

TAGUNGSBAND

14.

FACH-  
KOLLOQUIUM  
26. + 27.  
September  
2018



INSTITUT FÜR  
KONSTRUKTIONSWISSENSCHAFTEN  
UND TECHNISCHE LOGISTIK



Georg Kartnig / Technische Universität Wien  
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

**Tagungsband zum 14. Fachkolloquium  
der Wissenschaftlichen Gesellschaft  
für Technische Logistik e. V. (WGTL)**

Wien, 26. und 27. September 2018

# IMPRESSUM

---

## Tagungsband zum 14. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL)

---

### Herausgegeben von:

Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL)  
c/o Universität Rostock  
Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik  
Richard-Wagner-Straße 31  
18119 Rostock-Warnemünde



### Redaktion, Layout & Titelbild:

Ing. Michael Haupt  
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik - Technische Universität Wien  
Getreidemarkt 9, Hoftrakt BD, 4. OG  
A-1060 Wien

Der Tagungsband wurde mit Mitteln der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik finanziert.

Für den Inhalt der Beiträge sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung der Rechte Dritter. Schadensersatz für fehlerhafte, unvollständige oder nicht abgedruckte Beiträge ist ausgeschlossen. Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © 2018 Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e. V. und die Fachautoren

Druck: Dániel Dencsi, Buch und Medienwirtschaft; [info@dengraf.com](mailto:info@dengraf.com)

### Wir danken unseren Sponsoren



# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>VORWORT</b>	<b>IX</b>
<b>PAPERS ZU DEN VORTRÄGEN VOM MITTWOCH DEN 26.09.2018</b>	<b>1</b>

---

<b>Themengruppe: Konstruktion und maschinenbauliche Gestaltung</b>	<b>1</b>
<b>Experimentelle Analyse des Lenkverhaltens von Tragrollen in Gurtförderanlagen bei Gurtschieflauf</b>	<b>1</b>
<i>Hendrik Otto, Lisa Wonner, Andre Katterfeld</i>	
<i>Lehrstuhl für Fördertechnik Fakultät für Maschinenbau Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg</i>	
<b>Kombination von Eigenspannungen und betrieblichen Spannungen in einem Kranlauftrad</b>	<b>9</b>
<i>Georg Havlicek<sup>1</sup>, Georg Kartnig<sup>1</sup>, Georg Klapper<sup>2</sup></i>	
<i><sup>1</sup>Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik Forschungsbereich: Konstruktionslehre und Fördertechnik (KLFT) Technische Universität WienH</i>	
<i><sup>2</sup>Leiter Entwicklung Maschinenbau Künz GmbH</i>	
<b>Dezentrales Steuerungskonzept für antreibende Tragrollen</b>	<b>19</b>
<i>Lars Bindszus, Daniel Hötte, Ludger Overmeyer</i>	
<i>Institut für Transport- und Automatisierungstechnik Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover</i>	
<b>Parameteridentifikation mit Hilfe eines strukturmechanischen Modells für Superelastikreifen</b>	<b>31</b>
<i>Arne Pross, Rainer Bruns</i>	
<i>Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik Fakultät für Maschinenbau Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr, Hamburg</i>	
<b>Schwingungsmodell zur Abbildung der dynamischen Beanspruchung von Gittermast-Fahrzeugkranen und Lkw-Ladekranen</b>	<b>41</b>
<i>Manuel Stölzner, Michael Kleeberger, Willibald A. Günthner, Johannes Fottner</i>	
<i>Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Fakultät Maschinenwesen Technische Universität München</i>	

---

**Themengruppe: Steuerungstechnik und IT-Systeme** **53**

---

**Towards an approach for assuring machinery safety in the IIoT-age** **53**

*Tommi Kivelä, Markus Golder, Kai Furmans*

*Institute for Material Handling and Logistics (IFL)  
Karlsruhe Institute of Technology (KIT)*

**Deep-Learning-Verfahren zur 3D-Objekterkennung in der Logistik** **69**

*Marko Thiel, Johannes Hinckeldeyn, Jochen Kreuzfeldt*

*Institut für Technische Logistik  
Technische Universität Hamburg*

---

**PAPERS ZU DEN VORTRÄGEN VOM DONNERSTAG DEN 27.09.2018** **79**

---

**Themengruppe: Konstruktion und maschinenbauliche Gestaltung** **79**

---

**Potentiale und Möglichkeiten einer Energieeffizienzsteigerung von Stückgutstetigförderern durch optimierte Antriebssystemauswahl** **79**

*Thomas Stöhr, Norbert Hafner*

*Institut für Technische Logistik (ITL)  
Fakultät Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften  
Technische Universität Graz*

**Rollende Abstützung von Transportzahnriemen in der Anwendung** **87**

*Jan Finke<sup>1</sup>, Jens Sumpf<sup>1</sup>, Carl Conrad Mäder<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Professur Förder- und Materialflusstechnik  
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Chemnitz*

*<sup>2</sup>WRH Corporate Services AG*

**Lebensdauer kunststoffummantelter Drahtseile** **97**

*Toni Recknagel, Thorsten Schmidt*

*Professur für Technische Logistik  
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme  
Fakultät Maschinenwesen  
Technische Universität Dresden*

**Das laterale Laufverhalten von Stahlprozessbändern - Erweiterung der Betrachtungen auf Bänder mit geringer Bandspannung** **105**

*FranzPaulischin, Georg Kartnig*

*Forschungsbereich Fördertechnik und Konstruktionslehre  
Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik  
Technische Universität Wien*

---

**Themengruppe: Planung, Analyse und Simulation logistischer Systeme** **115**

---

**Entwicklung einer mehrkomponentigen Bewertungsmethodik für die Energieeffizienz von Regalbediengeräten** **115**

*Andreas Rücker, Johannes Fottner*

*Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  
Fakultät für Maschinenwesen  
Technische Universität München*

**Integration von Virtual Reality und optischem Motion Capturing in die Planung und Optimierung von Materialflusssystemen** **127**

*André Terharen, Felix Feldmann, Christopher Reining, Michael ten Hompel*

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Dortmund*

---

**Themengruppe: Management, Organisation und Betrieb** **137**

---

**Intralogistikkomponenten für die Automobilproduktion ohne Band und Takt – erste Prototypen** **137**

*Matthias Hofmann*

*Institut für Fördertechnik und Logistik  
Abteilung Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung  
Universität Stuttgart*

**Ein Ansatz für ein Predictive-Monitoring-System zur Identifikation von Störungswirkungen in der Produktionslogistik mittels künstlichen neuronalen Netzen** **145**

*Björn Erichsen, Nina Vojdani*

*Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Universität Rostock*

**Optimierung von Fabrikplanungsprozessen durch Drohneneinsatz und automatisierte Layoutdigitalisierung** **153**

*Dominik Melcher, Benjamin Küster, Malte Stonis, Ludger Overmeyer*

*IPH – Institut für Integrierter Produktion Hannover gGmbH*

**Adaptive Materialbereitstellung – ein neuartiges Konzept für die Materialbereitstellungsplanung in veränderungsfähigen Produktionssystemen** **161**

*Mathias Knop, Nina Vojdani*

*Lehrstuhl Produktionsorganisation und Logistik  
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Universität Rostock*

---

**POSTERBEITRÄGE** **169**

---

**Themengruppe: Konstruktion und maschinenbauliche Gestaltung** **169**

---

**Einfluss der Mensch-Maschine-Interaktion auf das Maschinendesign in der Social Networked Industry** **169**

*Dominik Borst, Christopher Reining, Michael ten Hompel*

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Dortmund*

**Ebener Seilroboter mit HM-HT-Faserseilen als Regalbediengerät in Kommissionierlagern** **177**

*Christoph Müller<sup>1</sup>, Markus Helbig<sup>1</sup>, Markus Golder<sup>1</sup>, Wolf Sattler<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Professur Förder- und Materialflusstechnik  
Fakultät für Maschinenbau  
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe  
Technische Universität Chemnitz*

*<sup>2</sup>Altratec Automation GmbH*

**Entwicklung eines Baukastensystems für universelles Greifen mit flexiblen Aktoren** **183**

*Stephan Ulrich, Christoph Buhdorf, Christopher Klitsch, Rainer Bruns*

*Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL)  
Fakultät für Maschinenbau  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr, Hamburg*

**Modellierung und Untersuchung eines segmentierten Fachwerksystems für Brückenkranträger** **189**

*Jan Oellerich, Steffen Bolender, Kai Furmans*

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

---

**Themengruppe: Steuerungstechnik und IT-Systeme** **197**

---

**Optische Energieversorgung für einen drahtlosen Sensorknoten** **197**

*Christoph von der Ahe, Ludger Overmeyer*

*Institut für Transport- und Automatisierungstechnik  
Leibniz Universität Hannover*

**A Neural Network-Based Algorithm with Genetic Training for a Combined Job and Energy Management for AGVs** **203**

*Paolo Pagani, Dominik Colling, Kai Furmans*

*Institute for Material Handling and Logistics (IFL)  
Karlsruhe Institute of Technology*

**Simulation model for the verification of a safety-related control system in a hoist application** **213**

*Tommi Kivelä, Steffen Bolender, Markus Golder, Kai Furmans*

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

**Autonomes Greifen mit individuell zusammengestellten Greifern des Greifer-Baukastens** 223

*Ilja Dick, Stephan Ulrich, Rainer Bruns*

*Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL)  
Fakultät für Maschinenbau  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr, Hamburg*

---

**Themengruppe: Planung, Analyse und Simulation logistischer Systeme** 229

---

**Dezentrale assistierte Planung: Integrierte Layout- und Systemplanung von Intralogistiksystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Software** 229

*Ruben Noortwyck<sup>1</sup>, Timo Müller<sup>2</sup>, Karl-Heinz Wehking<sup>1</sup>, Michael Weyrich<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)  
Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
Universität Stuttgart*

*<sup>2</sup>Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS)  
Fakultät für Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik  
Universität Stuttgart*

**Ansätze zur Berücksichtigung der zeit- und ortsabhängigen Eigenschaften von Festkörperbrücken in DEM-Simulationen** 241

*Alexander Haber, Georg Kartnig*

*Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik  
Forschungsbereich: Konstruktionslehre und Fördertechnik  
Technische Universität Wien*

**Modellierung und Analyse von Bedarfsschwankungen in Routenzugsystemen zur Versorgung von getakteten Variantenproduktionen** 247

*Christian Lieb, Fabian Hormes, Willibald A. Günthner, Johannes Fottner*

*Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  
Fakultät für Maschinenwesen  
Technische Universität München*

**Numerische Simulation eines Schubelementeförderers** 263

*Christian Richter<sup>1</sup>, Matthias Pusch<sup>1</sup>, Andre Katterfeld<sup>1</sup>, Rolf Kamps<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik  
Fakultät Maschinenbau, Institut für Logistik und Materialflusstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg*

*<sup>2</sup>Bühler AG  
CH-9240 Uzwil, Schweiz*

**System zur reproduzierbaren, automatischen und sicheren Stapelung von Gitterboxen mit einem Brückenkran - KrasS** 273

*Steffen Bolender, Jan Oellerich, Meike Braun, Kai Furmans*

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*



**Spielerisch zum Trainingserfolg: Evaluationsstudie eines PC-basierten Serious Games für die Verpackungslogistik bei DB Schenker**

**279**

*Veronika Kretschmer<sup>1</sup>, Michael Schmidt<sup>1</sup>, Christian Schwede<sup>1</sup>, Sabrina Schäfer<sup>2</sup>, Gerald Müller<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Germany*

*<sup>2</sup>Schenker Deutschland AG, Logistics Product and Process Management, Frankfurt am Main, Germany*

# Ansätze zur Berücksichtigung der zeit- und ortsabhängigen Eigenschaften von Festkörperbrücken in DEM-Simulationen

Approaches to improve existing "bond models" to account for time- and location-dependent properties of solid-state bridges in DEM simulations

Alexander Haber  
Georg Kartnig

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik  
Forschungsbereich: Konstruktionslehre und Fördertechnik  
Technische Universität Wien

**I**n dieser Arbeit werden mögliche Ansätze für eine Erweiterung der bisher in DEM-Softwarepaketen für die Abbildung von kristallinen Festkörperbrücken implementierten Bond-Kontaktmodelle aufgezeigt, mithilfe derer eine allgemein gültige Kalibrierung für bestimmte Schüttgüter ermöglicht wird. Insbesondere soll dadurch eine Unabhängigkeit von der konkret bei der Kalibrierung vorliegenden Zeit- und Druckverfestigung erreicht werden.

[Schlüsselwörter: DEM, kristalline Festkörperbrücken, Bonds, hygroskopisches Schüttgut]

**P**ossible approaches for an extension of the bond contact models implemented so far in DEM software packages for the imaging of crystalline solid-state bridges are shown in this article. These will allow a general calibration for a particular bulk material. Especially, this is intended to achieve independence from the time and pressure consolidation, which is actually present during the calibration.

[Keywords: DEM, caking, solid-bridges, bonds, hygroscopic bulk solids]

## 1 EINLEITUNG

Weltweit wird über alle Produktionsbereiche hinweg, vor allem aber in der chemischen, pharmazeutischen und Lebensmittelindustrie, ein großer Anteil der Güter in Form von Schüttgut gelagert, dosiert und transportiert. So werden beispielsweise jährlich etwa 5400 Mio. Tonnen Schüttgut per Schiff transportiert (54%), wohingegen nur etwa 1600 Mio. Tonnen (16%) in Containern verschifft werden. Die restlichen 30% entfallen auf flüssige und gasförmige Güter wie zum Beispiel Öl [Unc15].

Die Investitionskosten der in der Regel vollautomatischen Förderanlagen für Schüttgüter liegen oftmals im Bereich von mehreren Millionen Euro, was nicht zuletzt auch für den Zulieferer solcher Anlagen ein entsprechendes Risiko im Falle eines Stillstandes zufolge einer Störung darstellt. Dementsprechend hat die Ausfallsicherheit der gesamten Anlage sowohl für den Betreiber als auch für den Hersteller eine außerordentlich hohe Priorität. Bei problematischen Schüttgütern, wie beispielsweise dem hygroskopischen Schüttgut Urea, führt dies teilweise zur Verwendung von Verfahren, die zwar eindeutig wesentliche Nachteile gegenüber anderen Verfahren besitzen, dafür jedoch die nötige Ausfallsicherheit aufweisen. So wird zum Beispiel Kristallharnstoff, der nach der Produktion noch eine gewisse Restfeuchtigkeit aufweist, niemals direkt in vollautomatischen Silos gelagert, sondern in bestenfalls teilautomatisierbaren Hallen, da ein Verklumpen durch Bildung von Festkörperbrücken sehr rasch zu einem Totalausfall eines Silos führen würde. Die mit der Haldenlagerung einhergehenden Nachteile wie schwierige Dosierung, Mischung und teilweise notwendige manuelle Zwischenschritte liegen dabei auf der Hand, werden jedoch bisher akzeptiert, da für eine Lagerung in Silos allgemeine Leitfäden für eine ausfallsichere verfahrenstechnische Auslegung fehlen.

Mit den immer weiter zunehmenden Rechnerleistungen werden numerische Methoden neben der festigkeitstechnischen Auslegung (Finite Elemente Methode) seit geraumer Zeit auch für die verfahrenstechnische Auslegung und Optimierung (Diskrete Elemente Methode) immer interessanter. Anlagen für nicht kohäsive Schüttgüter können schon seit einigen Jahren mit vertretbaren Rechenzeiten mithilfe von DEM-Simulationen untersucht und optimiert werden. Dazu ist eine geeignete Kalibrieroutine notwendig, die in möglichst kurzer Zeit zur richtigen Abbildung verschiedener Schüttgüter in der Simulation führt. Für einfache Schüttgüter sind etliche solcher

Kalibrierversuche in der Literatur angegeben, bei kohäsivem Verhalten fehlen diese jedoch größtenteils. Ein weiteres Problem stellen die in gängigen Softwarepaketen implementierten Modelle für kohäsive Partikeleigenschaften dar. Im Gegensatz zu nicht kohäsiven Schüttgütern können deren Eigenschaften sehr stark durch unterschiedliche Betriebsbedingungen, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Druck, beeinflusst werden. So kann selbst eine für einen Betriebspunkt durchgeführte Kalibrierung trotz gleichen Schüttgutes für einen anderen Betriebspunkt nicht mehr gültig sein. Um daher den Aufwand für die Kalibrierung überschaubar zu halten und damit die DEM-Simulation für die Industrie zugänglich zu machen, müssen die vorhandenen Kontaktmodelle hinsichtlich ihrer Einsatzgrenzen erweitert werden. In diesem Artikel sollen Ansätze für die Weiterentwicklung der in Softwarepaketen bereits implementierten Bond-Modelle zur Simulation von durch Kristallisation hervorgerufenen Festkörperbrücken erläutert werden.

## 2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN DER FESTKÖRPERBRÜCKENBILDUNG

Schüttgüter, die nicht nur Druck-, sondern auch Zugkräfte aufnehmen können, werden im Allgemeinen als kohäsive Schüttgüter bezeichnet. Nach Rumpf [Rum58] lassen sich folgende Haftmechanismen unterscheiden:

- Anziehungskräfte (z.B. Van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische Kräfte)
- Flüssigkeitsbrücken
- Festkörperbrücken

Zur Gruppe der Festkörperbrücken gehören der Vorgang des Sinterns und das Auskristallisieren eines Feststoffes aus einer Lösung. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich ausschließlich mit zweitgenanntem Effekt.

Für die Entstehung einer Festkörperbrücke aus einer Lösung muss zunächst ein Lösungsmittel vorhanden sein. Im Falle der stark hygroskopischen Schüttgüter Zucker, Kochsalz oder Urea wäre dies beispielsweise Wasser, da es sich bei diesen sowohl um wasseranziehende wie auch wasserlösliche Stoffe handelt. Im industriellen Umgang mit hygroskopischen Schüttgütern wird nun unterschieden, ob die zum Verklumpen führende Feuchtigkeit aus der Umgebung oder direkt aus dem Schüttgut kommt. Für den physikalischen Vorgang macht dies aber keinen Unterschied.

Zunächst versucht jeder Stoff bzw. jedes Partikel des Schüttgutes einen Gleichgewichtszustand mit seiner Umgebung herzustellen. Das hier relevante Feuchtigkeitsgleichgewicht kann für jedes Schüttgut in Abhängigkeit von der Temperatur durch sogenannte Sorptionsisothermen dargestellt werden, siehe Abbildung 1. Diese beschreiben, wie sich eine Änderung der relativen Luft-

feuchtigkeit auf die aus der Umgebung adsorbierte Feuchtigkeitsmenge auswirkt.

Bei einer geringen bis mittleren relativen Luftfeuchtigkeit stellt sich im Allgemeinen eine weitgehend konstante dünne Adsorptionsschicht um die einzelnen Partikel ein. Diese beeinflusst das Schüttgutverhalten bei Partikelgrößen im Millimeterbereich nur sehr gering. Ab einer kritischen Luftfeuchtigkeit steigt die Materialfeuchte stark an, da sich an den Kontaktstellen zusätzlich Flüssigkeitsbrücken durch Kapillarkondensation ausbilden.

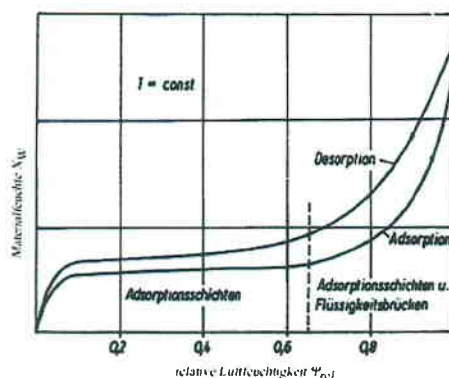


Abbildung 1. Exemplarische Sorptionsisotherme [Sch05]

Die Versuche von Kirsch et al. [KWB11] an einem Zwei-Partikelsystem von gepulvertem Urea mit einem Durchmesser von 1-2 mm zeigen entsprechend Abbildung 2, dass eine Variation der relativen Luftfeuchtigkeit im überkritischen Bereich – beispielsweise von 71% auf 72% – eine sehr rasche Änderung des Flüssigkeitsbrückendurchmessers bewirkt.

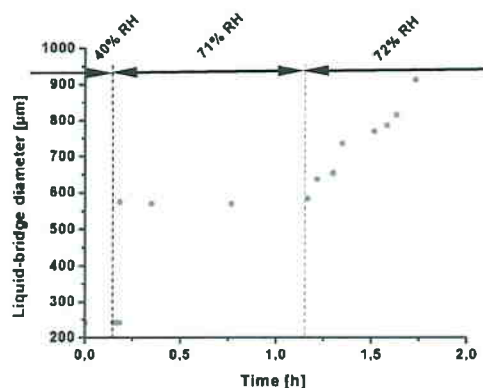


Abbildung 2. Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den Flüssigkeitsbrückendurchmesser zwischen zwei Urea-Partikeln [KWB11]

Weisen die Partikel aufgrund eines vorgelagerten Prozesses unterschiedliche Materialfeuchten auf, so kommt es zu Ausgleichsprozessen über die Partikelgrenzen hinweg, wobei wiederum zumindest kurzfristig Flüssigkeitsbrücken gebildet werden. Diese Feuchtigkeit aus dem Inneren der Partikel kann beispielsweise aus der enthaltenen Restfeuchtigkeit eines Schüttgutes nach einem

Trocknungsvorgang resultieren. Abbildung 3 zeigt schematisch den unterschiedlichen Feuchtegehalt von größeren und kleineren Partikeln.

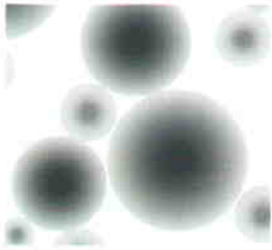


Abbildung 3. Restfeuchtigkeit in verschiedenen großen Partikel

Aufgrund der Wasserlöslichkeit der oben erwähnten Schüttgüter führt die Anwesenheit der Flüssigkeitsbrücken zu einem partiellen Lösen der Partikel. Aus der ursprünglich aus Wasser bestehenden Flüssigkeitsbrücke wird nun mit zunehmender Zeit eine gesättigte Lösung. Je nach weiterer Veränderung oder Beibehaltung der Umgebungsbedingungen können folgende zwei Gründe für ein Auskristallisieren aus einer übersättigten Lösung unterschieden werden:

- Erhöhung der Umgebungstemperatur und Kristallisation durch Verdampfung des Lösungsmittels
- Kristallisation durch Kristallwachstum und Verlagerung der Flüssigkeitsbrücke

Die in Abbildung 4 gezeigte Veränderung der Partikel- und Brückenform tritt unabhängig von dieser Unterscheidung in Abhängigkeit von der Lagerzeit auf und gilt somit für beide Fälle.

### 2.1 KRISTALLISATION DURCH VERDAMPFUNG

In diesem Fall wird die für die Auskristallisierung notwendige Übersättigung der Lösung durch Verdampfung des Lösungsmittels erreicht. Die Festigkeit der dabei entstehenden Festkörperbrücke hängt hier im Wesentlichen nicht von der Größe der vorherigen Flüssigkeitsbrücke ab, sondern vielmehr von der zuvor für die Auflösung des Partikels zur Verfügung gestellten Zeit und ihr Einfluss auf den Sättigungsgrad der Lösung. In [KWB11] haben Kirsch et al. unter anderem die Bruchfläche von Festkörperbrücken zwischen zwei Urea-Partikeln untersucht. Abbildung 4 unten zeigt deutlich, dass bei einer kurzen Lagerzeit nur die Randzone und nicht der komplette Querschnitt der Flüssigkeitsbrücke auskristallisiert. Die Ringform der Kontaktzone (Abb. 4, a2) ist vermutlich damit zu begründen, dass mit dem Verdampfen des Wassers durch Verringerung der Luftfeuchtigkeit zunächst in den Randzonen eine übersättigte Lösung auftritt und dort die ersten Kristallkeime gebildet werden. In der Folge kommt es von der Randzone ausgehend zu einem Kristallwachstum, bis sämtlicher gelöster Stoff auskristallisiert ist. Unter diesem Aspekt stellt die vollständige Verdamp-

fung des Lösungsmittels lediglich ein definiertes Ende der Festkörperbrückenbildung dar.

### 2.2 KRISTALLISATION DURCH KRISTALLWACHSTUM

Werden die von einer Adsorptionsschicht umgebenen und mit Flüssigkeitsbrücken verbundenen Partikel lange genug gelagert, so kommt es auch ohne äußere Veränderung der Temperatur oder Feuchtigkeit zu einer gesättigten Lösung. Durch thermische Energiefluktuationen kann es im Laufe der Zeit zufällig zur Entstehung eines Kristallkeims kommen, dessen Radius den für stabiles Kristallwachstum benötigten kritischen Radius übersteigt. Anschließend kommt es durch das Bestreben der Minimierung der freien Energie eines jeden Systems zum Kristallwachstum, solange dadurch die Oberflächenenergie reduziert werden kann. Abbildung 4 oben zeigt die Veränderung der Partikelgeometrie und Porosität bzw. Dichte der Festkörperbrücke. Im Zuge des Umlagerungsprozesses entsteht aus den zwei ursprünglich sphärischen Partikeln ein Partikel mit zunehmend zylinderähnlicher Form.

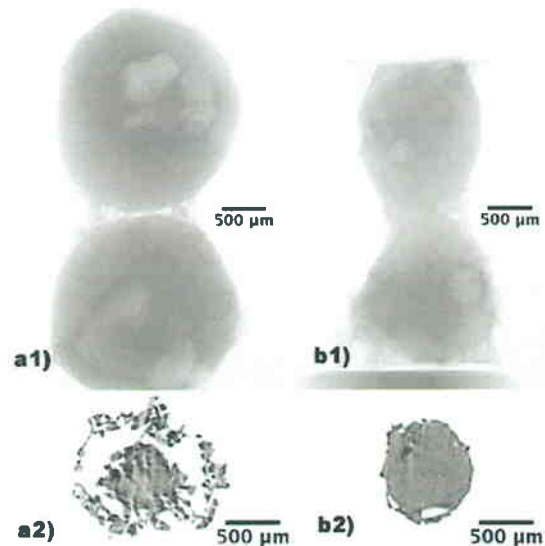


Abbildung 4. Form und Querschnitt von Feststoffbrücken: a) 4h Lagerzeit; b) 72h Lagerzeit [KWB11]

Es ist festzuhalten, dass die Festigkeit einer Festkörperbrücke nur aus einer Kombination aus Lagerzeit und Größe der dabei vorherrschenden Flüssigkeitsbrücke bestimmt wird.

Einen weiteren bisher nicht erwähnten Einfluss auf die Festkörperbrückenfestigkeit hat die Kompressionsspannung während der Lagerung. Es zeigt sich, dass höhere Drücke bei gleicher Lagerzeit zu einer erhöhten Festigkeit der Festkörperbrücken führen. Es wird allerdings angenommen, dass dieser Effekt auf die Form bzw. Größe der Flüssigkeitsbrücke zwischen den Partikeln zurückzuführen ist und damit bereits in der oben genannten Betrachtung enthalten ist.