

# 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.

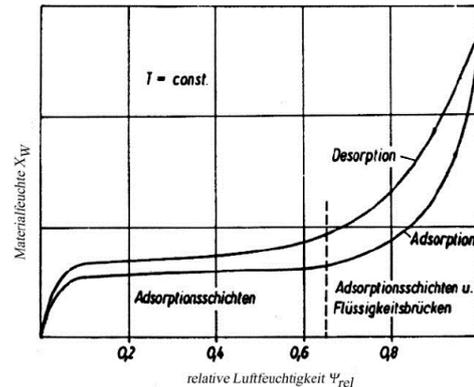


Abbildung 1. Exemplarische Sorptionsisotherme [Sch05]

Die Versuche von Kirsch et al. [KWB11] an einem Zwei-Partikelsystem von geprülltem 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 Flüssigkeitsbrückenradius bewirkt.

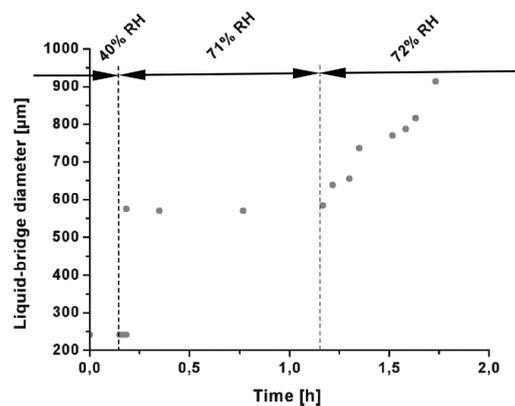


Abbildung 2. Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den Flüssigkeitsbrückendurchmesser zwischen zwei Urea Partikel [KWB11]

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.

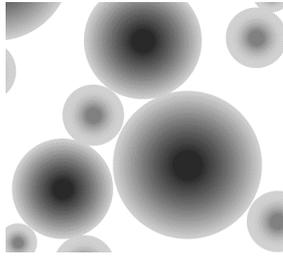


Abbildung 3. Restfeuchtigkeit in verschiedenen großen Partikel

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 Verdampfung

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.

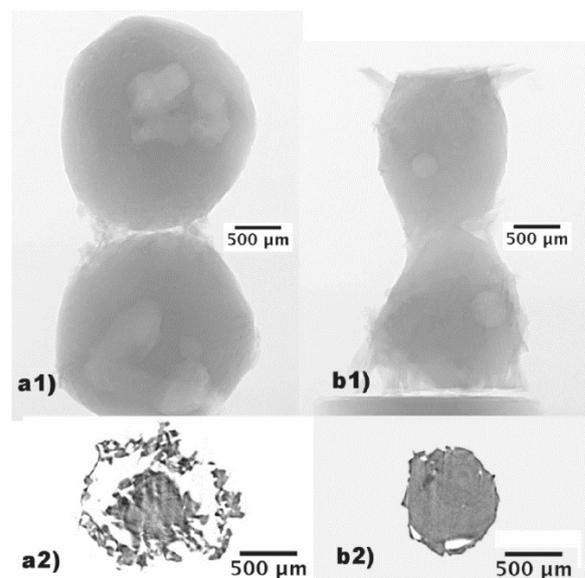


Abbildung 4. Form und Querschnitt von Feststoffbrücken: a) 4h Lagerzeit; b) 72h Lagerzeit [KWB11]

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.

### 3 STAND DER TECHNIK BETREFFEND FESTKÖRPERBRÜCKEN IN DEM-PROGRAMMEN

Die Simulation von Festkörperbrücken kann mit den gängigen DEM-Programmen bereits seit einiger Zeit durch sogenannte Bond-Modelle durchgeführt werden. Abbildung 5 zeigt schematisch die Implementierung dieser Modelle. Dazu werden die Mittelpunkte zweier benachbarter Partikel mit einem elastischen Zylinder verbunden, der die entsprechenden Zugkräfte aufnehmen kann. Für die Definition der Verbindungen müssen folgende Parameter des Zylinders definiert werden:

- Radius der Querschnittsfläche  $R_B$
- Steifigkeit  $k_{Bond}$
- Bruchspannung  $\sigma_{Bond}$

Zusätzlich wird den Partikeln unabhängig vom physikalischen Partikelradius ein Kontaktradius zugewiesen. Nur wenn sich die Kontaktradien zweier Partikel überschneiden, liegen diese nahe genug beieinander, so dass sich eine Festkörperbrücke bilden kann. Der Kontaktradius dient damit neben der Bruchspannung als weiteres Kriterium für die mögliche Existenz einer Verbindung.

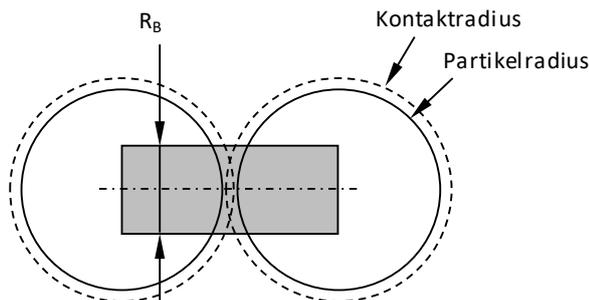


Abbildung 5. Bond-Modell in DEM Programmen [QFE11]

Da in der Simulation der zeitliche Verlauf der Festkörperbrückenbildung in industriellen Anwendungen derzeit aufgrund der zu hohen Rechenzeiten nicht sinnvoll simuliert werden kann, wird im Allgemeinen ein Zeitpunkt festgelegt, bei dem alle Verbindungen generiert werden, um anschließend den verfestigten Zustand untersuchen zu können.

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, ist im Vorfeld eine Kalibrierung der Modellparameter notwendig. Während die Steifigkeit und die Bruchspannung aus realen Versuchen übernommen werden können, ist die richtige Wahl des Zylinderradius aufgrund der beschriebenen physikalischen Abhängigkeiten sehr schwierig. Wahl et al. [WBB08] zeigen auf, dass es nicht zielführend ist, den Mittelwert der gemessenen Festkörperbrückenradien des Zwei-Partikelsystems als einheitlichen Zylinderradius für alle Verbindungen heranzuziehen. Eine stochastische Übertragung der Verteilungsfunktion der gemessenen Brückenfestigkeiten brachte zwar eine Verbesserung in Bezug auf den Vergleich mit der gemessenen Druckfestigkeit der Schüttgutprobe, dennoch sind die Abweichun-

gen zur Realität beträchtlich. Dies ist durchaus verständlich, wenn man bedenkt, dass die unterschiedlichen Festkörperbrückenfestigkeiten vor allem aus den in einem Schüttgut vorliegenden unterschiedlichen Partikelabständen resultieren. Dieser Effekt kann jedoch durch den in [WBB08] beschriebenen Versuch am Zwei-Partikelsystem nicht erfasst werden. In den gängigen Softwarepaketen ist es darüber hinaus überhaupt nicht möglich, den Zylinderradius gezielt innerhalb der betrachteten Partikelpackung zu variieren. Aus diesem Grund ist die Untersuchung eines Silos mit von oben nach unten steigenden Druckspannungen und dementsprechend steigenden Brückenfestigkeiten derzeit nicht möglich. Unabhängig von dieser Anwendung müssen selbst für Simulationen mit konstanter Druckspannung, jedoch unterschiedlicher Lagerzeit, immer erneute Kalibrierversuche durchgeführt werden. Eine der DEM vorgelagerte computerunterstützte Anwendung eines Druckfestigkeits-Zeit-Gesetzes und dazugehöriger Messmethoden zur Erfassung allgemeiner Parameter ist den Autoren nicht bekannt.

### 4 ANSÄTZE ZUR ERWEITERUNG VORHANDENER BOND-MODELLE

#### 4.1 BERECHNUNG DER FLÜSSIGKEITSBRÜCKENRADIEN

Zunächst soll eine Möglichkeit dargestellt werden, die Festigkeit der Festkörperbrücken in Abhängigkeit von den örtlichen Druckspannungen richtig wiederzugeben. Die Haftkraft der Flüssigkeitsbrücken wird zunächst vernachlässigt, da davon ausgegangen wird, dass für den Ausfall eines Silos durch Verklumpen hauptsächlich die wesentlich stärkeren Festkörperbrücken verantwortlich sind. Die Form und das Volumen der Flüssigkeitsbrücken sind dennoch von großer Bedeutung, da die Entstehung der Festkörperbrücken auf eben jene zurückzuführen ist. Nach Pietsch und Rumpf [PR67] lässt sich die Kontur einer Flüssigkeitsbrücke sehr gut durch Kreisbögen annähern und geometrisch beschreiben

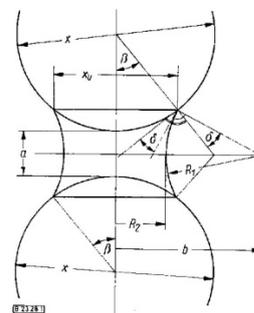


Abbildung 6. Modell einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei gleich großen Kugeln [PR67]

Bei Schüttgütern mit einheitlicher Partikelgröße und homogener Feuchtigkeitsverteilung kann anhand der Anzahl an Partikelkontakten aus der DEM und einem gege-

benen Gesamtflüssigkeitsvolumen das Fluidvolumen je Kontaktstelle ermittelt werden. Daraus resultiert in weiterer Folge in Abhängigkeit von dem konkret vorliegenden Partikelabstand  $a$  – siehe Abbildung 6 – ein Brückenfüllungswinkel  $\beta$  und damit alle weiteren geometrischen Abmessungen der Flüssigkeitsbrücke, wie der für die Festigkeit der Festkörperbrücke wesentliche Brückenradius  $R_2$ .

Mit dieser Methode können nun entsprechend Abbildung 7 Bonds mit unterschiedlichem Durchmesser in Abhängigkeit vom Partikelabstand definiert werden. Damit kann mithilfe der DEM-Simulation bereits der Einfluss von örtlich unterschiedlichen Druckspannungen während der Lagerung berücksichtigt werden. Als Eingabeparameter ist damit nicht mehr der Bonddurchmesser anzugeben, sondern ein für den jeweiligen Anwendungsfall zu untersuchender Feuchtigkeitsgehalt  $X_W$ .

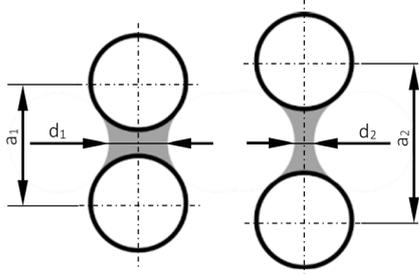


Abbildung 7. Berücksichtigung des Partikelabstandes bei der Erstellung der Bonds

#### 4.2 BERECHNUNG DER TATSÄCHLICHEN BOND-RADIEN

Die ermittelten Brückenradien der Flüssigkeitsbrücken  $R_2$  können jedoch nicht direkt für die Zylinderradien  $R_B$  der Bonds in der DEM-Simulation herangezogen werden, da die Festigkeit der Festkörperbrücken – wie beschrieben – immer durch die Kombination von Feuchtigkeitsgehalt und Lagerdauer bestimmt werden. Es werden daher die bereits bestimmten Brückenradien in weiterer Folge für eine geeignete – von der Zeit abhängige – Skalierung herangezogen.

Für die Erfassung der Zeitabhängigkeit wird das Modell von Tomas für die Bildung von Kristallisationsbrücken herangezogen [Tom97]:

$$\sigma_c(t) = \sigma_{DS} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot Y_s \cdot (X_{W0} - X_{WE}) \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{63}}}\right)$$

Mit Hilfe der angegebenen Formel kann die einachsige Druckfestigkeit  $\sigma_c$  des Schüttgutes als Funktion von der Zeit anhand des Zeitparameters  $t_{63}$  zur Erfassung der Kinetik des Mikro-Kristallisationsprozesses berechnet werden. Des Weiteren ist  $\sigma_{DS}$  die Druckfestigkeit des kristallisierenden Feststoffes,  $\varepsilon$  die Porosität der Schüttgutprobe,  $Y_s$  die Sättigungslöslichkeit (kg gelöster Stoff zu kg Wasser),  $X_{W0}$  die Anfangsfeuchte und  $X_{WE}$  die Feuchtig-

keit im End- bzw. Gleichgewichtszustand. Die Funktion  $\sigma_c(t)$  wird von Tomas entsprechend Abbildung 8 angegeben und spiegelt den zeitlichen Verlauf der Kristallisationsgeschwindigkeit wieder, wobei hier zusätzlich der Einfluss der in einem Schüttgut vorliegenden unterschiedlichen Partikelabstände dargestellt ist.

Da jedoch keine vollständige analytische Berechnung der Druckfestigkeit des gesamten Schüttgutes durchgeführt werden soll, sondern lediglich der richtige Zylinder-radius der einzelnen Bonds bestimmt werden soll und ohnehin eine Kalibrierung des Schüttgutes erfolgen muss, interessiert hier aufgrund der Analogie zur Kristallisationsgeschwindigkeit lediglich der zeitliche Verlauf von  $\sigma_c$  und die zur Beschreibung notwendigen Faktoren.

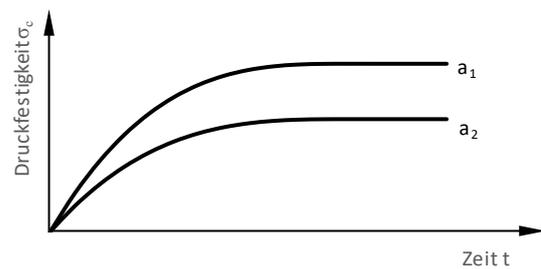


Abbildung 8. Einfluss der Zeit auf die Festigkeit der Festkörperbrücken

Um den Einfluss der Zeitverfestigung mithilfe dieser Funktion zu berücksichtigen, müssen bei der Kalibrierung zwei Festigkeitsmessungen nach unterschiedlichen Lagerzeiten durchgeführt werden. Der auf diese Weise bestimmbare Zeitparameter  $t_{63}$  dient neben der Angabe der zu untersuchenden Lagerungszeit als Eingabeparameter für das DEM-Modell.

#### 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Simulation von Festkörperbrücken mittels DEM kann derzeit für Anwendungen mit variierenden Drücken und damit unterschiedlichen mittleren Brückenfestigkeiten nicht angewandt werden und auch für einfachere Anwendungen muss die zeitaufwändige Kalibrierung der implementierten Bond-Modelle bei jeder geringfügigen Änderung der Betriebsparameter erneuert werden. Anhand der vorgestellten Erweiterung vorhandener Bond-Modelle zur Simulation kristalliner Festkörperbrücken mithilfe der DEM kann eine für ein Schüttgut allgemein gültige Kalibrierung durchgeführt werden. In weiterer Folge können für ein hygroskopisches Schüttgut zahlreiche Simulationen unterschiedlichen Druckniveaus und unterschiedlicher vorangegangener Lagerzeiten durchgeführt werden. Der Einsatz der DEM für industrielle Anwendungen, insbesondere für die Auslegung von Silos, wird damit in Zukunft möglich sein. Im nächsten Schritt soll der hierfür notwendige Berechnungsalgorithmus entsprechend Abbildung 9 ausgearbeitet und im Softwarepaket LIGGHTS implementiert werden.

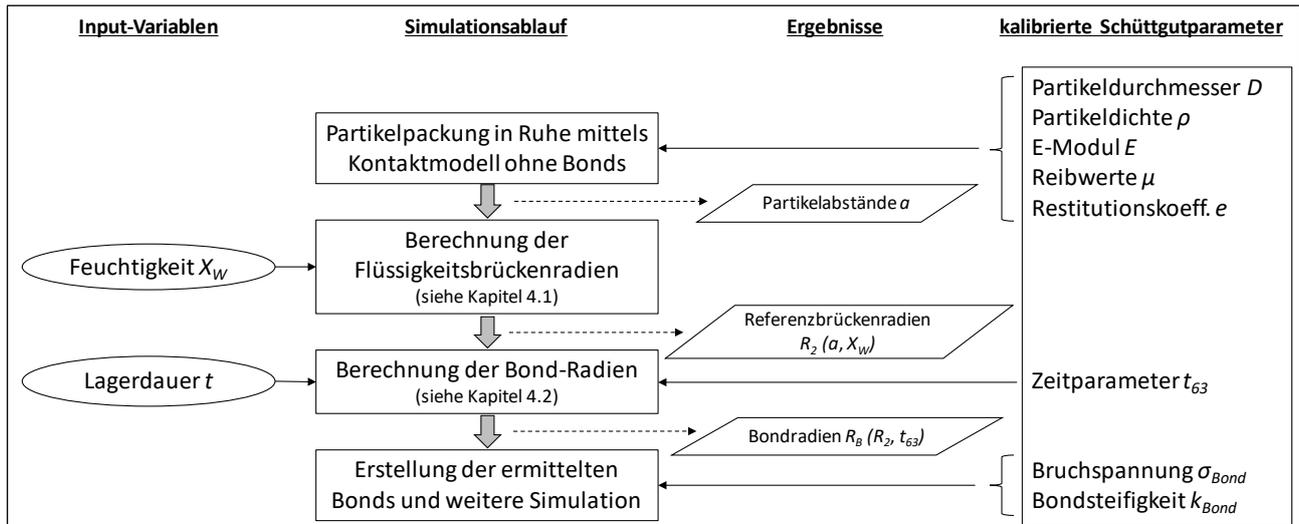


Abbildung 9. Simulationsablauf zur Berücksichtigung druck- und zeitabhängiger Festkörperbrücken

### LITERATUR

- [KWB11] Kirsch, R.; Williams, R.; Bröckel, U.; Hammond, R.; Jia, X.: *Direct Observation of the Dynamics of Bridge Formation between Urea Prills*. In: Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50 (20), S. 11728–11733
- [PR67] Pietsch, W.; Rumpf, H.: *Haftkraft, Kapillardruck, Flüssigkeitsvolumen und Grenzwinkel einer Flüssigkeitsbrücke zwischen zwei Kugeln*. In: Chemie Ingenieur Technik, 1967, 39 (15), S. 885-893
- [QFE11] Quist, J.; Franke, J.; Evertsson, M.: *The effect of liner wear on gyratory crushing – a DEM case study*. In: Tagungsband zum 3th International Computational Modelling Symposium, Falmouth, Cornwall, UK, 2011
- [Rum58] Rumpf, H.: *Grundlagen und Methoden des Granulierens*. In: Chemie Ingenieur Technik, 1958, 30 (3), S. 144-158
- [Sch05] Schumann, M.: *Einfluss von Adsorptionsschichten auf die Fließfähigkeit feiner Schüttgüter*. Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Deutschland, 2005
- [Tom97] Tomas, J.: *Zur Verfestigung von Schüttgütern – Mikroprozesse und Kinetikmodelle*. In: Chemie Ingenieur Technik, 1997, 69 (4), S. 455-467
- [Unc15] UNCTAD: *Review of Maritime Transport 2015*. New York & Geneva, United Nations, 2015
- [WBB08] Wahl, M.; Bröckel, U.; Brendel, L.; Feise, H.; Weigl, B.; Röck, M.; Schwedes, J.: *Understanding powder caking: Predicting caking strength from individual particle contacts*. In: Powder technology, 2008, 188 (2), S. 147-152
- [ZVC17] Zafar, U.; Vivacqua, V.; Calvert, G.; Ghadiri, M.; Cleaver, J.: *A review of bulk powder caking*. Powder Technology, 2017, 313, S. 389-401

---

**Dipl.-Ing. Alexander Haber**, Assistent am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik an der Technischen Universität Wien

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Georg Kartnig**, Professor am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, Leiter des Fachbereichs Konstruktionslehre und Fördertechnik an der Technischen Universität Wien

Adresse: Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, Technische Universität Wien, Getreidemarkt 9/307, 1060 Wien, Österreich  
 Telefon: +43-1-58801-30743  
 E-Mail: alexander.e307.haber@tuwien.ac.at, georg.kartnig@tuwien.ac.at