

Rückverfolgbarkeit von Schüttgütern in der Lebensmittelverarbeitung

Tracing of bulk material in food processing

Hendrik Otto
Thomas Rößler
André Katterfeld

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik
Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Die Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln und Futtermitteln, von der Lebensmittelgewinnung dienenden Tieren und allen sonstigen Stoffen, die dazu bestimmt sind oder von denen erwartet werden kann, dass sie in einem Lebensmittel oder Futtermittel verarbeitet werden, ist in allen Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen sicherzustellen.“ [EG02]

Die Rückverfolgbarkeit von Schüttgut ist im Bereich der Lebensmitteltechnik eine herausfordernde Aufgabenstellung, die mit dem Stand der Technik nur ungenügend gelöst ist. Dort wo das Gut nicht aktiv gefördert wird, sondern unter Gravitationseinfluss selbst fließt, sind statische Lagermodelle, wie sie z.B. heute zum Silomanagement verwendet werden, nur bedingt einsetzbar. Computergestützte Rückverfolgungsmodelle auf Basis der Theorie der Zellulären Automaten stellen eine neue und präzise Möglichkeit dar, die chargenweise Lagerung von leicht fließenden bis leicht kohäsiven Schüttgütern in Großraumsilos oder Halden zu realisieren.

In diesem Beitrag werden Lösungsansätze als auch Anwendungsbeispiele vorgestellt, mit denen es möglich ist, Schüttgüter auch in großen Massen und Volumina mit hoher Auflösung echtzeitfähig über statistische Flussmodelle abzubilden.

[Schlüsselwörter: Zellulärer Automat, Simulation, Rückverfolgung, Lebensmittelsicherheit]

The traceability of food, feed, food-producing animals, and any other substance intended to be, or expected to be, incorporated into a food or feed shall be established at all stages of production, processing and distribution.” [EG02]

The traceability of bulk materials in the field of food technology is a challenging task, which is not sufficiently solved with the state of the art. Where the material is not actively conveyed, but flows by itself under gravitational influence, static models as used today for silo manage-

ment, are only conditionally usable. Computational traceability models based on the theory of cellular automaton represent a new and precise way to realize the batch wise storage of easily flowing to slightly cohesive bulk solids in large silos or stockpiles.

In this contribution, solutions as well as application examples are presented, with which it is possible to reproduce bulk materials in large masses and volumes with high resolution in real time via statistical flow models.

[Keywords: Cellular Automaton, Simulation, Traceability, Food Security]

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Laut Verordnung EG 178/2002, Artikel 18 [EG02] des Europäischen Parlamentes ist es zwingend notwendig eine Rückverfolgbarkeit aller Lebensmittelerzeugnisse sicher zu stellen:

„Die Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln und Futtermitteln, von der Lebensmittelgewinnung dienenden Tieren und allen sonstigen Stoffen, die dazu bestimmt sind oder von denen erwartet werden kann, dass sie in einem Lebensmittel oder Futtermittel verarbeitet werden, ist in allen Produktions-, Verarbeitungs- und Vertriebsstufen sicherzustellen.“ [EG02]

Auf Grundlage dieser Verordnung ist es z.B. möglich ein Hühnerei zum Herstellungsbetrieb zurückzuverfolgen. Das verwendete Tierfutter muss ebenfalls rückverfolgbar sein. Was bei Stückgütern wie Eiern keine großen Probleme verursacht, ist bei Schüttgütern, wenn überhaupt, nur sehr schwer möglich. Wenn Futtermittel nicht zufällig vom Verbraucher selbst erzeugt bzw. direkt vom Erzeuger gekauft werden, ist eine Rückverfolgung nur sehr eingeschränkt möglich.

Viele Getreidearten wie Weizen, Roggen etc. aber auch Mais werden nicht direkt vom Erzeuger an den Endverbraucher geliefert. Oft ist mindestens ein Groß-Agrarhändler zwischengeschaltet. Hier wird das Gut vom LKW antransportiert und bis zum Weitertransport per LKW, Zug oder Schiff sortenrein in großen Vorratssilos gelagert (s. Bild 1).



Abbildung 1: Großsilanlage der Firma Beiselen GmbH im Magdeburger Hafen. [BEI15]

Die Vorratssilos sind meist Kernflusssilos, da so eine größere Lagerkapazität erreicht werden kann. Im Unterschied zu Massenflusssilos fließt das Gut in Kernflusssilos nicht in horizontalen Schichten zum Auslauf (s. Abbildung 2). Vielmehr fließt das Gut in der Mitte zuerst. Da trockenes Getreide meist ein leichtfließendes Gut ist, treten typische Kernflussprobleme wie Schachtbildung nur selten und meist aufgrund zusätzlicher Einflüsse (Schädlingsbefall, Nestbildung etc.) auf.

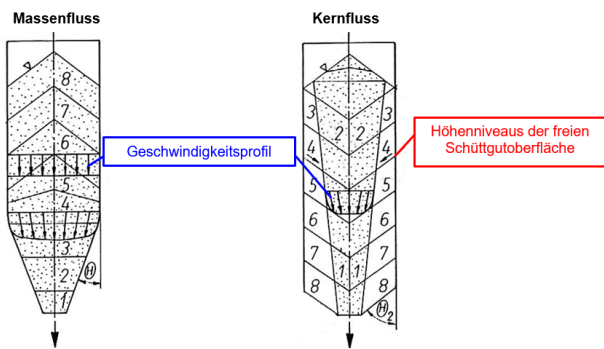


Abbildung 2: Entleerungsarten von Schüttgutsilos: Massenfluss und Kernfluss. Die Ziffern geben die Reihenfolge der auslaufenden Teilvolumina an. [TOM01]

Die Verordnung EG178/2002 zwingt Händler und verarbeitende Betriebe dazu, eine Rückverfolgbarkeit von Getreidelieferungen zu ermöglichen. Bei Kernflusssilos ist diese Rückverfolgbarkeit aufgrund des Ausflussverhaltens kaum möglich. Typische Großsilos wie in Abbildung 1 dargestellt fassen ca. 8000 t an Getreide. Eine LKW-Charge umfasst üblicherweise 32 t. Nimmt man an, dass sich 32 t Weizen über dem gesamten Durchmesser des

Großraumsilos von 24m gleichmäßig verteilen, ergibt sich eine Chargendicke von 30cm.

Wenn man die Bildung eines Böschungswinkels berücksichtigt sowie die Tatsache, dass Großraumsilos meist nie komplett geleert sondern immer wieder nachgefüllt werden, wird sehr deutlich, dass eine wirkliche Rückverfolgung des Getreides eine sehr komplexe Aufgabe ist.

Einige Anlagenhersteller offerieren eine Möglichkeit der Rückverfolgung auf Basis von sogenannten Schichtenmodellen [MUE04, ROE14]. Diese Schichtenmodelle, die in der wissenschaftlichen Literatur nicht beschrieben werden, versuchen die entleerten horizontalen und vertikalen Schüttgutschichten beim Kernfluss näherungsweise zu berechnen und so die entleerten Chargen auszuweisen. Dazu ist die Eingabe einer Anzahl von Werten notwendig, die zum einen die Schüttguteigenschaften und zum anderen die Geometrie des Silos berücksichtigen sollen. Es handelt sich jedoch meist um reine Schätzwerte die im Resultat eine wirkliche Rückverfolgbarkeit nur vorgaukeln. Eine verlässliche Chargencharakterisierung für Großsilos ist mit den Schichtenmodellen kaum möglich.

Jedoch nicht nur in der Nahrungsmittelindustrie ist eine Rückverfolgbarkeit von Schüttgütern von Bedeutung. In der Rohstoffverarbeitenden Industrie und in der Kraftwerkstechnik wird das Schüttgut oft in Halden gelagert. Eingelagert wird das Gut mit Hilfe von Gurtförderern, sogenannten Stackern, die je nach Betriebsweise des Stackers ein typisches Einlagerungsschema nutzen (s. Abbildung 3).

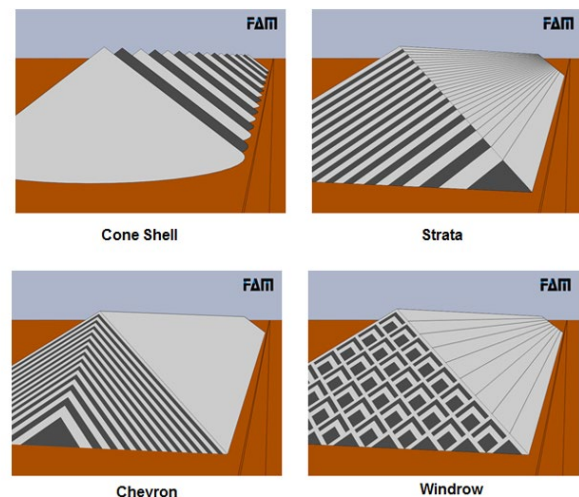


Abbildung 3: Haldenaufbauverfahren [FAM10]

Für die Auslagerung, dem sogenannten Reclaiming, ergeben sich mehrere Möglichkeiten. Beim längsseitigen Abbau durch Schaufelrad-Reclaimer, Seite- oder Portalkratzer. Stirnseitig kann die Halde zum Beispiel durch Brückenkratzer abgebaut werden. Dabei fließt die Mehrheit des Gutes über die stirnseitige Böschung zum Haldenfuß und wird dort abtransportiert.

Für das Haldenplatzmanagement existieren hoch entwickelte Messsysteme und Bestandsverwaltungsprogramme, wie sie in [RUE14] beispielhaft vorgestellt werden. Solche Systeme können bei Kenntnis der angelieferten Guteigenschaften durch kontinuierliche Oberflächenscans die Veränderung der Haldenoberfläche sehr präzise aufzeichnen und speichern. Dadurch kann die Haldenzusammensetzung sehr detailliert und wirklichkeitsgetreu analysiert werden. Voraussetzung für den Einsatz solcher Systeme ist die kontinuierliche Vermessung der Halde in Echtzeit sehr zeitnah nach jeglicher Veränderung der Haldenoberfläche durch Ein- oder Entspeicherung. Dort wo solche Systeme aus Kostengründen, mangelndem Bauraum oder den Produkteigenschaften (Staubigkeit) nicht eingesetzt werden können oder es nicht um die Vermessung einer realen Halde sondern vielmehr um die Vorhersage der Zusammensetzung einer virtuellen – vielleicht zukünftig zu errichtenden – Halde geht, können solche Systeme nur sehr beschränkt eingesetzt werden, da sie die Gutbewegung in Folge Gravitation nicht abbilden können.

2 STAND DER TECHNIK

Um die Gutbewegung in Silo oder Halde in Folge von Gravitation zu modellieren, kommen mehrere Ansätze in Frage. Wie bereits oben beschreiben sind so genannte Schichtenmodelle zwar die einfachste und schnellste Möglichkeit, den Auslauf von bestimmten großräumigen Gutbereichen aus dem Silo zu berechnen. Jedoch sind diese Modelle sehr ungenau, ohne physikalische Grundlage und die Modellparameter kaum wissenschaftlich untersucht. Eine wirkliche Rückverfolgung von einzelnen realitätsnahen Chargengrößen ist ebenso wenig möglich wie die Anwendbarkeit auf die Haldenproblematik.

Computersimulationen auf Basis der Diskrete Elemente Methode (DEM) bieten zwar sehr detaillierte und physikalisch fundierte Möglichkeit, die Gutströmung einzelner Partikel im Silo oder in der Halde zu modellieren [MIN07, GRO06, GRO07a, GRO07b]. Jedoch erfordert die DEM zur Abbildung der Partikelanzahlen in typischen Silos oder Halden eine enorme Rechenzeit, meiste Tage oder Wochen. Eine Nutzung dieser Simulationsmethode für die Echtzeitnutzung zur Rückverfolgung ist damit nicht möglich.

Der Ansatz des Zellulären Automaten, der zur Gutrückverfolgung gewählt werden soll, ist ein rein stochastischer Ansatz. Das bedeutet im Vergleich zu partikelmechanischen Systemen, bei denen immer physikalische Modelle die Interaktion der Partikel bestimmen, werden bei diesem Ansatz die Zellen nur nach relativen Wahrscheinlichkeiten bewegt. Dafür ist es notwendig die Wahrscheinlichkeiten für die Zellenbewegungen so einzustellen, dass eine hohe Übereinstimmungsgüte mit Modellen auf physikalischer Grundlage bzw. mit Versuchen gegeben ist. Der Vorteil des Systems liegt in seiner Einfachheit. Ein korrekt kalibrierter

Zellulärer Automat zeigt die gleichen Ausfluss und Befüllungseigenschaften wie das reale System, das er abbilden soll, jedoch lässt sich sein Zustand in Bruchteilen der Zeit bestimmen, die Nötig wäre um eine DEM Simulation mit gleicher Abbildungsgüte zu erstellen.

Zelluläre Automaten sind theoretisch seit den 1940'er Jahren bekannt. Sie dienen der Beschreibung räumlicher diskreter dynamischer Systeme. Zelluläre Automaten werden in unterschiedlichen Wissenschaftsgebieten eingesetzt. Populär wissenschaftlich bekannt geworden sind die sozial-biologischen Untersuchungen „Spiel des Lebens“ (Game of Live) von J.H. Conways [ADA10] oder die von K. Zuse gemachten Aussagen in seinem Artikel zum „Rechnenden Raum“, in dem angenommen wird, dass das gesamte Universum ein gigantischer Zellulärer Automat wäre [ZUS67].

Bei der Methode der Zellulären Automaten wird ein Raum mit beliebig vielen jedoch meist 1-3 Dimensionen in Zellen aufgeteilt werden. Jede Zelle verfügt über eine gewisse Anzahl von Nachbarzellen und weist einen bestimmten Zustand auf (z.B. gefüllt, nicht gefüllt). Mit Hilfe von Überföhrungsfunktionen kann beschrieben wann und wie sich der Zustand der Zelle verändern kann.

Zelluläre Automaten (ZA) sind in der Schüttguttechnik kaum verbreitet obwohl einige Grundlagenuntersuchungen veröffentlicht wurden, die interessante Ergebnisse beinhalteten. In seiner Dissertation [KAL98] untersuchte Kaldenhoff 1998 die Eignung von Zellulären Automaten zur Berechnung des Ein- und Auslaufverhaltens von Schüttgütern in Silos. Es konnte zwar eine prinzipielle Eignung für die Vorhersage des allgemeinen Fließverhaltens festgestellt werden, für die Berechnung der Seitenwanddrücke erschien die Methode jedoch weniger geeignet. Die 1998 zur Verfügung stehende Rechentechnik beschränkte die Anwendung der Methodik stark.

In neueren Studien konnten Kozicki und Tejchman 2004 sehr gute Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen von ZA-Modellen und experimentellen Untersuchungen veröffentlichen [KOZ04a/b]. Hier wurden auch alternative Überföhrungsfunktionen und Zellformen diskutiert, die zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment führten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit dem ZA bereits ein vielversprechender numerischer Ansatz zur Abbildung des Bewegungsverhaltens freifließender Schüttgüter existiert, dessen Ergebnisse in experimentellen Untersuchungen validiert wurden und die sich auch auf die Modellierung vergleichsweise großer Gutvolumina anwenden lassen. Eine Nutzung des ZA-Ansatzes zur Gut-Rückverfolgung durch Implementierung in Steuerungssoftware zum Bestandsmanagement von Halden oder Silos ist den Autoren jedoch nicht bekannt.

3 ZA-MODELL ZUR RÜCKVERFOLGUNG

Ein Zellulärer Automat besteht immer aus einem Zellenraum, bei dem jede Zelle eine endliche Anzahl an Nachbarzellen hat. Jede Zelle kann nur eine definierte Menge an Zuständen enthalten. Des Weiteren existiert eine Überführungsregel, mit der sich die Zustände der Zellen in Abhängigkeit der Zustände Ihrer Nachbarzellen ändern. Ein Beispiel für populärere zelluläre Automaten sind die Waldbrandsimulationen [SCH14]. Bei diesen ZA kann sich das Feuer im Wald nur auf Zellen mit Baumbestand ausbreiten. Grenzt das Feuer an eine mit Wald gefüllte Zelle so wandelt sich der Zustand der Zelle von Wald zu Feuer. Für solche Simulationen ist es möglich den Zustand jeder Zelle in Abhängigkeit ihrer direkten Nachbarzellen mit nur einer einzigen Regel zu berechnen, da sich das Verhalten der Zelle nicht durch den Zustand der Zelle, bzw. die Lager der betrachteten Zelle im Raum verändert.

Zellulärer Automaten für die Schüttgutsimulation müssen jedoch mehrere Regeln benutzen, da frei fallende Zellen, beim Einfügen von Gut im oberen Teil des Silos anders bewegt werden als Zellen innerhalb des Silos. Würden alle Zellen mit den gleichen Regeln berechnet werden, würde es entweder zu einem nicht korrekten einfüllen oder einem falschen Ausflussverhalten kommen. Daher lassen sich Befüllung und Entleerung eines Zellulären Automaten zu Abbildung von Schüttgütern nicht mit derselben Regel formulieren.

Würde für die Zelle (1) in Abbildung 4 die gleiche Regel gelten wie für die gefüllte Zelle oberhalb des Loches (3) so würde sich das Loch ausschließlich mit Schüttgut der direkt darüber befindlichen Zelle füllen. Dadurch würde immer ein extrem stark ausgeprägter Kernfluss entstehen. In Realität würde jedoch auch Schüttgut von den Seiten sowie von Schräg oben in ein entstehendes Loch rutschen. Daher ist es hier notwendig sowohl aufsteigende Löcher, als auch herabfallende Zellen separat zu betrachten.

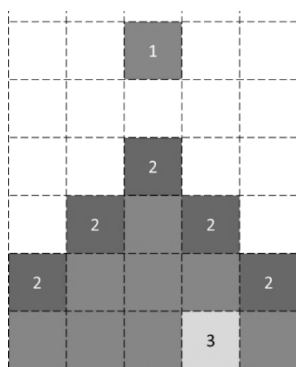


Abbildung 4: Fallunterscheidung der Zellbewegung

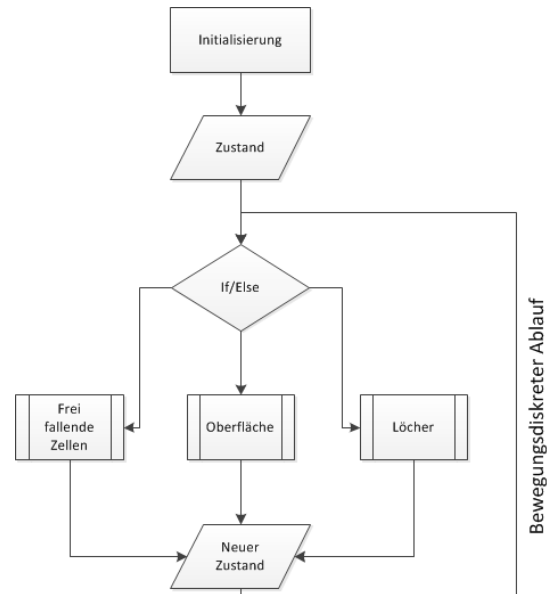


Abbildung 5: Programmablaufplan

Als zusätzlichen Fall müssen die Zellen der Gutoberfläche (2) betrachtet werden. Wenn sich eine gefüllte Zelle von oben bis auf die Oberfläche herunter bewegt hat bzw. ein Loch bis zu jener aufgestiegen ist, würde die Bewegung andernfalls stoppen. Um eine stetige Oberfläche zu erhalten ist es daher notwendig diese mit einer dritten, zufälligen Funktion zu berechnen.

Das Simulationsgebiet wird durch eine Massenmatrix abgebildet. Diese ist ausschließlich durch diskrete Werte 0 und 1 besetzt. Dabei beschreibt der Wert einer Stelle der Matrix lediglich den Zustand der Zelle, also gefüllt oder ungefüllt.

$$M = \{0,1\} \rightarrow \mathbb{R}^3 \quad (1)$$

Für die Rückverfolgung wird eine zweite Matrix aufgespannt, deren Elementen aber eine individuelle Kennzeichnung bzw. Farbwerte zugeordnet werden.

Freie Zellen sind alle die Zellen, die keine gefüllte Zelle direkt unter sich haben. Das bedeutet jedoch, dass Material nur zu jedem zweiten Schritt in der Berechnungsschleife im Ablaufdiagramm in Abbildung 5 eingefügt werden kann. Muss der generierte Volumenstrom erhöht werden, so muss eventuell die Breite des Einfügebereichs leicht erhöht werden. Da die Berechnungsschleife nicht zeitdiskret abläuft sondern volumendiskret, kann ein solcher Fall nur dann auftreten, wenn gleichzeitig ein Volumen aus dem Bunker abgezogen wird.

Zellen der Oberfläche werden durch Differenzieren der Massenmatrix nach der vertikalen Komponente identifiziert.

$$S = \frac{\partial M}{\partial y} \quad (2)$$

Zur Oberfläche gehören dann alle die Zellen der Massenmatrix, deren Ableitung positiv ist, und deren Ableitung der darunter liegenden Zelle nicht negativ ist.

$$O_{fl;x,y,z} = 1 \text{ wenn } \left\{ \begin{array}{l} S_{x,y,z} = 1 \\ S_{x,y+1,z} \neq -1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

Als Löcher werden alle Zellen der Massenmatrix betrachtet, die nicht positiv sind und sich in y-Richtung unterhalb der Oberfläche befinden.

$$L_{fl;x,y,z} = 1 \text{ wenn } \{M_{x,y,z} = 1\} \ \& \ y > O_{fl;x,y,z} \quad (4)$$

Zellen der Oberfläche können sich bis zu zwei Zellen nach links und rechts eine Zeile tiefer als die betrachtete Zelle bewegen, Während Löcher genau die gleiche Bewegung nach oben vollziehen können. Die Entscheidung wohin eine Zelle bewegt wird ist zufällig. Für die Bewegung der Zellen der Oberfläche ist der Wert bzw. die Verteilung der Werte des möglichen Bewegungsraums nicht entscheidend, da sich immer nur ein definierter Oberflächenwinkel (Böschungswinkel) einstellen kann. Für die Bewegung der Löcher ist jedoch die Verteilung der Zufallswerte innerhalb des möglichen Bewegungsraums entscheidend, da das Loch immer während eines Schleifendurchlaufs verschoben wird. Die Zellen an der Oberfläche können jedoch nur dann verschoben werden, wenn es Lücken oder Fehlstellen in der Oberfläche (mit höherem Böschungswinkel) gibt. Die verwendeten Wahrscheinlichkeiten für die Lochbewegung müssen kalibriert werden, um das erwartete Ausflussverhalten abbilden zu können. Je häufiger die Löcher in den Randbereich des Bewegungsraums verschoben werden, desto eher entsteht Massenfluss. Bei einer Gleichverteilung aller Wahrscheinlichkeiten kann schon ein ausgeprägter Kernfluss beobachtet werden.

Für die Rückverfolgung werden alle ID-Zellen mit den Massenzellen mitbewegt. In den Abbildungen sind die IDs als Helligkeitswerte dargestellt. In Abbildung 6 und Abbildung 7 sind unterschiedliche Flussverhalten dargestellt, die sich einstellen, indem die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lochausbreitung entsprechend der angegebenen Wahrscheinlichkeiten eingestellt wird.

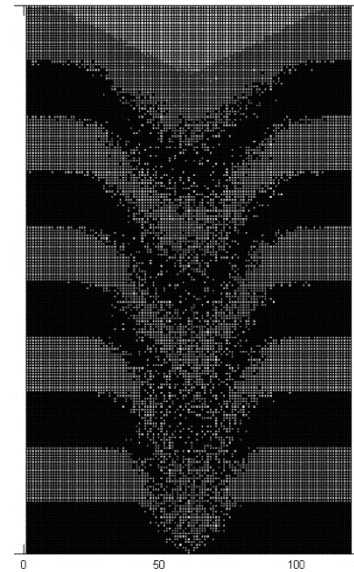


Abbildung 6: Gleichverteilung der Wahrscheinlichkeiten für den Lochaufstieg mit $p = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$

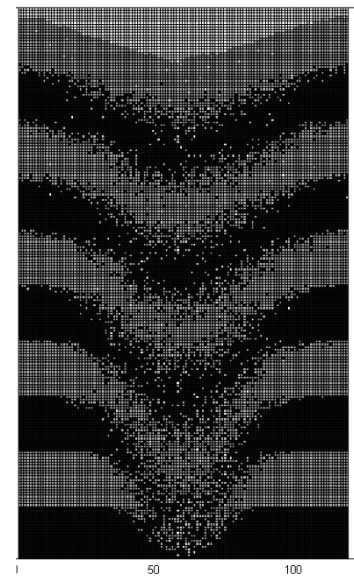


Abbildung 7: Erhöhung der Wahrscheinlichkeiten des Lochaufstiegs in den Randbereichen $p = (0.3, 0.15, 0.1, 0.15, 0.3)$

4 ANWENDUNGSBEISPIELE

Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Gutrückverfolgung ist die Agrar- und Nahrungsmittelindustrie, vor allem die Hersteller und Betreiber von (Groß-) Siloanlagen für Getreide ein sehr interessantes Anwendungsgebiet für ZA-Modelle. Wie schon erläutert wurde, erfolgt hier die chargenweise Einlagerung meist per LKW in sortenreine Silos, die meist ausgeprägten

Kernfluss aufweisen. Abzug- und Befüllung wechseln sich ab.

Zur Gutrückverfolgung in Echtzeit müssen die ZA-Modelle entsprechend leistungsfähig sein. Für die Modellierung eines konischen, keilförmigen oder asymmetrischen Silos mit einen oder mehreren Ausläufen ist ganz allgemein ein 3 dimensionales ZA-Modell erforderlich (s. Abbildung 8). Dies resultiert in deutlich höherem Rechenaufwand. Modelle mit 300.000 und mehr Zellen können heute in Echtzeit gerechnet werden. D.h. dass die Berechnung der ein- und ausgelagerten Gutchargen schneller oder mindestens genauso schnell realisiert wird, wie die reale Befüllung und Entleerung mit typischen Massenströmen von 3000 t/h. Bei einem 10.000 m³ Silo entspräche das einer Auflösung von 33 L je Zelle zur Speicherung von Chargeninformationen.

Noch genauer können rotationssymmetrische Silos mit nur einem zentrischen Ein- und Auslauf modelliert werden. Hier kann ein 3d-ZA-Modell in Form eines Tortenstückes verwendet werden, mit dem das Verhalten der befüllten oder entleerten Gutchargen berechnet werden kann. Dabei kann bei gleichbleibender Rechnerleistung eine deutlich feinere Diskretisierung des Silos erreicht werden, wodurch die Güte der Rückverfolgung noch einmal deutlich gesteigert werden kann.

Damit ist die Abbildungsgenauigkeit des Zellulären Automaten von Aufbau, Größe und Betriebsweise des Silos abhängig. Kleinere Silos oder Silos mit geringerem Massenstrom bei Befüllung und Entleerung können mit höherer Genauigkeit berechnet werden, da das Zellvolumen, das pro Sekunde mindestens bewegt werden muss geringer ist. Ein Beispiel für einen dreidimensionalen Zellulären Automaten ist in Abbildung 8 dargestellt.

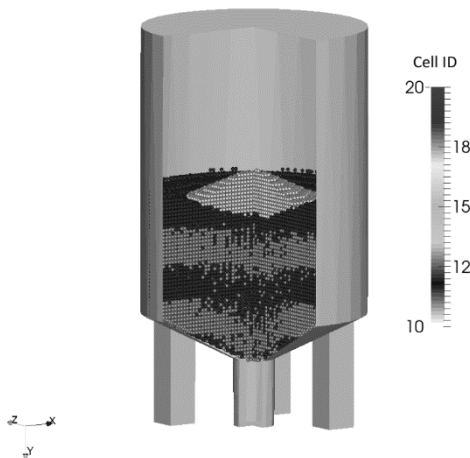


Abbildung 8: Dreidimensionaler Aufbau eines zellulären Automaten zur Silosimulation

Ein ähnliches Problem wie die Rückverfolgung besteht beim Haldenmanagement auf Lagerplätzen, mit wechselnder Schüttgutqualität. Bei Kohle- oder Erzlagerplätzen kann die angeforderte Qualität stark schwanken. Durch eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung mit abgeschlossenem kleinvolumigen Haldenmanagementsystem wäre jedoch ein gezielter Haldenaufbau mit gleichmäßiger Qualität denkbar, wodurch höhere Preise für die Gesamthalde erzielt werden könnten, da eine höhere durchschnittliche Mindestqualität garantiert werden kann. In Abbildung 9 ist ein Schnappschuss aus einer ZA-Simulation einer realitätsnahen Halde mit einer Länge von 160m und einer Breite von 30m dargestellt.

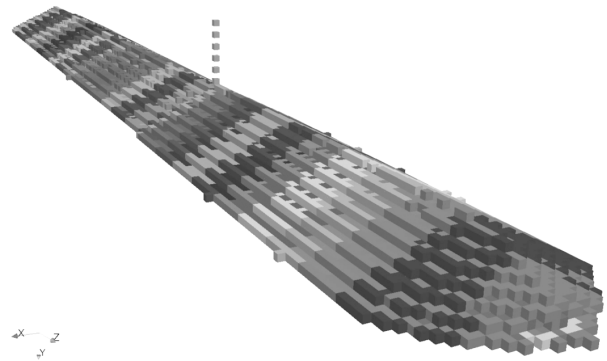


Abbildung 9: Haldenbestandsmodell (160 m x 30 m) mit Einfärbung nach Kennzeichen des Trucks

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Methode der Zellulären Automaten (ZA) stellt einen bislang noch nicht verwendeten Ansatz dar, um die Gutrückverfolgung in Silos oder Halden mit einer deutlich größeren Präzision und Realitätsnähe zu ermöglichen. Es wurde ein ZA-Modell vorgestellt, mit dem sowohl das Befüllen als auch das Entleeren des Gutes effizient simuliert werden kann. In Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass das durch geeignete Wahl der ZA-Parameter (z.B. der Lochaufstiegswahrscheinlichkeiten) das prinzipielle Entleerverhalten beeinflussen lässt. So kann Massenfluss und Kernfluss abgebildet werden. Aufgrund des deutlich schwieriger vorherzusagenden Fließverhaltens von kohäsiven Gütern bleibt der Einsatz aber auf freieselnde und nur leicht kohäsive Güter beschränkt. Aufgrund der gestiegenen Leistungsfähigkeit moderner Computerprozessoren ist es heute möglich, die Gutrückverfolgung mit Hilfe von ZA-Modellen unter Verwendung handelsüblichen PCs in realitätsnahen Silos und Halden in Echtzeit zu realisieren.

LITERATUR

- [ADA10] Adamatzky, A.: Game of Life Cellular Automata, Springer, London 2010.
- [BEI15] Beiselen GmbH. Internetauftritt www.beiselen.de, Stand: 14.08.2015. Luftbild unter www.bing.de.
- [EG02] VERORDNUNG (EG) Nr. 178/2002 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit.
- [FAM10] FAM GmbH: Handbuch Schüttgutumschlag, Magdeburg 2010
- [GRO06] Gröger, T., Katterfeld, A.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Grundlagen und Kalibrierung In: Schüttgut, Vol. 12 (2006) Nr. 7, S. 480-486.
- [GRO07A] Gröger, T., Katterfeld, A.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Gutübergabestellen, In: Schüttgut, Vol. 13 (2007) Nr. 3, S. 202-213.
- [GRO07B] Gröger, T., Katterfeld, A.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Becher- und Kratzerförderer. In: Schüttgut, Vol. 13 (2007) Nr. 4, S. 276-2283.
- [KAL98] Kaldenhoff, M.: Simulation von grobgranularen Schüttgütern mit Hilfe zellulärer Automaten, Dissertation TU Braunschweig, 1998.
- [KOZ04a] Kozicki, J., Tejchmann, J.: Simulations of Flow Patterns in Silos with a Cellular Automaton: Part 1. In: Task Quarterly 9 No 1, p. 81–102. 2004
- [KOZ04b] Kozicki, J., Tejchmann, J.: Simulations of Flow Patterns in Silos with a Cellular Automaton: Part 2. In: Task Quarterly 9 No 1, p. 103–114. 2004
- [MIN07] Minkin, A., Katterfeld, A., Gröger, T.: Einsatz der Diskrete Elemente Methode in der Schüttguttechnik: Wendel- und Schneckenförderer. In: Schüttgut, Vol. 13 (2007) Nr. 1, S. 16-26.
- [MUE04] Müller, C.: Dem Mahlgut auf der Spur - Rückverfolgbarkeit im kontinuierlichen Prozeß. Getreidetechnologie 58 (2004) 1.
- [OTT15] Otto, H., Katterfeld, A.: Möglichkeiten der Gutrückverfolgung in Halden und Silos, Fachtagung Schüttgutfördertechnik, Volume: 20, Magdeburg 2015
- [ROE14] Rösser, L.: Produktverfolgung einfach nachrüsten. In: Mühle + Mischfutter (151) Nr. 8, 2014, S. 243 f.
- [RUE14] Rüttiger-Barth, K.-H., Merkel, N.: Optimierte Schüttgut-Lagerplatzmanagement auf der Basis von Echtzeit 3D Haldenprofilaten. In: Tagungsband zur 19. Fachtagung Schüttgutfördertechnik. TU München. 2014.
- [SCH14] Scholz D., Pixelspiele, Springer, Berlin 2014.
- [TOM01] Tomas, J.: Skript zur Vorlesung Schüttgutmechanik. Institut für Mechanische Verfahrenstechnik. Universität Magdeburg. 2001.
- [ZUS67] Zuse, K.: Rechnender Raum. In: Elektronische Datenverarbeitung 8 (1967) S. 336-344.

HENDRIK OTTO

Dipl.-Ing. Hendrik Otto works at the chair of Material Handling and Conveying Technology at the Institute of Logistics and Material Handling of the Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany. He graduated at the Technical University of Dresden in 2012 and holds a Master's in Mechanical Engineering (off-road vehicle dynamics). Since then he works in the field of belt mistracking of conveyor belts as part of his PhD studies.

THOMAS RÖBLER

Thomas Rößler, M.Sc. works at the chair of Material Handling and Conveying Technology at the Institute of Logistics and Material Handling of the Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany. He graduated at the OVGU

and holds a Master in Industrial Engineering. Since then he works in the field of bulk material simulations.

ANDRÉ KATTERFELD

Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld holds the chair of Material Handling and Conveying Technology at the Institute of Logistics and Material Handling of the Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Germany. He received his PhD on the analysis of tube chain conveyors in 2005. Prof. Katterfeld is an internationally known expert in the field of material handling with expertise in the mechanical transportation of bulk materials. He has a strong reputation in academic and industrial applications of the Discrete Element Method (DEM) in the field of material handling

Address: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,
Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik, Institut für
Logistik und Materialflusstechnik, Universitätsplatz 2,
39106 Magdeburg