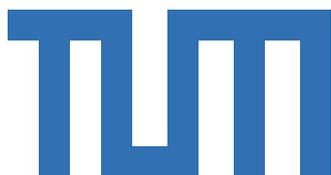


25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021
„Computersimulation – Organisation – Virtualisierung –
Innovation – Digitalisierung“

**Virtual Prototyping mit DEM zur Entwicklung eines Near-
Nozzle-Mixing Verfahrens für den additiven 3D
Betondruck für den Roboter Einsatz**

Yuan Tan, M.Sc.
Maximilian Dahlenburg, M.Sc.
Akad. Dir. Stephan Kessler
Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner



Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
fml -Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss
Logistik, Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Seite bitte leer lassen

Virtual Prototyping mit DEM zur Entwicklung eines Near-Nozzle-Mixing Verfahrens für den additiven 3D Betondruck für den Roboter Einsatz

Im Sonderforschungsbereiches TRR 277 „Additive Fertigung im Bauwesen – Die Herausforderungen des großen Maßstabs“ der DFG, steht Ressourcen- und Zeiteffizienz in der Bauindustrie im Fokus. Das hier beschriebene Teilprojekt zum 3D Betondruck beruht auf der Entwicklung eines düsennahen Mischsystems zum Einsatz am Roboter. Die Entwicklung erfolgt als 3D CAD Varianten Konstruktion mit virtual Prototyping gestützt auf die DEM. Zur Mischungscharakterisierung der verschiedenen Feststoffe und Wasser wird eine simulative DEM Studie erstellt und die prozessrelevanten Eingangsgrößen Anstellwinkel der Mischpaddel und Drehzahl Mischwelle stufenweise variiert. Durch zwei Parameter – dem Wassergehalt der Stoffe und dem Lacey-Index der Mischung – kann die Änderung des Mischungszustands analysiert und bewertet werden.

1 Roboter Entwicklungen und Einsätze für die Schüttgutfördertechnik

Roboter und Schüttgutfördertechnik sind im ersten Eindruck verschiedene Welten. Schaut man aber genauer hin, dann findet man eine verblüffende Synergie.

Bei Robotern spricht man von Automaten, die mechanische stereotype Tätigkeiten übernehmen, um den Menschen zu entlasten. Nach Definition der amerikanischen Robotic Industries Association ist im übertragenen Sinn ein Roboter ein programmierbares Handhabungsgerät für das Bewegen von Material, Werkstücken bzw. Werkzeugen. In der Schüttgutfördertechnik bewegen wir automatisiert Materialien. Mittlerweile sind unsere Anlagen auch programmierbar. Bei der JARA, der Japan Robot Association findet man als Untergruppe, die *Fixed Sequence Robots*, das sind Handhabungsgeräte, die wiederholt nach einem konstanten Bewegungsmuster arbeiten. Nun, das ist das Prinzip unser Stetigförderer. Wenn man Versackungsmaschinen in der Futtermittel-, Getreide- und Baustoffindustrie sieht, dann haben wir hier die Funktionen der Handhabung, einen Mehrachsbetrieb, den stereotypen Transport von Materialien über Gebindebildung und Palettierung. Bei Bedarf lassen sich verschiedene Programme fahren, das ist schon sehr Roboter like.

Auf unseren Baustellen müssen wir Erdreich bewegen und verschiedenste Schüttgüter verarbeiten. Hier ist die Schüttgutfördertechnik gefordert. In den nächsten Jahren werden wir hier die benötigten Roboter auf der Baustelle vorfinden. Bedingt ist das auch durch die ansteigende Demografie und den zunehmenden Fachkräftemangel. Im Baubetrieb unterscheiden wir den Tiefbau, den Hochbau und den Ingenieurbau. In allen Bereichen sind Schüttgüter zu bewegen. Das geschieht zunehmend automatisiert.

Beim 3D – Geländebaggern wird der Fahrer unterstützt durch einen SOLL – IST Vergleich der Aufmaßkontrolle. Das Gelände ist vermessen über Laser Theodolit (IST) und die aktuelle Position der Schaufelschneide des Baggers ist bestimmt über die vermessene Maschinenposition über Differential – GPS und die Stellung der Baggerkinematik über Winkelaufnehmer – IMUs. Der Fahrer bekommt das Gelände mit einem Rot – Grün – Netz angezeigt, d.h. Rot ist noch ab- oder aufzutragen und Grün heißt finished, das Endmaß ist erreicht.



Bild 1: Geländenetz beim 3D Geländeabbagern. [1]

Die Maschine arbeitet hier zusätzlich teilautomatisiert, bestimmte Freiheitsgrade werden automatisch nachgeführt z.B. der Schaufelwinkel. Das Erstellen von Planum, Schräghängen und optionalen Geländeprofilen erfolgt bis zu 30% schneller und bei besserer Qualität im Vergleich zur konventionellen Baggerarbeit. Das Bundesprojekt Bauen 4.0 des BMBF ist hier weiter unterwegs, um die Großmaschine zu automatisieren [2]. Damit wird der Bagger zum Roboter zum Handling von Erdreich und Schüttgütern.

Stereotype Transporte von Erdreich und Schüttgütern übernehmen mittlerweile selbstfahrende Mulden, z.B. der Volvo – Truck.



Bild 2: Volvo-Truck [3]

Mit dem 3D – Betondruck mit Betonpumpe werden mittlerweile ganze Häuser gedruckt. Hier besteht die Herausforderung, dass der Beton pumpbar bleiben muss, aber am Formkopf eine pastöse Raupe mit ausreichender Steifigkeit für den Druck vorliegen muss. Die US Army hat den Vorteil dieser Technik erkannt und damit ihre Pioniereinheiten ergänzt. In kürzester Zeit lassen sich so Gebäude und Zweckbauwerke erstellen.



Bild 3: 3D Betonpumpe (links) [4] und gedrucktes Haus BFT (rechts) [5]

Wir werden infolge Demografie und Fachkräftemangel bald mobile Kleinroboter auf der Baustelle vorfinden, sogenannte Cobots. Ihre Aufgabe ist in der Additiven Fertigung auf der Baustelle zu sehen beim lokalen Betonieren und Schweißen sowie beim Transport in der

letzten Meile.

Nicht nur dem Einsatz von Robotern auf der Baustelle, sondern auch der Digitalisierung ganz allgemeinen widmet sich der DFG Sonderforschungsbereich TRR277 (siehe Kapitel 2.1) in den kommenden Jahren. Hier sind Mitarbeiter der TU Braunschweig und der TU München auf dem Weg neue Entwicklungen für die additive Fertigung auf der Baustelle zu schaffen [6]. Der Lehrstuhl Fördertechnik Materialfluss Logistik der TU München hat hier die Aufgabe ein kompaktes Aggregat für den 3D Betondruck beim Robotereinsatz in der additiven Fertigung im Bauwesen zu entwickeln. Ein erster Prototyp zur Realisierung der Methode des „near-nozzle mixing“ wurde hierzu entwickelt. Zunächst noch als Standmodell, um Grundlagenversuche durchzuführen und die Machbarkeit zu zeigen. In einer zweiten Entwicklung erfolgt die Applikation am Roboter. Ein Virtual Prototyping, gestützt auf DEM Simulationen für die verschiedenen Prozessabschnitte, war hier zielführend. Projekt, System und Simulationsbeschreibungen werden nachfolgend beschrieben.

2 Pumpenlose additive Fertigung mit Extrusionsbeton – Pumpless Additive Manufacturing with Extrusion Concrete (PAMEC)

2.1 Projekt und Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – GZ:414265976 – TRR 277 stellt sich der Sonderforschungsbereich mithilfe einer kollaborativen und stark vernetzten Projektbearbeitung durch mehr als 70 Mitarbeitern in 21 verschiedenen Teilprojekten der Herausforderung die additive Fertigung nachhaltig in das Bauwesen einzugliedern. Neben klassischen Verfahren wie der Betonextrusion, Pulverbettbasierten- und Spritzbeton-Verfahren steht im TRR277 nicht nur der Werkstoff Beton, sondern auch die additive Fertigung mit Bewehrungen im Fokus sowie die additive Fertigung mit Schweißknoten. Zusätzlich zur Grundlagenforschung an Material- und Prozesstechnik in den Teilprojekten A01 – A08, werden auch aktuelle Themen wie computergestützte Modellierung und Steuerung in den Teilprojekten B sowie Bereiche wie Entwurf und Konstruktion im Bauwesen in den Teilprojekten C verfolgt.

2.2 Material, Problemstellung und Ziel

Beton stellt nicht nur den am meisten verwendeten Baustoff der Welt dar, sondern ist auch in seiner Herstellung und Rezeptur eines der vielfältigsten Materialien. Durch neue materialwissenschaftliche Ansätze wurde ein spezieller Extrusions-Leichtbeton mit dem Namen „LC3D“ (Lightweight Concrete for 3D printing) mit den Hauptbestandteilen CEM I 52,5 R und Blähglasgranulat (0,1 – 2 mm) entwickelt [7]. Ziel dieses innovativen Materials ist die Optimierung der Bau- und Pumpbarkeit zur Verwendung in etablierten Extrusionsprozessen (siehe Bild 4).



Bild 4: Darstellung eines klassischen Pumpbeton Material Extrusionsprozesses [8].

In Spritzbeton- und Extrusionsverfahren erzeugen meist Exzentrerschneckenpumpen die treibenden Kräfte für die Förderung des Betonstrangs durch Schläuche an die Düse. Bei solchen Fördermethoden muss während des Druckprozesses auf gute Fließfähigkeit und scherungsbedingte Rheologieadaptation in den Schläuchen und hoher Grünfestigkeit nach dem Austrag geachtet werden. Um diesen Phänomenen zu begegnen, ergeben sich zwei Anforderungen und gleichzeitig ein Zielkonflikt zwischen gut fließendem und schnell abbindendem Beton nach Düsenaustritt. [9] Während des Misch- und Fördervorgangs ist bei LC3D allerdings auf die maximale Druckfestigkeit der Leichtfüllstoffe zu achten. Beim Überschreiten einer Druckbelastung von 19,1 MPa werden die Blähglaskugeln zermahlen, wodurch die positive Eigenschaft wie eine geringe Dichte nicht erreicht werden kann. [10]

Nachteilig bringen kontinuierliche Standardmischer auf Schneckenbasis konstruiert, nach Stand der Technik, bedingt durch hohe Drehzahlen von mehr als 200 U/min zu viel Mischenergie in das Material ein. Zudem sind die genannten Exzentrerschneckenpumpen durch ihre geringen Toleranzen nicht immer in der Lage das Material in ausreichender Menge zerstörungsfrei an den Austragungsort zu fördern.

Anstatt die Transportfähigkeit durch massive Zugabe von Fließmitteln zu erhöhen, wird im Teilbereich A03 TRR277 der Extrusionsprozess grundlegend überarbeitet. So wird eine pumpenlose, düsennahe und kontinuierliche Mischung von angepasstem LC3D unter der Projektbeschreibung "Extrusion of Near-Nozzle Mixed Concrete – Individually Graded in Density and in Rate of 3D Fibre Reinforcement" entwickelt. Wie der Titel ankündigt, steht neben der kontinuierlichen düsennahen Mischung als weiteres Alleinstellungsmerkmal eine Gradierbarkeit der Materialeigenschaften von abgelegten Betonsträngen im Vordergrund. Zudem soll das abgelegte Material durch eine lokale Bewehrung in vertikaler Richtung armiert werden, um den Schichtenverbund zu stärken.

Ziel ist es ein Mischsystem zu entwickeln, welches in der Lage ist LC3D-Beton schonend mit geringer Mischenergie, kontinuierlich, mit zufriedenstellender Qualität, düsennah zu mischen, um dadurch lange Förderwege zum Austragungsort zu eliminieren.

2.2 Systembeschreibung und -funktion von PAMEC

Ein Prototyp des Misch- und Zuführsystems wurde erfolgreich entwickelt und gebaut. Das in Bild 5 abgebildete Mischsystem wurde in Anlehnung eines Trogmischers ausgelegt und

mit einem Innendurchmesser von $D_{iMFa} = 240 \text{ mm}$ dimensioniert, um die geforderte Mindestdruckgeschwindigkeit von $v = 3 \text{ m/min}$ einhalten zu können.



Bild 5: Links: Querschnitt des Mischsystems ohne Antriebselemente mit dem Zulaufbereich rechter Rand, Nassmisch- und Förderbereich mitte und Kompressionsbereich links vertikal angeordnet;
Rechts: Gesamtansicht des Mischsystems „near-nozzle-mixing“ aus DFG-SFB TRR277

Das System besteht aus 3 Bereichen, durch welche das Material sukzessive durchgeleitet und druckbar gemacht wird. Im ersten, dem sog. Mischbereich, wird Material aus einer volumetrischen Dosiereinheit der Firma Brabender Technologie im Zulaufbereich eingebracht (siehe Bild 6).



Bild 6: Volumetrische Schüttgut Dosiereinheit FlexWall40 [11]

Im Mischbereich (Zulaufbereich) werden mögliche Entmischungserscheinungen durch die beweglichen Dosierwände im sog. Trockenmischbereich auf einer Gesamtlänge von $l_{T_MS} = 150 \text{ mm}$ ausgeglichen. Dieser Bereich wird durch eine volle Schneckenwendel mit einer Steigung von $P_{MS} = 40 \text{ mm}$ vom nachfolgenden Nassmischbereich mit einer Länge von $l_{N_MS} = 965 \text{ mm}$ getrennt (siehe Bild 7).

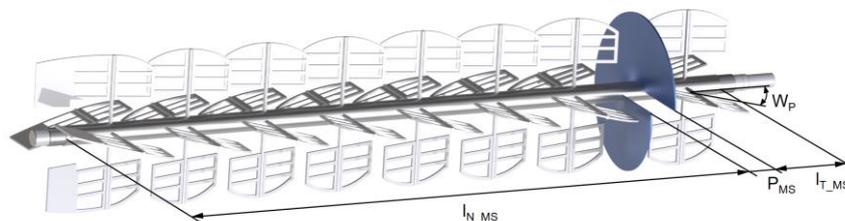


Bild 7: Mischwelle mit Mischpaddeln (rechts), Schott (blau) und vier Endpaddeln (links)

Kurz nach dem Eintritt in diesen zweiten Bereich werden flüssige Komponenten wie Wasser und Fließmittel über ein Dosiersystem der Firma Spraying Systems zugeführt. Hierzu werden über jeweils eine ausgangsdruckgesteuerte und pneumatische Membranpumpe mit nachgelagertem Pulsationsdämpfer zwei Pulsajet-Düsensysteme betrieben. Bei der Pulsajet-Düsentechnik handelt es sich um ein patentiertes System, welches die Durchflusssteuerung über Frequenzmodulation im Prozentbereich ermöglicht. Insgesamt befinden sich auf der Mischwelle 28 Mischpaddel die neben der Mischung für eine definierte Förderung des Materials verantwortlich sind. Zusätzlich sind am Ende des Nassmischbereichs vier „Endpaddel“ angebracht, um das gemischte Material möglichst schnell und definiert in den nachfolgenden Förderbereich weiterzugeben. Diese Endpaddel

unterscheiden sich von den Mischpaddeln hinsichtlich Stegbreiten und Form. Die Misch- und Endpaddel sind in Ihrem Winkel WP zur Mischachse anstellbar (siehe Bild 7). Wie die in Kapitel 3 beschriebenen Untersuchungen zeigen, stellt dieser Winkel neben der Wellendrehzahl und dem Füllgrad einen der Hauptparameter hinsichtlich Fördermenge und Mischwirkung dar. Nach einer durchschnittlichen Verweilzeit von ca. 2 Minuten (Betonaktivierungszeit) im Nassmischbereich wird das Material in den Förderbereich weitergeschoben. Dort wird der fertig gemischte Beton von einer über das Lager ragenden und ungestützten Vollschncke (siehe Bild 8) eingezogen und über einen gestützten Bandschnckenbereich an den Kompressionsbereich weitergegeben.

Im vertikalen Kompressionsbereich wird das Material von einer Vollschncke mit konstanter Steigung $P_{KS} = 40$ mm über eine Länge von $l_{KS} = 216$ mm und einem Außendurchmesser von $D_{KS} = 54$ mm über eine Querschnittsveränderung am Düsenaustritt $\Delta D_D = -29$ mm komprimiert und ausgetragen (siehe Bild 8). Die Verwendung von Schncken mit abnehmender Steigung (degressiv) hat keine signifikanten Veränderungen in der Kompressionswirkung gezeigt. Aus Fertigungsgründen kann hier eine kostengünstigere Vollschncke mit konstanter Steigung eingesetzt werden, die auch einfacher zu reinigen ist.

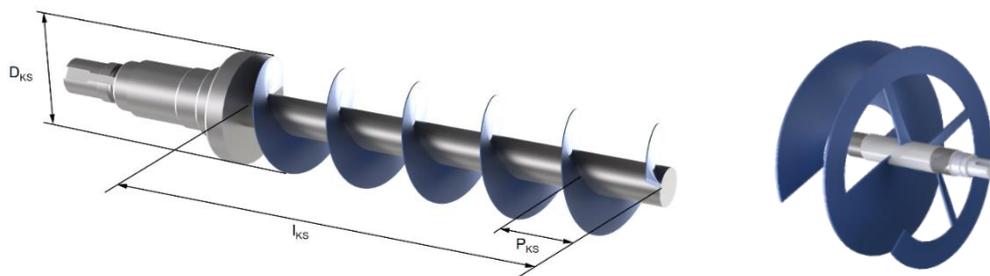


Bild 8: Links - Kompressionswelle mit Vollschncke aus dem Kompressionsbereich,

Rechts - Förderwelle mit Teilbandschncke aus dem Förderbereich.

Hinsichtlich des aggressiven Abbindeverhalten von LC3D liegt ein besonderes Augenmerk auf der Reinigung des Systems bei der konstruktiven Gestaltung. Mit der begleitenden DEM Simulation beim Virtual Prototyping wurden Stau- und Totzonen detektiert und konstruktiv eliminiert. Sollte sich gehärteter Beton durch Vibrationen von den Bauteilen lösen, kann dies fatale Kollisionen und Blockaden im Gerät hervorrufen. Dank dem Einsatz von Motoren mit IP65 Schutzklassen kann das System durch den Einsatz von Druckwasser einfach gereinigt werden. Für eine manuelle Nachreinigung sind zudem alle Teile gut zugänglich gestaltet durch die Deckelbauweise.

Um die Steuerung aller angetriebenen und gesteuerten Elemente so einfach und intuitiv wie möglich zu gestalten, wurden diese über eine Beckhoff SPS gekoppelt und lassen sich nun über ein Industrie-HMI mit GUI unabhängig ansteuern. Dadurch ist das System hervorragend für die Grundlagenforschung an neuer Material- und Prozesstechnik geeignet. SPS-Programmierkenntnisse sind damit nicht erforderlich. Diese Art der Ansteuerung ist gleichzeitig ein Test für die spätere HMI des Endgerätes am Roboterkopf. Der entwickelte Prototyp ist durch seine modulare Bauweise auf weitere Optimierungen für eine zweite verbesserte Version vorbereitet. Mithilfe des digitalen Zwillings aus dem Virtual Prototyping lassen sich Ergebnisse der DEM-Simulationen direkt ins digitale Format

migrieren, um diese in virtuellen Funktionstests zu validieren.

3. Methode nach Lacey zur Auswertung der DEM-Simulationen um Mischverhältnisse zu bestimmen

Im Jahr 1943 führte Lacey P.M.C. erstmals den heutigen Lacey Mischungsindex (M) durch. Dieser (Gl. (1)) wird zur Auswertung der Qualität eines Stoffgemisches verwendet, um den Mischungsgrad eines Gemisches aus zwei Materialien zu berechnen [12, 13].

$$M = \frac{S_0^2 - S^2}{S_0^2 - S_r^2} \quad (1)$$

Gemäß dieser Methode soll die zu untersuchende Stichprobe in N -Zellen aufgeteilt werden. Während S_0^2 die Varianz darstellt, wenn beide Partikel vollständig getrennt sind, ist S_r^2 die Varianz der völlig zufälligen Vermischung zweier verschiedener Partikel. P bezeichnet den Anteil der Partikel A in der Stichprobe. N_{ave} ist die durchschnittliche Anzahl von Partikeln in jeder Zelle [14].

$$S_0^2 = P(1 - P) \quad (2)$$

$$S_r^2 = \frac{p(1-p)}{N_{ave}} \quad (3)$$

Im Weiteren wird die Varianz des tatsächlichen Mischzustands von einzeltem Material (S^2) mit der folgenden Formel berechnet:

$$S^2 = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{n_{i.sum}} \left(\frac{n_i}{n_i} - P \right)^2 \quad (4)$$

Hierbei ist N die Gesamtzahl der Zellen in der Stichprobe, n_i und N_i ($i= 1, 2, 3... N$) bezeichnen die Anzahl einzelner Partikel (A) sowie der Gesamtpartikel in i -Zelle und n_{sum} stellt die Gesamtpartikelzahl aus allen Zellen in der Stichprobe dar. n_i/n_{sum} bezeichnet demnach die Gewichtung der i -Zelle. Diese Gewichtung ist dementsprechend Null, wenn kein Partikel A sich in einer Zelle befindet [13].

Daten für die Anwendung des Lacey Mischungsindex (M) werden durch die Post-Processing-Funktion von EDEM [15] gesammelt.

4 Modellaufbau für die DEM-Simulation zur Mischungsverhältnis Untersuchung

4.1 Basismodellaufbau

In der aktuellen Forschungsarbeit wird eine kommerzielle Software, Altair EDEM [14], für die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) zur Untersuchung dieses Mischungsverfahrens eingesetzt. Dabei wird ein Plug-in zur Verwirklichung des Wasseraustausches zwischen den Partikeln bei verschiedenen Wassergehalten eingesetzt. Dieses Plug-in wurde in Absprache mit University Edinborough, Altair und TUM fml konfektioniert und ermöglicht die Befeuchtung der Partikel über der Zeit durch Kontaktdauer darzustellen und zu bewerten. Aus dem virtuellen 3D CAD-Prototyp des zu untersuchenden Mischsystems wird ein vereinfachtes simulatives Modell in EDEM migriert (Bild 9)

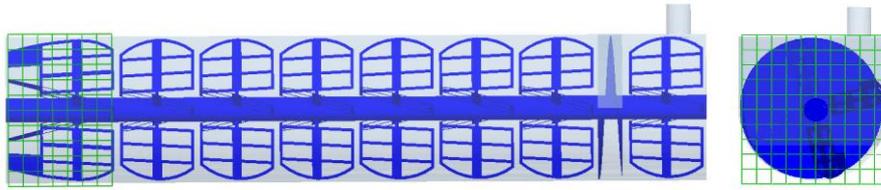


Bild 9: Geometrie DEM Simulationsmodell und Stichproben Analyse mit Lacey Zellen zur Auswertung des Mischzustands - Hauptansicht und Seitenansicht

4.2 Simulierte Partikel- und Betriebsparameter

Die Partikel- und Betriebsparameter, die in EDEM eingestellt werden müssen, werden in Tabelle 1 und Tabelle 2 gelistet. Hier ist zu erklären, dass die Größen der drei Simulationspartikel – Zement, Zuschlagstoff und Wasser– auf 1,5 mm, 2 mm und 2 mm hochskaliert wurden, damit der Simulationsaufwand (Rechenzeit) verringert ist für die benötigten Varianten Untersuchungen

Tabelle 1: Partikelparameter in EDEM

	Schüttdichte [kg/m^3]	Partikel Radius [mm]	Poissonzahl
Zement	2000	1,5	0,25
Zuschlagstoff	1450	2	0,35
Wasser	1000	2	0,25

Untersucht wurde der Einfluss des Anstellwinkels der Paddel und die Drehzahl der Mischwelle auf den Mischzustand und den Wassergehalt der Partikel, also die Durchfeuchtung. Zwei Anstellwinkel, 15° und 20° , wurden untersucht und für die Drehzahl wurden 5 Stufen vorgegeben. Diese Werte wurden mit den Betonspezialisten vom CBM der TUM abgestimmt, den Partnern in A03 TRR277.

Tabelle 2: Betriebsparameter der Simulationen

Fall	1	2	3	4	5
Anstellwinkel [°]			15		
Drehzahl [U/min]	10	15	20	25	30
Fall	6	4	8	9	10
Anstellwinkel [°]			20		
Drehzahl [U/min]	10	15	20	25	30

Jede Simulation beginnt mit der Zufuhr des Zements und der Zuschlagstoffe. Dies geschieht jeweils mit dem Massenstrom von $0,1 \text{ kg/s}$, die zunächst im Trockenmischbereich gemischt und durch die Schneckenwende bis zum Nassmischbereich gefördert werden. Im Weiteren wird die Mischung des Trockencompounds (M_1) mit drei Zufuhrströmen aus Wasserpartikeln gemischt. Der Massenstrom jedes Wasserstromes beträgt $0,025 \text{ kg/s}$. Die neue Mischung (M_2) wird im Anschluss durch den Nassmischbereich transportiert. Der Ausgangsbereich mit den letzten Paddeln wurde zur quantitativen Auswertung des Mischzustands und Wassergehalts der Partikel von M_2 durch die Lacey Zellen gewählt. Um die Diskussion zu erleichtern, werden die Simulationen mit den unterschiedlichen Betriebsparametern als Fall 1 bis Fall 10 bezeichnet – siehe oben Tabelle 2

5 Ergebnisse und Diskussion

Die DEM ist hervorragend geeignet das virtual Prototyping der Entwicklung eines Stetigförderers als Analysewerkzeug zu begleiten. In der Entwurfsphase und für die Grobkonstruktion genügt es anerkannte bzw. bekannte Stoffwerte und Modelle anzusetzen. Hiermit kann bereits der Massenstrom und die benötigte Antriebsleistung bestimmt und konfektioniert werden. Stau- bzw. Totbereiche im Fördergerät lassen sich bereits detektieren und konstruktiv vermeiden. Beim Übergang zum virtuellen Zwilling ist dann die Analyse der Stoffeigenschaften und die exakte Modellbildung notwendig. Dies geschah hier mit Unterstützung des Schüttgutlabors des ILM von Herrn Prof Katterfeld von der OvGU Magdeburg. Hierfür unser herzlicher Dank. Mit der anschließenden Maschinenkalibrierung, d.h. Trimmung des verwendeten DEM – Modells im Abgleich mit der Realförderung kommt man zum virtuellen Zwilling (vZ) der Entwicklung . Mit diesem vZ kann anschließend explorativ und einfach virtuell weiter entwickelt werden ohne reale Prototypen bauen zu müssen.

Wie in der DEM-Modellbeschreibung bereits erwähnt, werden Partikel aus Zement, Zuschlagstoff und Wasser in der Mischzone vollständig gemischt und über die Scherkraft des Mischpaddels weiter transportiert, bis sie aus dem Auslass herausfließen. Hiermit wird der Mischzustand aller drei Stoffe und der durchschnittliche Wassergehalt der Partikel jedes Stoffes am Ausgang quantitativ ausgewertet.

5.1 Bewertung des Mischzustandes

In der Auswertung des Massenstroms ist zu erkennen, dass die Mischungen aller Simulationsfälle ab ca. 30 s einen stabilen Zustand, d.h. eine gute Durchmischung $M > 0,9$ erreichen. Es wird deswegen der Mischungsindex alle 5 s innerhalb von 0-30 s und alle 1 s innerhalb von 30-45 s skaliert. Wie in Bild 10 veranschaulicht, sind die Ergebnisse der Stichproben Analysen nach Lacey zur Ermittlung der Mischungsindexe dargestellt. Hierzu ist ein Würfel der Seitenlängen von 250x250x170 mm am Ausgang des Mischers angesetzt und gleichmäßig in 10x10x7 kleine kubische Zellen unterteilt.

Nachdem die Position, die Größe und die Unterteilung der Probe in kleine Zellen definiert ist, kann die Anzahl der Partikel für die Mischungen abgeleitet werden. Das Post-Processing der EDEM-Simulation zählt zu jedem Simulationszeitpunkt die Anzahl von Partikeln in jeder kleinen Zelle. Um die Mischzustände aller untersuchten Fälle zu beschreiben und die Auswirkungen der unterschiedlichen Betriebsparameter zu vergleichen, werden die Mischungsindexe in der Zusammenschau in Bild 10 geplottet.

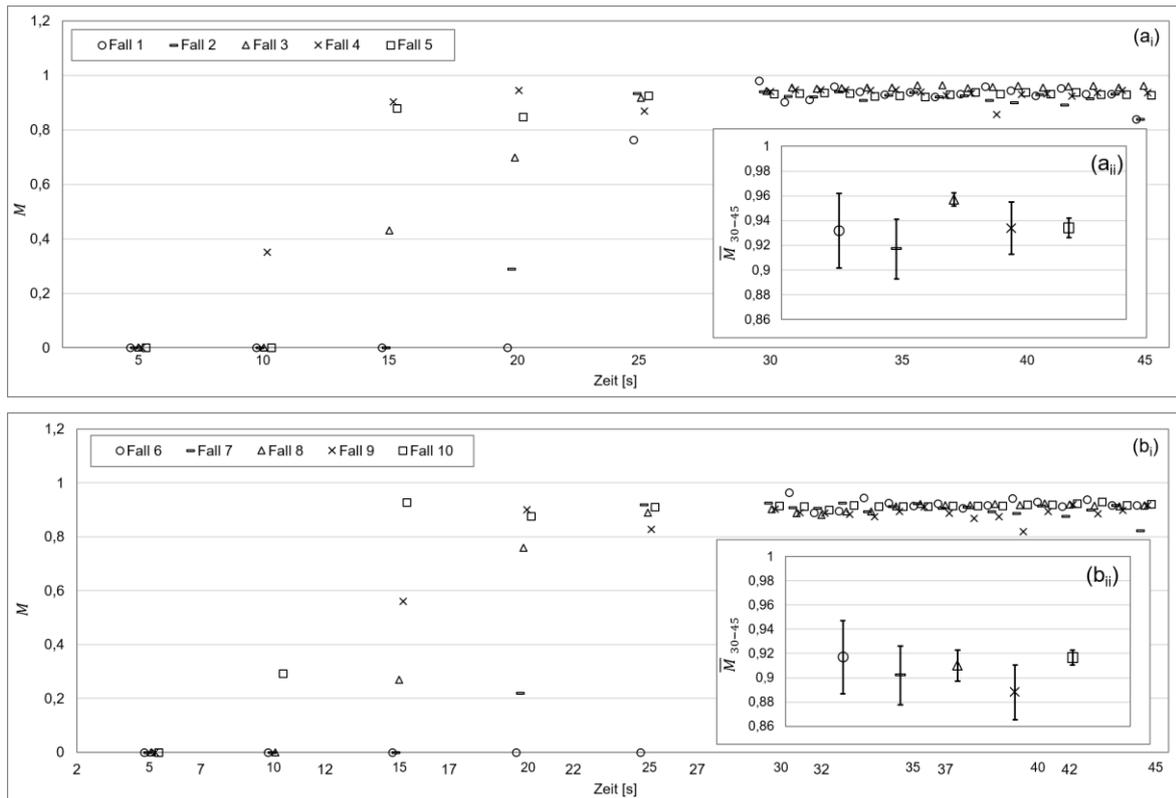


Bild 10: Lacey Mischungsindex über der Zeit

Legende - a: alle protokollierten Indexe bei 15° Anstellwinkel und aii: Mittelwert der Indexe zwischen 30-45 s bei 15° Anstellwinkel

Legende: - b: alle protokollierten Indexe bei 20° Anstellwinkel und bii: Mittelwerte der Indexe zwischen 30-45 s bei 20° Anstellwinkel

Beim Vergleich von allen zehn Simulationsfällen im gleichen Zeitintervall ist folgendes ersichtlich:

Man erkennt, wie erwartet, dass mit steigender Drehzahl das Mischverhältnis eher ansteigt. D.h. bei höherer Drehzahl könnte man die Mischzone kürzer bauen.

Eine wichtige Erkenntnis ist, dass praktisch unabhängig von der Drehzahl eine robuste Durchmischung mit $M > 0,9$ ab 30 s bei Paddeln mit 15° Anstellwinkel vorliegt. D.h. auch der energetisch günstigere Langsamläufer erzielt die gewünschte Durchmischung.

Der Vergleich der Paddel Anstellwinkel zeigt, dass bei 15° die Mittelwerte und die Wertebereiche des erzielten Mischzustandes etwas höher liegen als bei 20°. Die Vermutung liegt nahe, dass die längere Kontaktzeit der Partikel (Gleitzeiten) mit den Paddeloberflächen eine bessere Durchmischung bewirkt.

Dieses Beispiel zeigt, dass mit der DEM und der Lacey Methode sehr detaillierte Aussagen zum Mischungsgrad möglich sind.

5.2 Darstellung und Bestimmung des Wassergehaltes in der Mischung

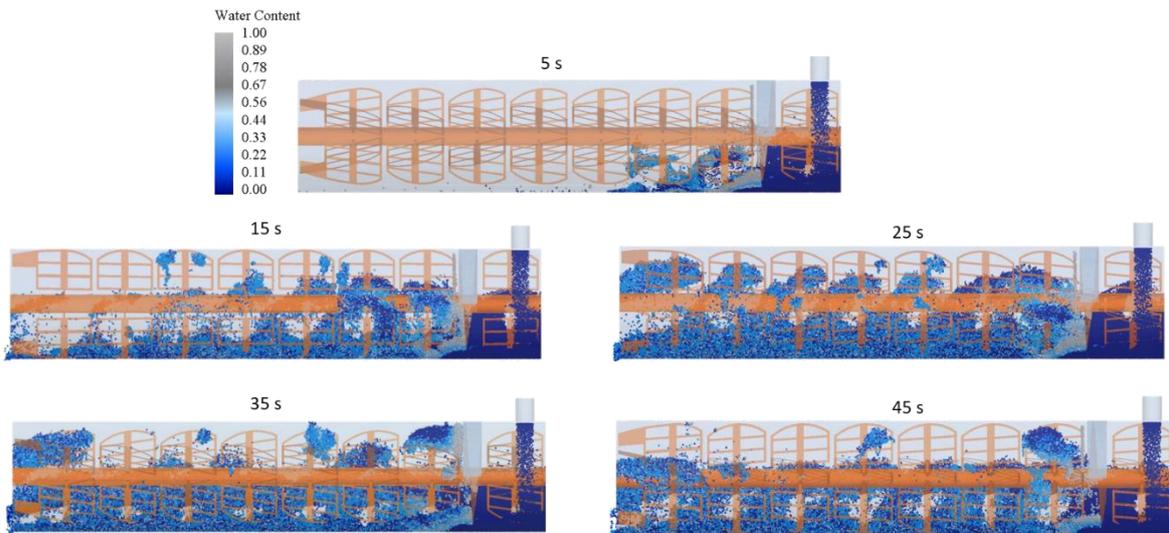


Bild 11: Screenshots des Wassergehalts zu Zeiten 5, 15, 25, 35 und 45 s beim Anstellwinkel von 15° und Drehzahl von 20 U/min (Fall 3).

Im Bild 11 sind die Screenshots der Near-Nozzle-Mischung für die Wasseraufnahme einer DEM Simulation nach Zeitschritten dargestellt. Hier werden praktisch das Anlaufverhalten und der Übergang in den quasistationären Zustand dargestellt. Wie bei den Mischungsuntersuchungen nach Lacey ist ersichtlich, dass man ab ca. 25 sek. in einen quasistationären Zustand im hinteren Bereich des Mischers kommt. Bei dieser Simulation Fall 3 (15° Anstellwinkel und Drehzahl 20 U/min) fällt auf, dass eine Klumpenbildung stattfinden kann. In der Kombination von Mischung und Förderung der Paddel werden geklumpfte Partikel vom Trogboden zum oberen Teil des Trogs geworfen. D.h. hier liegen kleine Plantschverluste vor, die sowohl energetisch als auch mischtechnisch nicht erwünscht sind. Die Abbildungen zeigen, wie die Wasseraufnahme nach dem Einlauf und zwei Paddelgängen im Mischer bereits relativ homogen erfolgt ist. D.h. nach zwei Mischstellen, jeweils mit vier Paddeln, ist die Verteilung schon relativ homogen und tendiert zu engen Werten. Das ist eine wichtige Erkenntnis für die benötigte Mindestlänge des Mischers für die 2. Prototypen Konstruktion.

Im folgenden Bild 12 wird die Durchfeuchtung quantitativ dargestellt und der aufgenommene Wassergehalt auswertbar.

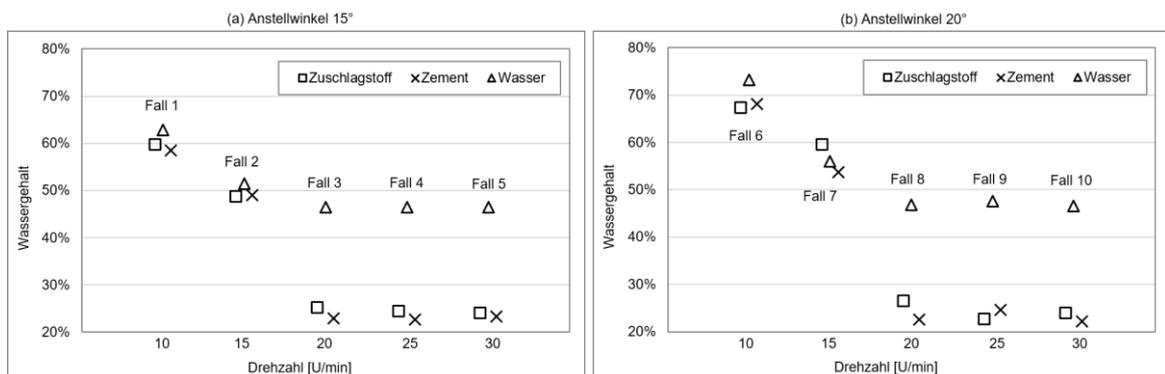


Bild 12: Punktediagramm des durchschnittlichen Wassergehalts in der Mischung und der Mischverteilung der Stoffe am Ausgang für die Fälle 1 bis 10

Auffällig ist, dass beim Langsamläufer ($n \leq 15$ U/min) Fälle 1 und 2 sowie Fälle 6 und 7 eine sehr homogene Durchfeuchtung vorliegt, wie gewünscht, während bei den höheren Drehzahlen das Wasser offensichtlich nicht optimal aufgenommen wird. Dies spiegelt die Aussage der Betonspezialisten wieder: „Wir haben bei diesen Leichtbetonen das Problem, das Wasser in die Mischungen zu bekommen“. Das vorliegende DEM Diagramm zeigt sehr deutlich, dass dieses Problem Drehzahl abhängig ist. D.h. bei Langsamläufern (hier $n \leq 15$ U/min) sollte die Durchfeuchtung komplett erfolgen, während bei höheren Drehzahlen das nicht gewährleistet ist. Daraus kann gefolgert werden, dass die Wasseraufnahme des Zements und der Zuschlagstoffe hauptsächlich von der Drehzahl dominiert wird. Ein Einfluss des Anstellwinkels ist hier offensichtlich nur bei niedrigen Drehzahlen (10 U/min und 15 U/min) da, also bei den Fällen der kompletten Durchfeuchtung bemerkbar. Hier zeigt sich jetzt gegenteilig, dass bei der Durchfeuchtung der steilere Anstellwinkel 20° einen kleinen Vorteil hat. Das legt die Vermutung nahe, dass zwar beim flacheren Anstellwinkel der Mischgutweg am Paddel länger ist, d.h. mehr Reibleistung einbringt und dadurch die Mischung der Feststoffe fördert (siehe Bild 10 Mischung), dass aber dadurch wahrscheinlich eine Kongglomeration der reagierenden Feststoffe stattfindet, welche der Wasseraufnahme entgegenwirkt. Das Problem ist komplex und man sieht, dass nur die begleitenden DEM-Simulationen des virtuellen Zwillings Transparenz und Aufklärung bringen.

Zusammenfassung

Bei etablierten Betonextrusionsprozessen besteht ein Zielkonflikt hinsichtlich der Eigenschaften des verwendeten Materials. Es wird zum einen ein gut fließender Beton für die langen Pumpwege und zum anderen ein schnell abbindender Beton nach Ablage des Extrusionsstrangs benötigt. Um diesen Zielkonflikt zu lösen, wurde vom CBM der TU München ein extrusionsfähiger Leichtbeton „Lightweight Concrete for 3D printing“ (LC3D) entwickelt. Durch den hohen Anteil von Blähglasgranulat ist die Mischbarkeit des Materials in konventionellen Durchlaufmischern, welche durch hohe Mischenergie diese Partikel zerstören, eingeschränkt. Im Teilprojekt A03 des DFG Sonderforschungsbereiches TRR277 wird ein Mischsystem entwickelt, welches LC3D verarbeiten kann. Durch den Ansatz einer düsennahen Mischung ohne Pumpwege und Schläuche lässt sich nicht nur zerstörungsfrei mischen, sondern auch der Fließmittelgehalt auf ein Minimum reduzieren. Der erste Prototyp besteht aus 3 Bereichen, welche das Material sukzessive durchläuft. Im Mischbereich wird das Trockencompound durch individuell anstellbare Paddel durchmischt und über einen Förderbereich definiert in den Kompressionsbereich weitergegeben. Zu Forschungszwecken sind hier alle Wellen individuell ansteuerbar.

Um den Einfluss von Betriebsparametern wie Anstellwinkel der Mischpaddel und Drehzahl der Mischwelle auf die Betonmischung zu untersuchen, wurden Vergleiche mit variierenden Simulationsbedingungen in einer DEM Studie durchgeführt. Dadurch werden folgende Kenntnisse über den Einfluss quantitativ gewonnen:

- 1) Die Simulationsergebnisse zeigen durch die Agglomerationen, dass die konstruierten Mischpaddel die gewünschte Mischwirkung von zwei trockenen Materialien und Wasser hervorbringen.

2) Eine Steigerung der Drehzahl erhöht zwar die Mischwirkung signifikant, verringert aber vermutlich im Zuge der kürzeren Kontaktzeiten auch die Wasseraufnahme des Trockencompounds.

3) Flachere Anstellwinkel führen zu einer besseren Durchmischung des Materials, verringert jedoch bei niedrigen Drehzahlen die Befeuchtung des Trockencompounds.

Die wirkende Kontaktfläche zwischen Partikeln und Paddeln spielt in dieser Anwendung eine entscheidende Rolle.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des TRR 277 (www.tu-braunschweig.de/trr277) durch die Deutsche Fördergemeinschaft (DFG) – TRR 277/1 2020 – Projektnummer 414265976.

Quellenverzeichnis:

- [1] Maschinentechnik Schrode Werksfoto 2018
- [2] VDMA Info Tage zu Bauen 4.0., 4.5. bis 6.5.2021 - <https://www.verbundprojekt-bauen40.de/blog-Infotage>.
- [3] Volvo Werksfoto zur bauma 2019.
- [4] CON – Print 3D reinforced, TU Dresden, Institut für Baustoffe. <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ifb/das-institut/news/CONPrint3D>.
- [5] BFT International. https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Deutschlands_erstes_Gebaeude_aus_dem_3D-Drucker_3582812.html.
- [6] Kloft, H; Gehlen, C.; Dörfler, K; Hack, N; Henke, K; Lowke, D.; Mainka, J.; Raatz, A.: TRR 277: Additive Fertigung im Bauwesen; Bautechnik 98, H. 3, S. 222 – 231, 2021, Berlin, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG.
- [7] Matthäus, Carla; Henke, Klaudius; Talke, Daniel; Kränkel, Thomas: Leichtbeton-3D-Druck – Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton; BBSR-Online-Publikation, 05/2021, Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2021.
- [8] MAI International GmbH: MAI® MULTIMIX-3D – Spezialisierte Mörtelmischpumpe für den 3D-Betondruck [online]. Herausgegeben von MAI International GmbH 2020 [Zugriff am: 05. Juli 2021]. Verfügbar unter: <https://www.mai.at/de/3d-druck/mairmultimix-3d/>.
- [9] Matthäus C., Back D., Weger D., Kränkel T., Scheydt J., Gehlen C. (2020) Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. In: Bos F., Lucas S., Wolfs R., Salet T. (eds) Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. DC 2020. RILEM Bookseries, vol 28. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_32.
- [10] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Poraver® Leichtfüllstoff [online]. R&G

- Faserverbundwerkstoffe GmbH September 2016 [Zugriff am: 05. Juli 2021].
Verfügbar unter: https://www.r-g.de/wiki/Poraver%C2%AE_Leichtf%C3%BCllstoff.
- [11] Brabender Technologie GmbH & Co. KG: CAD Modell FlexWall40. Verfügbar unter:
<https://www.brabender-technologie.com/>.
- [12] Lacey, P.: Developments in the theory of particle mixing; Journal of applied chemistry, 1954; 257-268.
- [13] Godlieb, W.: DEM and TEM simulations of solid mixing in a gas-solid fluidized bed. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 9-11 December 2009.
- [14] Martin Rhodes: Introduction to Particle Technology.2008.
- [15] DEM Solutions, Altair Engineering, Inc. Troy, Michigan, USA, EDEM 2021.