Faserwerkstoffplatten aus feucht-konserviertem Hanf

Ralf Pecenka, Christian Füll, Christine Idler, Ljubomir Radosavljevic, Philipp Grundmann, Detlef Ehlert

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100
E-Mail: rpecenka@atb-potsdam.de

Zusammenfassung

Die Verminderung der Anlageninvestitionen und der Kosten für den Faseraufschluss in den Ländern der Europäischen Union ist unbedingt notwendig, um einerseits den Naturfaserpflanzenanbau für Landwirte attraktiv zu gestalten und andererseits die Nachfrage für Fasern für die weitere Verarbeitung in der Fahrzeugindustrie sowie in der Bau- und Dämmstoffindustrie zu erhöhen. Deshalb werden seit Jahren am Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim (ATB) Untersuchungen zur Verarbeitung von feucht-konserviertem Hanf durchgeführt. Die im Jahr 2007 am ATB in Betrieb genommene Pilotanlage für die Verarbeitung feucht-konservierter Naturfaserrohstoffe ermöglicht die Herstellung verschiedener Werkstoffe bei Nutzung der gesamten Pflanze ohne jegliche Verluste. Sie ist für einen Durchsatz von 1 t/h Naturfaserkonservat konzipiert und hat damit den Laborcharakter bereits verlassen. Neben feucht-konservierten Faserpflanzen wie Hanf und Flachs können auch Stroh, fasrige Reststoffe aus anderen Verarbeitungslinien landwirtschaftlicher Rohstoffe und ebenso Holz mit dieser neuartigen Technologie verarbeitet werden. Erste Untersuchungen zu Rohstoffmischungen aus Hanf und Holz (Masseverhältnis 70:30) haben gezeigt, dass unter Nutzung üblicher synthetischer Bindemittel mittel- und hochdichte Faserplatten hergestellt werden können, die in ihren mechanischen Eigenschaften handelsüblichen Faserwerkstoffen aus Holz entsprechen. Darüber hinaus wurde der Einsatz verschiedener natürlicher Bindemittel untersucht, um umweltfreundlichere und zu 100% auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Endprodukte herzustellen.

Mit diesen Arbeiten konnten wichtige Grundlagen geschaffen werden, damit Landwirte zukünftig nicht nur Produzenten preisgünstiger Faserrohstoffe sein können, sondern auch die Verarbeitung dieser nachwachsenden Rohstoffe zu hochwertigen Halbzeugen und Endprodukten in dezentralen Anlagen durch die Landwirtschaft erfolgen kann.

Abstract

The cultivation of bast fibre plants such as hemp and flax has gained much importance for European agriculture in the last years. At present, more than 19.000 t of natural fibres are annually used in the German automotive industry alone. The optimisation of the whole process line with focus on reductions of investment and processing costs are necessary in order to make cultivation of natural fibres more attractive for farmers on the one hand, and to increase the demand for natural fibres used e.g. in the automotive industry or in the building industry on the other. Therefore, a novel technology based on processing of preserved hemp has been examined at the Leibniz - Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim (ATB) for many years now. The conventional production of hemp fibres is based on field drying and retting of hemp straw. At the usual harvest date in September, weather conditions are often detrimental to processing of harvested hemp. Therefore, a weather-independent post harvest technique is under investigation at the ATB. The harvest of hemp by means of chopper followed by an-aerobic storage is favourable for the farmer, because the weather risk can be avoided. Additional steps are the same as for ensiling. A pilot plant with a processing capacity of approximately 1 ton per hour wet fibre material has been built up at the ATB and is tested at present. The whole plant material can be processed to final products like insulation materials and fibre boards or semi products for injection moulding without any loss. Various raw materials like wet-preserved hemp and flax, straw, other natural fibre plants or fibrous production residues as well as wood can be processed with this novel technology. First samples such as high and medium density fibre boards have been produced from material mixtures of hemp and wood. According to the current results, the mechanical properties of these samples are comparable with the properties of commercial products made of wood fibres. By the use of natural binders for fibre board production the end products of the pilot plant are 100 % made of renewable raw materials, ecological, biodegradable and environmentally friendly.

Introduction

The cultivation of fibre plants such as hemp and flax has gained much importance for European agriculture during the last 15 years. Research and practice in natural fibre technology have shown that alongside their use as textiles, natural fibres can also be used successfully as reinforcing fibres in composite materials, in building materials, as heat and sound insulation materials, and in many other applications. For example, if they are used to replace glass fibres in composite materials, they achieve virtually the same material properties. At present, approximately 19.000 t of natural fibres (not counting cotton and wood fibres) are annually used only as reinforcement fibres in composites for the automotive industry in Germany alone (FNR 2008).

For farmers, cultivating natural fibre plants represents an alternative crop and alternative source of income. Furthermore, there are ecological advantages, for example because cropping hemp does not require the use of any plant protection agents (DESANLIS 2006). It is advantageous to include hemp in crop rotation because following crops produce up to 30 % higher yields (FNR 1997). The traditional production of hemp and flax fibres in Europe is based on field drying and retting of fibre straw. At the usual harvest time in September, weather conditions are often unfavourable for the processing of hemp to high quality fibres for industrial purposes. Therefore, traditional hemp and flax fibre production is connected to a certain economic and logistic risk for the farmers and fibre processors in many typical cultivation areas all over the world. Further disadvantages at present are above all the higher prices of natural fibre products for the final consumer by comparison with traditional construction and insulation materials. For farmers in the EU, in turn, the proceeds gained from natural fibre straw hardly cover costs, now that subsidies have been reduced.

This results in the following conflict at present:

- There are increasingly fewer farmers who are willing to cultivate natural fibres in Germany.
- The excessively high final consumer prices for building and insulating materials lead to only insufficient demand, even taking into account ecological aspects and market launch programmes.
- Although it processes increasing quantities every year, the automotive industry prefers to procure cheaper fibres from abroad.

Hence, cost reductions are imperative throughout the entire production chain of bast fibres in order to improve chances for cultivating natural fibre plants in future (MUNDER *et al.* 2003; PECENKA 2004).

Pilot plant for the processing of hemp silage

A new process for processing hemp based on weather-independent harvest and post-harvest techniques has been developed at the ATB. The objective consists in developing an alternative process line for conditioning and processing wet-preserved hemp, characterised by:

- A reduction in process costs,
- Reduced investment in plant for fibre pulping and processing the preserved matter,
- Simplicity of the plant coupled with reliable operation, and
- Securing of product quality.

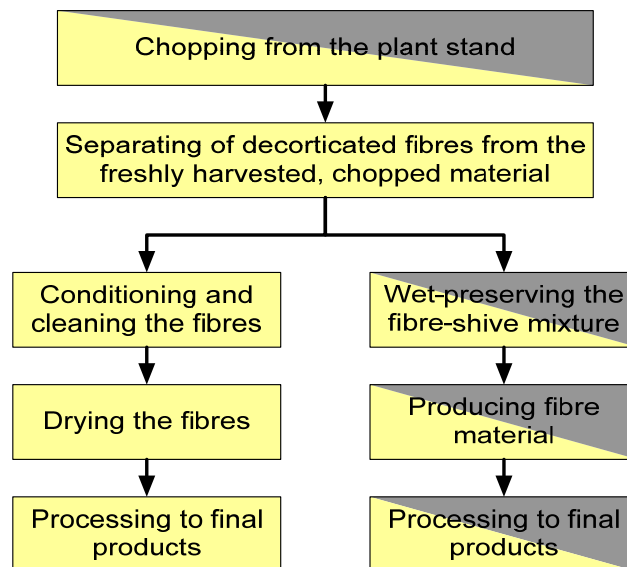
While in the traditional process hemp is mowed at harvesting time in August and September, dried on the field and possibly also retted, the wet processing line starts with

chopping the hemp from the plant stand with a self propelled forage harvester (**Fig. 1**). The chopped material is then preserved in horizontal clamp silos or tube silos, for example like maize (**Fig. 2**) (IDLER *et al.* 2006). A new process produces the desired final product from the wet-preserved material directly, using the whole plant mass. In principle two process lines are conceivable (**Fig. 3**). The right process line has already been realised in a pilot plant.



Fig. 1: Hemp harvest

Fig. 2: Wet-preservation of Hemp



■ Processing of the whole plant mass of preserved hemp to final products (ATB 1997)

■ Processing of preserved hemp with separation of high value fibres (ATB 2003)

Fig. 3: Technologies for harvesting, preserving and processing of fibre plants

In the first process chain (right branch) the final product is made from the whole, wet-preserved, chopped material. In the second chain (left branch) long fibres are separated by means of a comb shaker (PECENKA 2004) from the fresh chopped plant material and

processed further separately. Only the short fibres and shives are processed using the right process line. The advantages of both process lines consist in reducing the weather risk at harvesting time in late summer and in processing the whole plant mass to a final product without losses. Applications for products from these process lines are seen in the fields of insulation and construction panels, packing materials, linings, as well as in the use of fibres to reinforce lean concretes. After harvesting and storage, the new process produces the desired final product from the preserved material directly, using the whole plant mass. The technology of the pilot plant enables the processing of different fibre plants from agriculture and forestry. The realized process is a modified dry/half-dry process from wood industry adapted to the processing of agricultural raw materials like wet-preserved hemp at reduced energy consumption (**Fig. 4**).

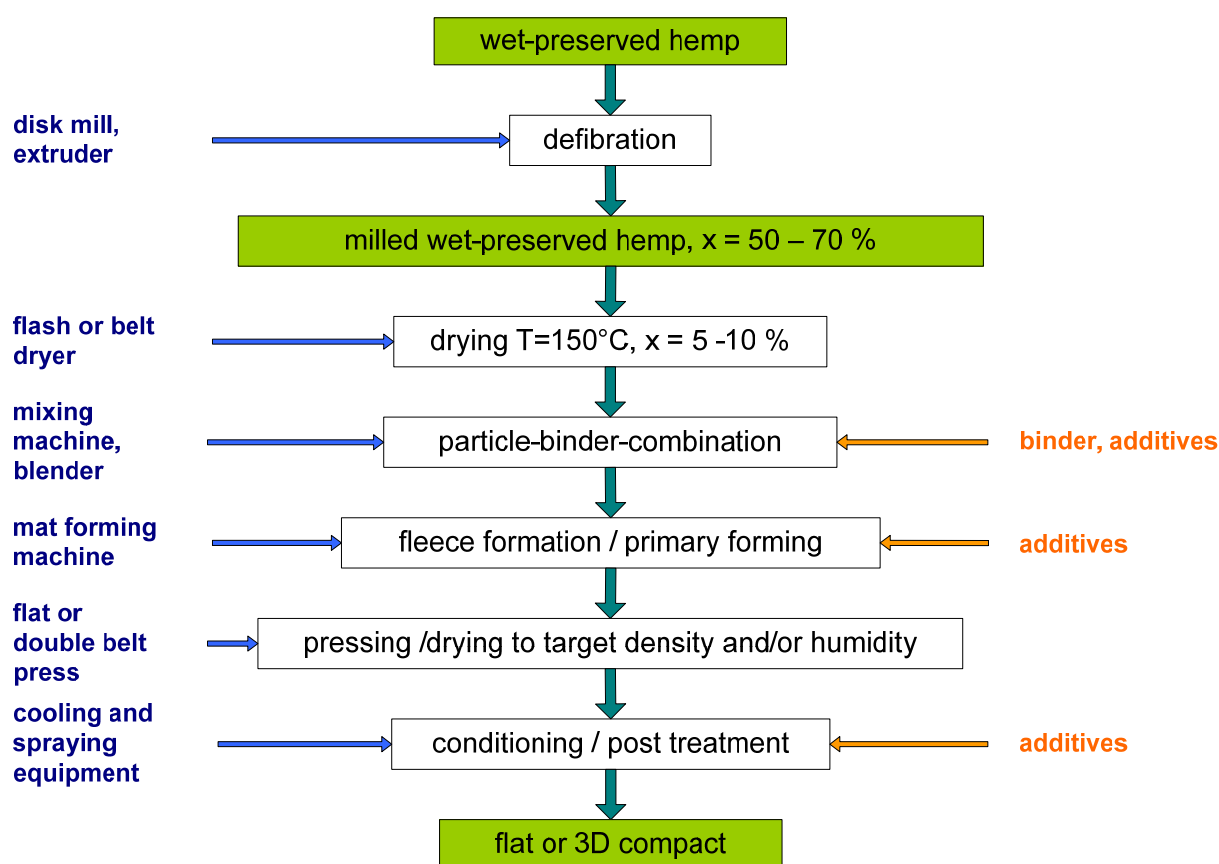


Fig. 4: Process line for processing wet-preserved hemp (IDLER *et al.* 2000)

Materials and methods

The research work comprises all process stages from raw material production to several end products. Current sub-projects focus mainly on the following areas: cultivation, harvesting and preservation, conditioning and processing technology, and economic assessment of the overall process.

The structure of different components produced by chopping hemp with a conventional forage harvester is shown in **Fig. 5**. The compliance with suitable chopping length (5 to 30 mm) is of major importance for preservation under anaerobic conditions as well as for processing to quality fibre boards (IDLER *et al.* 2000; FÜRLL *et al.* 2006).



Fig. 5: Manually sorted, chopped hemp: a) chopped material, b) fibres, c) leaves, d) shives (PE-CENKA *et al.* 2007)

For processing of the raw material to high-quality products in the pilot plant the following process steps are mainly under examination:

- a) Selection / extraction / provision of raw materials
- b) Particle pulping / particle modification
- c) Particle (fibre) drying
- d) Particle - binder combination (gluing of the fibre material) / natural binders

- e) Structuring / fleece forming / primary pressing
- f) Press forming / reforming and structure fixing
- g) Finishing post-treatment of the fibre boards and 3-D compacts

Results

The pilot plant has been put into operation in March 2007 and is tested at present (**Fig. 6**). First samples like MDF and HDF fibre boards have been produced. According to the current results, the mechanical properties of the test samples are comparable with the properties of commercial products made of wood fibres. Silage-like odours of the raw material can be disadvantageous for several end products. First trials have shown that the novel processing technology is appropriate to reduce the content of odorous components. Butyric acids and other odorous acids are released to the exhaust air by means of the thermal treatment of the raw material in the defibration and drying stage of the process. Therefore, end products do not have any unfavourable silage-like odours.

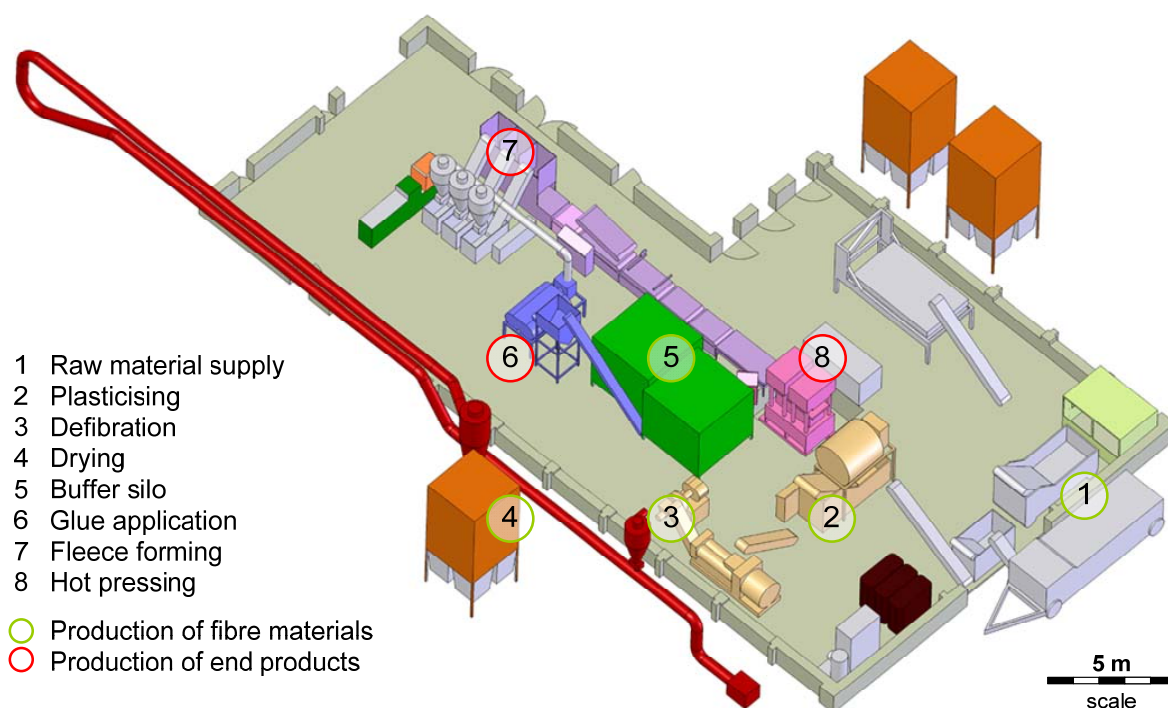


Fig. 6: 3D-Layout of the pilot plant for the processing of fibre plants

The application of natural binders such as starch, lactic acid or inexpensive by-products from agriculture instead of common synthetic binders e.g. on the basis of phenolic-formaldehyde is another important part of the ongoing research. Advantages of such binders are the lower health risk and the environmental friendly production. Furthermore, such fibre boards are completely made from renewable raw materials from agriculture. The disposal by incineration for energy purposes is CO₂ neutral. Several test samples made with different natural binders already fulfil the requirements of European standards (EN 622 - 2) regarding the mechanical properties (**Fig. 7**). But there is still an important need and potential for optimisation (RADOSAVLJEVIC *et al.* 2007).

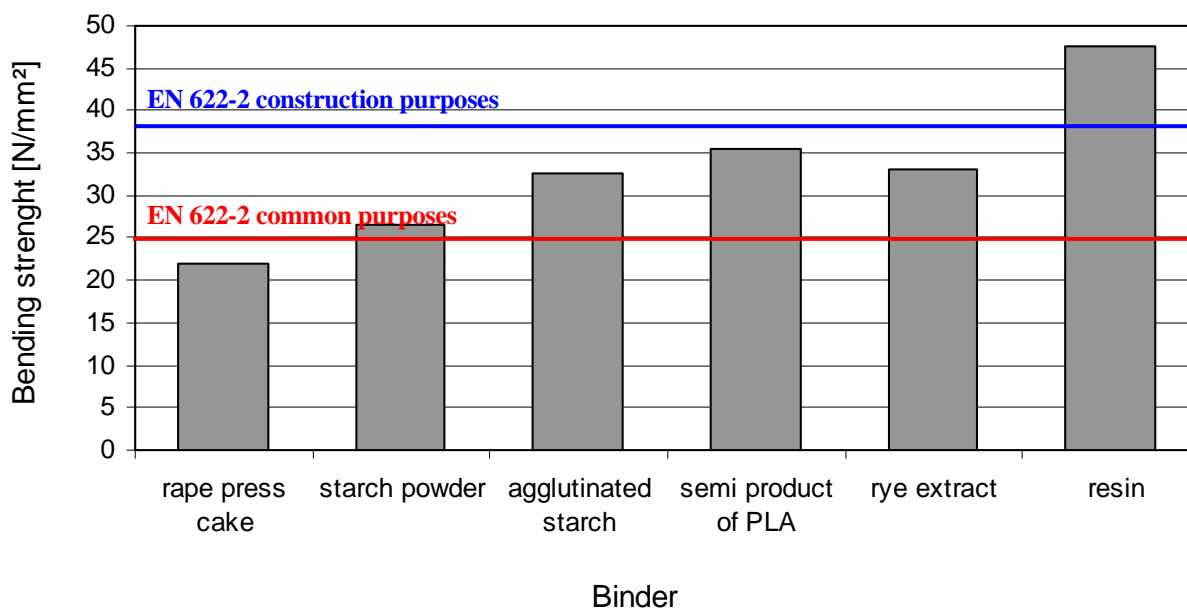


Fig. 7: Bending strength of fibre boards from wet-preserved hemp and wood (6:4) with the use of different natural binders (thickness 10 mm, density 1140 kg/m³, binder content 10 mass-%)

Conclusion

Experiences from construction and testing of a novel fibre processing plant have shown that wet preserved hemp can be processed to high quality fibre boards. The typical weather risk of the hemp harvest can be largely eliminated for the farmer. Also other fibre plants from agriculture and forestry or mixtures of different raw materials can be processed in the pilot plant at reasonable costs. The novel technology is appropriate to establish decentralized processing plants at farm level. Main advantages of such plants for hemp processing will be the alternative income for the farmer, the environmentally sound production of fibre boards and the enrichment in crop rotation.

References

- ATB (1997):** Patent DE 197 56 046: Verfahren zur Ernte, Konservierung, Aufbereitung und Verarbeitung von Hanf. Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
- ATB (2003):** Patent DE 103 463 658: Verfahren zur Aufbereitung von Naturfaserpflanzen. Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
- DESANLIS F. (2006):** Basics of hemp growing. 4th International Conference of the "European Industrial Hemp Association". Hürth/Cologne, Germany. 21-22 November 2006.
- EN 622 (2003): Faserplatten – Anforderungen. Ausgabe 2003-09, Beuth-Verlag, Berlin
- FNR (1997):** Hanf, Wissenschaftliche Untersuchung zum Thema "Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf" im Auftrage des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 7, Teil. 1 und Teil 2, Landwirtschaftsverlag, Münster, 175 pp.
- FNR (2008):** Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaserwerkstoffen (Deutschland und EU). Gülzower Fachgespräche, Bd. 26, Gülzow, 391 pp.
- FÜRL C., SCHMERBAUCH K.-J., KAISER E., IDLER C. (2006):** Einflüsse durch das Verdichten und den äußeren Luftabschluss auf die Qualität von Grassilagen - Ergebnisse und Anforderungen. Agrartechnische Forschung 12, p. 19-29.
- IDLER C., EHLERT D., ACKERMANN I., KÜHNE G. (2000):** Ernte, Konservierung und Erstverarbeitung von Hanf aus einer Feuchtgutlinie. ATB-Projektabschlußbericht 2000/3, Potsdam, 43 pp.
- IDLER C., PECENKA R. (2006):** Ensiling - a new practice for preservation of hemp, 11th International Conference of Agricultural Technologies and Technical means in Ecological and Energetic Aspects, Kaunas 2006, Proceedings pp 125-132
- MUNDER F., FÜRL C., HEMPEL, H. (2003):** Advanced Decortication Technology for not retted Bast Fibres. Journal of Natural Fibers 4, p. 49-65.
- PECENKA R. (2004):** Cost reductions in natural fibre processing by the use of an optimized comb shaker for fibre cleaning. Agricultural Engineering Research 10, p. 48-53.
- PECENKA R., IDLER C., GRUNDMANN P., FÜRL C., GUSOVIUS H.-J. (2007):** Tube Ensiling of Hemp – Initial Practical Experience. Agricultural Engineering Research 13, pp 15-26
- RADOSAVLJEVIC L., PECENKA R., FÜRL C. (2007):** Organic-native bonding agents for the manufacture of materials using preserved hemp. 6th International Symposium "Materials made of renewable resources", Erfurt 2007, Proceedings p. 7

Fließeigenschaften von Schüttgütern aus dem Faserpflanzenaufschluss

Flow properties of bulk material from fibre decortication

Jürgen Runge, Steffen Schmidt

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik,
Geusaer Str. 88, 06217 Merseburg
E-Mail: runge.juergen@vdi.de

Kurzfassung

Schüttgüter aus dem Faserpflanzenaufschluss, so genannte Schäben, besitzen infolge ihrer sperrigen Partikelform und ihrer relativ großen Partikelabmessungen elastische Eigenschaften. Dies führt zu Problemen bei der Ermittlung von Fließorten mittels Scherzellen. Da beträchtliche Scherwege benötigt werden, um hinlänglich stationäres Fließen zu erreichen, wurde ein Großringschergerät verwendet. Die gemessenen Fließeigenschaften sind lediglich als Anhaltswerte bei der Silodimensionierung zu verwenden.

1 Einleitung

Beim Aufschluss von Faserpflanzen erhält man neben dem Zielprodukt, den Fasern, so genannte Schäben. Schäben sind Bruchstücke des Holzkerns im Inneren des Stängels. Für die weitere Verarbeitung und Verwertung dieser Schäben ist die Kenntnis ihrer Lager- und Fließeigenschaften wichtig. Zu untersuchen waren Hanfschäber, Flachsschäben und Ölleinschäben aus verschiedenen Stufen des Aufschlussprozesses: der Aufschlussmaschine, dem Speisegerät und dem Stufenreiniger. Entscheidend werden die Partikeleigenschaften vom Zerkleinerungsgerät, in diesem Falle der Aufschlussmaschine beeinflusst. So besitzt jede Maschine Ihre eigene „Handschrift“ bezüglich der Form und Größe der erzeugten Partikel. Speisegerät und Stufenreiniger sind Stationen des nachfolgenden Separierungsprozesses hier fallen weitere Schäben an, welche schrittweise von den Fasern getrennt werden. Die so erhaltenen Schüttgüter besitzen im unverdichteten Zustand eine sehr geringe Schüttdichte, sind mit zunehmender Normalspannung relativ stark verdichtbar und entwickeln dabei elastische Eigenschaften.

2 Ermittelte Schüttguteigenschaften

2.1 Partikelabmessungen

Die Analyse der Partikelabmessungen erfolgte in der Hauptsache durch fotografische Darstellung. Vorhandene Feingutanteile wurden mittels Vibrationssiebung bei einer Maschenweite von 200 µm ermittelt.

2.1.1 Flachsschäben

Man erkennt in **Bild 1**, dass die Flachsschäben stäbchenförmig ausgebildet sind.

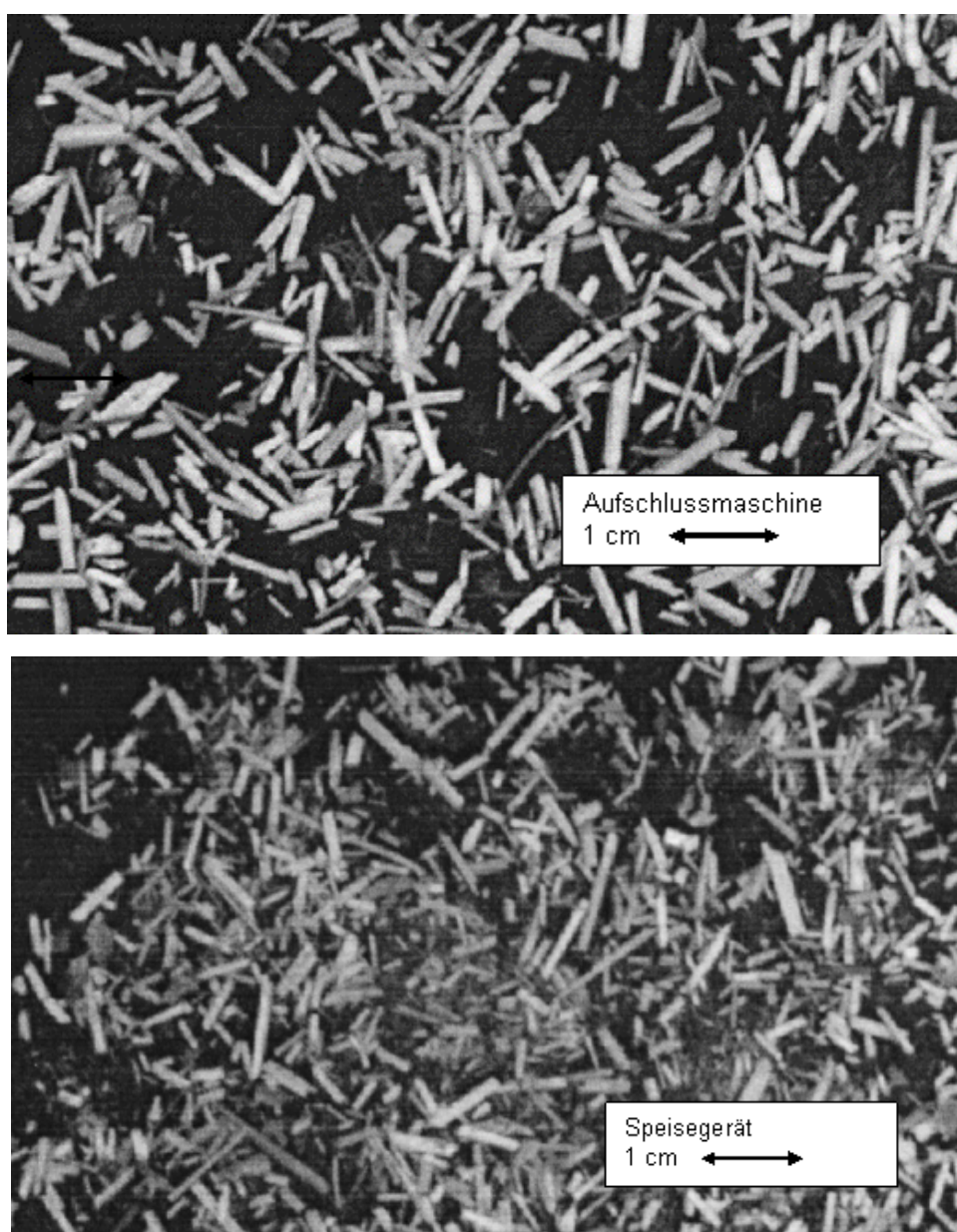
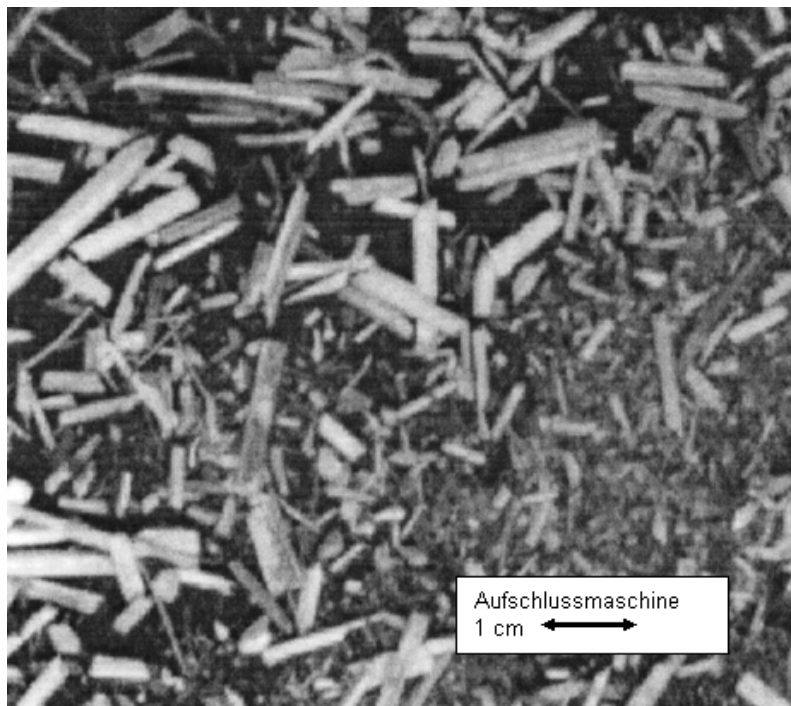


Bild 1: Flachsschäben

Das Produkt von der Aufschlussmaschine weist nahezu keinen Feingutanteil unter 200 μm auf. Die Partikellänge schwankt von 0,5 bis 40 mm und die Breite variiert von 0,5 bis 1 mm. Der mittels Vibrationssiebung abgetrennte Feingutanteil unter 200 μm beträgt 7,67 Masseprozent. Es ist festzustellen, dass das Feingut dazu neigt, sich zu Knäueln zusammenzuschließen.

2.1.2 Hanfschäben

In **Bild 2** ist zu erkennen, dass die Hanfschäben von der Aufschlussmaschine eine etwas kompaktere Form besitzen. Die größten Partikel besitzen eine Länge von etwa 20 mm und eine Breite von 3 mm. Der Feingutanteil der Hanfschäben von der Aufschlussmaschine unter 200 μm beträgt 4,73 Masseprozent. Die Hanfschäben vom Speisegerät besitzen eine noch kompaktere Form. Es sind geringe Anteile von Fasern zu erkennen.



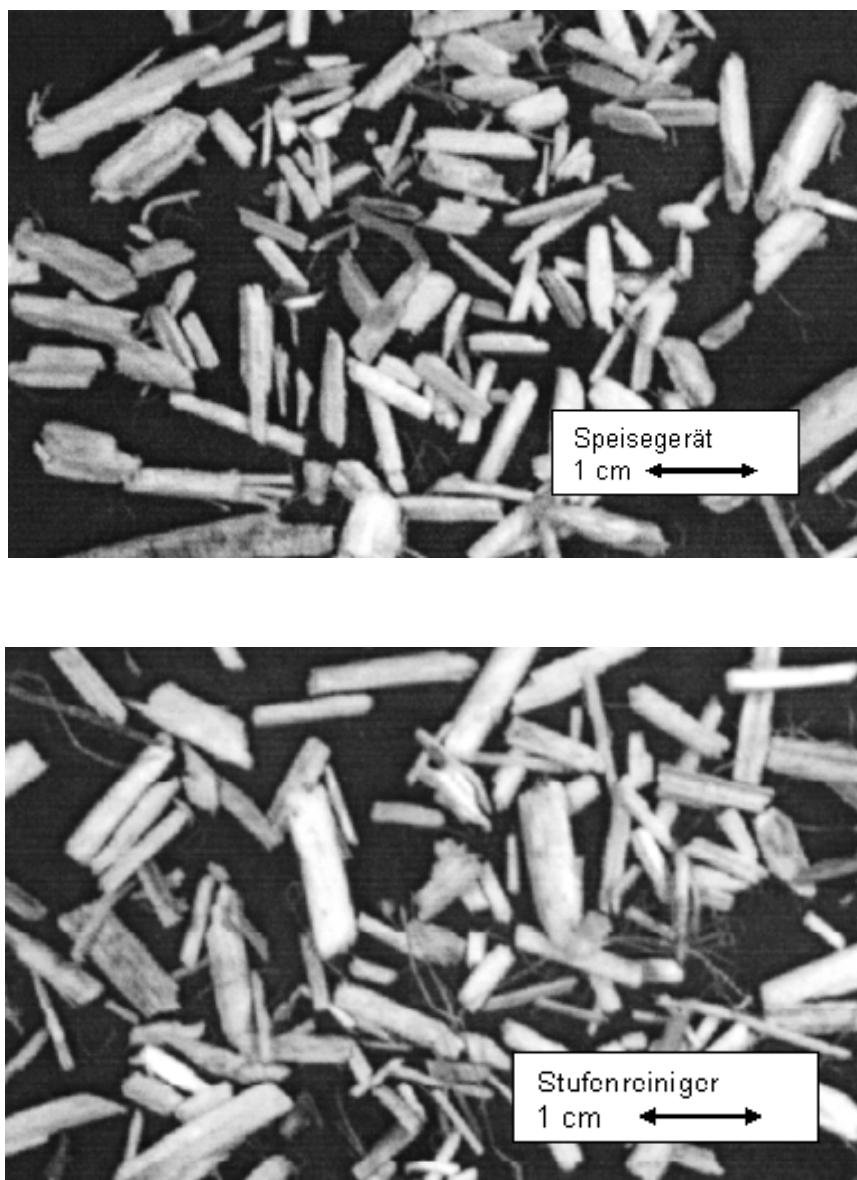


Bild 2: Hanfschäben

Die Hanfschäben von Stufenreiniger besitzen eine ähnliche Kompaktheit wie die vom Speisegerät, jedoch ist der Faseranteil etwas höher.

2.1.3 Ölleinschäben

Die Ölleinschäben in **Bild 3** zeigen eine feinere Struktur als die Flachs- und Hanfschäben.

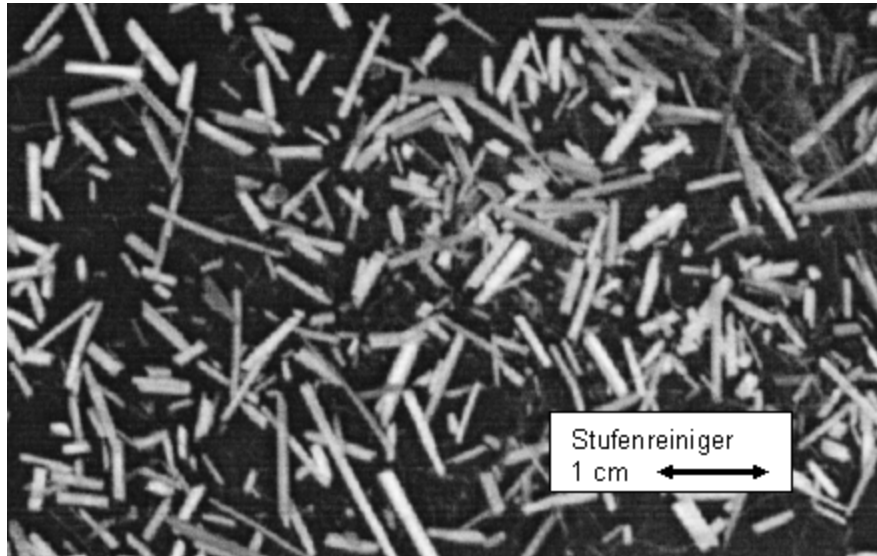


Bild 3: Ölleinschäben

2.2 Statisches Verdichtungsverhalten

Das statische Verdichtungsverhalten wurde mit nachfolgend beschriebenem Messprinzip ermittelt: Es basiert darauf, dass in einen Topf eine definierte Masse eines Stoffes eingefüllt wird. Durch Aufbringen von Massenstücken auf einen vertikal beweglichen Deckel wird dem eingefüllten Schüttgut eine definierte Normalspannung aufgeprägt. Durch Messung der Höhe des Schüttgutes im Topf kann nun das von ihm eingenommene Volumen ermittelt werden. Die Dichte ρ_{stat} wird durch Division der Masse des Schüttgutes durch das berechnete Volumen ermittelt. **Bild 4** zeigt die schematische Darstellung der Messeinrichtung. Die Normalspannung σ wird berechnet, indem man die Kraft auf die Querschnittsfläche des zur Verdichtung benutzten Gefäßes bezieht.

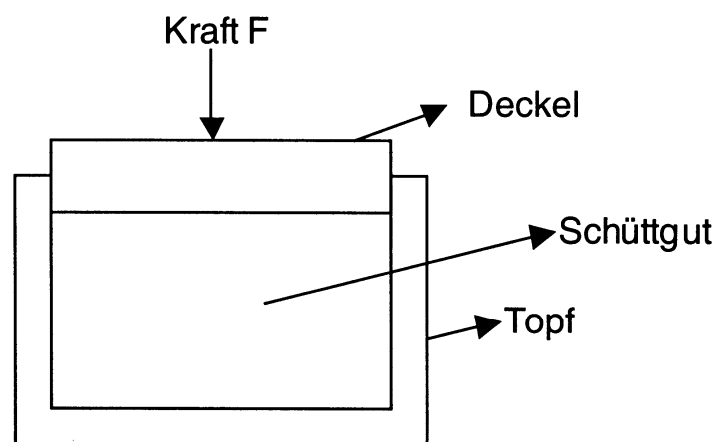


Bild 4: Messeinrichtung zum statischen Verdichtungsverhalten

In **Bild 5** werden die gemessenen Kurven für das statische Verdichtungsverhalten der untersuchten Produkte dargestellt. Generell kann man feststellen, dass die lockere Schüttdichte aller Produkte recht gering ist, wobei Ölleinschäben der geringsten Wert aufweisen aber am stärksten verdichtbar sind. **Tabelle 1** enthält zum Vergleich die Werte für die lockere Schüttdichte und die bei der maximalen Normalspannung von $\sigma=14,82$ kPa.

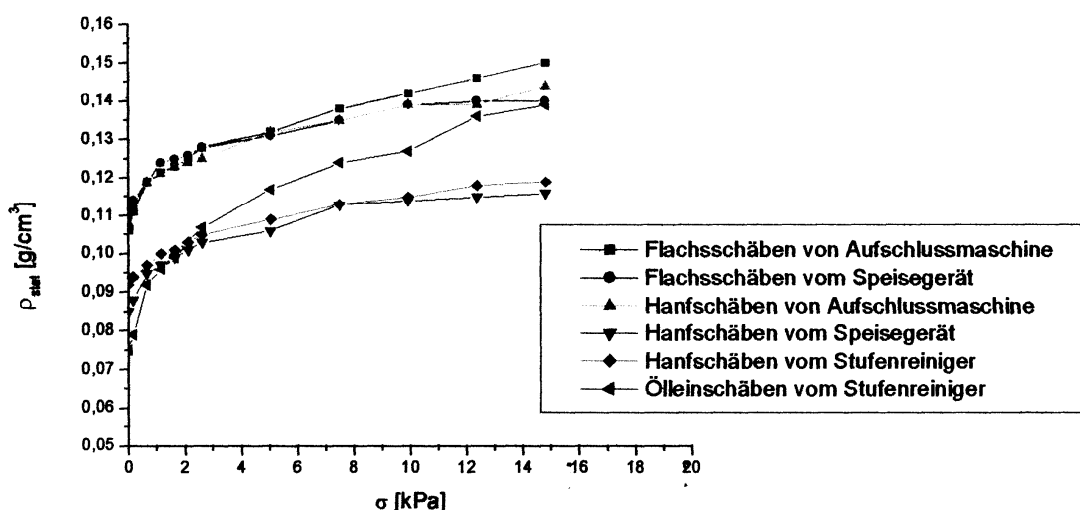


Bild 5: Statisches Verdichtungsverhalten

Tabelle 1: Statisches Verdichtungsverhalten

Normalspannung	Flachsschäben von Aufschlussmaschine	Flachsschäben vom Speisegerät	Hanfschäben von Aufschlussmaschine	Hanfschäben vom Speisegerät	Hanfschäben vom Stufenreiniger	Ölleinschäben vom Stufenreiniger
σ [kPa]	ρ_{stat} [g/cm ³]	ρ_{stat} [g/cm ³]	ρ_{stat} [g/cm ³]	ρ_{stat} [g/cm ³]	ρ_{stat} [g/cm ³]	ρ_{stat} [g/cm ³]
0	0,106	0,11	0,108	0,085	0,092	0,075
14,82	0,15	0,14	0,144	0,116	0,119	0,139

2.3 Verwendete Großringscherzelle

Zur Ermittlung der Fließeigenschaften von Schüttgütern steht eine Auswahl an verschiedenen Schergeräten bereit. Angesichts der hier zu untersuchenden Produkte aus dem Faserpflanzenaufschluss kommt erfahrungsgemäß nur ein Ringschergerät in Frage. Dies ist damit zu begründen, dass Packungen derartiger Schüttgüter elastisch sind und zum Scheren einen relativ langen Scherweg bedürfen. Weiterhin bedingt die längliche Partikelform, dass beim Einfüllen in die Scherzelle eine in starkem Maße ungeordnete Packung vorliegt, welche eines gewissen Scherweges bedarf, um sich zu ordnen bzw. auszurichten. Angesichts der vorliegenden Partikelgrößen bis in den Zentimeterbereich kann nur eine Ringscherzelle mit großen Abmessungen zum Einsatz kommen.

Bild 6 zeigt die schematische Darstellung des Versuchsstandes. Dieser wurde im Rahmen früherer Arbeiten (CHOLODEWICZ 2002, SCHMIDT 2003, HERRLING 2004) gebaut und erprobt, um Messdaten von Schüttgütern gewinnen zu können, welche über große Partikelabmessungen, geringe Schüttgutdichten und elastische Eigenschaften beim Fließen verfügen.

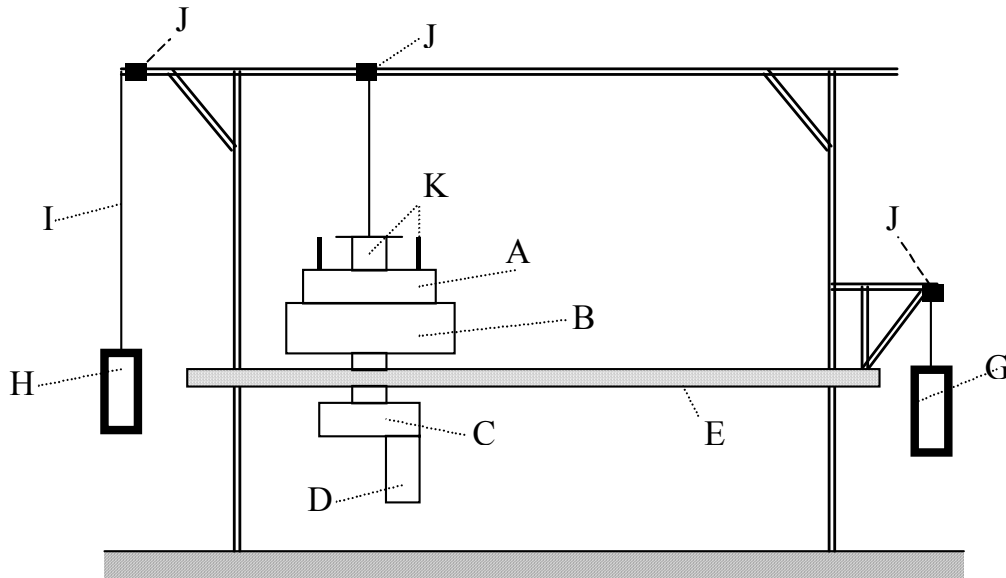


Bild 6: Schematische Darstellung der Versuchsanlage

- A Scherdeckel (ruhend)
- B Schertrog (rotierend)
- C Schneckengetriebe
- D Elektromotor
- E Tischplatte
- F Traverse
- G Eichgewicht
- H Masse zum Ausgleich des Deckelgewichtes
- I Stahlkabel
- J Umlenkrollen
- K Ablage für die Gewichte zur Erzeugung der Normalspannung

Der Versuchsstand verfügt über einen elektrischen Antrieb mit Frequenzrichter, der eine Stufenlose Drehzahlregulierung des Schertroges erlaubt. Um die Lagerreibung des Scherdeckels möglichst gering zu halten, kommt ein Luftlager zum Einsatz. Damit werden

durch Reibung hervorgerufene Messfehler weitgehend vermieden. Die erforderliche Normalspannung wird durch auf den Scherdeckel aufgelegte Gewichte erzeugt.

Der Deckel der Großringscherzelle verfügt über einen Hebelarm, welcher gegen eine Kraftmessdose drückt. Die dort erzeugten Signale werden über einen Verstärker verarbeitet und in einem Computer ausgewertet. **Bild 7** zeigt den Aufbau der Scherzelle. Sie hat folgende Abmessungen:

- Außendurchmesser $D=480$ mm
- Innendurchmesser $d=290$ mm
- Breite des Scherraumes $b=95$ mm
- Höhe der Zelle $H=110$ mm
- Scherraumvolumen $V_S=12639$ cm³

Um den Schervorgang in der Scherzelle zu realisieren, muss vermieden werden, dass das Schüttgut am Boden und am Deckel gleitet. Dies wird bei feinkörnigen Schüttgütern durch den Einbau von Rippen im Scherdeckel und im Schertrog gewährleistet. Vorversuche haben ergeben, dass die untersuchten Schäben zur Knäuelbildung neigen, was kein eigentliches Scheren mehr möglich macht. Deshalb wurden Scherdeckel und -boden mit Platten aus Hart-PVC versehen, in welche Nägel eingelassen wurden. Diese hatten einen Durchmesser von 0,8 mm und eine Länge von 12 mm. Die Nageldichte betrug am Zellenboden 14150 Nägel/m² und am Deckel 20690 Nägel/m².

Die Messprozedur zur Ermittlung von Fließsorten ist in der Literatur ausführlich beschrieben (SCHULZE 2002A & SCHULZE 2002B). Deshalb wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

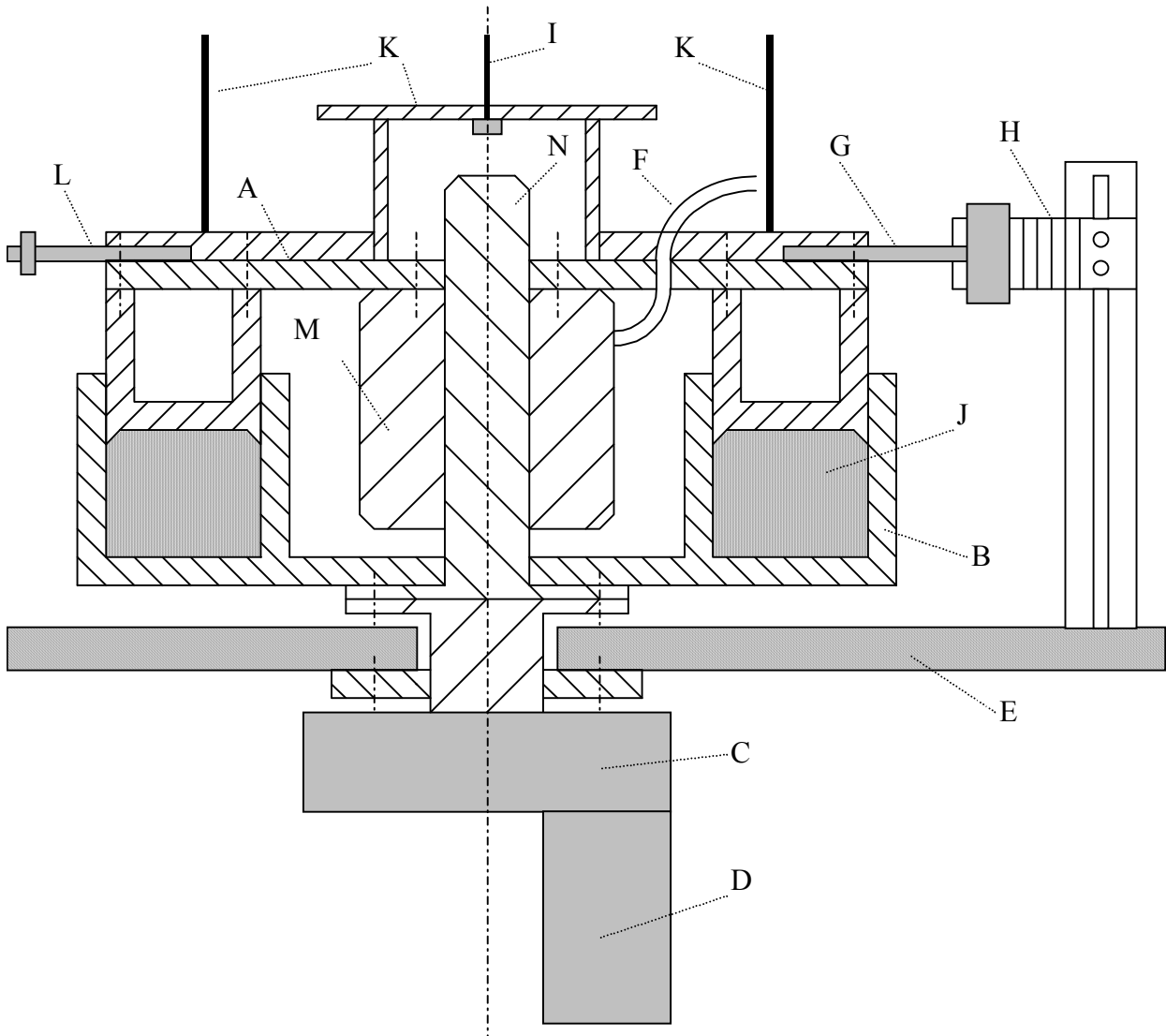


Bild 7: Schematische Schnittdarstellung der Ringscherzelle

A	Scherdeckel (ruhend)	I	Stahlkabel
B	Schertrog (rotierend)	J	Schüttgut
C	Schneckengetriebe	K	Ablage für die Gewichte zur Erzeugung der Normalspannung
D	Elektromotor	L	Kalibrierarm
E	Tischplatte	M	Luftgleitlager
F	Druckluftschlauch	N	Lagerzylinder
G	Messarm		
H	Kraftmessdose		

2.4 Wandreibung

Der Wandreibungswinkel eines Schüttgutes ist eine bestimmende Größe für das Fließregime in einem Silo und die Belastung der Silokonstruktion. In den **Bildern 8** und **9** sind die Wandfließorte für das Wandmaterial C-Stahl dargestellt indem die Wandschubspannung τ_w über der Wandnormalspannung σ aufgetragen wird. Sie wurden mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Ringschergerät gemessen. Die in den **Bildern 8** und **9** dargestellten Wandfließorte stellen Geraden durch den Koordinatenursprung dar. Dies bedeutet, daß der Wandreibungswinkel dem Anstieg der Wandfließorte entspricht und unabhängig von der Wandnormalspannung σ ist. **Tabelle 2** enthält die gemessenen Wandreibungswinkel φ_w .

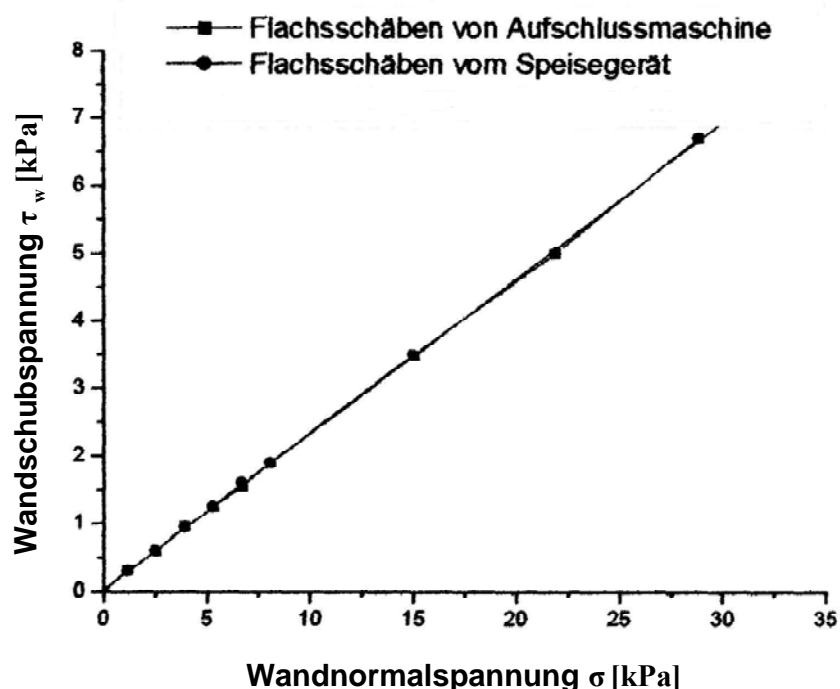


Bild 8: Wandfließorte der Flachsschäben

Tabelle 2: Gemessene Wandreibungswinkel

Produkt	φ_w [°]
Flachsschäben von Aufschlussmaschine	13,1
Flachsschäben vom Speisegerät	13,1
Hanfschäben von Aufschlussmaschine	15,9
Hanfschäben vom Speisegerät	15,5
Hanfschäben vom Stufenreiniger	15,9
Ölleinschäben vom Stufenreiniger	13,3

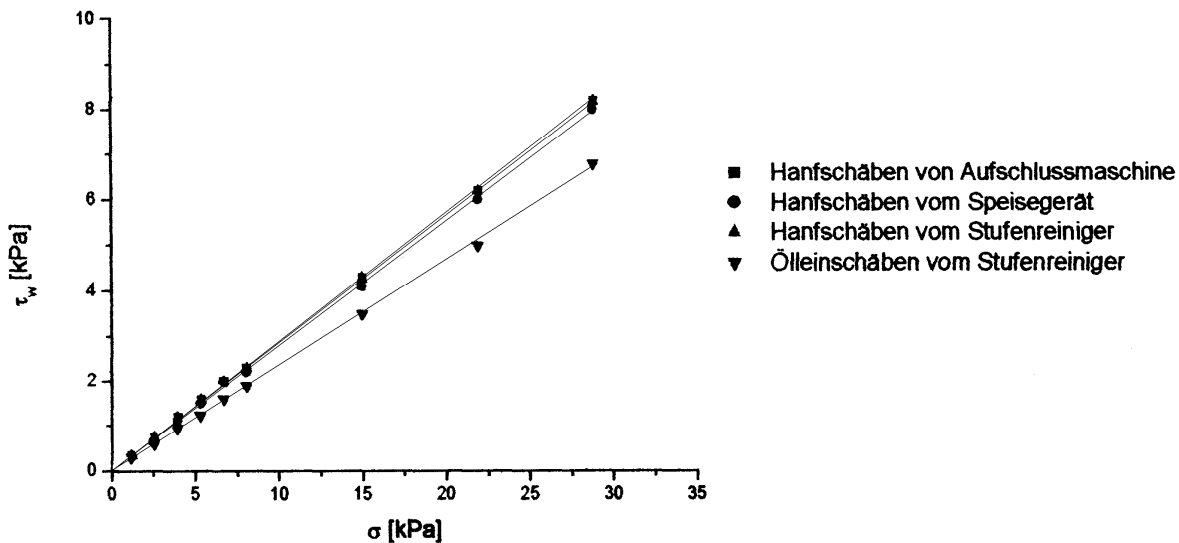


Bild 9: Wandfliessorte von Hanf- und Ölleinschäben

2.5 Fließeigenschaften

Die Messung der Fließsorte gestaltete sich für die untersuchten Produkte kompliziert. Gründe hierfür sind die abnormale Form und Größe der Partikel. Daraus resultieren stark elastische Eigenschaften der Schüttgutpackung und die Gefahr der Knäuelbildung beim Schervorgang. Auch hat man zu beachten, dass der anfänglich beim Einfüllen vorhandene stochastische Packungszustand sich im Laufe des fortschreitenden Schervorganges umorientiert und eine mehr oder weniger geordnete Ausrichtung der Längsachse der Partikel in Scherrichtung erfolgt.

2.5.1 Flachschäben von der Aufschlussmaschine

Das Schüttgut ist als sehr elastisch einzustufen. Die Messungen gestalteten sich schwierig, da eine Tendenz zur Knäuelbildung beobachtet wurde. Damit wird eine Ausrichtung der länglichen Partikel beim Scheren verhindert. Der Fließfaktor ff_c nach JENIKE hat einen Wert zwischen 5,0 und 6,0. Das Schüttgut kann somit formell als leicht fließend eingestuft werden. Hierbei ist aber zu beachten, dass alle hier untersuchten Produkte sehr geringe Schüttdichten ρ_{sch} aufweisen. Sie liegen für dieses Produkt im stationären Fließzustand zwischen 0,146 und 0,156 g/cm³. Der Fließfaktor ff_c wurde seinerzeit von JENIKE anhand von Schüttgütern z. B. aus der Bau- und Montanindustrie definiert, welche eine wesentlich höhere Schüttdichte besitzen. Die Anwendung des Fließfaktors ff_c in seiner ursprünglichen Klassifizierung ist also für Schüttgüter mit sehr geringer Schüttdichte differenziert zu sehen. Dies gilt für alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Schüttgüter.

2.5.2 Flachschäben vom Speisegerät

Es sind keine Ausrichteffekte zu beobachten, da eine Tendenz zur Knäuelbildung besteht. Der Fließfaktor ff_c nach JENIKE hat einen Wert zwischen 5,4 und 6,4. Die Schüttgutdichten ρ_{sch} liegen für dieses Produkt im stationären Fließzustand zwischen 0,143 und 0,153 g/cm³.

2.5.3 Hanfschäben von der Aufschlussmaschine

Ausrichteffekte sind bei diesem Produkt vorhanden, wirken sich aber nicht signifikant auf die Fließeigenschaften aus. Der Fließfaktor ff_c nach JENIKE hat einen Wert zwischen 7,9 und 12,1 im eingefüllten, nicht ausgerichteten Zustand und von 7,5 bis 13,9 im ausgerichteten Zustand. Die Schüttgutdichten ρ_{sch} liegen für dieses Produkt im stationären Fließzustand zwischen 0,143 und 0,156 g/cm³ und erhöhen sich nach der Ausrichtung auf Werte zwischen 0,156 und 0,172 g/cm³.

2.5.4 Hanfschäben vom Speisegerät

Hier spielen die Ausrichteffekte eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Der Fließfaktor ff_c nach JENIKE hat einen Wert zwischen 5,8 und 8,2 im eingefüllten, nicht ausgerichteten Zustand und von 3,9 bis 8,5 im ausgerichteten Zustand. Es ist also eine deutliche Verschlechterung des Fließfaktors mit fortschreitendem Schervorgang zu verzeichnen. Die Schüttgutdichten ρ_{sch} liegen für dieses Produkt im stationären Fließzustand zwischen 0,157 und 0,174 g/cm³ und erhöhen sich nach der Ausrichtung auf Werte zwischen 0,161 und 0,179.

2.5.5 Hanfschäben vom Stufenreiniger

Auch hier spielen Ausrichteffekte eine Rolle. Im Gegensatz zu den Hanfschäben vom Speisegerät kommt es durch den Ausrichtvorgang zu einer Verbesserung der Fließeigenschaften. Hier ergibt sich ein Widerspruch, welcher angesichts der sehr ähnlichen Morphologie der Hanfschäben aus den beiden Verarbeitungsstufen (siehe **Bild 2**) nicht erklärt werden kann. Am Beispiel der Hanfschäben vom Stufenreiniger sollen die Veränderungen der Fließeigenschaften nachfolgend dargestellt werden. **Bild 10** zeigt die gemessenen Fließorte mit den MOHR'schen Spannungskreisen im anfänglichen nicht ausgerichteten und **Bild 11** im ausgerichteten Zustand am Beispiel der Hanfschäben vom Stufenreiniger. Es ist zu erkennen, dass die Fließorte im nicht ausgerichteten deutlich steiler verlaufen und einen größeren Ordinatenabschnitt besitzen als im ausgerichteten Zustand. Das bedeutet, dass die Fließeigenschaften sich mit zunehmendem Scherweg verbessern, was mit dem sich einstellenden höheren Ordnungszustand der Packung erklärt werden könnte,

aber, wie oben schon bemerkt, nicht schlüssig ist. **Tabelle 3** enthält die Kennwerte der einzelnen Fließorte. Die Werte für den ausgerichteten Zustand sind darin grau unterlegt. Neben der Veränderung der Werte für den Fließfaktor ff_c und die Schüttgutedichte ρ_{sch} erkennt man auch eine deutliche Abnahme des inneren, effektiven und stationären Reibungswinkels φ_i , φ_e und φ_{st} . Dieser Effekt ist übrigens bei allen hier untersuchten Produkten zu beobachten, welche einen Ausrichteffekt aufweisen.

Tabelle 3: Fließeigenschaften der Hanfschäben vom Stufenreiniger
(grau unterlegte Werte im ausgerichteten Zustand)

	Fließort 1	Fließort 2	Fließort 3
σ_1 [kPa]	14,9	21,3	29,9
	12,2	19,1	26,5
σ_c [kPa]	1,59	2,69	6,85
	0,829	1,66	3,74
τ_c [kPa]	0,442	0,769	1,9
	0,283	0,57	1,26
φ_i [°]	31,8	30,6	31,9
	21,3	21,1	22,2
φ_e [°]	34,5	33,9	38
	23,2	23,5	26,2
φ_{st} [°]	31	30,1	32
	21,2	22,4	23,9
ff_c	9,39	7,92	4,37
	14,8	11,5	7,07
ρ_{sch} [g/cm ³]	0,141	0,149	0,151
	0,158	0,169	0,173

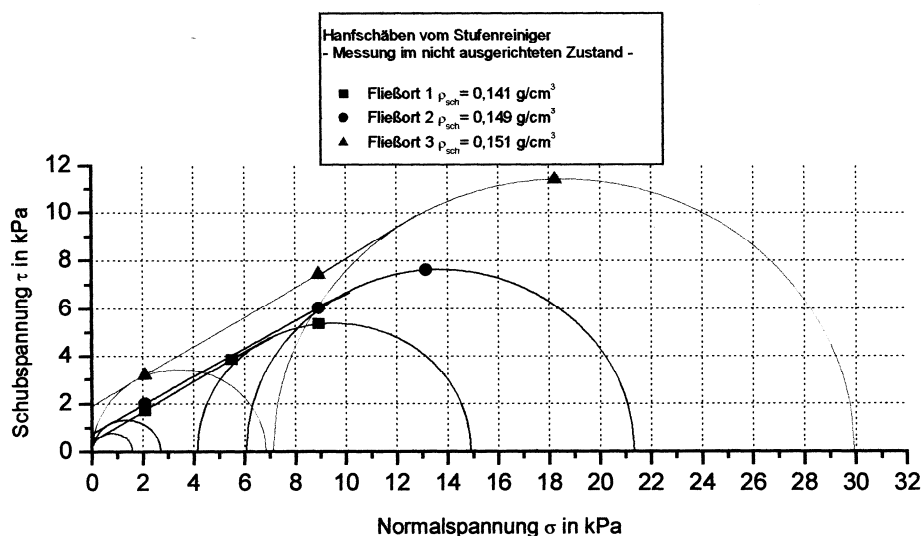


Bild 10: Fließorte für Hanfschäben vom Stufenreiniger im nicht ausgerichteten Zustand

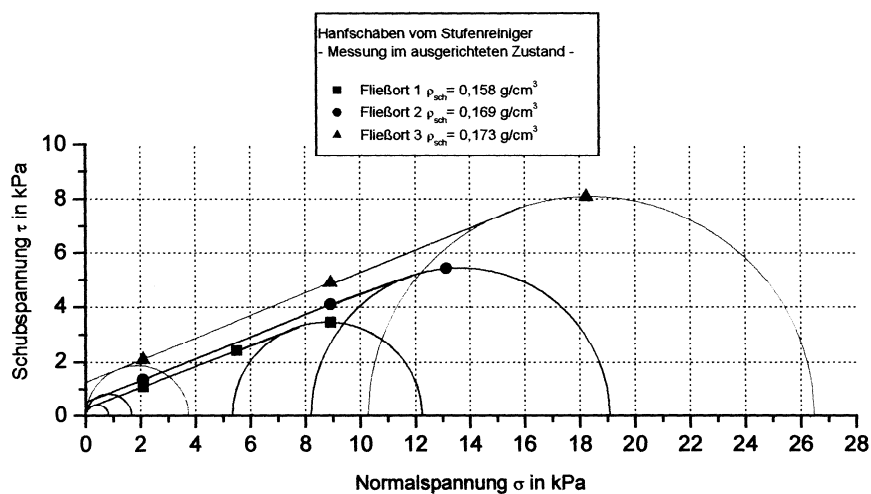


Bild 11: Fließorte für Hanfschäben vom Stufenreiniger im ausgerichteten Zustand

2.5.6 Ölleinschäben vom Stufenreiniger

Infolge Knäuelbildung konnte bei diesem Produkt kein Ausrichteffekt festgestellt werden. Die Messungen gestalteten sich deshalb schwierig. Der Fließfaktor ff_c nach JENIKE hat einen Wert zwischen 5,8 und 6,7. Die Schüttgutdichten ρ_{sch} liegen für dieses Produkt im stationären Fließzustand zwischen 0,131 und 0,146 g/cm^3 .

3 Schlussfolgerungen

Schüttgüter aus dem Faserpflanzenaufschluss besitzen gewisse Eigenheiten, welche die Ermittlung der Fließeigenschaften erschweren. Lassen sich für Schüttgüter, deren Partikel eine kompakte Korngestalt besitzen die Fließorte im Scherversuch reproduzierbar ermitteln, so trifft dies für fasrige oder spanförmige Partikel nicht mehr zu. Schüttgüter mit derartigen Partikeln haben eine weitere Besonderheit: Die Partikel, welche anfangs in stochastischer Packung in die Scherzelle eingefüllt werden neigen dazu, sich mit zunehmendem Scherweg parallel zu diesem auszurichten. Durch diesen Vorgang ändert sich der Packungszustand dermaßen, dass völlig veränderte Fließeigenschaften auftreten können. Im eingefüllten Zustand sind Verschlaufungen und Verhakungen unmittelbar zwischen den Partikeln noch vorhanden. Während des Schervorganges werden diese mehr und mehr aufgelöst, so dass sich im ausgerichteten Zustand die Schubspannung τ verkleinern müsste. Diese Vermutung konnte bei den Hanfschäben von Speisegerät bestätigt werden. Die Änderung war teilweise beträchtlich, da Unterschiede in der Schubspannung von bis zu 1,5 kPa zu verzeichnen sind. Dies bedeutet, dass für jeden der beiden Packungszustände eigene Fließorte existieren. Für die Hanfschäben vom Stufereiniger ergeben sich widersprüchliche Ergebnisse, für welche momentan keine Erklärung möglich ist. Von den untersuchten Stoffen können die Hanfschäben als die mit dem stärksten Ausrichteffekt betrachtet werden.

Generell ist es nicht möglich für alle sechs untersuchten Produkte die Fließorte exakt zu ermitteln. Es kann nur ein Intervall der Fließeigenschaften bestimmt werden. Man kann so den möglichen Bereich der Fließeigenschaften eingrenzen und die Auslaufgeometrie eines Silos näherungsweise bestimmen. Eine weitere negative Tendenz besteht bei den Produkten mit Knäuelbildung, welche in der Praxis zu Auslaufstörungen in Silos führen kann.

Die geringen Schüttdichten sind eine weitere besondere Eigenschaft der untersuchten Schüttgüter. Da sich Verschlaufungen und Verhakungen durch die geringe Gewichtskraft derartiger Schüttgüter nicht ohne weiteres von alleine auflösen, ist mit Fließbehinderungen zu rechnen. Abhilfe können hier verschiedene mechanische Austraggeräte schaffen.

Es ist bemerkenswert, dass man kaum Aussagen über derartige Schüttgüter in der Literatur findet. Es ist wünschenswert, dass in Zukunft weitere Untersuchungen mit derartigen Schüttgütern durchgeführt werden, um die bestehenden Unsicherheiten bei der Ermittlung der Fließeigenschaften und damit auch der Silodimensionierung zu minimieren.

4 Danksagung

Für die Bereitstellung der Schüttgutproben und die langjährige kollegiale Zusammenarbeit möchten wir Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Fürll vom ATB Potsdam-Bornim herzlich danken.

5 Symbolverzeichnis

ff_c	Fließfunktion nach JENIKE
φ_e	effektiver Reibungswinkel
φ_i	innerer Reibungswinkel
φ_{st}	stationärer Reibungswinkel
φ_W	Wandreibungswinkel
ρ_{sch}	Schüttgutdichte im stationären Fließzustand
ρ_{stat}	Schüttgutdichte bei einaxialer Verdichtung
σ	Normalspannung
σ_c	einaxiale Druckfestigkeit
σ_1	größte Hauptspannung
τ	Schubspannung
τ_c	Kohäsion
τ_W	Wandschubspannung

6 Literatur

- CHOLODEWICZ R. (2002):** Messung der Fließfähigkeit von grobkörnigen Schüttgütern mit einem Großringschergerät. Projektarbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
- HERRLING S. (2004):** Untersuchungen zum Fließverhalten grobkörniger Schüttgüter in Ringscherzellen. Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
- SCHMIDT S. (2003):** Untersuchung der Fließeigenschaften von Schüttgütern aus dem Faserpflanzenaufschluss. Projektarbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
- SCHULZE D (2002B):** Fließeigenschaften von Schüttgütern mit faser- und plättchenförmigen Partikeln, Schüttgut 8 (6): 538-546
- SCHULZE D. (2002A):** Messung der Fließeigenschaften hochdispenser Schüttgüter bei sehr kleinen Verfestigungsspannungen. Chemie-Ingenieur-Technik 74 (8): 1044-1048

Neue Werkstoffe aus Naturfasern

New materials of natural fibres

Thomas Hoffmann, Dana Barthel

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V., 14469 Potsdam, Max-Eyth-Allee 100
E-Mail: thoffmann@atb-potsdam.de

Kurzfassung

Faserpflanzen sind ein zunehmend genutzter Rohstoff in der industriellen Verwertung. Im Interesse einer möglichst hohen Wertschöpfung im ländlichen Raum wird versucht, die ersten Aufbereitungs- und Verarbeitungsschritte von landwirtschaftlichen Unternehmen durchzuführen. In einer Diplomarbeit war zu klären, welche Voraussetzungen und Anforderungen sich ergeben, wenn aus Hanf- und Weizenstroh Elementarfasern und Whisker gewonnen werden sollen. Die Elementarfasern können als Verstärkungsmaterial in Spritzgussbauteilen und die Whisker bei Nanoanwendungen verwendet werden.

Durch eine Literaturrecherche wurden verschiedene Aufschlussmethoden aufgezeigt. Die Herstellung von Elementarfasern und Whisker erfordert in der Regel eine Kombination aus mechanischer Vorzerkleinerung, chemischem Aufschluss und mechanischer Nachzerkleinerung.

Im Labormaßstab sind Mahlversuche mit einer Messermühle, einer Planetenmühle, einer Zentrifugalmühle und einer Scheibenmühle durchgeführt worden. Die kleinsten Fasern wurden von der Zentrifugalmühle erzeugt. Die Mediane bei der Faserlängen und –breiten betragen bei Hanf 135,23 µm bzw. 5,51 µm, bei Stroh 25,26 µm und 9,19 µm.

1 Einführung

Die Nutzung von pflanzlichen Naturfasern hat eine lange Tradition. Altägyptisches Faserleingewebe von ca. 5.000 v. Chr. oder chinesische Seile aus Hanf von 2.800 v. Chr. zeugen davon (CARUS *et al.* 2008).

In Europa sind Hanf und Flachs gebräuchliche Faserpflanzen. Mit der Mechanisierung der Baumwolle und dem Aufkommen der Kunstfaser wurden die einheimischen Faserpflanzen im Laufe der Zeit verdrängt.

Mitte der 90er Jahre wurde der Hanfanbau in Deutschland wieder etabliert. Der Verbraucher interessierte sich für umweltfreundliche Produkte, die leicht wiederzuverwerten sind und auf natürlichem Weg entsorgt werden können. Auch die Industrie hatte die Faser-

pflanzen, vor allem Hanf, als nachwachsenden Rohstoff mit werkstofftechnisch herausragenden Eigenschaften wiederentdeckt. Das große Interesse rührt auch daher, dass mit der Entwicklung von naturfaserverstärkten Kunststoffen wie Formpressteilen und Spritzgussteilen neue Einsatzmöglichkeiten für die Pflanzenfasern erschlossen worden sind.

Damit Pflanzenfasern in naturfaserverstärkten Kunststoffen die gewünschten Materialeigenschaften liefern, müssen sie aufbereitet werden. Art und Umfang der Aufbereitung richtet sich nach der Anwendung und nach der Morphologie der Pflanzenfasern.

Hanf und Flachs gehören zu den Bastfaserpflanzen, d.h. die Fasern werden aus dem Rindenteil der Stängel gewonnen. Die Fasern sind in Faserbündel angeordnet. Um die Elementarfasern mit einem Durchmesser von 15 – 35 μm (**Tabelle 1**) nutzen zu können, müssen sie aus den Faserbündeln herausgelöst werden. Die Elementarfasern ihrerseits lassen sich in Stufen bis zu Microfasern (Mikrofibrillen) auftrennen. Der Grad der Auftrennung hängt vom Verwendungszweck ab (**Bild 1**).

Tabelle 1: Durchmesser der Elementarfasern bei ausgewählten Pflanzenfasern (KOZLOWSKI *et al.* 2008)

Faserpflanze	Durchmesser der Elementarfaser [μm]
Abaca (<i>Musa Textilis</i> Nee) ^{a)}	10-30
Baumwolle (<i>Gossypium</i>) ^{b)}	15-24
Flachs (<i>Linum Usitatissimum</i>) ^{c)}	15-22
Hanf (<i>Cannabis Sativa</i>) ^{c)}	17-24
Jute (<i>Cochorus Capsularis</i>) ^{c)}	15-35
Kenaf (<i>Hibiscus Cannabinus</i>) ^{c)}	13-20

^{a)} Blattfaser ^{b)} Samenfaser ^{c)} Bastfaser

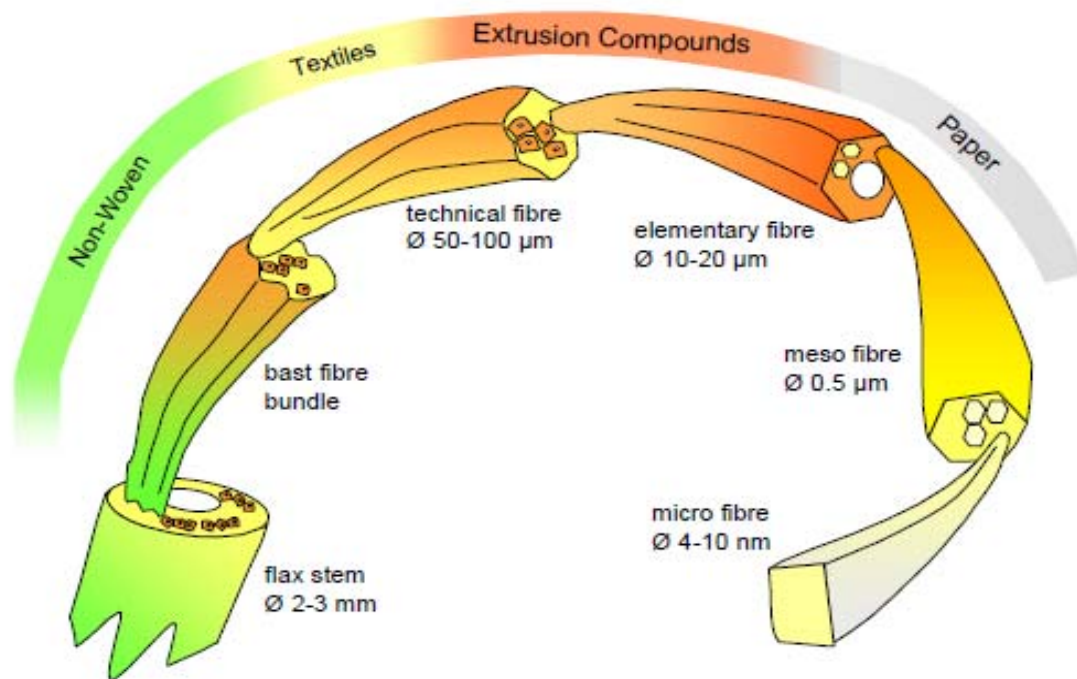


Bild 1: Schematischer Aufbau von Bastfasern am Beispiel von Flachs (Bos *et al.* 2002)

Je nach Verwendungszweck werden verschiedene Varianten der Aufbereitung unterschieden:

- Fasern und Holzkern (Schäben) werden zusammen zerkleinert und zu Dämmstoffen und Platten verarbeitet.
- Die Faserbündel werden vom Holzkern gelöst. Aus den Faserbündeln können Seile, Vliese, Filze und Textilien hergestellt werden.
- Die Faserbündel werden in Einzelfasern aufgetrennt. Die Einzelfasern können in Spritzgussbauteilen oder bei der Papierherstellung verwendet werden.
- Ein weiteres Auftrennen der Einzelfasern führt zu Cellulosenadeln, den so genannten Whisker. Die Cellulosenadeln sind aufgrund ihrer geringen Abmaße interessante Rohstoffe für Nano-Anwendungen.

2 Zielstellung

Die Landwirtschaft ist nicht nur Produzent von Nahrungsmitteln, sondern zunehmend auch Lieferant von Ausgangsstoffen für die industrielle Verwertung. Im Interesse einer höheren Wertschöpfung in der Landwirtschaft sollen die Aufbereitung der Rohstoffe und erste Verarbeitungsschritte bereits durch Industrieunternehmen im ländlichen Raum erfolgen. Mit dem Einsatz der Fasern als Verstärkungsmaterial in Spritzgussbauteilen oder dem Auf-

trennen der Fasern in Fibrillen und weiter in Cellulosenadeln ergeben sich zwei zukunfts-trächtige Anwendungsmöglichkeiten.

In einer Diplomarbeit (BARTHEL 2008) war zu klären, welche Voraussetzungen und Anforderungen sich ergeben, wenn Pflanzenfasern für Spritzgussteile oder als Cellulosenadeln eingesetzt werden sollen.

Als landwirtschaftlicher Rohstoff wurden Hanfstroh und Weizenstroh gewählt. Hanffasern lassen aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit auch nach dem Zerkleinern reißfeste Partikel erwarten. Das Weizenstroh war aufgrund seiner Verfügbarkeit interessant.

3 Stand des Wissens und Ableitung geeigneter Aufbereitungsverfahren

3.1 Grundlagen

Die Hauptbestandteile der pflanzlichen Zellwand sind Cellulose, Pektin, Lignin und Hemicellulose. Die Cellulose ist ein fasriges Material, das in einer Matrix aus Lignin, Hemicellulose und Pektin eingebettet ist. Dadurch entstehen Poren und Tunnel, die die Zellwände horizontal wie vertikal durchziehen (BARTUNEK 1956). Das Lignin ist für die Verholzung zwischen und innerhalb der Zellen verantwortlich. Die Hemicellulose ist eine flexible Kittsubstanz, die zwischen der Cellulose und dem Lignin vermittelt.

Der Aufbau der pflanzlichen Zellwand besteht aus Mittellamelle, Primärwand, Sekundärwand und Tertiärwand. Innerhalb der verschiedenen Schichten variieren die chemische Zusammensetzung (BACIC *et al.* 1998) und der Kristallinitätsgrad der Cellulose (BOLYSON & HERBERT 1995).

Die Reaktivität der Cellulose sowie die Zugänglichkeit in die Cellulosezwischenräume für chemische Reaktanten werden durch die intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen beeinflusst. Dabei gilt, je höher die Festigkeit des Cellulosekristalls, desto schwerer ist der Zugang für Reaktanten und desto geringer ist die Reaktivität.

3.2 Ausgewählte chemische Methoden der Celluloseherstellung

Mit der chemischen Behandlung werden folgende Ziele verfolgt:

- Verbesserung der Zugänglichkeit in die Cellulosestruktur für chemische Reaktanten und Steigerung der Reaktivität
- Abspalten von Lignin und Hemicellulose von der Cellulose
- Gezieltes Abspalten von Lignin
- Aufbrechen der Celluloseketten

Das übergeordnete Ziel der chemischen Behandlung ist, aus Lignocellulose reine Cellulose zu gewinnen.

Zugänglichkeit und die Reaktivität durch Quellen

Beim Quellen wird zwischen interkristallinem und intrakristallinem Quellen unterschieden.

Interkristallines Quellen kann mit Wasser erfolgen. Das Wasser dringt über Poren und Kanäle bis in die Zwischenräume der Elementarfibrillen und in die amorphen Bereiche vor. In diesen Bereichen der Cellulose findet eine Adsorption des Wassers statt, wobei das Wasser nicht weiter in den Cellulosekristall infiltrieren kann (KATZ 1932). Der Querschnitt der Fasern kann sich um 20-25 % vergrößern, wenn sie mit genügend überschüssigem Wasser bedeckt sind (MARTIN *et al.* 1972).

Zu den intrakristallinen Quellmitteln zählen Säure, Salz, Amine, Aminkomplexe oder Hydroxid-Lösungen. Intrakristalline Quellmittel erreichen alle Teile der Cellulose und auch den Cellulosekristall. Das Quellmittel gelangt über Tunnel und Poren bis in die Zwischenräume der Elementarfibrillen und in die amorphen Bereiche. Von da aus infiltriert das Quellmittel in den Cellulosekristall und spaltet dabei intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen und Van-der-Waals-Bindungen auf. Die Kristallgitterstruktur wird geweitet, wodurch sich die Faser vergrößert (WARWICKER *et al.* 1966, WARWICKER 1971).

Abspalten von Lignin und Hemicellulose durch Aufschluss

Zur Anwendung kommen chemische Verfahren, die entwickelt worden sind, um aus Holz Zellstoff zu gewinnen. Dafür werden das Lignin und die Begleitstoffe in Lösung gebracht und entfernt. Je nach Verfahren wird auch die Cellulose teilweise degradiert. Es werden mehrere Verfahrensvarianten unterschieden (GRUBER 2007, SCHRÖDER 2007):

Sulfatverfahren

- Aufschlusschemikalie ist Sulfit NaS
- bei der Chemikalien-Rückgewinnung wird Sulfat (Na_2SO_4) zugesetzt – daher der Name
- Kochen in wässriger Lösung, Kochdauer 4-6 Stunden bei etwa 170 - 190 °C
- geringe Ansprüche an den Rohstoff starke Geruchentwicklung (faule Eier)
- es können auch harzreiche Hölzer verarbeitet werden

Säure-Vorhydrolyse

- als erster Aufschluss Vorhydrolyse durch vorzugsweise Schwefelsäure oder durch Wasserdampfbehandlung bei 170°C
- anschließend Sulfat-Aufschluss
- im Ergebnis sehr reiner Zellstoff

Sulfit-Verfahren

- älter als das Sulfatverfahren, wird weniger oft angewendet
- Aufschlusschemikalie ist SO_2 , das in Wasser zu schwefliger Säure (H_2SO_3) wird
- es gibt mehrere Varianten: Saurer Sulfitaufschluss, Bisulfitaufschluss, neutraler Sulfitaufschluss, Alkalischer Sulfitaufschluss

Natron-(Soda)-Aufschluss

- Aufschlusschemikalie ist Natronlauge (NaOH), Soda (Na_2CO_3) für Laugenrückgewinnung
- bei Holz nur chemischer Teilaufschluss
- Aufschluss auf alkalischem Weg
- Basis für Sulfatverfahren
- gut geeignet für Einjahrespflanzen (GRUBER 2007), weil dieses Pflanzenmaterial wenig Lignin enthält

Enzymatischer Aufschluss

- Aufschluss durch Enzyme
- Abbaureihenfolge: Hemicellulose, Cellulose, Lignin
- ideal wäre Lignin zuerst abzubauen
- mögliche Enzyme: Laccase, Mangan-Peroxidase, Lignin-Peroxidase (Lignase)
- bisher kein Verfahren, dass ausschließlich mit Enzymen arbeitet

Aufbrechen der Celluloseketten durch Degradation

Degradation bedeutet das Verringern des Polymerisationsgrades. Die Degradation kann durch Säurehydrolyse, Peeling-Reaktion oder Alkalihydrolyse erfolgen. Für die Degradation kann auch der Enzymkomplexe Cellulase verantwortlich sein, der von Bakterien, Pilzen und einigen wirbellosen Tieren produziert wird (KRÄSSIG 1996). Der Vorgang wird dann Biodegradation genannt.

3.3 Ausgewählte mechanische Methoden

Ultraschall-Verfahren

- Behandlung des Ausgangsstoffes mit Ultraschall-Desintegrator oder im Ultraschallbad
- Wirkprinzip: akustische Kavitation in Flüssigkeiten

Hochdruck-Homogenisator-Behandlung

- Wirkprinzip: Das vorzerkleinerte Material wird in einer Flüssigkeit mit bis zu 1500 bar durch ein Ventil gepresst, wobei Kavitation, Scherkräfte und Kompressionskräfte auf die Partikel wirken und diese zerkleinern

Cryocrushing

- Wirkprinzip: vorzerkleinertes Material wird mit Flüssigstickstoff auf -196°C abgekühlt und anschließend in einem Mörser zerkleinert
- 75% der Teilchen hatten nach der Zerkleinerung einen Durchmesser $< 1\mu\text{m}$ (CHAKRABORTY *et al.* 2005)

Extrusionsverfahren

- Wirkprinzip: dickflüssiges Material wird mit einer Schnecke verdichtet und unter Druck und gegebenenfalls hoher Temperatur durch eine Lochscheibe gepresst und dabei durch Scherung aufgeschlossen
- Aufschluss der Lignocellulose wird durch Zugabe einer basischen Lösung in den Extrusionsvorgang unterstützt

Dampfexplosion

- Wirkprinzip: Überhitzung des Fasermaterial durch Dampf mit 200°C bei einem Druck von ca. 20 bar, schlagartige Entspannung des Drucks führt zum explosionsartigen Verdampfen des Wassers im Fasermaterial und zum Zerreißen der Faser

3.4 Faserfeinheiten

Nach dem Zerkleinern kann das fasrige Gut durch Angabe der Faserlänge und Faserbreite (Faserdurchmesser) charakterisiert werden. Die Faserbreite ist allgemein der wichtigere Wert, weil damit ausgedrückt wird, inwieweit die Faserbündel aufgeschlossen und die Einzelfasern freigelegt worden sind.

Tabelle 2: Durchmesser von Pflanzenfasern nach unterschiedlichen Aufschluss- und Zerkleinerungsverfahren (Auszug aus BARTHEL 2008)

Ausgangsmaterial	Behandlung	Durchmesser [nm]	Quelle
Bastfasern	Ultraschall	25 bis 120	ZAO und FENG (2005)
Bastfasern	Chemische Behandlung, Cryocrusching, Homogenisator	10 bis 60	BHATNAGAR und SAIN (2005)
Weizenstroh	Chemische Behandlung, Cryocrusching, Homogenisator	30	SAIN und BHATNAGAR (2005)
Hanf Fasern	Chemische Behandlung, Cryocrusching, Homogenisator	61	SAIN und BHATNAGAR (2005)
Rutabaga	Chemische Behandlung, Cryocrusching, Homogenisator	35	SAIN und BHATNAGAR (2005)
Flachs	Chemische Behandlung, Cryocrusching, Homogenisator	55	SAIN und BHATNAGAR (2005)
Kartoffelpülpe	Mixer, Sieben, chemische Behandlung, Homogenisator	5 und größer	DUFRESNE <i>et al.</i> (2000)
Zuckerrübenpülpe	Mixer, chemische Behandlung, Sieben, Homogenisator	2 bis 3	DINAND <i>et al.</i> (1999)

3.3 Zusammenfassung geeigneter Aufbereitungsverfahren für den Einsatz im ländlichen Raum

Für das Projekt bestand die Zielstellung, Vorzugslösungen zur Aufbereitung von Elementarfasern und Whisker aus Hanf- und Weizenstroh zu entwickeln, die in landwirtschaftsnahen Unternehmen umgesetzt werden können. Die Herstellung von Elementarfasern und Whisker ist in der Regel eine Kombination aus mechanischer Vorzerkleinerung, chemischem Aufschluss und mechanischer Nachzerkleinerung. Whisker werden zusätzlich degradiert.

Die chemischen Aufschlussverfahren erfordern spezielle Anlagen und ein entsprechendes Fachwissen. Die Etablierung dieser Verfahren in landwirtschaftlichen Betrieben ist eher unwahrscheinlich.

Der chemische Aufschluss, d.h. das Abspalten von Lignin und Hemicellulosen, kann durch eine Säure-Vorhydrolyse, einem Sodaaufschluss oder auf enzymatischem Weg geschehen. Die mechanische Nachzerkleinerung erfolgt meist mit einer Ultraschallbehandlung oder mit einem Hochdruck-Homogenisator. Mit dem Einsatz von Dampfexplosionsgeräten kann der chemische Aufschluss vereinfacht und teilweise ersetzt werden. Die Anwendung von Ultraschall könnte eine geeignete Möglichkeit darstellen, Elementarfasern oder Microfasern ohne chemischen Aufschluss zu produzieren.

Obwohl zu erwarten war, dass durch chemische Aufschlussverfahren geringere Faserdurchmesser zu erzielen sind als durch einen rein mechanischen Aufschluss, sollte untersucht werden, welchen Partikelgrößen durch das mechanische Zerkleinern mit verschiedenen Mühlentypen möglich sind.

4 Versuche zum Zerkleinern von Hanf und Stroh

4.1 Einleitung

In Laborversuchen war die Zerkleinerung von pflanzlichen Faserstoffen durch Mühlen zu untersuchen. Für den Einsatz als Verstärkungsmaterial im Spritzguss waren bei Hanf Faserlängen von 500-600 μm und Faserbreiten von 10-20 μm das Ziel. Als Rohstoff für Nanoanwendungen waren noch kleinere Partikel anzustreben.

Die Faserlängen und -breiten des Gutes sollten nach dem Zerkleinern eine geringe Streubreite aufweisen.

4.2 Material und Methoden

Das Hanfstroh hatte einen Trockensubstanzgehalt von 95.8% und das Weizenstroh 95,5 %. Zum Zerkleinern wurden vier verschiedene Mühlen untersucht (**Bild 3**):

- Versuch 1: Messermühle Grindomix GM 200; Firma Retsch, Probe 7,5 g; Mahldauer 2 x 1 min; Drehzahl 10.000 min^{-1}
- Versuch 2: Planetenmühle Pulverisette 5; Firma Fritsch. Probe 2 g ; Mahldauer 15 min; Rotation des Planetentellers 180 min^{-1}
- Versuch 3: Ultra-Zentrifugalmühle ZM200; Firma Retsch; Siebgröße 0,08 mm; Drehzahl 10.000 min^{-1} verwendet.
- Versuch 4: Scheibenmühle Dr. Mader; Mahlsplatt ca. 0,1 mm; Scheibendrehzahlen: 3000 min^{-1} ; 2250 min^{-1} ; 1500 min^{-1}

Das Ausgangsmaterial für die Versuche 1, 2 und 3 wurde mit einer Schneidmühle SM 100 der Firma Retsch mit einer Siebgröße von 1,5 mm vorzerkleinert (Vorzerkleinerung A). Aufgrund des höheren Rohstoffbedarfs wurde das Material für die Scheibenmühle (Versuch 4) mit einer Schneidmühle Zerma GS 301 vorzerkleinert (Siebgröße 10 mm für Weizenstroh, Siebgröße 15 mm für Hanfstroh, Drehzahl 1400 min^{-1}).

Nach dem Zerkleinern wurden je Mahlvorgang Proben für die Fasergrößenanalyse gezogen. Das zu untersuchende Material wurde auf eine Folie gestreut, von Hand vereinzelt und eingescannt. An den eingescannten Bildern wurden am Bildschirm durch Auftragen von Strecken und Polygonzügen die Faserlängen und -breiten bestimmt.



Messermühle Grindomix GM 200



Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200 (Werksfoto)



Planetenmühle Pulverisette 5



Scheibenmühle

Bild 3: Mühlen im Vergleichstest zum Zerkleinern von Hanf- und Weizenstroh

4.3 Ergebnisse

Die beiden Schneidmühlen SM 100 und Zerma für die Vorzerkleinerungsvarianten VZA bzw. VZB führten bei Hanfstroh zu einem vorzerkleinerten Gut mit deutlich unterschiedlichen Faserlängen (**Bild 4**). Während bei der Schneidmühle SM 100 (VZA) Faserlängen mit einem Median von 1178,24 μm erzielt wurden, waren die Fasern bei der Schneidmühle Zerma (VZB) mit 4270,29 μm im Median deutlich länger. Mit der Messermühle (MM) und der Planetenmühle (PM) konnte das Gut von der Vorzerkleinerung A noch geringfügig eingekürzt werden, wesentliche kürzere Fasern wurde nur mit der Zentrifugalmühle (135,23 μm) erreicht.

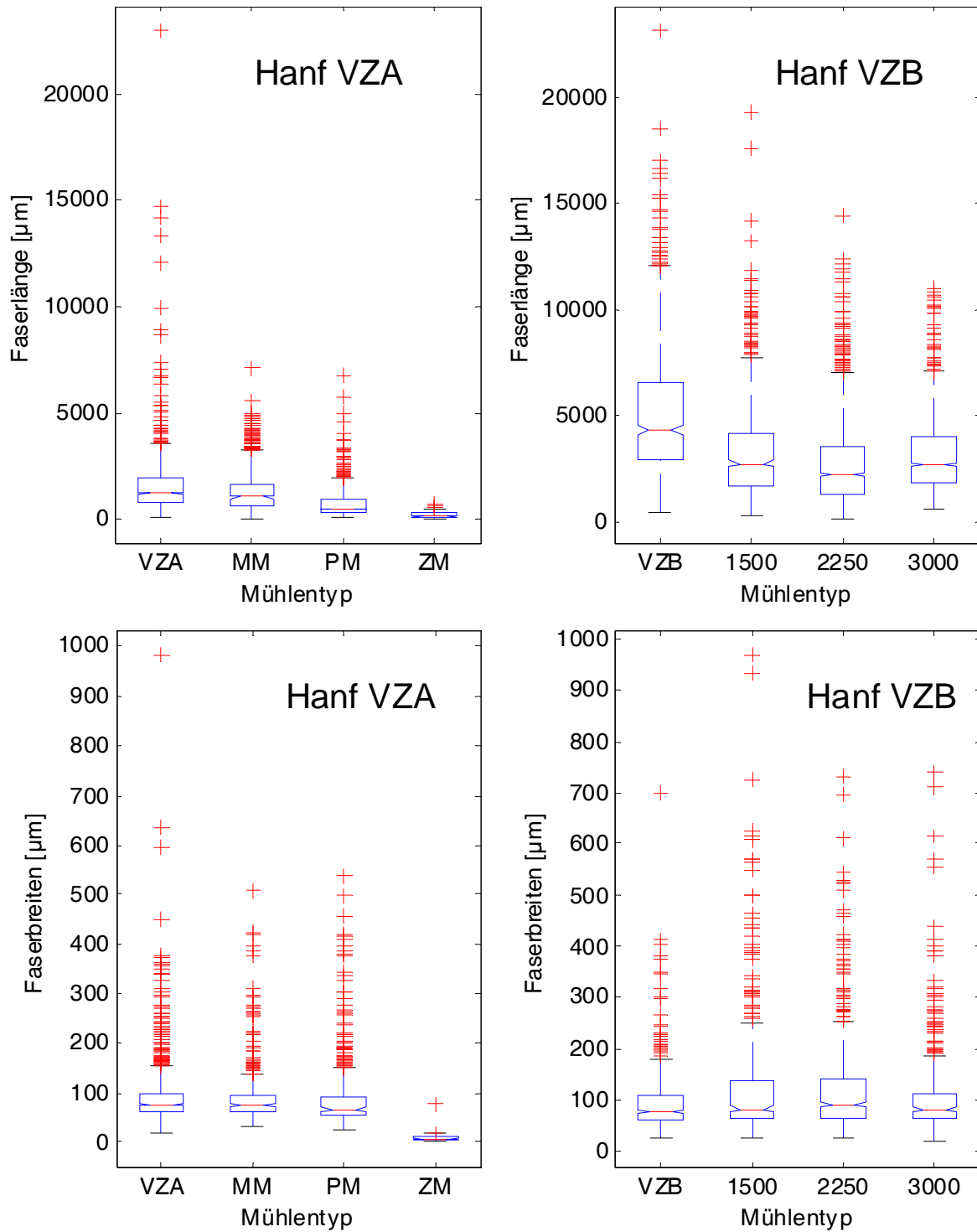


Bild 4: Faserlängen und -breiten von Hanf nach der Zerkleinerung

- VZA Vorzerkleinerung A (Schneidmühle SM 100, Retsch)
- VZB Vorzerkleinerung B (Schneidmühle Zerma)
- MM Messermühle
- PM Planetenmühle
- ZM Zentrifugalmühle
- 1500 Scheibenmühle 1500 min⁻¹
- 2250 Scheibenmühle 2250 min⁻¹
- 3000 Scheibenmühle 3000 min⁻¹

Das vorzerkleinerte Gut der Variante VZB wurde mit der Scheibemühle bei allen drei Drehzahlvarianten (1500, 2250, 3000) weiter eingekürzt. Die Mediane lagen mit 2644, 2004 und 2703 μm über dem Wert von der Zentrifugalmühle.

Ein Verringern der Faserbreite war nur mit der Zentrifugalmühle möglich. Der Medianwert betrug 5,51 μm .

Anhand der Faserbreite war das Mahlgut geeignet, um als Verstärkungsmaterial für den Spritzguss eingesetzt zu werden. Mit 135,23 μm statt der geforderten 500-600 μm waren die Fasern jedoch zu kurz.

Bei Stroh wurden mit alle Mühlen die Längen und Breiten der Strohpartikel gegenüber dem vorzerkleinerten Ausgangsmaterial deutlich reduziert (**Bild 5**). Ähnlich wie beim Hanf lieferte die Zentrifugalmühle (ZM) das Mahlgut mit der geringsten Faserlänge (Median 25,26 μm) und Faserbreite (Median 9,19 μm).

Die Partikellängen und -breiten nach der Zerkleinerung bei Hanf und Stroh zeigten eine weite Streuung. Am wenigsten streuten die Werte bei der Zentrifugalmühle. Aufnahmen mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) zeigten aber, dass es sich trotz der geringen Streubreite um ein heterogenes Material handelte (**Bild 6**). Die mechanische Zerkleinerung in der Zentrifugalmühle durch Schneiden und Scheren führte zu Fasern, die teilweise eingekürzt, vereinzelt und aufgerissen waren. Es wurde offensichtlich, dass die am Bildschirm ausgemessenen Faserlängen und -breiten (**Bild 4**) eine starke Vereinfachung darstellten.

Als Nachteil bei der Zentrifugalmühle erwies sich die starke Wärmeentwicklung, die eine großtechnische Anwendung im Dauerbetrieb verhindert.

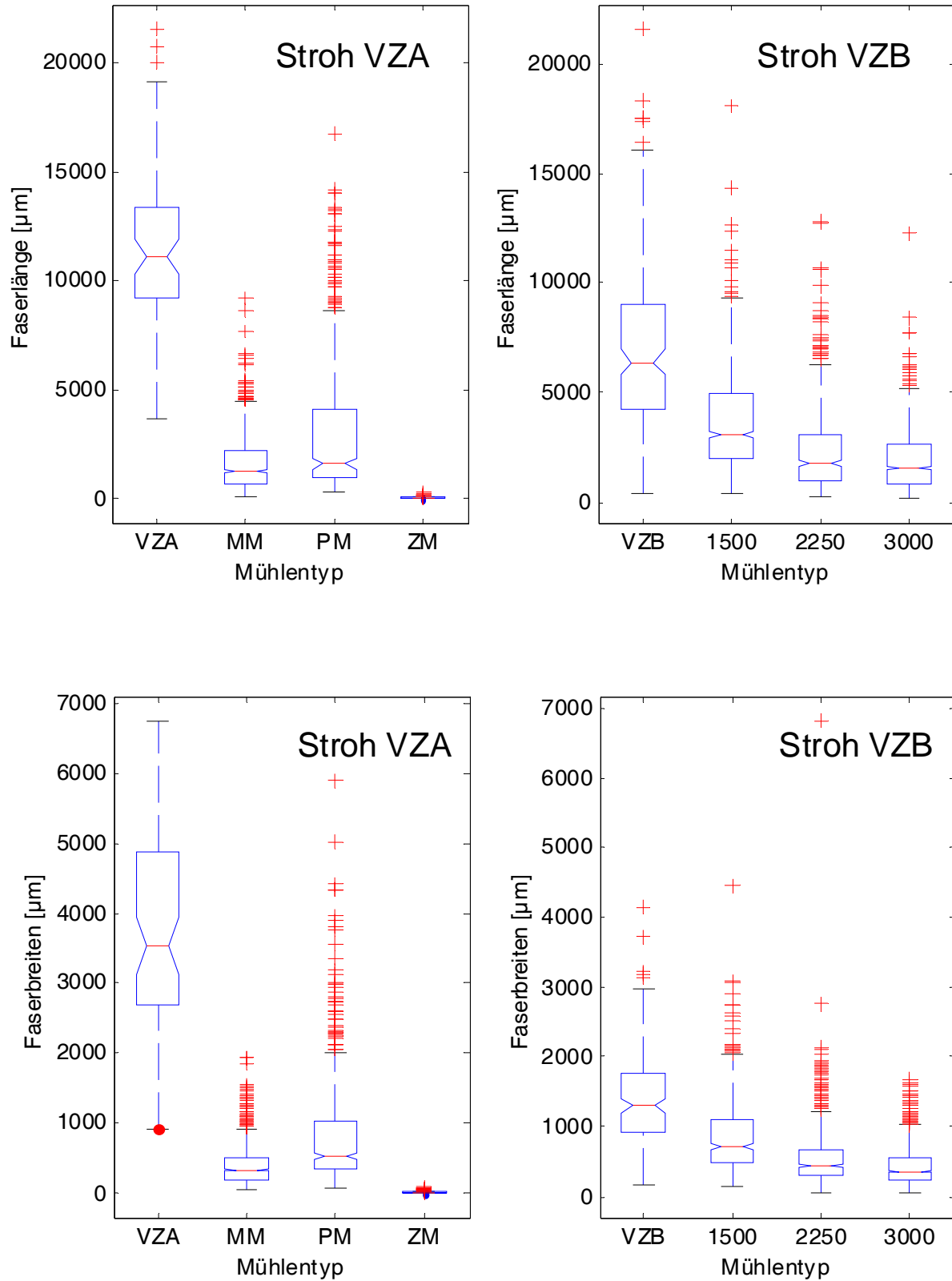


Bild 5: Faserlängen und -breiten von Stroh nach der Zerkleinerung (Abkürzungen siehe **Bild 4**)

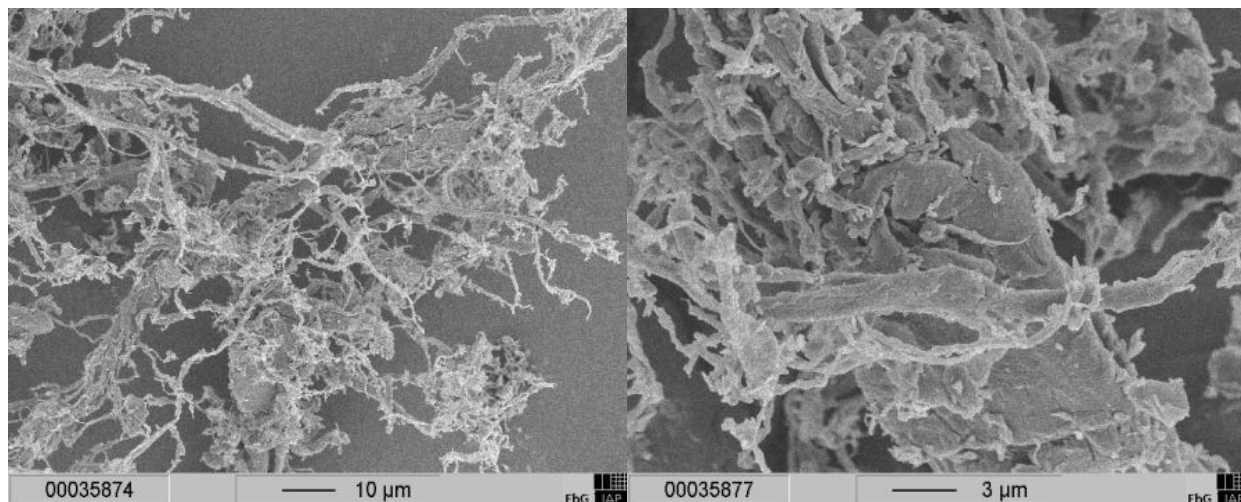


Bild 6: Aufnahmen von Hanffasern mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop nach dem Mahlen mit der Zentrifugalmühle

5 Zusammenfassung

Die Arbeit gliedert sich in zwei Hälften. In der ersten Hälfte wurden Grundlagen zum Aufbau der Pflanzenfasern, sowie zu chemischen und mechanischen Aufschlussmethoden zusammengestellt.

In der zweiten Hälfte wurden Zerkleinerungsversuche mit Hanf- und Weizenstroh durchgeführt. Das Zerkleinern erfolgte mit einer Messermühle, einer Planetenmühle, einer Zentrifugalmühle und einer Scheibemühle. Das Ziel war, durch mechanische Zerkleinerung Fasern mit möglichst geringem Durchmesser zu produzieren.

Die in dieser Arbeit erzeugten Fasern lassen sich in die Kategorie der Mikrofasern einordnen. Das Ziel, Fasern im Nanometerbereich zu erzeugen, wurde nicht erreicht. Diese Einschätzung beruht auf Faserlängen und -breiten, die mit einem Bildanalyseprogramm am Bildschirm gemessen worden sind. Aufnahmen mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop zeigten, dass mit der Zentrifugalmühle ein Mahlgut mit teilweise aufgetrennten Fasern erzeugt worden ist. Teile der Fasern hatten Durchmesser im Nanometer-Bereich.

In weiterführenden Untersuchungen ist zu prüfen, ob die Hanfstrohfasern für die Herstellung von Nanocellulose geeignet sind. Weiterhin sollten Versuche mit einem Ultraschall-Desintegrator und einem Dampfexplosionskessel stattfinden.

Quellenverzeichnis

BACIC A., HARRIS P.J., STONE B.A. (1998): Structure and function of plant cell walls. The Biochemistry of Plants: A Comprehensive Treatise, 14: 297-371.

- BARTHEL D. (2008):** Zerkleinerung und Aufbereitung von Hanfstroh und Weizenstroh für die weitere Verarbeitung. Diplomarbeit, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 95 Seiten.
- BARTUNEK R. (1956):** Chemie und Technologie der Kunststoffe, (Ed. R. Houwink), 3 Aufl., 233-238, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig, Leipzig.
- BHATNAGAR A., SAIN M. (2005):** Processing of Cellulose Nanofiber-reinforced Composites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 24: 1259-1268
- BOLYSOTON E. K., HERBERT J. J. (1995):** „The primary cell wall of cotton fibers“, Textile Res. J. 65: 429-431.
- BOS H.L., VAN DEN OEVER M.J.A., PETERS O.C.J.J (2002):** Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites. Journal of materials science 73: 1683-1692
- CARUS M., MÜSSIG J. (2007):** Markt für Nawaro-Werkstoffe: Biopolymere und holz- und naturfaser-verstärkte Kunststoffe. In: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teil II. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- CARUS M., VOGT D., BREUER T. (2008):** Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen. In: Gülzower Fachgespräche Band 26. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), 391 Seiten
- CHAKRABORTY A., SAIN M., KORTSCHROT M. (2005):** cellulose microfibrils: A novel method of preparation using high shear refining and cryocrushing. Holzforschung, Vol 52: 102-107
- DINAND E., CHANZY H., VIGNON M.R. (1999):** Suspensions of cellulose microfibrils from sugar beet pulp, Food Hydrocolloids, 13(3): 275-283.
- DUFRESNE A., DUPEYRE D., VIGNON M.R. (2000):** Cellulose microfibrils from potato tuber cells: Processing and characterization of starch-cellulose. Journal of Applied Polymer Science, 76: 2080–2092
- KATZ J.R. (1932):** The laws of swelling. Transaction of the Faraday Society, 29: 279-297
- KOZLOWSKI R., WLADYKA-PRZYBYLAK M., KICINSKA JAKUBOWSKA A. (2008):** State of the art in the reserach on natural fibers and their properties used in composites. 7th Global WPC and Natural Fibre Composites Congress and Exhibition, Kassel 18.-19.Juni 2008, A14-1- A14-18
- KRÄSSIG H. (1996):** Cellulose Structure, Accessibility and Reactivity. Gordon and Breach Science Publishers, Volume 11, Kap. 2: 6-41, Kap. 5: 167-324.
- MARTIN L.F., BERTONIERE N.R., ROWLAND S.P. (1972):** The effect of sorption and molecular size of solutes upon elution from polhydroxylic gels, Journal of Chromatography, 64: 263-269.
- MEYER K.H., VAN DER WYK A.J.A (1941):** „Über der Feinbau der Cellulosefasern“, Zeitschrift für Elektrochemie, 47(5): 353-360.
- GRUBER E. (2007):** Grundlagen der Zellstofftechnologie, Unterlagen zur Vorlesung, Vorlesung 5 Cellulose, TU-Darmstadt. www.cellulose-papier.chemie.tu-darmstadt.de
- PÖHLER E., ZIMMERMANN T., GEIGER T:** Cellulose-Nanofibrils Reinforcement, EMPA, Wood Laboratory and Laboratory for Functional Polymers, Dübendorf, Switzerland. http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/27303/---/l=1
- RANBY B.G. (1952):** The cellulose micelles. Tappi 35(2): 53.
- SAIN M., BHATNAGAR A. (2005):** Manufacturing of nano-fibrils from natural fibres, agro based fibres and root fibres, CA, Nr. 2437616
- SCHRÖDER H.W. (2007):** Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe. Unterlagen zur Vorlesung Zellstoff, TU-Freiberg, <http://www.exphys.tu-freiberg.de/~wwwvtut/lsvvt/mik/mitarbeiter/schroeder.html?PHPSESSID=d973ea9cbdb41ae2295ddddd855eca7b>

WARWICKER J.O. (1971): Cellulose and Cellulose Derivates (Eds: Bikales, N. M. and Segal, L.) Part IV, Chapter XIII, H2, pp. 338-343, John Wiley & Sons, New York.

WARWICKER J.O., JEFFRIES R., COLBRAN R.L., ROBINSON R.N., (1966): Review of the Literature on the Effect of Caustic Soda and Other Swelling Agents on the Fine Structure of Cotton. Shirley Institute Pamphlet 93, Shirley Institute Didsbury, Manchester, UK

ZHAO H.-P., FENG X.-Q. (2007): Ultrasonic technique for extracting nanofiber from nature materials, Applied Physics Letters, 90, 073112

**In der Reihe
Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005

Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern	2005
	Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005
Heft 53	Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung von Rizinusöl	2005
Heft 54	Non-Destructive Methods for Detecting Health-Promoting Compounds COST Action 924 Working Group Meeting	2005
Heft 55	4 th IFAC / CIGR Workshop Control Applications in Post - Harvest and Processing Technology (CAPPT 2006) 26th - 29th March 2006, Potsdam, GERMANY	2006
Heft 56	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2006	2006
Heft 57	Kontrolle der Frische in der Nacherntekette von Ökogemüse	2006
Heft 58	Entwicklung eines innovativen Dekontaminationsverfahrens als Technologieantwort auf zukünftiges Qualitätsmanagement im Nacherntebereich	2006

Heft 59	Experimental Studies and Mathematical Modelling of Solar Drying System for Production of High Quality Dried Tomato	2007
Heft 60	13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming	2007
Heft 61	Energiepflanzen im Aufwind Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz	2007
Heft 62	14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2008
Heft 63	Experten-Workshop Lagerung von Holzhackschnitzeln	2008
Heft 64	Postharvest unlimited 2008	2008
Heft 65	Vom Agrarrohstoff zu neuen Produkten – Verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich	2009

Interessenten wenden sich an:

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Tel.: (0331) 5699-820
Fax.: (0331) 5699-849
E-Mail: atb@atb-potsdam.de

Schutzgebühr: 13,- €