

OTTO - VON - GUERICKE -
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

SCHÜTTGUTFÖRDERTECHNIK AM PULS DER ZEIT

29. Fachtagung Schüttgutförderertechnik Magdeburg

17. und 18. September 2025



INSTITUT FÜR ENGINEERING
VON PRODUKTEN UND SYSTEMEN

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

am 17. und 18. September 2025 in Magdeburg

Eine Veranstaltung von:



Technische Universität München
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik
Institut für Engineering von Produkten und Systemen (IEPS)



IBAF Engineering GmbH

in fachlicher Trägerschaft
des VDI-Fachausschusses 307 Schüttgut-Fördertechnik



29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Herausgegeben als Begleitband zur gleichnamigen Fachtagung
am 17. und 18. September 2025 in Magdeburg

Herausgeber:

André Katterfeld, Friedrich Krause, Johannes Fottner, Willibald A. Günthner,
Dagmar Pfeiffer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-948749-55-2

DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/118679>

Alle Rechte vorbehalten.

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Lizenz:



© 09/2025 Institut für Engineering von Produkten und Systemen (IEPS)
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Umschlaggestaltung: Arnhild Gerecke

Bildnachweise: OVGU; IEPS Katterfeld; IBAF GmbH; TUM; ellisedelacruz pixabay

Druck: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

Inhaltsverzeichnis	Seite
<i>Y.-J. Huang, D. Vidal Soroa, L. Oehler, C. Haid, R. Dietrich, J. Fottner</i> Kollaborative autonome Bauroboter: Ein Konzept zu Schüttguttransport und Verdichtung auf der Baustelle	5
<i>F. Mattersberger, A. Ortner-Pichler, C. Landschützer</i> Biomasselogistik: Methoden zur virtuellen Produktentwicklung eines Biomassegreifers	21
<i>M. Pusch, M. Raupert, C. Lotz, L. Overmeyer, A. Katterfeld</i> Pulverförderer für die Schwereelosigkeit	43
<i>M. Weidemann, E. Schmidt</i> Experimentelle Evaluation der Effizienzsteigerung durch elektrostatische Tropfenaufladung in der Nassentstaubung beim Schüttgutumschlag	59
<i>A. Bürger, S. Simon, S. HERNSCHIER, K. Moosburg</i> Untersuchungen an fettgefüllten, berührungsfreien Labyrinthdichtungen in Tragrollen	73
<i>Y. Redka, T. Kämper</i> Entwicklung eines intelligenten Prüfstandes für eine realitätsnahe Tragrollenprüfung	87
<i>D. Kasperek, J. Wilke</i> Vibrationsgestützte Tragrollen-Verschleißdiagnose für die Förderbandinspektion	99
<i>I. Ayoun</i> Reduzierung von Stillstandszeiten durch intelligente Wartungsstrategien	111
<i>H. Otto, R. Spaargaren, L. Wonner, M. Ajmal, A. Katterfeld</i> Experimentelle und simulative Untersuchung der Partikeldegradation bei Aufprall aus großen Fallhöhen	119
<i>J. Rettig, C. Bonenberger</i> Stauberfassung direkt an der Quelle	133

S. Dandorfer

Reine Produktivität mit Herding OMIKRON – das Filtermedium für die pneumatische Förderung 145

U. Richter

Umbau eines Bandantriebs von getriebe- auf getriebelose Antriebstechnik in der Untertage-Eisenerzmine Malmberget/Schweden 155

D. Aufderheide, A. Chavan, A. Noe, T. Rosenhövel

KI-gestützte Optimierung des Austragsverhaltens von Becherwerken für alternative Brennstoffe auf Basis von Reinforcement Learning 167

C. Kirschniok

Entwicklung eines neuartigen Becherwerkes zur Vertikalförderung von Schüttgütern mittels Schubkette 183

D. Sopauschke

Dynamische Analyse von Materialverhalten in Schüttgutanwendungen mittels LiDAR-Messtechnik 195

R. W. Heinrich

Simulation von Aufbereitungswerken mit NIAflow® 205

M. Wittje

Ermittlung von Mischkennzahlen durch DEM-Simulationen – Ausblick zur Optimierung von Wärmeströmen bei Schneckenwärmetauschern 223

J. Lukas, T. Plankenbühler, D. Müller

KI-basierte optische Qualitätssicherung von Schüttgütern 233

S. Ruberg

Gyraton® - Präzisionsmischer für große Schüttgut-Chargen, der bei minimaler Motorleistung ideale Mischgütern erzeugt 241

Ankündigung:

30. Fachtagung Schüttgutfördertechnik

17. und 18. September 2026

Technische Universität München

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Kollaborative autonome Bauroboter: Ein Konzept zu Schüttguttransport und Verdichtung auf der Baustelle

Yuan-Jen Huang

Daniel Vidal Soroa

Lukas Oehler

Charlotte Haid

Robin Dietrich

Johannes Fottner



Yuan-Jen Huang, M. Sc. (Referentin)

Technische Universität München

Boltzmannstraße 15

85748 Garching bei München

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch das TUM Georg Nemetschek Institute Artificial Intelligence for the Built World unterstützt.

Kollaborative autonome Bauroboter: Ein Konzept zu Schüttguttransport und Verdichtung auf der Baustelle

Die Bauindustrie steht vor erheblichen Herausforderungen, darunter ein anhaltender Fachkräftemangel, steigende Kosten und eine begrenzte Digitalisierung. Während die Automatisierung industrielle Produktionsprozesse bereits transformiert hat, erschwert die unstrukturierte und dynamische Natur von Baustellen deren direkte Automatisierung. Anstelle von vollständiger Autonomie untersucht diese Arbeit den Übergang zu einer semi-autonomen Baustelle, in der menschliche Bediener und autonome Roboter kooperieren. Anhand eines konkreten Systemkonzepts mit einem autonomen Dumper und einer Rüttelplatte zeigen wir mögliche Wege auf, wie Baustellen in der Zukunft inkrementell und mit stetiger Inbezugnahme des Menschen autonomisiert werden können (Bild 1).



Bild 1: Kollaborative Bauroboter: Ein Konzept zu Schüttguttransport und Verdichtung auf der Baustelle (Symbolbild)

1 Einleitung

Die Baubranche befindet sich im Wandel. Getrieben durch den weltweit steigenden Infrastrukturbedarf und die zunehmende Urbanisierung, wächst die Nachfrage nach Bauleistungen kontinuierlich [1, 2]. Trotz ihrer wirtschaftlichen Bedeutung – über 13 % des globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP) entfallen auf den Bausektor – wird die Branche seit Jahrzehnten durch grundlegende, branchenweite Herausforderungen gebremst [1]. Die starke Abhängigkeit von manueller Arbeit, verbunden mit einem Fachkräftemangel und ineffizienten Abläufen, beeinträchtigt die Produktivität erheblich und führt häufig zu Projektverzögerungen und Kostenüberschreitungen [1, 3]. So stagniert die Produktivität seit Jahren mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von lediglich 1 % [1]. Zudem gehört die Bauwirtschaft weltweit zu den gesundheitsschädlichsten Branchen, mit einem überproportional hohen Anteil an Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten [3, 4]. Diese miteinander verknüpften Herausforderungen unterstreichen den dringenden Bedarf an innovativen technologischen Lösungen.

Automatisierung und Robotik bieten ein großes Potenzial, um diesen Problemen zu begegnen, insbesondere mit Blick auf Arbeitssicherheit, Effizienz und Produktivität [3, 5, 6]. Die direkte Übertragung von Automatisierungskonzepten aus der industriellen Fertigung in den Baubereich ist jedoch nur begrenzt möglich [4, 5]. Baustellen sind im Gegensatz zu

Fertigungsanlagen dynamisch, unstrukturiert und schwer vorhersehbar. Die Prozesse sind stark kontextabhängig und erfordern häufig die Echtzeit-Koordination verschiedener Systeme [7]. Zwar wurden bereits verschiedene Bauroboter für spezifische Aufgaben entwickelt, doch sind diese derzeit noch nicht leistungsfähig genug für einen effizienten, autonomen Betrieb ohne menschliche Unterstützung und einen breiten Einsatz [3, 6]. Statt eine vollständige Autonomie zu verfolgen – was langfristig ein Ziel bleibt – bietet die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) einen praktikablen und kurzfristig umsetzbaren Ansatz [3, 6].

MRK vereint die komplementären Stärken von Menschen und Robotern. Ziel ist es, die Flexibilität und das Vermögen, Situationen zu verstehen, robotischer Anwendungen zu verbessern, indem menschliche Fähigkeiten wie intuitive Entscheidungsfindung, Reaktionsvermögen und Anpassungsfähigkeit integriert werden [6]. Die Aufgabenverteilung erfolgt dabei arbeitsteilig: Menschen übernehmen zunehmend übergeordnete Rollen in Planung, Qualitätskontrolle und Entscheidungsprozessen, während Roboter sich auf physisch anstrengende, repetitive und präzise Aufgaben konzentrieren [3, 5]. Ein zentrales Ziel von MRK ist die Erhöhung der Arbeitssicherheit. Indem Roboter gefährliche oder dauerhaft belastende Tätigkeiten übernehmen, sinkt das Risiko für Unfälle und langfristige gesundheitliche Beeinträchtigungen von Menschen [3, 4, 5]. Darüber hinaus bieten Roboter eine Antwort auf den Arbeitskräftemangel, indem sie Teilprozesse übernehmen [3, 5].

Zur praktischen Erprobung von MRK auf der Baustelle fokussiert sich diese Arbeit auf eine grundlegende Aufgabe: den Transport und die Verdichtung von Schüttgut. Der Umgang mit Materialien wie Kies oder Erde stellt ein ideales Versuchsfeld für kollaborative Systeme dar. Diese Aufgaben sind stark repetitiv und körperlich belastend; sie erfordern eine gleichbleibende Ausführung, jedoch kein komplexes, kreatives Problemlösen. Dadurch eignen sie sich besonders gut als Einstiegspunkt für den Einsatz kollaborativer Roboter-Systeme in realen Baustellen.

Vorgestellt wird ein Konzept als Blaupause für zukünftige Entwicklungen in der kollaborativen Baurobotik, das auf die Gestaltung sicherer, effizienterer und intelligenter Bauprozesse durch die Zusammenarbeit heterogener Agenten abzielt. Im Zentrum steht eine exemplarische Demonstration, in der ein menschlicher Bediener gemeinsam mit einem autonomen Dumper und einer autonomen Rüttelplatte agiert. Diese Konstellation dient als technisches Referenzmodell und beleuchtet zentrale Systemaspekte wie Umgebungswahrnehmung, Kommunikationsstrategien und Flottenmanagement zur Aufgabenkoordination. Durch die kombinierte Betrachtung von einerseits Roboter-Roboter-Kollaboration (RRK) und andererseits MRK in einer geteilten Baustellenumgebung formuliert diese Arbeit einen visionären Ansatz. Ziel ist es, die Lücke zwischen traditionellen, manuellen Prozessen und zukünftigen, vollständig autonomen Bauabläufen zu überbrücken.

2 Stand der Forschung

2.1 Automatisierung von Baumaschinen

Die Automatisierung von Baumaschinen hat sich als vielversprechender Ansatz zur Bewältigung der anhaltenden Herausforderungen in den Bereichen Produktivität, Effizienz und Sicherheit im Bausektor herausgestellt. Eine aktuelle Umfrage von Porsche Consulting ergab, dass 80 % der Branchenexpert:innen erwarten, dass vernetzte und autonome Maschinen die Effizienz auf Baustellen um 10–20 % steigern werden [2]. Entsprechend investieren Industrie und Forschungseinrichtungen zunehmend in die Entwicklung autonomer und semi-autonomer Baumaschinen, wobei der Schwerpunkt derzeit auf der Automatisierung einzelner Aufgaben liegt – mit ersten funktionsfähigen Prototypen und kommerziellen Anwendungen als Ergebnis.

Ein zentraler Forschungsschwerpunkt liegt dabei auf autonomen Baggern, die komplexe Erdbewegungs- und Materialumschlagprozesse nachbilden sollen. Neuere Studien kombinieren optimierungsbasierte Bewegungsplanung mit lern-basierten Ansätzen, um menschliche Strategien nachzuahmen und gleichzeitig Leistung und Anpassungsfähigkeit zu verbessern [8, 9,]. Sicherheitsfunktionen wie Selbst-Kollisionsvermeidung, vordefinierte Sicherheitszonen und Objekterkennung gewährleisten dabei einen zuverlässigen Betrieb in dynamischen Umgebungen. Anwendungsbereiche umfassen das Ausheben von Gräben und das Beladen mit Materialien [8, 9].

Auch nachgerüstete Muldenkipper zeigen aussichtsreiche Ergebnisse. Diese Systeme übernehmen automatisiert Lenkung, Beschleunigung und Bremsvorgänge und nutzen 3D-LiDAR zur Hinderniserkennung sowie Algorithmen zur Pfadverfolgung [10].

Radlader, die typischerweise für kurze Ladevorgänge eingesetzt werden, können ebenfalls automatisiert werden, um Material zwischen Haufwerken und Muldenkippern zu bewegen. Auf Reinforcement Learning basierende Steuerungen unterteilen die Aufgabe in Teilaufgaben und führen zu einer gesteigerten Ausführungsgenauigkeit und Effizienz [11]. Vergleichende Untersuchungen mit manuell gesteuerten Maschinen berücksichtigen Bewertungskriterien wie Schaufelfüllrate, Kraftstoffverbrauch und Arbeitsdauer [12]. Eine weitere Innovation ist das autonome Betriebssystem von Liebherr für Radlader. Es führt wiederkehrende Ladevorgänge ohne menschlichen Eingriff durch [13, 14]. Das System nutzt 3D-Umfeldwahrnehmung zur dynamischen Anpassung an Innen- oder Untertagebereiche und ist darauf ausgelegt, Verschleiß und Kraftstoffverbrauch zu minimieren, was betriebliche Vorteile bietet [14].

Insgesamt zeigen diese Technologien hohe Leistungen bei der Automatisierung einzelner Aufgaben, arbeiten jedoch meist isoliert. Solche Automatisierungsinselformen sind weder auf die Interaktion mit anderen autonomen Maschinen noch mit menschlichen Akteuren ausgelegt – häufig erfordern sie sogar den Ausschluss menschlicher Präsenz im Arbeitsbereich [15]. Für eine Umsetzung in kollaborativen, vielschichtigen Baustellenabläufen sind daher gezielte Fortschritte in der RRK und MRK erforderlich. Die folgenden Abschnitte gehen näher auf diese Aspekte ein.

2.2 Kollaborative Robotik in unstrukturierten Umgebungen

Mit zunehmender Komplexität und Skalierung von Bauaufgaben gewinnen Multi-Roboter-Systeme gegenüber Einzelrobotern zunehmend an Bedeutung, insbesondere in dynamischen, unstrukturierten Umgebungen. Solche Systeme bieten zahlreiche Vorteile: Sie bewältigen Aufgaben, die die Fähigkeiten einzelner Roboter übersteigen, verbessern die Flexibilität und ermöglichen eine effizientere Arbeitsverteilung [16, 17, 18].

Besonders vielversprechend sind heterogene Roboterteams, bei denen unterschiedliche robotische Fähigkeiten kombiniert werden, um eine höhere Leistungsfähigkeit, größere räumliche Abdeckung, effizientere Energienutzung und eine verbesserte Datenfusion zu erreichen [17, 18]. Ein Beispiel dafür ist ein Luft-Boden-Roboterteam, das gemeinsam Ziegel lokalisiert, transportiert und zu einer Wand zusammensetzt [18].

Um diese Potenziale auszuschöpfen, sind effektive Koordinationsstrategien entscheidend. Dazu gehören die Modellierung von Aktivitätsdynamik, ausgewogene Arbeitsverteilung und direkte Kommunikationsprotokolle [17, 18]. Ergänzend kommen digitale Zwillinge sowie Building Information Modeling (BIM) zum Einsatz, um Planung in Multi-Agenten-Systemen, Simulation, und Echtzeit-Koordination zu unterstützen [5, 6].

Neben der RRK spielt auch die MRK eine zentrale Rolle für die praktische Umsetzung. Bauaufgaben lassen sich nur selten vollständig automatisieren – es bedarf daher Systeme, die eine dynamische Zusammenarbeit zwischen Menschen und autonomen Agenten ermöglichen. Eine für den Bausektor angepasste Taxonomie mit sechs Autonomiestufen (Levels of Autonomy, LoA) beschreibt diese Zusammenarbeit [3]. Sie reicht von vollständig manueller Operation (LoA 1) bis hin zur vollständigen Autonomie (LoA 6), mit Zwischenstufen wie Pre-Programming (LoA 2), adaptiver Manipulation (LoA 3), Imitationslernen (LoA 4) und improvisierender Steuerung (LoA 5). Jede Stufe repräsentiert eine spezifische Verteilung von Planung, Wahrnehmung und Entscheidungsfindung zwischen Menschen und Maschinen.

Auch die Mensch-Roboter-Interaktion wird durch verschiedene Rollen bestimmt: Operatoren steuern Roboter direkt per Teleoperation oder intuitiver Schnittstellen wie Gesten- oder Sprachsteuerung. Programmierer definieren Verhaltensweisen mittels BIM oder digitalen Zwillingen. Teamkollegen teilen Arbeitsräume mit Robotern und arbeiten kooperativ an gemeinsamen Aufgaben. In der Rolle der Aufsicht koordinieren Menschen hochautonome Systeme und intervenieren situativ. [3, 6].

Trotz technischer Fortschritte fehlen im Bausektor bislang empirische Studien zur Zusammenarbeit heterogener Mensch-Roboter-Teams. Der folgende Beitrag zeigt das Potenzial solcher Ansätze anhand eines realen Anwendungsfalls zur koordinierten Schüttgutverarbeitung.

3 Anwendungskonzept: Kollaborative Schüttgutverarbeitung

3.1 Technische Einordnung und Aufgabenstellung

Die betrachtete Aufgabe umfasst den Transport und die Verdichtung von Schüttgut in kleinem Maßstab – typische Prozesse bei der Baustellenvorbereitung und im Wegebau. Im konventionellen Ablauf (LoA 1), wie in Bild 2 gezeigt, wird Schüttgut mit einem Dumper transportiert, manuell verteilt und anschließend mit einer von einem Menschen gesteuerten Rüttelplatte verdichtet. Dieser Prozess ist arbeitsintensiv, da er eine Eins-zu-eins-Interaktion zwischen Mensch und Maschine erfordert und gesundheitlich belastend ist durch Lärm, Vibrationen und Staub. Er erfolgt zudem häufig unter variablen Gelände- und Umweltbedingungen, was eine vollständige Automatisierung erschwert.

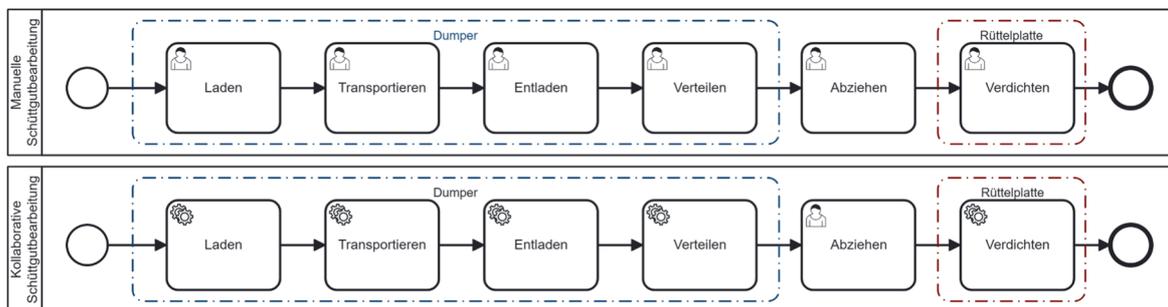


Bild 2: Prozessstruktur im konventionellen und kollaborativen Arbeitsablauf

Das vorgestellte Anwendungskonzept besteht aus einem heterogenen Team: einem menschlichen Bediener, einem autonomen Dumper sowie einer autonomen Rüttelplatte. Ziel ist es, dass der Mensch vorwiegend die übergeordnete Aufgabenkoordination und Systemüberwachung übernimmt und zugleich einzelne Arbeitsschritte unterstützt. Die Roboter führen hingegen die Haupttätigkeiten aus, wie den Schüttguttransport und die Verdichtung. Um dies zu ermöglichen, müssen die Roboter nicht nur einzelne Befehle ausführen, sondern auch in der Lage sein, ihre Umgebung zu erfassen, zu interpretieren und darauf situationsangepasst zu reagieren. Dafür verfügen sie über multimodale Sensorik zur Umgebungswahrnehmung und Statusrückmeldung, die Echtzeitlokalisierung, agentenbezogene Situationsanalyse und den Zugriff auf gemeinsame digitale Informationen zur Koordination und Zielsetzung ermöglichen. Die angestrebte Autonomiestufe variiert je nach Aufgabe – abhängig vom Entwicklungsstand der Systeme und dem jeweiligen Umfeld – und reicht von vorgegebenen Abläufen (Pre-Programming, LoA 2) bis hin zu adaptiven (LoA 3) und improvisierenden (LoA 5) Strategien, da nicht jede Aufgabe volle Autonomie oder Interaktion erfordert.

3.2 Analyse des Arbeitsablaufs

Der kollaborative Arbeitsablauf automatisiert zentrale Teilprozesse der Schüttgutverarbeitung: Beladung, Transport, Entladung, Verteilung und Verdichtung. Die konkrete Ausgestaltung zeigt die potenziellen Fähigkeiten der beteiligten Roboter, die unterschiedlichen Autonomiestufen zugeordnet sind. Dadurch kann eine einzige Person mehrere Roboter parallel überwachen und koordinieren.

Während der Dumper selbstständig zyklisch arbeitet, erfolgen das Abziehen des Materials durch den Menschen und die Verdichtung durch die Rüttelplatte gleichzeitig. So entsteht ein koordinierter und kontinuierlicher Ablauf, wie in Bild 2 dargestellt. Im Vergleich zum konventionellen Vorgehen, das für einen durchgehenden Materialfluss mindestens drei Arbeitskräfte erfordert, ermöglicht der vorgeschlagene Ansatz eine effizientere und personalreduzierte Ausführung bei gleichbleibendem Prozess.

Im Folgenden sind exemplarische Autonomiestufen für die Teilprozesse aufgeführt:

Beladung und Entladung mit dem Dumper:

- Pre-Programming (LoA 2): Ausführung an vordefinierten Wegpunkten
- Improvisierende Steuerung (LoA 5): Nutzung visueller Rückmeldungen in Echtzeit zur Erkennung von Füllständen

Transport mit dem Dumper:

- Pre-Programming (LoA 2): Punkt-zu-Punkt-Fahrten entlang linearer Pfade
- Adaptive Manipulation (LoA 3): Anpassung der Route mithilfe von Sensoren zur Umgehung von Hindernissen
- Imitationslernen (LoA 4): Erlernen von Fahrtrajektorien durch Nachverfolgung menschlicher Bewegungen für eine intuitivere Navigation

Materialverteilung:

- Imitationslernen (LoA 4): Ableitung von Verteilstrategien aus menschlichen Demonstrationen, unter Berücksichtigung von Bodenunebenheiten

Verdichtung mit Rüttelplatte:

- Pre-Programming (LoA 2): Verfolgen einer vorgegebenen, GNSS-basierten Trajektorie
- Improvisierende Steuerung (LoA 5): Eigenständige Planung der Verdichtung mit menschlicher Überwachung über eine Benutzeroberfläche

Die Koordination zwischen den Agenten erfolgt durch eine Kombination unterschiedlicher Autonomiestufen. So kann z. B. der Dumper (LoA 4) bei der initialen Pfaderstellung durch Gesten eines Menschen trainiert werden. Im späteren Betrieb passt er seine Route, basierend auf der Position der Rüttelplatte (LoA 2), an, um synchronisierte Materialentladung zu ermöglichen. Die RRK und MRK erfolgen somit nicht separat, sondern werden dynamisch miteinander verknüpft.

Dieser Anwendungsfall zeigt exemplarisch, wie durch abgestufte Autonomiefähigkeiten und klar verteilte Zuständigkeiten eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter möglich wird. Die Effizienz wird gesteigert, die Wiederholbarkeit verbessert und das Risiko für menschliche Akteure reduziert. Die konzeptionelle Umsetzung dient als Grundlage für die in den folgenden Abschnitten dargestellte Systemübersicht und Methodik.

4 Systemübersicht

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Systemarchitektur für den vorgesehenen Anwendungsfall. Das Roboter-Team besteht aus einem autonomen Dumper und einer Rüttelplatte. Die spezifischen Konfigurationen, Fähigkeiten und die Integration der Maschinen ins System werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.1 Autonomer Schüttguttransport

Der autonome Dumper basiert auf dem Wacker Neuson DT10e, einem elektrisch angetriebenen Raupendumper mit einer Nutzlast von 1 t und einer Höchstgeschwindigkeit von 1,11 m/s. Er wird von zwei 2-kW-Motoren angetrieben, die jeweils eine Raupe antreiben. Ein speziell entwickelter Schaltschrank ermöglicht den autonomen Betrieb des Dumpers und besitzt einen NVIDIA Jetson als Hauptbordcomputer. Dieser Computer ist für die Schnittstelle zu allen Bordsensoren, die Verarbeitung ihrer Daten, die Ausführung von Steuerungsalgorithmen und die Erzeugung von Geschwindigkeits- und anderen Befehlen verantwortlich.

1. Kippanhänger (Skip)
2. Ladeeinheit (Schaufel)
3. Ketten
4. Steuereinheit
5. Tiefenkamera ZED2
6. GNSS U-blox Antenne
7. IMS360 Neigungssensor
8. Bosh Ultraschallsensor

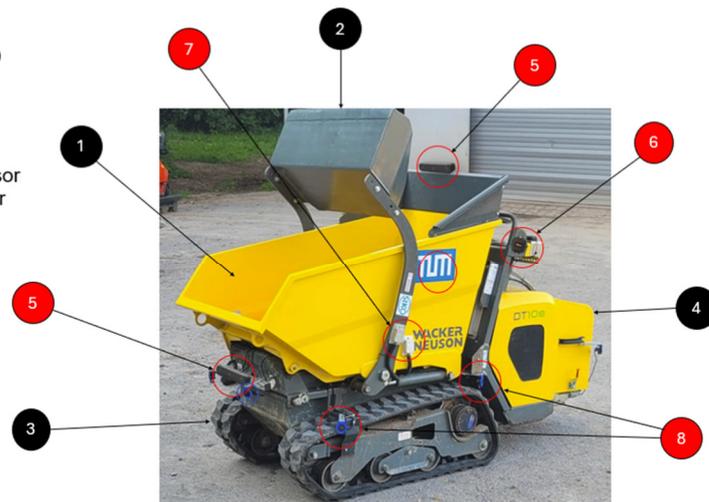


Bild 3: Skizze des autonomen Dumpers DT10e

Der Dumper ist mit einer Reihe von Sensoren ausgestattet, die Echtzeitinformationen für die autonome Navigation und Umgebungswahrnehmung liefern. Dazu gehören drei Neigungssensoren zur Messung der Neigungs- und Rollwinkel von Schaufel, Mulde und Fahrgestell mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ$. Zur Hinderniserkennung ist der Dumper mit acht Ultraschallsensoren von Bosch ausgestattet. Diese Sensoren haben einen Erfassungsbereich von 0,15 m bis 5,5 m und eine Genauigkeit von 0,02 m im Nahbereich.

Zur Lokalisierung ist der Dumper mit zwei Echtzeit-GNSS-Sensoren der Firma U-blox ausgestattet, die eine Genauigkeit im Zentimeterbereich bieten. Zusätzlich sorgen zwei ZED 2-Tiefenkameras für eine Echtzeit-3D-Wahrnehmung: Eine ist über dem Schaufelbehälter angebracht, um eine erhöhte Sicht auf den Arbeitsbereich zu bieten und den Füllstand des Schaufelbehälters zu überwachen, während die zweite an der Vorderseite des Fahrzeugs platziert ist, um die Umgebung vor dem Fahrzeug zu beobachten und den Füllstand der Schaufel zu scannen. Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Sensoren und Teile sind in Bild 3 zu sehen.

4.2 Rüttelplatte

Die in dieser Studie verwendete Rüttelplatte ist die Wacker Neuson DPU 110r, eine leistungsstarke Bodenverdichtungsmaschine, die durch Vibration die Porenräume reduziert und so die Tragfähigkeit des Bodens verbessert. Die Vibrationsplatte wird kinematisch als Raupenfahrzeug beschrieben, wobei die interne Antriebsmechanik mit Motoren und Unwuchtmassen vereinfacht dargestellt wird.

Um einen semi-autonomen Betrieb der Rüttelplatte zu ermöglichen, wurde eine spezielle Hardware-Konfiguration für die Autonomie implementiert, dargestellt in Bild 4.

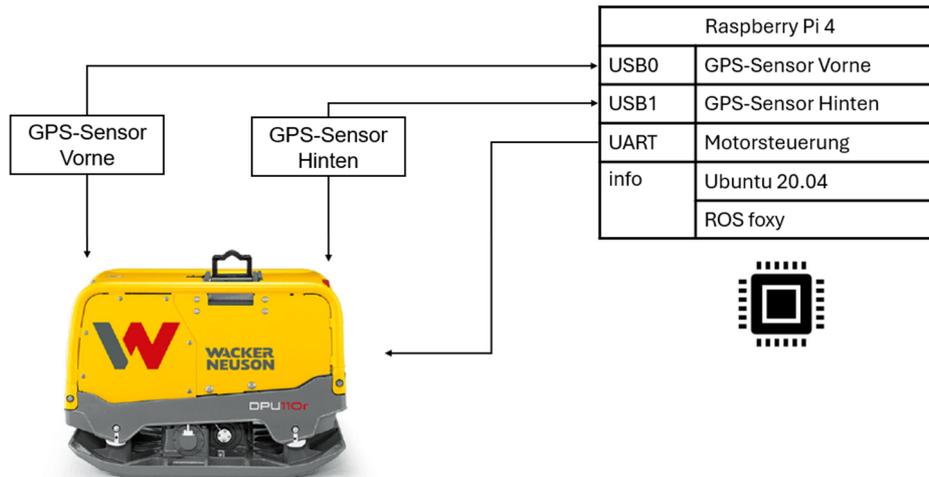


Bild 4: Rüttelplatte DPU110r

Die Verarbeitungseinheit ist ein Raspberry Pi 4, der für die Verarbeitung der Motorsignale zuständig ist. Die Kernsteuerung ermöglicht es dem System, Aktuierungsbefehle an die virtuellen linken und rechten Ketten der Verdichtungsmaschine zu übertragen [19]. Diese Abstraktion ermöglicht es dem Steuerungssystem, Navigationsziele in präzise Motorbefehle umzusetzen, wodurch ein semi-autonomer Betrieb der Vibrationsplatte innerhalb eines definierten Arbeitsbereichs möglich ist.

Zur Lokalisierung integriert das System zwei GNSS-Sensoren, von denen einer vorne und einer hinten an der Maschine angebracht ist, die die Positionierungsgenauigkeiten im Zentimeterbereich gewährleisten. Deswegen sind weitere Sensoren notwendig, um die Umgebungswahrnehmung und Autonomie zu verbessern.

5 Methodik

5.1 Versuchsaufbau und Testumgebung

Das Ziel der Studie besteht darin, die Wirksamkeit und Eignung von MRK mit mobilen Robotern im Bausektor zu bewerten. Für das Szenario des Schüttguttransports und der Verdichtung in kleinem Maßstab wird ein System in zwei Schritten mit jeweils unterschiedlichen Autonomiestufen entwickelt (Bild 5). Diese werden mit dem traditionellen, manuellen Arbeitsablauf verglichen, wobei die Fertigstellungszeit, die durchschnittliche Anzahl der erforderlichen menschlichen Eingriffe und der daraus resultierende Maschinenstillstand als Kriterien herangezogen werden. Auch wenn dieser Anwendungsfall nur einen kleinen Bereich des Bauwesens abdeckt, lässt sich der vorgeschlagene Ansatz einfach erweitern und an andere Szenarien anpassen.

Das System wird in einer Simulationsumgebung sowie auf einem Testgelände des Lehrstuhls, das einer herkömmlichen Baustelle ähnelt, getestet. Mithilfe der Simulation werden die Effektivität des Systems unter idealen Bedingungen, die Durchführbarkeit von Aufgaben und die benötigte Berechnungskomplexität überprüft. Die Tests auf der Baustelle untersuchen die Widerstandsfähigkeit des Systems gegenüber verrauschten Sensoren, ungenauen Aktoren mit Latenzzeiten und Umgebungsvariabilität.

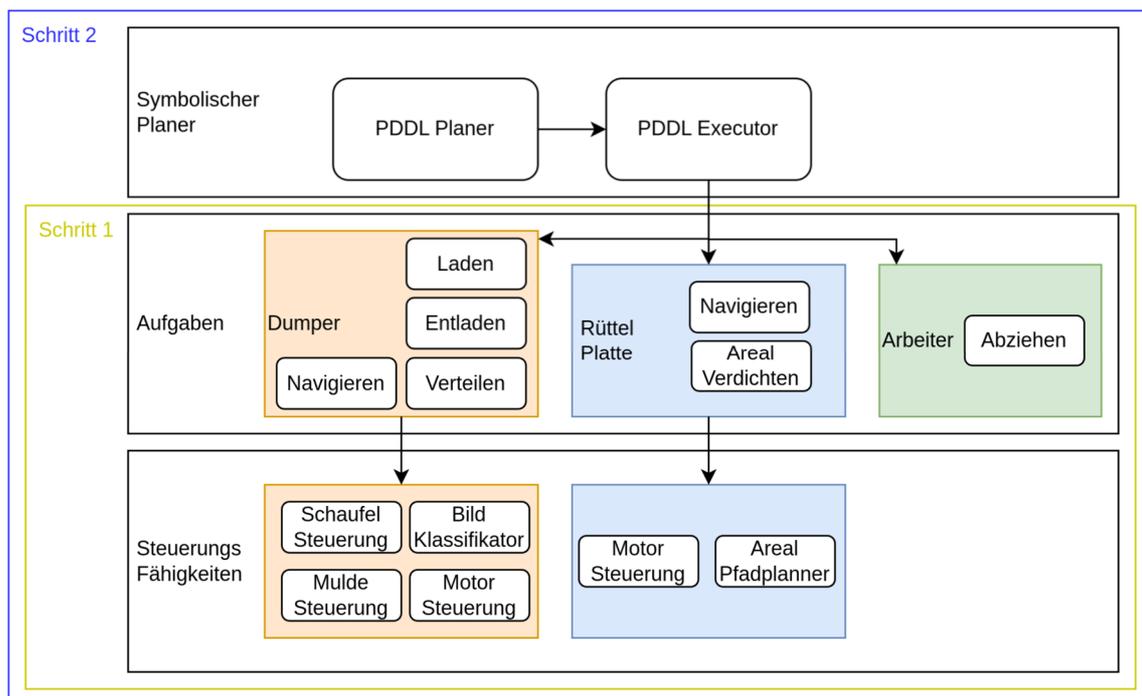


Bild 5: Komponenten des vorgeschlagenen Systems mit drei Deliberationschichten

5.2 Fuhrparkverwaltung

Der erste Schritt zielt darauf ab, ein System mit einer Autonomiestufe der adaptiven Manipulation (LoA 3) zu schaffen. Die Ansteuerung der Aktoren wird mit Hilfe von Verhaltensbäumen zu Aufgaben abstrahiert. Diese Verhaltensbäume beschreiben übersichtlich die Logik einer Aufgabe, indem sie Bedingungen mit Aktionen verknüpfen.

Die Aktionen beinhalten typischerweise die Manipulation von Aktoren. Eine Aufgabe als Verhaltensbaum ist beispielsweise die autonome Ladefunktion für den Dumper. Mit den benötigten Aufgaben beschrieben, ist der Arbeiter in diesem Schritt dafür verantwortlich, sich um die Planung und Orchestrierung der verfügbaren Maschinen zu kümmern, indem er die verfügbaren Aufgaben befiehlt, ohne die zugrunde liegende Implementierung berücksichtigen zu müssen.

Der zweite Schritt baut auf dem ersten auf, indem er diesen um einen symbolischen Planer erweitert und die Autonomiestufe auf eine improvisierende Steuerung (LoA 5) erhöht. Dieser Planer wird als oberste Steuerebene implementiert und zielt darauf ab, die Planungs- und Orchestrierungsaspekte des ersten Ansatzes zu automatisieren. Der Planner unterscheidet nicht zwischen der zugrunde liegenden Hardware, sondern nach den Aufgaben, die die Maschinen ausführen können. Dafür werden eine Domänenbeschreibung, die Baustelleneigenschaften und die Maschinenfähigkeiten in der Planning Domain Definition Language (PDDL) definiert. Mit der Problembeschreibung und einer Zielbedingung kann nach der Lösung des gegebenen Planungsproblems gesucht werden. Ein gültiger Plan wird anschließend einem Plan-Executor übergeben. Dieser löst entweder bestimmte Maschinenaufgaben direkt aus oder bittet den Arbeiter, Aufgaben durchzuführen, die die Maschinen nicht ausführen können. Dabei werden Arbeiter oder Maschinen jeweils nur zu einer Aufgabe gleichzeitig aufgefordert, während der Plan-Executor sicherstellt, dass sich keine zwei Einheiten zur gleichen Zeit am gleichen Ort befinden. Eine Aufgabe gilt als erfolgreich, wenn entweder der entsprechende Verhaltensbaum erfolgreich abschließt oder wenn der Mensch die Aufgabe als abgeschlossen bestätigt. Wenn Aktionen fehlschlagen, versucht das System eine Neuplanung. Wenn keine brauchbare Lösung für das Planungsproblem gefunden werden kann, wird das System angehalten. Der Arbeiter ist in dem vollständigen System verantwortlich für die Durchführung und Bestätigung von Aktionen, die die Maschinen nicht durchführen können, ebenso wie für die Überwachung des Systems.

Dieses System wird eine zentralisierte Steuerungsarchitektur haben. Ein Server vor Ort wird als zentraler Knotenpunkt dienen, der langfristige Pläne berechnet, Wege findet, eine geteilte Karte verwaltet und maschinenunabhängige Informationen bereitstellt. Die Aktionen selbst werden auf lokalen Mikrocontrollern der Maschinen ausgeführt, um die Latenzzeit zu minimieren. Mithilfe ihrer Sensoren werden die Maschinen Informationen über angetroffene dynamische Hindernisse dem Server bereitstellen. Eine Verbindung zum Server ermöglicht es dem Arbeiter, den Prozess zu überwachen, Aktionen zu bestätigen und die Zustände der angeschlossenen Maschinen zu überprüfen.

6 Diskussion

Anstelle auf Automatisierungsinself einzelner Roboter zielt die vorgestellte Systemarchitektur darauf ab, mehrere (teil-)autonome Bauroboter innerhalb eines Arbeitsablaufes zusammenarbeiten zu lassen. Die zugrunde liegende technische Struktur legt die Basis für roboterübergreifende Koordination durch eine höhere Systemautonomie. Der generische PDDL-Planer generiert Aufgabensequenzen für das Multi-Robotersystem und kann dabei komplexe, definierte Einschränkungen berücksichtigen. Er übernimmt

dadurch Aspekte eines Flottenmanagers. Zwar wurde im aktuellen Fall von jeweils einem Roboter pro Typ ausgegangen, der Planer lässt sich aber perspektivisch um eine Aufgabenauktion erweitern, um bei mehreren homogenen Robotern eine optimierte Zuweisung zu ermöglichen. Die beteiligten Roboter haben die Aufgaben in Form von Verhaltensbäumen abstrakt definiert, da diese Bäume Reaktivität und Anpassungsfähigkeit bei der Ausführung komplexer Aufträge gewährleisten und gleichzeitig die zugrunde liegende Hardware übersichtlich abstrahieren, was die Modularität und Wiederverwendbarkeit erhöht. Die zentralisierte Steuerungsarchitektur ermöglicht die durchgehende Systemüberwachung und entlastet die Roboter durch die Auslagerung rechenintensiver Planungsprozesse. Eine zentrale Herausforderung bleibt die Übertragung des Konzepts auf reale, komplexe Baustellen. Zukünftige Forschung sollte sich daher auf dynamische Priorisierung, situationsabhängige Aufgabenverteilung und robuste Koordinationsstrategien zur Generierung optimierter Aufgabensequenzen in gemischt-autonomen Systemen konzentrieren.

Zusammenfassung

Diese Arbeit präsentiert ein exemplarisches Konzept zur Mensch-Roboter-Kollaboration im Kontext von Schüttguttransport und -verdichtung. Ziel war es, ein skalierbares Systemdesign eines heterogenen Teams aufzuzeigen, das unterschiedliche Autonomiestufen von Robotern mit menschlicher Aufsicht vereint. Anhand des entwickelten Szenarios wurde demonstriert, wie aufgabenspezifische Fähigkeiten durch Verhaltensbäume modelliert und in einem Flottenmanagementsystem orchestriert werden können. Die vorgestellte Konzeption verdeutlicht, wie autonome Prozesse schrittweise in reale Baustellen integriert werden können und eröffnet damit einen vielversprechenden Weg für die zukünftige Forschung.

Mit Blick auf die Zukunft liegt der Schwerpunkt zunächst auf der praktischen Umsetzung und Validierung des vorgestellten zentralisierten Ansatzes unter realen Baustellenbedingungen. Ziele sind die prototypische Realisierung der Systemarchitektur, die empirische Untersuchung der Mensch-Roboter-Interaktion sowie die Evaluation der Flottenkoordination in dynamischen Umgebungen. Langfristig könnten höhere Autonomiegrade und robustere Interaktionsmechanismen den Weg zu flexibleren Systemarchitekturen für großvolumige, repetitive Aufgaben ebnen. Voraussetzung dafür ist eine tiefere Integration digitaler Planungswerkzeuge, semantischer Prozessmodelle und stabiler Kommunikationsinfrastrukturen.

Diese Arbeit legt ein Fundament für den Übergang zu kollaborativen Arbeitsabläufen und verdeutlicht den weiteren Forschungsbedarf im Bereich der Mensch-Roboter-Interaktion, der Koordination heterogener Systeme und der Übertragbarkeit auf weitere Bauprozesse.

Quellenverzeichnis:

- [1] McKinsey & Company: The Next Normal in Construction – How Disruption Is Reshaping the World’s Largest Ecosystem [online]. Herausgegeben von M. J. Ribeirinho, J. Mischke, G. Strube, E. Sjödin, J. L. Blanco, R. Palter, J. Biörck, D. Rockhill und T. Andersson. 2020 [Zugriff am: 17. Januar 2025]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com>
- [2] Dolny, O. R.; Remmers, C.; Michels, T.: The Future of Construction Machinery Manufacturers – Eco-System with a New Perspective [online]. 2020 [Zugriff am: 17. Januar 2025]. Verfügbar unter: <https://www.porsche-consulting.com>
- [3] Liang, C.; Wang, X.; Kamat, V. R.; Menassa, C. C.: Human–Robot Collaboration in Construction: Classification and Research Trends; *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(10), 2021
- [4] Sun, Y.; Jeelani, I.; Gheisari, M.: Safe Human–Robot Collaboration in Construction: A Conceptual Perspective; *Journal of Safety Research*, 86, 2023; S. 39–51
- [5] Wei, H.; Zhang, Y.; Sun, X.; Chen, J.; Li, S.: Intelligent Robots and Human–Robot Collaboration in the Construction Industry: A Review; *Journal of Intelligent Construction*, 1(1), 2023; Art. 9180002
- [6] Zhang, M.; Xu, R.; Wu, H.; Pan, J.; Luo, X.: Human–Robot Collaboration for On-Site Construction. *Automation in Construction*, 150, 2023; Art. 104812
- [7] Melenbrink, N.; Werfel, J.; Menges, A.: On-site Autonomous Construction Robots: Towards Unsupervised Building; *Automation in Construction*, 119, 2020; Art. 103312
- [8] Jud, D.; Kerschler, S.; Wermelinger, M.; Jelavic, E.; Egli, P.; Leemann, P.; Hottiger, G.; Hutter, M.: HEAP – The Autonomous Walking Excavator; *Automation in Construction*, 129, 2021; Art. 103783
- [9] Zhang, L.; Zhao, J.; Long, P.; Wang, L.; Qian, L.; Lu, F.; Song, X.; Manocha, D.: An Autonomous Excavator System for Material Loading Tasks; *Science Robotics*, 6(55), 2021
- [10] Komatsu, T.; Konno, Y.; Kiribayashi, S.; Nagatani, K.; Suzuki, T.; Ohno, K.; Suzuki, T.; Miyamoto, N.; Shibata, Y.; Asano, K.: Autonomous Driving of Six-Wheeled Dump Truck with a Retrofitted Robot; in: Ishigami, G.; Yoshida, K. (Hrsg.): *Springer Proceedings in Advanced Robotics, Field and Service Robotics*, Singapore: Springer Singapore, 2021; S. 59–72
- [11] Borngrund, C.; Bodin, U.; Sandin, F.; Andreasson, H.: Autonomous Navigation of Wheel Loaders Using Task Decomposition and Reinforcement Learning; in: *Proceedings of the 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Auckland, New Zealand, 2023; S. 1–8
- [12] Chen, Y.; Jiang, H.; Shi, G.; Zheng, T.: Research on the Trajectory and Operational Performance of Wheel Loader Automatic Shoveling; *Applied Sciences*, 12(24), 2022; Art. 12919

-
- [13] LIEBHERR INTERNATIONAL AG: Bauma 2025: Liebherr Demonstrates the Future of Construction and Mining with 'Hands on the Future' [online]. März 2025. [Zugriff am: 10. Juni 2025]. Verfügbar unter: <https://www.liebherr.com>
- [14] SOUTHEAST ASIA CONSTRUCTION: Liebherr Autonomous Wheel Loaders [online], 2025. [Zugriff am: 10. Juni 2025]. Verfügbar unter: <https://www.tradelinkmedia.biz/publications/7/news/5806>
- [15] Schöberl, M.; Huber, A.; Kreppold, S.; Dirnaichner, J.; Kessler, S.; Fottner, J.: Cobot Uptake in Construction: Embedding Collaborative Robots in Digital Construction Processes; *Construction Robotics*, 7(1), 2023; S. 89–103
- [16] Asani, Z.; Ambrosino, M.; Vanderborght, B.; Garone, E.: Implementation of a Heterogeneous Multi-Robot System for a Construction Task; *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 2023; S. 3373–3378
- [17] Pan, Z.; Yu, Y.: Optimizing Heterogeneous Multi-Robot Team Composition for Long-Horizon Construction Tasks: Time- and Utilization-Guided Simulation; *Automation in Construction*, 165, 2024; Art. 105520
- [18] Krizmancic, M.; Arbanas, B.; Petrovic, T.; Petric, F.; Bogdan, S.: Cooperative Aerial-Ground Multi-Robot System for Automated Construction Tasks; *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 2020; S. 798–805
- [19] Goldfuss, T.: Prototyping Method to Elevate Machines Towards Autonomy Applied on a Compaction Plate (Masterarbeit); Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik – Technische Universität München. München, 2021

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Biomasselogistik: Methoden zur virtuellen Produktentwicklung eines Biomassegreifers

Florian Mattersberger
Alexander Ortner-Pichler
Christian Landschützer



Dipl.-Ing. Florian Mattersberger

Dipl.-Ing. Dr. techn.

Alexander Ortner-Pichler

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Prof. h. c.

Christian Landschützer

TU Graz - Institut für Technische Logistik

Inffeldgasse 25/E

8010 Graz, Österreich

Biomasselogistik: Methoden zur virtuellen Produktentwicklung eines Biomassegreifers

Im Rahmen des Projekts CBE4I wurde ein innovatives Hackgutfördersystem entwickelt, das dazu dient, eine Biomassefeuerung bedarfsorientiert, automatisiert und selektiv mit Biomasse zu versorgen. Ein zentraler Bestandteil dieses Biomassefördersystems ist ein multisensorischer Greifer, der den Endeffektor eines Brückenkrans darstellt und dadurch wichtige Teilfunktionen beim Transport der Biomasse übernimmt. Dieser Beitrag beschreibt eine im Zuge des Entwurfsprozesses des Greifers verwendete Methodik der virtuellen Produktentwicklung, mit der es gelingt, das Systemverhalten des Greifers durch eine dynamische Analyse in einer domänenübergreifenden Co-Simulation darzustellen.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts Clean Bio Energy for Industry (CBE4I) findet sich ein Konsortium, bestehend aus vier wissenschaftlichen Partnern sowie mehreren Industriepartnern (siehe [1]) zusammen, die als gemeinsames Ziel die Entwicklung einer neuartigen, brennstoffflexiblen Biomasse-Aufwindvergasungstechnologie für eine hocheffiziente, emissionsarme Prozesswärmeversorgung in der Industrie verfolgen. Diese Technologie ermöglicht entweder die Bereitstellung von Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus für indirekte Heizprozesse mittels Produktgasverbrennung, die flexibel mit verschiedenen Kesseltypen (Heizwasser-, Thermoöl- und Dampfkesseln) gekoppelt werden kann oder sie liefert Prozesswärme und sauberes Produktgas durch eine integrierte thermische und katalytische Teerreformierung, das direkt in Gasbrennern genutzt werden kann. Dem Verbrennungsprozess wird ein Rauchgaskondensationsystem mit integrierter Wärmepumpe nachgeschaltet, wodurch es gelingt, eine Erhöhung des Wirkungsgrads auf über 120% (bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffs) zu erreichen. Zudem wird ein neues Verfahren zur Kondensataufbereitung die direkte Einleitung in die Kanalisation ermöglichen und es wird ein neuartiges Konzept zur Nutzung von Biomasse-Asche für die Düngemittelproduktion entwickelt. Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung des Gesamtsystems der im Projekt entwickelten Prototypenanlage sowie die Schnittstellen zwischen den einzelnen Systembereichen.

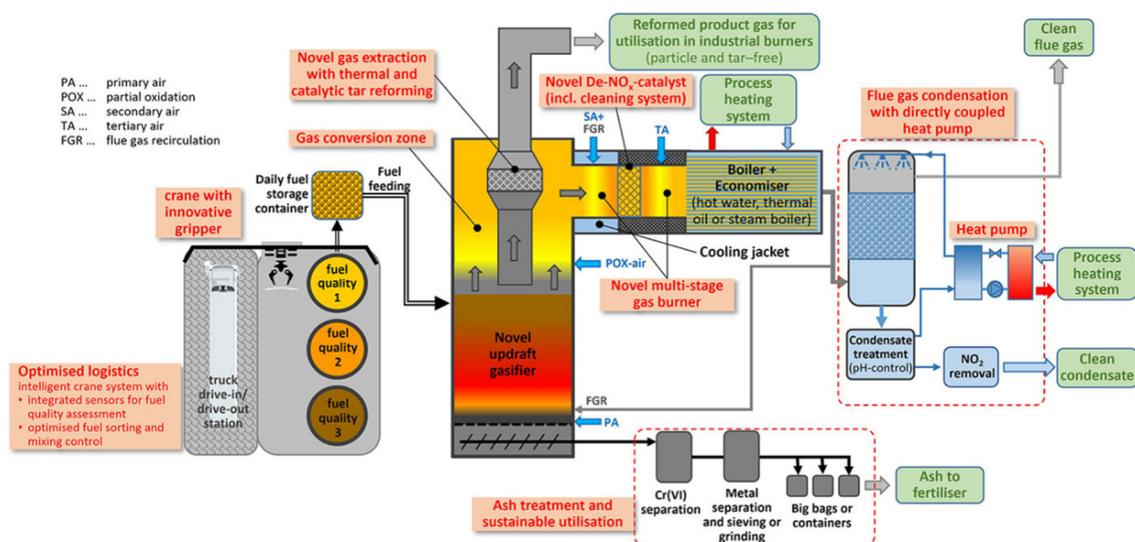


Bild 1: Überblick über das im Rahmen des CBE4I Projekts entwickelte System [1]

Um die Verbrennungsprozesse und den Gesamtwirkungsgrad zu optimieren, ist es notwendig, die Brennkammer mit Brennstoff möglichst gleichbleibender Qualität (d. h. konstanter Asche- und Wassergehalt der Biomasse) zu versorgen. Aufgabe der Autoren ist es, die Versorgung der Anlage mit dem richtigen Kraftstoff, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, in der richtigen Menge und in der richtigen Qualität sicherzustellen [1]. Hierfür wurde ein innovatives Fördersystem entwickelt, das darauf basiert, die Biomasse an der Oberseite des Bunkers zu entnehmen, indem ein Brückenkran mit einem Greifer ausgestattet wird, der über die notwendige Sensorik verfügt, um die Qualität der Hackschnitzel zu erfassen und eine selektive, bedarfsorientierte und automatisierte Beladung zu ermöglichen. Neben klassischen Hackschnitzeln kommen beim CBE4I-System auch typische südeuropäische Biomasse-Reststoffe wie zum Beispiel Schnittabfälle oder Kerne zum Einsatz. Diese Entwicklung stellt eine systematische Weiterentwicklung des 2015 auf der 20. Fachtagung Schüttgutfördertechnik vorgestellten Systems (siehe [2]) dar, das durch eine sensorgeprüfte, unetstetige Zuführung eine bedarfsorientierte Zuförderung von Hackschnitzeln an die Verbrennungsanlage ermöglicht. Das neue System (siehe Bild 2) ist flexibler und agiert unter geänderten Randbedingungen und Zielsetzungen.

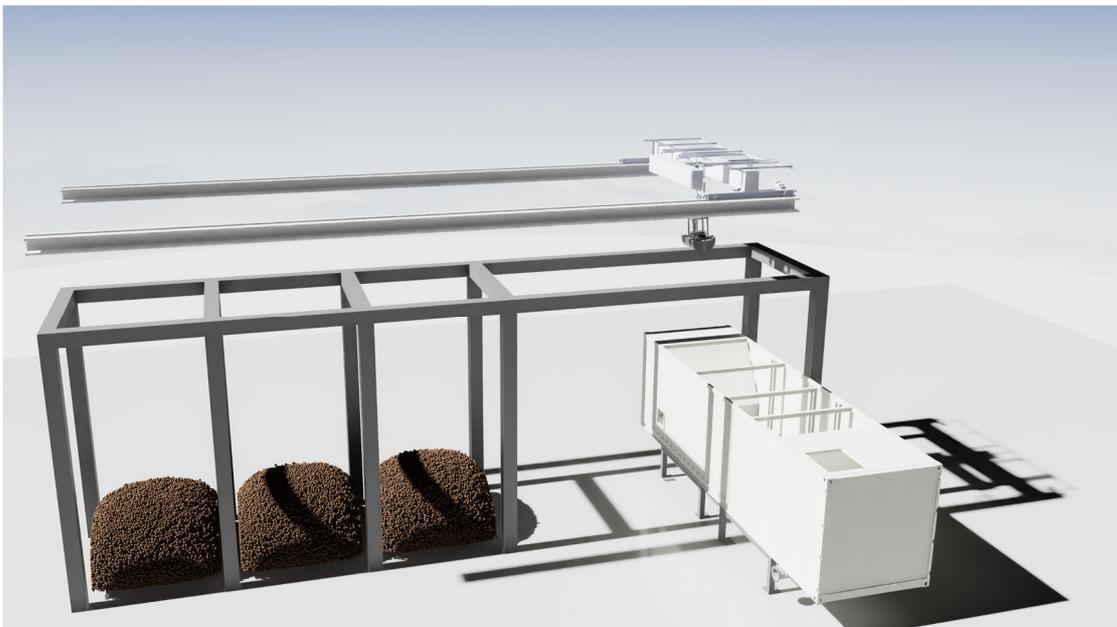


Bild 2: Darstellung des neu entwickelten Fördersystems für Brennstoff [16]

Bei der Entwicklung des Greifers ergibt sich neben der Integration der notwendigen Sensorik und Steuerungstechnik als weitere Herausforderung die Berechnung der benötigten Vorschubkraft der Aktoren der Schaufeln. Da die Eigenschaften der Biomasse stark schwanken und von vielen Parametern abhängig sind, lässt sich die Widerstandskraft der Biomasse während des Greifens nur durch Messungen oder aufwändige numerische Berechnungen ermitteln. Wird auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, ergibt sich in der Regel eine Überdimensionierung der Aktoren, die zu einer starken mechanischen Belastung des Greifers führen kann. Aus den Erfahrungen des Vorgängersystems (siehe [2]) ist bekannt, dass die Aufhängungen der Schaufeln des Greifers die mechanisch stärkste Belastung erfahren. Um eine ausreichende mechanische Festigkeit zu gewährleisten und die Funktion des Greifers zu optimieren, wird das strukturelle Verhalten der Schaufel anhand einer dynamischen FEM-Analyse untersucht. Durch einen multidisziplinären Ansatz wird ein virtueller

Prototyp (exemplarisch siehe auch [3] und [4]) durch eine Kopplung unterschiedlicher Simulationsprogramme und -methoden erstellt und in einer Co-Simulation betrieben. Dadurch gelingt es, das für die Schaufeln gravierendste Überlastszenario, bei dem während des Schließvorgangs die Schaufeln aufgrund eines Fremdkörpers vollständig blockieren, nachzubilden.

Die im Folgenden beschriebenen Inhalte und Ergebnisse wurden zum Teil im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität Graz [5] erarbeitet.

2 Stand der Forschung

Otto et al. führten in ihrer Forschungsarbeit [6] eine gekoppelte MKS-DEM-Simulation zur Formoptimierung der Schalen eines Hackschnitzelgreifers durch und zeigen damit eine Möglichkeit, wie aus Simulationen gewonnene Erkenntnisse genutzt werden können, um die Konstruktion eines Schalengreifers zu verbessern. Die im Zuge der Parametrisierung der DEM-Simulation durchgeführte Analyse der Hackschnitzel zeigt jedoch, dass die sich ergebenden Widerstandskräfte an den Schaufeln je nach Feuchtigkeit, Größe und Anteil von Rinde und Verschmutzungen stark variieren können.

Die Arbeit von [7] zeigt im Kontext von Holzverladesystemen, wie der gesamte Arbeitsprozess einer Maschine, einschließlich ihrer Umgebung, realitätsnah abgebildet werden kann. Durch Mehrkörpersimulationen können dabei die dynamischen Belastungen, denen die Maschine ausgesetzt ist, präzise berechnet werden. Die ermittelten Belastungen stellen die Eingangsgrößen für Finite-Elemente-Analysen dar, auf deren Basis die strukturellen Eigenschaften der Maschine bewertet und potenzielle Schwachstellen frühzeitig erkannt werden können. Eine Kopplung der Bereiche (Mehrkörperdynamik und Strukturmechanik) bzw. eine Integration der Aktorik in Form einer Systemsimulation ist in dieser Arbeit jedoch nicht Bestandteil.

In [8] hingegen liegt der Fokus in der Optimierung eines Fahrwerksprüfstands, zu einem Zeitpunkt, an dem die Konstruktion noch nicht abgeschlossen war. Zusätzlich wurde die Simulationsumgebung so eingerichtet, dass sie zur Vorbereitung realer Tests auf dem Prüfstand verwendet werden kann. Das vorgestellte Modell enthält sowohl die geometrischen Konfigurationen als auch die Hydraulik und die Steuerung des Systems.

Die Forschungsarbeit in [9] zeigt anhand zweier Beispiele (elektronischer Fensterheber und Gleichstromstellantrieb), wie die Systemsimulation mechatronischer Systeme angewendet werden kann, um vor allem in frühen Entwicklungsphasen wichtige Informationen für Designentscheidungen zu liefern.

Der derzeitige Stand der Forschung belegt, dass im Allgemeinen eine ganzheitliche digitale Abbildung von Systemen realisierbar ist und auch dazu beiträgt, den Produktentwicklungsprozess von Systemen effizienter zu gestalten, es jedoch speziell für den Anwendungsfall Schalengreifer noch Lücken gibt. Es mangelt insbesondere an Modellen, die das Systemverhalten erfassen und dabei sowohl die verwendete Aktorik als auch die dynamischen Eigenschaften und Bauteilelastizitäten berücksichtigen.

3 Entwicklung des virtuellen Prototyps

Zur Verkürzung der Entwicklungsdauer und um potentielle Entwicklungsfehler frühzeitig aufzudecken und zu korrigieren, wird im Entwicklungsprozess auf Methoden des Digital Engineerings zurückgegriffen. Dabei wird der Hackschnitzelgreifer in Form eines virtuellen Prototyps abgebildet. Grundlage bildet ein in [3] vorgestelltes Vorgehen, das sich an der Richtlinie VDI 2206 (siehe [10]) orientiert. Da der entwickelte Prozess sehr umfangreich ist, konzentriert sich dieser Beitrag auf die Prozessschritte eins bis vier, wie sie in Bild 3 dargestellt sind.

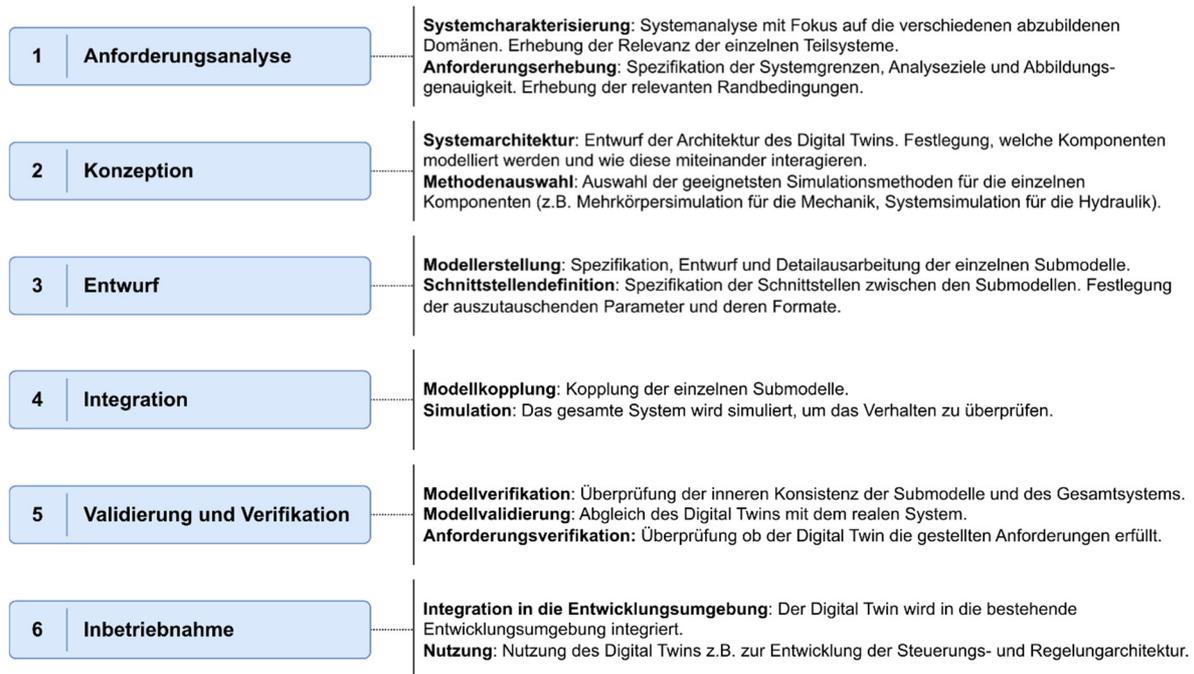


Bild 3: Prozess zur Entwicklung des virtuellen Prototyps [3]

Im Rahmen der Anforderungserhebung ergibt sich als primäres Analyseziel die Ermittlung der auftretenden Spannungen in den Schaufeln des Greifers während des Schließvorgangs. Daraus resultiert, dass zumindest die Schaufeln in einer FEM-Simulation nachgebildet werden müssen, wobei es sich in diesem Fall anbietet, auch den Fremdkörper zu integrieren.

Da das Schließen der Schaufeln ein dynamischer Vorgang ist, werden die für die Bewegung maßgeblichen Bauteile als Starrkörper in einer MKS-Simulation nachgebildet. Die Bewegung wird durch einen elektrischen Linearaktor erzeugt, dessen relevante Bauteile ebenfalls als Starrkörper in der MKS-Simulation integriert werden.

Das Verhalten des Aktors in Form seiner Antriebskennlinie könnte auch direkt in die MKS-Simulation integriert werden. Hier wurde das Verhalten jedoch in eine Systemsimulation integriert, da dies eine detailliertere Modellierung des Antriebs (z. B. elektrisches Verhalten oder Spiel aufgrund von Fertigungstoleranzen) zu einem späteren Zeitpunkt ermöglicht.

Im Zuge der Systemcharakterisierung ergibt sich somit ein System, bestehend aus drei Domänen:

- FEM-Domäne: Strukturmechanik der Schaufeln und des Fremdkörpers
- MKS-Domäne: Bewegung des Greifers als starres System
- SYSTEM-Domäne: Verhalten des elektrischen Antriebs der Schaufeln

Unter der Annahme, dass sowohl die Position des Hauptrahmens als auch die des Blocks fest im Raum definiert ist, ergibt sich für die Systemarchitektur durch die symmetrische Konstruktion des Greifers, dass es ausreicht, die Bewegung einer Schaufel nachzubilden, um Aufschluss über die strukturmechanischen Eigenschaften der Schaufeln zu erhalten.

3.1 Submodelle

Abschnitt 3.1 des Beitrags erläutert die Entwicklung der Submodelle des virtuellen Prototyps des Biomassegreifers. Gemäß dem in Bild 3 dargestellten Prozess zur Entwicklung eines virtuellen Prototyps konzentriert sich dieser Beitrag auf die Prozessschritte eins bis vier. Nachdem die Anforderungsanalyse (Prozessschritt 1) die Ermittlung der auftretenden Spannungen in den Greiferschaufeln als primäres Analyseziel definiert hat und die Systemcharakterisierung im Rahmen der Konzeption (Prozessschritt 2) die drei relevanten Domänen (FEM, MKS, SYSTEM) identifiziert hat, widmet sich dieser Abschnitt der Modellerstellung (Prozessschritt 3) der einzelnen Submodelle. Diese Submodelle bilden die Grundlage für die spätere Integration (Schritt 4) und Co-Simulation des Gesamtsystems.

3.1.1 Mehrkörpersystem des Greifers

Die Grundlage der Mehrkörpersimulation bildet das im Entwurfsprozess des Greifers entstandene CAD-Modell. Dieses CAD-Modell bildet eines der Hauptergebnisse der Diplomarbeit aus [5] und wurde unter Zuhilfenahme der VDI-Richtlinie 2221 (Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung) in einem methodischen Produktentwicklungsprozess entwickelt. Neben der in dieser Publikation gezeigten äußeren Struktur des Biomassegreifers wurde in der erwähnten Masterarbeit (siehe [5]) ebenso das sensorische Konzept als konsequente Weiterentwicklung der Projektergebnisse aus [2] unter den geänderten Randbedingungen erweitert. Bild 4 zeigt die relevanten Bauteile und Gelenke, die zur Beschreibung der kinetischen Zusammenhänge einer Schaufelbewegung erforderlich sind.

Die Mehrkörpersimulation wird in Hexagon Adams umgesetzt. Hierbei werden die rotatorischen Verbindungen des Greifers als ideale Drehgelenke ausgeführt. Dies entspricht einem starren, reibungsfreien, rotatorischen Gelenk mit nur einem Freiheitsgrad. Der Linearaktor der Schaufel wird vereinfacht durch zwei starre Körper (P3 & P4) dargestellt, die mit einem idealen translatorischen Gelenk verbunden sind. Hierbei wird dem Gelenk (C34) eine Vorschubgeschwindigkeit aufgeprägt, die aus der Systemsimulation stammt.

Bauteile:

- P1: Hauptrahmen
- P2: Schaufel
- P3: Aktor-Treibendes Glied
- P4: Aktor-Schubstange

Gelenke:

- C12: Drehgelenk Schaufel
- C13: Drehgelenk Aktor
- C34: Schubgelenk Aktor
- C42: Drehgelenk Aktor

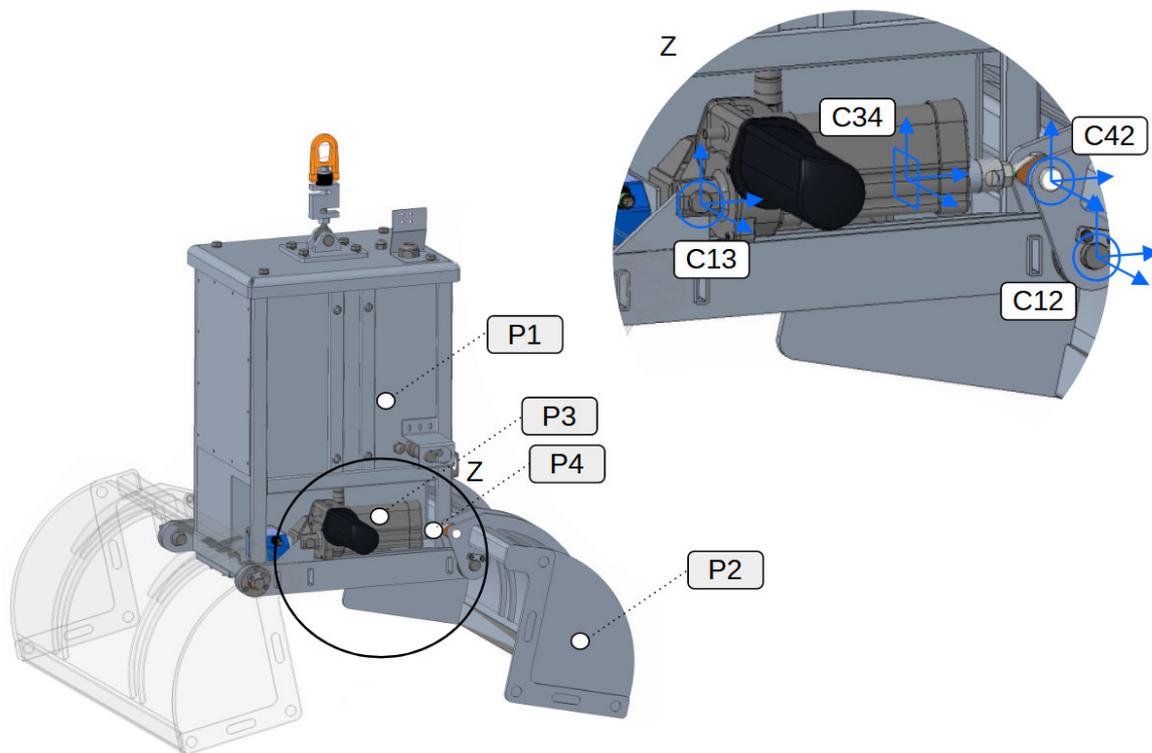


Bild 4: Modell des Greifers als Basis der Mehrkörpersimulation

3.1.2 Linearantrieb der Schaufeln

Bei dem Antrieb der Schaufeln handelt es sich um einen Elektrozyylinder des Unternehmens SERVOMECH S.P.A. Laut Hersteller-Datenblatt besteht dieser im Wesentlichen aus drei Unterbaugruppen: DC-Motor (1), Schneckengetriebe (2) und Trapezgewindespindel (3). Die Systemsimulation des Antriebs wurde in der Open-Source-Software OpenModelica umgesetzt. Sind die relevanten Parameter¹, die das zeitliche Verhalten des Antriebs beeinflussen, bekannt, kann das Modell des Antriebs nach Bild 5 (links) modelliert werden.

Die relevanten Parameter des Linearaktors wurden vom Hersteller jedoch nicht für eine Publikation freigegeben. Daher wird im Rahmen dieser Veröffentlichung das Verhalten des Antriebs durch die vom Hersteller bereitgestellte Motorkennlinie, Funktion der Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Vorschubkraft, nachgebildet. (siehe Bild 5)

¹Parameter des DC-Motors (1), modelliert als permanent erregte Gleichstrommaschine: Elektrischer Widerstand der Ankerwicklung, Ankerinduktivität und Trägheit des Rotors (nach [11]). Parameter des Schneckengetriebes (2): Trägheit der Schnecke, Trägheit des Schneckenrades, Übersetzung des Getriebes, Elastizität der Zähne sowie das Spiel im Zahneingriff (nach [12]). Parameter der Trapezgewindespindel (3): Trägheit der Mutter (Antriebsrad), Masse der Hohlspindel, Übersetzung durch Schraubverbindung, Spiel im Gewindeeingriff und Reibungswiderstand durch Führung der Gewindespindel (orientiert an [13]).

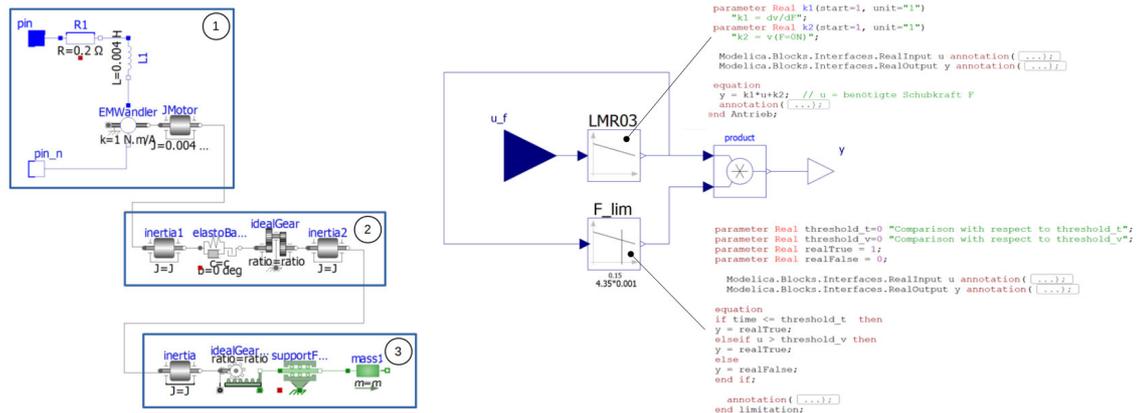


Bild 5: links: Detaillierte Abbildung des Antriebs in OpenModelica [5],
rechts: Abbildung des Linearaktors auf Basis der Motorkennlinie in OpenModelica [5]

Das Simulationsmodell des elektrischen Antriebs wird in das Gesamtsystem des virtuellen Prototyps als FMU² integriert. Als Schnittstellen dienen dazu die in Bild 5 dargestellten Interface u_f und y . Als Eingangsgröße (u_f) der Systemsimulation dient eine in der Mehrkörpersimulation berechnete Widerstandskraft, die dem Antrieb entgegenwirkt. Auf Basis dieser ergibt sich über die Antriebskennlinie eine Vorschubgeschwindigkeit, die dem Ausgangssignal (y) entspricht.

3.1.3 Schaufel und Fremdkörper

Die Schaufel des Greifers und der als Widerstand wirkende Block wurden in Hexagon Marc als elastische Körper in einer FEM-Simulation integriert. Bei der Schaufel des Greifers handelt es sich um eine Schweißkonstruktion, deren Bauteile einzeln durch ein Hybridnetz, bestehend aus Tetraedern und Hexaedern vernetzt und deren Verbindung vereinfacht durch das Verschmelzen der Kontaktflächen mittels „Glued Contacts“³ nachgebildet wurde. (siehe Bild 6)

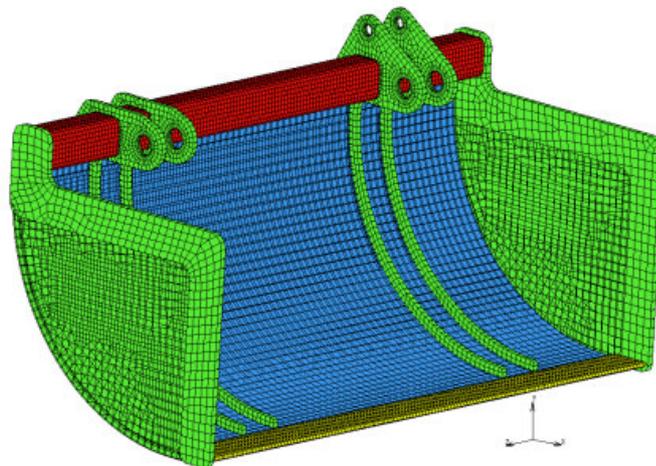


Bild 6: Schaufelmodell nach Vernetzung [5]

Da die Verbindung der Bauteile in der Realität durch Schweißnähte erfolgt und durch das

² Die FMU stellt eine eigenständige Einheit dar, die mit dem restlichen Modell über gerichtete Ein- und Ausgänge kommuniziert. Für weitere Details siehe [11].

³ Ein „Glued Contact“ verbindet die Kontaktzone, indem alle Verschiebungsfreiheitsgrade der angewählten Knoten unterdrückt werden. Für weitere Informationen siehe [14].

Weglassen der Schweißnähte im Modell, Abweichungen der Berechnungsergebnisse zu erwarten sind, erfolgte zusätzlich eine statische FEM-Simulation der Schaufel mithilfe der Software Creo Simulate Structure, in der zwei Schaufelmodelle (mit und ohne implementierte Schweißnähte) gegenübergestellt wurden, um die Größenordnung des Einflusses der Schweißnähte auf das strukturelle Verhalten des Schaufelmodells zu untersuchen. Es werden die Von-Mises-Vergleichsspannungen und die Verformung als Verlauf der maximalen Verschiebungen gegenübergestellt, die aus der Belastung durch den Antrieb mit einer Vorschubkraft von 4000 N resultieren. Die Ergebnisse des Schaufelmodells mit Schweißnähten sind in Bild 7 und die Ergebnisse des Schaufelmodells ohne Schweißnähte in Bild 8 dargestellt. In den Abbildungen sind links die Von-Mises-Vergleichsspannungen in N/mm^2 und rechts der Betrag der Verschiebungen in mm dargestellt.

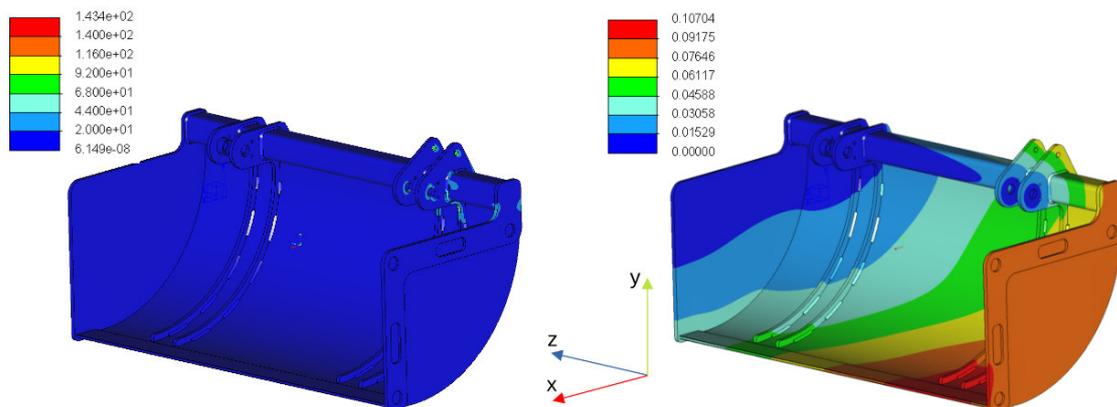


Bild 7: Ergebnisse der statischen Analyse der Schaufel mit Schweißnähten [5]

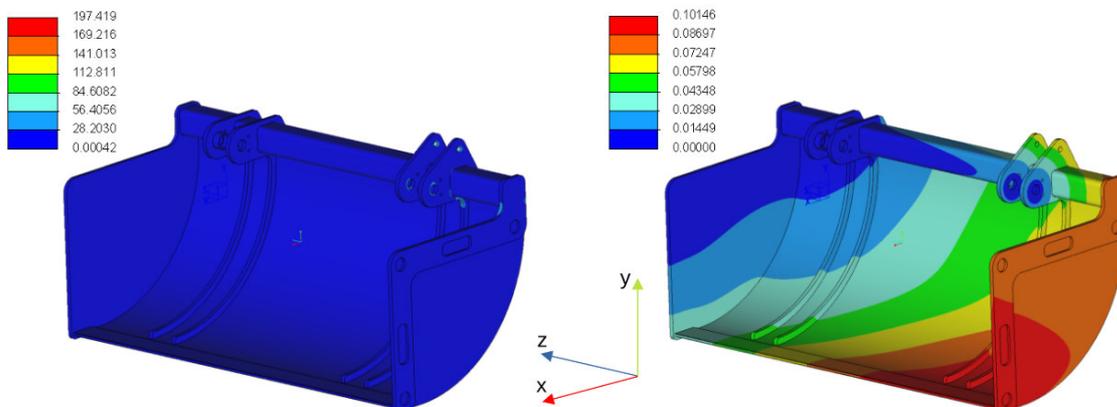


Bild 8: Ergebnisse der statischen Analyse der Schaufel ohne Schweißnähte [5]

Aus der Gegenüberstellung der Schaufelmodelle (mit und ohne implementierte Schweißnähte) ist zu erkennen, dass für diesen Anwendungsfall das Verformungsverhalten und die Verläufe der Von-Mises-Vergleichsspannungen nur geringfügig abweichen. Daher kann auf die Modellierung der Schweißnähte in Hexagon Marc verzichtet werden und die Nachbildung der Schweißverbindung durch „Glued Contacts“ als verifiziert angesehen werden.

Das für die Greiferschaufeln und den Fremdkörper geplante Material (S235JR) wird durch einen elastisch-plastisch, isotropen Materialtyp abgebildet, wobei für beide Körper ein E-Modul von 210.000 N/mm^2 und eine Querkontraktionszahl von 0,3 gewählt wird. Die Kon-

taktbeziehung zwischen Block und Schaufel wird durch einen „Touching Contact“⁴ beschrieben.

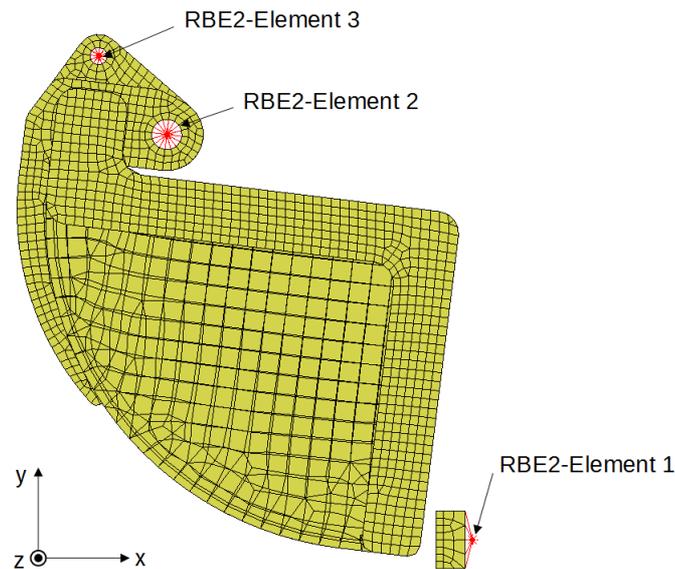


Bild 9: Seitenansicht des FEM-Modells

Um eine gleichmäßige Kräfteinleitung sicherzustellen, werden an den entsprechenden Stellen des Modells RBE2-Elemente⁵ gesetzt. Folgende Boundary Conditions wurden den Referenzknoten der RBE2-Elemente aufgeprägt:

- RBE2-Element 1: Alle Freiheitsgrade wurden fixiert.
- RBE2-Element 2: Entspricht der Drehachse der Schaufel, die nur eine Drehbewegung um die z-Achse zulässt, während alle anderen Freiheitsgrade eingeschränkt sind.
- RBE2-Element 3: Der Referenzknoten dieses RBE2-Elements wird durch eine Boundary Condition mit einem Marker aus dem MKS-Modell des Greifers verbunden und bildet damit die physikalische Schnittstelle, an der ein Informationsaustausch zwischen den Domänen erfolgt.

3.2 Integration des virtuellen Prototyps

Für die Integration des Antriebsverhaltens in das Gesamtsystem werden FMI⁶-Schnittstellen verwendet, indem der Programmcode als FMU (Model Exchange) aus OpenModelica exportiert und als ESL (External System Library) in Hexagon Adams importiert wird. Die zentrale Steuerung und Lösung des neu entstandenen Systems, bestehend aus MKS-Modell und FMU des Antriebsmodells erfolgt ausgehend von Hexagon Adams.

⁴ Ein „Touching Contact“ entspricht einer lokalen Nicht-Durchdringungs-Bedingung, die ein relatives Gleiten der Körper in der Kontaktschnittstelle noch zulässt (siehe auch [14]).

⁵ RBE2 steht für „Rigid Body Element Typ 2“. Ein RBE2-Element ist eine allgemeine Mehrpunktverbindung, die eine Gruppe gebundener Knoten mit einem Referenzknoten verbindet. Für weitere Informationen siehe [14].

⁶ Der FMI-Standard zielt darauf, den C-Code eines dynamischen Modells zu erzeugen, der von verschiedenen Modellierungs- und Simulationsumgebungen für einen Modellaustausch genutzt werden kann. Details dazu sind unter anderem auch in [15] dargestellt.

Die Simulationskopplung der FEM-Simulation und der MKS-Simulation erfolgt über die externe Schnittstelle ACSI⁷. Im Modell wird die Übergabe von Daten an der physikalischen Schnittstelle umgesetzt, also an dem Punkt, an dem das Modell mit einem anderen Modell interagiert, in diesem Fall dem Angriffspunkt des Aktors an der Schaufel. Bei allen Adams-Marc-Interaktionen übergibt Adams Verschiebungen durch einen Marker, die auf einen Knoten in Marc aufgeprägt werden. Marc gibt die resultierenden Kraft-/Drehmomentwerte auf Basis des FEM-Modells an Adams zurück, die durch eine GForce⁸ abgebildet werden. Zur Veranschaulichung sind der Aufbau des Gesamtsystems sowie der Informationsfluss vereinfacht in Bild 10 dargestellt.

In der dynamischen Analyse des Gesamtsystems werden in jedem Integrationsschritt der Co-Simulation Informationen zwischen den Domänen ausgetauscht. Als Eingangsgröße (u_f) der Systemsimulation dient die sich am Aktor einstellende Widerstandskraft im Gelenk (C42), die in der FEM-Simulation berechnet und über die physikalische Schnittstelle an die MKS-Simulation übergeben wird. Auf Basis dieser Widerstandskraft ergibt sich in der Systemsimulation über die Antriebskennlinie eine Vorschubgeschwindigkeit, die dem Ausgangssignal (y) entspricht und dem Gelenk (C34) in der MKS-Simulation aufgeprägt wird, was wiederum zu einer Verschiebung im Gelenk (C42) führt, die an die FEM-Simulation zurückgegeben wird.

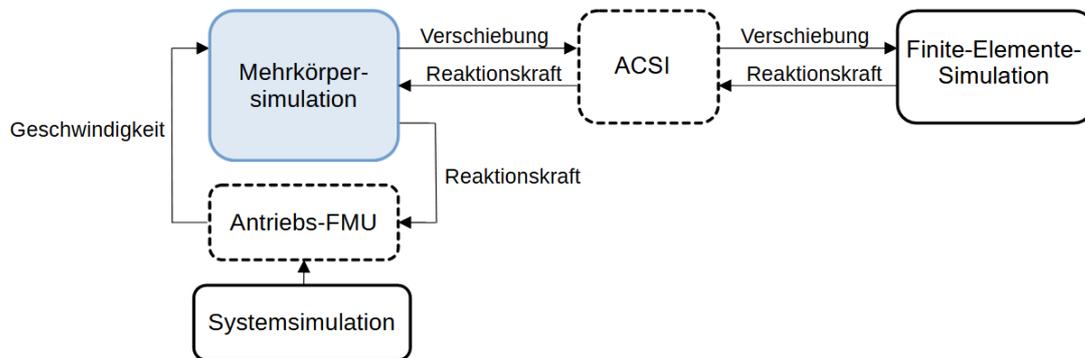


Bild 10: Informationsfluss des Gesamtsystems

⁷ Das Adams Co-Simulation Interface (ACSI) ist eine externe Schnittstelle, die den Datenaustausch der beiden Modelle ermöglicht und zugleich die Verwaltung der Kommunikation übernimmt.

⁸ Eine GForce beschreibt ein allgemeines Kraftelement, bestehend aus drei orthogonalen Kraft- und Drehmomentkomponenten.

4 Ergebnisse der Simulation

Für die Co-Simulation, die über eine Zeitspanne von 0,25 s läuft, wurde ein Zeitschritt von 0,01 s gewählt. Zu Beginn befindet sich die Schaufel in Ruheposition und beginnt, sich auf den Fremdkörper zuzubewegen. Nach 0,14 s kommt es zur Kollision, wodurch die Vorschubgeschwindigkeit abnimmt, bis eine festgelegte Grenzgeschwindigkeit erreicht wird und die Schaufelbewegung stoppt. Bild 11 zeigt im oberen Bereich den Geschwindigkeitsverlauf und im unteren Bereich den Verlauf der Vorschubkraft der Schaufelaktorik.

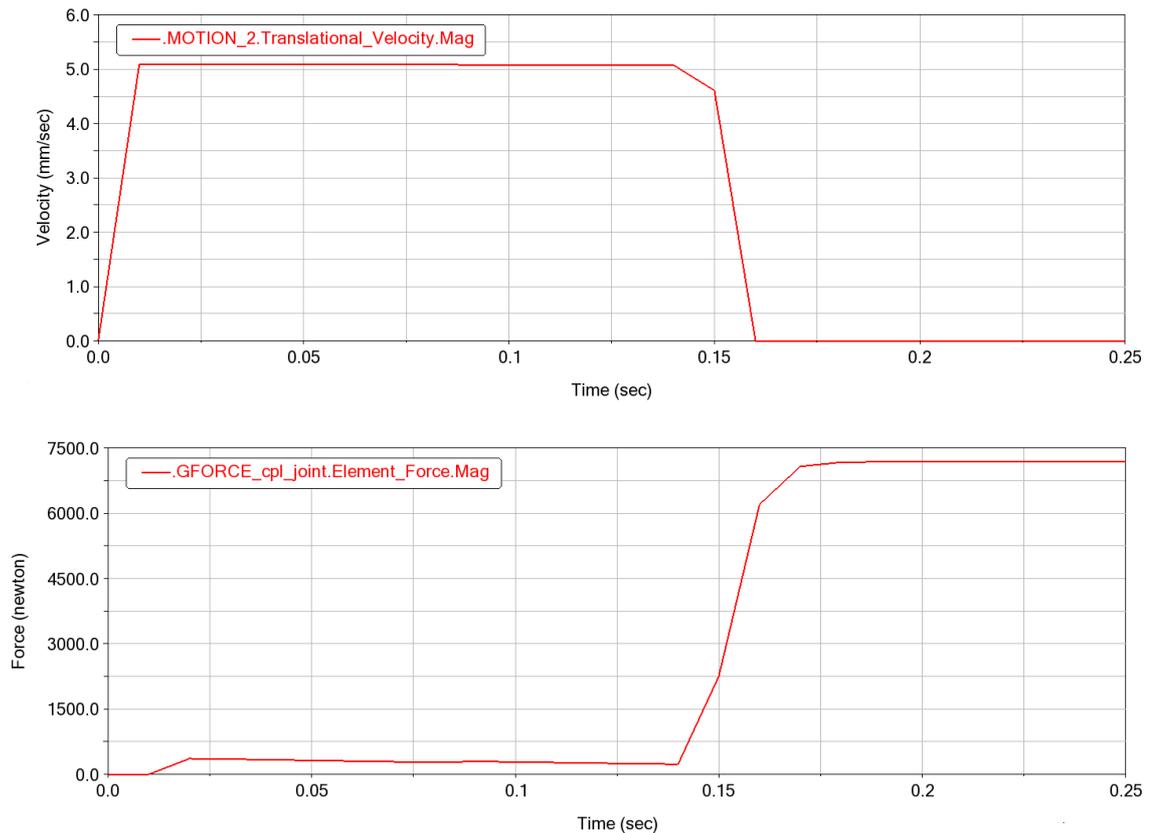


Bild 11: Vorschubgeschwindigkeits- und Vorschubkraftverlauf der Schaufelaktorik [5]

Zur Ermittlung des Worst-Case-Szenarios für die Schaufeln des Greifers wurde die Analyse bei unterschiedlichen Positionen des Fremdkörpers durchgeführt. Die FEM-Simulation der Schaufeln wurde verifiziert, indem der ermittelte Geschwindigkeits- und Vorschubkraftverlauf mit den zeitlich veränderlichen, resultierenden Vergleichsspannungen verglichen wurden. Bild 12 zeigt den Verlauf der Von-Mises-Vergleichsspannungen der Schaufel zu einem Simulationszeitpunkt von 0,2 s.

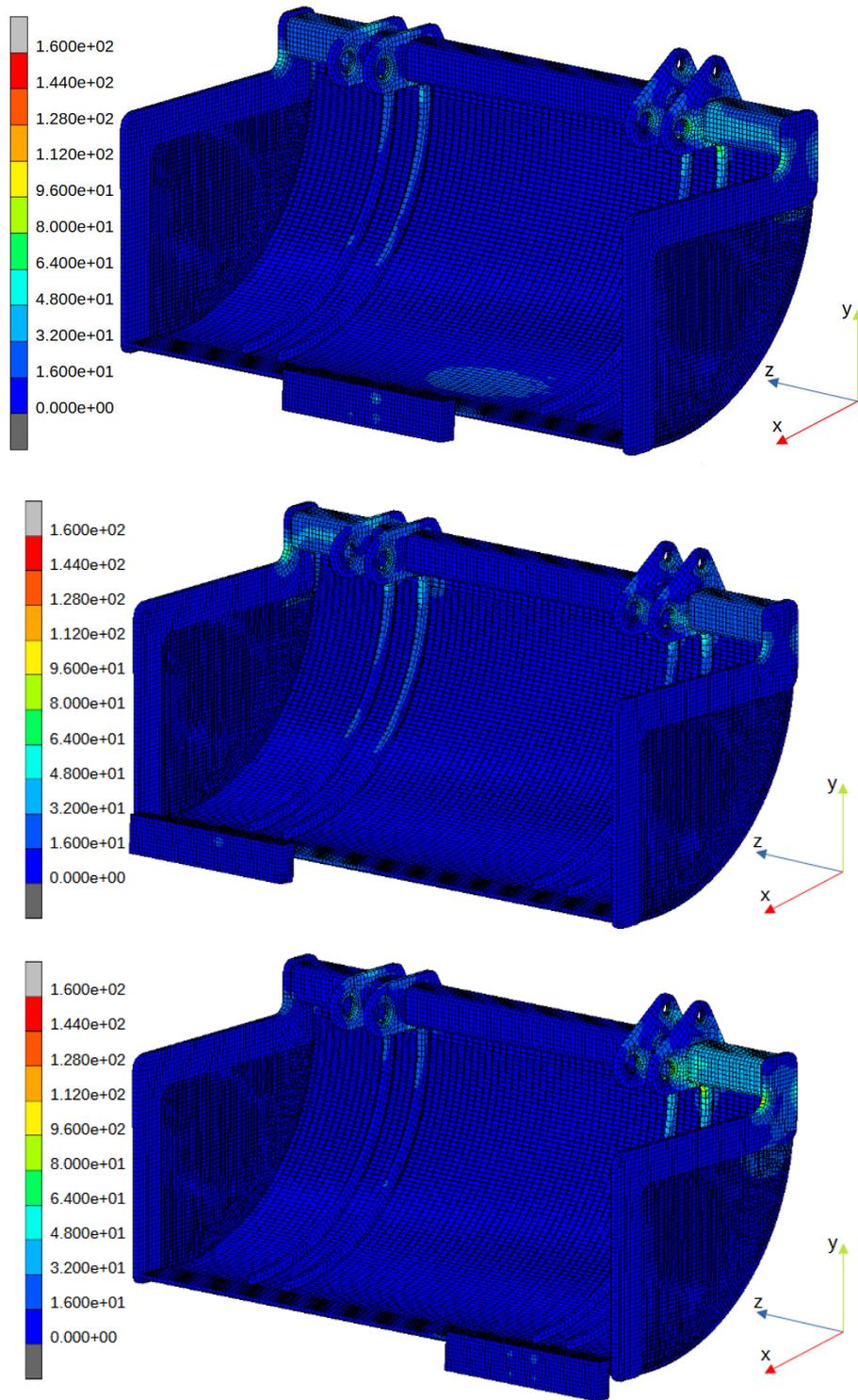


Bild 12: Spannungsverlauf der Schaufel bei unterschiedlich positioniertem Fremdkörper

Darin ist gut zu erkennen, dass sich ein seitlich positionierter Fremdkörper am ungünstigsten auf die Beanspruchung der Schaufel auswirkt. Die beiden unteren Darstellungen zeigen den jeweils auftretenden Spannungsverlauf des Schaufelpaares im Zuge des Greifvorgangs.

4.1 Bewertung der Simulationsergebnisse

Die in diesem Beitrag durchgeführte Co-Simulation des Biomassegreifers liefert wertvolle erste Einblicke in das dynamische Systemverhalten unter Belastung, insbesondere im kritischen Szenario einer Blockade durch einen Fremdkörper. Die Ergebnisse bestätigen, dass ein seitlich positionierter Fremdkörper die höchste mechanische Beanspruchung auf die Greiferschaufeln ausübt, was sich in den maximalen Von-Mises-Vergleichsspannungen widerspiegelt. Der ermittelte Geschwindigkeits- und Vorschubkraftverlauf der Schaufelaktuatorik, wie in Bild 11 dargestellt, sowie der Spannungsverlauf in Bild 12 bieten eine solide Grundlage für die Verifizierung der FEM-Simulation der Schaufeln.

Ein wesentlicher Vorteil der dynamischen Analyse gegenüber einer rein statischen Betrachtung liegt in der Möglichkeit, den gesamten Schließvorgang zu erfassen und zeitabhängige Einflussgrößen zu berücksichtigen. Dies ermöglicht die Identifizierung potenzieller Belastungsspitzen, die bei einer rein statischen Analyse möglicherweise unentdeckt blieben. Die vorläufigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Schaufeln der maximalen Vorschubkraft der Antriebe mit hoher Wahrscheinlichkeit standhalten, ohne sich plastisch zu verformen. Eine detaillierte Spannungsbewertung wird zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Artikels noch finalisiert, weshalb die Ergebnisse als vorläufig zu betrachten sind.

Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Modellierungsansatz muss jedoch feststellen, dass großes Potential der gewählten Simulationskopplung ungenutzt bleibt. Die gewählte Modellierung ermöglicht zwar die betrags-, lage- und zeitkorrekte Einleitung der Kraft in das FEM-Modell auf Basis der Bewegung des Bewegungszustands der Mehrkörpersimulation, Verformungen im Hauptrahmen oder den Lagerstellen, die sich aufgrund der Krafrückwirkung ergeben würden, bleiben jedoch aufgrund der Starrkörpermodellierung des MKS-Modells unberücksichtigt. Ebenso muss die Krafeinleitung und Aufhängung im FEM-Modell (siehe Bild 9) fallspezifisch überprüft werden. Durch die Modellierung der Kraftverteilung der Synchronisierungsknoten (Abbildung in Hexagon Marc als Knoten des FEM-Netzes sowie Abbildung als Marker in Hexagon Adams) in Marc auf Basis eines RBE2-Elements werden die entsprechenden Lagerstellen mit unendlicher Steifigkeit abgebildet.

Im vorliegenden Fall haben hierbei Vorstudien ergeben, dass diese Verformungen gering genug sind, um sie vernachlässigen zu können. In anderen Szenarien könnten die Auswirkungen jedoch höher sein und müssten berücksichtigt werden.

4.2 Auswirkungen auf das Design

Die Simulationsergebnisse sind von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung des Greiferdesigns. Die Erkenntnis, dass eine seitliche Blockade das Worst-Case-Szenario darstellt, erlaubt es den Konstrukteuren, gezielte Verstärkungen in den am stärksten beanspruchten Bereichen der Schaufeln vorzusehen, um die strukturelle Integrität zu gewährleisten und Überdimensionierungen an anderen Stellen zu vermeiden. Die gezeigten Modelle stellen bereits eine fortgeschrittene Variante des Designs dar. In frühen Designvarianten waren die in den Bildern zu sehenden Rippen als Aussteifungen noch nicht enthalten, da sie erst auf Grund der Ergebnisse der ersten Analysen mit der gezeigten Prozesskette vorgesehen wurden. Die dynamische Analyse ermöglicht ebenso eine präzisere Auslegung

der Aktoren, da nun ein fundierteres Verständnis der tatsächlich auftretenden Widerstandskräfte vorliegt. Dies kann zu einer Optimierung des Energieverbrauchs und einer Verlängerung der Lebensdauer der Komponenten führen.

4.3 Kosten-Nutzen-Bewertung des virtuellen Prototypen

Der Einsatz eines virtuellen Prototypen im Produktentwicklungsprozess, wie im Rahmen dieses Projekts demonstriert, hat sich als äußerst vorteilhaft erwiesen. Die Analysequalität der dynamischen FEM-Analyse zeigt sich in diesem Bereich in vielen Anwendungsfällen gegenüber einer statischen FEM-Analyse als überlegen, da die Randbedingungen wie zum Beispiel die Lage der Krafteinleitungen oder des Bauteils korrekt und in Abhängigkeit der Rückwirkung der Mehrkörpersimulation berücksichtigt werden. Mit der vorgestellten Prozesskette lassen sich daher die Detailtiefe und das Spektrum möglicher Analysen stark erweitern.

Nutzen:

- Frühe Fehlererkennung: Durch die Entwicklung anhand der vorgestellten Prozesskette konnten in einer frühen Entwicklungsphase Defizite in der strukturellen Ausgestaltung identifiziert und behoben werden.
- Kostenreduktion: Die Relevanz einer CAE-basierten Entwicklung sollte im Allgemeinen unumstritten sein. Auch in der Umsetzung des vorgestellten Projekts konnte die Notwendigkeit physischer Prototypen und aufwändiger realer Tests reduziert werden, wodurch eine erhebliche Kosten- und Zeiteinsparung erreicht werden konnte. Verschiedene Designvarianten und Betriebsszenarien konnten effizient simuliert und verbessert werden, ohne physische Änderungen vornehmen zu müssen.
- Risikominimierung: Belastungsszenarien, die in der Realität schwer oder gefährlich zu reproduzieren wären (wie die Blockade durch einen Fremdkörper), konnten sicher und kontrolliert untersucht werden. Im vorliegenden Fall liegt das Risiko eines Tests am realen Prototypen vorrangig darin, den Prototypen zu beschädigen.
- Verbessertes Systemverständnis: Die detaillierte Simulation förderte ein tieferes Verständnis des Systemverhaltens und der Interaktionen zwischen den verschiedenen Domänen (Mechanik, Aktorik, Struktur). Vor allem hinsichtlich der Kinematik, die sich im System einstellt, konnten detaillierte Erkenntnisse erlangt werden, die über den Umfang der vorgestellten Publikation hinausgehen.

Aufwand:

- Modellierungskomplexität: Die Erstellung detaillierter und genauer Modelle über verschiedene Domänen hinweg erfordert spezialisiertes Wissen, Zeit und Erfahrung. Nur wenn die notwendige Modellierungskompetenz und Routine im Umgang mit den unterschiedlichen Softwarelösungen in der entsprechenden Entwicklungsabteilung vorhanden sind, zeigt sich der Aufwand der Umsetzung der Prozesskette als rentabel.
- Software- und Hardwareanforderungen: Die Durchführung von Co-Simulationen erfordert leistungsstarke Software-Tools und Rechenressourcen. Die Lizenzkosten für die verwendeten Programme sind ebenso zu berücksichtigen.

Insgesamt überwiegt der Nutzen des virtuellen Prototypen den anfangs höheren Aufwand deutlich, da er zu einer effizienteren, risikoärmeren und kostengünstigeren Produktentwicklung führt. Die Lernkurven der verwendeten Programme und Methoden sind jedoch kritisch zu bewerten und daher nur bei regelmäßiger Anwendung zielführend. Bei unregelmäßiger Nutzung ist der Modellierungsaufwand potenziell sehr hoch einzuschätzen. Zudem kann die Komplexität der Kopplung der Submodelle zu einer drastischen Verlängerung der Bearbeitungszeit führen.

5 Verallgemeinerung der Ergebnisse

Die in diesem Beitrag demonstrierte Methodik der virtuellen Produktentwicklung, basierend auf dem vorgestellten Entwicklungsprozess eines virtuellen Prototypen (siehe Bild 5) und der daraus resultierenden Co-Simulation von Mehrkörpersimulation, Strukturmechanik sowie Systemsimulation (siehe u. a. Bild 10), ist nicht spezifisch auf den Biomassegreifer beschränkt, sondern auf eine Vielzahl komplexer mechatronischer Systeme übertragbar und wiederverwendbar. Die Stärke dieses Ansatzes liegt in seiner Fähigkeit, die Interaktionen verschiedener physikalischer Domänen ganzheitlich abzubilden.

5.1 Transferierbarkeit und Wiederverwendbarkeit

Multidomain-Ansatz: Die zentrale Eigenschaft dieser Prozesskette ist die Verknüpfung von Mehrkörpersimulation, Strukturmechanik und Systemsimulation. Dies ermöglicht die simultane Berücksichtigung von Bewegung, elastischer Verformung und der Beeinflussung durch Antriebs- oder Regelungselemente (abbildbar in der Systemsimulation). Dieser integrative Ansatz ist fundamental für jedes technische System, bei dem die Kopplung zwischen diesen Domänen entscheidend für die Funktionsweise und das Ausfallverhalten ist.

Hierarchische Modellierung: Die Kette erlaubt eine hierarchische Modellierung, beginnend mit einem übergeordneten MKS-Modell zur Erfassung der Systemkinematik und -dynamik. Kritische oder hochbeanspruchte Komponenten können anschließend durch detailliertere FEM-Modelle ersetzt oder ergänzt werden, um lokale Spannungen und Verformungen detailliert zu analysieren. Die Systemsimulation liefert dabei die notwendigen Randbedingungen und die Interaktion der Teilsysteme. Diese Skalierbarkeit ermöglicht es, den Detaillierungsgrad an die spezifischen Problemstellungen anzupassen. Auch wenn manche kommerzielle Softwarelösungen die Abbildung all dieser Bestandteile in einer einzelnen Simulationsumgebung ermöglichen, zeigt sich in vielen Anwendungsbeispielen, dass der Einsatz spezialisierter Softwarelösungen und deren Kopplung vorteilhaft hinsichtlich der Qualität der durchgeführten Analysen ist.

Standardisierte Schnittstellen: Die Nutzung offener Standardschnittstellen wie FMI (Functional Mock-up Interface) ist vorteilhaft für die Wiederverwendbarkeit der Prozesskette. Diese Standards erleichtern den interoperablen Austausch und die Kopplung von Modellen, die in unterschiedlichen Simulationsumgebungen erstellt wurden. Dies fördert die Bildung von Modellbibliotheken und beschleunigt den Aufbau neuer Simulationsmodelle für ähnliche oder modifizierte Systeme. Im gezeigten Fall wurde bei der Kopplung zwischen Mehrkörpersimulation und Strukturmechanik eine proprietäre Schnittstelle (ACSI Interface) verwendet, da beide verwendeten Simulationsprogramme Produkte desselben Herstellers

sind. Eine weitergehende Verallgemeinerung durch die Nutzung des FMI/FMU Standards auch in der Interaktion zwischen Mehrkörpersimulation und Strukturmechanik wäre jedoch ebenso realisierbar.

5.2 Restriktionen der Anwendung

Systemcharakterisierung und Domänenidentifikation: Für jede neue Anwendung ist eine präzise Identifikation der relevanten physikalischen Domänen (z. B. zusätzlich Thermik, Fluidik, Akustik) und ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten unerlässlich. Nur so kann das geeignete Set an Simulationswerkzeugen und Kopplungsstrategien ausgewählt werden.

Modellauswahl und Detaillierungsgrad: Die Wahl der passenden Modellierungstiefe für FEM, MKS und Systemsimulation muss sorgfältig abgewogen werden. Ein zu hoher Detaillierungsgrad kann die Komplexität und den Rechenaufwand unnötig erhöhen, während ein zu geringer Detaillierungsgrad kritische Effekte vernachlässigen könnte. Co-Simulationen, insbesondere solche mit detaillierten FEM-Modellen, können sehr rechenintensiv sein und erfordern leistungsstarke Hardware sowie optimierte Solver-Konfigurationen. Die Simulationsdauer kann bei sehr komplexen Systemen eine Herausforderung darstellen.

Modellierungskomplexität und Interpretationsaufwand: Die Erstellung und Pflege von gekoppelten Multidomain-Modellen erfordert spezialisiertes Fachwissen sowohl in den jeweiligen Simulationsdomänen als auch bezüglich der Kopplungsmechanismen und deren softwareseitigen Schnittstellen, was den initialen Aufwand erhöhen kann. Darüber hinaus erfordern die umfassenden Ergebnisse einer Co-Simulation eine fundierte Interpretation, um die relevanten Erkenntnisse für die Designoptimierung und Entscheidungsfindung abzuleiten.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts CBE4I – Clean Bioenergy for Industry wird ein innovatives Hackgutfördersystem entwickelt, das dazu dient, einen Biomassekessel bedarfsorientiert, automatisiert und selektiv mit Hackschnitzeln zu versorgen. Hierbei handelt es sich um einen Nachfolger des Projekts „Wood chip feeding technology of the future for small-scale biomass boilers“ (Kurztitel: „BioChipFeeding“) und entspricht einer systematischen Weiterentwicklung dessen (siehe [2]).

Ein zentraler Bestandteil dieses Biomassefördersystems ist ein Greifer, der den Endeffektor eines Brückenkrans darstellt und dadurch wichtige Teilfunktionen beim Transport der Biomasse übernimmt. Dieser Beitrag beschreibt eine im Zuge des Entwurfsprozesses des Greifers verwendete Methodik der virtuellen Produktentwicklung, mit der es gelingt, das Systemverhalten des Greifers durch eine dynamische Analyse in einer domänenübergreifenden Co-Simulation darzustellen.

Der virtuelle Prototyp liefert die Grundlage, das Systemverhalten des Greifers zu beschreiben. Im Rahmen des Projekts kann diese in einer weiteren Entwicklungsphase für Optimierungen und eine genaue Beurteilung der strukturmechanischen Eigenschaften der Schaufel genutzt werden. Bevor dies jedoch möglich ist, gilt es, das Modell durch Messungen am ersten entstandenen Prototyp zu validieren, welche z. B. im Zuge von Funktionstests an

der aufgebauten Versuchsanlage bei einem der Projektpartner (Polytechnik GmbH) durchgeführt werden können.

Acknowledgement:

This project has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under grant agreement No 101122292.

Project Acronym: CBE4I

Duration: 09/2023 – 08/2026



Author Contributions:

Conceptualization: FM, AOP; Methodology: FM, AOP; Simulation - Modeling: FM, AOP; Simulation - study: FM; Investigation: FM, AOP; Writing - Original Draft: FM, AOP; Writing - Review & Editing⁹: FM, AOP, CL; Visualization: FM; Project administration: AOP, CL; Funding acquisition: AOP, CL

⁹ Die orthografische und grammatikalische Korrektur wurde teilweise mithilfe der Large Language Models ChatGPT und Google Gemini unterstützt.

Quellenverzeichnis:

- [1] CBE4I Projekt website: Project description [online]. Herausgegeben von CBE4I Projekt Konsortium. Februar 2024 [Zugriff am 11. Juni 2025]. Verfügbar unter: [Project: cbe4i.eu](http://cbe4i.eu)
- [2] Ortner-Pichler, A.; Rackl, M.; Landschützer, C.; Kessler, S.; Jodin, D.; Willibald, A. G.: Biomasselogistik – Innovative Ansätze Zur Bedarfsorientierten Versorgung von Hackgutfeuerungen. In 20. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2015, 15. Magdeburg, Deutschland, 2015
- [3] Ortner-Pichler, A.; Cichocki, M.; Landschützer, C.: FutureWoodTrans: Entwicklung eines automatisierten Be-, Um- und Entladesystems in der autonomen Forstwirtschaft. In 33. Internationale Kranfachtagung 2025: Kran 4.0: Zukunft der Digitalisierung. Magdeburg, Deutschland, 2025. <https://doi.org/10.25673/117821>
- [4] Cichocki, M.; Ortner-Pichler, A.; Landschützer, C.: Virtual Engineering in the Design and Simulation of Advanced Gripper Systems for Biomass Handling. In 32nd European Biomass Conference (EUBCE 2024). Marseille, France, 2024. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33086.29762> (Abrufdatum: 12.03.2025)
- [5] Mattersberger, F.: Entwicklung eines innovativen multisensorischen Hackschnitzelgreifers. Diplomarbeit, Universität Graz, Fakultät Maschinenbau, 2025
- [6] Otto, H.; Zimmermann, A.; Kleiber, M.; Katterfeld, A.: Optimierung eines Mehrschalengreifers für Holzhackschnitzel. In 27. Internationale Kranfachtagung 2019. Der Kran – Leistungssteigerung, Leichtbau und Automatisierung. Bochum, Deutschland, 2019. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.33086.29762>
- [7] Kaufmann, D; Osterloh, T.; Rossmann, J.: A Digital Twin based Approach to Structural Mechanics: New Perspectives for Robotics in Forestry and Beyond. 2024. <https://doi.org/10.5220/0012755500003758>
- [8] Speckert, M.; Dreßler, K.; Mach, H.: MBS Simulation of a hexapod based suspension test rig. Berichte des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM Report). 2006. [urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-14633](http://nbn:de:hbz:386-kluedo-14633)
- [9] Mammen, H.; Buschmann, U.: Simulation mechatronischer Systeme auf der Basis der Modellbeschreibungssprache Modelica. In 21. Symposium Simulationstechnik 2011. Winterthur, Schweiz, 2011
- [10] VDI – Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2206 – Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme 2nd ed., Berlin: Beuth Verlag, 2021
- [11] Schmitt, T. L.; Andres, M.: Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme – Bondgraphen, objektorientierte Modellierungstechniken und numerische Integrationsverfahren. 2.Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2023
- [12] Dresig, H.; Fidlin, A.: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme – Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese. 4., korrigierte Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2019

- [13] Zirn, O.; Weikert, S.: Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme – Eine praxisnahe Einführung., Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2006.
- [14] Hexagon AB (Publ): Marc 2018.1 – Volume A: Theory and User Information. [Zugriff am: 17. Juni 2025]. Verfügbar unter: [Marc and Mentat Documentation: Release 2018](#)
- [15] Ochel, L.; Braun, R.; Thiele, B.; Asghar, A.; Buffoni, L.; Eek, M.; Fritzson, P.; Horkeby, S.; Hällquist, R.; Kinnander, Å.; Palanisamy, A.; Pop, A.; Sjölund, M.: OMSimulator – Integrated FMI and TLM-based Co-simulation with Composite Model Editing and SSP. Verfügbar als PDF-Dokument unter [\(PDF\) OMSimulator - Integrated FMI and TLM-based Co-simulation with Composite Model Editing and SSP](#) (Datum des Zugriffs: 11.06.2025)
- [16] Cichocki, M.; Mattersberger, F.; Ortner-Pichler, A.; Landschützer, C.: Enhancing the Product Development Process by a Virtual Engineering Approach. Logistics Journal (to be published), 2025

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Pulverförderer für die Schwerelosigkeit

Matthias Pusch

Marvin Raupert

Christoph Lotz

Ludger Overmeyer

André Katterfeld



Matthias Pusch, M. Sc. (Referent)

Lehrstuhl für Förder- und

Materialflusstechnik

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Universitätsplatz 2

39106 Magdeburg



Institut für Transport- und

Automatisierungstechnik (ITA)

c/o Hannover Institute of Technology

Leibniz Universität Hannover

Callinstraße 36

30167 Hannover



Pulverförderer für die Schwerelosigkeit

Für den 3D-Druck in der Schwerelosigkeit wird ein Pulverförderer benötigt, der auch ohne Schwerkraft funktioniert. Im Projekt wird dafür ein spezieller Prototyp entwickelt und im Einstein-Elevator getestet. Die Mikrogravitation wird durch einen Parabelflug mit 5 g Beschleunigung und 4 s Freifall simuliert. Ziel ist ein konstanter, präzise steuerbarer Pulvermassenstrom für die additive Fertigung. Untersucht werden Titan- und Nickellegierungen, wie sie in der Raumfahrt üblich sind. Klassische Förderer versagen hier, der neue Spiralkratzer liefert stabile Ergebnisse. Messungen zeigen: Unter μg -Bedingungen fließt das Pulver sogar besser. Der Prototyp ist ein Schritt Richtung 3D-Druck im All – unabhängig von Schwerkraft.

1 Projektvorstellung

Die Entwicklung eines geeigneten Pulverförderers ist eine zentrale Voraussetzung für den Einsatz des Laser Powder-based Directed Energy Deposition (LP-DED) Verfahrens unter Mikrogravitationsbedingungen. Nur so lässt sich ein gleichmäßiger und kontrollierter Pulvermassenstrom für den additiven Fertigungsprozess gewährleisten. Herkömmliche Fördermechanismen aus Industrie und Forschung sind für den Einsatz unter Schwerkraftbedingungen konzipiert und daher in Mikrogravitation nicht funktionsfähig.

Dieses Forschungsvorhaben ist Teil eines gemeinsamen Projekts der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Leibniz Universität Hannover. Ein weiteres zentrales Ziel des Projekts ist die stabile und reproduzierbare Herstellung zylindrischer Proben mit einem Durchmesser von 3 mm, den sogenannten Seed Sticks, mittels LP-DED unter Mikrogravitationsbedingungen.

Zur Simulation der Mikrogravitation wird der Einstein-Elevator genutzt, ein Fallturm der neuesten Generation. Die Fertigungsversuche erfolgen mit den für die Raumfahrt typischen Werkstoffen Ti-6Al-4V (Titanlegierung) und Inconel 625 (Nickelbasislegierung) [1].

1.1 Einstein-Elevator

Der Einstein-Elevator der Leibniz Universität Hannover ist ein innovativer Fallturm, der Experimente unter verschiedenen Gravitationsbedingungen ermöglicht, von Mikrogravitation bis zu 5 g Hypergravitation.

Die Versuchsgondel (siehe Bild 1) bietet dabei Platz für Aufbauten mit bis zu 2 m Höhe und 1,7 m Durchmesser und kann Nutzlasten von bis zu 1000 kg aufnehmen [2,3].

Für einen Mikrogravitationstest wird die Gondel durch Linearsynchronmotoren mit 5 g vom unteren Ende des 40 m hohen Turms beschleunigt (siehe Bild 2). Nach etwa einer halben Sekunde ist eine Geschwindigkeit von 20 m/s erreicht, die Beschleunigung endet, und der Experimentträger entkoppelt sich minimal von der Gondel. So entsteht eine Mikrogravitation von etwa vier Sekunden [2,4,5]. Während dieser Zeit hält eine geregelte Antriebssteuerung den Abstand zwischen Träger und Gondelboden konstant und gleicht Störungen durch Luft- und Rollwiderstände aus. Vor der Abbremsung wird der Träger wieder angekoppelt, die Gondel bremst mit bis zu 5 g über eine Wirbelstrombremse ab. [4]

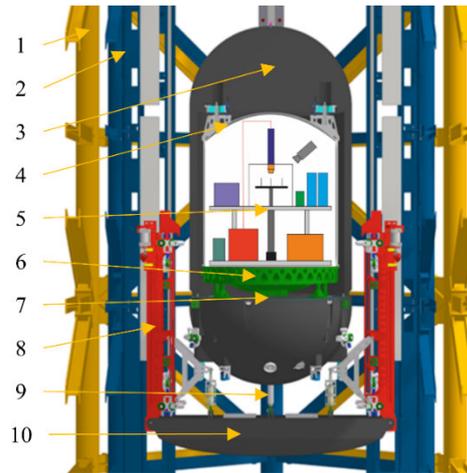


Bild 1: Aufbau des Einstein-Elevators

1: Führungsstruktur, 2: Antriebsstruktur, 3: Gondel, 4: Druckhülle, 5: Versuchsaufbau, 6: Experimentträger, 7: Plattenwärmetauscher, 8: Antriebsschlitten, 9: Koppelstange, 10: Traverse, [Leibniz Universität Hannover/Marvin Raupert [6], lizenziert unter CC BY 4.0, bearbeitet von Marvin Raupert]

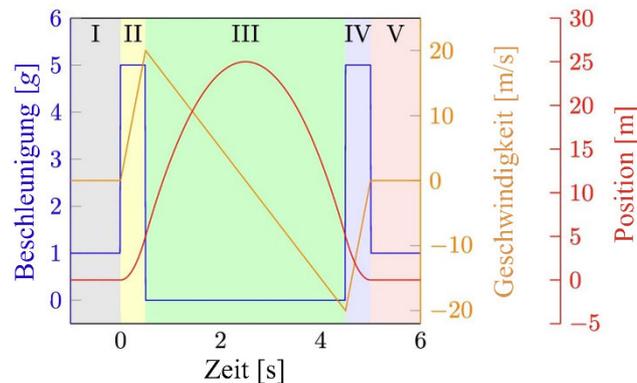


Bild 2: Ablauf eines μg -Experiments

I: Vorbereitungsphase, II: Beschleunigungsphase, III: Freier Fall, IV: Abbremsphase, V: Nachbereitungsphase

[Leibniz Universität Hannover/Richard Sperling [4], lizenziert unter CC BY 4.0, bearbeitet von Marvin Raupert]

Die Anlage ist nach etwa vier Minuten wieder betriebsbereit. Alternativ können auch Hypo- und Hypergravitation erzeugt werden, wobei der Experimentträger fest mit der Gondel verbunden bleibt und die gewünschte Beschleunigung durch Aufwärts- oder Abwärtsschub entsteht. Schnelle Änderungen der Beschleunigung sind in weniger als 50 ms möglich, die Gesamtdauer des Experiments hängt vom Zielprofil ab [7].

1.2 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung eines Pulverförderers im LP-DED-Verfahren unter Mikrogravitation wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt. Er ist so ausgelegt, dass Experimente sowohl im Labor als auch unter variabler Gravitation im Einstein-Elevator möglich sind.

Die Versuchsanordnung verteilt sich auf zwei Ebenen mit jeweils 1,7 m Durchmesser (siehe Bild 3) und umfasst eine Prozesskammer für die Fertigung unter Schutzgasatmosphäre. Ein Manipulatorsystem mit Probenkarussell und Linearantrieb ermöglicht die serielle Herstellung mehrerer Proben, ohne die Kammer öffnen zu müssen.

Die für den Schmelzprozess nötige Energie liefert ein 2 kW Diodenlaser (960/1020 nm), unterstützt durch einen 6 kW Energiespeicher. Die Materialzufuhr wird über ein Pneumatiksystem gesteuert, das an den Pulverförderer angebunden ist. Mehrere Kühlkreisläufe sorgen für die Temperaturstabilität kritischer Komponenten.

Die Steuerung erfolgt über einen Industriecomputer mit digitalen und analogen Schnittstellen. Wärmebild- und Hochgeschwindigkeitskamera sowie ein Quotienten-Pyrometer überwachen den Prozess. Die gesamte Konstruktion ist so gestaltet, dass Vibrationen während der Fertigung unter Mikrogravitation minimal bleiben.

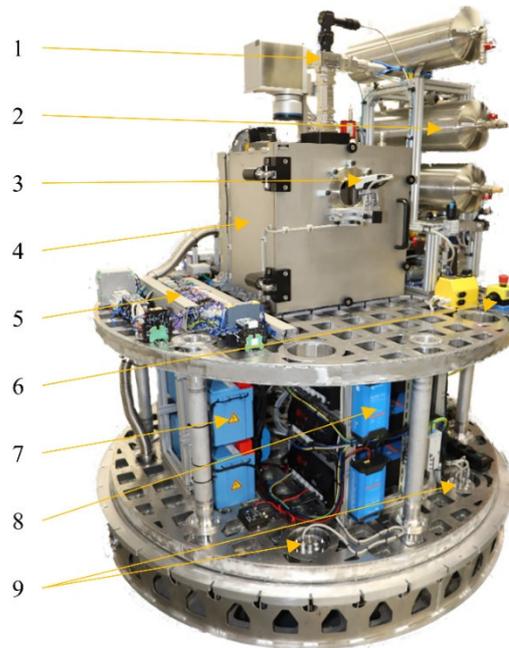


Bild 3: Versuchsaufbau

1: Bearbeitungsoptik, 2: Pneumatiksystem, 3: Kamera, 4: Prozesskammer, 5: Steuerung, 6: Notausschalter, 7: Energiespeicher, 8: Wechselrichter, 9: Schnittstellen zum unteren Träger
[Leibniz Universität Hannover/Marvin Raupert]

1.3 LP-DED-Prozess

Beim Laser Powder-based Directed Energy Deposition-Prozess (LP-DED) wird Metallpulver durch einen Laserstrahl aufgeschmolzen und schichtweise auf einem Substrat aufgetragen. Mögliche Anwendungen umfassen die Herstellung endkonturnaher Bauteile, das Beschichten, Fügen sowie das gezielte Hinzufügen von Strukturen. Im Gegensatz zu vielen anderen additiven Fertigungsverfahren erlaubt LP-DED auch die Reparatur beschädigter Komponenten – ein Aspekt, der insbesondere für Einsätze im Weltraum großes Potenzial bietet [6, 8].

Zu Beginn des Prozesses erzeugt der Laserstrahl ein Schmelzbad durch lokale Erwärmung einer dünnen Schicht des Substrats. So entsteht eine metallurgische Verbindung zwischen dem Grundwerkstoff und dem aufgetragenen Material. In diesem Projekt wird das Metallpulver über eine Mehrstrahldüse mithilfe von Argon als Trägergas zielgerichtet in das Schmelzbad eingebracht. Die im Schmelzbad gespeicherte Wärmeenergie schmilzt die Partikel auf, sodass diese sich dauerhaft mit dem Werkstück verbinden.

Zur Generierung von Linien, Flächen oder komplexen Geometrien kann entweder die Pulverdüse samt Bearbeitungsoptik oder die Substratplatte bewegt werden [8].

2 Verwendetes Pulver

Im Projekt werden Versuche mit zwei unterschiedlichen Metallpulvern durchgeführt, deren Schüttguteigenschaften vorab untersucht wurden. Inconel 625 ist eine Nickelbasislegierung mit rund 22 % Chrom, 9 % Molybdän und 4 % Niob/Tantal. Sie ist wegen ihrer Korrosions- und Warmfestigkeit für Hochtemperaturanwendungen geeignet. Ti64-G23-E (Ti-6Al-4V) ist die am häufigsten verwendete Titanlegierung, bestehend aus etwa 89 % Titan, 6 % Aluminium und 4 % Vanadium. Die hohe Festigkeit und geringe Dichte von Ti64 machen es besonders für die Luft- und Raumfahrt interessant.

Tabelle 1: Wichtige Eigenschaften der verwendeten Pulver

Eigenschaft	Ti64	Inconel 625
Schüttdichte	2,38 kg/l	4,16 kg/l
Korngröße d_{50}	70 μm	36 μm
Böschungswinkel	29,5°	27,1°
Effektiver Reibwinkel (Ringscherversuch)	32°	33°
Wandreibwert gegen X5CrNi18-10	0,39	0,45
Wandreibwert gegen Polyethylen (PE)	0,32	0,33

Beide Legierungen liegen als graues Pulver vor. In Tabelle 1 sind wichtige Eigenschaften der verwendeten Pulver aufgezeigt. Ti64 ist bei gleichem Volumen deutlich leichter als Inconel 625 und weist mit etwa 70 μm mittlerer Korngröße etwa doppelt so große Partikel auf. Reibwerte und Böschungswinkel sind ähnlich, doch zeigte sich Ti64 in den Versuchen frei fließend, während Inconel 625 leicht kohäsiv reagierte. REM-Aufnahmen (siehe Bild 4) bestätigen diese Unterschiede: Ti64-Partikel sind nahezu kugelförmig, bei Inconel 625 dagegen treten unregelmäßige Formen und Anhaftungen auf, was das Verhaken der Partikel begünstigt.

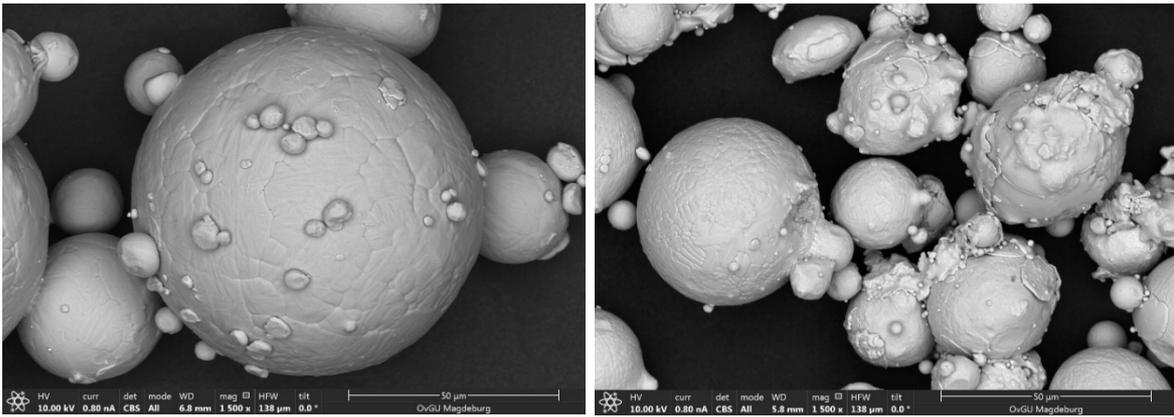


Bild 4: REM-Aufnahme des Ti64- (links) und des Inconel 625-Pulvers (rechts)

3 Pulverförderer-Prototyp

3.1 Klassische Pulverförderer

Zur Erzeugung eines Trägergas-Pulver-Gemischs werden Pulverförderer eingesetzt, die entweder als eigenständige Geräte oder als Teil größerer Anlagen genutzt werden. Wesentliche Bestandteile sind die Regelung des Trägergasvolumenstroms (z. B. Argon, Helium oder Stickstoff) sowie die Pulverhandhabung mit Vorratsbehälter und Dosiereinheit.

Bei klassischen Pulverförderern wird der Pulvermassenstrom über eine rotierende Scheibe mit Ringnut erzeugt (siehe Bild 5). Das Pulver fällt in die Nut, ein Abstreifer stellt eine gleichmäßige Befüllung sicher. Durch Rotation wird das Pulver zur Austrittsöffnung transportiert, an der es vom Trägergasstrom mitgerissen wird. Der Pulvermassenstrom kann über die Drehzahl und unterschiedliche Nutgrößen angepasst werden [9]. Frei fließende Pulver füllen die Nut selbstständig, bei kohäsiven Pulvern helfen Rührwerke, die Fließfähigkeit zu erhalten [10].



Bild 5: Standardpulverförderer von GTV
links in Zusammenbau mit Vorratsbehälter, rechts demontiert mit Blick auf die Nutscheibe mit Pulverablagebereich (unten) und Pulverabsaugbereich (oben)

Dieses Prinzip beruht jedoch auf Schwerkraft und ist daher für Mikrogravitation ungeeignet. Austragshilfen sorgen nur für die Fließfähigkeit, nicht für den eigentlichen Materialtransport. Unter Mikrogravitation könnte das Pulver unkontrolliert austreten oder sich ansammeln.

Deshalb wird für den Weltraumeinsatz ein neues Förderkonzept benötigt, das unabhängig von der Schwerkraft arbeitet.

3.2 Anforderungen an einen Pulverförderer für die Schwerelosigkeit

Die Anforderungen an einen Pulverförderer für Mikrogravitation ergeben sich aus den Bedingungen des LP-DED-Prozesses, dem Flugprofil des Einstein-Elevators sowie den Eigenschaften der Pulver. Ziel ist ein konstant und präzise regelbarer Pulvermassenstrom.

Da die Mikrogravitation im Einstein-Elevator nur vier Sekunden dauert, muss der Aufbau der Seed Sticks direkt zu Beginn dieser Phase erfolgen. Der Förderer muss deshalb schon vorher betriebsbereit sein und das Trägergas-Pulver-Gemisch bereitstellen. Anfahr- und Transportzeiten machen eine Funktion auch bei weniger als 1 g notwendig. Zudem müssen sehr kleine Massenströme kurzfristig zuverlässig gefördert werden können.

Es hat sich gezeigt, dass Pulvermassenstrom und Trägergasvolumenstrom unabhängig voneinander einstellbar sein sollten, um flexibel reagieren und den Gasverbrauch optimieren zu können. Für eine stabile Förderung wird ein Trägergasvolumenstrom von etwa 15 l/min empfohlen, um Strähnen- oder Propfenbildung im pneumatischen System zu vermeiden.

Vorversuche ergaben für Ti64 einen minimalen Pulvermassenstrom von 7,4 g/min und für Inconel 625 13,3 g/min, was einem ähnlichen Pulvervolumenstrom entspricht. Um die Fertigungseffizienz zu steigern, sollen auch deutlich höhere Massenströme möglich sein, bis zu 25 g/min für Ti64 und 45 g/min für Inconel 625. Der Vorratsbehälter muss zudem groß genug für ca. 20 Flüge ohne Nachfüllen sein.

Der Pulverförderer soll in die zentrale Steuerung eingebunden und mit einer Pulvermassenstrommessung kombinierbar sein. Alle pulverführenden Komponenten müssen antistatisch ausgelegt sein, um Störungen durch Aufladung zu vermeiden.

3.3 Prototyp Spiralkratzer

Nach der Betrachtung mehrerer Varianten wurde der Spiralkratzer als beste Variante ausgewählt. Er besteht aus einem feststehenden Oberteil mit integrierten Trägergaskanälen und einer Kratzerstruktur sowie einem dreh- und hubbeweglichen Vorratsbehälter, der das Pulver enthält. Im oberen, feststehenden Teil sind die Trägergaskanäle und die fest installierten Schlauchkupplungen untergebracht. Durch diese Anordnung kann es nicht zu einem Verdrehen oder Aufwickeln der Schläuche kommen. Die Trägergaskanäle münden in ein Steigrohr, das die Verbindung zwischen dem unteren Kratzerbereich und der Trägergaszufuhr herstellt.

Am unteren Ende des feststehenden Teils befindet sich der Kratzer, dessen spezielle Geometrie in das Pulvervolumen des darunter angeordneten Vorratsbehälters hineinragt. Während des Betriebs rotiert der Vorratsbehälter um seine Mittelachse und wird dabei gleichzeitig langsam angehoben. Ziel ist es, das Pulver zu aktivieren und gezielt zum Steigrohr zu fördern (Bild 6). Um Verdichtungen oder Verstopfungen des Pulvers zu vermeiden, folgt die Kratzerstruktur dem Verlauf einer archimedischen Spirale. Diese Geometrie zeichnet sich durch einen linearen Zusammenhang zwischen Drehwinkel und

Radius aus, wodurch konstruktiv bedingte Verengungen unterhalb des Kratzers vermieden werden.

Mit einer geeigneten Abstimmung von Hub- und Drehgeschwindigkeit des Vorratsbehälters lässt sich so ein konstanter Pulvermassenstrom im Steigrohr erzeugen. Das grundlegende Funktionsprinzip wurde mithilfe von diskreten Elementemodellierungen (DEM-Simulationen) untersucht. Die Ergebnisse bestätigen die Förderfähigkeit sowohl unter Erdschwerkraft als auch unter Mikrogravitation.

Ein wesentlicher Vorteil dieses Prinzips ist die Unabhängigkeit von Pulvermassenstrom und Trägergasvolumenstrom. Darüber hinaus erlaubt die vergleichsweise große Querschnittsfläche des Vorratsbehälters sehr geringe Hub- und Drehgeschwindigkeiten, sodass keine nennenswerte Störung der Mikrogravitation im Einstein-Elevator zu erwarten ist.

Ein Nachteil dieser Lösung besteht im unvermeidbaren Verschleiß der Dichtung, die mit dem Metallpulver in Kontakt steht. Außerdem müssen konstruktive Maßnahmen getroffen werden, um eine elektrostatische Aufladung des Vorratsbehälters zu verhindern.

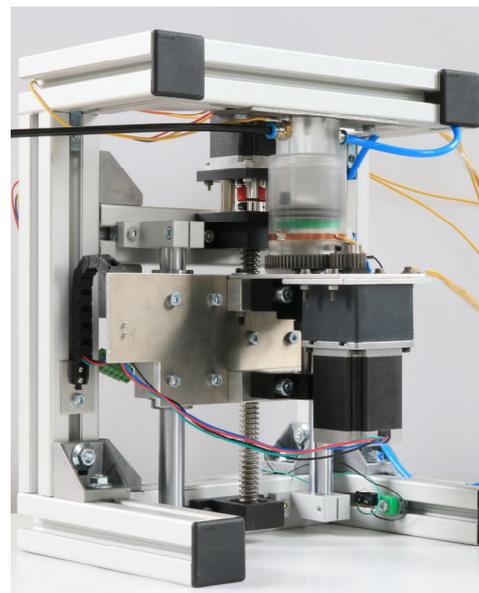
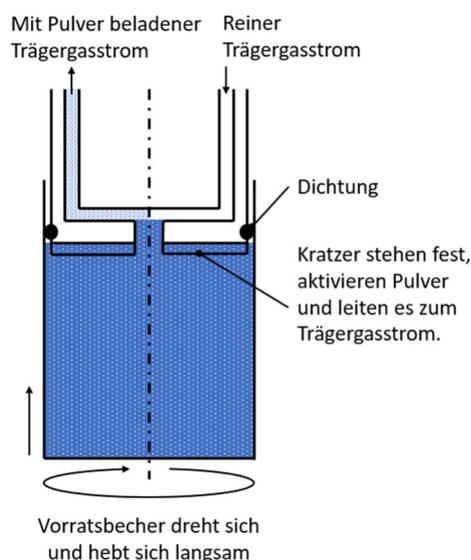


Bild 6: Spiralkratzer

links: Funktionsprinzip des Spiralkratzers; rechts: Prototypischer Aufbau des Pulverförderers nach dem Prinzip des Spiralkratzers

Der Vorratsbehälter sowie die daran angeschlossene Pneumatik des Spiralkratzer-Prototyps wurden aus Plexiglas gefertigt, um während der Förderung eine visuelle Beobachtung des Pulververhaltens zu ermöglichen. Der Kratzer selbst besteht aus PLA und wurde im FDM-Verfahren 3D-gedruckt. Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass der Kratzer leicht ausgetauscht werden kann. Dadurch besteht die Möglichkeit, bei erhöhtem Verschleiß einzelne Kratzerblätter gezielt zu ersetzen. Bild 7 zeigt die Kratzerblätter im Detail im Wartungs- bzw. Wiederbefüllungszustand des Pulverförderers.



Bild 7: Kratzergeometrie mit Kratzerblättern, die einer archimedischen Spirale folgen

Bild 6 zeigt den Gesamtaufbau des Pulverförderers mit nahezu entleertem Vorratsbehälter. Der Vorratsbehälter mit seinem Drehantrieb ist auf einem höhenverstellbaren Hubtisch montiert. Hub- und Drehbewegung können unabhängig voneinander ausgeführt werden und verfügen jeweils über eigene Antriebe. Für die Hubbewegung kommt eine Trapezgewindespindel mit direktem Schrittmotorantrieb zum Einsatz. Die Rotation des Vorratsbehälters erfolgt über einen Schrittmotor in Kombination mit einem Getriebe.

Die Wahl eines Getriebes ermöglicht die Umsetzung der sehr niedrigen Drehzahlen, die für den Betrieb erforderlich sind. Gleichzeitig wird damit sichergestellt, dass die Drehbewegung auch unter Last zuverlässig erfolgt, da eine genaue Berechnung des benötigten Antriebsmoments im Vorfeld nur schwer möglich war.

Die sehr niedrigen, geforderten Pulvermassenströme erfordern entsprechend geringe Rotationsgeschwindigkeiten beider Antriebe. Die Hubbewegung des Vorratsbehälters erfolgt mit einer Geschwindigkeit von maximal wenigen Millimetern pro Minute. Die Drehzahl des Behälters liegt im Bereich von etwa 0,5 bis wenigen Umdrehungen pro Minute. Das theoretische Verhältnis von Hub- zu Drehgeschwindigkeit kann aus dem gewünschten Pulvermassenstrom abgeleitet werden, da der Hub die durch das geförderte Pulver entstehende Leervolumenzone ausgleichen muss.

Erste praktische Versuche zeigten jedoch, dass diese theoretischen Berechnungen allein nicht ausreichen. Unterhalb des Kratzers tritt zusätzlich Schlupf im Pulver auf, was zu einer Abweichung zwischen berechnetem und tatsächlichem Fördervolumen führt. Daher wurde das optimale Verhältnis zwischen Hub- und Drehgeschwindigkeit experimentell unter Erdschwerkraftbedingungen bestimmt. Aus diesem Verhältnis ergibt sich die Möglichkeit, bei bekannter Drehzahl die passende Hubgeschwindigkeit zu berechnen – oder umgekehrt.

4 Messung des Pulvermassenstroms

4.1 Erfolgreicher erster Flug des Versuchsaufbaus im Einstein-Elevator

Der entwickelte Versuchsaufbau wurde erfolgreich im Einstein-Elevator erprobt. Dabei konnten sowohl die Funktionalität des LP-DED-Prozesses als auch die des integrierten Spiralkratzer-Pulverförderers nachgewiesen werden (siehe Bild 8). Die Analyseergebnisse des ersten unter Mikrogravitation gefertigten Seed Sticks sowie der nachfolgenden Proben werden in späteren Publikationen veröffentlicht.

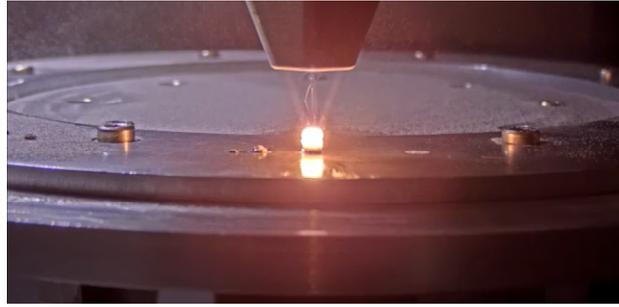


Bild 8: Erster Flug des Einstein-Elevators mit komplettem Versuchsaufbau. Sowohl LP-DED-Prozess als auch der Pulverförderer konnten in Mikrogravitation erfolgreich getestet werden.

4.2 Messaufbau zur Pulverstrommessung

Die Messung des Pulvermassenstroms erfolgt mit dem Flow Watch von Medicoat. Dieser Sensor arbeitet indirekt, indem er die Trübung des Argon-Pulver-Gemischs erfasst, das am Sensor vorbeiströmt [11]. Um aus dem gemessenen Signal den tatsächlichen Massenstrom ableiten zu können, ist eine Kalibrierung beziehungsweise Umrechnung notwendig.

Das Sensorsignal hängt von der optischen Dichte des Pulver-Gas-Gemischs ab, die wiederum sowohl vom Pulvermassenstrom als auch vom Volumenstrom des Argons bestimmt wird, da dieser die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr beeinflusst. Ein höherer Pulvermassenstrom führt zu einem stärkeren Messsignal, während ein erhöhter Trägergasvolumenstrom das Signal tendenziell verringert.

Für die Kalibrierung wurde ein Standardpulverförderer eingesetzt, bei dem Pulvermassenstrom und Trägergasvolumenstrom unabhängig voneinander eingestellt werden konnten. Das dabei aufgezeichnete Sensorsignal ist in Bild 9 anhand der roten Messpunkte dargestellt.

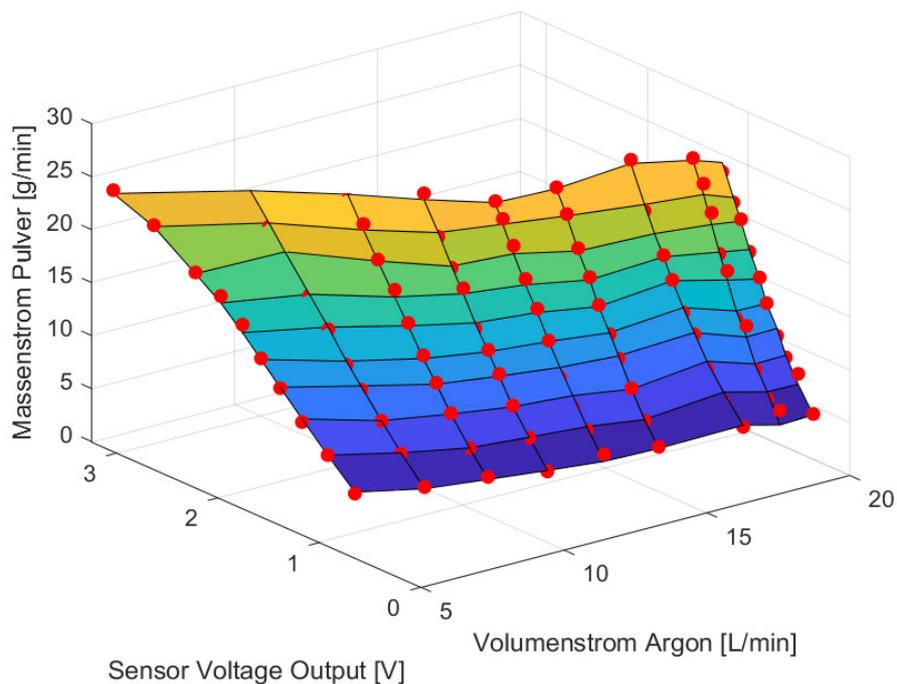


Bild 9: Sensormesswerte bei gewählten Kombinationen aus Volumenstrom und Massenstrom (rot) und die daraus ermittelte Kalibrierungsfunktion (farbige Oberfläche)

Im vorgesehenen Nutzungsbereich für Pulvermassenstrom und Trägergasvolumenstrom wurde eine Vielzahl von Messpunkten aufgenommen. Diese Datenpunkte werden mithilfe einer Oberflächenfunktion angenähert. Die Kalibrierungsfunktion ist dabei als Polynom dritten Grades mit zwei Variablen und Mischgliedern ausgelegt. Die Bestimmung der Vorfaktoren erfolgt automatisiert in Matlab und erreicht ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,993$. Damit liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den aufgenommenen Messpunkten und der berechneten Oberflächenfunktion vor. In Bild 9 ist diese Kalibrierungsfunktion als farbige Oberfläche im Vergleich zu den einzelnen Messpunkten dargestellt.

Der Pulversensor ist zwischen Pulverförderer und Pulverdüse installiert, sodass der ausgetragene Pulvermassenstrom erfasst werden kann. Für die Umrechnung des gemessenen Spannungssignals wird die ermittelte Kalibrierungsfunktion genutzt. In der Steuerung kann der tatsächlich geförderte Pulvermassenstrom damit direkt angezeigt und aufgezeichnet werden.

4.3 Messergebnisse

Während einer Versuchsreihe wurde der Pulverförderer mit einer festen Hub- und Drehgeschwindigkeit betrieben. Bei unterschiedlichen Argonvolumenströmen wurden jeweils drei Versuche in einem μg -Parabelflug im Einsteinelevator und mit genau gleichen Bedingungen im gelandeten Zustand durchgeführt. Die Messwerte sind in Abbildung 10 dargestellt.

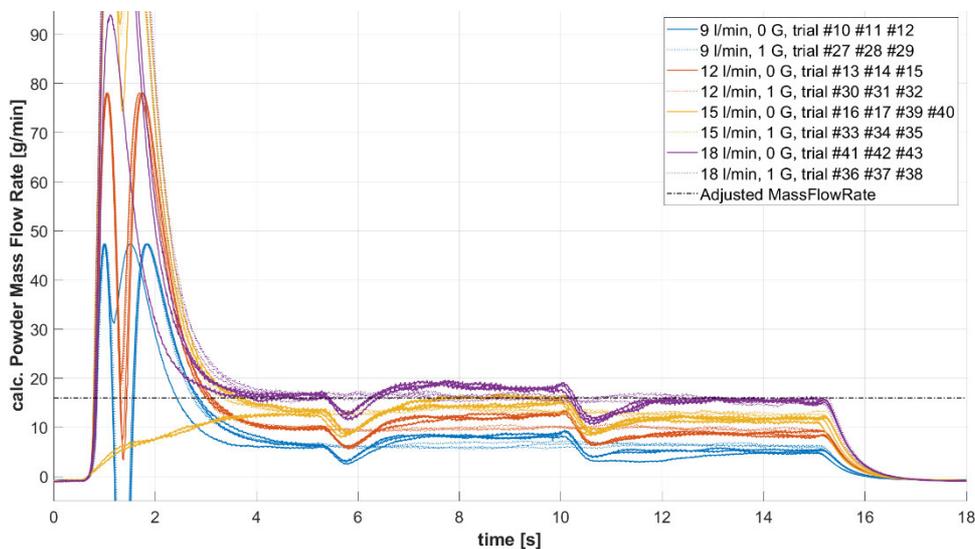


Bild 10: Vergleich der gemessenen Pulvermassenströme bei unterschiedlichen Trägergasvolumenströmen (unterschiedliche Farben) während μg -Parabelflügen (Volllinien bzw. im gelandeten Zustand (Punktlinien))

Bei den Parabelflügen zeigt sich ein deutliches Muster:

- In den ersten vier Sekunden tritt ein klarer Peak im Pulvermassenstrom auf. Hier wird vermutlich Restmaterial aus dem pneumatischen Fördersystem ausgeräumt.
- Von Sekunde 4 bis 5,5 stellt sich ein stabiler Pulvermassenstrom ein; in dieser Phase befindet sich das Experiment noch im gelandeten Zustand bei normaler Erdgravitation.

- Zwischen Sekunde 5,5 und 6 ist ein Einbruch im Pulvermassenstrom zu beobachten. Zu diesem Zeitpunkt beginnt der Parabelflug und das Experiment wird mit 5 g beschleunigt.
- Im Zeitfenster von Sekunde 6 bis 10 ist ein höheres Niveau des Pulvermassenstroms erkennbar als zuvor. Hier läuft das Experiment in der Mikrogravitation (μg -Phase) unter nahezu Schwerelosigkeit ab. Offenbar wird das Pulver dabei besser in den Trägergasstrom eingemischt und gefördert.
- Ab Sekunde 10 setzt die Bremsphase ein, was erneut zu einem Einbruch des Pulvermassenstroms führt.
- Ab ungefähr Sekunde 11 stellt sich wieder ein konstanter Pulvermassenstrom auf dem Niveau der Phase zwischen Sekunde 4 und 5,5 ein, da das Experiment wieder gelandet ist und 1 g herrscht.
- Ab etwa Sekunde 15,5 werden der Pulverförderer und der Trägergasstrom abgeschaltet, wodurch der Pulvermassenstrom vollständig zum Erliegen kommt.

Im Vergleich dazu zeigen Messungen im gelandeten Zustand ab Sekunde 4 einen durchgehend konstanten Pulvermassenstrom bis zum Abschalten von Förderung und Trägergas.

Aus den Parabelflugmessungen ergeben sich mehrere Erkenntnisse:

- Eine gleichmäßige Pulverförderung ist auch unter μg -Bedingungen möglich.
- Der Pulvermassenstrom ist in der μg -Phase größer als unter 1 g, was darauf hinweist, dass die Pulveraufnahme im Trägergas bei geringerer Schwerkraft besser funktioniert. Die genauen Ursachen werden noch durch Simulationen und weitere Versuche untersucht.
- Der geförderte Pulvermassenstrom hängt vom Trägergasvolumenstrom ab, selbst wenn der Pulverförderer mit konstanten Hub- und Rotationsgeschwindigkeiten betrieben wird. Auch dieser Zusammenhang wird noch genauer erforscht.
- Es zeigt sich, dass eine völlig schwerkraftunabhängige Pulverförderung schwierig zu realisieren ist, da insbesondere während der Beschleunigungs- und Bremsphasen deutliche Einbrüche im Pulvermassenstrom auftreten.

Obwohl die Bedingungen für die Flugförderung rechnerisch gegeben sind, werden bei unterschiedlichen Trägergasvolumenströmen unterschiedliche Pulvermassenströme transportiert. Auch hier erfolgt eine tiefere Untersuchung mit Hilfe von Simulationen.

Zusammenfassung

Das vorgestellte Projekt entwickelt einen Pulverförderer, der für den Einsatz des Laser Powder-based Directed Energy Deposition (LP-DED) Verfahrens unter Mikrogravitation geeignet ist. Herkömmliche Förderer funktionieren nur mit Schwerkraft und scheiden für Anwendungen im Weltraum aus. Kernstück des Versuchs ist der Einstein-Elevator, ein innovativer Fallturm, der Mikro- bis Hypergravitation erzeugt. Die Versuchsgondel bietet Platz für komplexe Aufbauten bis 1000 kg Nutzlast. Ein speziell entwickelter Versuchsaufbau ermöglicht Fertigungstests mit Titan- und Nickellegierungen unter kontrollierten Bedingungen. Erste erfolgreiche Flüge belegen die Funktionstüchtigkeit des

Aufbaus. Die Messergebnisse zeigen, dass unter Mikrogravitation konstante Pulvermassenströme erreicht werden können – ein wichtiger Schritt für additive Fertigungstechnologien im All.

Förderhinweis

Dieses Forschungsprojekt (Projektnummer: 456663377) wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Autoren bedanken sich bei der DFG für die finanzielle Unterstützung. Darüber hinaus danken die Autoren der DFG und der Niedersächsischen Landesregierung für die finanzielle Unterstützung beim Bau des Hannover Institute of Technology (HITec) und des Einstein-Elevators (NI1450004, INST 187/624-1 FUGB) sowie dem Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR-SI) für die Entwicklung und Bereitstellung des Experimentträgersystems.

Quellenverzeichnis:

- [1] Raupert, M.; Tahtali, E.; Sperling, R.; Heidt, A.; Lotz, C.; Overmeyer, L.: Challenges in the development of the Laser Metal Deposition process for use in microgravity at the Einstein-Elevator. Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference 2023, Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik und Photonik e.V. (WLT), 2023, doi: 10.15488/15680
- [2] Lotz, C.: Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Qualität von Experimenten unter Mikrogravitation im Einstein-Elevator. 2022, doi: 10.15488/11713
- [3] Reitz, B.; Lotz, C.; Gerdes, N.; Linke, S.; Olsen, E.; Pflieger, K.; Sohr, S.; Ernst, M.; Taschner, P.; Neumann, J.; Stoll, E.; Overmeyer, L.: Additive Manufacturing Under Lunar Gravity and Microgravity. Microgravity Science and Technology, Vol. 33, Nr. 25, 2021, doi: 10.1007/s12217-021-09878-4
- [4] Sperling, R.; Raupert, M.; Lotz, C. et al.: Simulative validation of a novel experiment carrier for the Einstein-Elevator. Sci Rep 13, 19366, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-46483-4
- [5] Raudonis, M. et al.: Microgravity facilities for cold atom experiments. Quantum Sci. Technol. 8, 044001, 2023, doi: 10.1088/2058-9565/ace1a3
- [6] Raupert, M.; Pusch, M. et al.: Laser Metal Deposition with Metal Powder in Microgravity. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022, Dresden, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., doi: 10.25967/570466
- [7] Lotz, C. et al.: Einstein-Elevator: A new facility for research from μg to 5g. Gravitational and Space Research, 2017, doi: 10.2478/gsr-2017-0007
- [8] Mahamood, R. M.: Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials. Engineering Materials and Processes, Springer International Publishing, Cham, 1st edition, 2018 edition, 2018. ISBN: 9783319649856, doi: 10.1007/978-3-319-64985-6
- [9] GTV Verschleißschutz mbH (Hrsg.): Pulverförderer Serie PF: Für jede Anwendung die passende Lösung [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gtv-mbh.de/>
- [10] GTV Verschleißschutz mbH (Hrsg.): Original Betriebsanleitung Pulverförderer [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gtv-mbh.de/>
- [11] Mauer, G.; Rauwald, k.-H.; Mücke, R.; Vaßen, R.: Monitoring and Improving the Reliability of Plasma Spray Processes. Journal of Thermal Spray Technology, Jg. 26, Nr. 5, S. 799–810, 2017, doi: 10.1007/s11666-017-0559-0

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

**Experimentelle Evaluation der Effizienzsteigerung durch
elektrostatische Tropfenaufladung in der
Nassentstaubung beim Schüttgutumschlag**

Marcus Weidemann

Eberhard Schmidt



Marcus Weidemann, M. Sc.
Institut für Partikeltechnologie
Bergische Universität Wuppertal
Rainer-Gruenter-Str. Geb. FF
42119 Wuppertal

Experimentelle Evaluation der Effizienzsteigerung durch elektrostatische Tropfenaufladung in der Nassentstaubung beim Schüttgutumschlag

Beim Förderbandabwurf von Schüttgütern entsteht Staub. Es konnte gezeigt werden, dass bei gleichem Stoff, allein durch Änderung der Partikelgröße, die Staubentstehung an anderer Stelle und in anderer Art abläuft. Art und Ort der Staubentstehung spielen eine entscheidende Rolle bei der elektrostatisch unterstützten Nassentstaubung. Löst sich Staub von größeren Partikeln ab, z. B. beim Aufprall auf die Schüttung, kann dies durch vorherige Benetzung wassersparend vermieden werden. Hier konnte jedoch keine Verbesserung durch die elektrostatische Aufladung des Wassers erzielt werden. Für Schüttgüter, die als Agglomerate aus feinen Primärpartikeln vorliegen, war die Staubunterdrückung nicht möglich. Es wurde jedoch gezeigt, dass bei einer nachträglichen Abscheidung von luftgetragendem Staub mittels Wassernebel eine deutliche Effizienzsteigerung durch die elektrostatische Aufladung der Tropfen ermöglicht wird.

1 Einleitung

Um die Effizienzsteigerung durch elektrostatisch beeinflussten Wassernebel in der Staubunterdrückung und in der Staubabscheidung zu untersuchen, ist ein grundlegendes Verständnis der wirkenden Mechanismen notwendig. Zur Verbesserung der Staubunterdrückung sind dazu die Staubfreisetzungsmechanismen von Interesse, für die Staubabscheidung die der Anlagerung von Partikeln an Kollektoren.

Zur Staubfreisetzung aus Schüttgütern gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen für unterschiedliche Schüttgüter und Anwendungsfälle. Allgemeingültige Modelle konnten jedoch noch nicht etabliert werden. Im Kontext dieser Arbeit sind die Ansätze von Antonyuk [1] sowie von Schulz und Woschny [2] besonders hervorzuheben. Antonyuk hat die Partikelfreisetzung beim Aufprall von einzelnen Granulaten untersucht. Dabei zerbricht das Ausgangsgranulat in Fragmente, die dann als Staub auftreten können. Die Partikelgrößenverteilung der Fragmente hängt dabei von der Aufprallgeschwindigkeit ab. Schulz und Woschny betrachten einzelne mit Staub beladene Grobpartikel. Beim Aufprall löst sich, abhängig von der Geschwindigkeit, unterschiedlich viel Staub ab. In beiden Arbeiten werden einzelne Granulate bzw. beladene Grobpartikel im Moment des Aufpralls mittels Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt und es werden entsprechende DEM- bzw. DEM/CFD-Modelle erstellt. Für beide Ansätze fehlt bisher ein vollständiger Übertrag der Einzelpartikelbetrachtung auf das Verhalten realer Schüttgüter. Wobei dies für letzteren zumindest im Labormaßstab bereits teilweise erfolgt ist [3].

Die Abscheidung von Partikeln aus Luft ist gut untersucht und verstanden. Nähert sich eine luftgetragene Partikel einem Kollektor, dies könnten z. B. die Faser eines Filters oder ein Tropfen im Wassersprühnebel sein, kommen Diffusions-, Trägheits- und optional elektrostatische Effekte zum Tragen [4]. Diffusionskräfte sind im Bereich kleiner etwa $0,1 \mu\text{m}$ besonders wirksam, Trägheitskräfte im Bereich größer etwa $0,5 \mu\text{m}$. Dazwischen ergibt sich ein Abscheideminimum, in dem Partikeln nicht oder nur unvollständig abgeschieden werden. Wirken zusätzlich elektrostatische Kräfte, kann dieses Minimum abgeschwächt werden. Zillgitt [5] konnte zeigen, dass der Einsatz von elektrostatisch unterstützten Zweistoffdüsen grundlegend geeignet ist, um die Abscheidung bei der

Nassentstaubung zu verbessern.

In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen im Windkanal vorgestellt. Begonnen wird mit der Staubfreisetzung aus gemahlene sowie gesiebte Kalksteinfraktionen. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden zur Interpretation von Versuchsergebnissen aus dem Bereich der Staubunterdrückung durch Benetzung mit Wasser am Förderbandabwurf sowie dem Bereich der Staubabscheidung durch nachträgliche Behandlung des luftgetragenen Staubs genutzt.

2 Methoden und Materialien

2.1 Verwendete Schüttgüter und Stäube

Als Versuchsmaterial wurde der Kalkstein Ulmer Weiß (UW) < 99 % CaCO_3 der Firma Eduard Merkle in den Varianten XMF ($x_{10,3} = 1,94 \mu\text{m}$, $x_{50,3} = 3,63 \mu\text{m}$, $x_{90,3} = 5,49 \mu\text{m}$, optischer Durchmesser aus Laserbeuger trocken dispergiert) und 0,5-1,2 ($x_{10,3} = 648 \mu\text{m}$, $x_{50,3} = 981 \mu\text{m}$, $x_{90,3} = 1470 \mu\text{m}$) ausgewählt. UW 0,5-1,2 weist eine bimodale Verteilung auf, wobei sich 1,34 % der Masse eng verteilt im Bereich um einen Modalwert von $2,6 \mu\text{m}$ als Feingutpartikeln befinden. Unter dem Auflichtmikroskop ist zu sehen, dass es sich bei 0,5-1,2 um grobe Partikeln handelt, die mit Feingutpartikeln beladen sind.

2.2 Windkanalversuchsstand

Verwendet wird ein Windkanal mit einer Länge von 23 m (siehe Bild 1). Der quadratische Querschnitt hat eine Kantenlänge zwischen 1 m an Einlass und Messstelle und 1,7 m an der Abwurfstelle. Der gesamte Kanal ist aus Blech gefertigt und geerdet.

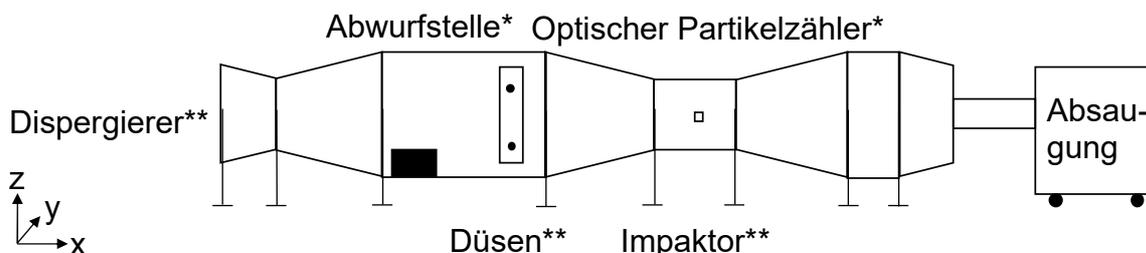


Bild 1: Skizze des Windkanals mit Aufbauten für *Staubfreisetzung / -unterdrückung und **Staubabscheidung

Der Kanal besteht aus fünf Segmenten (siehe Bild1). Der Einlass, einschließlich Übergangsstück, ist 2,5 m lang. Das zweite Segment umfasst die Abwurfstelle und vier elektrostatisch unterstützte Zweistoffdüsen (Model Max Charge der Firma ESS). Es ist einschließlich Übergang 8,2 m lang. Im dritten Segment befinden sich isokinetische Probenahmestellen für den optischen Partikelzähler (OPZ, Grimm 1.109 bzw. 11-A mit Verdünnungsstufe) und den Kaskadenimpaktor (Dekati DLPI+). Das fünfte Segment besteht aus einem Lamellenabscheider mit nachgeschalteter Drosselklappe. Anschließend folgt die Absaugung mit Frequenzumrichter und Filter. Die Strömungsgeschwindigkeit an der Abwurfstelle ist aufgrund des größeren Kanalquerschnitts um den Faktor drei kleiner als an Einlass und Abwurfstelle.

Für die Versuche zur Staubfreisetzung ist auf dem Windkanal ein Förderband positioniert (Länge 140 cm, Breite 11,5 cm, Geschwindigkeit $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bis $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Dies wird von einem Schneckendosierer (Brabender DDW-M-FW80) mit einem einstellbaren konstanten Schüttgutmassenstrom beschickt. Unter dem Windkanal befindet sich eine mit Wasser befüllte Wanne (siehe Bild 2). Für die Beanspruchungsart „Wanne“ fällt das Schüttgut vom Förderband durch die Querströmung des Windkanals in die Wanne. So kann der Staubaustrag während des angeströmten Falls isoliert ohne Aufpralleffekte betrachtet werden. In der Wanne ist eine Wasserdüse eingebaut, die entstehende Schüttguthaufen verteilen und unter der Wasserlinie halten kann. Für die Beanspruchungsart „Teller“ wird ein 13 cm hoher Teller mit 20 cm Durchmesser in die Wanne gestellt. Darauf kann sich ein konstanter Schüttkegel bilden, während überschüssiges Material in das Wasser fällt. So kann der Staubaustrag beim angeströmten Fall auf eine Schüttung aus konstanter Abwurfhöhe gemessen werden.

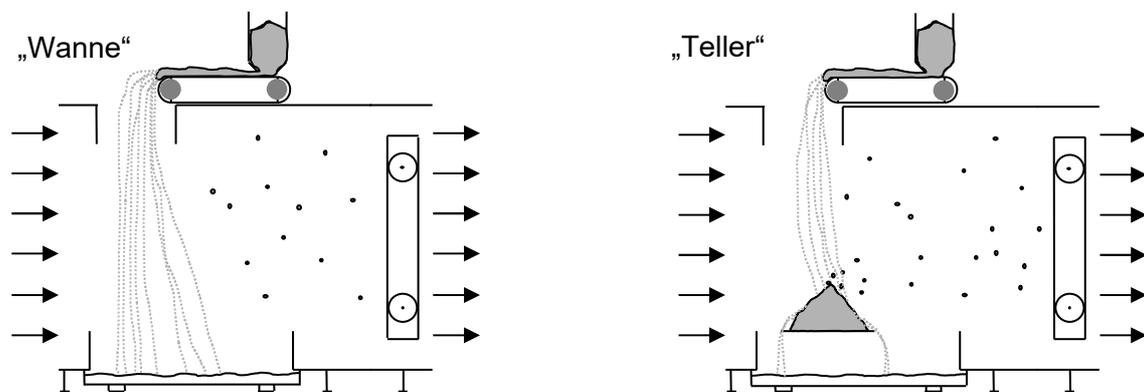


Bild 2: Varianten der Versuchsaufbauten an der Abwurfstelle
(Schneckendosierer zur Befüllung des Förderbandes nicht eingezeichnet)

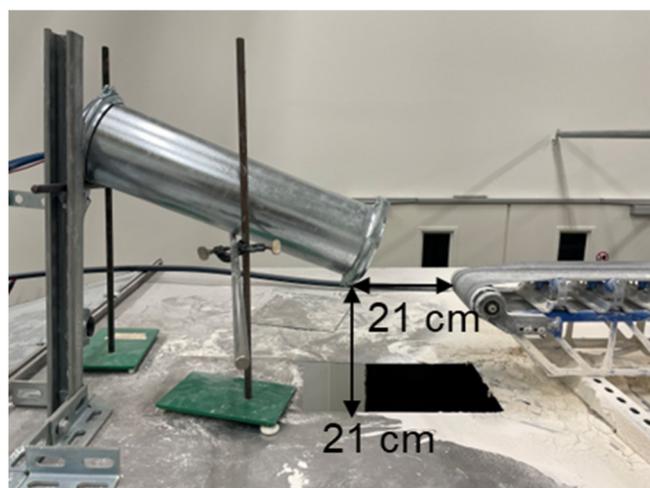


Bild 3: Düsenrohr, ausgerichtet auf Förderbandabwurfstelle zur Staubunterdrückung

Zur Staubunterdrückung wird eine, mittig in einem Rohr (Länge 52 cm, Durchmesser 17 cm) eingebaute, Max Charge Zweistoffdüse im 15° Winkel auf die Abwurfstelle gerichtet (siehe Bild 3). Das Rohr ist hinten verschlossen und vorn mit einem Drahtgewebe versehen,

so wird der austretende Sprühstrahl auf einen größeren Austrittsquerschnitt aufgeweitet und so die Austrittsgeschwindigkeit stark reduziert.

Für die Staubabscheidungsversuche werden Wanne und Abwurfstelle mit Blechen abgedeckt. Am Kanaleinlass wird ein Topas Feststoffaerosolgenerator mit Druckluftdispergierung eingesetzt.

2.3 Messabläufe

2.3.1 Staubfreisetzung

Für beide Schüttgüter wird die Strömung an der Messstelle in vier Stufen ($0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) und der Massenstrom in drei Stufen ($30 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $65 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ für XMF und $120 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $260 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, $400 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ für 0,5-1,2) variiert. Jeder Parametersatz der resultierenden Versuchsmatrix wird zwei Minuten gehalten und jeweils fünffach wiederholt. Die Bandgeschwindigkeit beträgt $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Die anzahlbezogene, nach Partikelgröße aufgelöste Staubkonzentration wird mit dem OPZ gemessen und anschließend via Momentenmethode, unter der Annahme kugelförmiger Partikeln mit der Dichte $2,68 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, in Massenkonzentration und massenbezogene Partikelgrößenverteilung umgerechnet. Die Staubmassenkonzentration wird mit dem Volumenstrom multipliziert, um die zeitbezogene Staubfracht zu berechnen. Der Volumenstrom ist das Produkt aus eingestellter Strömungsgeschwindigkeit an der Messstelle und dem Querschnitt von $0,984 \text{ m}^2$. Abschließend wird die Staubfracht durch den eingestellten Schüttgutmassenstrom am Band geteilt, um die Freisetzungsrates (Staubmasse pro Schüttgutmasse) zu berechnen.

2.3.2 Staubunterdrückung

Die Schüttgüter werden in der Variante „Teller“ abgeworfen. Es werden jeweils Messsequenzen mit sieben Abschnitten durchlaufen: A1 Nullmessung, A2 Zweistoffdüsen an, A3 Zweistoffdüsen mit Elektrostatik, A4 Bandabwurf, A5 Bandabwurf mit Zweistoffdüse, A6 Bandabwurf mit Zweistoffdüse und Elektrostatik und A7 Nullmessung. Jeder Abschnitt wird mindestens zwei Minuten gehalten. Der Minderungsgrad wird mit Formel (1) berechnet. Da im OPZ Tropfen und Partikeln nicht unterschieden werden können, wird die Tropfenkonzentration bei reinem Düseneinsatz aus dem Minderungsgrad herausgerechnet.

$$E(x)_{\text{Minderung}} = 1 - \frac{c_{D+B}(x) - c_D(x)}{c_B(x)} \quad (1)$$

Einbezogen werden die Staub- und Tropfenkonzentration bei Bandabwurf und gleichzeitigem Düseneinsatz c_{D+B} (A5 bzw. A6), die Tropfenkonzentration bei alleinigem Düseneinsatz c_D (A2 bzw. A3) und die Staubkonzentration beim ungeminderten Bandabwurf c_B (A4). Die Laufvariable x bezeichnet die jeweilige Partikelgrößenklasse des OPZ. Die Messungen werden jeweils dreifach wiederholt. Der Minderungsgrad wird anschließend gemittelt.

2.3.3 Staubabscheidung

Es werden Messsequenzen analog zur Staubunterdrückung fünffach durchlaufen. Anstatt des Bandabwurfs wird jedoch gezielt Staub dispergiert. In den Abschnitten der Dispergierung bei gleichzeitiger Minderung wird zusätzlich der Impaktor zur Messung eingesetzt. Die Messintervalle werden auf mindestens zehn Minuten verlängert, um gravimetrisch erfassbare Massen auf den einzelnen Impaktorstufen generieren zu können. Der Abscheidegrad wird mit Formel (2) berechnet. Da die Wassertropfen im Impaktor, und damit vor dem Wiegen, verdunsten, müssen die Tropfenkonzentrationen hier nicht herausgerechnet werden.

$$E(x)_{\text{Abscheidung}} = 1 - \frac{m_{D+S}(x) \cdot \dot{m}_S}{m_S(x) \cdot \dot{m}_{D+S}} \quad (2)$$

Einbezogen werden die gewogene Staubmasse in der Partikelgrößenklasse (x) des Impaktors für gleichzeitigen Düseneinsatz und Staubdispergierung $m_{D+S}(x)$, der dispergierte gemittelte tatsächliche Staubaufgabemassenstrom während der reinen Staubdispergierung \dot{m}_S , die gemessene Staubmasse während der ungeminderten Staubdispergierung $m_S(x)$ und der dispergierte Staubaufgabemassenstrom während der Staubdispergierung bei gleichzeitigem Düseneinsatz \dot{m}_{D+S} . Die gewogenen Staubmassen aus den Fünffachmessungen werden gemittelt. Aus den gemittelten Massen wird der Fraktionsabscheidegrad berechnet.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Staubfreisetzung beim Förderbandabwurf

Die Freisetzungsrates, also die pro abgeworfener Schüttgutmasse freigesetzte und bis zur Messstelle transportierte Staubmasse, ist in Bild 4 für beide Schüttgüter und Belastungsarten über die eingestellte Strömungsgeschwindigkeit aufgetragen. Für XMF (durchgezogene Linien) ist zu sehen, dass die Freisetzungsrates für den angeströmten Abwurf mit Aufprall auf die Schüttung „Teller“ nur leicht über dem ohne Aufprall „Wanne“ liegt. Dies zeigt, dass für das feinkörnig gemahlene XMF die Staubfreisetzung hauptsächlich während des Fallens stattfindet. Hierbei ist ein Einfluss der Anströmungsgeschwindigkeit auf die Freisetzungsrates im untersuchten Bereich innerhalb der Messunsicherheit nicht nachweisbar. Für das grobkörnig gesiebte 0,5-1,2 (gestrichelte Linien) ist die Freisetzungsrates mit Aufprall ein bis zwei Größenordnungen größer als die ohne, wobei die Freisetzungsrates ohne Aufprall „Wanne“ exponentiell mit der Anströmung ansteigt. Mit Aufprall gibt es erst einen Anstieg, der jedoch asymptotisch ausläuft. Durch die unterschiedlichen Verläufe nähern sich die Freisetzungsrates für 0,5-1,2 mit und ohne Aufprall mit zunehmender Strömung an, der Abstand bleibt jedoch signifikant.

Das grundlegend unterschiedliche Verhalten des gemahlene und des gesiebte Kalksteins deuten auf verschiedene Staubfreisetzungsmechanismen hin. Unter dem Auflichtmikroskop ist zu sehen, dass 0,5-1,2 aus groben, mit Staub beladenen Partikeln besteht. Diese können durch den Modellansatz von Schulz und Woschny näherungsweise dargestellt werden [2]. Der große Unterschied mit und ohne Aufprall zeigt, dass die Staubfreisetzung bei diesem Material hauptsächlich beim Aufprall auf die Schüttung statt-

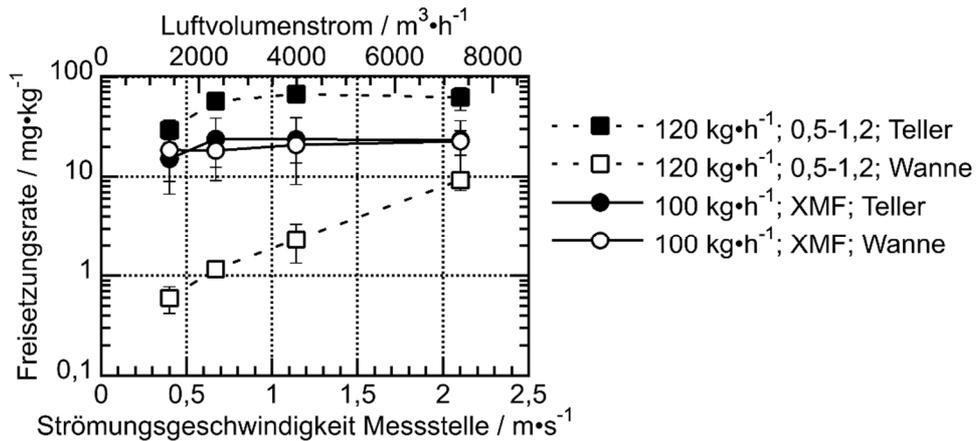


Bild 4: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Freisetzungsrate bei unterschiedlichen Materialien und Beanspruchungsarten; Unsicherheitsindikatoren entsprechen einfacher Standardabweichung aus Fünffachmessung

findet. Dabei wird die Staubbelastung auf den Grobpartikeln beim Aufprall teilweise oder vollständig abgeworfen (siehe Bild 5). Dies kann den asymptotischen Verlauf von 0,5-1,2 „Teller“ teilweise erklären, da es eine maximale abzuwerfende Staubmenge gibt. Die gemessene Freisetzungsrate von $64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ bei $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ liegt jedoch deutlich unter dem potenziellen Staubgehalt von 1,34 % ($13400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), der als Feingutmodus im 0,5-1,2 Material vorliegt. Ein möglicher Erklärungsansatz für die Diskrepanz ist, dass neben den Freisetzungsmechanismen auch Abscheidungs- und Wiederanlagerungsmechanismen in den realen Schüttgütern wirken. So wird ein Teil der abgelösten Staubpartikeln nach unten in den Schüttguthaufen abgeworfen werden, wo er sich wieder an die ruhenden Schüttgutpartikeln anlagert. Ein Teil der nach oben abgeworfenen Staubpartikeln kann an nachkommenden Grobpartikeln im fallenden Schüttgutstrang abgeschieden werden. Die starke Dynamik für 0,5-1,2 im angeströmten Fall ohne Aufprall „Wanne“ ist durch eine, durch die Strömung induzierte, stärker werdende Partikel-Partikel-Kollisionsintensität in der Luft zu erklären. Schulz [2] sagt hier einen nahezu exponentiellen Anstieg der Staubablösung mit der Kollisionsgeschwindigkeit im Bereich niedriger Kollisionsgeschwindigkeiten voraus. Auch für 0,5-1,2 ist ein exponentieller Anstieg der Staubfreisetzung mit der Strömungsgeschwindigkeit im freien Fall zu beobachten. Zusätzlich zu den beschriebenen Abscheidungs- und Wiederanlagerungsmechanismen ist zwischen Abwurf- und Messstelle von einem Materialverlust durch Sedimentation auszugehen. Das anhaftende Feingut im Größenbereich von $2,6 \mu\text{m}$ ist als Einzelpartikel zwar potentiell lange luftgetragen, es kann jedoch nicht von einer vollständigen Vereinzelung der Feingutpartikeln beim Abwurf von den Grobpartikeln ausgegangen werden. Dies begünstigt die Sedimentation eines Teils des abgeworfenen Materials.

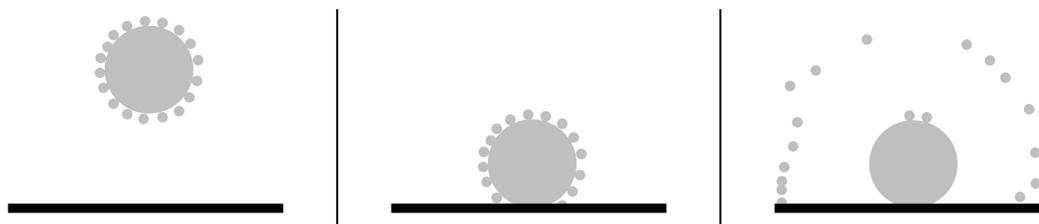


Bild 5: Schema Aufprall von 0,5-1,2 Partikel mit Staubanlagerung auf Boden mit Staubablösung

Die direkte Beobachtung des fallenden XMF zeigt, dass es in losen Agglomerat-Strukturen innerhalb eines mehr oder weniger definierbaren Strangs fällt. Der geringe Unterschied in der Freisetzungsrates mit und ohne Aufprall zeigt, dass die Staubfreisetzung hauptsächlich während des Fallens stattfindet (vgl. modellhafte Darstellung in Bild 6). Stoßen zwei Agglomerate in der Luft zusammen, werden diese zerschlagen, wodurch Staub freigesetzt wird. Der grundlegende Wirkmechanismus wird im Modell von Antonyuk [1] für Granulate beschrieben. Es ist jedoch anzumerken, dass die Haftkräfte innerhalb der gezielt hergestellten Granulate im Modell deutlich höher sein dürften als in den losen Agglomerat-Strukturen, die beim Förderbandabwurf entstehen. Durch die geringen Haftkräfte wird ein Agglomerat bereits bei geringer Zusammenstoßgeschwindigkeit vollständig zerstört. Dies kann die geringe Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit erklären, dass die höhere Strömung zwar zu potentiell höheren Stoßgeschwindigkeiten führen kann, dadurch jedoch keine weitere Staubfreisetzung entsteht. Die Agglomerat-Struktur kann ebenfalls die geringe Staubfreisetzung beim Aufprall erklären. Prallt ein loses Agglomerat auf einen Widerstand, z. B. einen Schüttguthaufen, wird es vollständig deformiert, was einem plastischen Stoß entspricht. Dabei entsteht keine Rückstoßenergie, die Staubpartikeln gegen die Aufprallrichtung abwerfen könnte. Dies begünstigt eine Anlagerung der Staubpartikeln in der ruhenden Schüttung und verhindert eine zusätzliche Staubfreisetzung beim Aufprall.

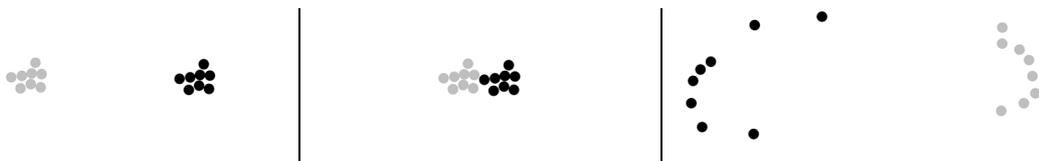


Bild 6: Schema Kollision von XMF-Agglomeraten und Dispergierung in der Luft

Im Weiteren werden die diskutierten Modellansätze der Staubfreisetzung genutzt, um das unterschiedliche Verhalten von XMF und 0,5-1,2 bei der Staubunterdrückung zu erklären.

3.2 Staubunterdrückung durch Benetzung an der Abwurfstelle

Die Minderung der Staubfreisetzung, durch Besprühen mit Wasser an der Abwurfstelle mit und ohne Elektrostatik, als Funktion der Partikelgröße ist in Bild 7 für die beiden getesteten Schüttgüter dargestellt. Es wird jeweils ein exemplarischer Parametersatz für den angeströmten freien Fall einschließlich Aufprall „Teller“ dargestellt. Für 0,5-1,2 sind durchgängig hohe Minderungsgrade ($> 88\%$ im Bereich über $1\ \mu\text{m}$) zu sehen. Der Gesamtminderungsgrad für 0,5-1,2 ist 92% ($\pm 1,0\%$) beim Einsatz von Wasser und 89% ($\pm 0,7\%$) beim Zuschalten der Elektrostatik. Für XMF sind die Minderungsgrade sehr durchwachsen. Im Größenbereich zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$ variiert der Minderungsgrad zwischen -71% ($\pm 7,5\%$) und 37% ($\pm 15\%$). Insbesondere die deutlich negativen Minderungsgraden im Bereich $2\ \mu\text{m}$ und $2,5\ \mu\text{m}$ sind hier interessant, da sich hier ein großer Massenanteil des luftgetragenen XMF befindet. Der Gesamtminderungsgrad für XMF ist -29% ($\pm 18\%$) beim Einsatz von Wasser und -96% ($\pm 52\%$) beim Zuschalten der Elektrostatik.

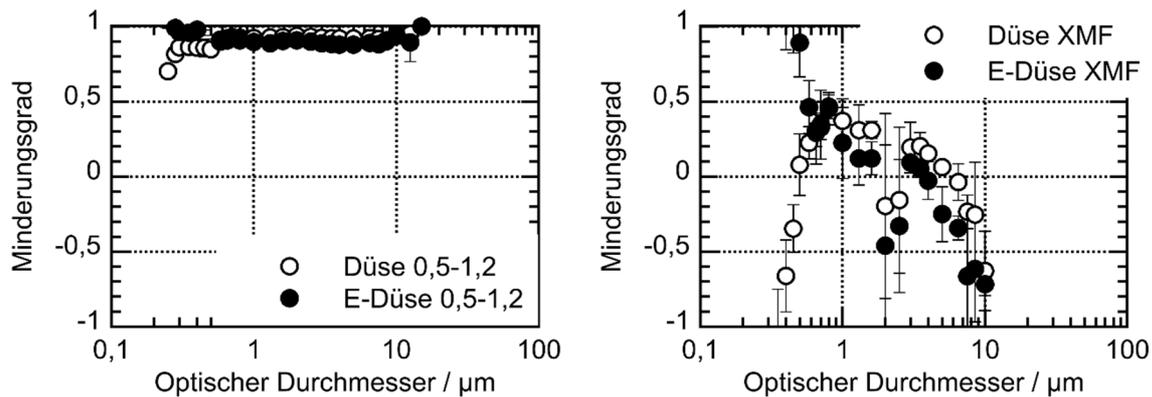


Bild 7: Staubminderung als Funktion der Partikelgröße für den Abwurf auf „Teller“, bei Besprühen der Abwurfstelle auf dem Band, mit und ohne Elektrostatik; Strömung an Messstelle $1,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Wassereinsatz $2,5 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$ bzw. $10 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$; links für 0,5-1,2 ($260 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$), rechts für XMF ($100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$); Unsicherheitsindikatoren entsprechen einfacher Standardabweichung aus Dreifachmessung

Die hohen Minderungsgraden für 0,5-1,2 von teils 90 % und höher sind an dieser Stelle lediglich als Funktionsnachweis zu interpretieren. In einer übergeordneten Messkampagne, in der Düsenposition, Kanalströmung, Beanspruchungsart und Abwurfmenge variiert wurden, ergeben sich auch für dieses Material teils sehr geringe bis negative Minderungsgrade. Insgesamt liegt der Minderungsgrad bei beiden Materialien für den Einsatz der elektrostatisch unterstützten Staubunterdrückung unter dem ohne Elektrostatik. Daraus ergibt sich, dass die Elektrostatik auf die Staubunterdrückung durch Benetzung mit Wasser insgesamt einen leicht negativen Effekt hat. Die Annahme, dass durch eine unipolare Tropfenladung eine gegenseitige Abstoßung der Tropfen zu einer gleichmäßigeren Benetzung des Schüttguts und damit zu einer verbesserten Staubunterdrückung führt, konnte somit nicht bestätigt werden. Im Gegenteil ist hier ein negativer Effekt zu erklären. Ein möglicher Ansatz ist, dass geladene Tropfen-Partikel-Agglomerate weniger leicht an größeren, durch die Benetzung ebenfalls gleichpolig geladenen Strukturen wieder anlagern können, wodurch sie häufiger in der Luft verbleiben. Zusätzlich kann die Elektrostatik innerhalb einer Agglomerat-Struktur bzw. eines Grobgut-Feingut-Systems zu abstoßenden Kräften führen, was einen Partikelaustrag begünstigt.

Die deutlich negativen Minderungsgrade, die hier für XMF dargestellt sind, können durch einen Dispergierungseffekt erklärt werden, bei dem durch die Druckluft der Zweistoffdüse zusätzliche Stöße zwischen Agglomeraten entstehen, was die Staubbefreiung begünstigt. Aufgrund der losen Agglomerat-Struktur des fallenden XMF, vgl. Bild 7, kann eine oberflächliche Benetzung mit Wasser nur wenig zur Stabilisierung dieser Agglomerat-Strukturen beitragen. Die negativen Abscheidegrade sind damit zu erklären, dass die dispergierenden deutlich stärker als die stabilisierenden Effekte sind.

Da beim gröberen 0,5-1,2 die Staubbefreiung durch Ablösung von an der Oberfläche anhaftendem Feingut entsteht (vgl. Bild 5), kann eine oberflächliche Benetzung hier eine deutliche Reduktion der Staubbefreiung bewirken. Bei ungünstigen Bedingungen können jedoch auch für 0,5-1,2 die Dispergierungseffekte stärker als die Benetzungseffekte sein. Prinzipiell ist eine Staubunterdrückung durch Benetzung mit Wasser vor Abwurf vom Förderband für das Schüttgut 0,5-1,2 jedoch effektiv möglich.

3.3 Nachträgliche Staubabscheidung

Die Staubabscheidung im Sinne einer nachträglichen Entfernung von bereits luftgetragenen Staub wird für gezielt dispergiertes XMF an einem konkreten Parametersatz in Bild 8 dargestellt. Da die Partikelgrößenverteilung des luftgetragenen XMF praktisch identisch ist mit der luftgetragenen Staubfraktion, die bei der Staubfreisetzung aus 0,5-1,2 gemessen wird, ist XMF ein geeignetes Stoffmodell, um beide Materialien abzubilden. Mit und ohne Elektrostatik ist zu sehen, dass bei Partikelgrößen kleiner $0,3 \mu\text{m}$ Abscheidegrade zwischen 25 % und 65 % erreicht werden. Im Bereich zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$ sinkt der Abscheidegrad auf -17 % ohne bzw. 7 % mit Elektrostatik ab. Anschließend steigt der Abscheidegrad für beide Fälle an. Über den gesamten Bereich wird durch die elektrostatische Unterstützung eine, teils signifikante, Erhöhung des Abscheidegrads erzielt. Der Gesamtabscheidegrad wird in diesem Fallbeispiel von 12 % ($\pm 11 \%$) auf 26 % ($\pm 9 \%$) erhöht. In der Berechnung des Abscheidegrads wird nicht berücksichtigt, dass von den $92 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$ am Kanaleinlass dispergiertem Staub auch ohne Minderungsmaßnahme lediglich $48 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$ an der Messstelle ankommen. Dieser Materialverlust wird durch Staubablagerungen vor allem auf dem Windkanalboden aber auch an den Wänden und der Decke sichtbar und erklärbar.

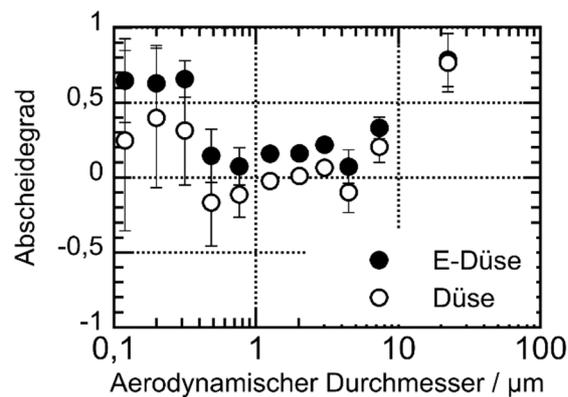


Bild 8: Fraktionsabscheidegrad für die nachträgliche Staubabscheidung von XMF; Strömung an Messstelle $1,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Staubaufgabe $92 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}$, Wassereinsatz $10,1 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$ bzw. $40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$; Unsicherheitsindikatoren entsprechen 68,3 % Konfidenzintervall

Die Ergebnisse unterstützen die theoretische Betrachtung [4, 5], nach der im Bereich $< 0,3 \mu\text{m}$ luftgetragene Partikeln gut durch Diffusionskräfte und im Bereich $> 1 \mu\text{m}$ zunehmend gut durch Trägheitskräfte abgeschieden werden können. Im Übergangsbereich entsteht ein Abscheideminimum, das durch den Einsatz von Elektrostatik abgeschwächt werden kann. Die teils negativen Abscheidegrade beim Einsatz von ungeladenem Wasser im Bereich zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$ können durch zwei Effekte erklärt werden. Zum einen bewegen sich die porösen Kalksteinpartikeln durch einen Tropfennebel und damit durch mit Feuchtigkeit gesättigte Luft, wodurch es zu Kondensation und Einlagerung von Wasser in den Partikeln kommen kann. Zum anderen können sich feinere Partikeln aus dem Bereich $> 0,3 \mu\text{m}$ an Wassertropfen zusammenschließen und so einer größeren Partikelklasse zugeordnet werden, die im Bereich des Abscheideminimums stabil in der Luft bleibt.

Insgesamt ist zu sehen, dass durch den Einsatz der Elektrostatik der Abscheidegrad erhöht werden kann, wobei der verstärkende Effekt besonders im Bereich des ansonsten schwer zu behandelnden Abscheideminimums signifikant ist.

Zusammenfassung

Zur experimentellen Untersuchung der Effizienzsteigerung beim Einsatz von elektrostatisch beeinflusstem Wassernebel in der Nassentstaubung beim Förderbandabwurf von Schüttgütern wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt.

Es wurde gezeigt, dass die Staubfreisetzung bei getrocknetem Kalkstein durch Änderung der Partikelfraktion von fein gemahlenem XMF zu gebrochenem und gesiebttem Material der Größenklasse 0,5 mm bis 1,2 mm grundlegend geändert wird. Das fein gemahlene XMF staubt vorrangig bei Zusammenstößen loser Agglomerate in der Luft. Beim 0,5-1,2 Material hingegen werden an Grobpartikeln anhaftende Feingutpartikeln vorrangig beim Aufprall auf die Schüttung freigesetzt.

Für 0,5-1,2 konnte durch Benetzen des Schüttguts an der Förderbandabwurfstelle mit $38 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Wasservolumen pro Schüttgutmasse) die Ablösung der Feingutpartikeln und damit die Staubfreisetzung um 92 % reduziert werden. Es ist jedoch anzumerken, dass diese hohe Minderungsrate bereits durch kleine Änderungen im Versuchsaufbau deutlich ins Negative fallen kann.

Bedingt durch die andersartige Staubfreisetzung ist für das feinkörnige XMF eine Staubunterdrückung allein durch Benetzen mit Wasser nicht effizient möglich. Hier ist eher eine zusätzliche Staubentwicklung durch die für die Zweistoffdüsen notwendige Druckluft zu beobachten. Im aufgezeigten Beispiel sind die Minderungsgrade deutlich negativ, was einer zusätzlichen Staubaufwirbelung entspricht.

Für beide Materialien hat die elektrostatische Aufladung der Tropfen einen negativen Effekt auf die Staubunterdrückung und ist für diesen Anwendungsfall zu vermeiden.

Bei der nachträglichen Staubabscheidung kann durch die Elektrostatik jedoch eine deutliche Verbesserung des Abscheidegrads erzielt werden. So konnte bei konstanter Wassersprühkonzentration von $10 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$ der massenbezogene Gesamtabseidegrad von 12 % auf 26 % deutlich erhöht werden. Für die nachträgliche Staubabscheidung ist der Einsatz der Elektrostatik folglich zu empfehlen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Antonyuk, S.; Khanal, M.; Tomas, J.; Heinrich, S.; Mörl, L.: Impact breakage of spherical granules: Experimental study and DEM simulation. *Chemical Engineering and Processing* 45, p. 838–856, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2005.12.005>
- [2] Schulz, D.; Woschny, N.; Schmidt, E.; Kruggel-Emden, H.: Modelling of the detachment of adhesive dust particles during bulk solid particle impact to enhance dust detachment functions. *Powder Technology*, Bd. 400, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117238>
- [3] Woschny, N.; Schulz, D.; Kruggel-Emden, H.; Schmidt, E.: Predicting dust emissions – Experimental study compared to coupled DEM/CFD simulations using a reference test bulk material. *Advanced Powder Technology*, Bd. 32, p. 3189–3206, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.07.001>
- [4] Schmidt, E.: Dust Separation. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, 2023, p. https://doi.org/10.1002/14356007.b02_13.pub3
- [5] Zillgitt, M.: *Staubabscheidung mit elektrostatisch beeinflusstem Wassersprühnebel*, Düren: Shaker Verlag, 2021

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Untersuchungen an fettgefüllten, berührungsfreien Labyrinthdichtungen in Tragrollen

Andreas Bürger
Sylvio Simon
Stephan Henschler
Kay Moosburg



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Andreas Bürger, M. Eng.
BTU Cottbus-Senftenberg
Universitätsplatz 1
01968 Senftenberg

Untersuchungen an fettgefüllten, berührungsfreien Labyrinthdichtungen in Tragrollen

In der Fettfüllung von Labyrinthdichtungen in Tragrollen bildet sich bei der Rotationsbewegung ein Luftspalt, der die eigentliche Barriere für Verschmutzungen darstellt. Auf einem Versuchsstand wurden die Vorgänge in Schmierfetten unterschiedlicher Konsistenzklassen separat für den axialen und radialen Teil der Labyrinthdichtung untersucht. Neben der Messung des Drehmomentes als Indikator für die Vorgänge im Schmierfett und die Öffnung des Luftspaltes wurde die elektrische Kapazität gemessen und mit dem Drehmoment verglichen. Durch die Messung der Kapazität sind eine räumliche Zuordnung der Vorgänge im Schmierfett und bessere Aussagen zum Verhalten von Schmierfett in der Labyrinthdichtung möglich.

1 Motivation

Nachdem die Autoren auf der Tagung Schüttgutförderertechnik im September 2024 in Garching die Arbeiten zur Temperaturmessung in Labyrinthdichtungen an Tragrollen und zur drahtlosen Datenübertragung vorstellten, werden hier Ergebnisse der Untersuchungen zum Verhalten von Schmierfett in Labyrinthdichtungen speziell in Tragrollen vorgestellt.

Bei vielen Anwendungen sind Wellendurchtrittsstellen abzudichten, die von außen stark verschmutzt werden. Ein typischer Anwendungsfall sind Tragrollen für Gurtförderer im Bergbau. Neben einer starken Belastung mit trockenen und feuchten Stäuben sind die Tragrollen Niederschlägen und großen Temperaturdifferenzen ausgesetzt. Trotzdem sollen die Abdichtungen der Tragrollen die Lager langfristig - bis zu 14 Jahre sind durchaus möglich - schützen.

In Tragrollen kommen seit Jahrzehnten Labyrinthdichtungen, in [1][2][3] als fettbefüllte berührungsfreie Wellendichtungen (FBWD) bezeichnet, in der Bauform senkrecht zur Achse zum Einsatz. Bei dieser Bauform wechseln sich Elemente vertikal zur Achse (radial) und parallel zur Achse (axial) ab. Die beiden Labyrinthringe der Dichtung berühren sich dabei nicht. Der Raum zwischen den Labyrinthringen ist, zumindest im Neuzustand, vollständig mit Schmierfett gefüllt. Die Fertigung und Montage dieser Dichtungsart sind relativ einfach und preiswert.

Lange Zeit herrschte die Ansicht, dass die Fettfüllung die eigentliche Barriere für von außen auf die Dichtung einwirkende Verschmutzungen darstellt.

Haas, Kümmel und Bosch wiesen in ihren Arbeiten von ca. 2011 - ca. 2018 nach, dass sich bei hinreichend großer Umfangsgeschwindigkeit (hier gleichbedeutend mit der Schergeschwindigkeit im Schmierfett) ein Luftspalt zwischen den Labyrinthringen auftut, der die eigentliche Barriere für Verschmutzungen darstellt [1][2][3]. Demnach öffnet sich bereits bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten aufgrund der wirkenden Fliehkräfte der vertikale Bereich der Dichtung und bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten durch die wirkenden Scherkräfte der horizontale Bereich der Dichtung. Das Schmierfett dient der Aufnahme und Bindung der Verschmutzungen. Wesentliche Teile dieser Arbeiten fanden auch Eingang in das Handbuch Dichtungspraxis [4]. Weitere Versuche ergaben eine fettabhängige Druckbeständigkeit der Dichtwirkung bis zu ca. 130 mBar [1].

Andere theoretische Untersuchungen und Simulationen (z. B. in [5]) betrachten die Wärmeentwicklung und die Fettverteilung im Labyrinth, gehen aber nicht auf die Bildung eines Luftspaltes ein.

Ziel dieses Projektes ist es, mit weiteren Messungen zum Verhalten des Schmierfettes in Labyrinthdichtungen an die Arbeiten von Haas, Kümmel und Bosch anzuknüpfen und unter anderem die Ausbildung und die Wirkung des Luftspaltes zu untersuchen. Es soll geklärt werden, ob und wie die Labyrinthdichtung zuverlässig das Eindringen von Verschmutzungen von außen in das Lager verhindern kann.

2 Vorgehensweise

Für den Versuchsaufbau wurde eine Drehmaschine so modifiziert, dass Drehzahlen ab ca. $0,5 \text{ s}^{-1}$ möglich sind. Damit die Ursache des Drehmomentes örtlich zugeordnet werden kann, wurde die Labyrinthdichtung als Scheibe-Scheibe-System für den Radialspalt (d. h. vertikal zur Achse, Bild 1, Bild 2) und als Topf-Inlet-System (Rohr-in-Rohr, waagrecht zur Achse, Bild 3) für den Axialspalt nachgebildet und separat untersucht.

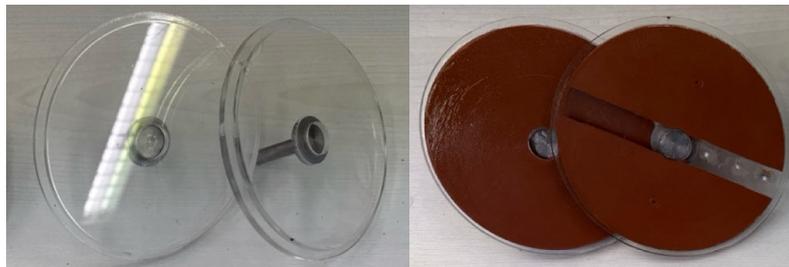


Bild 1: Scheibe-Scheibe ohne Beschichtung mit Beschichtung für einen Kondensator



Bild 2: Scheibe-Scheibe mit Beschichtung für drei Kondensatoren, $d_{\text{außen}} = 120 \text{ mm}$

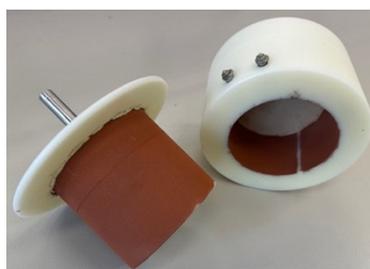


Bild 3: Topf-Inlet mit Beschichtung, $d_i(\text{Topf}) = 80 \text{ mm}$

Die Drehzahlmessung erfolgt durch eine Impulszählung an der Antriebswelle. Das Drehmoment wird mittels einer Drehmomentwelle auf der ruhenden Seite des Systems gemessen.

Damit konnte der Einfluss von Drehmomentschwankungen aus dem Getriebe weitgehend vermieden werden.

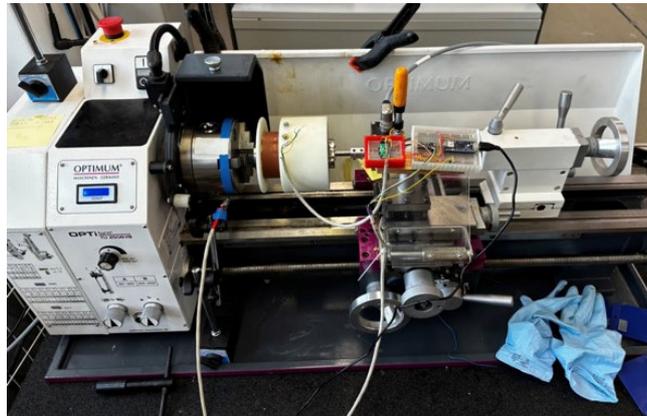


Bild 4: Versuchsstand mit modifizierter Drehmaschine, Sensorik und Topf-Inlet-System

Betrachtet man die beiden Teile der Labyrinthdichtung als Kondensatorplatten und das Schmierfett bzw. Schmierfett-Luft-Gemisch als Dielektrikum, liegt ein Rückschluss von der gemessenen Kapazität auf die Menge bzw. den Zustand des Schmierfettes nahe. Die Kapazität ist direkt proportional zur Dielektrizitätskonstante, welche von der Schmierfettzusammensetzung bestimmt wird (1).

$$C = \varepsilon_R \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1)$$

mit

- C Kapazität des Kondensators
- ε_0 Dielektrizitätskonstante im Vakuum
- ε_R relative (stoffabhängige) Dielektrizitätskonstante bezogen auf ε_0
- d Plattenabstand
- A wirksame Plattenfläche

Die aus Polyacryl gefertigten Teile der Labyrinthdichtung wurden dazu mit einem elektrisch leitfähigen Lack beschichtet. Die relative Dielektrizitätskonstante von Schmierfetten ist in der Literatur nicht auffindbar. Für Transformatorenöl ist sie in [8] mit 2,1, für Schweröl mit 2,2 und für Wasser mit 80 angegeben. Eigene Messungen ergaben u. a. für die verwendeten Fette Folgendes (Tabelle 1):

Tabelle 1: Ausgewählte relative Dielektrizitätskonstanten

Medium	ε_R
Luft (eigene Messung)	0,93
Schmierfett NLGI 2 (eigene Messung)	1,41
Schmierfett NLGI 3/4 (eigene Messung)	1,69
Luft (lt. [8])	1,00059
Wasser (lt. [8])	80,3

Die ermittelten Werte für Schmierfett sind signifikant größer als die relative Dielektrizitätskonstante von Luft. Damit ist ein deutliches Absinken der Kapazität beim Öffnen des Luftspaltes zu erwarten.

Die Dielektrizitätskonstante von Wasser ist wesentlich größer als die von Luft oder Schmierfett. Das Eindringen von Wasser in das Schmierfett, also zwischen die Kondensatorplatten, sollte sich in einer starken Erhöhung der Kapazität bemerkbar machen.

Erste Messungen der Kapazität am Scheibe-Scheibe-System erfolgten zunächst durch Messung der Entladezeit eines Kondensators mit einem Arduino Nano 33. Diese Messungen ergaben bereits reproduzierbar gute Ergebnisse und eine sehr gute Korrelation der Kapazitätsänderung mit dem Drehmoment (Bild 5).

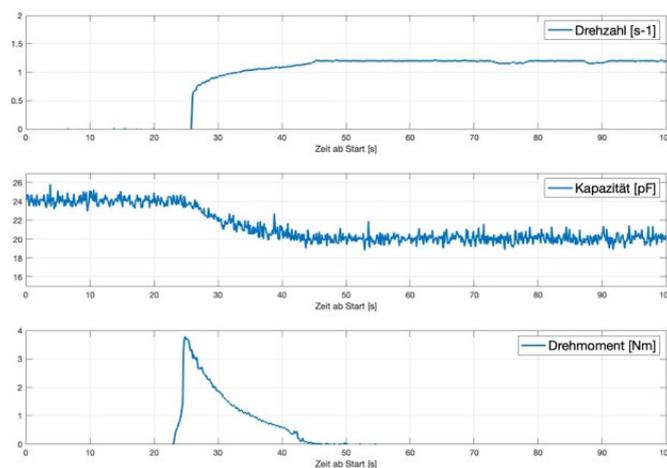


Bild 5: Messwerte für Drehmoment, Drehzahl und Kapazität am Scheibe-Scheibe-System

Der Einsatz des für die Kapazitätsmessung entwickelten IC TDF1004 von Texas Instruments [6], [7] ermöglichte eine wesentlich genauere Messung der Kapazität im Bereich 0-115 pF mit einer Auflösung von 0,5 fF synchron auf 4 Kanälen.

Realisiert wurde die Kapazitätsmessung auf 3 ringförmigen Kondensatorflächen des Scheibe-Scheibe-Systems (Bild 2). Damit kann die Kapazitätsänderung, d. h. die Änderung der Schmiermittelverteilung bzw. -zusammensetzung, wesentlich genauer lokalisiert werden. Die 3 Kreisringe besitzen folgende Radien und Flächen (Tabelle 2):

Tabelle 2: Radien und Flächen der genutzten Kreisringe

	Innenradius	Außenradius	Fläche
Ring Innen	5 mm	30 mm	2.747 mm ²
Ring Mitte	35 mm	45 mm	2.512 mm ²
Ring Außen	50 mm	60 mm	3.545 mm ²

3 Messungen und Messergebnisse

3.1 Messung am vertikalen Teil

Der vertikale Teil der Labyrinthdichtung wurde als Scheibe-Scheibe-System (Bild 2) nachgebildet. Bei den Messungen wurde die Drehzahl einer Scheibe schrittweise erhöht, während die andere Scheibe fixiert war. Dargestellt sind jeweils die Umfangsgeschwindigkeit der sich drehenden Scheibe am größten Durchmesser, das Drehmoment an der fixierten Scheibe sowie die Kapazitäten der 3 ringförmigen Kondensatoren.

In Bild 6 ist beispielhaft der Verlauf einer Messung des Drehmomentes und der Kapazitäten am Scheibe-Scheibe-System dargestellt und interessante Änderungen markiert.

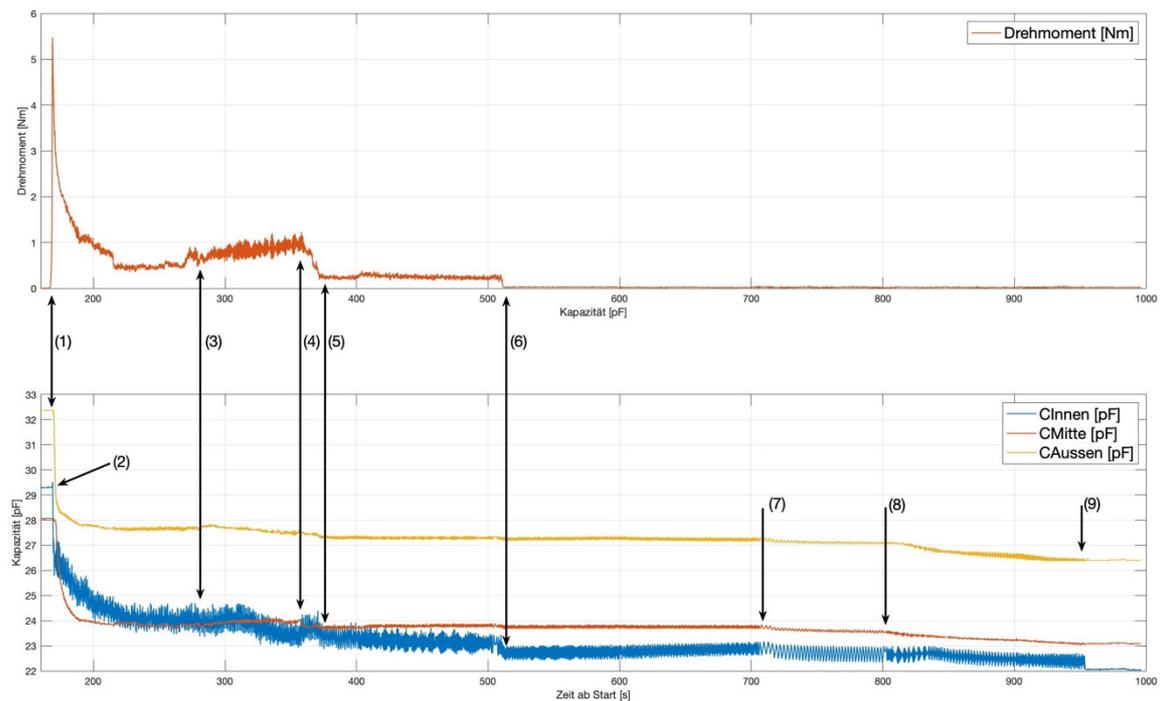


Bild 6: Beispielhafter Verlauf einer Messung, Schmierfett NLGI 3/4, Spalt 2 mm

- (1) Start des Versuchs, Anstieg des Drehmomentes, steiles Sinken der Kapazität vermutlich infolge des Aufreißens der Schmierfettschicht und Eindringen von Luft
- (2) kurzer impulsartiger Anstieg der Kapazität im inneren Kreisring
- (3), (4), (5) Drehmomentänderungen, synchron Änderungen der Kapazitäten in den Kreisringen
- (6) Drehmomentänderung auf nahe Null, lt. [1][2][3] als Indiz für die vollständige Öffnung des Luftspaltes, weitere Kapazitätsänderungen und Absinken der Kapazität in den Kreisringen, was auf Turbulenzen in der Schmierfettschicht hindeutet
- (7), (8) weitere Änderungen der Kapazitäten ohne messbare Drehmomentänderung
- (9) Stopp des Antriebs, Drehzahl = 0, Kapazitäten bleiben konstant.

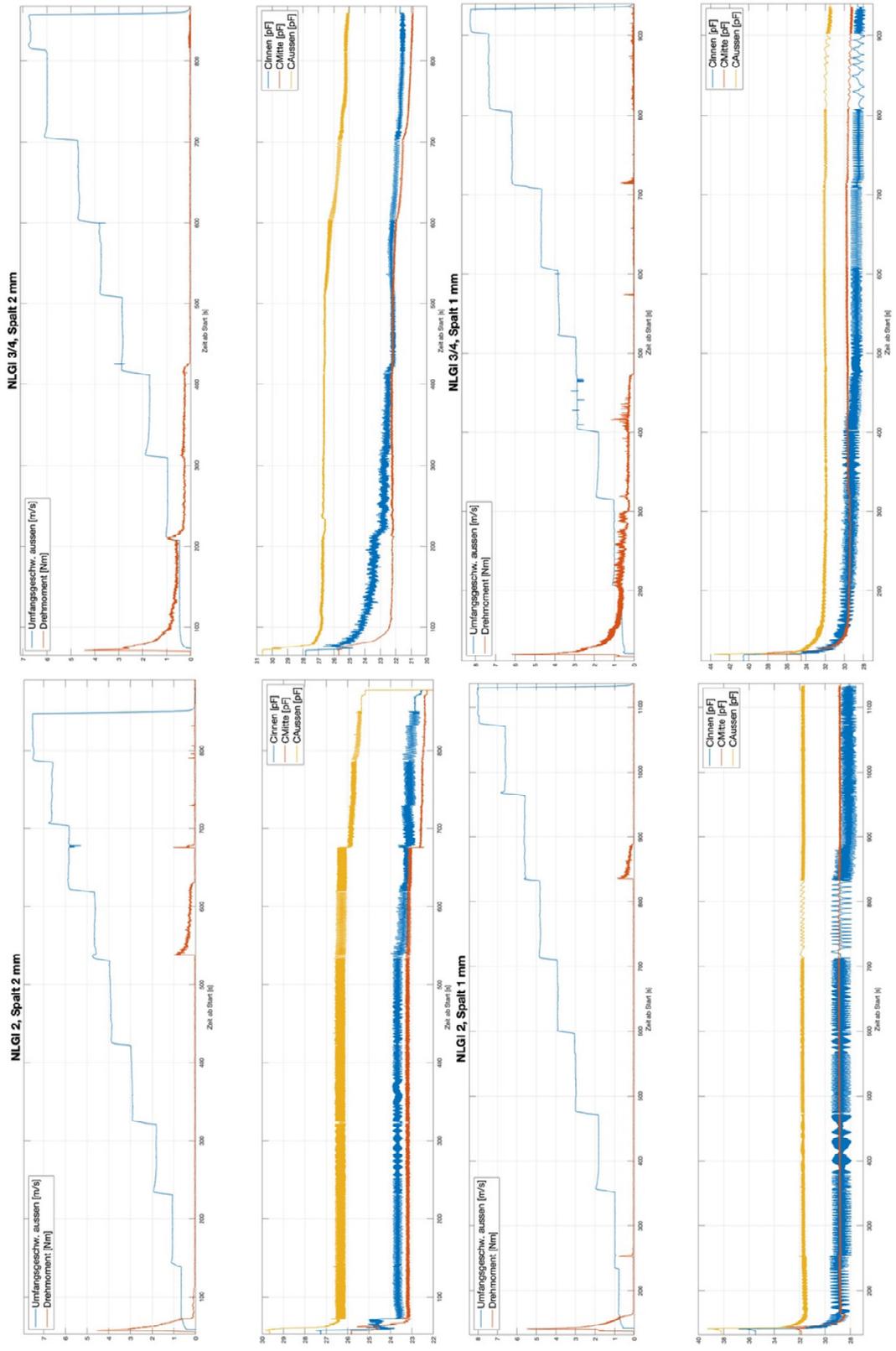


Bild 7: Messergebnisse am vertikalen Teil der Labyrinthdichtung (Scheibe-Scheibe)

3.2 Zusammenfassung zu den Messergebnissen am vertikalen Teil der Labyrinthdichtung (Scheibe-Scheibe)

In Auswertung der Messdaten (Bild 9) lassen sich die Ergebnisse genannt werden:

- Das Absinken des Drehmomentes auf nahe Null als Indiz für die vollständige Öffnung des Luftspaltes geschieht bereits bei geringer Umfangsgeschwindigkeit.
- Je geringer die Konsistenzklasse des Schmierfettes, umso geringer die für das Öffnen des Luftspaltes erforderliche Umfangsgeschwindigkeit.
- Nach dem vollständigen Öffnen des Luftspaltes ist ein kurzzeitiger Anstieg des Drehmomentes, d. h. teilweises Schließen des Luftspaltes möglich, verursacht z. B. durch Beschleunigungsvorgänge.
- Abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit und von der Konsistenzklasse wird durch die wirkenden Fliehkräfte das Schmierfett aus den Scheiben herausgeschleudert. Es verbleiben ein Schmierfettfilm auf den Scheiben und ein Wulst am Scheibenrand (Bild 8).
- Im Mittelpunkt der Scheibe bzw. in der Nähe des Mittelpunktes ist die Fliehkraft sehr gering. Das Schmierfett verbleibt dort. Für den realen Einsatzfall ist dieses Verhalten wenig relevant, da sich an dieser Stelle die Achse befindet.



Bild 8: Luftspalt am vertikalen Teil der Labyrinthdichtung (Scheibe-Scheibe),
Scheibenabstand 2 mm, Schmierfett NLGI 3/4

3.3 Messung am waagerechten Teil

Der waagerechte Teil (parallel zur Achse) der Labyrinthdichtung wurde als Topf-Inlet-System nachgebildet. Gemessen wurden das Drehmoment, die Drehzahl bzw. die Umfangsgeschwindigkeit sowie die Kapazität. Die Ringbreite betrug 25 mm. Der Innendurchmesser des äußeren Teils (Topf) betrug 79 mm, der Außendurchmesser des inneren Teils (Inlet) betrug 77 mm (Spalt 1 mm) bzw. 75 mm (Spalt 2 mm). Die Messwerte wurden vom Stillstand beginnend bis zu einer Umfangsgeschwindigkeit von bis zu ca. 6 m/s aufgezeichnet.

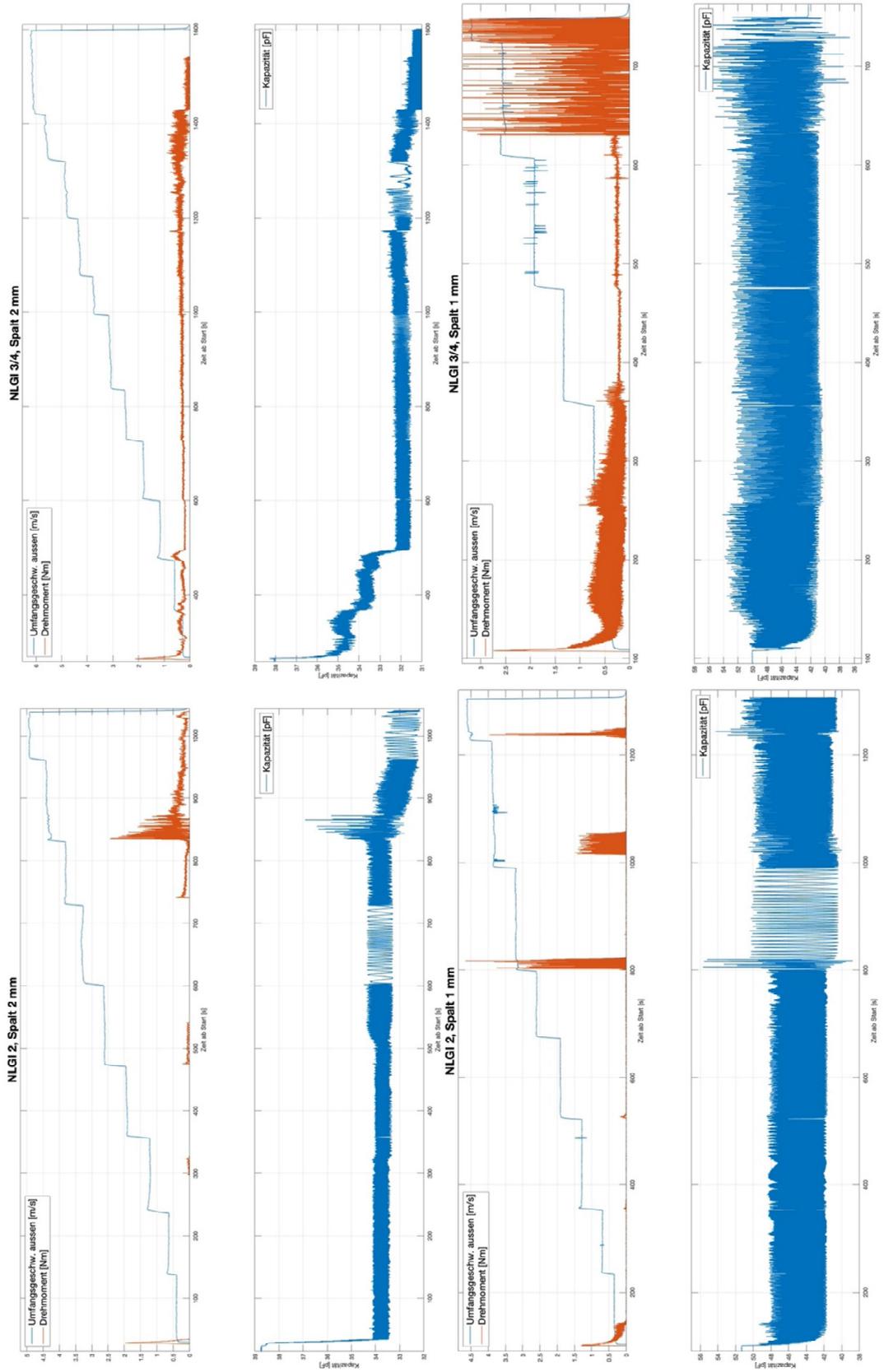


Bild 9: Messergebnisse am waagerechten Teil der Labyrinthdichtung (Topf-Inlet)

3.4 Zusammenfassung zu den Messergebnissen am waagerechten Teil der Labyrinthdichtung (Topf-Inlet)

Aus der Auswertung der Messdaten lassen sich die Ergebnisse wie folgt benennen:

- Je geringer die Konsistenzklasse des Schmierfettes, umso geringer ist die für das Öffnen des Luftspaltes erforderliche Umfangsgeschwindigkeit.
- Bei kleinerer Spalthöhe wird eine größere Zeit für das Öffnen des Luftspaltes benötigt.
- Bei der Konsistenzklasse 3/4 wird mehr Zeit für das Absinken des Drehmomentes benötigt. Das Drehmoment sinkt auch bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten nicht gegen Null.
- Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Spalthöhe, Konsistenzklasse und benötigtem Anlaufdrehmoment ist nicht festzustellen.
- Bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten, insbesondere bei Beschleunigung, traten bei allen Konsistenzklassen und beiden untersuchten Spalthöhen große Drehmomentspitzen auf, obwohl das Drehmoment vorher bereits stark abgesunken war. Synchron waren Änderungen der Kapazität messbar. Vermutlich lösen sich bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten Teile des Schmierfettes vom Inlet und werden als Wulst zwischen Inlet und Topf bewegt. Das würde bedeuten, der bereits geöffnete Luftspalt schließt sich temporär wieder. Aufgrund der dabei entstandenen Unwucht konnten die Messungen nicht mit höheren Umfangsgeschwindigkeiten fortgeführt werden.
- Bei der Messung mit Schmierfett der Konsistenzklasse 3/4 stieg das Drehmoment bei Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit leicht an.
- Das Schmierfett wurde während der Messung seitlich als Wulst herausgedrückt, damit wurde die Bildung des Luftspaltes möglich (Bild 10).

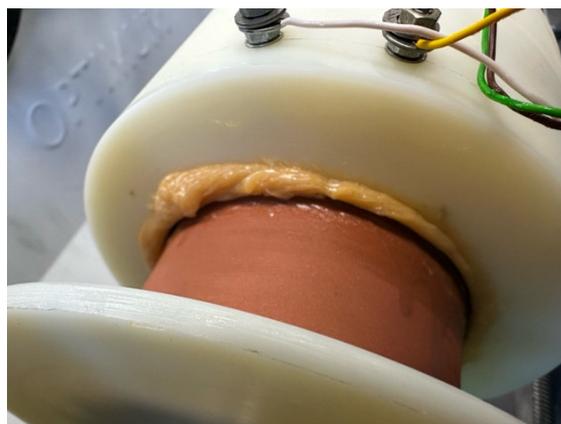


Bild 10: Fettwulst und Luftspalt am waagerechten Teil der Labyrinthdichtung (Topf-Inlet), Schmierfett NLGI 2

Zusammenfassung und Ausblick

An Teilsegmenten der Labyrinthdichtung wurden - abhängig von wesentlichen Parametern - das Drehmoment sowie die elektrische Kapazität gemessen. Es konnte eine sehr gute Korrelation zwischen diesen Messgrößen festgestellt werden. Die Kapazität ist dabei aussagekräftiger als das Drehmoment und ermöglicht eine Lokalisierung des Schmierfettes und/oder die Bestimmung des Schmierfetzustandes. Die Messungen zeigten, dass ein im waagerechten Teil bereits geöffneter Luftspalt sich bei Beschleunigung und bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten zumindest teilweise und temporär wieder schließen kann. Ein Teil des Schmierfettes wird bei Rotation aus dem vertikalen Teil und auch aus dem waagerechten Teil seitlich als Wulst herausgedrückt und verbleibt dort oder wird später durch Fliehkräfte fortgeschleudert. In der Labyrinthdichtung schließen jedoch waagerechte und vertikale Bereiche unmittelbar aneinander an. In weiteren Arbeiten wird u. a. zu klären sein, wie sich das Schmierfett in diesem Übergangsbereich verhält und welchen Einfluss dies auf die waagerechten und vertikalen Bereiche hat. Außerdem soll das Phänomen des „Atmens“ der Tragrolle auf die Wirksamkeit der Labyrinthdichtung untersucht werden.

Weitere Messungen sollen über einen längeren Zeitraum mit konstanter Umfangsgeschwindigkeit erfolgen. Weiterhin ist geplant, die Messungen an einer montierten Labyrinthdichtung sowohl am Versuchsstand als auch an Tragrollen fortzuführen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Kümmel, J. U.: FKM-Vorhaben 287 Fettgefüllte berührungsfreie Wellendichtungen mit Fettfüllung, FKM-Forschungsberichte/Forschungskuratorium Maschinenbau; H. 311, Frankfurt/Main: 2011
- [2] Kümmel, J. U.: Schmutzabdichtung mittels fettgefüllter berührungsfreier Wellendichtungen. Dissertation. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente; Heft 171, Stuttgart: 2017, ISBN 978-3-936100-72-3
- [3] Bosch, F.: Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreien Wellendichtungen. Dissertation. Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente; Heft 177, Stuttgart: 2018, ISBN 978-3-936100-78-5
- [4] Riedl, A.: Handbuch Dichtungspraxis, 4. Auflage, Essen: Vulkan-Verlag, 2017, ISBN 978-3-8027-2214-1
- [5] Augusto, L. L. X.; Takahama, M. H.; Negrão, C. O. R.; Cousseau, T.: The effect of viscous dissipation and heat transfer on friction losses of grease-filled labyrinth seals. Tribology International, Volume 153, 2021, 106571, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106571>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20304011>
- [6] Datasheet FDC1004 4-channel 16-bit capacitance-to-digital converter with active shield driver for EMC protection [Zugriff am: 26. Mai 2025]; verfügbar unter: <https://www.ti.com/de/lit/gpn/fdc1004>
- [7] Applicationnote FDC1004 4-Channel Capacitance-to-Digital Converter for Capacitive Sensing Applications [Zugriff am: 26. Mai 2025]; verfügbar unter: <https://www.ti.com/de/lit/gpn/fdc1004>
- [8] Dielektrizitätszahl-Liste [Zugriff am 26. Mai 2025]; verfügbar unter https://www.vega.com/-/media/pdf-files/dielektrizitaetszahl-liste_de.pdf?rev=be01d5f43f94437c9de2b12c283e43e8

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Entwicklung eines intelligenten Prüfstandes für eine realitätsnahe Tragrollenprüfung

Yevhen Redka

Thomas Kämper



Yevhen Redka, M. Sc.

Artur Küpper GmbH & Co. KG

An der Knippenburg 27

46238 Bottrop



Dr. Thomas Kämper

Eilhauer Maschinenbau GmbH

Am Pferdemarkt 53

30853 Langenhagen

Entwicklung eines intelligenten Prüfstandes für eine realitätsnahe Tragrollenprüfung

Für die Entwicklung neuer innovativer Tragrollenausführungen ist es unerlässlich, die Produkte bis zu den Grenzen der Belastbarkeit unter realitätsnahen Bedingungen prüfen zu können. Aktuell gibt es verschiedene Normen, die Tragrollenprüfungen beinhalten. Diese Normen beziehen sich ausschließlich auf Stahltragrollen und enthalten einige Prüfhinweise, jedoch nicht Prüfzenarien unter realitätsnahen Lasten. Aktuell werden von den Betreibern aus ergonomischen und sicherheitsrelevanten Gründen vermehrt gewichtsreduzierte Tragrollen aus Kunststoff angefordert. Diese müssen dementsprechend ausgelegt und geprüft werden können. Die Firma Kupper hat aktuell in Kooperation mit der Firma Eilhauer einen Tragrollenprüfstand entwickelt, der den aktuellen Kundenanforderungen gerecht wird. Auf diesem Prüfstand können Tests sämtlicher bestehender und neu entwickelter Tragrollenausführungen (Kunststoff und Stahl) unter realitätsnahen Bedingungen durchgeführt werden.

1 Einleitung

Tragrollen stellen eine essenzielle Komponente von Bandförderanlagen dar. Ihre Hauptfunktion liegt in der Abstützung und Führung des Fördergurts sowie der Aufnahme des Materialgewichts während des Transports. Aufgrund ihrer großen Anzahl in einer Bandanlage haben sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Betriebssicherheit und Energieeffizienz des Gesamtförderers.

Trotz ihrer vermeintlich einfachen Bauweise sind Tragrollen sicherheitskritische Bauelemente. Bereits eine einzige defekte oder blockierte Rolle kann zu erheblichen Störungen im Förderprozess führen. In besonders schwerwiegenden Fällen, etwa durch Reibungswärme infolge festgelaufener Lager, besteht die Gefahr eines Bandanlagenbrands (Bild 1). Die wirtschaftlichen Schäden durch Produktionsausfälle und Reparaturmaßnahmen sowie die Risiken für Mensch und Umwelt unterstreichen die Wichtigkeit eines hohen Qualitätsniveaus und einer sorgfältigen Kontrolle der Tragrollen [1].



Bild 1: Brand einer Kohle fördernden Bandanlage [1]

Um die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit langfristig zu gewährleisten, ist eine umfassende und systematische Prüfung der Tragrollen bereits im Rahmen der Entwicklungsphase unerlässlich.

2 Tragrollenprüfungen und Prüfstände

Es gibt zahlreiche Prüfverfahren und Methoden für die Qualitätskontrolle sowie Bewertung von Tragrollen, die sich in zwei Gruppen unterteilen lassen: industriell etablierte standardisierte Verfahren sowie experimentelle Methoden aus dem wissenschaftlich-technischen Umfeld.

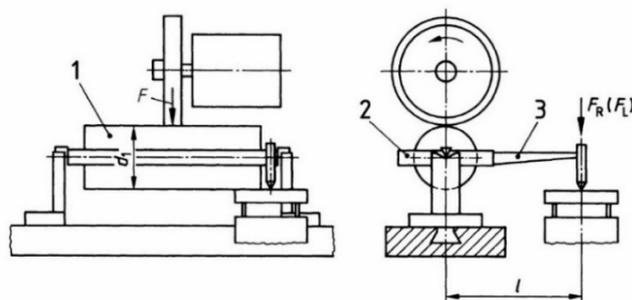
2.1 Standardisierte Prüfverfahren und Prüfstände

Am ausführlichsten sind die Prüfverfahren in der DIN 22112-3 beschrieben [2]. Neben der DIN gibt es auch einige andere, weitere Standards weltweit, die die Prüfung von Tragrollen beschreiben. Im Wesentlichen wird in diesen Normen die Prüfung von folgenden Eigenschaften behandelt:

- Axiale Verschiebbarkeit
- Ausdrückwiderstand
- Rundlauf toleranz
- Dichtheit und Schmierung
- Laufeigenschaften

Für jedes Merkmal werden spezielle Prüfstände eingesetzt. Das Ziel von diesen Prüfständen ist jedoch nicht die Simulation der realen Einsatzbedingungen von Tragrollen, sondern die Prüfung der einzelnen Tragrolleigenschaften.

So muss z. B. bei der Ermittlung der Laufreibungskraft nach DIN 22112-3 die Tragrolle lediglich mit 250 N belastet werden (Bild 2). Bei der gleichen Prüfung nach CEMA [3] wird die Tragrolle ohne Belastung geprüft.



- Legende**
- 1 Tragrolle
 - 2 Rahmen
 - 3 Hebel
 - F Anpresskraft 250 ± 5 N

Bild 2: Schema der Messung der Laufreibungskraft der Tragrolle nach DIN 22112-3 [2]

Für eine Simulation der realen Einsatzszenarien wurden weitere verschiedene Prüfstände bzw. Prüfverfahren aus dem wissenschaftlich-technischen Umfeld entwickelt und eingesetzt.

2.2 Tragrollenprüfstände aus dem wissenschaftlich-technischen Umfeld

Eine besondere Rolle spielt in der Wissenschaft die Prüfung der Laufeigenschaften von Tragrollen dar. Mit diesem Ziel wurden zahlreiche Prüfstände mit unterschiedlichem Aufbau entwickelt und eingesetzt. Ein sehr interessanter Prüfstand wurde z. B. bei den Versuchen von Barbey [4] eingesetzt. Diesen Prüfstand hat nach einigen Modifikationen auch Geesman für seine Versuche mit Tragrollen verwendet [5].

Bei diesem Prüfstand erfolgt die Belastung sowie der Antrieb der Tragrolle mit einem Flachriemen. Die Tragrollenbelastung kann dabei deutlich über 10 kN liegen, womit viele reale Belastungsfälle der Tragrollen simuliert werden können.

Ein weiterer interessanter Prüfstand (Bild 3) stammt auch aus Hannover und wurde im IPH entwickelt [6]. Dieser Prüfstand ist sowohl für konventionelle als auch für angetriebene Tragrollen konzipiert worden. Die Belastung der Tragrolle erfolgt mit einem speziell gefederten Antriebsrad. Der Prüfstand ist klimatisiert und kann neben dem Laufwiderstand auch die Wuchtgüte sowie die Geometrie bzw. den Rundlauf der Tragrolle ermitteln.

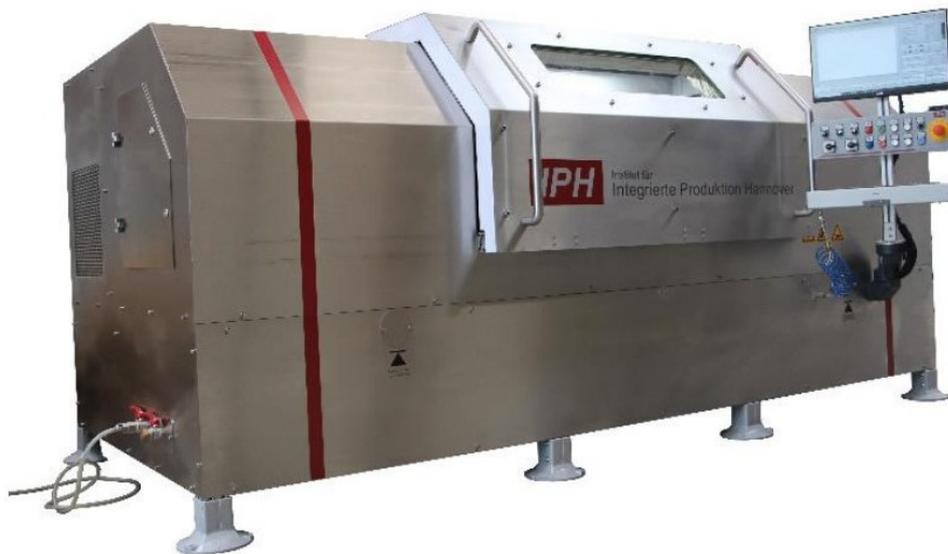


Bild 3: Tragrollenprüfstand vom IPH Hannover [6]

Die Firma Artur Küpper verfügt auch über einen Tragrollenprüfstand, bei dem die Rollen mit sehr hohen Lasten beaufschlagt werden und dabei wichtige Parameter wie der Laufwiderstand oder die Geometrie der Tragrolle erfasst werden können (Bild 4). Die Tragrolle wird in diesem Prüfstand mit einer Last von bis zu 40 kN über zwei LKW-Räder belastet und angetrieben. Dieser Prüfstand wurde für eine Vielzahl von Tests und Versuchen verwendet, um die Tragrollenkonstruktion zu optimieren. Die hohe Belastung ermöglicht des Weiteren Tragrollenprüfungen für sämtliche Einsatzfälle: Obertrum, Untertrum und Aufgabe.



Bild 4: Belastungsprüfstand der Fa. Artur Küpper

2.3 Herausforderungen bei der Prüfung von gewichtsreduzierten Tragrollen

Bei gewichtsreduzierten Tragrollen wird der Rollenmantel entweder aus dünnwandigem Stahl oder aus Kunststoff bzw. Composite-Werkstoffen hergestellt. Die Festigkeit und Stabilität dieser Tragrollen müssen besonders betrachtet und analysiert werden. Die konventionellen Auslegungsmethoden wie z. B. VDI 2341 [7] sowie die Prüfungen entsprechend DIN 22112-3 [2] reichen dabei nicht aus.

Die Firma Artur Küpper hat auch eine solche Tragrolle in ihrem Produktportfolio – Küpper xForce (Bild 5).

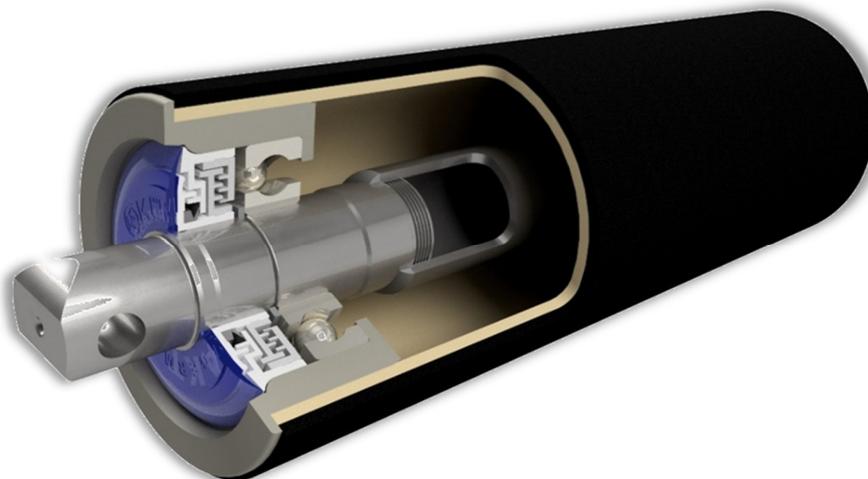


Bild 5: Tragrolle Küpper xForce [8]

Der Mantel dieser Tragrolle ist aus einem speziellen GFK-Rohr mit PU-Ummantelung ausgeführt. Das Rohr ist mit einem metallischen Lagergehäuse über eine Übermaßpassung verbunden. Die Auslegung und Prüfung dieser Verbindung ist von besonderer Bedeutung für die zuverlässige Funktion dieser Tragrolle im Betrieb.

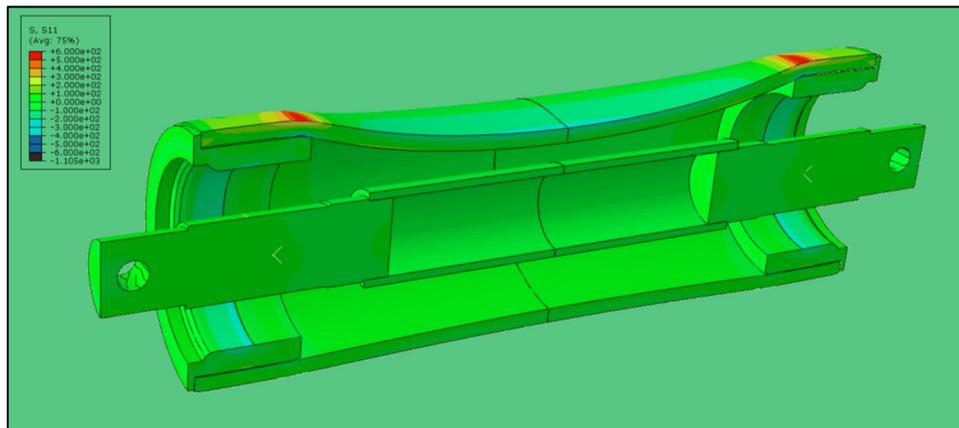


Bild 6: FEM-Auslegung einer Tragrolle mit einem Mantel aus einem Verbundwerkstoff

Die FEM-Analyse (Bild 6) belegt, dass das Composite Rohr im Vergleich zu den anderen Stahl-Bauteilen der Tragrolle deutlich nachgiebiger ist.

Bei den aktuell verwendeten Berechnungsprogrammen zur Tragrollenauslegung wird das Rohr als biegesteif vorausgesetzt und nicht berücksichtigt. Somit muss ein neues Programm entwickelt werden, das die Durchbiegung des Tragrollenrohres unter Belastung berücksichtigt. Speziell bei Composite Werkstoffen sind hierbei viele materialabhängige Parameter zu berücksichtigen. Diese theoretisch ermittelten Werte müssen durch eine Reihe von realitätsnahen Belastungstests auf einem Prüfstand validiert werden.

Da die Belastungssituationen bei allen im Kap. 2.2 beschriebenen Prüfständen sehr weit von der Realität entfernt sind, muss für die Prüfung von Composite Tragrollen ein komplett neues Prüfstandskonzept entwickelt werden.

3 Konzept des neuen Prüfstandes und Definition der Anforderungen

Bei der Konzipierung des neuen Prüfstandes wurde das Ziel einer möglichst realistischen Tragrollenbelastung verfolgt. Dafür wurde als Belastungs- bzw. Antriebskomponente ein Fördergurt ausgewählt. Der Prüfstand stellt eine kleine Bandanlage dar, bei der die Test-Tragrolle gegen den Fördergurt gedrückt wird. Zur Stoßdämpfung infolge der Gurtverbindung werden Balgzylinder eingesetzt, die unrealistische Belastungsspitzen abfedern (Bild 7).

Ein weiteres Element ist das ausfahrbare Tragrollenaufnahmegestell, das einen schnellen und werkzeugarmen Wechsel der Prüftragrollen ermöglicht. Dieses Gestell lässt sich auf Schienen aus dem Prüfstand herausfahren, wodurch der Zugang zur Prüfeinheit erheblich erleichtert und die Rüstzeit minimiert wird.

Für eine flexible Aufnahme verschiedener Tragrollentypen wurden schnell wechselbare Adapter konzipiert, mit denen unterschiedliche Achsgeometrien aufgenommen und fixiert werden können.

Der Prüfstand ist für eine maximale mechanische Belastung von 40 kN ausgelegt, damit auch hochbelastete Tragrollen realitätsnah geprüft werden können. Die maximale Prüfgeschwindigkeit beträgt 15 m/s und übertrifft somit die typischen Einsatzbedingungen

im industriellen Hochleistungsbetrieb.

Folgende Anforderungen wurden an den zu entwickelnden Tragrollenprüfstand gestellt:

- Belastungsfall möglichst ähnlich zu einer realen Bandanlage
- Tragrollenbelastung bis 40 kN
- Drehgeschwindigkeit der Tragrollenauflfläche bis 15 m/s
- Erfassung folgender Messwerte bei der Prüfung einer Tragrolle:
 - Belastung der Tragrolle
 - Tragrollenlaufwiderstand
 - Temperatur (mittels Kontaktsensoren sowie mit Wärmebildkameras)
 - Rundlauf (Kreisformabweichung des Rohres sowie die Außermittigkeit der Drehachse)
 - Wuchtgüte der Tragrolle
- Sehr kurze Versuchsvorbereitung (unter 5 Minuten)
- Schallisolierte Verkleidung

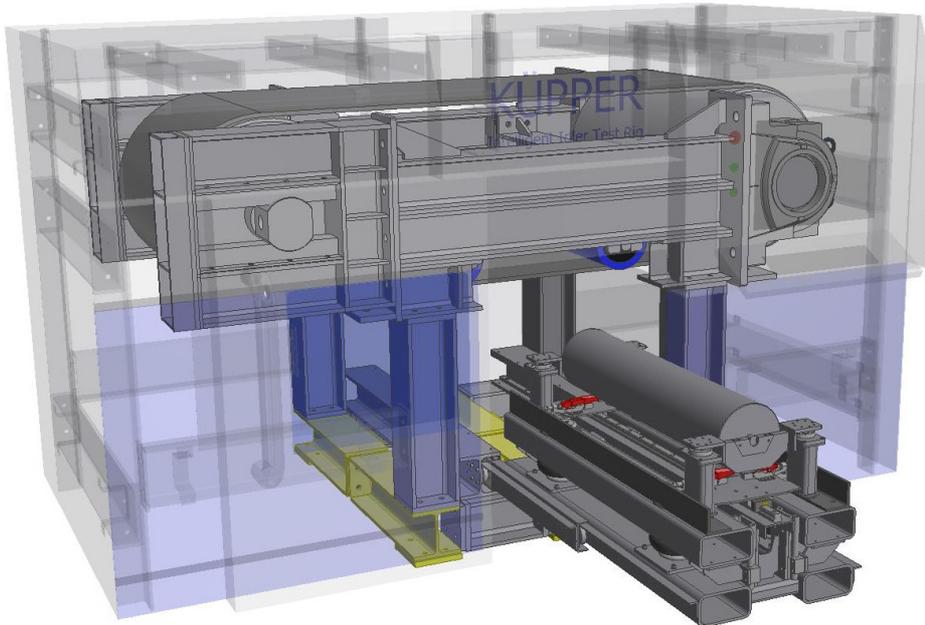


Bild 7: Detailliertes Konzept des Prüfstandes mit transparenter Umhüllung und ausgefahrenem Tragrollen-Aufnahmegestell

Eine besondere konstruktive Herausforderung stellte die Entwicklung der Vorrichtung zur präzisen Messung des Laufwiderstands dar. Diese musste sowohl eine sehr hohe Messgenauigkeit als auch eine hohe mechanische Belastbarkeit gewährleisten. Das an der Tragrollenachse infolge des Laufwiderstandes entstehende Drehmoment wird in dieser Vorrichtung beidseitig am Achsende über einen Drehmomentsensor erfasst (Bild 8). An diesem Sensor ist ein Adapter angeschlossen, in dem die Tragrollenachse eingelegt und formschlüssig geklemmt wird. Zur Aufnahme der vertikalen Kräfte wird der Adapter zusätzlich auf zwei gehärteten Stahlscheiben gelagert, die mit leichtgängigen Zylinderrollenlagern versehen sind. Diese Lagerung ruft jedoch einen geringen zusätzlichen Widerstand in Messrichtung hervor. Um diesen Einfluss präzise zu kompensieren, wird er im Rahmen von Validierungsmessungen erfasst und bei der Auswertung der Laufwiderstandsmessungen berücksichtigt.

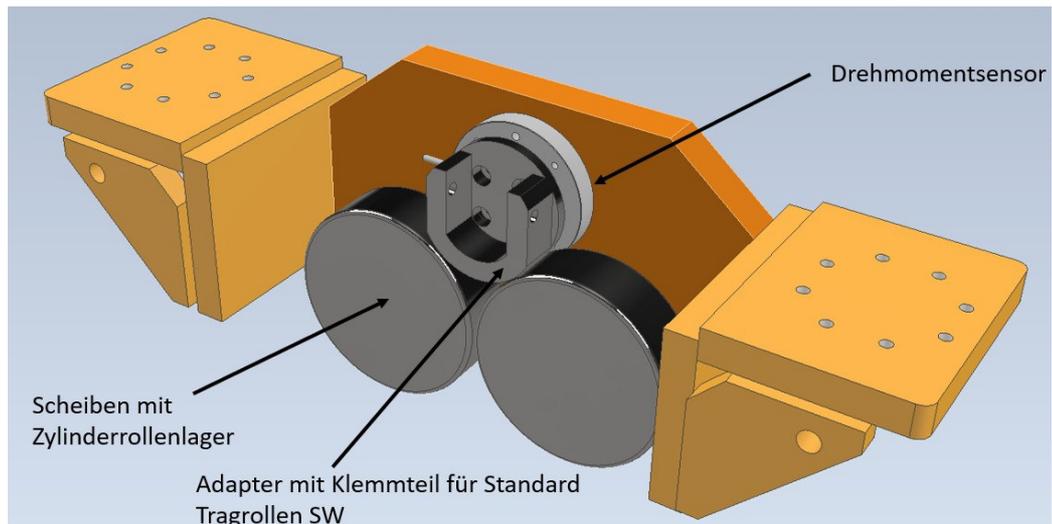


Bild 8: Konzept der Vorrichtung für die Messung des Tragrollenlaufwiderstandes

4 Entwicklung und Inbetriebnahme des Prüfstandes

Die Entwicklung des Prüfstandes erfolgte zusammen mit der Fa. Eilhauer. Dabei wurde die vorher erstellte Detailkonstruktion des Prüfstandes im Hinblick auf die Handhabung, Ergonomie und Sicherheit optimiert und erweitert (Bild 9).

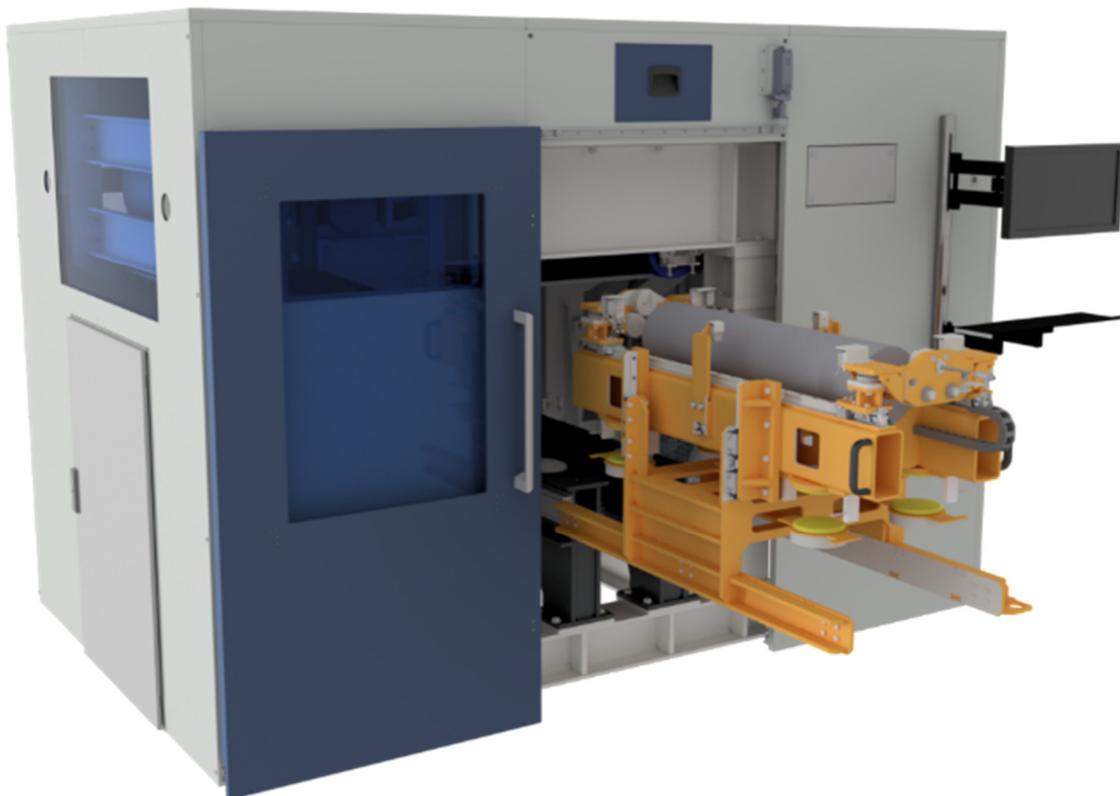


Bild 9: CAD-Detailkonstruktion des Tragrollenprüfstandes

Die Konstruktion wurde entsprechend angepasst und ermöglicht eine kurze Rüstzeit und einen einfachen Wechsel des Fördergurts.

4.1 Ergonomie

Zur Verbesserung der Ergonomie wurde die Arbeitshöhe zum Wechsel der Prüfrollen entsprechend angepasst.

Für die visuelle Kontrolle während des Prüfablaufs wurden gezielt Öffnungen in der Verkleidung vorgesehen. Diese ermöglichen unter anderem die einfache Überwachung der Gurtposition auf der Spanntrommel sowie der Spannvorrichtung.

Zur weiteren Unterstützung beim Rollenwechsel ist in unmittelbarer Nähe des Prüfstands ein Säulenschwenkkran installiert, der ein ergonomisches und sicheres Handling der Prüftragrollen gewährleistet.

An der Vorderseite des Prüfstands befindet sich eine Bedieneinheit, bestehend aus Bildschirm, Tastatur und Maus. Diese ist an einem schwenkbaren Gelenkarm montiert, sodass eine ergonomisch günstige Anpassung an die jeweilige Bedienposition möglich ist.

4.2 Antrieb des Prüfstandes

Für den Antrieb des Prüfstands kommt ein Asynchronmotor mit einer Nennleistung von 15 kW zum Einsatz. Die Kraftübertragung zur Antriebstrommel erfolgt über fünf parallel laufende Keilriemen, die eine schlupfarme Leistungsübertragung gewährleisten. Durch die gezielte Auslegung des Übersetzungsverhältnisses der Antriebsscheiben wird eine maximale Gurtgeschwindigkeit von 15 m/s erreicht. Die Drehzahlregelung des Motors erfolgt über einen Frequenzumrichter, der eine stufenlose Geschwindigkeitsanpassung im Bereich von 2 m/s bis zur Maximalgeschwindigkeit ermöglicht. Dies erlaubt eine präzise Simulation unterschiedlicher Betriebsbedingungen und stellt eine wichtige Grundlage für reproduzierbare Prüfabläufe dar.

4.3 Belastungsvorrichtung des Prüfstandes

Die mechanische Belastung der Tragrolle erfolgt über eine definierte Anpresskraft, mit der die Tragrolle gegen den umlaufenden Fördergurt gedrückt wird. Diese Kraft wird durch pneumatisch gesteuerte Balgzylinder erzeugt, die im Tragrollen-Aufnahmegestell integriert sind. Insgesamt werden vier Balgzylinder eingesetzt, die gemeinsam eine maximale Druckkraft von etwa 40 kN aufbringen können (ca. 10 kN pro Zylinder).

Die Einstellung der Anpresskraft erfolgt über eine pneumatische Steuerung. Da die wirksame Kraft der Balgzylinder positionsabhängig ist, wird der maximale Wert bei Rollen mit einem Außendurchmesser von 219 mm erreicht. Kleinere Tragrollen werden aufgrund der geometrischen Verhältnisse mit entsprechend reduzierter Kraft belastet.

4.4 Messtechnik

Die Messtechnik des Prüfstands ist umfassend ausgelegt, um alle relevanten mechanischen und thermischen Prüfgrößen erfassen zu können. Zur Messung der Tragrollenbelastung sind vier Kraftmessdosen installiert, während zwei weitere Kraftmessdosen die kontinuierliche Überwachung der Spannkraft des Fördergurts übernehmen. Für die Laufwiderstandsmessung kommen zwei hochauflösende Drehmomentaufnehmer zum Einsatz. Die geometrische Prüfung der Tragrolle erfolgt über

sechs Laser-Abstandssensoren, die während des Betriebs die Form der Tragrolle erfassen. Die Drehzahl der Tragrolle wird mittels eines Reflexionstasters gemessen. Zur thermischen Überwachung sind vier PT100-Temperatursensoren sowie zwei Wärmebildkameras verbaut, die die Temperaturentwicklungen an den Lagerstellen und der Rollenoberfläche detektieren können.

Alle Messsignale werden über die modularen SomatXR-Messboxen der Firma HBM erfasst und über ein Profinet-Gateway an die übergeordnete SPS-Steuerung übertragen. Die Konfiguration, Kalibrierung und Auswertung der Messdaten erfolgt zentral über einen Mess-PC mit der Software Catman AP (ebenfalls von HBM).

4.5 Steuerung und Sicherheitsfunktionen

Die Steuerung des Prüfstands erfolgt über eine übergeordnete SPS, welche sämtliche relevanten Parameter und Messwerte aus den Systemen für Messtechnik, Pneumatik und Antrieb zentral erfasst, verarbeitet und steuert. Die SPS bildet damit das Herzstück der Prüfstandslogik und ermöglicht sowohl automatisierte Prüfabläufe als auch eine durchgängige Prozessüberwachung.

Im Rahmen der Steuerungsprogrammierung wurde ein umfassendes Sicherheitskonzept implementiert, das sowohl den Schutz des Bedienpersonals als auch die Schonung der Prüfstands-Komponenten sicherstellt. Neben der Überwachung der Türverriegelung umfasst dieses Konzept auch eine Positionsüberwachung der Tragrolle sowie eine kontinuierliche Kontrolle der Gurtspannkraft. Wird ein definierter Grenzwert überschritten – beispielsweise bei einem unzulässigen Anstieg der Spannkraft oder einer fehlerhaften Rollenposition – erfolgt automatisch ein sicherer Abschaltvorgang. Dabei werden der Antrieb und die pneumatischen Systeme deaktiviert und der Luftdruck in den Balgzylindern kontrolliert abgelassen, um Gefahrenpotenziale wirkungsvoll zu minimieren.

Zusammenfassung

Die Firma Artur Küpper entwickelte in Kooperation mit der Firma Eilhauer einen neuartigen Prüfstand zur realitätsnahen Erprobung von Tragrollen. Der neu entwickelte Prüfstand bildet eine vollständige Bandanlage im verkleinerten Maßstab nach und ermöglicht eine dynamische Prüfung unter realen Betriebsbedingungen.

Ein besonderes Augenmerk liegt auf einem schnellen Rollenwechsel durch ein ausfahrbares Aufnahmegestell sowie der präzisen Erfassung aller relevanten Prüfgrößen.

Durch diese Innovation wird eine reproduzierbare, realitätsnahe und effiziente Prüfung verschiedener Tragrollentypen ermöglicht – ein entscheidender Schritt zur Qualitätssicherung bestehender und zukünftiger Rollenkonstruktionen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Chumachenko, Y., Richter, C., Katterfeld, A.: Smart Monitoring im Einsatz: LoRaWAN™ basiertes Sensornetzwerk zur permanenten Überwachung von Förderanlagen; Beitrag zur 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik, 2021, S. 83-97
- [2] DIN 21112-3, Gurtförderer für den Kohlenbergbau unter Tage - Tragrollen - Teil 3: Prüfung; 2022-12
- [3] Belt Conveyors for Bulk Materials; Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA) 7th Edition
- [4] Barbey, H.-P.: Untersuchung an Tragrollen bei tiefen Temperaturen und hohen Lasten; Dissertation; Fakultät für Maschinenwesen der Universität Hannover; 1987
- [5] Geesmann, F.-O.: Experimentelle und Theoretische Untersuchungen der Bewegungswiderstände von Gurtförderanlagen; Dissertation; Fachbereich Maschinenbau der Universität Hannover; 2001
- [6] Kriwal, A., Alshov, B., Küster, B., Stonis, L., Overmeyer, L.: Entwicklung zur Untersuchung des Laufverhaltens von konventionellen und angetriebenen Tragrollen unter einsatznahen Bedingungen; Beitrag zur 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik, 2021, S. 131-142
- [7] VDI 2341, Gurtförderer für Schüttgut – Tragrollen und Tragrollenabstände; 2007
- [8] Redka, Y.: xForce – Weiterentwicklung einer konventionellen Tragrolle; Beitrag zur 27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik, 2023, S. 123-133

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Vibrationsgestützte Tragrollen-Verschleißdiagnose für die Förderbandinspektion

Daniel Kasperek

Jan Wilke



Dr.-Ing. Daniel Kasperek

REMA TIP TOP AG

Gruber Straße 65

85586 Poing

Vibrationsgestützte Tragrollen-Verschleißdiagnose für die Förderbandinspektion

Tragrollen in Förderbandanlagen unterliegen hohen Belastungen und verschleifen oft unbemerkt. Klassische Inspektionsmethoden erkennen Schäden meist erst spät und es kommt zu ungeplanten Stillständen. Mit MCube RFP – Roller Failure Prediction stellt REMA TIP TOP ein vibrationsgestütztes Diagnosesystem vor, welches schadhafte Tragrollen frühzeitig erkennt. Durch ein relatives Vergleichsprinzip wird der Rollenzustand im laufenden Betrieb objektiv bewertet. Mobile und fest installierte Varianten ermöglichen eine flexible Anwendung. Die Wirksamkeit und der konkrete Nutzen des Systems für Wartung und Betrieb von Förderanlagen werden durch Praxisbeispiele belegt.

1 Einleitung

Förderbandanlagen sind zentrale Elemente in der Schüttgutfördertechnik – ihre Tragrollen tragen maßgeblich zur Führung und Stabilität des Fördergurts bei. In großen Anlagen finden sich oft mehrere hundert Rollen, die jeweils dynamischen Belastungen und rauen Umgebungsbedingungen wie Schmutz, Feuchtigkeit oder Temperaturwechsel ausgesetzt sind.

Obwohl Tragrollen essenziell für den störungsfreien Betrieb sind, erfolgt ihre Überwachung meist manuell durch visuelle oder akustische Inspektionen. Dabei werden Defekte häufig erst erkannt, wenn bereits hörbare Geräusche, spürbares Spiel oder Wärmeentwicklung auftreten – also in einem fortgeschrittenen Ausfallstadium, was zu erhöhten Instandhaltungskosten, erhöhter Energieaufnahme und Anlagenstillständen führen kann.

Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen das Potenzial vibrationsbasierter Methoden zur frühzeitigen Erkennung von Lagerschäden. So analysieren Alharbi et al. moderne Verfahren zur akustischen und vibrationsbasierten Zustandsüberwachung von Tragrollen und heben deren Bedeutung für zustandsorientierte Instandhaltungsstrategien hervor [1]. Rani et al. zeigen in einer systematischen Untersuchung, dass sich durch Zeit-Frequenz-Analysen und darauf aufbauende, datengetriebene Klassifikationsmethoden typische Fehlersignaturen von Rollen präzise erkennen lassen [2]. Auch experimentelle Studien wie von Adhikari et al. belegen, dass schon geringe Veränderungen im Schwingungsverhalten auf frühzeitige Lagerdefekte hinweisen können [3].

Viele dieser Methoden sind jedoch entweder auf Laborbedingungen beschränkt oder erfordern komplexe Sensortechnik und Datenverarbeitung. Für den industriellen Alltag fehlen bislang robuste, praxistaugliche Systeme zur schnellen, einfachen Erkennung defekter Rollen im laufenden Betrieb.

Mit dem MCube RFP (Roller Failure Prediction) hat REMA TIP TOP ein vibrationsgestütztes Diagnosesystem entwickelt, das diese Lücke adressiert. Es ermöglicht eine schnelle, objektive Bewertung des Rollenzustands auf Basis von Schwingungsdaten und lässt sich unkompliziert in bestehende Inspektionsprozesse integrieren.

Ziel dieses Beitrags ist es, den technologischen Ansatz, die Anwendungsmöglichkeiten und erste Erfahrungen mit MCube RFP darzustellen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem praktischen Nutzen für Wartung, Energieeffizienz und Anlagenverfügbarkeit im industriellen Förderbetrieb.

2 Technischer Hintergrund und Problemstellung

Tragrollen sind zentrale Funktionseinheiten in Gurtförderanlagen. Sie stabilisieren den Fördergurt, übernehmen Lasten und beeinflussen entscheidend den Energieverbrauch. In großen Anlagen sind häufig mehrere hundert bis tausend Rollen im Einsatz. Besonders in rauen Umweltbedingungen – wie Bergbau oder Zementproduktion – sind sie hohen Belastungen durch Staub, Feuchtigkeit und Schwingungen ausgesetzt, was zu einem schnellen Lager-Verschleiß führen kann.

Untersuchungen zeigen, dass nahezu 75 % aller mechanischen Ausfälle in Förderbandsystemen auf defekte Tragrollen oder deren Lager zurückzuführen sind [4]. Zugleich erzeugen blockierte oder festsitzende Rollen erhebliche Mehrbelastung: Studien belegen, dass festsitzende Rollen den Energiebedarf von Anlagen signifikant erhöhen können [5].

Traditionelle Zustandsüberwachungsverfahren – wie Sichtkontrolle, akustische Hinweise oder Temperaturmessung – greifen häufig erst im späten Stadium eines Rollenfehlers. Eine experimentelle Studie von Liu et al. zeigte, dass kontinuierliche thermografische Messungen zwar zuverlässig sind, jedoch erhebliche Aufwände und Kosten verursachen [6]. Zudem sind viele Anlagenbereiche schlecht zugänglich, was regelmäßige manuelle Inspektionen erschwert.

Moderne Methoden kombinieren vibrationsbasierte Analyse mit Modellierung und datengetriebenen Verfahren: Liu et al. entwickelten Modelle zur Vorhersage von Rollendefekten durch die Analyse von Schwingungsdaten im Zeit-Frequenz-Bereich [6]. Diese Ansätze zeigten hohe Genauigkeit, sind aber meist auf Laborszenarien begrenzt oder erfordern permanente Sensorinstallation, was den industriellen Einsatz einschränkt. Ein Review von Alharbi et al. bestätigt diesen Trend, hebt jedoch hervor, dass praktische Lösungen in großindustriellen Umgebungen bislang selten sind [1].

Daraus ergibt sich die zentrale Problemstellung: Es besteht ein Bedarf an einer praxistauglichen, kosteneffizienten und skalierbaren Lösung zur frühzeitigen Erkennung von Tragrollen- bzw. Lagerdefekten im laufenden Betrieb. Das System sollte ohne aufwändige Sensorinfrastruktur funktionieren und sich nahtlos in bestehende Wartungsprozesse integrieren lassen.

Mit dem System MCube RFP adressiert REMA TIP TOP genau diese Anforderungen: Es nutzt kurzzeitige vibrationsbasierte Messungen zur objektiven Bewertung des Rollenzustands im Feld und schließt gezielt die Lücke zwischen Laborverfahren und industrieller Anwendung.

3 Systembeschreibung – MCube RFP

Das System MCube RFP (Roller Failure Prediction) wurde von REMA TIP TOP entwickelt, um eine praxistaugliche, robuste und gleichzeitig wirtschaftliche Lösung zur frühzeitigen Erkennung von Tragrollenschäden zu bieten. Ziel ist es, eine präzise Diagnose im Feld zu ermöglichen – unabhängig von permanent installierter Sensorik oder anlagenspezifischen Referenzdatenbanken.

3.1 Messprinzip

MCube RFP basiert auf der Analyse der Schwingungen einzelner Tragrollenlager durch ein dreiachsiges Beschleunigungssensorsystem. Die Besonderheit des Verfahrens liegt in der Auswertung auf Basis eines relativen Vergleichsprinzips: Bei der Messung mehrerer Rollen innerhalb einer Anlage (z. B. 15–30 Stück) werden die Schwingungsdaten der Rollen zueinander in Beziehung gesetzt.

Intakte Rollen weisen dabei typischerweise ein ähnliches Schwingungsverhalten auf – geprägt durch das spezifische dynamische Verhalten der jeweiligen Förderanlage. Weichen einzelne Rollen davon deutlich ab, wird dies als Hinweis auf einen möglichen Defekt interpretiert. So lassen sich schadhafte Rollen eindeutig identifizieren, ohne dass ein externer oder anlagenspezifischer Referenzdatensatz erforderlich wäre.

Bild 1, entnommen aus Milovancevic et al. (2024) [8], illustriert beispielhaft die zeitlich-frequenzmäßige Dynamik von Vibrationssignalen bei unterschiedlichen Fehlerbildern von Tragrollen.

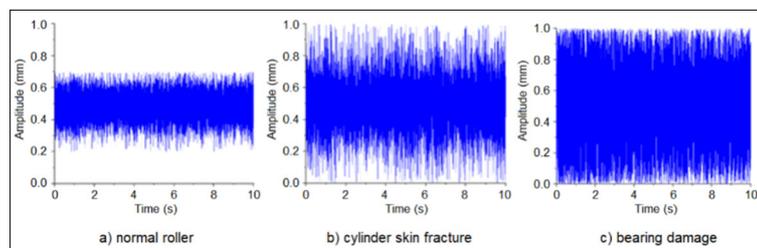


Bild 1: Amplituden-Zeit-Korrespondenzkurve verschiedener Tragrollenzustände [8]

Diese Methodik bietet einen entscheidenden Vorteil gegenüber vielen klassischen Diagnosesystemen, die auf vordefinierte Grenzwerte oder vorab trainierte Modelle angewiesen sind. MCube RFP benötigt weder maschinenspezifisches Training noch eine aufwendige Kalibrierung. Die Diagnose basiert vollständig auf dem internen Vergleich der im gleichen Messzyklus erhobenen Daten – einfach, robust und reproduzierbar.

3.2 Systemvarianten

MCube RFP ist in zwei Varianten verfügbar:

- **MCube RFP Mobile**

Für den Einsatz bei Inspektionen in zugänglichen Anlagenbereichen. Die Schwingungsdaten werden während des laufenden Betriebs erhoben, pro Rolle typischerweise in ca. 3 Sekunden. Die Steuerung und Datenerfassung erfolgen über eine mobile Einheit mit direkter Anzeige der Ergebnisse (siehe Bild 2).



Bild 2: Mobiler Einsatz mit Handgerät an laufender Förderanlage [9]

- **MCube RFP Fixed**

Für kontinuierliches Monitoring in schwer zugänglichen oder kritischen Anlagenbereichen. Fest installierte Sensoren übertragen die Schwingungsdaten fortlaufend an ein zentrales Auswertungssystem, das die relative Vergleichsanalyse automatisiert durchführt (siehe Bild 3).

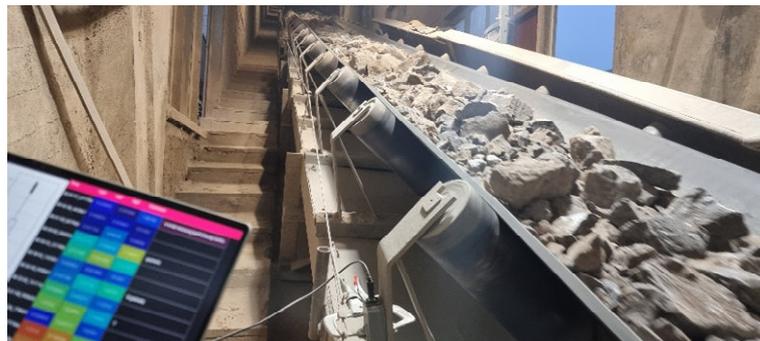


Bild 3: MCube RFP Fixed auf Tragrollenstation mit Verkabelung [9]

3.3 Integration in bestehende Systeme

Durch die Kombination aus einfacher Messdurchführung und relativer Datenauswertung lässt sich MCube RFP nahtlos in bestehende Wartungs- und Inspektionsprozesse integrieren. Die mobile Variante eignet sich ideal für turnusmäßige Begehungen und unterstützt eine zustandsorientierte Instandhaltung ohne zusätzlichen organisatorischen Aufwand.

Die Ergebnisse können über standardisierte Schnittstellen dokumentiert und mit Maintenance Management Systemen verknüpft werden. Dadurch entsteht eine vollständige, datenbasierte Sicht auf den technischen Zustand – objektiv messbar, nachvollziehbar und direkt in bestehende Systeme integrierbar.

4 Integration in den Instandhaltungsprozess

Die Instandhaltung von Förderbandanlagen steht unter zunehmendem Druck, sowohl wirtschaftliche Effizienz als auch betriebliche Sicherheit zu gewährleisten. Klassische Wartungsstrategien – insbesondere rein zyklische oder rein reaktive Ansätze – stoßen dabei an ihre Grenzen: Schäden an Tragrollen werden oft zu spät erkannt, Wartungsressourcen nicht optimal eingesetzt und kritische Zustände übersehen.

MCube RFP unterstützt hier einen praxistauglichen Wandel hin zu einer zustandsorientierten, risikobasierten Instandhaltung. Die Integration in bestehende Prozesse erfolgt flexibel – sowohl über die mobile Variante für gezielte Einzelmessungen als auch über die fest installierbare Lösung für kontinuierliches Monitoring.

4.1 Einbindung in Inspektions- und Wartungsabläufe

Die mobile Variante von MCube RFP eignet sich ideal zur Ergänzung bestehender Inspektionsroutinen. Während geplanter Begehungen oder Serviceeinsätze können Rollen gezielt geprüft und Auffälligkeiten identifiziert werden – direkt vor Ort und ohne aufwändige Auswertung, siehe Bild 4. Der direkte Vergleich der gemessenen Schwingungsmuster innerhalb eines Anlagenabschnitts ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Einschätzung des technischen Zustands.



Bild 4: Anwender mit MCube RFP-Handgerät während einer Routineinspektion [9]

In kritischen oder schwer zugänglichen Bereichen lässt sich das System auch fest verbauen, um kontinuierlich Daten zu erfassen und automatisch zu bewerten. Dies schafft zusätzliche Transparenz und reduziert manuelle Kontrollbedarfe.

4.2 Beitrag zur Betriebssicherheit

Defekte oder blockierte Tragrollen zählen zu den Hauptursachen für Brände entlang von Förderstrecken – insbesondere bei hoher Reibung und Materialanhaftungen. Die frühzeitige Erkennung von Lagerschäden mit MCube RFP leistet daher nicht nur einen Beitrag zur Anlagenverfügbarkeit, sondern auch zur aktiven Gefahrenprävention.

5.1 Identifikation bekannter Defekte

MCube RFP wurde in verschiedenen Testszenarien gezielt an Förderanlagen eingesetzt, bei denen bereits bekannte oder vermutete Rollendefekte vorlagen. Ziel war es, die Praxistauglichkeit des Systems unter realen Bedingungen zu validieren. Dabei zeigte sich ein konsistentes Muster: In allen Fällen, in denen das System auffällige Rollen identifizierte, konnten bei der anschließenden manuellen Prüfung an den entsprechenden Stellen Rollen mit erhöhtem Widerstand, Schwergängigkeit oder beginnendem Lagerschaden festgestellt werden.

So zum Beispiel bei einer Gurtförderanlage in Großbritannien: Dort wurde MCube RFP eingesetzt, um eine größere Anzahl von Rollen zu analysieren. Die auffälligen Rollenstühle, die durch das System detektiert wurden, bestätigten sich bei der Kontrolle vor Ort als tatsächlich betroffen. Ein ähnliches Bild ergab sich in einem italienischen Zementwerk, in dem auffällige Rollen ebenfalls eindeutig durch das System erkannt und später validiert werden konnten.

Diese Erfahrungen belegen die Zuverlässigkeit des relativen Vergleichsprinzips – unabhängig von Anlagentyp oder Umgebungsbedingungen.

Die mobile Variante von MCube RFP wurde auch erfolgreich in einer Ziegelei eingesetzt. Trotz staubiger Umgebung und eingeschränkter Zugänglichkeit konnte das System zügig angewendet werden, siehe Bild 6. Die Messergebnisse bestätigten, dass auch in diesem Umfeld eine zuverlässige Unterscheidung zwischen intakten und auffälligen Rollen möglich ist.



Bild 6: Bedienungssituation im Realbetrieb [9]

In einer Müllverbrennungsanlage in Deutschland ergaben sich hingegen Einschränkungen für den mobilen Einsatz: Wie in Bild 7 dargestellt, war die Förderanlage durch bauliche Maßnahmen stark gesichert (z. B. durch Gitterverkleidungen und Zugangsschutz). Hier zeigte sich, dass die fest installierte Variante von MCube RFP für den kontinuierlichen Einsatz besser geeignet ist. Die Testergebnisse belegen, dass sich beide Varianten je nach Anwendungsfall sinnvoll ergänzen.



Bild 7: Typischer Anlagenabschnitt in der Müllverbrennung mit Zugangsbeschränkung [9]

5.2 Erweiterte Nutzung: Antriebstrommeln

Neben der Überwachung klassischer Tragrollen zeigte sich in der Praxis ein weiterer Anwendungsbereich: Einige Kunden setzen das System zusätzlich zur Zustandsbewertung von Antriebstrommeln (Pulleys) ein – insbesondere zur Überwachung der Lager. Dabei wird nicht, wie bei Tragrollen, ein Vergleich zwischen mehreren Komponenten durchgeführt, sondern eine einzelne Trommel über einen definierten Zeitraum regelmäßig gemessen. Die zeitlich aufeinanderfolgenden Schwingungsdaten werden anschließend ausgewertet, um schleichende Veränderungen im Lagerzustand zu erkennen.

Diese Anwendung verdeutlicht die Flexibilität des Systems und dessen Übertragbarkeit auf weitere rotierende Komponenten innerhalb der Fördertechnik.

5.3 Weiterentwicklung durch Praxiseinsätze

Die wiederholte Anwendung in verschiedenen Branchen und Ländern trägt wesentlich zur Weiterentwicklung des Systems bei. Kleinere Anfangsschwächen – etwa bei der Bedienführung oder der Schnittstellennutzung – wurden im direkten Dialog mit Anwendern identifiziert und bereits im weiteren Entwicklungsverlauf korrigiert. Auch die Datenübertragung an PC-Systeme zur Archivierung und Analyse wurde optimiert, sodass heute eine robuste, einfach zu handhabende Lösung zur Verfügung steht.

6 Nutzen und Ausblick

Die bisherigen Anwendungen von MCube RFP haben gezeigt, dass das System einen relevanten Beitrag zur Effizienz, Sicherheit und Planbarkeit im Betrieb von Gurtförderanlagen leisten kann. Durch die konsequente Nutzung eines relativen Vergleichsprinzips können defekte oder schwergängige Rollen frühzeitig erkannt werden – unabhängig von Anlagenhersteller, Baujahr oder Fördergut.

6.1 Konkrete Vorteile im Betrieb

Die Rückmeldungen aus den Praxiseinsätzen zeigen, dass MCube RFP für Betreiber mehrere zentrale Vorteile bietet:

- Zuverlässige Früherkennung von Lagerschäden ohne externe Referenzdaten
- Zeit- und Ressourceneffizienz durch gezielte Messung und klare Priorisierung
- Flexibler Einsatz in unterschiedlichen Branchen und Anlagenlayouts
- Erhöhung der Betriebssicherheit durch rechtzeitige Intervention
- Reduktion ungeplanter Stillstände und Schutz des Fördergurts vor Folgeschäden

Durch die kompakte Bauweise, die einfache Handhabung und die direkte Auswertbarkeit der Daten eignet sich insbesondere die mobile Variante ideal für den operativen Einsatz durch Serviceteams. Die fest installierte Variante ergänzt dies bei Bedarf um kontinuierliche Überwachung in kritischen oder schwer zugänglichen Bereichen.

6.2 Ausblick

Die bisherigen Einsätze haben das System technologisch stabilisiert und das Vertrauen im Feld gestärkt. Der nächste Schritt ist nun die breitere Skalierung – sowohl durch die systematische Integration in Serviceprozesse als auch durch die Schulung von Anwendern. Darüber hinaus eröffnen sich durch die zunehmende Digitalisierung von Wartung und Anlagenbetrieb neue Potenziale, etwa in Bezug auf:

- Zustandsbasierte Lebensdauerprognosen
- Trendanalysen auf Basis aggregierter Schwingungsdaten
- Verknüpfung mit automatisierter Ersatzteilbereitstellung
- Erweiterung auf andere Komponentenarten (z. B. Motorlager, Kupplungen)

MCube RFP ist damit nicht nur ein Werkzeug zur Fehlererkennung, sondern ein Beitrag zur datenbasierten Weiterentwicklung der Fördertechnik-Instandhaltung – modular, skalierbar und praxisorientiert.

Zusammenfassung

Mit MCube RFP steht ein praxiserprobtes System zur Verfügung, das die vibrationsbasierte Zustandsbewertung von Tragrollen effizient, zuverlässig und wirtschaftlich ermöglicht. Durch das relative Vergleichsprinzip können defekte oder schwergängige Rollen frühzeitig erkannt werden – ohne aufwendige Referenzmodelle oder dauerhafte Sensorinstallationen.

Der modulare Aufbau, die einfache Handhabung und die robuste Diagnostik machen das System zu einem vielseitigen Werkzeug für unterschiedliche Anwendungsbereiche – von der mobilen Einzelmessung bis zur fest installierten Dauerüberwachung. Die positiven Rückmeldungen aus der Praxis bestätigen den technologischen Ansatz und unterstreichen den Mehrwert für Betreiber und Serviceeinheiten gleichermaßen.

MCube RFP leistet damit einen konkreten Beitrag zu einer sichereren, effizienteren und datenbasierten Instandhaltung von Förderanlagen – mit Potenzial für weitere Anwendungen in der Fördertechnik.

Quellenverzeichnis:

- [1] Alharbi, M., Elasha, F., Langdon, P. (2023): Condition Monitoring of Idlers in Belt Conveyor Systems Using Vibration and Acoustic Sensors. *Sensors*, 23(4), 1902. <https://doi.org/10.3390/s23041902>
- [2] Rani, M. R., Alangari, A. A., Kumar, A. et al. (2024): A hybrid time–frequency and machine learning framework for conveyor idler fault diagnosis. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 29(4), 2091–2103
- [3] Adhikari, B., Dubey, S., Kumar, M. (2023): A Vibration-Based Fault Diagnosis Framework for Belt Conveyor Idlers. *Symmetry*, 15(9), 1626. <https://doi.org/10.3390/sym15091626>
- [4] Zhang, R., Lodewijks, G. et al. (2009): Failure analysis of belt conveyor systems for condition monitoring purposes. *Mining Science*
- [5] Ilic, D., Wheeler, C. (2017): Measurement and simulation of the bulk solid load on a conveyor belt during transportation. *Powder Technology*, Elsevier
- [6] Liu, X. (2016): Prediction of Belt Conveyor Idler Performance. Dissertation, Delft University of Technology
- [7] Alharbi, F., Luo, S., Zhang, H., Chen, Z. (2023): A Brief Review of Acoustic and Vibration Signal-Based Fault Detection for Belt Conveyor Idlers Using Machine Learning Models. *Sensors – Basel*
- [8] Milovancevic, M., Sahan, M., & Dapo, S. (2024). Diagnosing Belt Conveyor Idler Faults with STFT and CNN. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 29(4), 2091–2103. <https://doi.org/10.20855/ijav.2024.29.41527>
- [9] REMA TIP TOP AG, Gruber Straße 65, 85586 Poing, Deutschland

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Reduzierung von Stillstandszeiten durch intelligente Wartungsstrategien

Ismail Ayoun



Ismail Ayoun (Referent)

Gurtec GmbH

Gurtecstraße 3

38170 Schöppenstedt

Veröffentlichungsgenehmigung nicht erteilt.

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Experimentelle und simulative Untersuchung der Partikeldegradation bei Aufprall aus großen Fallhöhen

Hendrik Otto

Richard Spaargaren

Lisa Wonner

Mohsin Ajmal

André Katterfeld



Dr.-Ing. Hendrik Otto (Referent)
Mohsin Ajmal, M. Sc.
IBAF GmbH
Listemannstraße 10a
39104 Magdeburg



Richard Spaargaren
ESI Eurosilos BV
Newtonstraat 26-28
1446 VR Purmerend (The Netherlands)



Lisa Wonner, M. Sc.
Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld
Professur für Förder- und
Materialflusstechnik
Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg

Experimentelle und simulative Untersuchung der Partikeldegradation bei Aufprall aus großen Fallhöhen

Beim Einspeichern von Schüttgütern in Silos kommt es zu vergleichsweise großen Fallhöhen von bis zu 60 m. Hierbei tritt, wie in allen Schüttgutumschlagsprozessen, Kornzerstörung auf. Die vorliegende Studie zeigt, wie durch experimentelle Untersuchungen eine Abhängigkeit der Kornzerstörung von der Fallhöhe nachgewiesen werden kann. Ferner wird diese Abhängigkeit genutzt, um Simulationsmodelle mit DEM zu parametrieren und für reale Anwendungen eine Aussage über die Menge an erzeugtem Feingut bei einer Silobefüllung zu treffen.

Die entwickelte Methodik umfasst die systematische Vermessung der Degradation des Schüttguts sowie der Partikelflusseigenschaften. Aus diesen Untersuchungen wird ein Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Degradation hergestellt. Darauf aufbauend lässt sich ein Partikelsimulationsmodell parametrieren, mit dem Aufprallkräfte in der DEM für die entsprechenden Fallhöhen abgeleitet werden. Daraus wird ein Zusammenhang zwischen Aufprallkraft und Degradation errechnet. Dieser Zusammenhang wird in einer Simulation der realen Anlage genutzt, um die tatsächliche Partikelzerstörung zu berechnen.

Das Vorgehen ist exemplarisch und lässt sich auf beliebige Anwendungen wie Silos, Übergabestellen, Schüttguthalden und Schiffsbelader übertragen.

1 Einleitung

In der Schüttgutfördertechnik tritt bei nahezu allen Anwendungen im Umgang mit Schüttgütern Verschleiß auf. Häufig wird unter Verschleiß vor allem der Materialabtrag an Anlagenteilen, etwa an Schurrenauskleidungen, verstanden. Dieser Abtrag entsteht durch Relativbewegungen zwischen Schüttgut und Wandungen bei gleichzeitig wirkenden Normalkräften.

Der dabei entstehende Verschleiß lässt sich in drei grundlegende Wirkmechanismen unterteilen: Abrasion, Strahlverschleiß und Oberflächenzerrüttung [1]. Neben dem Verschleiß an den Anlagenteilen kommt es jedoch auch zu einem Verschleiß der Schüttgutpartikel selbst. Die dabei auftretenden mechanischen Belastungen führen zu einer Partikelverkleinerung und beeinflussen somit auch die Eigenschaften des Fördergutes.

Diese Arbeit soll einen Ansatz liefern, den Verschleiß des Schüttguts zu charakterisieren, messbar zu machen und numerisch so abzubilden, dass die Kornverkleinerung als Erhöhung des Feingutanteils im Schüttgut berechenbar wird. Während der Verschleiß von Anlagenteilen in der Schüttgutfördertechnik bereits vielfach untersucht wurde, ist der partikuläre Verschleiß – also die Veränderung und Zerkleinerung der Schüttgutpartikel selbst – bislang weniger systematisch erfasst. Dabei hat dieser Prozess direkten Einfluss auf das Fließverhalten, die Entmischungstendenzen sowie auf nachfolgende Prozesse wie Sichten, Sieben oder thermische Behandlungen. Der partikelinduzierte Verschleiß entsteht infolge von Kollisionen, Reibung und Druckbeanspruchung, denen das Schüttgut im Anlagenbetrieb ausgesetzt ist. Ziel dieser Arbeit ist es daher, geeignete Messmethoden und Modellierungsansätze zu entwickeln, mit denen sich dieser Effekt quantifizieren und in numerische Simulationen integrieren lässt.

Die entwickelte Methodik umfasst fünf aufeinander aufbauende Schritte zur quantitativen Beschreibung des Partikelverschleißes. Erstens wird die Degradation von Partikeln

experimentell erfasst, indem gezielt Versuche mit variierenden Fallhöhen durchgeführt und die daraus resultierenden Veränderungen der Partikelgrößenverteilung gemessen werden. Zweitens wird auf Basis dieser Daten ein numerisches Modell unter Verwendung der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) entwickelt, das einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Fallhöhe und den bei Partikelkontakten entstehenden Kräften beschreibt. Drittens wird dieser Zusammenhang auf eine DEM-Simulation einer realen Anwendung übertragen. Die auftretenden Kontaktkräfte werden analysiert und daraus eine äquivalente Schädigung der Partikel abgeleitet. Viertens wird das Verfahren auf eine große Anzahl von Partikeln angewendet, um ein belastbares Abbild der gesamten Materialbeanspruchung im System zu erhalten. Fünftens wird ein statistisches Modell erstellt, das den Gesamtprozess der Partikelbeanspruchung abbildet und es ermöglicht, die resultierende Erhöhung des Feingutanteils im Schüttgut vorherzusagen.

Die vorgestellte Methodik soll dabei durch einfache Versuche umsetzbar sein, sodass Anwendungen aus der Schüttgutfördertechnik mit vertretbarem Aufwand berechenbar werden. Der erste Schritt ist daher die messtechnische Erfassung der Abhängigkeit der Partikeldegradation von der Fallhöhe.

2 Messung der Degradation im Versuch

Unter der Annahme, dass der durch den Förderprozess entstehende Feingutanteil die kritische Komponente zur Beschreibung des Partikelverschleißes darstellt, wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt, um die Degradation von Schüttgut ohne Anfangsfeinanteil experimentell zu erfassen (vgl. Bild 1).

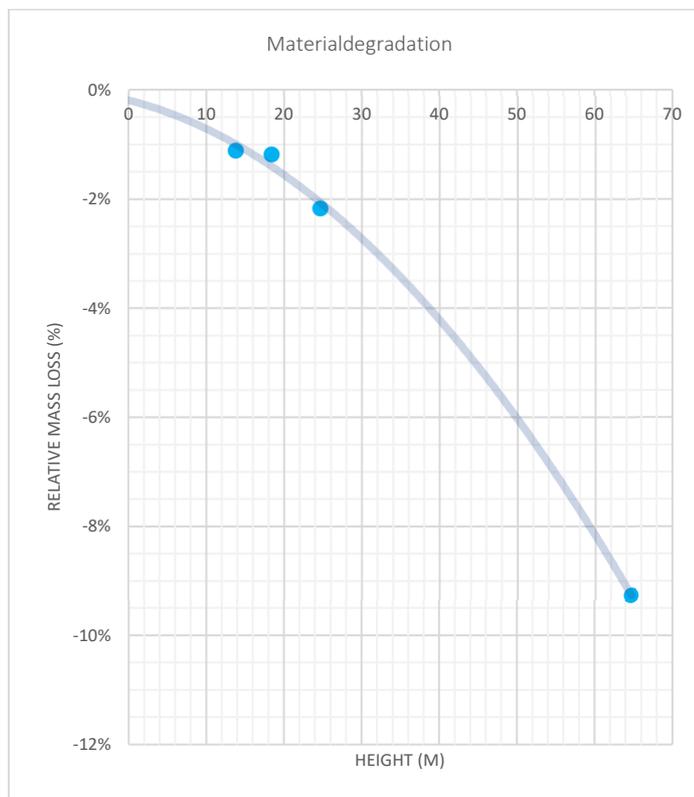


Bild 1: Versuchsaufbau (links) und Massenverlustfunktion (rechts)

Hierzu wurde an einem Treppenturm eines Silos ein 65 m hohes Fallrohr installiert, das in regelmäßigen Abständen von etwa 4 m über Y-Stücke die definierte Einschleusung von Schüttgutproben ermöglicht. Jede dieser Proben durchläuft somit eine definierte Fallhöhe, bevor sie am Fuß des Rohrs aufgefangen und analysiert wird. Ziel ist es, in Abhängigkeit von der Fallhöhe den durch den Materialabrieb entstehenden Feingutanteil zu bestimmen. Auf diese Weise lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Partikelzerkleinerung herstellen, der als Grundlage für die nachfolgende Modellierung dient.

Der Aufprall des Schüttguts erfolgt in einem am unteren Ende des Fallrohrs positionierten Auffangcontainer. Dieser Container dient als definierte Prallfläche zur Erzeugung realistischer Beanspruchungen nach dem freien Fall. Nach dem Aufprall wird das Schüttgut vollständig aufgefangen und im Anschluss die Masse des verbleibenden Grobguts bestimmt. Hierzu werden die größeren Partikel abgesiebt, um die durch den Aufprall verursachte Partikelverkleinerung quantifizierbar zu machen. Feingut in Form sehr feiner Partikel oder Staub kann aufgrund von Austragungsverlusten und Messunsicherheiten nicht zuverlässig erfasst werden. Die Analyse konzentriert sich daher auf den relativen Verlust des Grobgutanteils als messbares Maß für die Degradation.

Je nach Partikelgröße und -form kann es erforderlich sein, unterschiedliche Fallhöhen zu betrachten, da sich die Endgeschwindigkeit eines Partikels im freien Fall in Abhängigkeit vom Verhältnis seiner Masse zu seiner Querschnittsfläche einstellt. Kleinere Partikel mit höherem Strömungswiderstand erreichen bereits bei geringerer Fallhöhe ihre Endgeschwindigkeit, während größere und dichtere Partikel eine längere Beschleunigungsstrecke benötigen. Um vergleichbare mechanische Beanspruchungen zu erzielen, müssen daher fallhöhenabhängige Anpassungen in der Versuchsplanung vorgenommen werden.

Für kleine Partikel im laminar dominierten Fall (Reynolds-Zahl < 1) kann die Endgeschwindigkeit im freien Fall durch das Gleichgewicht zwischen Gewichtskraft und Strömungswiderstand berechnet werden. Die klassische Herleitung basiert auf dem Stokes'schen Gesetz für den Widerstand kugelförmiger Partikel.

Der Fall im Rohr führt bei den Partikeln jedoch zu einer deutlichen Zunahme der Endgeschwindigkeit, da sich die Luft entgegen der Fallrichtung der Partikel mitbewegt bzw. verdrängt wird und somit den Luftwiderstand reduziert. In Anlagen mit längeren Fallstrecken konnten die Autoren durch Messungen bereits Luftgeschwindigkeiten von über 15 m/s nachweisen, was eine signifikante Beeinflussung der Partikelgeschwindigkeit und damit der Aufprallenergie zur Folge hat. Der Versuchsaufbau mit Fallrohr ist daher nicht als unrealistisch zu bewerten.

Die Ergebnisse sind in Bild 1 dargestellt. Für das hier untersuchte Schüttgut mit hoher Dichte und einer Partikelgröße im Bereich von 50 mm bis 80 mm zeigt sich ein progressiver Verlauf: Mit zunehmender Fallhöhe steigt der Feingutanteil überproportional an, was auf eine zunehmende mechanische Beanspruchung und damit verstärkte Partikeldegradation hinweist. Der Feingutanteil wird hierbei als Massenverlust an verwertbarem Material interpretiert. Eine Betrachtung der Korngrößenänderung findet in diesem Fall nicht statt.

Dieser Verlauf lässt sich durch die unterschiedlichen Wirkmechanismen des Partikelverschleißes erklären. Bei geringen Fallhöhen dominiert Materialabrieb in Form feiner Oberflächenabnutzung. Bei mittleren Fallhöhen kommt es verstärkt zu Chipping, also zu lokalen Abplatzungen an der Partikeloberfläche. Bei hohen Fallhöhen hingegen treten Partikelbrüche auf, bei denen die Partikel durch die hohe mechanische Beanspruchung in mehrere größere Fragmente und einen größeren Teil Fein- und Feinstgut zerbrechen. Diese Differenzierung der Verschleißmechanismen erklärt den beobachteten progressiven Anstieg des Feingutanteils mit zunehmender Fallhöhe.

3 Nachbildung der Versuche

Das methodische Ergebnis der Versuche ist ein empirisch ermittelter Funktionszusammenhang zwischen Fallhöhe und dem Partikelmassenverlust. Dieser Zusammenhang beschreibt die resultierende Degradation in Abhängigkeit von der mechanischen Beanspruchung durch einen einzelnen Fallvorgang. Um daraus belastbare Aussagen für reale Anwendungen abzuleiten, muss dieser Zusammenhang auf Fördersituationen mit mehrfachen Partikelkollisionen übertragen werden. Dies erfordert eine Umrechnung des Einzelfalls auf komplexe Belastungskollektive, wie sie typischerweise während des Schüttguttransports auftreten.

3.1 Schüttgutlabor

Der erste Schritt zur Übertragung des empirischen Zusammenhangs in reale Anwendungsszenarien ist die Nachbildung der Versuche in einer DEM-Simulation. Um das Verhalten des Schüttguts realitätsnah abzubilden, ist zunächst eine grundlegende Charakterisierung der Materialeigenschaften im Labor erforderlich. Zu den wesentlichen Parametern, die für die Modellkalibrierung benötigt werden, zählen der Böschungswinkel, der Wandreiwert sowie die Schüttdichte. Diese Größen bestimmen maßgeblich das Fließverhalten des Schüttguts und dienen als Eingangswerte für die numerische Simulation der Partikelbewegungen und -belastungen.

3.2 Kalibrierung

Nach den Laborversuchen wird das Schüttgut mittels Parameterstudien kalibriert [2], um das Fließverhalten in der Simulation entsprechend den Beobachtungen aus den Laborversuchen realitätsgetreu abzubilden. Ziel ist es, ein Fließverhalten zu erzeugen, das dem des untersuchten Schüttguts in der tatsächlichen Anwendung möglichst genau entspricht.

3.3 Kraftsimulation

In der Simulation der Anwendung lässt sich der Verschleiß der Partikel nicht direkt bestimmen. Stattdessen kann die auftretende Aufprallkraft ermittelt werden. Daher muss der empirische Funktionszusammenhang aus Bild 1, der die Fallhöhe mit der Degradation verknüpft, in einen Zusammenhang zwischen Kraft und Degradation überführt werden. Das bedeutet, die Fallhöhe wird in der Simulation als partikelbezogene Kraft dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass diese Kraft innerhalb der Diskrete-Elemente-Methode (DEM)

betrachtet wird. Aufgrund der Modellannahmen ist davon auszugehen, dass die in der DEM berechneten Kräfte nicht realistisch messbar sind, da die Partikelsteifigkeit im Modell häufig deutlich geringer angesetzt wird als im realen Material.

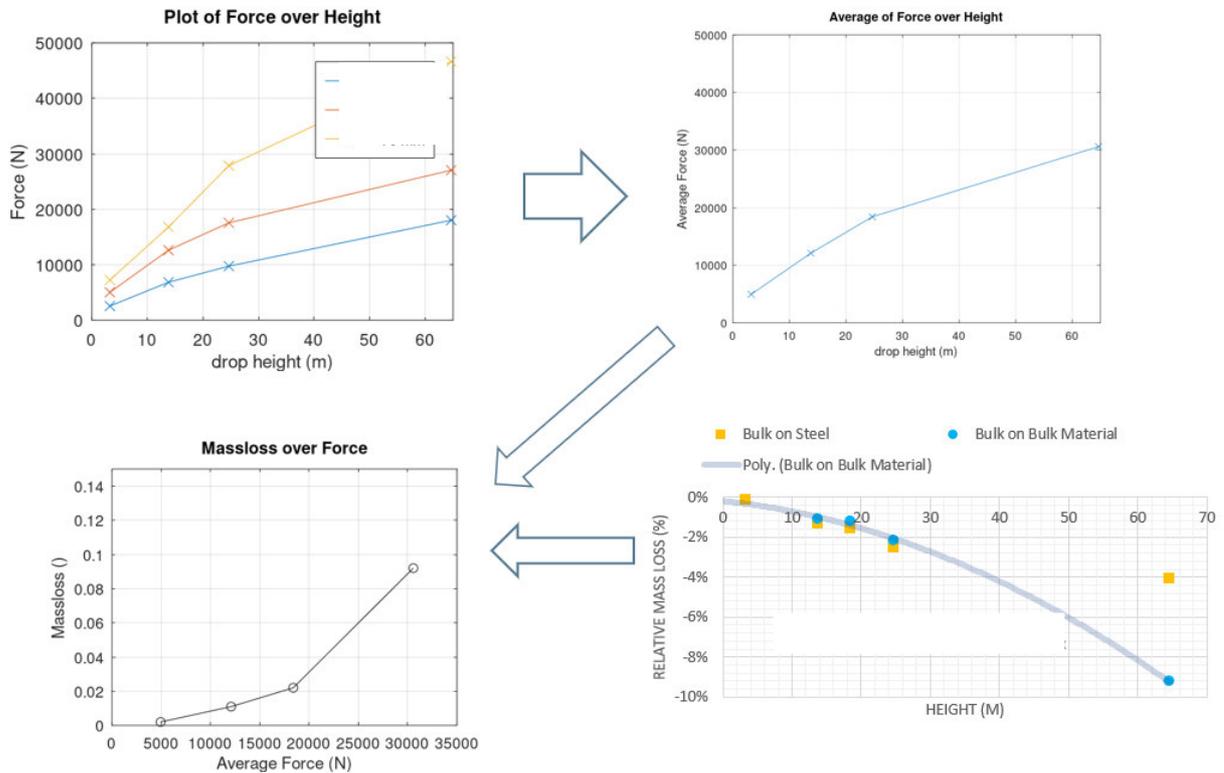


Bild 2: Ablauf der Methode.

Kraft-Höhe-Zusammengang (links oben und oben rechts) wird zu Massenverlust vs. Kraft

Um den Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Aufprallkraft herzustellen, werden die kalibrierten Partikel in einer Vorsimulation aus unterschiedlichen Fallhöhen fallen gelassen. Dabei wird der initiale Einschlag mit dem zugehörigen Kraftmaximum an einer Platte erfasst und ausgewertet.

3.4 Herstellen eines funktionalen Zusammenhangs

Bild 2 zeigt den Ablauf dieses Verfahrens. Unterschiedliche Partikel werden simuliert, um eine durchschnittliche Kraft-Fallhöhen-Funktion zu ermitteln. Diese wird anschließend mit dem zuvor ermittelten Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Verschleiß kombiniert, sodass ein Funktionszusammenhang zwischen der Partikeldegradation und der einzelnen Kraftspitze hergestellt werden kann.

4 Simulation der Einspeicherung

Um die Degradation eines Partikels während eines Förderprozesses realistisch zu simulieren, ist es notwendig, alle auf den Partikel wirkenden Kräfte innerhalb der DEM-Simulation zu erfassen. Dabei sind nicht nur die Kräfte relevant, die an Übergabestellen auftreten, sondern auch jene, die während des Falls im Silo wirken – ein Vorgang, der

vermutlich den größten Beitrag zur Partikelgrößenverkleinerung leistet. Ebenso wichtig ist jedoch die Betrachtung der Kräfte, die auf ruhende Partikel einwirken, also solche, die sich in einem stationären Zustand befinden. Besonders hervorzuheben ist hierbei der Belastungszustand von Partikeln, die sich an der oberen Schicht des Haufwerks befinden und durch den Aufprall nachfolgender Partikel von oben mechanisch beansprucht werden (Bild 3). Auch diese externen Krafteinwirkungen ohne Eigenbewegung können zur Schädigung und somit zur Degradation beitragen.

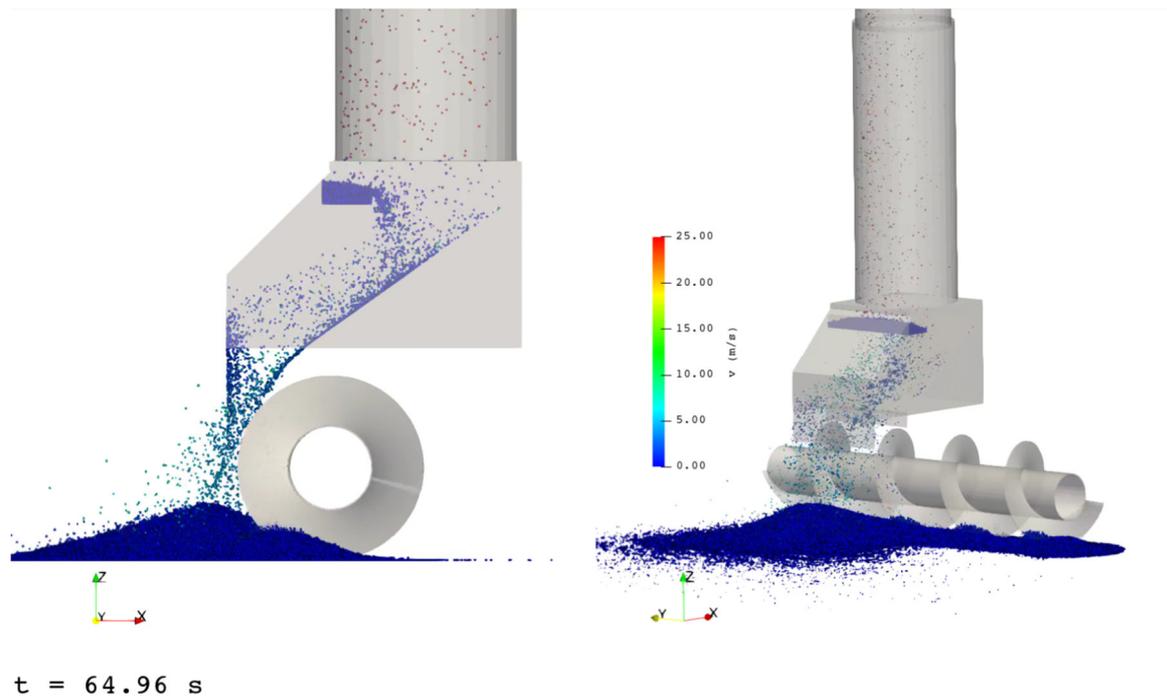


Bild 3: Simulation der Anwendung mit Aufprallbereich im Inneren der Schurre (links) und beim Sekundäraufprall im Haufwerk (rechts)

Kraftanalyse

Gesondert hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Bedeutung der Belastungsänderung eines Partikels. Während kurzzeitige Kraftspitzen maßgeblich zur Degradation beitragen können, zeigen Partikel unter konstantem Druck in der Regel keine relevante Veränderung. Entscheidend für die Schädigung ist somit nicht die Höhe der statischen Belastung, sondern die Dynamik der Kraftänderung. In Bild 4 ist exemplarisch ein Partikel dargestellt, der die in Bild 3 gezeigte Anlage durchlaufen hat. Anhand seines Kraftverlaufs lassen sich typische Belastungsspitzen erkennen, die mit einem erhöhten Risiko für Partikelbruch oder Abplatzungen einhergehen.

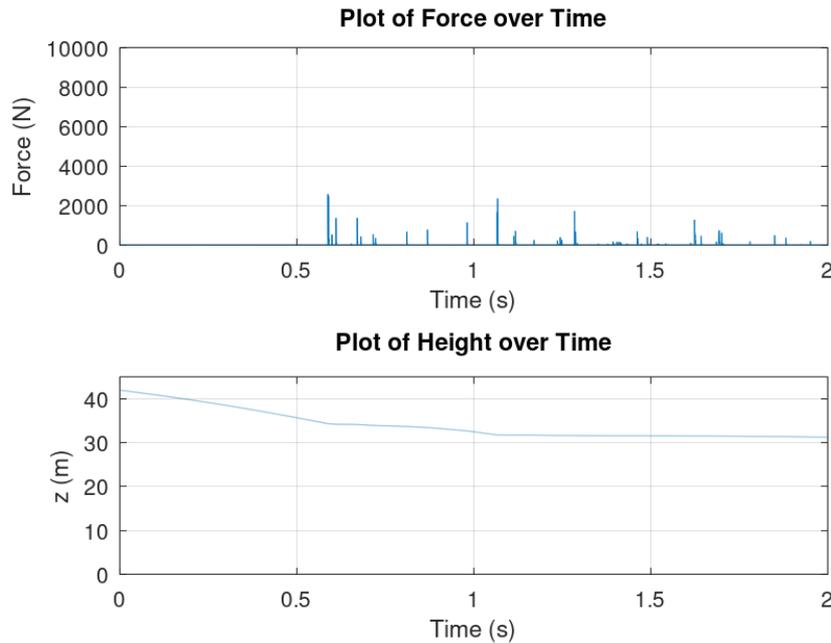


Bild 4: Kraft und Weg eines Partikels beim Befüllen eines Silos. Gut zu erkennen sind die Kraftspitzen bei initialem Aufprall und die folgenden sekundären Lasten durch Eigenbewegung und Fremdbelastung.

Wenn man die Belastungen der Partikel systematisch analysieren wollte, wäre eine Klassierung der Partikelkräfte erforderlich, beispielsweise durch eine Rainflow-Klassierung analog zur Betriebsfestigkeitsanalyse in der Werkstofftechnik. Durch diese Methode ließen sich wiederkehrende Belastungszyklen identifizieren und quantifizieren. Aufbauend darauf könnte angenommen werden, dass sich Betriebsfestigkeitsmodelle nach Wöhler, wie sie für metallische Werkstoffe etabliert sind, prinzipiell auch auf Schüttgutpartikel übertragen lassen – vorausgesetzt, das Materialverhalten erlaubt eine vergleichbare zyklische Schädigungsbewertung. Damit wäre es möglich, auf Basis der Kraftkollektive eine kumulierte Schädigung abzuschätzen und die resultierende Partikelverkleinerung prognostisch zu erfassen.

Da jedoch keine Informationen über die Vorschädigung der Partikel vorliegen, ist die Übertragbarkeit klassischer Betriebsfestigkeitsansätze kritisch zu hinterfragen. Partikel können bereits durch vorangegangene Prozesse wie Gewinnung, Aufbereitung und Förderung mechanisch vorgeschädigt sein, was ihre Bruchwahrscheinlichkeit deutlich beeinflusst. Darüber hinaus ist das Ausgangsmaterial nicht zwangsläufig als homogen zu betrachten. Im Gegensatz zu technisch hergestellten Werkstoffen treten in Schüttgutpartikeln häufig inhomogene Strukturen oder Einschlüsse auf, die lokal zu Spannungskonzentrationen führen können. Diese Unterschiede im inneren Aufbau wirken sich direkt auf das Bruchverhalten aus und lassen eine einfache Übertragung werkstoffmechanischer Konzepte auf Schüttgut nur eingeschränkt zu.

Da die zuvor beschriebenen Überlegungen zur Anwendung von Betriebsfestigkeitsmodellen auf Schüttgutpartikel zwar akademisch interessant, in der Praxis jedoch aufgrund fehlender Daten zur Wöhlerlinie nicht umsetzbar sind, wurde der Ansatz vereinfacht. Statt einer zyklischen Schadensakkumulation wird jede erfasste

Kraftspitze – wie in Bild 2 dargestellt – direkt einer entsprechenden Einzelschädigung des Partikels zugeordnet. Dabei wird jedoch nur eine Belastung gewertet, wenn zuvor eine vollständige Entlastung erfolgt ist, um die Unterscheidung einzelner Beanspruchungsereignisse zu ermöglichen.

Zur Umsetzung dieser Logik wurde ein Spitzenwertfindealgorithmus auf Basis der MATLAB-Funktion `peakFinder` entsprechend angepasst. Der Algorithmus erkennt nur Kraftspitzen, die oberhalb eines Schwellwerts liegen, welcher auf 15 % des Mittelwerts der maximalen Kraftamplituden aller Partikel gesetzt wurde. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass geringe, technisch irrelevante Kräfte keine Degradation erzeugen – was im Sinne des klassischen Wöhler-Konzepts [3] konsistent ist. Kräfte unterhalb dieser Schwelle bleiben unberücksichtigt, da sie nach Einschätzung der Autoren keine signifikante Materialschädigung verursachen.

Die Kraftspitzen, vgl. Bild 5, werden auf diese Weise extrahiert und anschließend mit der zuvor ermittelten Funktion des Partikelmassenverlusts verknüpft. Dabei wird nicht die Verkleinerung im Sinne einer Reduktion des Partikeldurchmessers betrachtet, sondern der Verlust an nutzbarer Masse. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Masseverlust in Form von Staub oder Feinkorn auftritt und somit nicht mehr als verwertbarer Wertstoff zur Verfügung steht. Dieses Vorgehen erlaubt eine praxisnahe Bewertung der Partikeldegradation im Hinblick auf stoffliche Verluste und die Qualität des Förderguts.

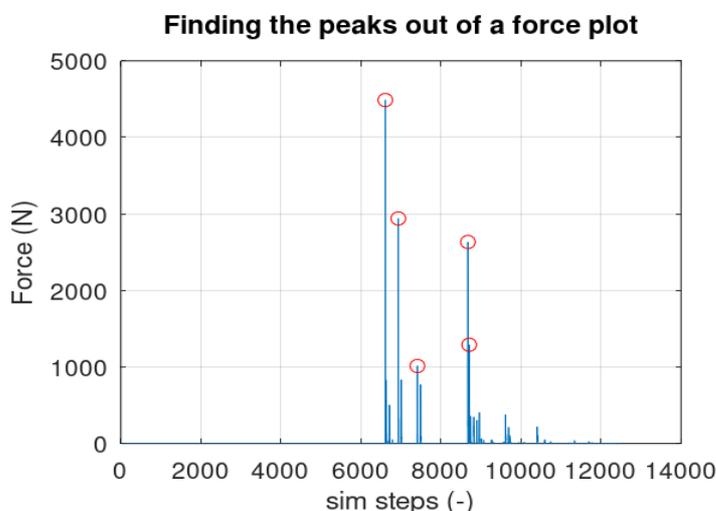


Bild 5: Beispiel der gefundenen Spitzenwerte

Wird diese Auswertung für eine große Anzahl an Partikeln durchgeführt, ergibt sich eine Punktwolke, aus der eine – für diesen Anwendungsfall überraschend große – Bandbreite an berechneten Massenverlusten hervorgeht (vgl. Bild 6). Diese Streuung lässt auf deutliche Unterschiede in der individuellen Belastung und Schädigung der Partikel innerhalb des Prozesses schließen.

Interessant ist hierbei auch die Verteilung der berechneten Partikeldegradation: Anstelle einer erwarteten Normalverteilung oder einer Gleichverteilung deutet die Form der Punktwolke auf eine Weibull-Verteilung hin. Dies legt nahe, dass die Partikelschädigung durch streuende Versagenswahrscheinlichkeiten dominiert wird – ähnlich wie bei

bruchanfälligen Werkstoffen, deren Festigkeit stark von inneren Schwachstellen oder Materialinhomogenitäten abhängt [4].

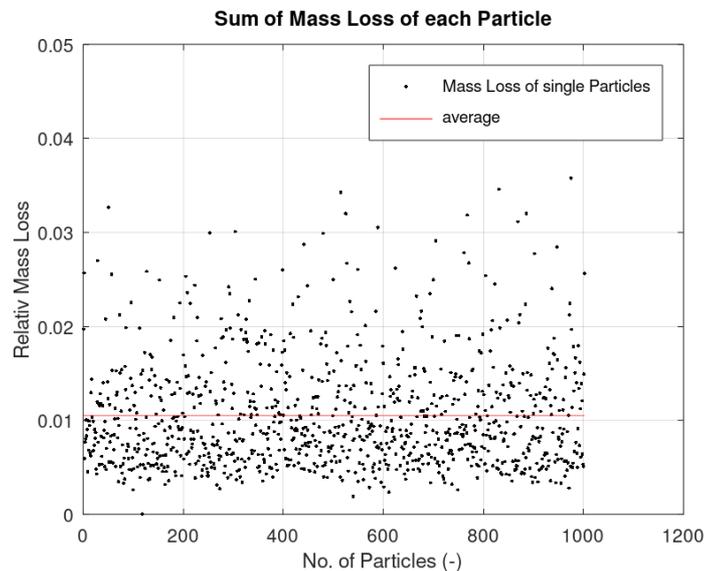


Bild 6: Punktwolke von 1000 Partikeln mit ihrem zugehörigen Massenverlust

Die erzeugte Verteilung ist insbesondere deshalb bemerkenswert, weil die Datenbasis dieser Studie vergleichsweise begrenzt ist. Trotz der relativ geringen Stichprobengröße lässt sich bereits eine deutliche Tendenz zur Weibull-Verteilung erkennen, was auf eine systematische Schädigungsmechanik hindeutet und die Aussagekraft des gewählten Ansatzes unterstreicht.

5 Berechnung der Gesamtdegradation

Um die Gesamtdegradation einer Silofüllung zu berechnen, werden die Simulationen – wie in Bild 3 dargestellt – für unterschiedliche Füllhöhen des Silos wiederholt. Aus den so gewonnenen Ergebnissen lässt sich, wie in Bild 6 gezeigt, ein mittlerer Degradationswert für jede betrachtete Füllhöhe ermitteln.

Aus den verschiedenen Füllhöhen und den jeweils zugeordneten mittleren Degradationswerten lässt sich ein Polynom 2. Ordnung ableiten, mit dem der gesamte Degradationsverlauf beschrieben werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Silofüllhöhe anfangs nicht linear mit der eingebrachten Masse zunimmt: Zu Beginn der Befüllung entsteht ein Schüttkegel, der sich zunächst bis zum Rand des Silos ausbreitet. Erst danach steigt die Füllhöhe annähernd linear mit zunehmender Masse. Um den gesamten Massenverlust zu berechnen, muss die Funktion Massenverlust (Füllhöhe) über das entsprechende Füllvolumen integriert werden. Diese Integration wurde in dieser Arbeit numerisch durchgeführt. Das Ergebnis ist der gesamte Massenverlust der ursprünglichen Korngröße, der infolge mechanischer Beanspruchung als nicht mehr verwertbares Feingut im Haufwerk vorliegt.

Zusammenfassung

Diese Arbeit liefert einen methodischen Ansatz zur Charakterisierung und quantitativen Beschreibung des Verschleißes von Schüttgutpartikeln, mit dem Ziel, die Kornverkleinerung als Erhöhung des Feingutanteils im Schüttgut messbar und numerisch abbildbar zu machen. Die vorgestellte Methodik basiert auf experimentellen Versuchen und numerischen Simulationen und soll mit vertretbarem Aufwand anwendbar sein, um die Verschleißprozesse in der Schüttgutfördertechnik realitätsnah abzubilden. Der erste Schritt ist dabei die messtechnische Erfassung der Abhängigkeit der Partikeldegradation von der Fallhöhe.

Zur Umsetzung umfasst die Methodik folgende Schritte: Zunächst wird die Partikeldegradation in Versuchen mit variierenden Fallhöhen bestimmt, indem Schüttgutproben ohne Feingut durch ein 65 m hohes Fallrohr geführt und der Massenverlust erfasst werden. Darauf aufbauend wird ein funktionales Simulationsmodell mit der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) entwickelt, das den Zusammenhang zwischen Fallhöhe und den auf die Partikel wirkenden Kräften herstellt. Dieses Modell wird auf eine reale Anwendung übertragen, indem Kräfte analysiert und äquivalente Schädigungen berechnet werden. Die Methode wird auf eine große Anzahl von Partikeln angewandt, um eine statistische Beschreibung der Degradation zu ermöglichen. Abschließend wird ein statistisches Modell erstellt, das den gesamten Prozess abbildet und die Erhöhung des Feingutanteils prognostiziert.

Im experimentellen Aufbau erfolgt die Probenentnahme aus einem Silo-Fallrohr mit definierten Einschleusstellen, wobei die Fallhöhe über Y-Stücke variiert wird. Die Endgeschwindigkeit der Partikel wird durch die Wechselwirkung mit der Luft beeinflusst und kann im laminar dominierten Bereich mittels Stokes'scher Gleichung abgeschätzt werden. Die Versuche zeigen einen progressiven Verlauf der Partikeldegradation mit zunehmender Fallhöhe, der durch verschiedene Verschleißmechanismen wie Abrasion, Chipping und Partikelbruch erklärbar ist.

In der DEM-Simulation können die Kräfte an den Partikeln erfasst werden, nicht jedoch der Verschleiß direkt. Deshalb wird der empirische Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Partikelmassenverlust in eine Beziehung zwischen Aufprallkraft und Degradation transformiert. Dazu werden kalibrierte Partikel in Vorsimulationen aus verschiedenen Fallhöhen fallen gelassen und die Kraftmaxima gemessen. Die ermittelten Kraftspitzen werden anschließend mit einer modifizierten Spitzenwertfindung (MATLAB peakFinder) extrahiert, wobei nur solche Kräfte berücksichtigt werden, die oberhalb eines definierten Schwellwertes liegen. Dies entspricht dem Konzept aus der Betriebsfestigkeit, dass nur belastungsändernde Ereignisse zur Schädigung führen.

Die Analyse der simulierten Partikelbelastungen zeigt eine breite Streuung der Massenverluste, deren Verteilung einer Weibull-Verteilung ähnelt. Dies deutet auf eine bruchmechanische Steuerung der Degradation hin, vergleichbar mit dem Versagen spröder Werkstoffe, deren Festigkeit durch innere Schwachstellen bestimmt wird. Die Datenbasis ist zwar begrenzt, dennoch liefert die Studie wertvolle Hinweise zur statistischen Beschreibung der Schüttgutdegradation.

Für die Anwendung im Silobetrieb wird der mittlere Massenverlust für unterschiedliche Füllhöhen bestimmt und mittels eines Polynoms 2. Ordnung approximiert. Dabei wird berücksichtigt, dass die Silofüllhöhe zunächst durch die Ausbildung eines Schüttkegels dominiert wird, bevor eine lineare Steigerung mit der eingelagerten Masse erfolgt. Die Gesamtdegradation wird durch numerische Integration der Massenverlustfunktion über das Füllvolumen berechnet. Das Resultat ist der gesamte Massenverlust der Ausgangskorngröße, der als Feingut im Schüttgutbestand verbleibt und nicht mehr als Wertstoff nutzbar ist.

Quellenverzeichnis:

- [1] Roessler, T.; Katterfeld, A. (2023). Calibrated and Validated Wear Prediction for Bulk Material Handling Equipment using DEM Simulations
- [2] Roessler, T.; Richter, C.; Katterfeld, A.; Will, F. (2018). Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations. Powder Technology. 343. 10.1016/j.powtec.2018.11.034
- [3] Wöhler, A. (1870). Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl. Zeitschrift für Bauwesen, 20, S. 73–106
- [4] Jansen, U.; Stoyan, D. (2000). On the validity of the Weibull failure model for brittle particles

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Staubfassung direkt an der Quelle

Jens Rettig

Christian Bonenberger



Jens Rettig

DFT GmbH Deichmann Filter Technik

Heinrich-Hertz-Str. 3

36179 Bebra

Staubfassung direkt an der Quelle

Im Rahmen zweier Projekte in Südamerika hat DFT moderne Entstaubungsanlagen für IPCC-Brecheranlagen (In-Pit Crushing and Conveying) geliefert und installiert. Das erste Projekt mit dem Namen Sulfides wurde in der Division Radomiro Tomic umgesetzt (Bild 1), einem offenen Kupfer-Tagebau der staatlichen chilenischen Bergbaugesellschaft Codelco. Die Mine liegt rund 40 km nördlich von Calama auf 3 000 m Höhe in der Atacama-Wüste nahe Chuquicamata. Das zweite Projekt – Oxides – wurde für den Anlagenhersteller METSO im selben Tagebauggebiet realisiert, nur wenige Kilometer entfernt. Die Aufgabenstellung für beide Projekte lässt sich wie folgt zusammenfassen:



Bild 1: Luftbild des Tagebaus Division Radomiro Tomic [1]

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

1.1.1 Kupferabbau unter verschärften Bedingungen

Die chilenische Kupferindustrie zählt zu den bedeutendsten weltweit. In der Division Radomiro Tomic, einem großflächigen Tagebau in der Atacama-Wüste, betreibt die staatliche Bergbaugesellschaft Codelco mehrere offene Brecheranlagen zur Verarbeitung von Kupferoxid- und Kupfersulfiderzen.

Aufgrund verschärfter nationaler und internationaler Anforderungen im Bereich Arbeits- und Umweltschutz sind Betreiber zunehmend gefordert, moderne Lösungen zur Emissionsminderung umzusetzen (Bild 2). Insbesondere der Feinstaub, der beim Brechprozess, beim Materialtransport und an Übergabestellen freigesetzt wird, steht im Fokus aktueller Umweltvorgaben.

Die Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte, wie sie in den chilenischen Umwelt- und Arbeitsschutzverordnungen festgelegt sind, erfordert innovative Maßnahmen zur Staubreduktion – etwa durch den Einsatz leistungsstarker Entstaubungsanlagen, gekapselter Übergabepunkte oder durch gezielte Luftführung und Abscheidung (Bild 3).

Diese Entwicklungen zeigen: Technologische Lösungen zur Luftreinhaltung werden nicht nur aus ökologischer, sondern auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht immer relevanter – insbesondere im Hinblick auf Genehmigungsfähigkeit, Nachhaltigkeit und den internationalen Wettbewerb.



Bild 2: Bestandsanlage [2]



Bild 3: Mobile Brecheranlage [2]

1.1.2 Herausforderungen bei offenen Brecheranlagen

Die Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte, wie sie in den chilenischen Umwelt- und Arbeitsschutzverordnungen festgelegt sind, stellt Betreiber vor immer größere Herausforderungen. In ariden Regionen wie der Atacama-Wüste, wo extreme Trockenheit und konstante Winde vorherrschen, wirken selbst kleinste Staub-emissionen wie ein Verstärker für Umwelt- und Gesundheitsrisiken. Besonders im Bereich der offenen Brech- und Förderanlagen kommt es durch mechanische Prozesse, Materialübergaben und Windverwirbelungen zu massiven Feinstaub-freisetzungen, die nicht nur die Arbeitssicherheit gefährden, sondern auch großflächige Staubverwehungen in die Umgebung begünstigen.

Zudem verschärfen sich die regulatorischen Anforderungen kontinuierlich – sowohl auf nationaler Ebene durch chilenische Gesetze (z. B. DS N° 594 und Ley 19.300) als auch durch den Druck internationaler Stakeholder und Abnehmer, die zunehmend auf Umwelt- und Sozialstandards achten. Ohne geeignete technische Gegenmaßnahmen drohen nicht nur Genehmigungsprobleme, sondern auch Produktionsunterbrechungen, Bußgelder oder der Verlust von Exportmärkten.

Gefordert sind daher leistungsfähige, an die rauen Umweltbedingungen angepasste Entstaubungskonzepte: Schlauchfilteranlagen oder Kompaktfilteranlagen mit hoher Abscheideleistung, strömungstechnisch optimierte Einhausungen, Windschutzsysteme sowie automatisierte Steuerungseinheiten zur bedarfsgerechten Erfassung und Abreinigung großer Luftvolumenströme. Nur durch die Kombination mehrerer Maßnahmen lassen sich die komplexen Emissionsquellen wirksam kontrollieren – und ein nachhaltiger, gesetzeskonformer Betrieb dauerhaft gewährleisten.

1.2 Ziel des Projektes

Ziel des Projekts war die Entwicklung einer praxismgerechten Entstaubungslösung, die an den offenen Brecheranlagen des Tagebaus eine wirksame Erfassung der beim Abkippen entstehenden Feinstäube (insbesondere PM10) direkt an der Quelle ermöglicht. Durch optimierte Luftführung, strömungsgünstige Erfassungshauben und moderne Filtertechnik sollte eine dauerhafte Einhaltung der lokal vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte erreicht werden. Der Fokus lag auf einer zuverlässigen, rein trockenen Absaugung ohne Einsatz von Wasser.

2 Technisches Konzept

2.1 CFD-basierte Analyse

2.1.1 Strömungssimulation des Gebäudeumfelds

Die CFD-Simulation umfasste eine Fläche von über 1 km² und mehr als 10 Millionen Rechenknoten. Sie bildete Windrichtungen, Gebäudeöffnungen, Strömungsgeschwindigkeiten und Staubausbreitung ab und zeigte: Ohne gezielte Erfassung wird Staub binnen Sekunden aus dem Gebäude getragen (Bild 4).

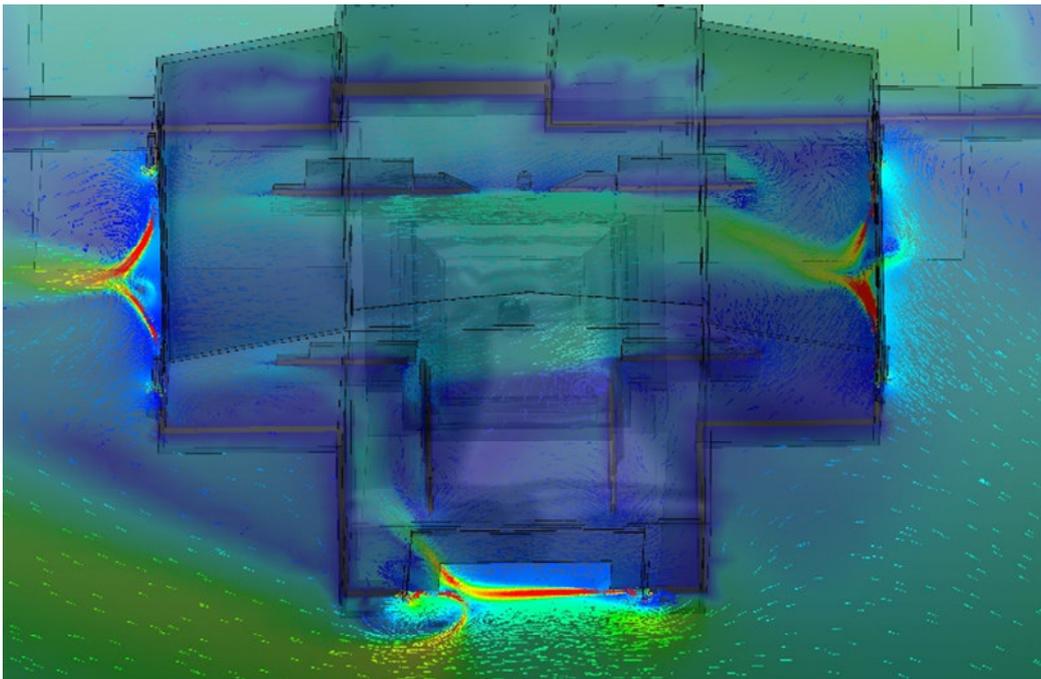


Bild 4: CFD-Simulation des Luftstroms und der Staubverteilung

2.1.2 Simulation der Absaugung direkt an der Quelle

Ein Konzept mit Wirbelhauben an der Brecher-Oberkante wurde entwickelt. Ergänzt durch einen Jet-Fan der Firma Korfmann mit verstellbarer Düse (Bild 6) wird aufsteigender Staub nach unten in den Erfassungsbereich gedrückt. Die Wirkung wurde simuliert und hat sich durch die Praxis bestätigt (Bild 5).

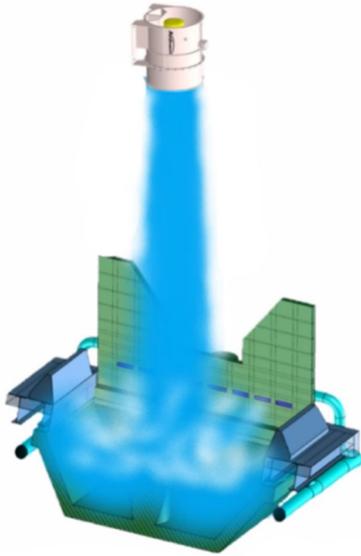


Bild 5: Positionierung des Jet-Fans



Bild 6: Korfmann Jet-Fan mit Stelldüse

2.2 Komponenten der Entstaubungslösung

2.2.1 Wirbelhaube mit Ringabsaugung

Die Ringhaube (Bild 7) ist so robust ausgeführt, dass sie direkt von Muldenkippern angefahren werden kann. Sie verhindert das unkontrollierte Aufsteigen von Staub und ist aufgrund ihrer Bauart sehr effektiv bei der Erfassung der aufsteigenden Stäube. Die Hauben sind speziell für den Betrieb im Tagebau ausgelegt.

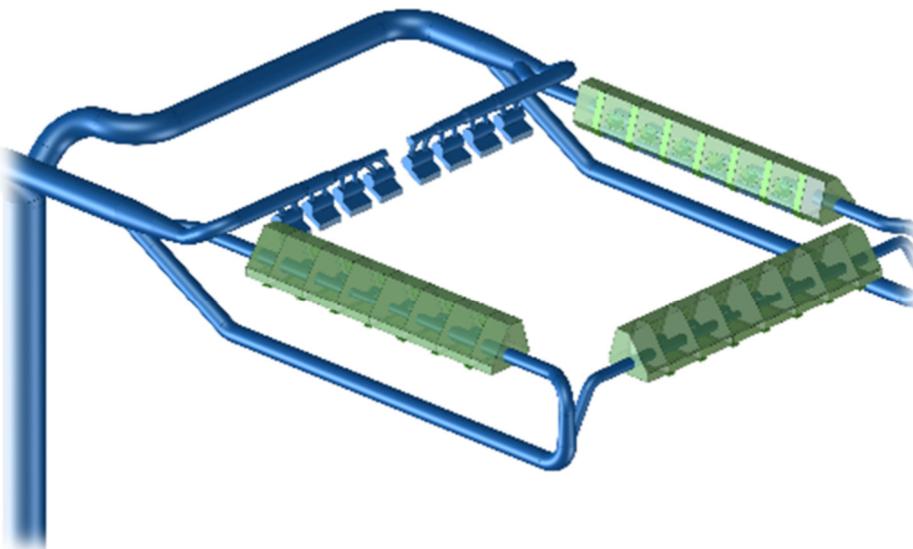


Bild 7: Massive Ringhaube (Swirl Hood) an der Brecheroberkante

2.2.2 Jet-Fan zur Strömungslenkung

Zur Unterstützung der Erfassungshaube wird ein industrieller Jet-Fan vom Typ Axialventilator Korfmann/CFT an der Hallendecke installiert. Der Ventilator erzeugt einen horizontal ausgerichteten Luftstrahl mit hoher Austrittsgeschwindigkeit, um aufsteigende Staubfahnen kontrolliert in den Wirkungsbereich der Erfassungseinheit zurückzulenken.

Der eingesetzte Jet-Fan basiert auf einem kompakt bauenden, einstufigen, drehzahlgeregelten Axialventilator. Das Laufrad ist aerodynamisch optimiert und mit verstellbaren Leitschaufeln ausgestattet. Die Dimensionierung erfolgte auf Basis der Ergebnisse der CFD-Analyse, wobei insbesondere die Strömungssymmetrie, das Eindringverhalten in die Staubwolke sowie die Rückführung zum Hauben-Bereich optimiert wurden.

Die Luftmenge des Ventilators liegt im Bereich von 10.000 bis 15.000 m³/h, bei einer freien Austrittsgeschwindigkeit von ca. 25 m/s, abhängig von der eingestellten Leistungsstufe. Das Gehäuse ist korrosionsgeschützt ausgeführt, die Komponenten sind für den Dauerbetrieb in staubiger Umgebung über 3.000 m ü. NN ausgelegt.

2.2.3 Luftvorhänge und Windschutzmauern

An allen Hallentoren wurden Luftvorhänge mit Leitblechen installiert (Bild 8). Zusätzlich sorgen Windschutzmauern („Windshots“) für eine signifikante Reduktion der Windgeschwindigkeit im Eingangsbereich.

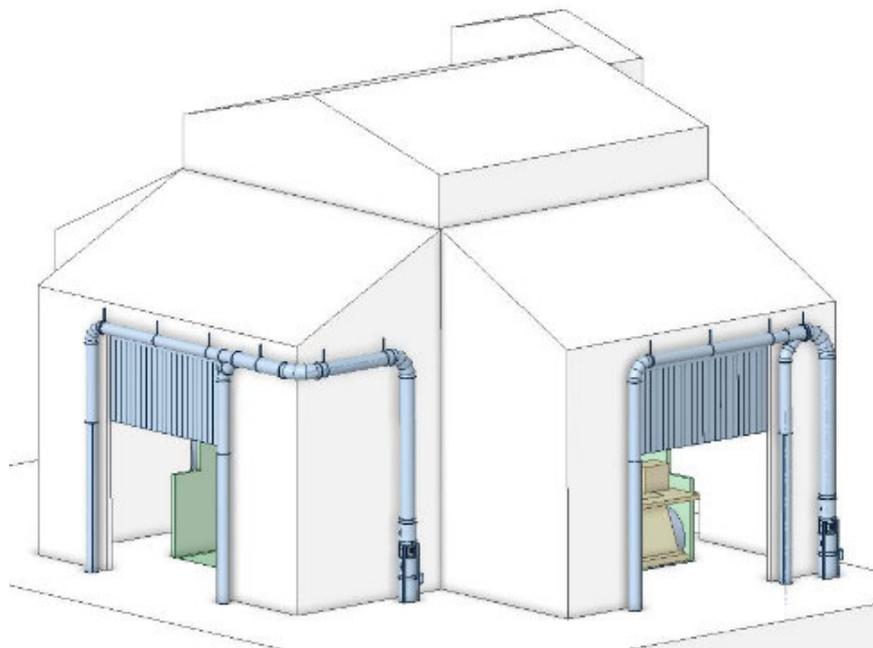


Bild 8: Luftvorhang – Außenansicht

2.2.4 Filtertechnik: Schlauch- oder Kompaktfilter

Das zentrale System arbeitet mit 1.377 m² Filterfläche und 120.00 m³/h Volumenstrom. Ergänzend sind Bandaufsatzfilter Typ BAF - mit eigenem Ventilator und Steuerung an mehreren Bandübergaben installiert. Der Reststaubwert beträgt beim Schlauchfilter $\leq 5 \text{ mg/m}^3$ und bei den Kompaktfiltern sogar $\leq 0,1 \text{ mg/m}^3$ (Bild 9).

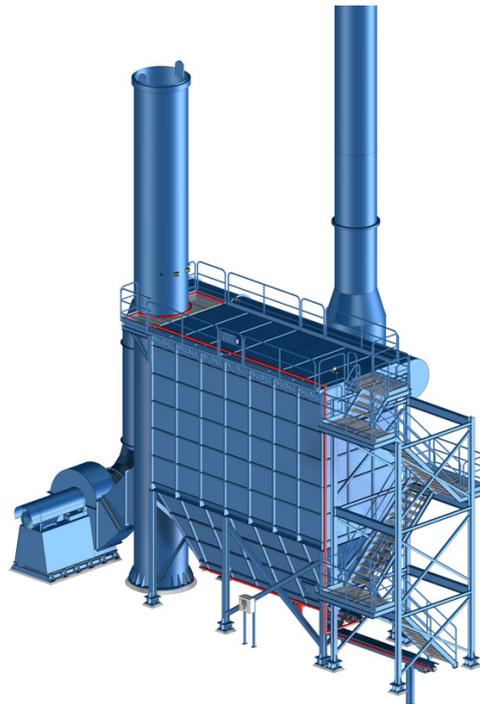


Bild 9: DFT Schlauchfilteranlage mit Jet-Pulse-Abreinigung

3 Projektumsetzung und Betrieb

3.1 Montage und Inbetriebnahme

3.1.1 Aufbau unter extremen Bedingungen

Die Montage der Entstaubungsanlage erfolgte im laufenden Betrieb auf über 3.000 m Höhe (Bild 10). Alle Komponenten wurden in modularer Bauweise vormontiert und per Container geliefert. Nach der erfolgreichen Montage des Schlauchfilters wurden zunächst die Absaughauben an den relevanten Staubaustrittspunkten installiert, gefolgt von der passgenauen Montage und Ausrichtung des Jet-Fans inklusive der Luftdüse zur gezielten Staubverdrängung. Anschließend erfolgte die Verlegung der gesamten Rohrleitungsstrecke für Roh- und Reingas sowie die Montage des Luftschleier-Systems, das als zusätzlicher Schutz gegen die Verbreitung von Staub in der offenen Umgebung dient.



Bild 10: Montage der Filteranlage

3.1.2 Inbetriebnahme und Justierung

Die Inbetriebnahme der Entstaubungsanlage erfolgte schrittweise und unter realen Betriebsbedingungen. Dabei wurden unter anderem die Jet-Fan-Düse, die Volumenströme an den Absaugpunkten sowie die Taktung der Filterabreinigung feinjustiert. Die Funktionalität und Wirksamkeit der Anlage konnten bereits während der ersten Brecherversuche erfolgreich bestätigt werden – die Staubemissionen wurden deutlich reduziert und die erfassten Staubmengen lagen im erwarteten Bereich.

3.2 Betriebserfahrung

3.2.1 Erreichte Emissionsminderung

Durch den Einsatz der kombinierten Entstaubungslösung konnte die $PM_{1,0}$ -Konzentration direkt an der Emissionsquelle um über 90 % reduziert werden. Diese Reduktionsleistung wurde nicht nur im stationären Betrieb, sondern auch bei kurzzeitigen Volumenstromspitzen nachgewiesen. Die Anlage arbeitet somit stabil und emissionsarm über den gesamten Lastbereich hinweg und erfüllt die geforderten Grenzwerte zuverlässig (Bild 11 und Bild 12).

Die hohe Abscheideleistung ist auf das abgestimmte Zusammenwirken der Erfassungseinrichtungen, der regelbaren Luftführung sowie der effektiven Jet-Pulse-Filterabreinigung zurückzuführen.



Bild 11: Situation vorher [3]



Bild 12: Situation nach Inbetriebnahme [3]

3.2.2 Rückmeldung des Betreibers

Die Rückmeldungen von Metso und Codelco sind durchweg positiv. Besonders hervorgehoben werden die hohe Wirksamkeit, geringe Wartung und einfache Reinigung des Entstaubungssystems. Die Feinstaubmessgeräte an den definierten Referenzmesspunkten im Betriebsbereich der Brecheranlage zeigen eine deutliche Reduzierung der Gesamtfeinstaubbelastung ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Entstaubungssystems. Das System dient als neues Referenzmodell für Folgeprojekte.

4 Fazit und Ausblick

4.1 Übertragbarkeit und Potenzial

4.1.1 Aufbau unter extremen Bedingungen

Die vorgestellte Lösung hat sich unter den herausfordernden klimatischen und topografischen Bedingungen der chilenischen Atacama-Wüste auf über 3 000 m Höhe bewährt. Sie eignet sich besonders für den Einsatz in offenen Brecheranlagen, an Übergabestellen sowie in anderen staubintensiven Umschlagprozessen im Tagebau. Durch die modulare Bauweise, die robuste Ausführung aller Komponenten sowie die intelligente Kombination aus Schlauchfilter, Jet-Fan, Absaughauben und Luftschleiersystem kann die Anlage flexibel an verschiedene Einsatzorte angepasst werden.

Dank der CFD-gestützten Auslegung der Luftströme und Erfassungspunkte ist eine präzise Planung möglich, die auch in schwierigen Umgebungen eine hohe Abscheideleistung gewährleistet. Die vollständige Systemlösung lässt sich daher auch auf andere industrielle Anwendungen übertragen – beispielsweise auf Schiffsentladungen mit offenen Bunkersystemen, Schüttgutumschlagplätze in Häfen oder auf staubkritische Prozesse in der Zement- und Baustoffindustrie.

4.1.2 Übertragbarkeit, Patentschutz und Perspektiven

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der Anlage ist die systematische Verknüpfung mehrerer staubmindernder Komponenten, die in ihrer Wechselwirkung aufeinander abgestimmt sind. Für dieses innovative Konzept wurde ein Patent (DE 10 2024 110 382)

angemeldet, das die Schutzrechte auf die Kombination der einzelnen Module sowie deren spezifische Anordnung sichert.

Durch die Skalierbarkeit des Systems und die Flexibilität in der Ausführung eröffnen sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten über den Tagebau hinaus. Künftige Projekte – etwa in Hafenanlagen, bei der Rohstofflogistik oder im Recyclingbereich – können von der hier entwickelten Lösung unmittelbar profitieren. Die Entstaubungstechnik von DFT leistet somit nicht nur einen Beitrag zur Einhaltung gesetzlicher Emissionsgrenzwerte, sondern auch zur nachhaltigen Verbesserung von Arbeitsbedingungen weltweit.

4.1.3 Weiterentwicklung durch Monitoring & KI

Geplant ist die Integration von PM₁₀-/PM_{2,5}-Sensorik zur kontinuierlichen Erfassung der tatsächlichen Staubbelastung im Betrieb. Die gewonnenen Messdaten dienen der schrittweisen Optimierung der Absaugleistung und ermöglichen eine bedarfsgerechte Steuerung des Systems. Darüber hinaus fließen die aus dem Monitoring gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Planung und Auslegung zukünftiger Anlagen ein – insbesondere in Bezug auf Luftvolumenströme, Erfassungspunkte und Reinigungsintervalle.

Die Langzeiterfassung betrieblicher Kenngrößen erlaubt außerdem eine zustandsbasierte Wartungsstrategie. So können Filterstandzeiten verlängert, Stillstände reduziert und die Betriebskosten insgesamt gesenkt werden.

Zusammenfassung

Die in Chile realisierte Entstaubungslösung erfüllt alle Anforderungen der chilenischen Richtlinien und zeigt, wie durch das Zusammenspiel aus Ringhaube, Jet-Fan, Windschutzsystem und Hochleistungs-Schlauchfilter eine signifikante Reduktion der PM₁₀-Emissionen – über 90 % an der Quelle – erzielt werden kann. Die robuste Ausführung der Anlage, ihre modulare Bauweise sowie die Möglichkeit zur datengestützten Optimierung machen das System besonders geeignet für offene Brecheranlagen, staubintensive Umschlagprozesse und ähnliche Einsatzbereiche weltweit. Das Projekt dient als praxisbewährtes Modell für zukünftige internationale Anwendungen und bildet zugleich die Grundlage für die Weiterentwicklung der Technologie – auch unter Patentschutz.

Quellenverzeichnis:

- [1] Google earth
- [2] TTM CHILE
- [3] Codelco

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Reine Produktivität mit Herding OMIKRON – das Filtermedium für die pneumatische Förderung

Sebastian Dandorfer



Sebastian Dandorfer, B. Eng. (Referent)

Herding GmbH Filtertechnik

August-Borsig-Str. 3

92224 Amberg

Reine Produktivität mit Herding OMIKRON – das Filtermedium für die pneumatische Förderung

Sinterlamellenfilter können für unterschiedlichste Anwendungen und Einsatzfelder in einem weiten Temperaturbereich konfektioniert werden. Etwas, das über die bewährten Eigenschaften des Sinterlamellenfilters hinaus alle Filterelemente der Firma Herding verbindet, ist die Bindung an eine linear verlaufende Lamellengeometrie. Zwar sind die Elemente in verschiedensten Abmessungen erhältlich, jedoch ändert sich an der durch die Sinterform vorgegebenen Linearität der Grundgeometrie nichts. Das rundum neu entwickelte Herding® OMIKRON Filterelement lässt die geometrischen Beschränkungen der standardisierten Formen nun hinter sich und kann somit perfekt an die Anforderungen für die pneumatische Förderung angepasst werden.

1 Grundlagen – Filtertechnik zur Staubabscheidung

1.1 Einleitung und Bedeutung der Filtration

In industriellen Prozessen, insbesondere bei der Förderung und Verarbeitung von Schüttgütern, ist die effektive Abscheidung von Stäuben essenziell. Sie dient nicht nur dem Arbeits- und Umweltschutz, sondern auch der Prozesssicherheit, Produktqualität und Wirtschaftlichkeit. Filteranlagen übernehmen dabei zentrale Aufgaben – sei es als Aspirationsfilter zur Erfassung luftfremder Stoffe oder als Prozessfilter zur Produktrückgewinnung (Bild 1).

Die Anforderungen an moderne Filtertechnik steigen kontinuierlich: konstante Betriebsbedingungen, sichere Handhabung brennbarer und explosionsfähiger Stäube, hohe Abscheidegrade auch bei kritischen Partikeln sowie ein sicheres und effizientes Staubhandling sind heute Standarderwartungen.

Der Aufbau von Filteranlagen ist vergleichbar, sie unterscheiden sich jedoch in der Ausführung, den Eigenschaften und Einsatzgrenzen der installierten Filterelemente.



Bild 1: Stauberzeugende Prozesse [Herding GmbH Filtertechnik]

1.2 Aufbau und Funktionsweise von Filteranlagen

Filternde Abscheider bestehen im Wesentlichen aus einem Rohgas- und einem Reingasraum, die durch ein Trennblech voneinander getrennt sind. In dieses Trennblech sind rein- oder rohgasseitig Filterelemente eingebaut. Der Rohgasraum enthält das staubbeladene Prozessgas, während im Reingasraum das gereinigte Gas (z. B. Luft oder Inertgas) ankommt.

Eine entscheidende Komponente ist die Abreinigungseinheit, die mithilfe von Druckluftimpulsen den auf der Filteroberfläche gebildeten Filterkuchen entfernt. Die Abreinigungseinheit besteht aus Druckgasspeicher, Blasrohren, Ventilen und Steuerung. Der Abreinigungsvorgang kann sowohl im laufenden Betrieb (online) als auch im Stillstand (offline) erfolgen, meist differenzdruck- oder zeittaktgesteuert.

Unterhalb des Filtergehäuses befindet sich in der Regel ein Trichter mit einem Staubaustragssystem, etwa in Form einer Zellenradschleuse oder eines Staubbehälters. Weitere Optionen, je nach Anforderung, sind Rohrleitungen, Ventilatoren als Unter- oder Überdruckerzeuger, Steuerungstechnik, ggf. Vorabscheidensysteme (Zyklone, Prallbleche etc.), Messeinrichtungen (Bild 2).



Bild 2: Unterschiedliche Baureihen von Filteranlagen [Herding GmbH Filtertechnik]

Bei metallischen als auch bei organischen Stäuben ist die Reaktion mit dem Sauerstoff aus der Luft - Oxidation - bekannt. Diese Brennbarkeit ist bei der Risikobeurteilung von Filteranlagen besonders zu behandeln, um durch Anwendung entsprechender Sicherheitsmaßnahmen einen sicheren Umgang mit diesen Stäuben zu gewährleisten. Im Vergleich dazu sind die nicht brennbaren mineralischen Stäube, wie sie z. B. im Bereich der steinverarbeitenden Industrie oder der Glasherstellung vorliegen, diesbezüglich nicht weiter zu bewerten.

Metallische und organische Stäube können im Rohgasraum der Filteranlage, je nach unterer Explosionsgrenze (UEG) des Staub-/Luft-Gemisches entweder als brennbare abgelagerte Staubschichten vorliegen - Brandgefahr - oder im ausreichend aufgewirbelten Zustand als staubexplosionsfähige Atmosphäre - Explosionsgefahr. Bei Letzterem sind für den Roh- und Reingasraum des filternden Abscheiders die staubexplosionsgefährdeten Bereiche - Zonen – gemäß ATEX festzulegen (Bild 3).

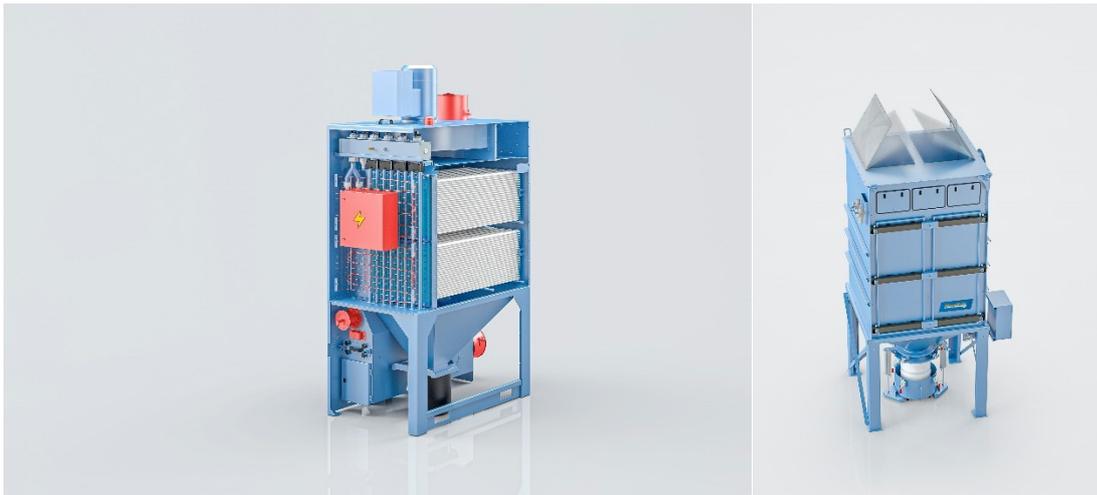


Bild 3: Brand und Explosionsschutz für Filteranlagen [Herding GmbH Filtertechnik]

1.3 Filterelemente und Filtrationsmechanismen

Zentrale Komponente jeder Filteranlage sind die Filterelemente. Diese unterscheiden sich hinsichtlich dem Material, der Geometrie und der Filterfläche. Während Schlauchfilter meist eine zylindrische Form aufweisen, bieten Taschen- oder Patronenfilter durch Faltung eine größere effektive Filterfläche. Sinterlamellenfilter bieten hier eine bis zu dreifach höhere Filterfläche zur Hüllfläche.

Die Werkstoffe der meisten Filtermedien sind thermoplastische Kunststoffe wie z. B. Polyethylen, Polyester, Polyamid oder Polytetrafluorethylen. Entsprechend besitzen die Filterelemente unterschiedliche Eigenschaften und Einsatzgrenzen. Textile Filtermedien sind nicht formstabil und benötigen für die Verwendung als Filterelement einen Stützkörper, der dem Textil die nötige Geometrie gibt. Schlauch-, Taschen- und Patronenfilter sind in der Regel mit solchen Stützkörpern ausgerüstet. Diese Filterelemente erfahren beim Einsatz in filternden Abscheidern eine Wechselbeanspruchung. Im Saugbetrieb bei der Filtration wird das flexible Medium auf den Stützkörper angesaugt, während es sich beim Abreinigungsimpuls aufbläht. Diese Bewegung im Filtermedium („Walkarbeit“) führt dazu, dass es zwischen dem Stützkörper und dem beweglichen Filtertextil zu Verschleiß durch Reiben und Scheuern kommt. Dieser Abnutzungseffekt tritt noch deutlicher beim Abscheiden abrasiver, scharfkantiger Staubpartikel in Erscheinung.

Anders verhält sich der Herding Sinterlamellenfilter, der ein Starrkörper aus gesintertem Polyethylen ist. Hier ist das Filtermedium eins mit dem formgebenden Körper. Die Wechselbelastung von Filtration und Abreinigung führt zu keiner Bewegung und damit zu keiner mechanischen Beeinträchtigung dieses Filterelements, selbst beim Einsatz für stark schleißende Stäube. Damit sind bei fachgerechtem Betrieb ungeplante Ausfallzeiten aufgrund verschleißbedingter, plötzlicher Filterrisse nahezu auszuschließen.

Neben den daraus resultierenden unterschiedlichen Standzeiten der Filterelemente aus beweglichen Filtermedien im Vergleich zum Starrkörper liegen auch Unterschiede bei der Filtration und dem Abreinigungsverhalten vor.

1.4 Staubabscheidung generell und die Unterschiede

Der sogenannte Filterkuchen ist dabei der effektivste Filter. Dies ist der abgeschiedene Staub über dem Filtermedium und hat nahezu die gleichen Eigenschaften wie die noch abzuschneidenden Staubpartikel und die Filtrationsprinzipien wie der Sieb-, Trägheits-, Sperr- und Diffusionseffekt führen selbst bei Partikeln im Nanobereich zu einer effizienten Abscheidung.

Bei der Oberflächenfiltration, wie der Name sagt, lagert sich das abzuschneidende Partikelspektrum im Filtrationsprozess aufgrund der feinporigen Struktur vom Filtermedium und genannter Mechanismen auf der Filteroberfläche an. Das saubere Prozessgas, als Stoff mit geringer Massenträgheit, kann diese Poren durchströmen. Diese Feinporigkeit kann unterschiedlich erreicht werden, wie zum Beispiel durch Beschichtung oder Membranen.

Der Herding Sinterlamellenfilter besteht aus einer robusten Kunststoffmatrix mit einer fest eingebetteten, filteraktiven Oberflächenbeschichtung. Diese Konstruktion verhindert mechanische Belastungen und Tiefenfiltration. Selbst abrasive Stäube werden sicher abgeschieden, ohne die Filterstruktur zu beschädigen. Die Beschichtung bleibt über den gesamten Lebenszyklus erhalten (Bild 4).

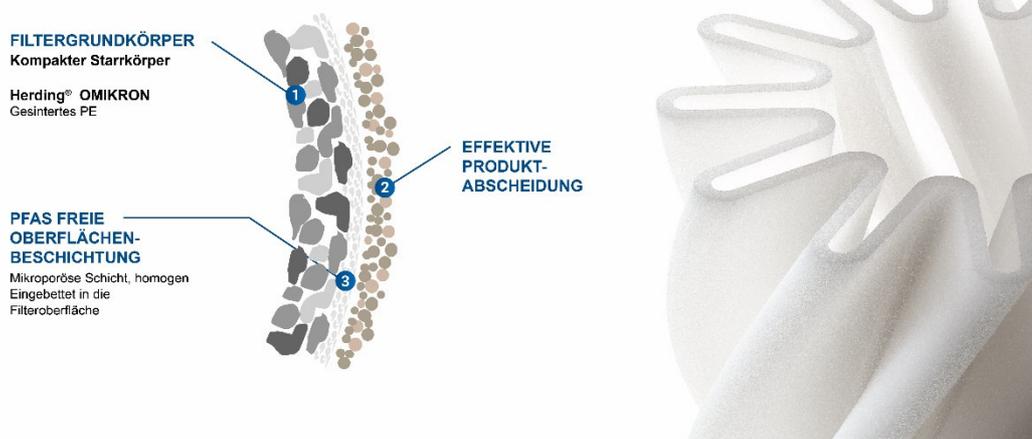


Bild 4: Reine Oberflächenfiltration / Aufbau Sinterlamellenfilter [Herding GmbH Filtertechnik]

Ein weiterer Vorteil liegt im Abreinigungsverhalten: Während flexible Medien abgeschiedenen Staub häufig erneut aufwirbeln, gleitet der Filterkuchen bei Sinterlamellenfiltern in Form großer Agglomerate kontrolliert ab. Dies ermöglicht eine kompakte Bauweise mit minimalem Abstand zwischen den Filterelementen und reduziert die Staubbelastung im Reingasraum erheblich (Bild 5). Bei der Tiefenfiltration hingegen lagern sich die abzuschneidenden Partikel in das Filterelement, also in das Innere des Filtermaterials, ein und lagern sich dort irreversibel ein. Eine Abreinigung der eingelagerten



Bild 5: Sinterlamellenfilter [Herding GmbH Filtertechnik]

Partikel ist nicht mehr möglich. Diese Staubeinlagerungen in den Filterwerkstoff führen zu zusätzlichem Verschleiß, insbesondere bei abrasiven Stäuben, und steigendem Druckverlust aufgrund der Reduzierung der verfügbaren aktiven Filterfläche.

2 Reine Oberflächenfiltration - Herding® OMIKRON

Das rundum neu entwickelte Herding® OMIKRON Filterelement (Bild 6) lässt die geometrischen Beschränkungen der standardisierten Formen nun hinter sich. In Verbindung mit einem additiven Fertigungsprozess können die Formen vollkommen neu gedacht und geschaffen werden. Es ist nun erstmals möglich, Geometrien dem Einsatzzweck und den baulichen Gegebenheiten anzupassen. Herding wird damit den individuellen Anforderungen einer sich schnell wandelnden Entwicklung im Anlagenbau gerecht und schließt gleichzeitig die Lücke hin zu eher kleineren Volumenströmen.



Bild 6: Herding® OMIKRON [Herding GmbH Filtertechnik]

Vor der Einführung von Herding® OMIKRON besitzt das kleinste Filterelement von Herding eine Filterfläche von 0,7m², durch den neuen Fertigungsprozess sind nun auch deutlich kleinere Filterelemente möglich. OMIKRON macht es erstmals möglich, dass der Kunde das Filterelement nach seinen Vorstellungen adaptieren lassen kann, dabei ist auch Stückzahl EINS wirtschaftlich darstellbar. Darüber hinaus wird OMIKRON ausschließlich aus dem Kunststoff PE hergestellt sowie zukunftsorientiert frei von PFAS. Das bedeutet, dass sowohl der Grundkörper als auch die Beschichtung der Filterelemente aus derselben Materialart erzeugt werden. Das Filterelement hat eine Konformität nach VO(EG) 1935/2004, VO(EU) 10/2011 sowie FDA und kann somit ohne Bedenken in Verbindung mit Lebensmitteln und im Pharma-Bereich eingesetzt werden. Strenge Hygieneanforderungen in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie machen es oft notwendig, Einwegfilter aus Papier oder Textilien regelmäßig auszutauschen, um u. a. Bakterienbildung vorzubeugen. Herding® OMIKRON kann nach Produktkontakt oder bei Produktwechsel gewaschen oder mit bis zu 121°C sterilisiert werden und damit wiederholt keimfrei im Prozess eingesetzt werden. Dadurch können Betriebs- und Entsorgungskosten stark reduziert werden. Dabei ist das Element außerdem sehr beständig gegen Chemikalien. Der faserfreie gesinterte Unibody erlaubt dabei kontaminationsfreie Produktrückgewinnung zum Beispiel bei der Grundstoffherstellung für die Batterieindustrie, in industriellen Staubsauganlagen oder eben für die pneumatische Förderung.

Umfangreiche Tests sowohl auf frei erhältlichen als auch auf eigens angefertigten Testanlagen weisen die Herding typischen Produkteigenschaften nach. Zusätzlich erzeugt die Bauform der OMIKRON Filterelemente eine ungekannnt hohe Stabilität, die hohe Differenzdrücke zulässt und das Element auch bei großen Filterflächenbelastungen einsetzbar macht.

Dies wird im Vortrag mit Anwendungsbeispielen zu folgenden Themen dargestellt:

- Additive Fertigung
- Interne Staubversuche/Fördertest
- Neues Produktdesign zu Herding COATER
- Staubsaugeranwendung in der Lebensmittelindustrie
- Anforderungen und Tests zum Serienprodukt in der pneumatischen Förderung
- Abreinigbarer Entlüftungsfiter in der Druckförderung

Zusammenfassung

Durch die Globalisierung steigt der Druck weiter auf europäische Unternehmen. Eine Antwort darauf ist Innovation. Durch die Additive Fertigung werden neue Designfreiheiten geschaffen, die im Herding® OMIKRON Filterelement umgesetzt worden sind und somit konnten neue Produkteigenschaften zu den bewährten Eigenschaften geschaffen werden.

- PFAs frei
- Unibody (Farbe Weiß)
- Waschbar / sterilisierbar
- NFC Tag
- Faserfreiheit
- Lebensmittelkonformität
- Zuverlässige Filtration auch bei feinsten Partikeln
- Produktrückgewinnung
- Energieeffizienz durch geringen Abreinigungsvordruck
- Effiziente Abscheidung von Partikeln und geringste Emissionen in die Umgebung
- Hohe Anlagenverfügbarkeit
- Kompakte Bauform
- Hohe Standzeiten

Diese Kombination aus den bewährten Eigenschaften und den neuen Möglichkeiten, entstand aus dem Bestreben, eigene Produkte neu zu denken, Bestandskunden mit Innovation zu begeistern und neue Kunden zu gewinnen.

Diese Erfolgsstory wird durch folgende Folien erzählt:

- Additive Fertigung
- Interne Staubversuche/Fördertest
- Neues Produktdesign zu Herding COATER
- Staubsaugeranwendung in der Lebensmittelindustrie
- Anforderungen und Tests zum Serienprodukt in der pneumatischen Förderung
- Abreinigbarer EntlüftungsfILTER in der Druckförderung

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Umbau eines Bandantriebs von getriebe- auf getriebe-lose Antriebstechnik in der Untertage-Eisenerzmine Malmberget/Schweden

Ulf Richter



Dipl.-Ing. Ulf Richter

ABB AG

Hänchener Str. 14

03048 Cottbus

Umbau eines Bandantriebs von getriebe- auf getriebe-lose Antriebstechnik in der Untertage-Eisenerzmine Malmberget/Schweden

Diese Abhandlung konzentriert sich auf die Herausforderungen und Strategien bei der Auslegung und Implementierung eines getriebe-losen Bandantriebs mit 2 x 1625 kW Permanentmagnetmotoren (PMMs), der ein veraltetes Antriebssystem, bestehend aus einem 2.800-kW-Schleifringläufermotor und zugehörigem Planetengetriebe, ersetzt.

1 Motivation und Lösungsansatz

Im Rahmen seines kontinuierlichen Engagements für operative Exzellenz und Nachhaltigkeit führt der Bergbaukonzern LKAB eine umfassende Modernisierung seines Fördersystems in der Eisenerzmine Malmberget in Nordschweden durch. Diese Initiative beinhaltet den Austausch herkömmlicher Förderantriebe in einem über 25 Jahre alten Gurtförderer durch getriebe-lose Förderantriebe (Gearless Conveyor Drive / GCDs) von ABB. Dies stellt einen strategischen Wandel hin zu effizienterer und zuverlässigerer Materialförderung sowie einer gesteigerten Förderleistung dar. Die Umbaumaßnahme wird vor allem notwendig, da LKAB vor Ort in die Verhüttung von Eisenerz durch Direktreduktion investiert und daher eine noch kontinuierlichere Förderung des Erzes absichern muss.

Diese Abhandlung konzentriert sich auf die Herausforderungen und Strategien bei der Auslegung und Implementierung eines getriebe-losen Bandantriebs mit 2 x 1625 kW Permanentmagnetmotoren (PMMs), der ein veraltetes Antriebssystem, bestehend aus einem 2.800-kW-Schleifringläufermotor und zugehörigem Planetengetriebe, ersetzt.

Die Logistik für den Transport und die Montage der großen Antriebseinheiten in engen unterirdischen Räumen erforderte eine sorgfältige Planung. Das getriebe-lose Design reduziert nicht nur den Platzbedarf, sondern senkt auch die Brandlast und die Geräusentwicklung vor Ort erheblich, was zu einem sichereren Arbeitsumfeld beiträgt.

Im Betrieb führt die getriebe-lose Lösung zu einer reduzierten Ausfallwahrscheinlichkeit, was die Planbarkeit und Höhe der Produktion positiv beeinflusst. Ebenfalls werden der spezifische Energieverbrauch sowie die Aufwände für die Wartung und Reparaturen gesenkt.

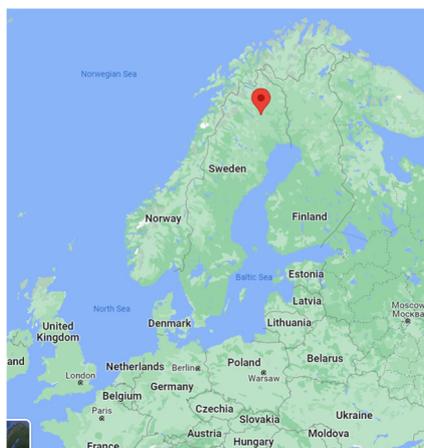


Bild 1: Geographische Lage der Mine Malmberget [1] und lokaler Flughafen

2 Eckdaten des Antriebssystems

2.1 Bestehendes System

Das bisher eingesetzte Antriebssystem bestand aus einem Schleifringläufer-Asynchronmotor mit zugehörigem Flüssigkeitsanlasser sowie einem Planetengetriebe (Bild 2). Eine Scheibenbremse ist zwischen Motor und Getriebe angeordnet. Die technischen Kenndaten des Antriebs und des Gurtförderers lauteten wie folgt:

- Nennleistung des Antriebs: 2800 kW
- Drehzahl der Antriebstrommel: 35,6 U/min
- Achsabstand: 1690 m
- Höhendifferenz: +224,7 m
- Massenstrom: 3000 t/h
- Gurtgeschwindigkeit: 3,0 m/s



Bild 2: Bestehendes Antriebssystem

2.2 Anforderungen an das neue Antriebssystem

Im Zuge der Modernisierung soll der Massenstrom durch Erhöhung der Gurtgeschwindigkeit auf 3600 t/h erhöht werden. Der neue Antrieb soll dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und insbesondere hinsichtlich Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Regelbarkeit optimiert sein.

Die folgenden Parameter wurden für das neue Antriebssystem festgelegt:

- Antriebsart: Direktantrieb mit Niederspannungsfrequenzumrichter
- Nennleistung des Antriebs: 3250 kW
- Drehzahl der Antriebstrommel: 43 U/min
- Massenstrom: 3600 t/h
- Gurtgeschwindigkeit: 3,6 m/s

Bei der Festlegung der neuen Antriebsleistung wurde ein Wegfall der Getriebeverluste berücksichtigt.

3 Neue Antriebskonfiguration

3.1 Logistische und räumliche Randbedingungen

Die Antriebsstation liegt in einer Kaverne des Tunnelsystems der Mine Malmberget auf einem Höhengniveau von -815 m unter der Erde. Sie ist auf einer Betonbrücke erhöht verlagert und in allen Richtungen von Felsgewölbe umgeben. Für die Kranlogistik steht eine fest installierte Laufkatze mit 25 t Nutzlast und einer begrenzten Anschlaghöhe zur Verfügung. Die Platzverhältnisse und Transportzugänge sind beengt und schwer überschaubar.

3.2 Auswahl des Antriebsmotors

Aufgrund der logistischen und räumlichen Randbedingungen musste geprüft werden, welcher Motortyp in Frage kommt. Als langsam laufende Drehmoment-Motoren stehen elektrisch oder permanent-magnetisch erregte Synchronmaschinen zur Verfügung.

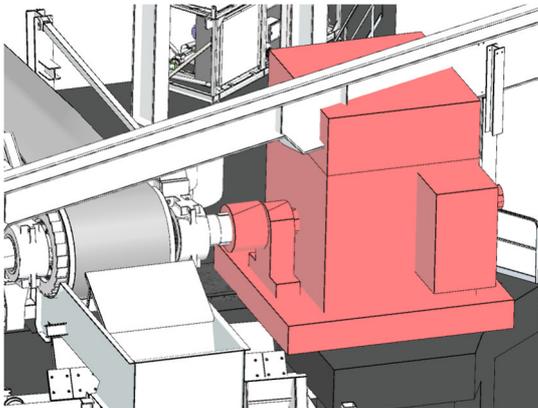


Bild 3: Elektrisch erregte Synchronmaschine (Option 2 x 1625 kW) mit Überlappung existierender Struktur

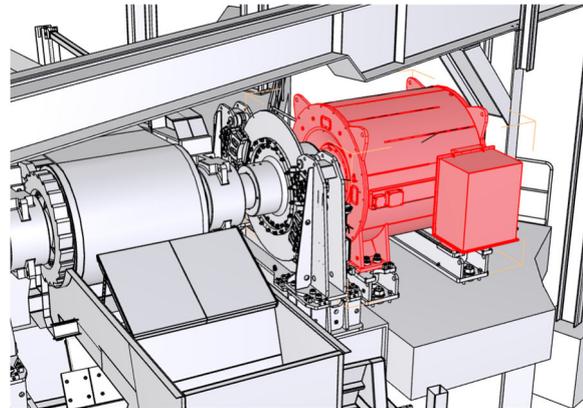


Bild 4: Permanentmagnetmotor (Alternative 2 x 1625 kW AH1200)

Eine Gegenüberstellung der Motordimensionen führt schnell zum Ausschluss der elektrisch erregten Synchronmaschine. Sowohl der Einbau einer Maschine mit 3250 kW als auch die Ausrüstung mit 2 Motoren á 1625 kW führt zur Überschreitung der räumlichen Abmessungen, des möglichen Krananschlags und der zulässigen Transportmasse (Bild 3).

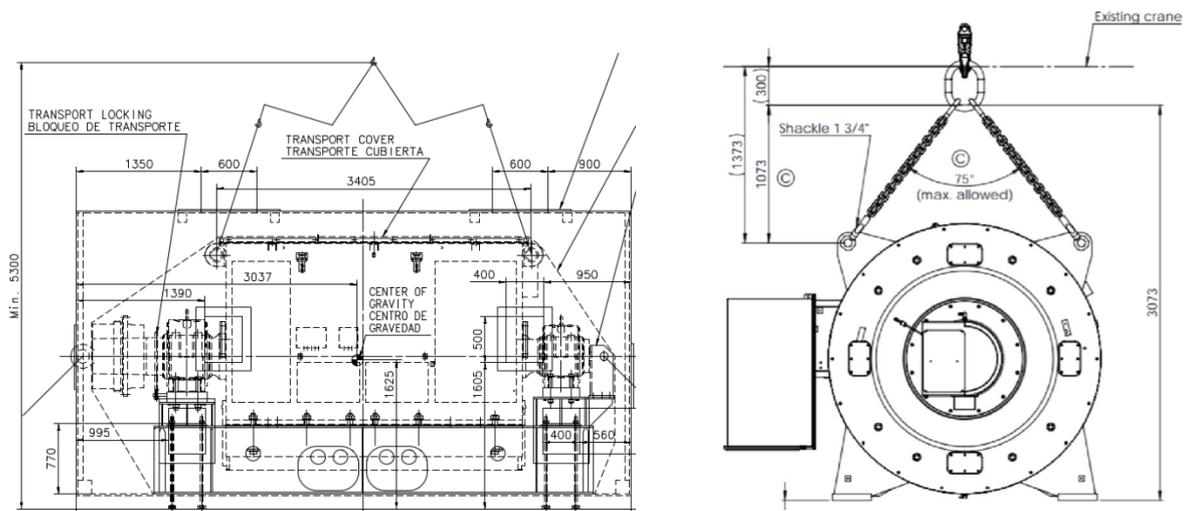
Die Lösung mit einer permanent erregten Maschine (1 x 3250 kW) ist ebenfalls nicht realisierbar, da die Masse des Motors für den verfügbaren Kran zu hoch ist.

Infrage kommt noch lediglich der Einbau von 2 Permanentmagnetmotoren (PM) mit je 1625 kW Nennleistung in der Achshöhe (AH) 1200mm oder 1400mm (Bild 4).

Eine Gegenüberstellung der Dimensionen findet sich in Tabelle 1. Die Krananschlüsse sind beispielhaft in Bild 5 dargestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der technischen Parameter von 3 untersuchten Antriebsmotoren (kritische Parameter in rot)

	Nennleistung	Transport- masse	Hauptabmessung (LxBxH [mm])	Minimaler Krananschlag
Grenzwert		25 t		4100 mm
Elektrisch erregte Synchronmaschine	2 x 1625 kW	>60 t	5700x3400x3900	5300 mm
PM Motor AH1400	3250 kW	36 t	2500x2800x2500	3800 mm
PM Motor AH1200	2 x 1625 kW	24 t		3300 mm

**Bild 5:** Minimaler Krananschlag verfügbarer Motorvarianten (links: Synchronmaschine; rechts: Permanentmagnetmotor)

Die Lösungen mit 2 x 1625 kW PM Motoren wurde in den Achshöhen 1400 mm und 1200 mm weiterverfolgt und aufgrund der schwer überschaubaren vorhandenen räumlichen Verhältnisse auf die Realisierbarkeit mittels 3D Raumsan überprüft (Bild 6). Hierbei fiel die finale Entscheidung auf die Achshöhe 1200 mm, da diese insgesamt den größten Abstand zur bestehenden Konstruktion und dem Berg und damit die beste Manövrierfähigkeit aufwies.

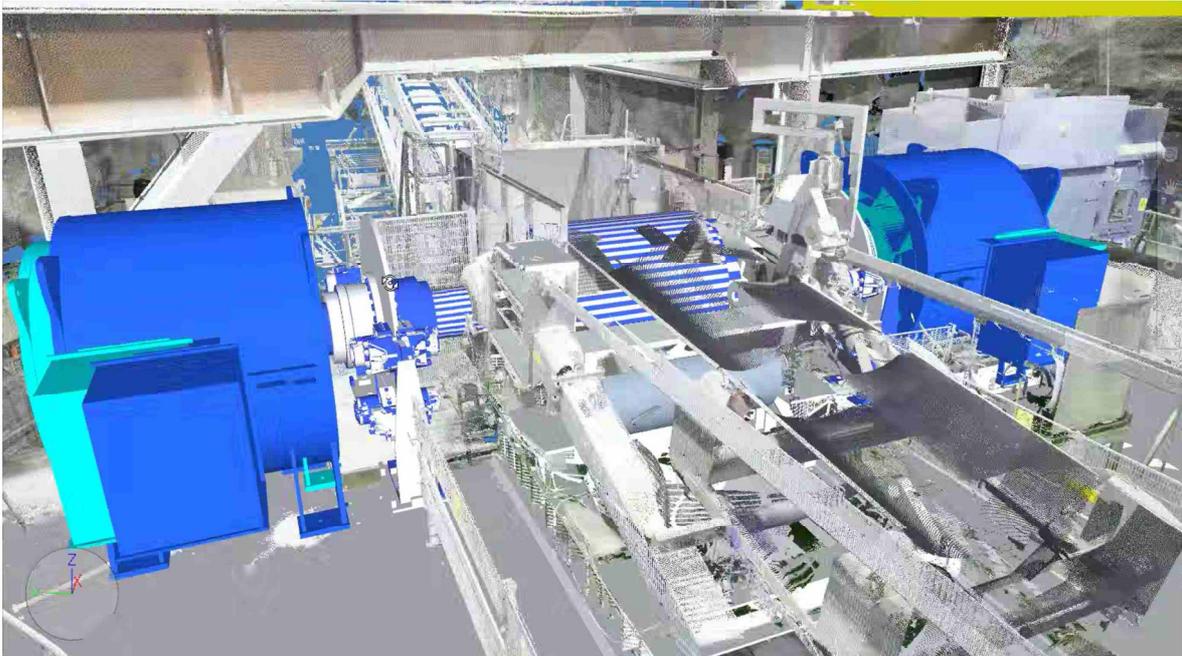


Bild 6: Raumscan der Antriebe mit maßstabsgerecht eingebrachten Motoren

3.3 Elektrischer Antrieb

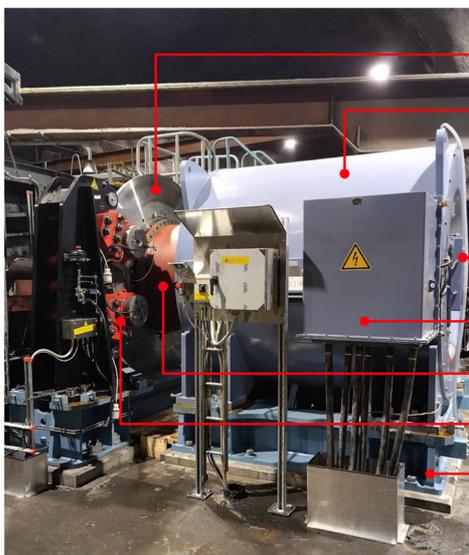
Auf Kundenwunsch wurde der elektrische Antrieb als Niederspannungsantrieb mit einer Nennspannung von 690 V aufgebaut. Hierbei kam ein luftgekühlter Frequenzumrichter vom ACS880 zum Einsatz, welcher in einem abgeschlossenen vollklimatisiertem E-Haus installiert wurde (Bild 7). Aufgrund der maximalen Transportmaße des E Hauses unter Tage wurde ein sehr kompakter Frequenzumrichter in MultiDrive Ausführung gewählt. Hierbei speisen zwei Gleichrichter auf einen gemeinsamen Gleichspannungszwischenkreis, aus welchem beide Motorwechselrichter versorgt werden. Die MultiDrive Ausführung erlaubt gleichzeitig eine redundante Ausführung sowohl der einspeise- als auch der motorseitigen Antriebskomponenten. Bei Ausfall eines Gleichrichters ist ein Weiterbetrieb des Antriebs mit vollem Drehmoment aber reduzierter Drehzahl möglich. Sollte ein Motor oder ein Motorwechselrichter ausfallen, kann der Förderer mit dem 1,6-fachen Motornennmoment gestartet und dann mit etwa 60% der Förderleistung weiterbetrieben werden. Die Redundanz erhöht zusätzlich die Verfügbarkeit der Anlage.



Bild 7: Blick in das E-Haus mit Frequenzumrichter und Klimatechnik (links) und Antriebsmotor (rechts)

3.4 Mechanik - Schnittstellen

Sowohl der Antriebsmotor als auch die Bremszangen wurden auf Stahlrahmen als Schnittstelle zwischen Betriebsmittel und Betonfundament verlagert (Bild 8). Die Anbindung des Motors an die Trommelwelle erfolgte mittels einer versatzausgleichenden Elastomer-Kupplung. Die Bremsscheibe ist in die Elastomer-Kupplung integriert. Die kundenseitige Schnittstelle des Liefer – und Leistungsumfangs stellt die Oberfläche des Betonfundaments bzw. das Wellenende der Trommelwelle dar. Konstruktive Parameter des Gurtförderers bleiben gleich.



Bremsscheibe

Antriebsmotor (PM Motor)

Drehzahl – und Drehwinkelgeber

Hauptklemmkasten

Wellenkupplung

Bremszangen (hydraulisch)

Schnittstellenrahmen

Bild 8: Eingebauter Permanentmagnet-Antriebsmotor mit Schnittstellenrahmen, Wellenkupplung und Scheibenbremse

4 Maßnahmen zur Absicherung der Projektzeitleiste

Bei der Analyse des Projektzeitplans ergaben sich zwei kritische Punkte:

- Lieferzeit der PM-Torque Motoren durch geopolitische Unsicherheiten
- Demontage des alten und Installation der neuen Antriebe innerhalb der jährlichen 2-wöchigen Generalinstandhaltungsperiode

Das Risiko der Lieferzeitüberschreitung wurde in Abstimmung mit dem Kunden durch eine frühzeitige Bestellung des Systems reduziert.

Für die Einhaltung der Umbauzeit wurden folgende wesentliche Maßnahmen ergriffen:

- Austausch der Trommelwelle auf eine Trommelwelle mit neuem Kupplungssitz und vorinstallierter Kupplungshälfte im Instandhaltungszeitraum des Vorjahres; dadurch zeitliche Auslagerung dieses Arbeitsschritts
- Vollständiger Leistungstest des Antriebssystems (Transformator–Frequenzumrichter–Motorkühler) in der Motorfabrik; dadurch Sicherstellung der Antriebsperformance und Fehlerfreiheit der Lieferung
- Vorinstallation und Schnittstellentest parallel zum laufenden Betrieb



Bild 9: Installiertes E-Haus für Frequenzumrichter (links) und Blick auf die Antriebsstation mit 2 x 1625 kW / 2 x 360 kNm Permanentmagnet–Drehmomentmotoren (rechts)

5 Back-to-back Leistungstest

Der Leistungstest wurde im Motorprüffeld durchgeführt. Dafür wurden die Hauptkomponenten

- PM-Torque Motoren
- E-Haus mit installiertem Frequenzumrichter und Kühltechnik (Bild 9)
- Motorkühler
- 6.6/0.69 kV Transformator

in die Motorfabrik geliefert und im Prüffeld temporär installiert (Bild 10). Ein Motor wurde als Prüfling gefahren, während der zweite Motor als Lastmaschine diente. Die Motorwellen waren dabei mechanisch gekuppelt.

Die Tests bezogen sich auf die Routineprüfung der Motoren, den Erwärmungslauf unter Nennlast und das Anfahren des vereinbarten Überlastpunktes von 160 % Motornennmoment für die vereinbarte Dauer der Überlast. Als Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass

- der Erwärmungslauf mit einer guten Temperaturmarge beendet wurde,
- der Überlastpunkt 160 % Motornennmoment (577 kNm) nachgewiesen wurde,
- das Antriebssystem voll funktionsfähig ist, so dass vor Ort keine unvorhergesehenen Arbeiten erforderlich werden.

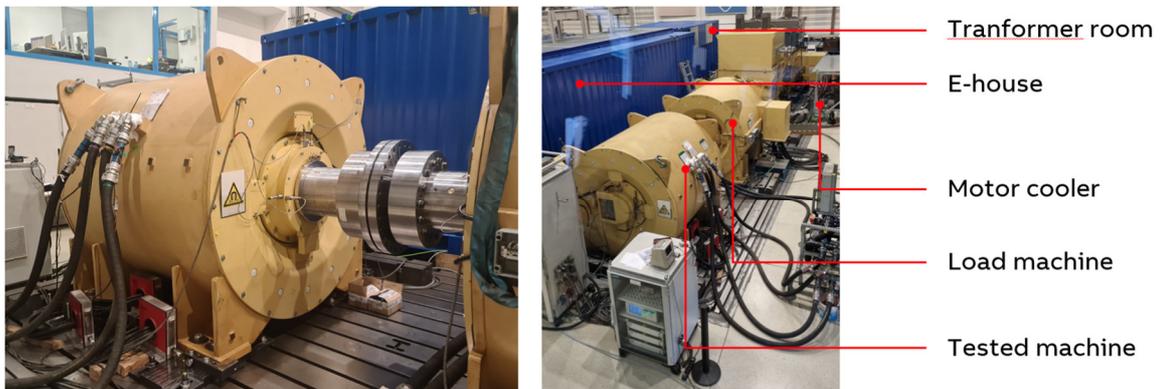


Bild 10: Hauptsystemkomponenten im Systemtest

6 Installation und Inbetriebnahme

Die Installation erfolgte im Wesentlichen in nachfolgend genannten Schritten vor bzw. nach Stillsetzen des Förderers.

Arbeiten **vor** Stillsetzen des Förderers für die 2-wöchige Instandhaltung:

- Montage der E-Häuser für Frequenzumrichter und Transformator
- Setzen und Grobausrichten des ersten Antriebsmotors und der Motorkühler
- Verkabelung der Einspeisung des Transformators und der Frequenzumrichter
- Verkabelung des ersten Antriebsmotors
- Verdrahten der Kommunikationsschnittstellen und Hilfsantriebe
- Elektrische Tests der Kommunikation sowie der Hilfs- und Hauptstromkreise

Arbeiten **nach** Stillsetzen des Förderers für die 2-wöchige Instandhaltung

- Installation der Scheibenbremse des ersten Antriebs
- Funktionsproben des ersten Antriebs entkuppelt
- Funktionsproben des ersten Antriebs gekuppelt
- Deinstallation des alten und Aufbau des neuen (zweiten) Antriebs
- Inbetriebnahme des Gesamtantriebs

Alle Arbeiten konnten fristgerecht zur Wiederaufnahme der Produktion erledigt werden. Die Antriebsoptimierung wurde parallel zum Ramp-Up der Erzproduktion durchgeführt und der Betrieb des Förderers mit der neuen Gurtgeschwindigkeit von 3.6m/s wurde aufgenommen. Der Gurtförderer ist seit Mai 2025 mit dem neuen Direktantrieb in Betrieb.

Zusammenfassung

In der Eisenerzmine Malmberget führte LKAB den Umbau eines Bandantriebs von konventioneller auf Direktantriebstechnik durch. Die Umbaumaßnahme war mit einer Leistungssteigerung um 20% verbunden. Der Umbau auf Direktantriebstechnik wurde durch den Einsatz von Permanentmagnet–Drehmomentmotoren möglich, da diese Motoren die nötige Kompaktheit aufweisen. ABB lieferte die Direktantriebsmotoren einschließlich der elektrischen Antriebstechnik, der Bandregelung („MCCP“) und der mechanischen Bremsen.

Quellenverzeichnis:

- [1] google maps
- [2] Bilder: ABB

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

KI-gestützte Optimierung des Austragsverhaltens von Becherwerken für alternative Brennstoffe auf Basis von Reinforcement Learning

Dominik Aufderheide

Akshay Chavan

Alfons Noe

Tobias Rosenhövel

Fachhochschule
Südwestfalen 
University of Applied Sciences


Industrielle Messtechnik
Industrial Measurement

Prof. Dr. Dominik Aufderheide (Referent)

Akshay Chavan, M. Sc.

Labor für Industrielle Messtechnik

Prof. Dr.-Ing. Alfons Noe

Tobias Rosenhövel, B. Eng.

Labor für Technische Mechanik

Fachhochschule Südwestfalen

Lübecker Ring 2

59494 Soest

KI-gestützte Optimierung des Austragsverhaltens von Becherwerken für alternative Brennstoffe auf Basis von Reinforcement Learning

Die Becherwerkstechnologie ist in der Energie- und Abfallwirtschaft oder Zementindustrie die primäre Förderoption für den vertikalen Stofftransport. Um auch Sekundärbrennstoffe in vollem Umfang einsetzen zu können, fehlen geeignete Becherwerke, die die oft fluffigen, inhomogenen und leichten Brennstoffe effizient senkrecht fördern. Eine neuartige Becherwerksregelung mit Echtzeitüberwachung durch eine Hochgeschwindigkeitskamera und Bildverarbeitung wurde entwickelt. Bilddatenanalysen und das Trainieren der neuen Regelung mit Reinforcement-Learning-Methoden der Künstlichen Intelligenz führen zur optimalen Einstellung des automatisierten Förderprozesses.

1 Einleitung

Der wachsende Druck zur CO₂-Reduktion zwingt die energieintensive Industrie (Stahl-, Zement- oder Kraftwerksindustrie) zunehmend zum Umstieg von Kohle und Gas auf alternative Brennstoffe (ABS). Doch Materialien wie Papierabfälle, Kunststofffolien oder Holzspäne variieren stark in ihren Eigenschaften – von Feuchtigkeit über Dichte bis zur Partikelgröße (siehe auch [1]). Dies stellt konventionelle Becherwerke vor Probleme: Ursprünglich für rieselfähige Schüttgüter konzipiert, erzeugen sie bei leichten, fluffigen ABS unregelmäßige Austragskurven. Wie in [2] dargestellt, sind eine reduzierte Förderleistung und mangelnde Dosiergenauigkeit häufig die Folge. Für eine nachhaltige Zukunft ohne Effizienzverluste sind daher neue technische Ansätze unverzichtbar.



Bild 1: Becherwerk - links: real; rechts: Simulation

Dieser Beitrag präsentiert ein intelligentes Becherwerkssystem, dessen Fördergeschwindigkeit durch einen Reinforcement-Learning-(RL)-Agenten dynamisch angepasst wird. Ziel ist die Minimierung von Abweichungen von einer Soll-Austragskurve, um eine gleichmäßigere Förderleistung zu erreichen. Um den Aufwand für die Datengenerierung an einem realen Becherwerk zu vermeiden, werden die notwendigen Interaktionsdaten synthetisch mittels einer Simulation auf Basis der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) generiert. Das gewonnene Wissen wird anschließend auf einen Becherwerks-Prototyp übertragen. Bild 1 zeigt beispielhaft ein reales Becherwerk sowie die zugehörige DEM-

Simulationsvisualisierung.

Für die Optimierung der Austragskurve ist eine präzise Korrelation materialbezogener Eigenschaften – wie Dichte, Partikelgrößenverteilung (PSD) und Fließverhalten – essenziell. Vorarbeiten nutzten bereits eine Deep-Learning-(DL)-basierte Online-PSD-Schätzung per Bildsegmentierung zur Zustandsbeschreibung des RL-Agenten [3]. Die Belohnungsfunktion des RL-Systems kombiniert Computer Vision (CV) und DL: Algorithmisch modifizierte Partikelbilder trainieren ein DL-Netz zur Materiallokalisierung, das dem Agenten in Echtzeit ein kontinuierliches Belohnungssignal liefert.

Zudem wurde mittels DEM der Einfluss von Partikelform und -größe auf die Becherbelastung während des Schöpfvorgangs im Becherwerksfuß analysiert.

Der Aufbau dieses Beitrags ist wie folgt: Abschnitt 2 beschreibt das Gesamtsystem mit bildbasierter Trajektorienerkennung und RL-basierter-Optimierung. Abschnitt 3 präsentiert die Ergebnisse aus Simulationen sowie Tests am realen Prototyp. Abschließend werden Erkenntnisse und Perspektiven für künftige Arbeiten diskutiert.

2 Methodologie

Der Optimierungsansatz nutzt KI-Verfahren zur Echtzeitregelung der Austragsbahn von Becherwerken, siehe Bild 2. Die RL-Umgebung besteht aus einer kontinuierlich überwachten Becherwerksimulation. Die Hauptsystemparameter Materialtyp, Partikelgrößenverteilung, Eingangsvolumenstrom, Fördergeschwindigkeit und Massenverteilung im Becher definieren den aktuellen Zustand. Auf dieser Basis passt der RL-Agent die Geschwindigkeit des Becherwerks an, wodurch die Austragsbahn direkt beeinflusst wird. Eine Hochgeschwindigkeitskamera erfasst den Materialstrom, und ein DL-basierter Algorithmus analysiert die Bildsequenzen, um Veränderungen der Trajektorien als kontinuierliche Werte (0–1) zu quantifizieren. Diese dienen dem RL-Agenten als Belohnungssignal zur optimalen Geschwindigkeitsanpassung in Abhängigkeit der Materialeigenschaften.

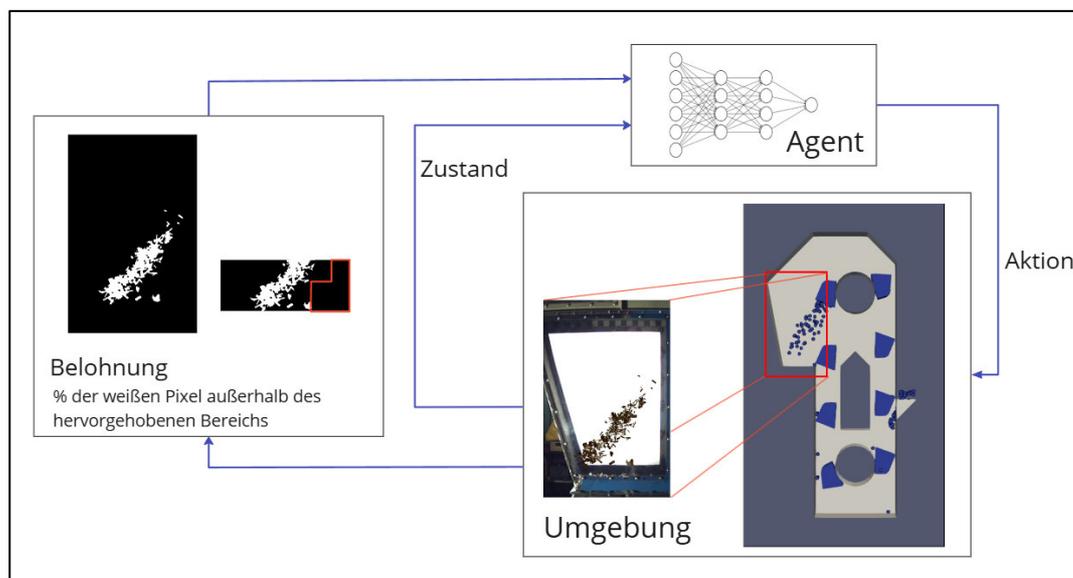


Bild 2: Prozessstruktur der KI-basierten Echtzeitregelung des Becherwerks

2.1 Bildgestützte Überwachung der Abflussparabel

Eine präzise Echtzeitverfolgung der Austragsparabel erfordert umfangreiche markierte Datensätze, deren Erhebung an realen Systemen kosten- und zeitintensiv wäre. Daher greift diese Arbeit auf Simulationen mit der DEM unter Verwendung der LIGGGHTS-Software zurück, um synthetische Trajektorien-Daten zu erzeugen. LIGGGHTS simuliert das Partikelverhalten in verschiedenen Industriezweigen wie Fördertechnik, Pharmazie oder Landwirtschaft [4] und basiert auf einem Feder-Dämpfer-Kontaktmodell [5]. Über eine Python-Schnittstelle lassen sich berechnete Partikeldaten auslesen. Gelesene Koordinaten der Partikelzentren und zugehörige Eigenschaften werden normalisiert und zur Erzeugung von Bilddatensätzen für das Training von DL-Segmentierungsmodellen verwendet.

2.1.1 Generierung synthetischer Datensätze

Für das DL-basierte Erkennen der Austragsparabel sind genau bezeichnete Datensätze erforderlich, bei denen Bild- und Partikelkontur exakt übereinstimmen. Da manuelles Markieren fehleranfällig ist, wird ein neuartiger Ansatz verwendet: Bilder realer Holzpartikel werden an den simulierten Partikelzentren positioniert – im Plexiglas-Beobachtungsbereich des Becherwerks (rot markierter Bereich in Bild 2). Durch gezielte Manipulation des Alpha-Kanals entstehen exakte Segmentierungsmasken. Ein standardisiertes 80/20-Splitting in Trainings- und Testdaten gewährleistet eine robuste Modelleistung. Ein exemplarischer Datensatz ist in Bild 3 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung ist in [5] dokumentiert.



Bild 3: Beispiel für einen synthetischen Datensatz:
links: Bild, rechts: Ground Truth der Segmentierung

2.1.2 Deep-Learning-Modell zur Bildsegmentierung

Die UNET-Architektur wird für Kontursegmentierungsaufgaben eingesetzt und verwendet Faltungsschichten zur Extraktion lokaler Bildmerkmale. Sie wurde ursprünglich zur Segmentierung medizinischer Bilddaten (z. B. Hirntumorerkennung) erfolgreich eingeführt [6]. Das in Bild 4 dargestellte Modell besteht aus kontrahierenden (Down-Sampling) und expandierenden (Up-Sampling) Pfaden, die Merkmale extrahieren bzw. rekonstruieren, um Objektmasken vorherzusagen. Es werden Convolutional Layers, ReLU-Aktivierung, Batch-Normalisierung und Pooling-Operationen verwendet. Das Training erfolgt auf einer 24 GB GPU mit PyTorch. Die Bilder werden auf 496×320 Pixel skaliert und mittels Medianfilter geglättet, um Übergänge zwischen Partikeln und dem Hintergrund zu optimieren. Der

Adam-Optimizer mit der Start-Lernrate von 10^{-3} und die Cross Entropy-Verlustfunktion laufen 40 Epochen. Insgesamt werden 3380 Trainings- und 820 Testbilder verwendet.

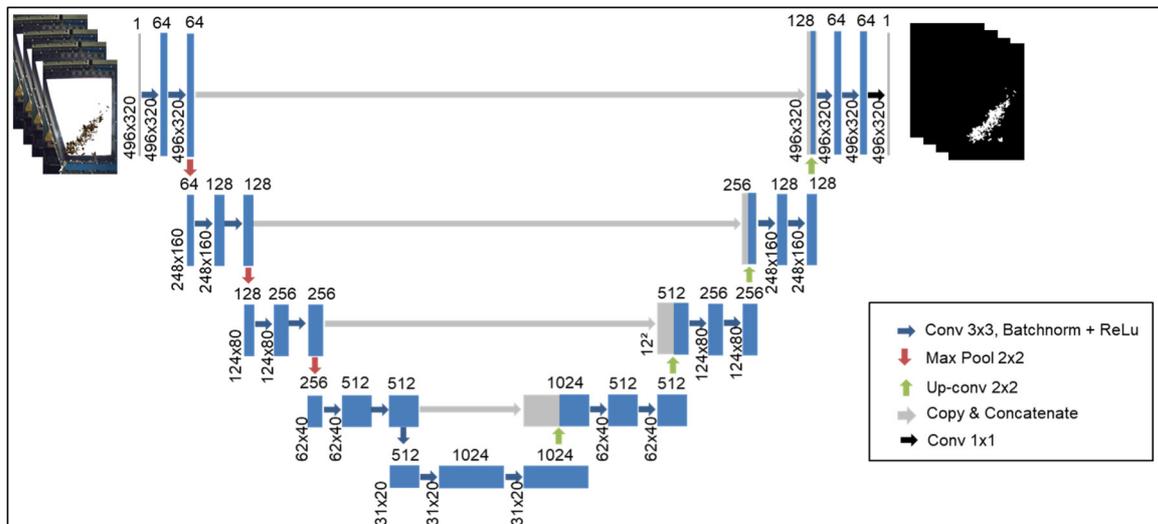


Bild 4: UNET-Architektur

2.2 Optimierung mittels Reinforcement Learning

RL verknüpft Austragsparabeln mit Systemparametern, um Becherwerksprozesse für verschiedene alternative Brennstoffe (ABS) zu optimieren. Der Ansatz gliedert sich in Trainingsphasen, in denen der Agent das Verhalten der Materialaustragstrajektorien erlernt, und Evaluierungsphasen, in denen das vortrainierte Modell die Austragsbahn für gegebene Systemzustände optimiert. Zur Validierung wird die Materialdichte eines einzelnen Bechers am Einlass mit der am Auslass verglichen.

2.2.1 Aufbau der RL-Umgebung

Die Umgebung stellt den Handlungsraum dar, in dem der Agent durch gezielte Aktionen den Systemzustand verändert. Für einen gegebenen Zustand löst eine Aktion eine Zustandsänderung aus, die mit Belohnung oder Bestrafung bewertet wird. Die RL-Umgebung basiert auf LIGGGHTS-Simulationen, in denen Parameter regelmäßig variiert werden. Zwei unterschiedliche LIGGGHTS-Setups simulieren das Verhalten von Papier- und Holzpartikeln entsprechend realer Becherwerksysteme. Der Systemzustand wird durch folgende Parameter definiert: Geschwindigkeit des Becherwerks, Materialtyp, Aufgabevolumenstrom und PSD. Abhängig vom aktuellen Zustand kann der Agent die Geschwindigkeit des Becherwerks in fünf vordefinierten Stufen erhöhen oder verringern.

2.2.2 Belohnungsfunktion

Die Belohnungsfunktion liefert dem RL-Agenten Antworten zur Lernsteuerung, die hier auf der segmentierten Austragskurve des Vision-Moduls basiert. Da Ausreißer die Analyse von Trajektorien verfälschen, werden sie mit DBSCAN (dichtebasierter Clustering-Algorithmus) entfernt, der Rauschen anhand lokaler Punktdichte und eines kleinen Radius herausfiltert.

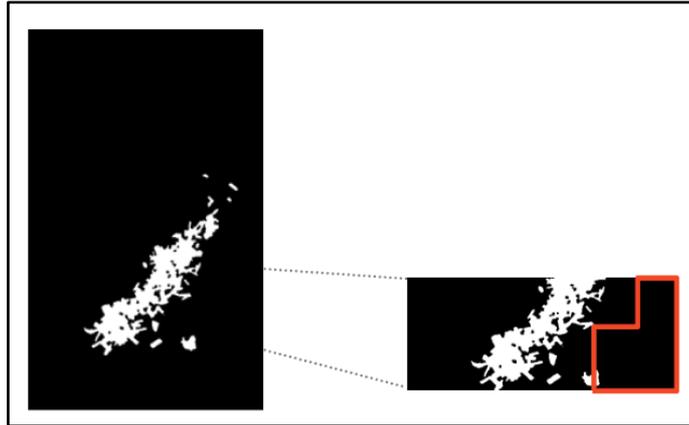


Bild 5: Belohnungsberechnungsbereich

Das bereinigte Segmentierungsbild in Bild 5 (weiße Pixel) wird in einer definierten Region of Interest (ROI) analysiert, die dem unteren Bereich des Becherwerks entspricht. Material in der rot markierten ROI gilt als Rückfall und somit als ineffizienter Austrag. Der prozentuale Anteil an Parabel-Pixeln außerhalb dieser Zone bestimmt die Belohnung „je höher, desto besser der Austrag“. Zur Bestrafung ungünstiger Zustände wird bei mehr als 30 % Materialanteil im roten Bereich ein Strafwert auf die Belohnung angewendet. Zudem wird eine kleine geschwindigkeitsabhängige Strafe eingeführt, da niedrigere Bechergeschwindigkeiten in der Regel bessere Austragsresultate liefern. Diese Strafkomponeute wird jedoch geringer gewichtet als die Segmentierungsbewertung, um die Lernrichtung nicht zu dominieren.

Das resultierende Belohnungssignal ist kontinuierlich und führt den Agenten schrittweise zum optimalen Systemzustand. Die formale Zusammenfassung erfolgt in Gleichung (1).

$$R = \begin{cases} \text{if } 100\% - \text{seg}_{\text{percent}} > 30\% : x = -2 + 1.0 \int_{\bar{x}=0}^{\bar{x}=\text{seg}_{\text{percent}}} d\bar{x} \\ \text{elseif : } x = -1 + \frac{9}{10} \int_{\bar{x}=0}^{\bar{x}=\text{seg}_{\text{percent}}} d\bar{x} + \frac{1}{10} \left(1 - \frac{v}{v_{\text{max}}} \right) \\ \text{else } m_o \geq 0.95 \cdot m_i : x = +2 \end{cases} \quad (1)$$

Dabei ist R die Belohnung, m_o die Materialmasse im Auslaufbecher, m_i die Materialmasse im Einlaufbecher, $\text{seg}_{\text{percent}}$ der prozentuale Segmentierungsanteil am Auslauf, sowie v und v_{max} sind die Geschwindigkeit des Becherwerks und deren Maximum.

2.2.3 Asynchronous Advantage Actor Critic (A3C)-basierter RL-Agent

Ein wesentliches Problem beim Einsatz von DEM-Simulationen im RL besteht in deren Einzel-Thread-Ausführung, was die Rechenleistung stark begrenzt. Zur Lösung dieses Problems kommt der A3C-Algorithmus zum Einsatz. Er ermöglicht paralleles Training durch mehrere unabhängige Umgebungsinstanzen, die jeweils auf separaten CPU-Kernen laufen. Dies führt zu vielfältigerer Zustandserkundung und beschleunigtem Lernfortschritt. Die zugrundeliegende Struktur ist im Bild 6 dargestellt.

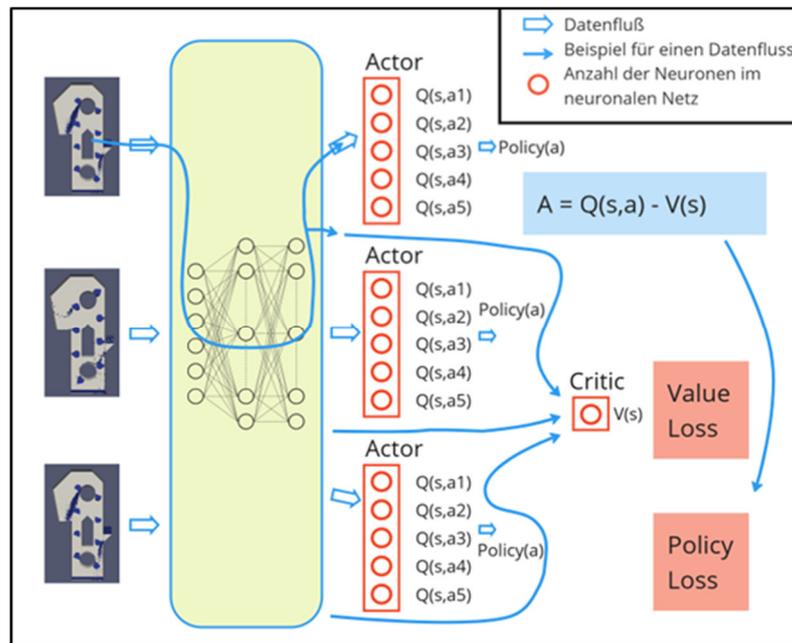


Bild 6: Arbeitsprinzip des A3C

A3C besteht aus zwei Komponenten: dem Actor, der auf Basis einer Policy-Funktion Aktionen auswählt, und dem Critic, der diese mittels einer Wertfunktion bewertet. Der RL-Zustandsraum umfasst sechs diskrete Variablen (siehe vorherige Beschreibung). Der Agent berechnet Wahrscheinlichkeiten für mögliche Aktionen und wählt jene mit dem höchsten Erwartungswert. Der Actor gibt eine von fünf diskreten Geschwindigkeitsanpassungen aus, während der Critic eine skalare Wertschätzung des aktuellen Zustands liefert. Die Differenz zwischen erwartetem und tatsächlichem Ergebnis – das sogenannte Advantage – dient zur gleichzeitigen Optimierung von Policy- und Wertfunktion mittels Backpropagation. Eine gemeinsame neuronale Netzwerkarchitektur mit getrennten Ausgängen für Actor und Critic erhöht die Trainingseffizienz und ermöglicht präziseres sowie schnelleres Lernen.

2.2.4 RL Trainingsparameter für die Optimierung der Austragsparabeln

Die RL-Umgebung basierte auf LIGGGHTS-Simulationen mit kugelförmigen Partikeln und wurde mit zehn parallelen Instanzen – jeweils eine pro CPU-Kern – ausgeführt, um die Trainingsauslastung zu maximieren. Jede Instanz absolvierte 22 Episoden mit maximal 25 Schritten pro Episode. Diese Parameter basierten auf verfügbaren Rechenressourcen.

Das Training erfolgte mit dem Adam-Optimierer bei einer Lernrate von $1e-3$ und einem Diskontfaktor von 0,99. Das neuronale Netzwerk des Agenten bestand aus zwei versteckten Schichten mit je 32 Neuronen. Alle Eingangsvariablen wurden auf den Bereich $[0, 1]$ normalisiert, um ein stabiles Training mit schneller Konvergenz zu ermöglichen. Zur realitätsnahen Simulation der Partikelgrößenverteilung wurden Partikelradien von 3,0, 1,5 und 0,5 cm verwendet. Dieses Setup erlaubte ein effizientes und stabiles Training des A3C-Agents zur Optimierung des Materialaustrags unter variierenden Systembedingungen.

2.3 Diskrete Elemente Methode

Für die DEM-Simulation wurde die von Cundall und Strack in [8] entwickelte Methode genutzt. Die Partikelbewegungen gehorchen den Newton-Euler-Impulssätzen. Die Kräfte und Momente resultieren aus nichtlinearer Deformation bei Hertzscher-Flächenpressung sowie Haft- und Rollreibung für Partikel k im Kontakt mit Partikel j sowie Gravitation.

Es gilt

$$m_k \dot{\mathbf{v}}_k = \sum (\mathbf{F}_{kj}^n + \mathbf{F}_{kj}^t) + m_k \mathbf{g} \quad , \quad \mathbf{I}_k^S \dot{\boldsymbol{\omega}}_k = \sum (\mathbf{R}_k \times \mathbf{F}_{kj}^t - \mathbf{T}_{kj}^r) \quad , \quad (2)$$

mit Bezug auf [9] und LIGGGHTS m_k , \mathbf{g} , \mathbf{I}_k^S , \mathbf{v}_k , $\boldsymbol{\omega}_k$ für die Masse, den Gravitationsvektor, den Massenträgheitstensor, die Translationsgeschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit von Partikel k . \mathbf{F}_{kj}^n und \mathbf{F}_{kj}^t sind die Normal- und Tangentialkräfte, die durch die Interaktion zwischen den Partikeln am jeweiligen Zeitschritt entstehen. \mathbf{R}_k ist der Abstandsektor zwischen dem Zentrum von Partikel k und dem Kontaktpunkt, an dem die Kraft \mathbf{F}_{kj}^t wirkt. Das mit \mathbf{T}_{kj}^r bezeichnete Moment entsteht aufgrund von Rollreibung.

Zur Berechnung der Kontaktkraftbeträge wurde ein Hertz-Mindlin Kontaktmodell genutzt. Das Modell ergibt die normalen und tangentialen, nichtlinearen Kontaktkräfte gemäß

$$F_{kj}^n = -\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_{kj}^n} \delta_{kj}^n - 2\sqrt{5/6} \psi \sqrt{C_n m^*} v_{kj}^n \quad , \quad F_{kj}^t = -8G^* \sqrt{R^* \delta_{kj}^n} \delta_{kj}^t - 2\sqrt{5/6} \psi \sqrt{C_t m^*} v_{kj}^t \quad , \quad (3)$$

mit E^* als äquivalenter E-Modul von zwei Partikeln in Kontakt. R^* ist der äquivalente Radius. m^* steht für die äquivalente Masse. v_{kj}^n und v_{kj}^t sind die relativen Normal- und Tangentialgeschwindigkeiten. δ_{kj}^n und δ_{kj}^t sind die normale und tangentiale Überlappung der Partikel. C_n und C_t sind die normale und tangentiale Kontaktsteifigkeit. G ist der äquivalente Schermodul und ψ ist eine Dämpfung in Abhängigkeit von der Stoßzahl. [7]

2.4 Mechanische Belastung des Bechers beim Schöpfvorgang

Die Becherbelastung, die beim Eintauchen in das Materialbett maximal ist, wurde mit der DEM berechnet. Aus DEM-Simulationen mit diversen Partikelgrößen und -formen wurde deren Wirkung auf die Belastung, wie in Bild 7 dargestellt, analysiert.

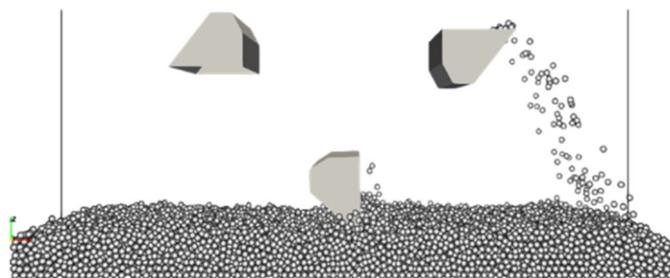


Bild 7: Ablauf der Simulation

3 Bewertung und Test des Gesamtsystems

Die Systemleistung wurde zweiphasig bewertet: 1. Segmentierungsqualität an realen Becherwerkbildern, 2. Austragsoptimierung mit trainierten RL-Agenten in der Simulation.

Für das Visionssystem wurden Austräge von Holz & Plastikpartikeln mit einer Hochgeschwindigkeitskamera detektiert. Das auf synthetischen Daten trainierte UNET-Modell wurde mit gängigen Metriken wie Dice Score, Intersection over Union (IoU) und

Segmentierungsgenauigkeit (SA) getestet. Die Ergebnisse - Dice Score: 0,9725, IoU: 0,9644, SA: 0,9723 - belegen eine erfolgreiche Generalisierung auf reale Daten.

Zur Bewertung des RL-Systems wurde der Agent im Inferenzmodus getestet, ausgehend von zufälligen Becherwerksgeschwindigkeiten und Materialparametern. Ziel war es, eine Geschwindigkeit zu finden, bei der mindestens 95 % des Einlaufmaterials im Becher am Auslauf freigesetzt werden. Die Bewertung erfolgte sowohl während des Trainings zur Konvergenzüberwachung als auch im Anschluss in Testszenarien. Die folgenden Abschnitte behandeln zunächst die DL-basierte Segmentierung und anschließend die Optimierung des realen Becherwerks.

3.1 Bewertung des Algorithmus mit realen Becherwerksbildern

Das Training des UNET-Modells zeigte über alle Epochen hinweg einen gleichmäßigen Rückgang des Verlustwerts für Trainings- und Testdaten, was auf eine gute Generalisierungsfähigkeit hinweist. Räumliche Merkmale wie Textur- und Farbunterschiede wurden zuverlässig erkannt, wodurch Material und Hintergrund klar voneinander getrennt werden konnten. Ein Early-Stopping-Mechanismus beendete das Training, sobald über zehn Epochen hinweg keine Verbesserung eintrat, um Overfitting zu vermeiden. Der Verlauf der Verlustfunktion ist in Bild 8 dargestellt. Zur Validierung wurde das Segmentierungssystem an realen Bildern des Becherwerks getestet. Zwei Beispielvorhersagen sind in Bild 9 zu sehen und zeigen, dass die vorgeschlagene Methode die Austragsparabel präzise segmentieren kann.

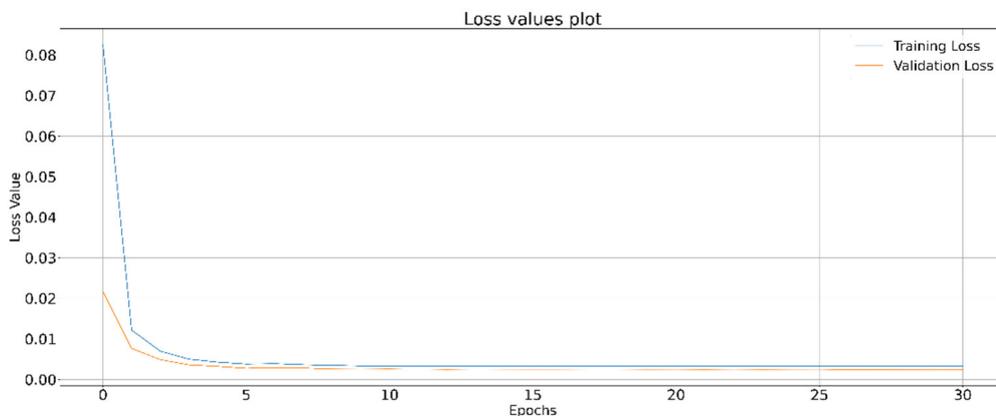


Bild 8: UNET Ausbildungs- und Evaluierungsplan

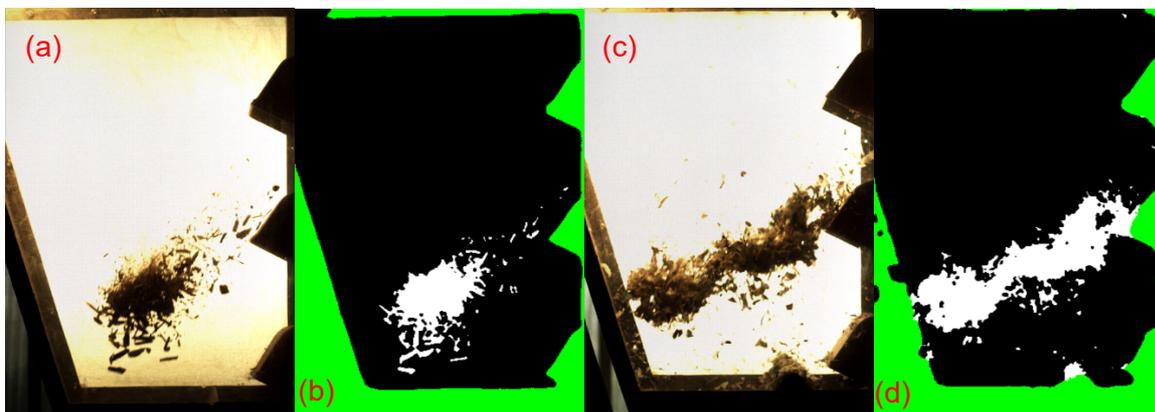


Bild 9: Auswurf des Materials: (a) Holz, (b) Vorhersage Holz, (c) Fluff, (d) Vorhersage Fluff

3.2 Bewertung des RL-Optimierungsprozesses

Die RL-Optimierung wurde zweiphasig getestet: Zuerst lernte der Agent, Systemzustände mit optimalen Aktionen zu verknüpfen, um dann Entscheidungen in Neuszenarien zu bewerten.

3.2.1 RL Trainingsphase

Das Training erfolgte über 20 Tage mit zehn parallelen DEM-Simulationen. Insgesamt wurden 220 Episoden mit jeweils 2 bis 25 Schritten durchgeführt. Zu Beginn überwogen negative Belohnungen, was auf einen ineffizienten Austrag hindeutete. Nach etwa 3.500 Schritten traten vermehrt positive Belohnungen auf – ein Zeichen dafür, dass der Agent effektive Geschwindigkeitsanpassungen erlernt hatte. Eine Belohnung von +2 zeigte zuverlässig an, dass 95 % des Einlaufmaterials optimal am Auslauf austraten. Der gesamte Trainingsverlauf ist in Bild 10 dargestellt.



Bild 10: Trainingsphase – verdiente Belohnung

3.2.2 RL-Testphase – Systembewertung

Der trainierte Agent wurde in zwei Szenarien getestet – mit Holz- bzw. Papierpartikeln. In beiden Fällen passte der Agent die Becherwerksgeschwindigkeit, basierend auf dem Systemzustand, so lange an, bis ein optimaler Austrag erreicht war.

Bechergeschwindigkeit=1.55 m/s

Bechergeschwindigkeit=1.3 m/s

Bechergeschwindigkeit=1.05m/s

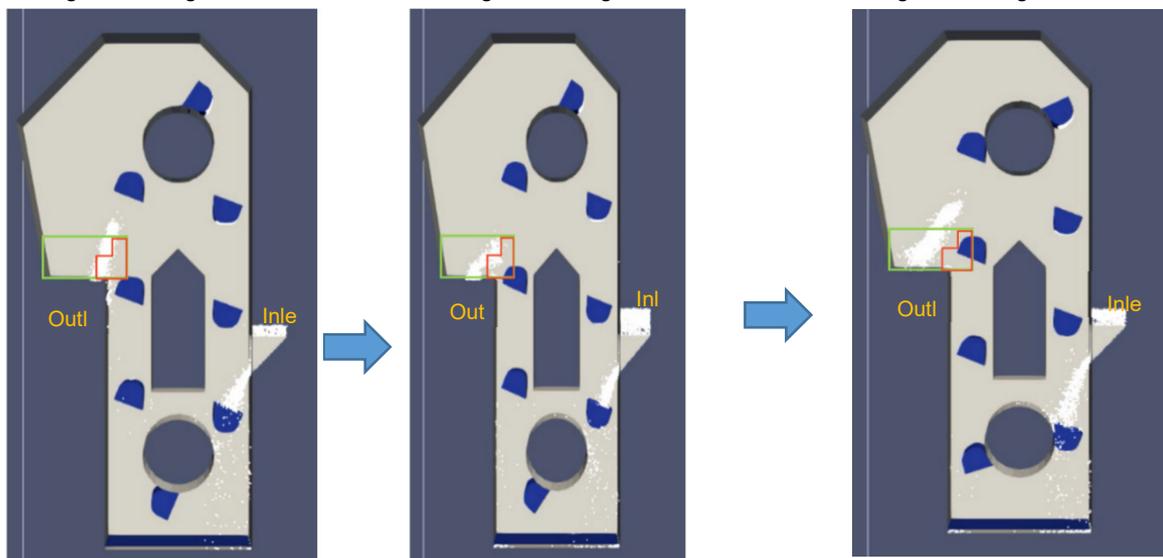


Bild 11: Auswertung des Optimierungsprozesses (Simulationstyp: Holz)

Im Holzscenario wurde die Geschwindigkeit von 1,8 m/s auf 1,05 m/s reduziert, wodurch der Großteil des Materials außerhalb der unerwünschten Zone landete. Die Einlaufmasse betrug 2,930 kg, die Auslaufmasse 2,799 kg und bestätigt einen sehr effizienten Austrag. Beim Papier wurde die Geschwindigkeit von 1,0 m/s auf 1,5 m/s erhöht; die Einlaufmasse lag bei 1,478 kg, die Auslaufmasse bei 1,475 kg und bestätigt eine hohe Austrageffizienz. Diese Anpassungen stimmen mit den im Training erlernten Trends überein: Dichtere Materialien werden bei geringeren Geschwindigkeiten besser ausgetragen, leichte und fluffige Materialien bei höheren Geschwindigkeiten. Mehrere Kamerabilder zu diskreten Zeiten der Holzsimulation verdeutlichen das Verhalten in Bild 11. Diese Ergebnisse zeigen, dass der RL-Agent materialabhängige Dynamiken erkennt und den Austrag wirkungsvoll optimiert.

3.3 Vision-PI-Ansatz für die intelligente Echtzeitregelung des Becherwerks

Aufgrund physikalischer Einschränkungen beim Echtzeit-RL-Einsatz wurde eine alternative Steuerstrategie entwickelt: Vision-PI-Ansatz. Hierbei wird Vision-basiertes Feedback mit einem Proportional-Integral-(PI)-Regler kombiniert, um die Becherwerksgeschwindigkeit dynamisch anzupassen. Die Segmentierung erkennt in Echtzeit Materialverluste am Auslauf und wandelt diese in eine quantifizierbare Regelgröße um, siehe Bild 12.

Der Prototyp nutzt ein NVIDIA Jetson Orin Nano zur Echtzeitsegmentierung und Steuerungsberechnung. Das Segmentierungsmodell wurde als TensorRT-Engine optimiert, um GPU-Beschleunigung zu nutzen und jedes Bild schnell zu verarbeiten. Innerhalb der Segmentierung definiert ein Bereich für Materialverluste das relevante Gebiet: die Anzahl weißer Pixel zeigt, wie viel Material zurückfallen könnte. Dieser Wert wird mit einem Sollwert (meist 5 %) verglichen. Die Differenz ist die Regelabweichung des PI-Reglers. Eine positive Abweichung indiziert erhöhten Materialverlust und bewirkt eine höhere Geschwindigkeit, negative eine geringere. Die PI-Gewichte ($k_p = 0.3$, $k_i = 0.03$) wurden empirisch bestimmt.

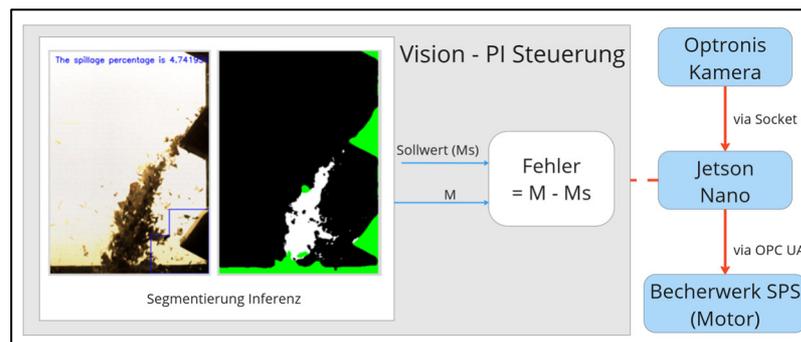


Bild 12: Steuerungsarchitektur für den Becherwerksbetrieb

Regelbefehle werden auf dem Jetson berechnet und ausgegeben. Hochgeschwindigkeits-Bilddaten werden per Socket von der Optronis Sprinter FHD-C Kamera an das Jetson übertragen. Nach der Verarbeitung werden Steuerdaten mit Fehlerwert via OPC UA an die SPS und damit an den Frequenzumrichter (VFD) gesendet, der die Motordrehzahl regelt. Diese Kommunikationsstrategie sichert niedrige Latenz und industrielle Zuverlässigkeit. Das System wurde unter Realbedingungen mit Plastik-Material getestet. Wie Bild 13 aufzeigt, stabilisierte sich der PI-Regler nach einer kurzen Anlaufphase auf etwa 28 Hz, mit

einer stationären Segmentierungsabweichung von 1–3 % und Einschwingzeit von ca. 5 Minuten. Dies zeigt, dass das System auch bei instabilem Materialverhalten zuverlässig arbeitet und bestätigt die Wirksamkeit des Vision-PI-Ansatzes für ABS in dynamischen Szenarien. Bild 13 zeigt exemplarisch die Anpassung des Systems über der Zeit.

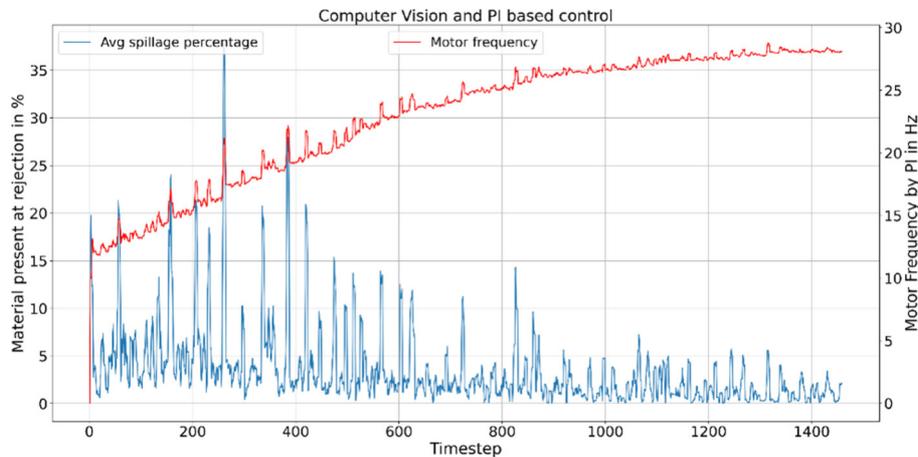


Bild 13: Vision-PI Steuerung für das Fluff-Material als komplexer Ersatzbrennstoff (EBS)

3.4 Einfluss der Materialform auf den Schöpfvorgang

Für den Beginn des Transportvorgangs zeigt Bild 14 Schöpfmomente beim Eindringen des Bechers in das Materialbett. Der gezackte Verlauf entsteht durch das Auftreffen der Becherkanten auf die Partikel. Nach der Partikelverdrängung nimmt die Belastung ab, bis die nächsten Partikel getroffen werden. Größere Partikel bewirken größere Belastungen der Becher. Die Becherkante kann leichter zwischen den kleineren Partikeln hindurchgleiten, während bei größeren Partikeln die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die Kante Partikel nahe des Zentrums trifft, sodass die Verdrängungskraft steigt. Bei nicht sphärischen Partikeln kommt ein Verklümmungseffekt hinzu, sodass die Plättchen bei etwa gleicher Größe wie Kugeln eine höhere Maximallast am Becher bewirken. Die Verklümmung ist besonders stark, wenn Stäbe zu Plättchen zugemischt werden. Im ungünstigsten Fall trifft die Kante unter 90° auf den Stab, sodass der komplett in seine umgebenden Partikel gedrückt wird.

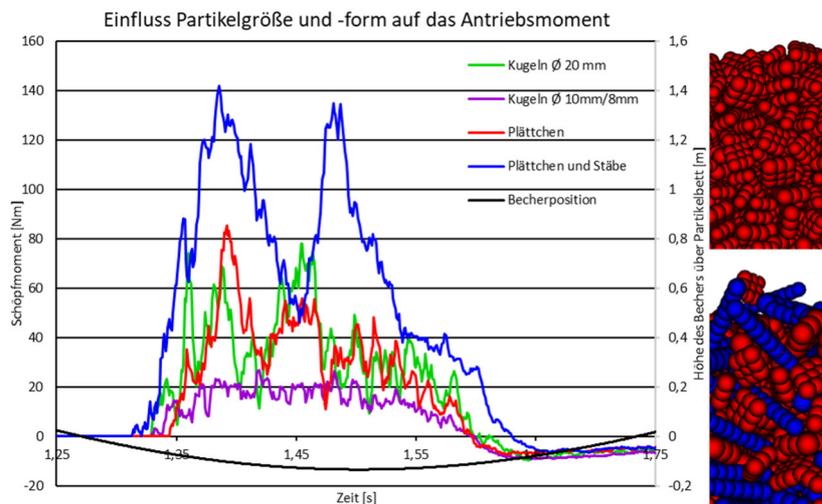


Bild 14: Belastung des Bechers während des Eingriffs in das Partikelbett. Rechts oben: Plättchen 15 mm * 15 mm. Rechts unten: Plättchen 20 mm * 20 mm * 10 mm und Stäbe Ø 10 mm * 50 mm

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt, dass der Einsatz von KI-Methoden – insbesondere Computer Vision, Reinforcement Learning (RL) und Vision-basierte PI-Echtzeitregelung – eine intelligente und adaptive Optimierung des Becherwerksaustrags für alternative Brennstoffe ermöglicht. RL- und Deep-Learning-Modelle auf Simulationsbasis erlauben das präzise Erkennen und Steuern von Trajektorien, während der Vision-PI-Regler belegt, dass Echtzeit-Bildfeedback auch bei anspruchsvollen Materialien wie Fluff eine stabile und effiziente Prozessführung sicherstellt. Insgesamt führen die vorgestellten Ansätze zu einer deutlichen Verbesserung von Austragsgenauigkeit, Durchsatz und Prozessstabilität und bilden damit die Basis für zukünftige intelligente Fördersysteme in der Industrie. Mit der DEM konnte ein Einfluss der Partikelform auf Belastungen beim Schöpfvorgang rechnerisch identifiziert werden.

Quellenverzeichnis:

- [1] Aufderheide, D.; Di Matteo, L.: Best Practice Approaches for Co-Processing of Alternative Fuels in the Cement Industry. In Cement International, Vol. 15, n. 1, p. 26-33, Jan. 2017, Verlag Bau+Technik, Erkrath - ISSN 1610-6199
- [2] Aufderheide, D.; Schmidt, B.; Di Matteo, L.: Optimising Bucket Elevators for Alternative Fuels. In International Cement Review, 8 (2020), pp. 64-68, Tradeship Publications Ltd., Dorking - ISSN 0959-6038
- [3] Chavan, A.; Aufderheide, D.; Schmidt, A.; Klopries, H.: Synthetic Image Generation for Visual Particle Size Distribution Estimation based on U-NET Convolutional Networks. Int. Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies, (DICCT), 2023
- [4] Kloss, C.; Goniva, C.; Hager, A.; Amberger, S.; Pirker, S.: Models, Algorithms and Validation for Open Source DEM and CFD-DEM. Progress in Computational Fluid Dynamics, Vol. 12, Nr. 2/3, 140-152, 2012
- [5] Gelnar, D.; Zegzulka, J.: Discrete Element Method in the Design of Transport Systems – Verification and Validation of 3D-Models. Springer, 2019
- [6] Chavan, A.; Rosenhövel, T.; Elbel, A.; Schmidt, B.; Noe, A.; Aufderheide, D.: Vision-Based Reinforcement Learning Approach to Optimize Bucket Elevator Process for Solid Waste Utilization. *Sustainability*, Bd. 16, Nr. 8, 2024
- [7] Ronneberger, O.; Fischer, P.; Brox, T.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Proc. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Springer, Vol 9351, 234-241, 2015
- [8] Cundall, P. A.; Strack, O. D. L.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, Vol 29, 47-65, 1979
- [9] Yan, Z.; Wilkinson, S. K.; Stitt, E. H.; Marigo, M.: Discrete Element Modelling Input Parameters: Understanding their Impact on Model Predictions using Statistical Analysis. *Computational Particle Mechanics*, Vol.2 (3), 283-299, 2015

Förderhinweis:

Diese Arbeit wurde durch das ZIM-Kooperationsprojekt, Kennzeichen KK 5298 302 CM1, vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages bis zum 31.01.2025 gefördert.

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Entwicklung eines neuartigen Becherwerkes zur Vertikalförderung von Schüttgütern mittels Schubkette

Christian Kirschniok



Dipl.-Ing. Christian Kirschniok
AUMUND Fördertechnik GmbH
Saalhofer Str. 17
47495 Rheinberg

Entwicklung eines neuartigen Becherwerkes zur Vertikalförderung von Schüttgütern mittels Schubkette

Das Projekt zur „Entwicklung eines energiesparenden Schubkettenbecherwerks zur umweltfreundlichen Vertikalgutförderung von Schüttgütern“ beinhaltet Aspekte der Verfahrens- und Prozessentwicklung. Die Schwerpunkte des Projekts waren die Auslegung und Detaillierung sowie Erzeugung von Berechnungen und Auswertungen. Mithilfe von CAD-Software konnten Komponenten ausgelegt werden und weiterführend mit der Finite-Elemente-Methode und Mehrkörpersimulation auf verschiedene Lastfälle, Festigkeiten etc. getestet werden. Basierend auf den ausgearbeiteten Konstruktionen und Entwicklungen wurde ein Schubkettenbecherwerk auf dem Betriebsgelände von AUMUND gebaut und getestet.

1 Einführung und Motivation

AUMUND ist seit mehr als 90 Jahren im Bereich der Fördertechnik für Schüttgüter tätig und ist ein Experte in der Transporttechnologie. Das Unternehmen bietet Produkte mit hohem technischen Standard und Lösungen für eine Vielzahl von Anwendungen zur Förderung und Lagerung von Schüttgütern an.

Ein wichtiger Aspekt, zur Minderung der Klimaeffekte, ist die Entlastung der Umwelt durch Einsparung von Energie. Der Bereich der Senkrechtförderer ist geprägt von bewährten Technologien. Die eingesetzten Anlagen zeichnen sich häufig durch eine lange Lebensdauer und niedrige Betriebskosten aus, wodurch sich partielle Innovationen und allgemeine Entwicklungstendenzen, z. B. im Bereich der Antriebstechnologien, nur sehr langsam durchsetzen. Dies gilt insbesondere für Becherwerke – sowohl für Gurt- als auch für Kettenbecherwerke. Diese werden zwar stets auf den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch ausgelegt, und die Zugmittel unterliegen einer stetigen Entwicklung, das Förderprinzip ist jedoch seit Jahren unverändert.

AUMUND entwickelte eine völlig neue Konstruktionsweise für Kettenbecherwerke, wodurch erstmalig das Prinzip der Schubkette im Anwendungsbereich der großvolumigen Vertikalförderung von schweren Schüttgütern eingesetzt wird. Die bedeutendsten Innovationsthemen sind dabei die Positionierung und Auslegung der Antriebstechnik am Fuße der Förderkette, das Design der Kette, die Kettenführung und die Bechersysteme sowie eine flexible, geschwindigkeitsunabhängige Entladung und Beladung. Dieser neue Anlagentypus wurde im Rahmen des hier vorgestellten Projekts bis hin zum Technikumsmaßstab untersucht.

2 Methodisches Vorgehen und Projektablauf

2.1 Theoretische Auslegung der Einzelkomponenten

Ziel des Entwicklungsschrittes ist es, eine Detailauslegung, Konzeptionierung und Planung der verschiedenen Einzelkomponenten zu erstellen. Dies dient als Grundlage der Entwicklung des Anlagenkonzeptes sowie der Vorbereitung des Aufbaus der Laboranlage. Die folgenden, einzelnen Entwicklungsbereiche wurden dabei nicht unabhängig voneinander betrachtet, so hängt z. B. das Austragsverhalten sowohl vom Becher als von Führung und Umlenkung ab. Als Teil dieser Entwicklungsarbeiten zu den verschiedenen

Elementen des neuen, innovativen Systems und deren Interaktionen werden Methoden der virtuellen Produktentwicklung und -berechnung angewendet. Auf Basis von CAD-Designs werden insbesondere numerische Simulationen wie MKS und FEM (Mehrkörpersimulation, Finite Elemente Methode) verwendet. Insbesondere in Bezug auf die Führung der Schubkette im Antriebsbereich sind bei großen Höhen Kräfte zu erwarten, die auf den Druckstab wirken. Die Führung und Versteifung des Druckstabs und die Vermeidung des unkontrollierten Ausknickens der Kette müssen durch Simulationen validiert werden. Dabei müssen die Bewegungswiderstände und der Verschleiß der Führung minimiert werden.

2.2 Auslegung und Erprobung des Gesamtsystems

Ziel ist es, durch die erlangten Erkenntnisse ein Gesamtsystem auszulegen sowie die Erstellung einer Laboranlage zur Durchführung der weiteren Entwicklung. Das Gesamtsystem wird aus den Einzelsystemen zusammengeführt. Dies beinhaltet die Vorbereitung der Montage der Laboranlage, alle Maßnahmen zur Organisation des Einzelsystems und der Komponenten sowie deren Qualitätskontrolle. Anschließend wird die Laboranlage errichtet und in Betrieb genommen.

2.3 Erprobung der Mechanik

Anhand der Laboranlage werden die Mechanik des Systems untersucht und daraus mögliche Probleme identifiziert. Zu dieser Untersuchung gehören

- die Variation der Betriebsparameter
- die Analyse der Auswirkungen verschiedener Betriebsparameter
- die Ableitung der maximalen und minimalen Betriebsparameter

2.4 Iterative Revision der Einzelsysteme und des Gesamtsystems

Auf Basis der Ergebnisse erfolgen die Anpassungen der konstruktiven Auslegung verschiedener Einzelsysteme und die Anpassung der Laboranlage. Die veränderten Systeme werden dann weiter untersucht. Hierbei erfolgen auch detaillierte numerische Simulationen, um die experimentellen Ergebnisse zu validieren. Es werden erneut MKS und FEM eingesetzt, allerdings mit höherem Detailgrad und unter Verwendung bisheriger Ergebnisse. Zur Einbeziehung des Schüttgutverhaltens werden auch DEM (Diskrete-Elemente-Methode) sowie sogenannte gekoppelte Simulationen, DEM-FEM oder DEM-MKS, eingesetzt. Für diese Durchführung werden spezialisierte Dienstleister eingebunden.

2.5 Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial

Ziel ist es, die verbesserte Laboranlage zu verwenden, um ausführliche Informationen über das Fördermaterial zu erlangen. Hierbei sind Aussagen zu den Fördereigenschaften sowie der Nachweis der Anwendbarkeit von Bedeutung.

Sobald die Untersuchungen und Entwicklungen eine ausreichend hohe Leistungsfähigkeit und Stabilität der Laboranlage erreicht haben, muss eine Erprobung unter Last erfolgen. Hierzu werden wiederholt Versuche mit verschiedenen Fördermaterialien unter verschiedenen Betriebsparametern durchgeführt. Dadurch wird das Förderverhalten für verschiedene Materialien analysiert. Es ist von essentieller Bedeutung, dass auch

sensiblere Materialien gefördert werden können. Insbesondere spielt der Erhalt von Korngeometrie eine wesentliche Rolle.

3 Ergebnisse

3.1 Grobkonzeptphase

In dieser Phase wurde ein Untersuchungsmodell erarbeitet und mittels CAD-Software parametrisch aufgebaut.

Auf Basis dieses Untersuchungsmodells wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der Parametervarianten vorgenommen wurden, um die größten Einflussfaktoren und Förderleistung zu ermitteln.

3.2 Auslegung des Konzeptes

Es erfolgte eine analytische Betrachtung der Schnittkräfte und Identifizierung der auslegungsrelevanten - höchstbelasteten - Komponenten sowie zur Verifizierung des FE-Modells. Nach der Betrachtung der Reaktionskräfte an der unteren Umlenkung, erst im quasistatischen Zustand und anschließend mit Beschleunigungsanteil, wurde eine Prüfung auf Umkippen durchgeführt. Basierend auf weiteren Berechnungen zu der erforderlichen Kettenschubkraft und Antriebsleistung beim Beschleunigungsvorgang im vollbeladenen Zustand, ist eine Auslegung des Antriebsstrangs möglich (Bild 1).

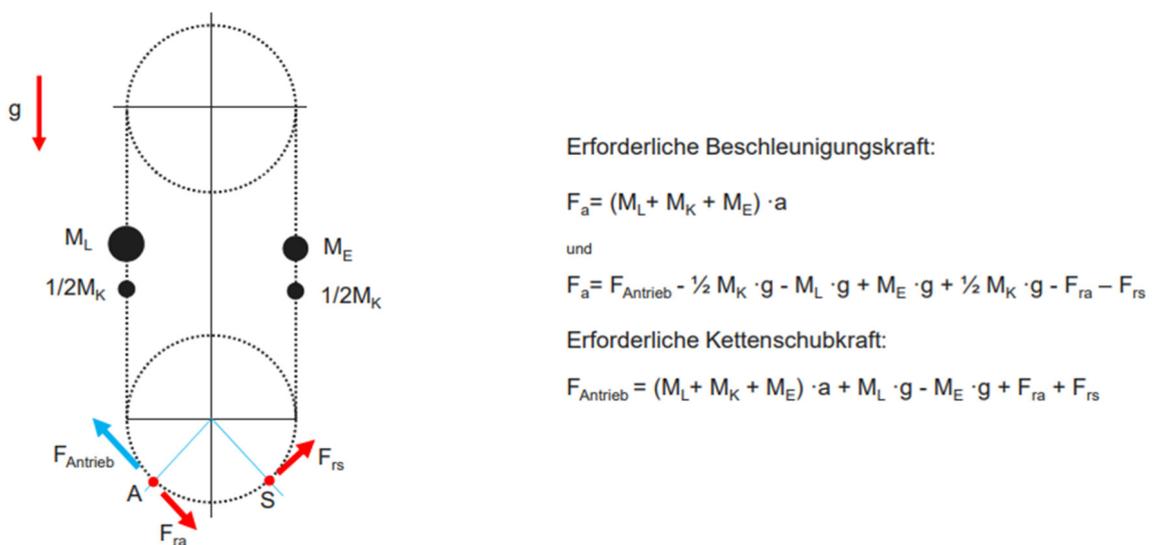


Bild 1: Beschleunigungskraft und Kettenschubkraft

3.3 Kettenstrang und Becher

Das Kettenglied ist modular aufgebaut und zur Mittelebene symmetrisch (Bild 2). Das Mittelstück und die Kettenstege werden miteinander verstiftet und verschraubt. Die Symmetrie erlaubt eine Verwendung der Kettenglieder auf beiden Strangseiten, die Montage des Endanschlags und Becherbolzens ist erfolgt auf dem jeweils anderen Stegelement. Bei Verschleiß/Beschädigung einzelner Bereiche des Kettengliedes kann somit nur die betroffene Komponente ausgetauscht werden.

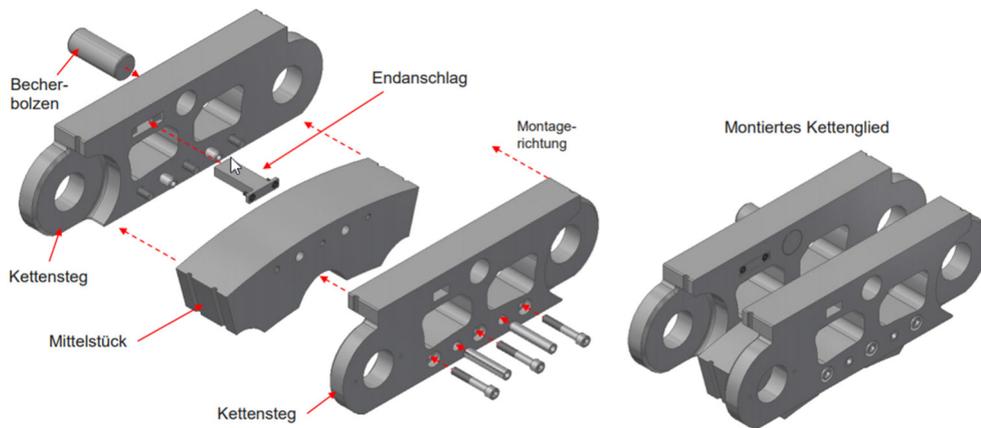


Bild 2: Modulbauweise Kettenglied

Das Kettenglied weist Funktionskontakte auf, diese unterscheiden sich je nach Position im Förderprozess. Differenziert wird hierbei zwischen Funktionskontakten in der Umlenkung oder aber im Leer-/Lasttrum. Die Kontakte sind in Bild 3 farblich markiert.

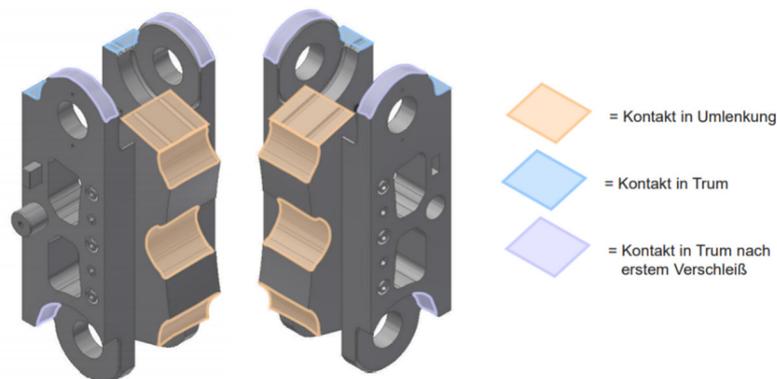


Bild 3: Kettenglied, Funktionskontakte

Im Last- & Leertrum wird die Schubkraft der Kette an den Stirnflächen der Kettenglieder übertragen, nach einem Anfangsverschleiß stehen die runden Ausnehmungen zusätzlich als Auflage zur Verfügung und verlangsamen so den weiteren Verschleiß. Durch exzentrische Montage der Becher zum Kettenglied werden die Stirnflächen der Kettenglieder zusätzlich belastet, dadurch wird der gerade Lauf der Kette stabilisiert.

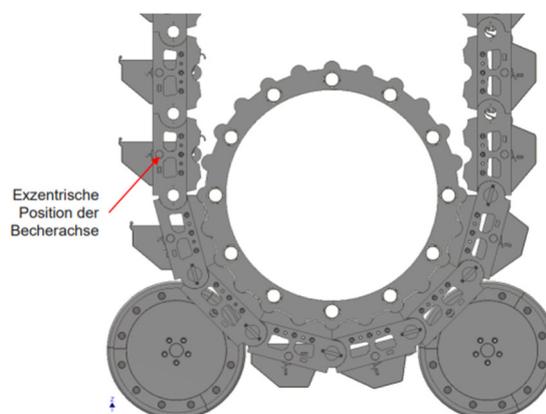


Bild 4: Position der Becherachse

Der Endanschlag eines Kettengliedes und die zwei Endanschläge am Becher dienen dazu, die gewünschte Becherposition in den jeweiligen Betriebsphasen sicherzustellen (Bild 4).

Die Ergebnisse der FE-Analyse zeigen grundsätzlich eine (hinsichtlich Festigkeit) größtenteils korrekt dimensionierte Kettengliedgrundgeometrie. Die Bereiche rund um die Bolzenlagerung mussten noch verstärkt werden. Auch weisen die Ergebnisse einige Bereiche, z. B. das Kettengliedmittelstück, mit relativ geringen Spannungen auf, womit Potential zu Materialeinsparung/Verschlanung vorhanden ist.

Die Bechergeometrie als gekantete Ausführung hat sich aufgrund der einfacheren Fertigungsmöglichkeiten und der damit einhergehenden Flexibilität in der Kontur ergeben. Durch Asymmetrie kann der Antriebsrad-Durchmesser verringert werden, was in einem kleineren Footprint der Anlage resultiert.

3.4 Antriebsstation und Kettenmontage

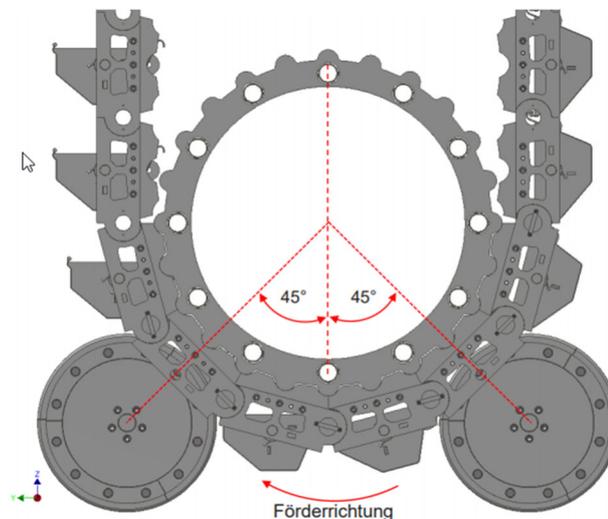


Bild 5: Antriebskonzept

Das Antriebsrad sowie die eingesetzten Schrauben wurden ausgiebig, anhand FE-Analysen, einer Festigkeitsbewertung unterzogen und somit geprüft. Wie nachfolgend zu entnehmen, bildet sich an der Stelle zwischen Kettenglied und Antriebsrad bzw. dem Übergang der Kranzteile eine kritische Stellung ab (Bild 6).

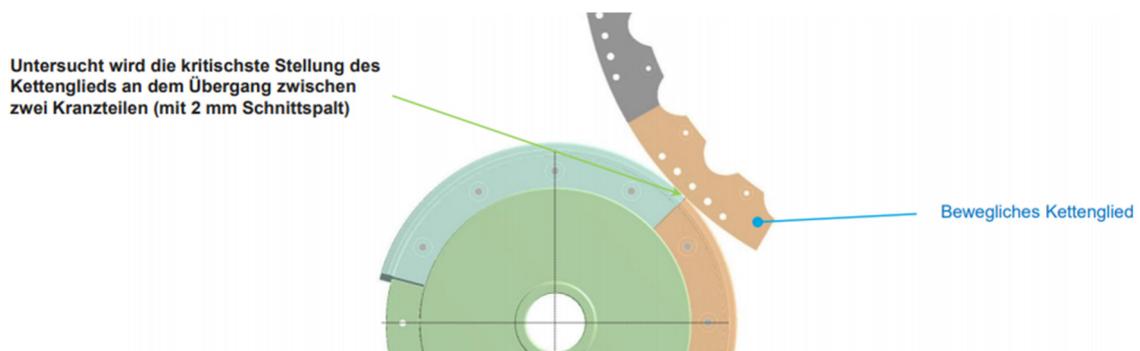


Bild 6: Kritische Stellung Kettenglied und Ringsegment

Die Antriebsräder spielen bei der Kettenmontage ebenfalls eine wichtige Rolle, hierbei werden die Kettensegmente in die untere Umlenkung eingeführt. Die Segmente sind lang genug, um auf Antriebsrad und Stützrad aufzuliegen, somit wird die Lage definiert. Das Nockenrad wird von oben in Mulden der Kettenglieder herabgelassen. Dieser Vorgang wird durch eine Vorrichtung gestützt, diese ermöglicht leichtes Rotieren des Nockenrads um die Achse. Anschließend kann ein weiteres Kettensegment aus gleicher Richtung nachgeführt werden (Bild 7).

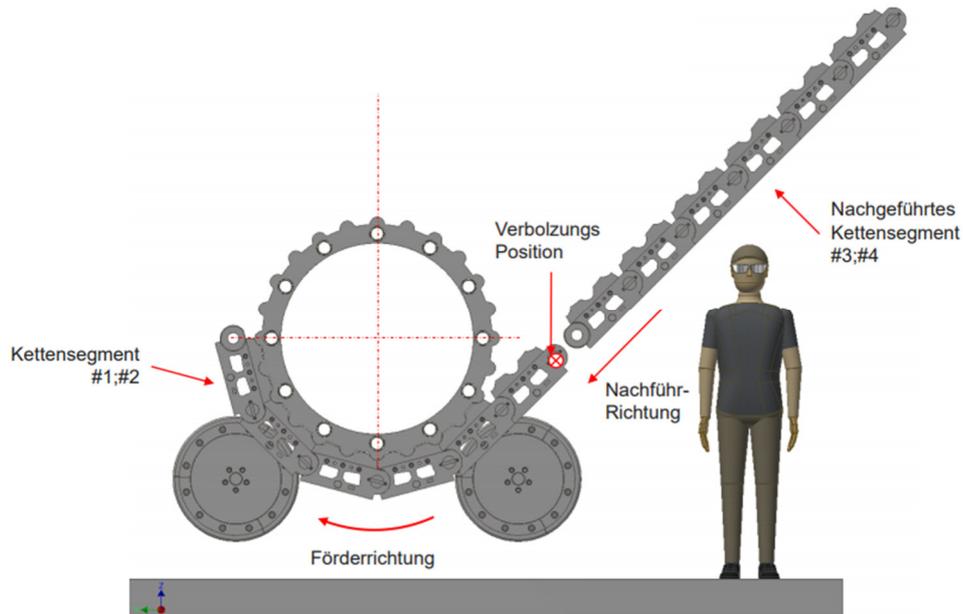


Bild 7: Montage der Kettenstränge

3.5 Umlenkung

Ein weiterer komplexer Bereich des SKBW's ist die untere Umlenkung. Diese wurde im Bereich, wie in Bild 8 dargestellt, näher betrachtet und mittels FEM durch Einstellen unterschiedlicher Parameter analysiert.

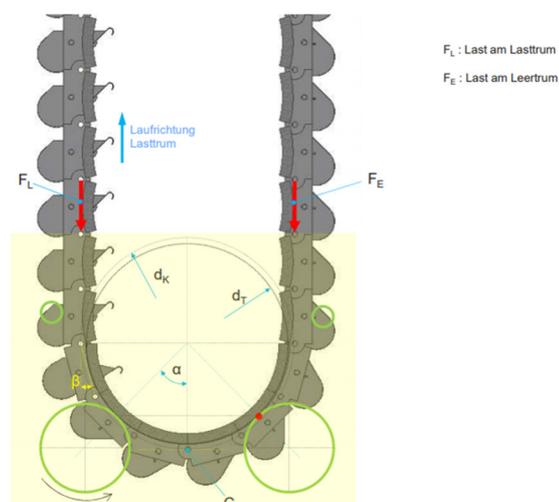


Bild 8: Bereich der unteren Umlenkung

Das Konzept der unteren Umlenkung besteht darin, dass die Kette über das Stützrad und das Antriebsrad umgelenkt und im optionalen Allrad-Betrieb über beide Wellen angetrieben wird. Die Synchronisierungs-Trommel (Druckstützrad), welche folgend noch näher beschrieben wird, stellt bei Haftverlust an den Rädern die Synchronisierung der beiden Kettenstränge über Nocken-Mulden-Kontakte her. Das verfolgte Hybridkonzept basiert auf dem Kontakt der Kettenglieder untereinander und dem Kontakt der Mulde der Kettenglieder und den Nocken der Synchronisierungs-Trommel. Zur Sicherstellung eines ruhigen Kettenlaufs werden im Bereich der unteren Umlenkung zusätzliche Stützelemente vorgesehen.

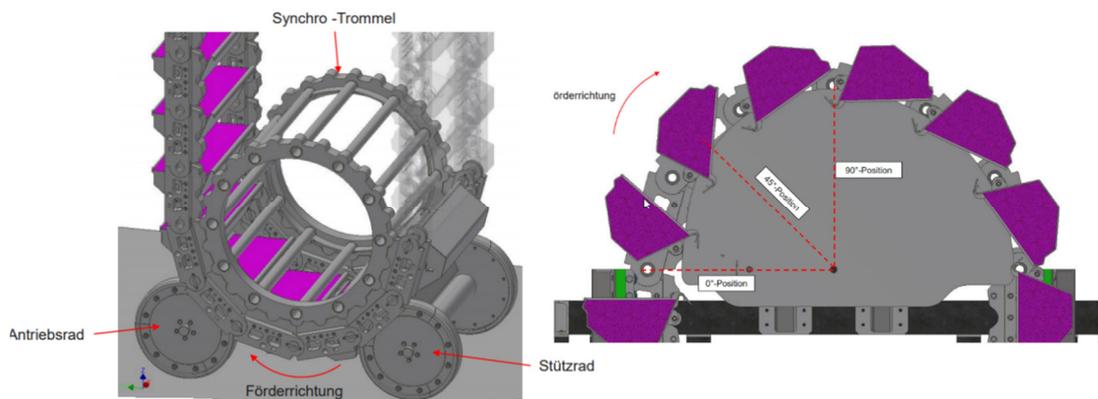


Bild 9: Konzept der unteren und der oberen Umlenkung

Das Druckstützrad wurde innerhalb der Entwicklung einem Festigkeitsnachweis bei Traktionsverlust auf einer Seite unterzogen. Die resultierenden Ergebnisse legen die Verformung und die Spannungen innerhalb dar. Unter Prüfung standen außerdem auch die Ermüdungsfestigkeit sowie eine Betrachtung der Schweißverbindungen.

Das Konzept der oberen Umlenkung besteht darin, eine Becherneigung durch den Endanschlag einzuleiten und durch weiteren Verlauf eines Kontakts der Becherrolle mit der Konturscheibe vorzugeben. Die Konturscheibe ist ausgerichtet für eine frühe Entleerung der Becher im Bereich von 45° bis 90° . Über den Bereich von 90° hinaus wird der Becher durch den Endanschlag in die für den Leertrum notwendige, vertikale Position geführt (Bild 9)

Die Synchronisierung der Kettenstränge geschieht einerseits über die Trommel in der unteren Umlenkung und andererseits über das Verhaken der Becher untereinander im Leertrum. Die Synchronisierung wird aufgrund der Nähe zum Ursprung der Asynchronität (Schlupf der Antriebsräder), der deutlich engeren möglichen Toleranzen und der höheren Steifigkeit der Kontaktflächen führend über die Trommel erzielt. Über das Einhängen der Becher im Leertrum kann auf einem großen Bereich eine gröbere Synchronisierung realisiert werden.

3.6 Gehäuse und Führung

Nach genauer Betrachtung vorangehender Ergebnisse wurde die Notwendigkeit der Kettenführung erkannt. Diese dient zur Stabilisierung der Kette, insbesondere im Lasttrum,

unabhängig vom Spiel in den Kettengliedergelenken, unabhängig von Fertigungstoleranzen der Kettenkomponenten sowie Schwingungen. Unter Stabilisierung der Kette ist die Beibehaltung der vertikalen Ausrichtung des Kettenstranges bzw. der vertikalen Ausrichtung der Schubkraft gemeint. Infolgedessen wurde eine stationäre Platzierung von Rollen und Gleitführungen vorgesehen (Bild 10).

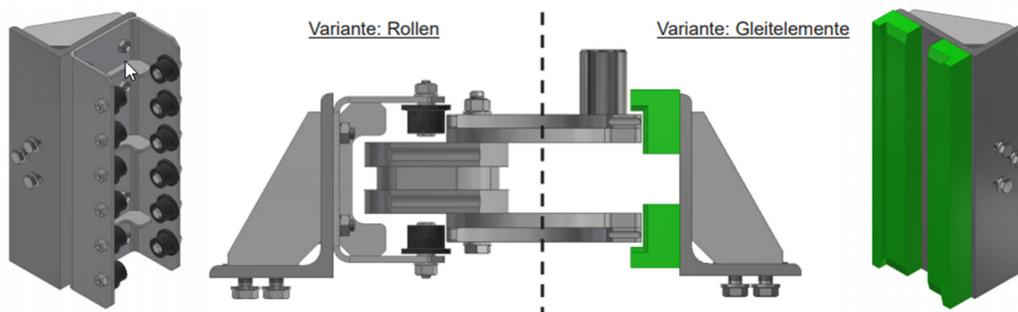


Bild 10: Führung der Kette

4 Aufbau und Erprobung einer Laboranlage

Nach der Fertigung der Einzelsysteme erfolgte die mechanische und elektrische Integration der Gesamtanlage auf dem Gelände der AUMUND Fördertechnik GmbH (Bild 11).



Bild 11: Aufgebaute Laboranlage

4.1 Erprobung des Gesamtsystems

Die Arbeitspakete „Erprobung der Mechanik“ und „Revision der Einzelsysteme und Umsetzung im Technikum“ wurden zeitparallel bearbeitet. Dadurch konnten die Erkenntnisse aus der Erprobung unmittelbar in die Revision einfließen und erneut validiert werden.

Anschließend wurde das Führungskonzept der Kette untersucht. Die zunächst eingesetzten Gleitkufen zeigten aufgrund der Materialpaarung mit der Kette eine zu hohe statische Reibung. Der Umbau auf Rollenführungen führte zu einer signifikanten Reduktion der Reibkräfte und ermöglichte einen Betrieb unter maximaler Drehzahl. Zudem konnte die Anzahl der benötigten Führungen reduziert werden, da der Kettenstrang auch ohne Führungen vertikal verläuft.

In einem weiteren Schritt wurde die Synchronisation der Kettenstränge überprüft. In einem ersten Probelauf konnte bestätigt werden, dass das Zusammenspiel von Kettenstrang und Bechern ausreicht, um eine Synchronität der beiden Kettenstränge sicherzustellen.

4.2 Erprobung des Gesamtsystems mit Fördermaterial

Für die Erprobung des Gesamtsystems unter Lastbedingungen wurde ein Versuchsaufbau mit kontinuierlichem Materialumlauf konzipiert (Bild 12). Über einen einstellbaren Muschelschieber sollen verschiedene Förderszenarien realisiert werden, darunter sowohl kontinuierliche Förderung als auch diskontinuierliche Siloabzugsprozesse. Der Muschelschieber ermöglicht zudem eine gezielte Beeinflussung des Füllgrads der Becher. Diese Variabilität soll eine systematische Untersuchung des Förderverhaltens unter praxisnahen Bedingungen ermöglichen.



Bild 12: 3D-Modell des kontinuierlichen Materialumlaufs

Zusammenfassung

Bezogen auf die Umweltaspekte gibt es zwei Innovationsbereiche: die Einsparung von Energiebedarf im Förderprozess durch den geringeren Leistungsbedarf des Antriebs und der Absaugung sowie der geringere Materialbedarf in der Anlagenherstellung. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das vorrangige Ziel, eine neue Lösung für die Vertikalförderung von schweren Schüttgütern zu entwickeln um wesentlich geringere Energieverbräuche aufzuweisen, von AUMUND erfüllt wurde. Durch Betrachtung vieler Systeme im Hinblick auf Leistungsreduzierung bei gleicher Fördermenge, beispielsweise die Schüttgutaufgabe in Förderrichtung, können Energieverbräuche reduziert werden. Zudem wird die Umweltbelastung durch Staub minimiert, indem Lösungen gegen das Austreten entwickelt wurden.

Der Vorteil des Schubkettenbecherwerks gegenüber herkömmlichen Becherwerken ist, neben der Reduzierung des Energieverbrauchs, der niedrige Schwerpunkt, der eine verfahrenbare Ausführung vereinfacht. Zudem ermöglicht die Position des Antriebes, direkt am Becherwerksfuß, eine leicht zugängliche Montage und Wartung. Die schonende Fördergutaufnahme, abwurfartunabhängige Fördergeschwindigkeit und ein breites Spektrum an förderbaren Schüttgütern machen das Schubkettenbecherwerk sehr flexibel einsetzbar. Die erreichbaren Förderhöhen sind aufgrund der Kettenbauweise (Druck- statt Zugbelastung) größer als bei konventionellen Becherwerken zu realisieren.

Der Blick auf die Zukunft zeigt sich sehr erfolversprechend, da anhand der Prototypenerstellung und Einsatz in Pilotprojekten weitere Erkenntnisse erwartet werden, die eine industrielle Etablierung aufzeigen werden.

Quellenverzeichnis:

- [1] Neu, F.: Entwicklung funktionsrelevanter Maschinenkomponenten für den Materialumlauf in einem Schubkettenbecherwerk. Bachelorarbeit Hochschule Niederrhein, 2025, AUMUND-intern
- [2] Heine, T.: Entwicklung und Konstruktion eines Schubkettenglieds mit verringertem Eigengewicht unter Anwendung der Topologieoptimierung. Bachelorarbeit, Westfälische Hochschule, 2020, AUMUND-intern
- [3] Haensel, H., Binder, J., Gutelewitsch, A.: Entwicklungsunterstützung im Bereich eines neuartigen Schubkettenbecherwerkes. IAMT, 2022, AUMUND-intern
- [4] Haut, H.: Analyse einer Schubkette mittels MKS. Simertis, 2018, AUMUND-intern
- [5] Kisters, P.: Vordimensionierung eines Schubmodulbecherwerkes. 2019, AUMUND-intern

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

**Dynamische Analyse von Materialverhalten in
Schüttgutwendungen mittels LiDAR-Messtechnik**

Daniel Sopauschke



Daniel Sopauschke, M. Sc.

Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und –
automatisierung IFF

Sandtorstraße 22

39106 Magdeburg

Veröffentlichungsgenehmigung nicht erteilt.

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Simulation von Aufbereitungswerken mit NIAflow®

Rüdiger W. Heinrich



Dr.-Ing. Rüdiger W. Heinrich
HAVER NIAGARA GmbH
Robert-Bosch-Str. 6
48153 Münster

Simulation von Aufbereitungswerken mit NIAflow®

Die Simulation verfahrenstechnischer Anlagen ist eine große Hilfe, Werke profitabel zu betreiben, zu projektieren oder zu optimieren. Mit NIAflow® lässt sich ein „Digitaler Zwilling“ eines kompletten Werkes erstellen. Jedes Gerät darin wird mit seinen konkreten Einstellungen eingerichtet und hat denselben Effekt auf das Material wie in der Realität. So wird ein zuverlässiges Werkzeug bereitgestellt, um Produktionsvorhersagen zu treffen, Änderungen an Maschinen zu bewerten oder das ganze Werk zu optimieren. In verschiedenen Betriebsarten können Kosten-Nutzen-Analysen durchgeführt werden, um das Werk profitabel zu betreiben.

1 Berechnungsgrundlagen

1.1 NIAflow®-Objektmodell

Zur Simulation komplexer Aufbereitungswerke sind alle relevanten Maschinen und Geräte in einer der Realität nahekommenden Struktur abzubilden. Für NIAflow® ist der Oberbegriff eines Projektes ein Container, der eine beliebige Anzahl an Werken beinhaltet. Im Projekt werden grundlegende Daten zu den Projektanforderungen gepflegt, aber auch übergeordnete Prozessdaten und die allgemeine Kostenstruktur. Im Ergebnis einer Berechnung fasst das Projekt die Einzeldaten aller Werke wie Jahresproduktion und Betriebskosten zusammen.

Ein NIAflow® Werk ist nicht zwangsläufig ein komplettes Werk, sondern kann als Gliederungsstruktur eines Prozessabschnittes verstanden werden wie beispielsweise eine Vorbrechanlage. Werke können sich in ihrem Betriebsregime und ihrer geographischen Lage unterscheiden. In der Dokumentation werden die Ergebnisse gegliedert nach Werken ausgewiesen.

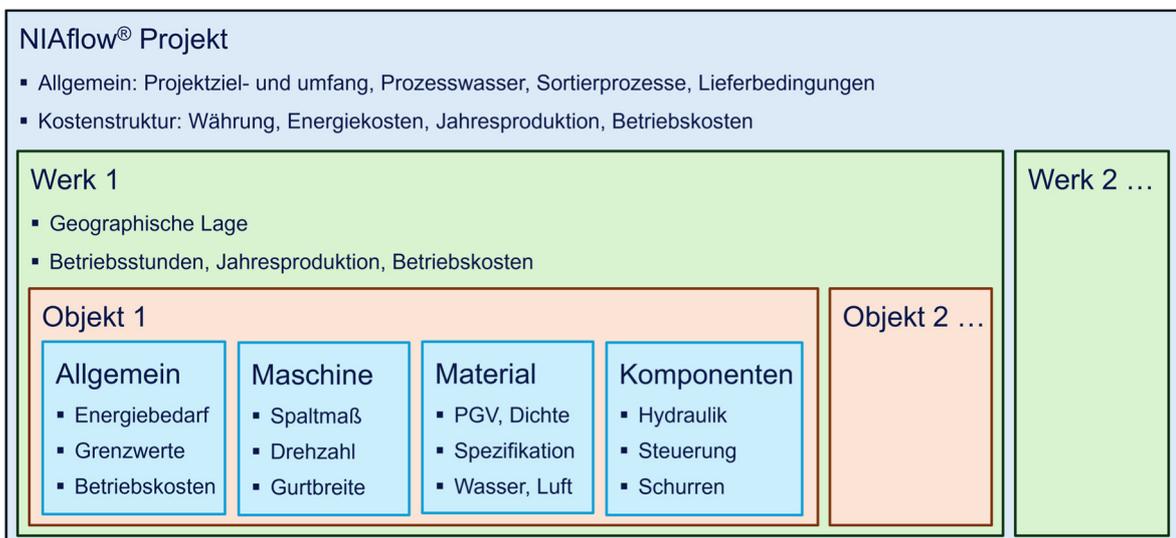


Bild 1: NIAflow® Objektmodell

Die kleinste Gliederungseinheit ist das NIAflow® Objekt. Innerhalb eines Werkes existieren eine beliebige Anzahl an Objekten, die untereinander durch Materialströme verknüpft sind. Dabei ist es unerheblich, ob verknüpfte Objekte im selben oder in unterschiedlichen Werken definiert sind (Bild 1).

Jedes Objekt enthält allgemeine Informationen wie Name, Position im Fließbild oder

Energiebedarf. In diesem Bereich werden vom Programm zu überwachende Grenzwerte definiert. Anstrichspezifikation und die Hauptabmessungen werden ebenfalls hier definiert.

Der maschinenspezifische Bereich eines Objektes speichert Einstellungen, die nur für den jeweiligen Maschinentyp zutreffen. Dies können das gewählte Modell zum Materialhandling in Speicherobjekten sein oder die Luftmenge einer Stauberfassungsstelle.

Sofern das Objekt Material führt, werden Daten des Aufgabematerials und der erzeugten Produkte ebenfalls im Objekt gespeichert.

Der Komponentenbereich eines Objektes enthält Zubehör, das keine verfahrenstechnische Relevanz besitzt, aber dennoch für das Funktionieren der Maschine erforderlich ist. Diese Komponenten verursachen Investitionskosten, verbrauchen unter Umständen Energie und müssen in den Zusammenfassungen der Anlagendokumentation aufgeführt werden.

1.2 Geräteklassen

NIAflow[®] Objekte lassen sich anhand ihrer Wirkung auf das Material grob in die folgende Übersicht einordnen (Bild 2).

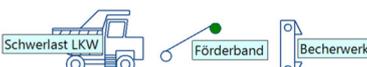
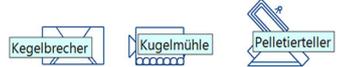
Geräteklasse	Einwirkung auf das Material		Beispiel
	Einfluss	Berechnungsansatz	
Transport	Kein Einfluss	Nicht erforderlich.	
Lagern	Massenströme (Puffer), Wasser, Temperatur	Fixierter Ausgang, dynamischer Ausgang, Anpassung an die Betriebsstunden des Zielwerkes.	
Verteilen, Mischen	Massenströme	Prozentuale, tonnage- oder volumenbasierte Massenstromaufteilung.	
Zerkleinern, Agglomerieren	Partikelgrößenverteilung (PGV)	Berechnete oder benutzerdefinierte PGV mit dynamischer Produktpassung (verhindert größeres Produkt als Aufgabematerial beim Brecher).	
Klassieren	Massenströme und PGV	Trennfunktion überlagert PGV des Aufgabematerials. Trennfunktion für Siebe vollautomatisch $T=f(\text{Siebbelag, Öffnung...})$, andere benutzerdefiniert.	
Sortieren	Sortiermerkmale in PGV-Fractionen, PGV, Massenströme	Benutzerdefinierte Trennfunktion überlagert Sortiermerkmale in den Fractionen der PGV des Aufgabematerials.	

Bild 2: Geräteklassen

Mit jeder der gezeigten Gruppen steigt der Einfluss auf den Materialfluss in Tonnage und/oder Zusammensetzung. Während reine Transportgeräte wie ein Schwerlast-LKW das Material kaum beeinflussen, findet man bei den Sortiergeräten eine massive Veränderung des Materials in der Anreicherung nach der jeweiligen Sortiereigenschaft, aber dadurch auch in der Partikelgrößenverteilung (PGV) und der Tonnage der Produkte.

Beim Durchlauf jeder Berechnung wird das ankommende Material entsprechend der im Bild 2 gezeigten Berechnungsansätze verarbeitet. Das resultierende Produkt wird am Ausgang des Objektes bereitgestellt.

Das Material hat ebenfalls eine Wirkung auf die Maschine. Diese wird über die Einhaltung

von Grenzwerten und Spezifikationen umgesetzt. Werden diese über- oder unterschritten, gibt es Warnhinweise, anhand derer die Maschine neu konfiguriert werden kann.

1.2.1 Transport

Für die Abbildung eines Aufbereitungswerkes in der Simulation spielen die Transportgeräte eine untergeordnete Rolle. Sie beeinflussen den Materialfluss nicht und sollten auch keinen Einfluss auf die Zusammensetzung des Materials haben.

Da der Materialtransport aber unabdingbar ist, treten diese Maschinen als Kostenverursacher in Erscheinung und müssen natürlich in der Gesamtbilanz berücksichtigt werden. Für Transportgeräte wie Gurtförderer oder Förderrinnen stellt NIAflow® Berechnungsmodule bereit, die die Bemessung dieser Geräte über die Wechselwirkung mit dem Material ermöglichen.

Vom Programm werden derzeit die erforderlichen Parameter von Gurtförderern bestimmt, wie Gurtbreite und Leistungsbedarf. Beim Leistungsbedarf wird zwischen Leerlaufleistung und durchsatzabhängiger Förderleistung unterschieden.

Weiter werden maximale Tonnage und Volumen mit Grenzwerten überwacht und entsprechende Fehlermeldungen angezeigt, wenn diese überschritten sind. Die Förderbarkeit wird anhand der Materialzusammensetzung in groben Grenzen bewertet, um zum Beispiel den Transport von Suspensionen auf Förderbändern zu verhindern.

1.2.2 Lagern

Lagerobjekte definieren mit ihrem Output den Gesamtdurchsatz der Anlage oder einzelner Anlagenteile. Die Ausgabeleistung kann der Materialaufgabe entsprechen, vom Anwender festgelegt, oder automatisch über die Jahresproduktion an die Betriebsstunden des Zielwerkes angepasst werden.

Wie andere NIAflow® Objekte kann jedes Lager beliebig viele unterschiedliche Partikelgrößenverteilungen als ‚alternative Produkte‘ speichern. Diese können gemeinsam mit der Ausgabeleistung bestimmten Betriebsarten zugeordnet werden, die es ermöglichen, das Anlagenmodell mit unterschiedlichen Durchsätzen und Massenströmen zu berechnen.

Eine besondere Rolle kommt Lagerelementen bei der Kosten-Nutzen-Analyse zu. Der für das jeweilige Material in einem Lager festgelegte Preis wird zur Analyse des Gesamtprozesses verwendet, sofern das Lager ein Einkaufsmaterial oder ein Verkaufsprodukt darstellt.

1.2.3 Verteilen, Mischen

Geräte dieser Gruppe steuern den Materialfluss durch die Anlage. Typische Vertreter sind Klappen und reversierbare Förderbänder. Auch diese Einstellungen können in Betriebsarten verwendet werden. Die Einstellung von Verteilobjekten kann prozentual oder nach festem Ausgang erfolgen. Für Flüssigkeiten gibt es einen durchflussbasierten Rohrverteiler.

Obwohl in der NIAflow® Objektsammlung ein extra Mischer existiert, werden Mischprozesse

für alle materialführenden Objekte automatisch ausgelöst, wenn an einem Objekt mehr als eine Materiallinie anliegt, unabhängig von deren Typ (Feststoff, Trübe, Wasser oder Luft).

1.2.4 Zerkleinern, Agglomerieren

Zerkleinerungsmaschinen wie Brecher und Mühlen beeinflussen die PGV des Produktes auf eine charakteristische Art und Weise.

Im automatischen Modus kann der Anwender eine PGV unter Angabe des Spaltmaßes des Brechers oder dem D50 des Agglomerats vom Programm bestimmen lassen. Dabei verwendet NIAflow® Algorithmen, die das Beanspruchungssystem und das typische Verhalten der gewählten Maschine berücksichtigen.

Wie die Lagerobjekte können auch Zerkleinerungsmaschinen unterschiedliche PGV speichern. Im Bild 3 gezeigt, sind eine Reihe alternativer Brechprodukte wie sie an einem Brecher bei unterschiedlichen Spaltmaßen zu erwarten sind.

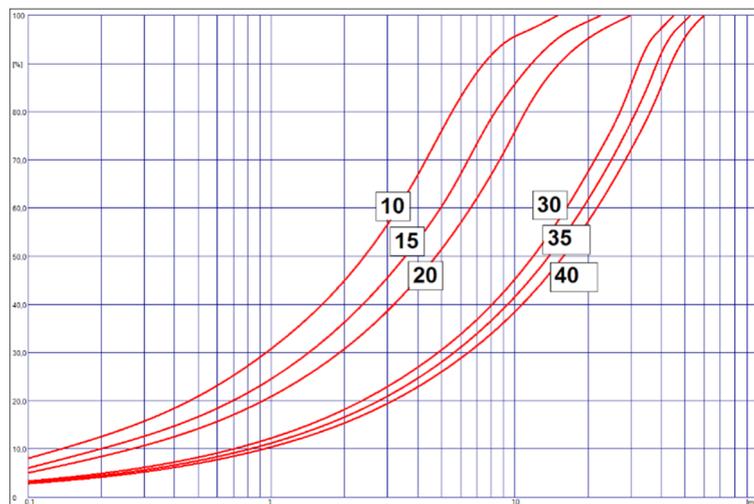


Bild 3: Alternative Produkt-PGV

Die PGV wurden von NIAflow® im automatischen Log-Log Modus für einen Prallbrecher ermittelt. Eines dieser Produkte kann als aktives Produkt gewählt werden. Alle Produkte lassen sich wiederum bestimmten Betriebsarten zuordnen und für diese automatisch aktivieren.

Agglomeratoren verwenden den gleichen Algorithmus wie Zerkleinerungsmaschinen, nur ist die Produkt PGV größer als die das Aufgabematerials.

1.2.5 Klassieren

Ein großer Teil der Klassierprozesse in der Aufbereitungstechnik wird mit Siebmaschinen realisiert. Man kennt die Siebmaschine am Ende einer Prozesskette zur klassischen Trennung eines Aufgabematerials in verschiedene verkaufsfertige Produktfraktionen, wie beispielsweise Kiese, Sande oder Splitte. Üblich sind auch Siebmaschinen in Konfigurationen mit Brechern. Hier erfolgt die Abtrennung von Feinmaterial, das bereits kleiner als das Brechprodukt ist.

Die Bandbreite möglicher Trennschnitte, die von Vibrationssiebmaschinen realisiert werden, reicht dabei von Feinstabsiebungen im 100 µm-Bereich bis zu schweren

Absiebungen vor Brechern in Größenordnungen von 300 mm bei maximalen Aufgabestückgrößen von 1500 mm. Das folgende Bild 4 zeigt eine kleine Auswahl verschiedener Siebmaschinen.

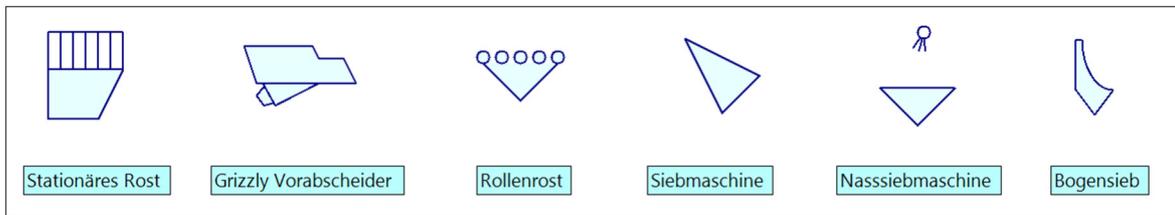


Bild 4: Siebmaschinen

Mit jedem Durchlauf der Berechnung werden die Parameter des ankommenden Materials mit denen der Maschine verarbeitet. Dabei bestimmt NIAflow® aus den Parametern des Aufgabematerials und denen der Maschine vollautomatisch eine interne Trennfunktion, die das aufgegebene Material an den einzelnen Decks in Produkte zerlegt.

Dieses Verfahren liefert zuverlässige praxisnahe Partikelgrößenverteilungen einschließlich Fehlkornanteilen. Bei der Auswahl der Maschineneinstellung, wie Siebfläche und Siebbelag, aktualisiert NIAflow® seine Produktberechnung, so dass man beurteilen kann, ob die Produkte innerhalb der Spezifikationsgrenzen bleiben.

Das unten gezeigte Beispiel illustriert diese Wechselwirkung zwischen Maschine und Material (Bild 5).

Die Maschine erhält ein vorabgesiebttes Produkt 0/11 von einem vorgelagerten Sieb. Es sollen Edelsplitt nach DIN EN 13242 hergestellt werden. Die berechnete Auslastung der Maschine beträgt lediglich 65%. Auch Grenzwerte wie maximale Stückgröße und Schichthöhen auf den Decks der Maschine werden eingehalten. Die Einwirkung des Materials auf die Maschine ist daher unkritisch.

Blickt man aber auf die von der Maschine erzeugten Produkte, wird das Ziel verfehlt, da im 5/8 zu viel Fehlunterkorn entsteht und damit die Spezifikation nicht gehalten wird. Es müssen geeignete Maßnahmen wie Änderungen am Siebbelag ergriffen werden, um dieses Ziel zu erreichen.

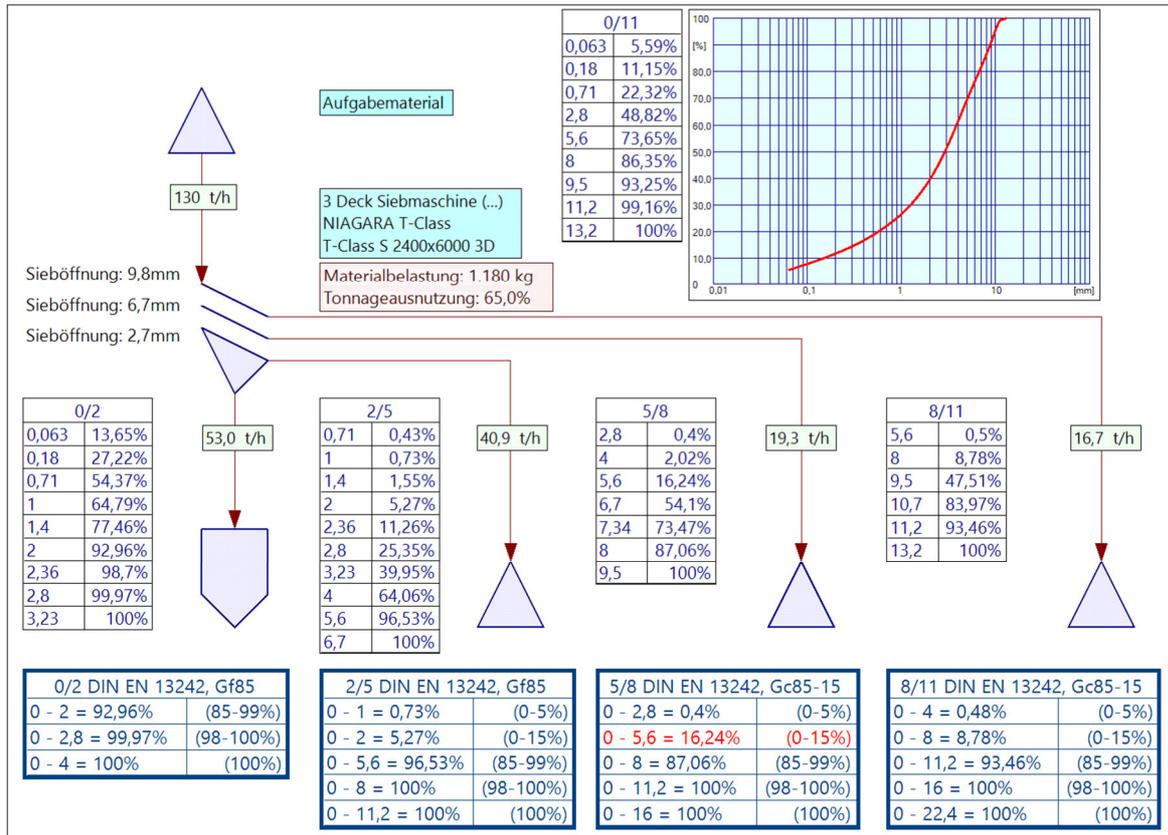


Bild 5: Wechselwirkung Maschine - Material

Es ist daher bei der Modellierung des Digitalen Zwillings unerlässlich, alle Grenzwerte aus Sicht der Maschine und des Materials zu erfassen.

1.2.6 Sortieren

Sortierprozesse sind sehr komplex. Das Sortiermerkmal kann in verschiedenen Fraktionen des Aufgabematerials unterschiedlich ausgeprägt sein. Deshalb wird jede einzelne Fraktion für sich berechnet. Im Ergebnis der Sortierung wird sich das Sortiermerkmal in einem Produkt an- und im anderen abreichern. Sind die Merkmale in den Fraktionen ungleich verteilt, ergibt sich zudem eine Änderung der PGV.

Im Bild 6 gezeigt, ist ein stark vereinfachter Farbsortierprozess. Es wird von einer gleichmäßigen Farbverteilung ausgegangen (z. B. von weiß = 0 nach rot = 1).

Eine vom Benutzer zu definierende Trennfunktion wird den Merkmalen jeder Fraktion überlagert. Im Ergebnis entsteht ein leicht farbiges Produkt (links) und ein stark farbiges (rechts).

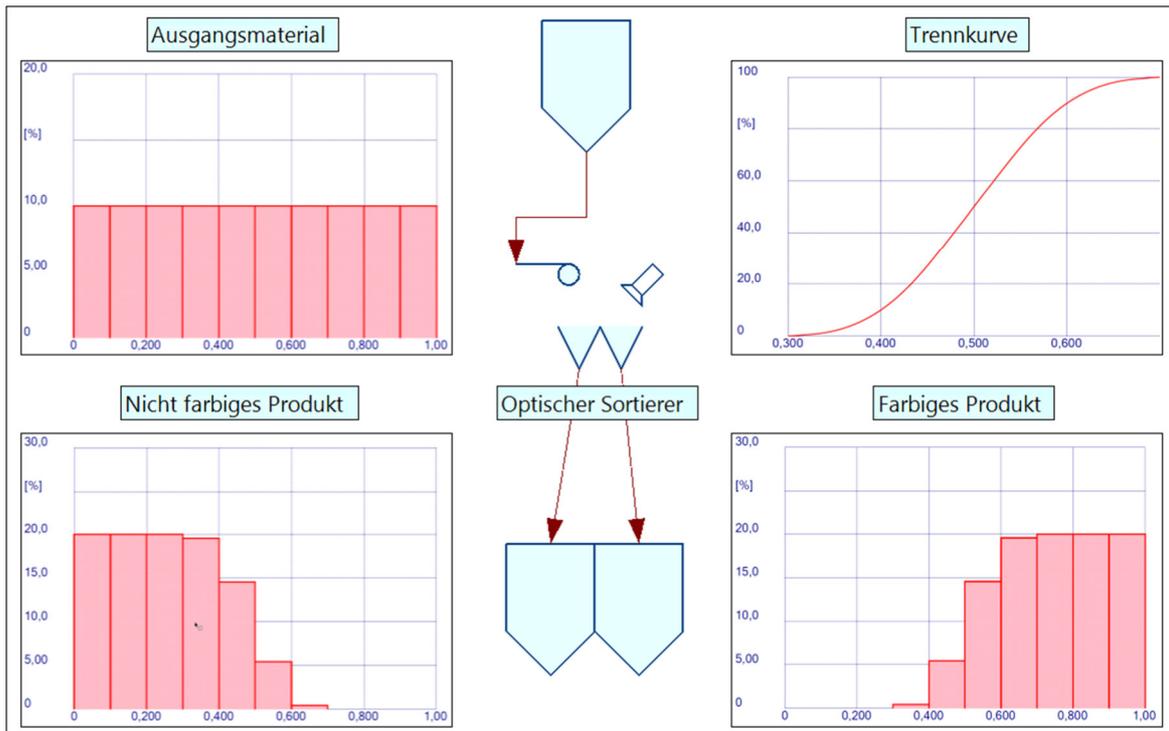


Bild 6: Farbverteilung einer PGV-Fraktion am Sortierer

2 Modellierung von Aufbereitungswerken

2.1 Der Digitale Zwilling

Die Grundlage der Simulation eines Werkes ist dessen digitales Abbild.

„Ein **Digitaler Zwilling** ist eine digitale Repräsentanz eines materiellen oder immateriellen Objekts aus der realen Welt. Es ist unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt bereits existiert oder zukünftig erst existieren wird. Digitale Zwillinge ermöglichen einen übergreifenden Datenaustausch. Sie sind aber mehr als reine Daten und können auch Algorithmen enthalten, die ihr Gegenstück aus der realen Welt und dessen Eigenschaften und Verhalten beschreiben.“ [1]

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen NIAflow® Objekte werden entsprechend der Struktur des bereits bestehenden oder des geplanten Werkes miteinander durch Stoffströme verknüpft und in Einzelwerken organisiert.

2.2 Werke

Jedes NIAflow® Projekt kann beliebig viele Werke enthalten, die ihrerseits aus miteinander durch Linien verknüpften Objekten bestehen, die den Materialfluss darstellen. Werke sind durch eine Reihe von Merkmalen definiert, deren wichtigstes das Betriebsregime ist. Die Festlegung der

- Arbeitsstunden pro Tag
- Arbeitstage pro Woche
- Anlagenverfügbarkeit
- Stillstandszeiten

liefert die Basis zur Berechnung der Jahresproduktion und der Kosten-Nutzen-Analyse.

Weitere werkspezifische Eigenschaften sind Kosten für die Infrastruktur, klimatische Bedingungen oder die Anstrichspezifikation für Maschinen und Geräte.

2.3 Beispiel: Bauschutttaufbereitung

Im Folgenden soll ein Beispiel zur Bauschutttaufbereitung die Modellierung von Projekten mit NIAflow[®] illustrieren. Das Projekt enthält neben Brech- und Siebprozessen eine optische Sortierung sowie einen Brauchwasserkreislauf (Bild 7).

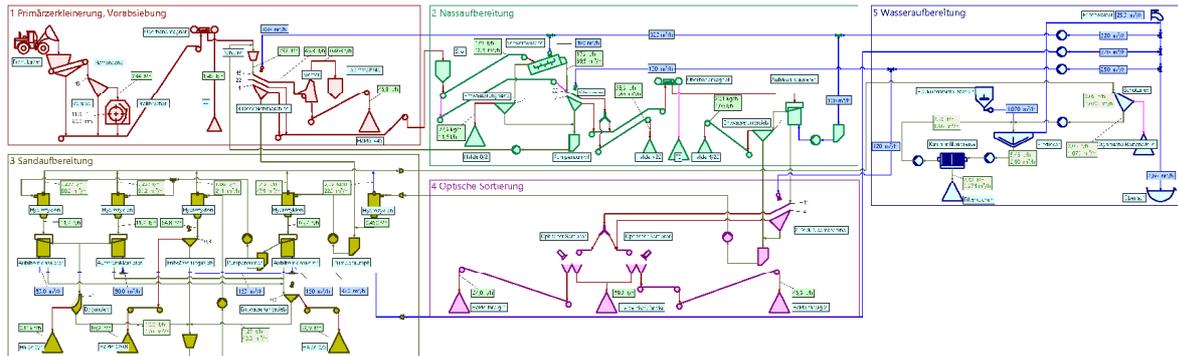


Bild 7: Beispielprojekt Bauschutttaufbereitung

2.3.1 Primärzerkleinerung

In der Primärzerkleinerung findet neben Brech- und Siebprozessen die Abscheidung von Armierungseisen und Leichtstoffen statt (Bild 8). Über die Einlaufschurre vor der Siebmaschine wird Feingut aus der Sandaufbereitung zurückgepumpt. Das Grobprodukt > 45 verbleibt im Werk, die anderen Produkte werden in der Nass- bzw. der Sandaufbereitung weiterverarbeitet.

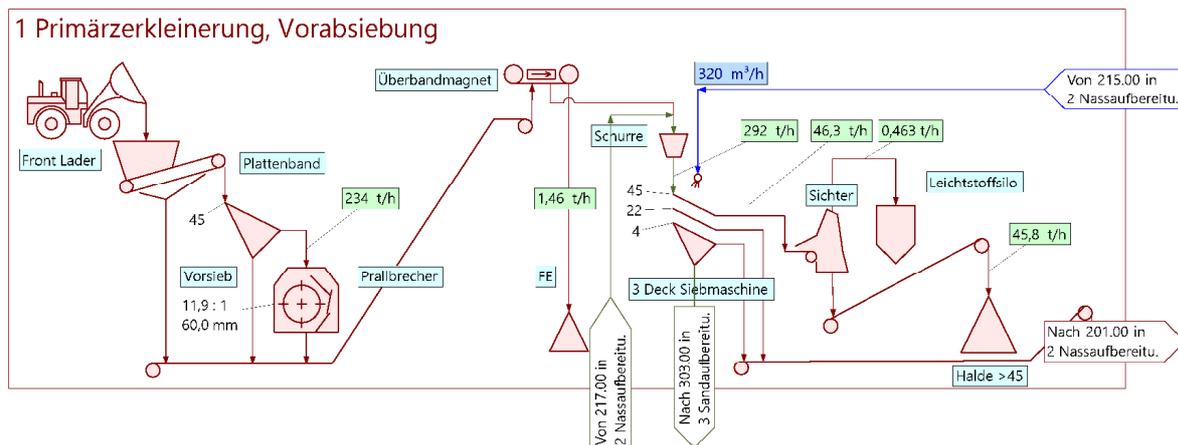


Bild 8: Bauschutttaufbereitung – Primärzerkleinerung

2.3.2 Nassaufbereitung

Das Material 4-45 wird im folgenden Schritt in die Nassaufbereitung gefördert. Dort erfolgt die weitere Reinigung des Produktes. Das Grobprodukt des Aufstromklassierers wie auch das Feingut der Siebmaschine wird zur „Optischen Sortierung“ gefördert (Bild 9). Letzteres wird mit dem dort anfallenden Feingut vereint und zur Sandaufbereitung gepumpt.

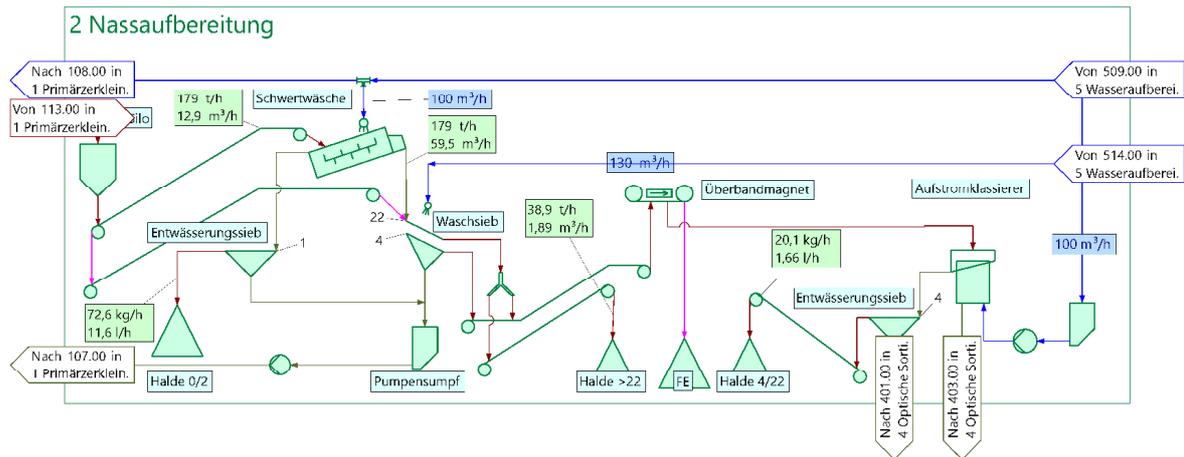


Bild 9: Bauschutttaufbereitung – Nassaufbereitung

2.3.3 Sandaufbereitung

Die Sandaufbereitung bekommt das Feinmaterial aus den bisher gezeigten Werken und aus der Optischen Sortierung. Über eine Serie von Hydrozyklonen und Aufstromklassierern werden Sande und Feinsande hergestellt (Bild 10). NIAflow® arbeitet bei diesen Geräten mit benutzerdefinierten Trennkurven.

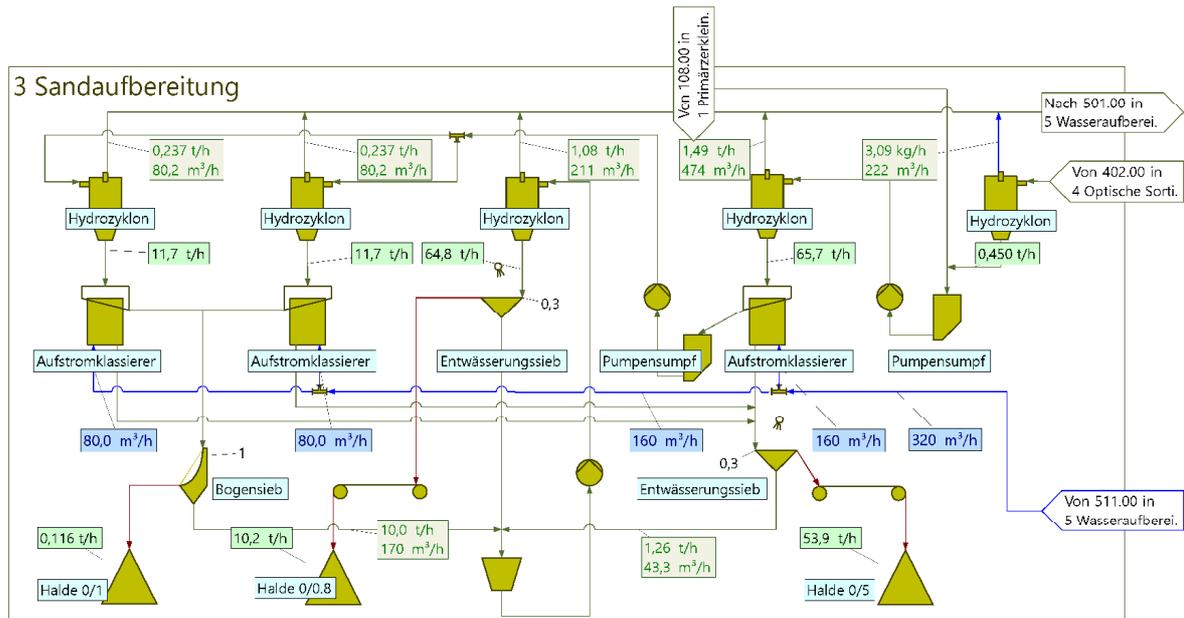


Bild 10: Bauschutttaufbereitung – Sandaufbereitung

2.3.4 Optische Sortierung

Das von der Nassaufbereitung kommende Grobgut wird hier nach farbigen Merkmalen sortiert. Sand < 4 mm wird der Sandaufbereitung zugeführt (Bild 11).

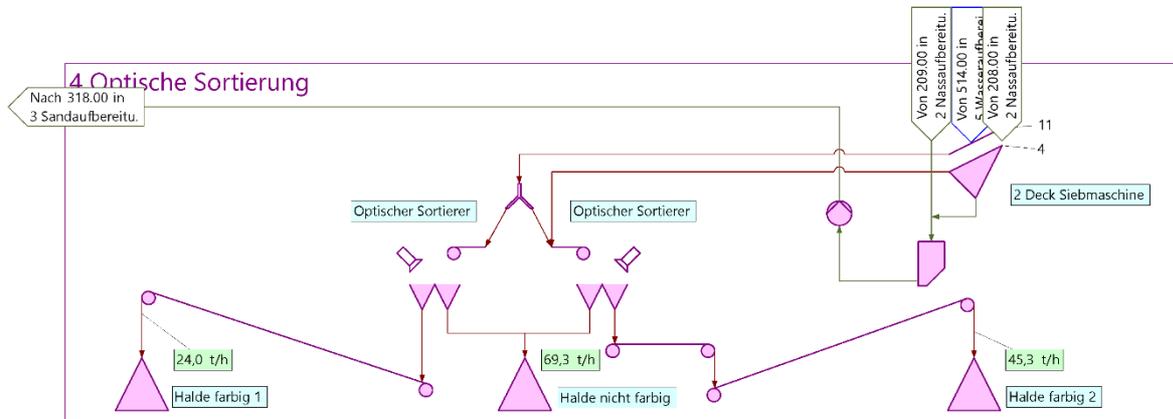


Bild 11: Bauschutttaufbereitung – Optische Sortierung

2.3.5 Wasseraufbereitung

Den letzten Werksteil im Beispielprojekt bildet der teilgeschlossene Wasserkreislauf. Dieses Werk versorgt alle anderen mit Brauchwasser. Der Frischwasserverbrauch beträgt ca. 25 m³/h und gleicht den Verlust durch den Wassergehalt in den Produkten aus.

Wichtig ist, darauf zu achten, dass der Wasserkreislauf nicht voll geschlossen sein sollte, da das zugeführte Frischwasser nie genau der Summe der Produktwassergehalte entspricht. Ohne einen Überlauf wie im Bild 12 dargestellt, würde sich das Wasser im Kreislauf anreichern, den Prozess aufschaukeln und unberechenbar machen.

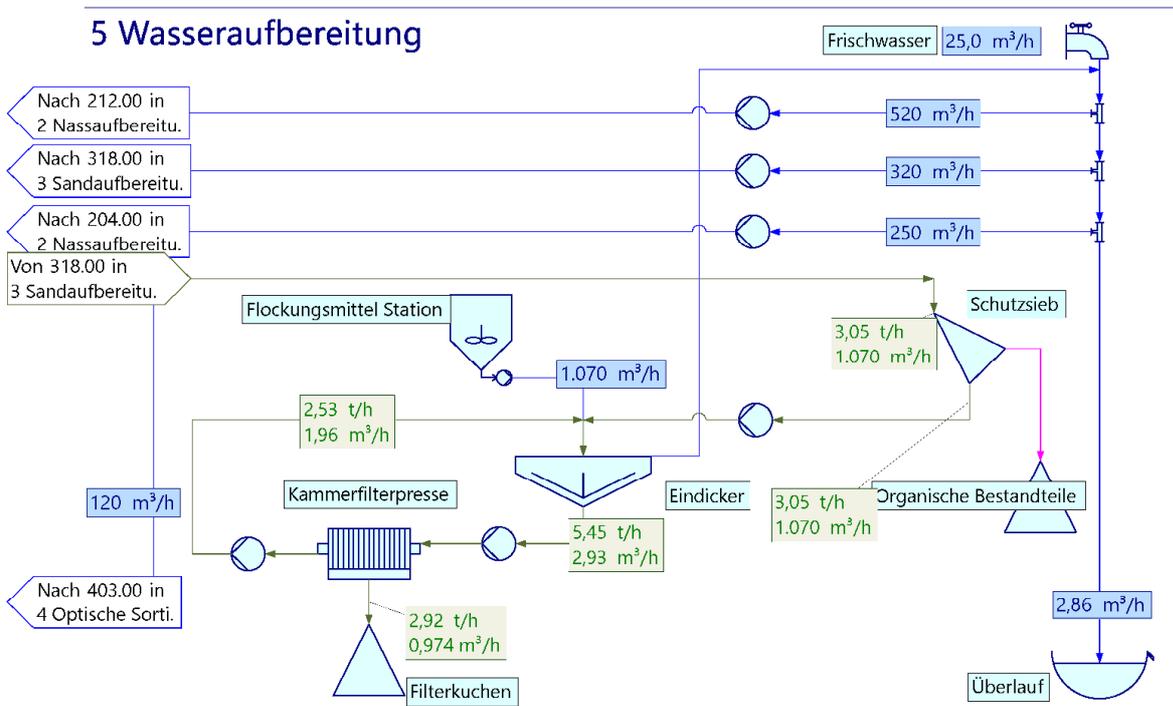


Bild 12: Bauschutttaufbereitung – Wasseraufbereitung

3 Betriebsarten

3.1 Grundlagen

Mit „Betriebsarten“ lassen sich Anlagenzustände aufzeichnen und auf Knopfdruck wieder herstellen. Hierbei werden folgende Einstellungen verwendet:

- Lagerobjekte
 - Tonnage am Ausgang
 - PGV des aktiven Produktes
- Transportobjekte
 - Splittereinstellungen
 - Aktiver Ausgang am reversierbaren Förderband
- Brecher, Agglomeratoren
 - Aktive Produkt PGV
- Siebe
 - Siebbeläge

Das Umschalten zwischen verschiedenen Betriebszuständen ermöglicht es, aus einer einheitlichen Datenbasis alle Zustände des Werkes abzuleiten und zu bewerten. Betriebszustände sind daher auch eine der Grundlagen zur kommerziellen Bewertung.

In der Praxis wird der Wechsel zwischen verschiedenen Betriebsarten durch das Einstellen von Verteilerschurren und reversierbaren Bändern und über die Steuerung der Aufgabeleistung bewerkstelligt. Üblich ist auch die Verstellung der Brecher, um das Produkt gezielt zu beeinflussen. Komplexere Produktwechsel können auch die Umbelegung von Siebmaschinen erfordern.

Diese Möglichkeiten bietet NIAflow® ebenfalls. Ebenso lassen sich Verschleißzustände an den Maschinen über Betriebsarten abbilden.

3.2 Beispiel: Schotterwerk Mustermann

Anhand eines stark vereinfachten Werkes zur Herstellung von Edelsplitt soll das Verfahren erläutert werden (Bild 13).

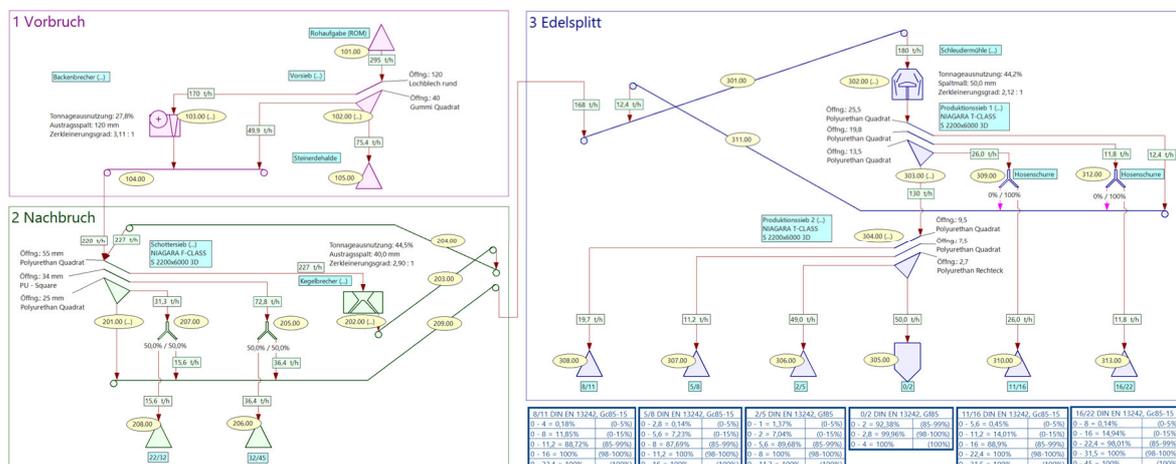


Bild 13: Schotterwerk Mustermann

Im Folgenden sind drei Betriebsarten definiert, die hinsichtlich ihres Ertrages bewertet werden sollen (Bild 14).

NIAflow® Objekt		Parameter	Betriebsart		
Position	Name		Edelsplitt	Rückbruch	Mischbetrieb
101.00	Rohaufgabe (ROM)	Ausgang	295 t/h	255 t/h	285 t/h
309.00	Hosenschurre	Verteileranteile	0% / 100%	100% / 0%	50% / 50%
312.00	Hosenschurre	Verteileranteile	0% / 100%	100% / 0%	50% / 50%
304.00	Produktionssieb 2, Trennschnitt 8 mm	Sieböffnung	9,5 mm	10 mm	9,5 mm
		Offene Fläche	30,70%	31,20%	30,70%
304.00	Produktionssieb 2, Trennschnitt 5,6	Sieböffnung	7,5 mm	7 mm	7,5 mm
		Offene Fläche	27,90%	27,00%	27,90%
302.00	Vertikal- schleudermühle	Produkt PGV	PGV Edelsplitt	PGV Rückbruch	PGV Mischbetrieb

Bild 14: Betriebsarten

Alle drei Betriebsarten wurden unter der Maßgabe berechnet, dass die in Bild 13 gezeigten Produktspezifikationen eingehalten werden.

3.3 Betriebsart „Edelsplitt“

Es wird angenommen, dass alle Produkte so verkauft werden können, wie sie anfallen. Die Rohaufgabeleistung in dieser Betriebsart kann auf 295 t/h gesteigert werden, bevor das Produkt 16/22 zu viel Fehlunterkorn enthält.

3.4 Betriebsart „Rückbruch“

In dieser Betriebsart wird angenommen, dass kein Markt für 11/16 und 16/22 existiert, so dass diese an sich schon fertigen Produkte zu feineren Spezifikationen weiterverarbeitet werden müssen. Die beiden Schurren fördern das gesamte Produkt >11 zurück auf die Schleudermühle. Die geänderte Materialaufgabe hat zur Folge, dass die Mühle eine etwas andere Produkt-PGV liefert, was ebenfalls in der Betriebsart gespeichert ist. Zusätzlich muss Produktionssieb 2 umbelegt werden, um die Spezifikationen zu halten.

Die Rohaufgabeleistung kann nur bis auf 255 t/h gesteigert werden, bevor Produkt 5/8 zu viel Fehlunterkorn enthält. Bild 15 illustriert das Verfahren.

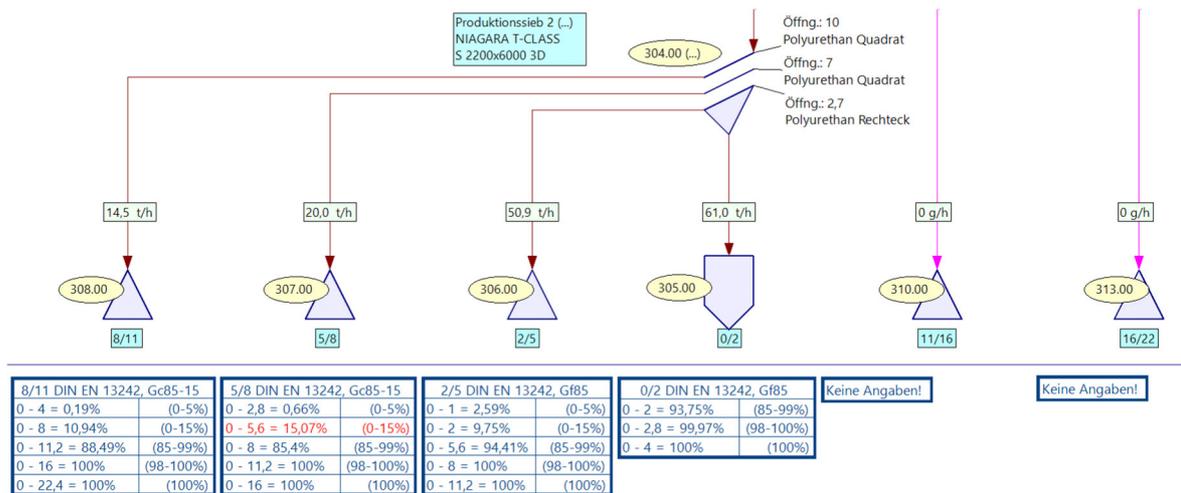


Bild 15: Produkt 5/8 nicht mehr normgerecht

3.5 Betriebsart „Mischbetrieb“

In dieser Betriebsart werden die groben Produkte hälftig nachgebrochen und verkauft. Die Maximalleistung von 285 t/h Rohaufgabe liegt etwas unter der Betriebsart „Edelsplitt“.

4 Kosten-Nutzen-Analyse

4.1 NIAflow®-Kostenmodell

Am Ende aller Bemühungen soll mit einem Aufbereitungswerk ein wirtschaftlicher Nutzen erzielt werden. NIAflow® führt die anfallenden Kosten und die verfahrenstechnischen Abläufe zusammen und ermöglicht so die Kosten-Nutzen-Analyse für jede Betriebsart.

Alle auftretenden Kosten werden auf Maschinen- und Werksebene eingepflegt und können so dem Erlös der Produkte gegenübergestellt werden. Dabei werden auf der Werksebene erfasst:

- Währung
- Infrastrukturkosten mit Abschreibungszeitraum
- Laufende jährliche Kosten
- Energie- und Dieselkosten je Verbrauchseinheit

Auf der Maschinenebene werden erfasst:

- Anschaffungspreis mit Abschreibungszeitraum
- Elektrischer Leistungsbedarf im Leerlauf und unter Last
- Dieselverbrauch im Leerlauf und unter Last
- Betriebskosten pro Stunde
- Verschleißkosten pro Tonne Durchsatz
- Wartungskosten pro Wartungsintervall

Um die Kosten dem Erlös gegenüberzustellen, müssen alle Produkte mit ihrem Marktpreis versehen werden. Für NIAflow® zählt ein Material als Produkt für ein Werk, wenn es:

- das Werk verlässt oder
- in einem Lagerobjekt des Werkes endet, das keine Ausgangslinie hat.

Untenstehendes Bild 16 verdeutlicht den Ansatz.

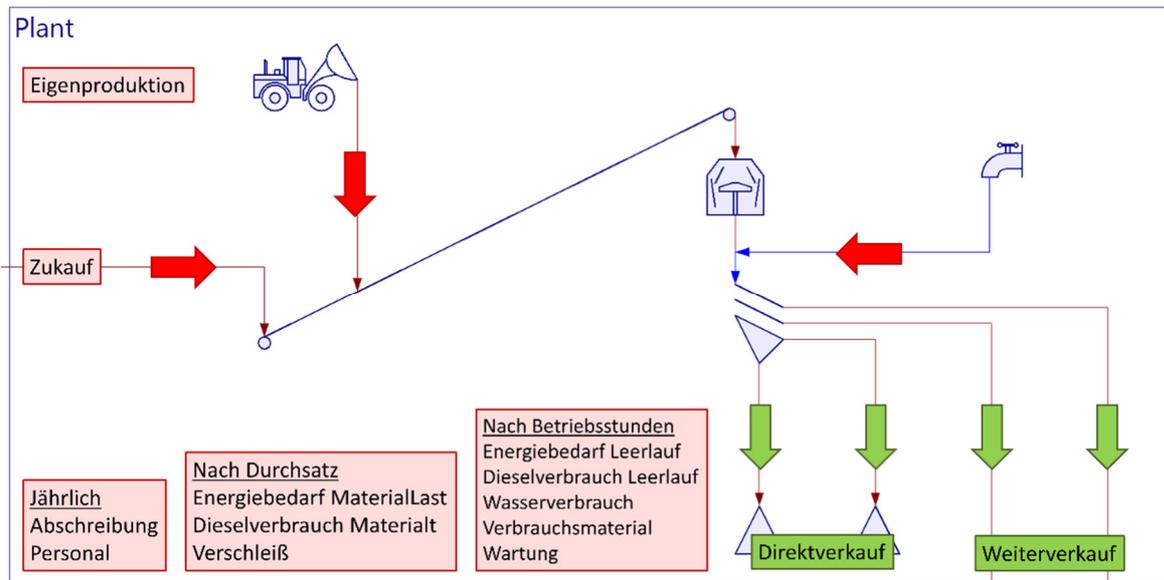


Bild 16: NIAflow® Kostenmodell

Das Produkt wird zum Verkaufsprodukt, wenn ein Preis definiert wurde. Es lässt sich außerdem einstellen, ob das Material nass oder trocken vermarktet wird.

4.2 Datenerfassung

Neben Investitionskosten und zugehörigen Abschreibungszeiträumen können in NIAflow® durchsatzabhängige und -unabhängige Betriebskosten erfasst werden (Bild 17).

Zu den durchsatzabhängigen Kosten gehören Verschleißkosten und Kosten, die direkt dem Material zuzuordnen sind.

Durchsatzunabhängige Kosten entstehen immer, wenn die Maschine läuft. Hierzu zählen die Kosten für Leerlaufleistung, Instandhaltungsintervalle und Betriebsstoffe. Im Programm kann für materialführende Geräte eingestellt werden, ob sie abgeschaltet werden, wenn in der aktuellen Betriebsart kein Material ankommt. Dann entfallen diese Kosten.

Da der Leistungsbedarf anteilig durchsatzabhängig ist, kann er als Leerlaufleistung und Leistungsbedarf Material angegeben werden. Ist letzterer unbekannt, ermittelt das Programm diesen Anteil automatisch. Dabei wird angenommen, dass die Differenz zwischen installierter Leistung und Leerlaufleistung für den Maximaldurchsatz an Material aufgewendet wird.

Objekt Nr.	Anz.	Name	Installierte Leistung	Leistungsleistung im Leerlauf	Einheit	Leistungsleistung Material	Einheit	Investition [EUR]	Abschreibung [Jahre]	Service [h]	Kosten pro Service [EUR]	Betriebskosten [EUR/h]	Verschleiß [EUR/Produkt]	Produkt	Max. Massend.	Einheit
101.00	1	Rohaufgabe (R...	0	0	kW	0	kWh/t		10			0	0	t	0	t/h
102.00	1	Vorsieb	30	20	kW	0,025	kWh/t	87.000	10	800	1.500	2	0,007	t	400	t/h
103.00	1	Backenbrecher	600	50	kW	0,917	kWh/t	660.000	10	1.000	6.500	2,5	0,2	t	600	t/h
104.00	1	Förderband	2,2	0,469	kW	0,00349	kWh/t	12.000	10	3.000	2.500	3	0,006	t	496	t/h
105.00	1	Steinerdehalde	0	0	kW	0	kWh/t		10			0	0	t	0	t/h
201.00	1	Schottersieb	30	20	kW	0,025	kWh/t	88.000	10	1.000	3.000	6,2	0,006	t	400	t/h
202.00	1	Kegelbrecher	450	50	kW	0,8	kWh/t	790.000	10	1.000	4.500	3	0,45	t	500	t/h
203.00	1	Förderband	1,5	0,408	kW	0,00304	kWh/t	48.000	10	5.000	2.000	2	0,002	t	359	t/h
204.00	1	Förderband	11	0,644	kW	0,0262	kWh/t	17.500	10	5.000	2.500	3	0,002	t	395	t/h

Bild 17: NIAflow® Kostenerfassung

4.3 Auswertung

Kosten-Nutzen-Analyse	Betriebsart		
	Edelsplitt	Rückbruch	Mischbetrieb
Fixkosten			
Personal und Verwaltung	520.000 €/a		
Abschreibung Infrastruktur	320.000 €/a		
Abschreibung Maschinen	303.390 €/a		
Fixkosten gesamt	1.143.390 €/a		
Variable Kosten			
Einkauf von Rohstoffen	2.613.860 €/a	2.259.439 €/a	2.525.255 €/a
Energie	521.074 €/a	479.722 €/a	516.522 €/a
Betriebsstoffe	137.913 €/a	137.913 €/a	137.913 €/a
Verschleiß	1.013.329 €/a	924.718 €/a	1.019.131 €/a
Service	124.898 €/a	124.898 €/a	124.898 €/a
Variable Kosten gesamt	4.411.074 €/a	3.926.690 €/a	4.323.719 €/a
Produktion / Verbrauch			
Durchsatz Feststoff	290 t/h	250 t/h	280 t/h
Energieverbrauch	2.786.491 kWh	2.545.357 kWh	2.762.147 kWh
Produktion Feststoff	1.045.544 t/a	903.775 t/a	1.010.102 t/a
Kosten-Nutzen-Analyse			
Betriebskosten gesamt	5.554.464 €/a	5.070.080 €/a	5.467.109 €/a
Erlös	7.186.621 €/a	6.057.567 €/a	6.942.223 €/a
Gewinn	1.632.157 €/a	987.487 €/a	1.475.114 €/a
Deckungsbeitrag	2.775.547 €/a	2.130.877 €/a	2.618.504 €/a
Spezifischer Durchschnittserlös	6,87 €/t	6,70 €/t	6,87 €/t
Spezifische Produktionskosten	5,31 €/t	5,61 €/t	5,41 €/t
Kapitalrendite	20,8%	12,6%	18,8%
Gewinnschwelle	430.713 t/a	484.949 t/a	441.069 t/a

Bild 18: NIAflow® Kosten-Nutzen-Analyse

Die reine Edelsplittproduktion ist die stärkste in der Produktionsleistung. Mit den besten Erträgen lässt sich auch die beste Kapitalrendite erzielen und die Gewinnschwelle wird bereits nach der Produktion von 430.700 t erreicht.

Die ökonomisch ungünstigste Betriebsart ist erwartungsgemäß „Rückbruch“ mit dem niedrigsten Produktionsvolumen und der schlechtesten Kapitalrendite. Die spezifischen Kosten liegen mit 5,61 €/t höher als in den anderen Betriebsarten.

Der Mischbetrieb ist nur unwesentlich schlechter und damit eine vertretbare Alternative.

Zusammenfassung

Im Beitrag wurde die Modellierung von Maschinen und Geräten der mechanischen Verfahrenstechnik in komplexen Werken mittels der Simulationssoftware NIAflow® behandelt. Die erstellten Modelle lassen sich zur Beurteilung der tatsächlichen Produktion, zur Optimierung von Werken oder zur Anlagenprojektierung benutzen.

Die gezeigten Beispiele zeigen die Bandbreite verfahrenstechnischer Abläufe, die mithilfe der Software abgebildet werden können. Mit der Kosten-Nutzen-Analyse kann die Verfahrenstechnik mit den Kosten in Verbindung gebracht werden, um ökonomisch sinnvolle Betriebszustände zu realisieren.

Eine gute Datenlage für die Modellierung vorausgesetzt, verhält sich ein NIAflow® Modell wie die reale Anlage und liefert damit eine exzellente Planungsmöglichkeit für den Betreiber oder Projektanten aufbereitungstechnischer Anlagen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Gesellschaft für Informatik (GI): Digitaler Zwilling. 15. Februar 2018, [Zugriff am 17. Februar 2018]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Digitaler_Zwilling

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Ermittlung von Mischkennzahlen durch DEM-Simulationen – Ausblick zur Optimierung von Wärmeströmen bei Schneckenwärmetauschern

Malte Wittje



Malte Wittje, M. Eng.

PHWT Diepholz / AMF-Bruns

Hauptstraße 101

26689 Apen

Ermittlung von Mischkennzahlen durch DEM-Simulationen – Ausblick zur Optimierung von Wärmeströmen bei Schneckenwärmetauschern

Die Bestimmung von Mischkennzahlen ist zentral für die Auslegung verfahrenstechnischer Apparate. Ein moderner Ansatz nutzt DEM-Simulationen (Diskrete Elemente Methode), um den Lacey-Mixing-Index in Abhängigkeit von Betriebsparametern zu berechnen. Für eine effiziente Anwendung sind neben der Schüttgutkalibrierung auch Symmetrien und Modellvereinfachungen notwendig. Die gewonnenen Mischkennzahlen können anschließend zur Prozessoptimierung, z. B. zur Intensivierung von Wärmeübertragungen, herangezogen werden. Studien zeigen eine klare Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten vom Füllgrad und dem Durchmischungsgrad.

Einleitung

Die Durchmischung von Schüttgütern stellt eine wichtige Grundlage in der Verfahrenstechnik dar. Prozessverläufe oder auch Wärmeübergänge weisen eine Abhängigkeit zu der Durchmischung eines Schüttguts auf. Die Verwendung von Mischkennzahlen unterschiedlicher Apparaturen bildet insofern eine wichtige Basis bei der Auslegung unterschiedlicher Komponenten. [4] [5]

Mischkennzahlen werden grundsätzlich anhand von experimentellen Daten ermittelt, wobei in den vergangenen Jahren der Einsatz von Simulationssoftware hinzugekommen ist. Praktische Versuche sind oftmals mit großem Aufwand sowie Kosten verbunden, wobei zusätzlich meistens keine Flexibilität bei der Versuchsdurchführung besteht. Der Einsatz von passenden Softwarelösungen sowie Berechnungskonzepten kann einen wichtigen Beitrag zur Beschleunigung und Ausweitung der Bestimmung von Mischkennzahlen leisten sowie die Integration in nachfolgende Berechnungen bewirken. [4]

1 Bestimmung von Mischkennzahlen mithilfe von DEM-Simulationen

Mischkennzahlen stellen einen wichtigen Kennwert für Mischprozesse und unterschiedliche Mischwerkzeuge dar. Im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten wurden unterschiedlichste Indizes erarbeitet, um den Durchmischungszustand statistisch erfassen zu können. Der Lacey-Mixing Index ist hierbei der gebräuchlichste Index, weshalb sich im Rahmen der weiteren Betrachtungen hierauf beschränkt wird. [3]

1.1 Berechnung des Lacey-Mixing-Index und der Mischkennzahl

Für den in der Praxis verwendeten Lacey-Mixing-Index existieren bereits Weiterentwicklungen, wobei sich folgend auf die ursprüngliche Ausführung beschränkt wird. Der Lacey-Mixing-Index basiert hierbei auf der Varianz der Durchmischung. [1]

$$\sigma_v^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i}{N_g} \left(\frac{n_i}{N_i} - p_v \right)^2 \right) \quad (1)$$

Anhand der Varianz kann die Berechnung des Lacey-Mixing-Index LMI unter Einbezug der Varianz bei vollständiger Durchmischung σ_R^2 und der Varianz bei vollständiger Entmischung σ_0^2 erfolgen. Ein völlig durchmischter Zustand wird durch einen Lacey-Mixing-Index von $LMI = 1$ wiedergegeben. [1]

$$LMI = \frac{\sigma_0^2 - \sigma_b^2}{\sigma_0^2 - \sigma_R^2} \quad (2)$$

Frühere Arbeiten zeigten bereits auf, dass der simulierte Lacey-Mixing-Index gegen den Wert eins strebt, wobei dieser nicht erreicht wird [2]. In Abhängigkeit der Simulationsdauer beziehungsweise der durchgeführten Umdrehungen der Schneckenwelle kann zusätzlich die Notwendigkeit einer Extrapolation bestehen. Aufgrund des Grenzwertes von $LMI = 1$ kann eine angepasste Hyperbelfunktion herangezogen werden. Aufgrund von unterschiedlichen Steigungen in Abhängigkeit der Schneckenengeometrie beinhaltet die folgende Formel neben der Steigung a , die Verschiebung b auch die Potenz c .

$$LMI(N) = -\frac{1}{a(N+b)^c} + 1 \quad (3)$$

Die Anpassung der Hyperbelfunktion an die Simulationsergebnisse kann anhand der kleinsten Fehlerquadrate erfolgen und so können die Variablen a , b und c optimiert werden. Aufgrund des Strebens gegen den Grenzwert von $LMI = 1$ ergibt sich die Notwendigkeit zur Definition eines niedrigeren Grenzwertes, ab dem ein ideal durchmischter Zustand angesetzt wird. Frühere Durchmischungssimulationen zeigten auf, dass ein Lacey-Mixing-Index von $LMI(N_g) = 0,95$ definiert werden kann, wobei N_g der erforderlichen Anzahl an Umdrehungen und somit der Mischkennzahl entspricht. [2]

1.2 Grundlegender Aufbau der Simulation

Zur Berechnung des Lacey-Mixing-Index in Abhängigkeit der Simulationszeit muss ein entsprechender Auswerteraum definiert werden. Um eine Optimierung der Berechnungszeit zu erwirken, kann in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen zusätzlich die Nutzung von Symmetrien erfolgen. In der Bild 1 sind beispielhaft zwei Schneckengänge mit einem Auswerteraum über einen Schneckenengang dargestellt. In diesem Fall wurde die Bauform einer Rohrschnecke gewählt, wobei alternativ auch andere Bauformen eingesetzt werden können. Der eigentliche Versuchsraum ist in mehrere Zellen zur Auswertung unterteilt und in der linken Darstellung ersichtlich. In der rechten Darstellung ist beispielhaft die durchmischte Partikelmischung im Versuchsraum abgebildet.

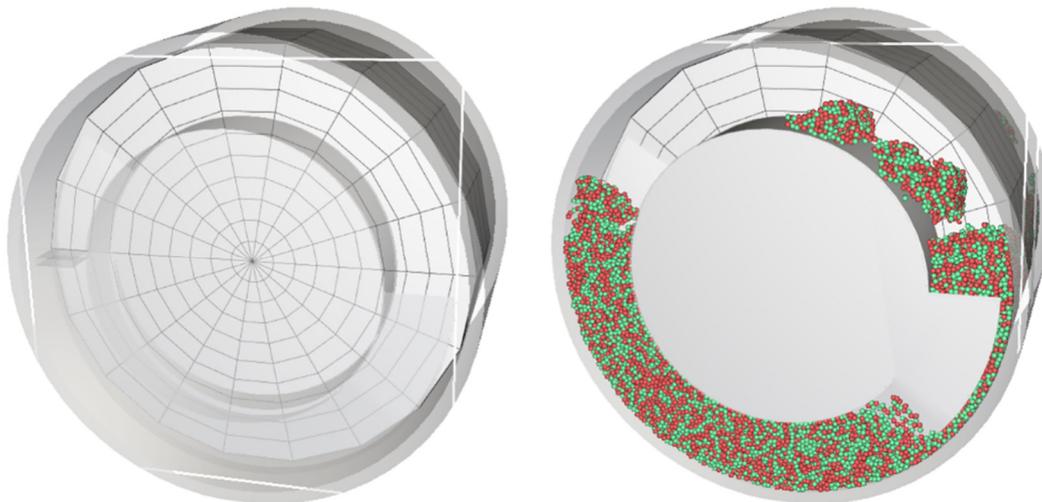


Bild 1: Auswerteraum innerhalb eines Schneckenförderers
links: ohne Schüttgut, rechts: mit Schüttgut

Anhand des „Division Tagging“ kann eine Unterteilung der Partikelschüttung in zwei Einheiten erfolgen, wodurch die Durchmischung statistisch mithilfe des Lacey-Mixing-Index bewertet werden kann.

Zu beachten ist hierbei die Wahl der Anzahl an Auswertezellen in Abhängigkeit der Partikelgröße. Insbesondere bei einer geringen Anzahl an Auswertezellen bzw. einer hohen Anzahl und Partikeln innerhalb einer Auswertezelle können deutliche Abweichungen bei der Bestimmung der Mischkennzahl resultieren. Partikelpositionen werden innerhalb einer Auswertezelle nicht berücksichtigt, weshalb ein höherer Lacey-Mixing-Index resultieren kann. Bei zu großer Anzahl an Auswertezellen kann unter Umständen bereits eine Stagnation des Lacey-Mixing-Index deutlich unterhalb der festgelegten Schwelle eintreten und somit ebenfalls die Auswertung beeinflussen. [1] [2]

1.3 Ergebnisse einer Beispielsimulation

Die Simulation erfolgte auf einem Desktop-PC mit 32 GB Arbeitsspeicher und einer Nvidia T1000 Grafikkarte. Für die Kalibrierung wurde die Programmversion Ansys Rocky™ 2024 R1.1 eingesetzt. Für die Werte wurde beispielhaft ein leicht fließendes Schüttgut kalibriert und die Simulation mit einem „Numerical Softening Factor“ von 0,005 durchgeführt, um einen Kompromiss mit der Berechnungszeit einzugehen. Zusätzlich wurde ein „Coarse Graining Factor“ von 160 bei einem Partikeldurchmesser in der Simulation von 4 mm vorgesehen. Für die Schneckenwelle wurde eine Ausführung mit Vollblattschneckenflügel sowie Ausschnitten zu Durchmischungszwecken vorgesehen.

In Bild 2 ist der simulierte Lacey-Mixing-Index in Abhängigkeit der durchgeführten Umdrehungen für unterschiedliche Füllgrade von 20 % bis 80 % dargestellt. Die Simulation erfolgte jeweils mit einer Wellendrehzahl von $n = 45 \text{ 1/min}$.

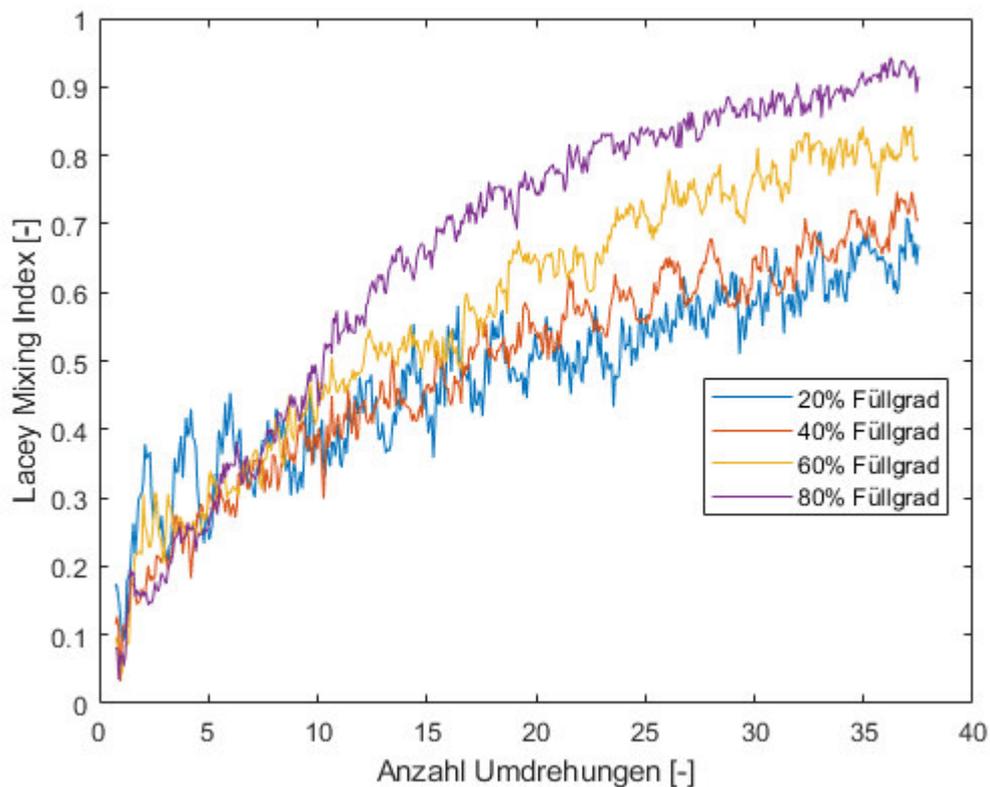


Bild 2: Beispielhafte Simulation des Lacey-Mixing-Index in Abhängigkeit der durchgeführten Umdrehungen und Füllgrade

Das Beispiel zeigt eine deutliche Abhängigkeit des Füllgrads auf den Lacey-Mixing-Index auf. Der Endwert der jeweiligen Simulation steigt mit steigendem Füllgrad von $LMI \sim 0,65$ bis auf $LMI \sim 0,9$. Aufgrund keiner kontinuierlichen Anzahl an Partikeln im Auswerteraum sowie Ausschnitten in der Schneckenflügelgeometrie können leichte Schwankungen im Simulationsverlauf festgestellt werden. Zudem kann anhand des Beispiels die Notwendigkeit der Extrapolation oder alternativ unterschiedlich langer Simulationszeiten dargelegt werden.

Für die Extrapolation ist dennoch zu beachten, dass abhängig von der Datenmenge bzw. des letzten Simulationswertes größere Abweichungen bei der Extrapolation auftreten können. Geometrieabhängig können Verläufe variieren, weshalb zudem kein allgemeingültiger Grenzwert für eine sichere Extrapolation definiert werden kann und stets eine Einzelfallbetrachtung erfolgen muss.

1.4 Herausforderungen bei der Simulation von Mischkennzahlen

Für die Simulation von Mischkennzahlen mithilfe von DEM-Simulationen ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen, um eine zuverlässige Bestimmung zu gewährleisten. Zudem beeinflussen diese zusätzlich den Aufbau einer entsprechenden Datenbank.

Berechnungszeit zu Simulationszeit

Insbesondere bei niedrigen Drehzahlen der Schneckenwelle bzw. des Mischwerkzeugs ergeben sich in Abhängigkeit der Mischintensität lange Simulationszeiten, um einen ausreichend hohen simulierten Lacey-Mixing-Index und eine sichere Extrapolation zu gewährleisten. Dieser Sachverhalt bestärkt zudem die Notwendigkeit zur Nutzung von Symmetrien des Anlagenaufbaus, um Berechnungszeiten möglichst gering zu halten.

Varianz der Mischwerkzeuge und Betriebsparameter

Die geometrische Ausführung der Mischwerkzeuge bzw. der Schneckenflügel besitzt einen direkten Einfluss auf den Lacey-Mixing-Index. Des Weiteren ergeben sich Abhängigkeiten zu der Fließfähigkeit des Schüttguts und den Betriebsparametern, wie Füllgrad und Drehzahl. Insofern resultiert ein hoher Berechnungsaufwand, um einen vollumfänglichen Vergleich mehrerer Mischwerkzeuge und Schüttgüter zu ermöglichen.

Kalibrierung von Schüttgütern

Allgemein ist die Qualität der Simulationsergebnisse von der Qualität der Eingangsdaten bzw. der Kalibrierung des Schüttguts abhängig. Insofern gilt analog zu typischen DEM-Simulationen die Herausforderung zur Bestimmung von Materialkennwerten sowie der anschließenden Kalibrierung. In Abhängigkeit der Anwendung müssen deshalb temperaturabhängige Materialkennwerte beachtet werden, die eine passende Kalibrierung zusätzlich erschweren. [7]

2 Vorteile und Möglichkeiten durch die Simulation von Mischkennzahlen mithilfe von DEM-Simulationen

2.1 Allgemeine Vorteile

Bei passender Kalibrierung des Schüttguts kann die Simulation von Mischkennzahlen in diversen Betriebspunkten mit geringem Personalaufwand erfolgen. Im Vergleich zu praktischen Versuchen kann dadurch ein deutlicher Vorteil beim Personaleinsatz erzielt werden. Des Weiteren ist die Auswertung in diversen Betriebspunkten oftmals mit umfangreicher Sensorik verbunden.

Nicht limitiert auf die Bestimmung der Mischkennzahlen durch DEM-Simulationen kann jedoch eine einfache Kombination von analytischen und numerischen Ersatzmodellen erfolgen, um die gewonnenen Mischkennzahlen weiter zu verarbeiten und Prozessoptimierungen von Apparaten zu erzielen.

2.2 Prozessintensivierung durch Durchmischung

Für viele chemische Prozesse unterschiedlicher Stoffe stellt der Kontakt auf molekularer Ebene einen grundlegenden Bestandteil dar. Durch die gezielte Optimierung von

Durchmischungen können neben der Beschleunigung des Hauptprozesses auch unter anderem eine Unterbindung von Nebenprozessen erreicht werden. Des Weiteren kann eine Abhängigkeit der Qualität des Produkts von der Durchmischung bestehen. [5]

Die gezielte Bestimmung von Mischkennzahlen und dadurch folgende Optimierung von Prozessverläufen in Apparaten stellt somit einen wichtigen Bestandteil dar. Auf Basis der Optimierung von Apparaten kann einerseits eine Verbesserung der Qualität des Produkts oder andererseits ein wirtschaftlicher Vorteil durch einen kompakteren Aufbau erzielt werden. [5]

2.3 Optimierung von Wärmeströmen in Schneckenwärmetauschern

Die Berechnung von Wärmeströmen unterteilt sich hauptsächlich in die Bereiche des Wärmeübergangskoeffizienten von Schüttgütern sowie des anlagenabhängigen Wärmewiderstands. Für die Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Schüttgut und Stahl kann neben praktischen Versuchen auch das Penetrationsmodell als analytischer Ansatz herangezogen werden. [4] [9]

Das Penetrationsmodell ermöglicht die durchmischungsabhängige Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten auf Basis von thermischen und mechanischen Schüttguteigenschaften. Letztendlich können auf Basis der Wärmeleitfähigkeit der Schüttung, Partikelgröße und des umgebenden Gases die physikalische Obergrenze sowie Untergrenze für den Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Verweilzeit bestimmt werden. Des Weiteren kann anhand der Mischkennzahl der Wärmeübergangskoeffizient für den durchmischten Zustand ermittelt werden. [4]

In Kombination mit numerischen Ersatzmodellen aber auch analytischen Ansätzen zur Berechnung des Wärmewiderstands der Gesamtanlage unter Einbezug des Wärmeübergangskoeffizienten besteht die Möglichkeit, eine umfangreiche Auslegung von Schneckenwärmetauschern vorzunehmen. Betriebsparameter wie die Drehzahl oder der Füllgrad können anhand unterschiedlicher Mischkennzahlen als auch die Bedeckung der Wärmeaustauschfläche berücksichtigt werden.

Zusammenfassend ergibt sich die Möglichkeit zur gezielten Auslegung und Optimierung im Hinblick des Wärmestroms. Des Weiteren kann eine breite Informationslage zu Auswirkungen von veränderten Betriebsparametern auf den Wärmestrom ermittelt werden. Untersuchungen von „Regucki“ ergaben bereits eine deutliche Abhängigkeit des optimalen Betriebspunktes in Abhängigkeit des Füllgrads innerhalb eines Schneckenwärmetauschers. Abhängig der exakten Betriebsbedingungen konnte hierbei ein Verhältnis des maximalen bis minimalen Wärmeübergangskoeffizienten von bis zu 4 ermittelt werden [8]. Zu beachten ist hierbei die Berechnung und Überdeckung der Wärmeaustauschfläche, weshalb das angegebene Verhältnis nur für die Berechnungsweise von „Regucki“ herangezogen werden kann. Basierend hierauf zeigt sich dennoch ein deutliches Potential bei gezielter Verwendung von Mischkennzahlen, eine Optimierung des Wärmestroms zu erreichen.

Zusammenfassung

Durchmischung und Mischkennzahlen bilden eine wichtige Basis bei der Auslegung von Apparaten. Die Bestimmung von Mischkennzahlen mithilfe von DEM-Simulationen stellt einen weiteren Ansatz dar, um eine Bestimmung von Mischkennzahlen in Abhängigkeit diverser Betriebsparameter zu erreichen.

Mithilfe von DEM-Simulationen kann die Simulation des Lacey-Mixing-Index mit anschließender Extrapolation der Simulationsdaten bis zu einem festgelegten Grenzwert von $LMI(N_g) = 0,95$ erfolgen. Neben den typischen Herausforderungen von DEM-Simulationen, wie die Kalibrierung des Schüttguts, ist für eine effektive Nutzung der Herangehensweise der Einbezug von Symmetrien und Vereinfachungen erforderlich, um eine zeiteffektive und sinnvolle Nutzung zu erreichen.

Schließlich kann auf Basis der Mischkennzahlen eine weitere Berechnung zwecks Prozessintensivierung oder auch Erhöhung von Wärmeströmen mithilfe von analytischen oder numerischen Berechnungsansätzen erfolgen. Untersuchungen von „Regucki“ wiesen hierbei bereits eine deutliche Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten vom Füllgrad und einhergehender Durchmischung auf.

Die Froude Zahl bildet nach Mollekopf bereits eine Basis für die Bestimmung bzw. Annäherung von Mischkennzahlen von leicht fließenden Schüttgütern [6]. Insofern bestünde bereits teilweise ein Ansatz zur weiteren Beschreibung und Auswertung der Mischkennzahlen. Dennoch weisen diverse Schüttgüter ein kohäsives Fließverhalten oder variierende Eigenschaften auf [7]. Um zukünftig einen universellen Ansatz zur Auslegung zu verfolgen, müssen tiefere Untersuchungen erfolgen. Grundsätzlich ergibt sich hierfür ein großes Potential, um zukünftige Auslegungen deutlich zu vereinfachen.

Langfristig gesehen, kann anhand von Mischkennzahlen eine gezielte Auslegung und auch Optimierung von Schneckenwärmetauschern erfolgen. Insbesondere bei Brownfield Projekten kann eine nachträgliche Steigerung der Durchsatzleistung auch im Sinne des Wärmeaustausches erreicht werden. Hierdurch ergeben sich ökologische als auch ökonomische Vorteile, da unter Umständen mit begrenztem Aufwand die Optimierung erreicht werden kann.

Quellenverzeichnis:

- [1] Cho, M., Dutta, P., Shim, J.: A non-sampling mixing index for multicomponent mixtures; Powder Technology, 2017, 319. S. 434 - 444
- [2] Chou, S., Song, Y., Hsiau, S.: A Study of the Mixing Index in Solid Particles, KONA Powder and Particle Journal, 2017, 34.0. S. 275 - 281
- [3] Jadidi, B., et al.: Effect of the Mixer Design Parameters on the Performance of a Twin Paddle Blender: A DEM Study, Processes, 2023, 11.3. S. 733
- [4] Tsotsas, E.: Heat Transfer from a Wall to Stagnant and Mechanically Agitated Beds, VDI Heat Atlas, 2010, 2. Berlin, S. 1311 - 1326
- [5] Schmidt-Lehr, S.: Charakterisierung der Mischgüte zur Prozessintensivierung, 2019. Ort: Hamburg
- [6] Mollekopf, N.: Wärmeübergang an mechanisch durchmischtes Schüttgut mit Wärmesenken im Kontaktapparaten, 1983, Karlsruhe
- [7] Hilgraf, P.: Projektierung und Auslegung von Schüttgutanlagen, 2022, Heidelberg
- [8] Regucki, P., Krzyżyńska, R., Szeliga, Z.: Mathematical model for a single screw ash cooler of a circulating fluidized bed boiler, Powder Technology, 2022, 396. S. 50 - 58
- [9] Zipf, V.: Schneckenwärmeübertrager in Latentwärmespeichersystemen: Tests und Wirtschaftlichkeitsstudie für solarthermische Anlagen, 2015, Aachen

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

KI-basierte optische Qualitätssicherung von Schüttgütern

Johannes Lukas
Thomas Plankenbühler
Dominik Müller



Johannes Lukas, M. Sc. (Referent)
Maschinenfabrik
Gustav Eirich GmbH & Co. KG
Walldürner Str. 50
74736 Hardheim



Dr. Thomas Plankenbühler
Dr. Dominik Müller
prosio vision GmbH
Bergstraße 6
91207 Lauf an der Pegnitz

KI-basierte optische Qualitätssicherung von Schüttgütern

Die Maschinenfabrik Gustav Eirich, bekannt als Anlagenbauer im Bereich der Aufbereitungs- und Mischtechnik, erweitert ihr Portfolio im Zuge der Digitalisierung um KI-gestützte Lösungen zur Prozessoptimierung. Durch die Kombination aus modernerameratechnik und intelligenter Bildverarbeitung werden Schüttgüter analysiert, um tiefe Einblicke in laufende Produktionsvorgänge zu gewinnen. Künstliche Intelligenz ermöglicht dabei die automatische Erkennung von Partikelgrößen, Konsistenzunterschieden, Texturmerkmalen oder Mischverhältnissen. Diese innovativen Verfahren unterstützen eine stabile Produktqualität, reduzieren die Abhängigkeit von erfahrenen Anlagenbedienern und leisten einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der Schüttgutverarbeitung.

1 Einleitung

Steigende Energiekosten und ein zunehmender wirtschaftlicher Wettbewerbsdruck zwingen Betreiber verschiedener Produktionsanlagen zu einer noch effizienteren Prozessführung. Gleichzeitig führen schwankende Rohstoffqualitäten und instabile Prozessbedingungen immer wieder zu variierender Produktqualität und Ausbeute. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor besteht in der Abhängigkeit von erfahrenem Personal. Die Leistungsfähigkeit vieler Anlagen ist stark vom individuellen Erfahrungswissen der Anlagenfahrer geprägt. Um dieses personenabhängige Wissen in systematisch nutzbares Prozesswissen zu überführen, gewinnen digitale, KI-gestützte Systeme zunehmend an Bedeutung.

Ein zentraler Baustein auf dem Weg zur Prozessstabilisierung und -optimierung ist die kontinuierliche, automatisierte Qualitätsüberwachung direkt in der Linie. Die Inline-Qualitätsmessung von Schüttgütern ermöglicht einen unmittelbaren Einblick in die laufende Produktion und bildet damit die Grundlage für datenbasierte Prozessoptimierungen und eine gesteigerte Wirtschaftlichkeit, wie in Bild 1 veranschaulicht. Gerade bei sensiblen oder variablen Produkten können visuelle Merkmale wie Partikelgröße, Form, Oberflächenstruktur oder Homogenität wichtige Indikatoren für die Produktqualität darstellen.

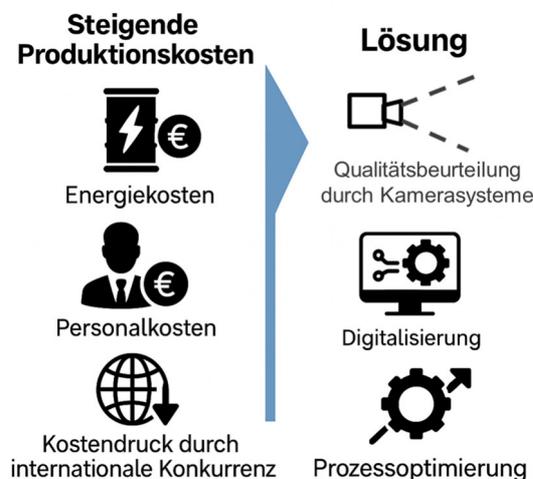


Bild 1: Schematische Darstellung steigender Produktionskosten und Prozessoptimierung als Lösungsansatz

Das Joint Venture proso vision GmbH vereint die langjährige Maschinenbaukompetenz der Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG mit der Digitalisierungsexpertise der proso engineering GmbH, deren Fokus auf der prozesstechnischen Optimierung liegt. Im Mittelpunkt der strategischen Ausrichtung steht nicht die Messtechnik selbst, sondern deren Einsatz als Mittel zur nachhaltigen Steigerung von Prozesssicherheit, Effizienz und Produktqualität im Kontext einer ganzheitlichen Digitalisierungs- und Optimierungsstrategie. Kamerasysteme und KI-basierte Auswertungen dienen dabei als wirkungsvolle Werkzeuge, um Prozesszusammenhänge transparent zu machen und gezielte Optimierungen zu ermöglichen. Die entwickelten Lösungen lassen sich flexibel in bestehende Fördersysteme integrieren oder direkt in Produktionsmaschinen wie Granuliertellern und Intensivmischern einsetzen und ermöglichen somit eine nahtlose Erweiterung bestehender Produktionssysteme um intelligente, datenbasierte Analysefunktionen.

2 Optische Charakterisierung von Schüttgütern

Für die automatisierte Qualitätssicherung und Prozessüberwachung in Schüttgutprozessen gewinnt die optische Charakterisierung zunehmend an Bedeutung. Mithilfe moderner Bildverarbeitung lassen sich materialbezogene Eigenschaften direkt im Prozess erfassen – etwa Partikelgrößenverteilungen, Materialmischungen oder Störstoffe.

Im Folgenden werden zunächst im Abschnitt 2.1 verschiedene Schüttgüter vorgestellt und exemplarisch gezeigt, welche Kenngrößen durch eine optische Qualitätsbeurteilung abgeleitet werden können. Abschnitt 2.2 beschreibt robuste Kamerasysteme, die über Fördersystemen oder in verschiedenen Aufbereitungsschritten in bestehende Anlagen integriert werden können. In Abschnitt 2.3 wird gezeigt, wie mittels Bildverarbeitung und KI-gestützter Auswertung Partikeleigenschaften automatisiert erkannt und Konsistenzabweichungen detektiert werden können.

2.1 Schüttgüter und Aufgabenstellungen

Bild 2 zeigt exemplarisch verschiedene Schüttgüter mit typischen Aufgabenstellungen der optischen Qualitätskontrolle. Sande verschiedenster Körnungen (a) werden in zahlreichen Branchen, etwa der Baustoffindustrie, eingesetzt. Die maximale Korngröße ist dabei oft ein zentrales Qualitätsmerkmal, um Eingangsmaterialien zu überprüfen oder Endprodukte zu klassifizieren – eine optische Überkornerkennung kann hier frühzeitig Abweichungen, z. B. durch Siebrisse, detektieren. Am Beispiel von Ziegelschutt (b) kann man erkennen, dass auch das Mischverhältnis optisch analysiert werden kann, was zur Bewertung von Trennergebnissen im Baustoffrecycling Verwendung findet. In Granulationsprozessen (c) ist häufig die Partikelgrößenverteilung als Qualitätsmerkmal relevant, da die Ausbeute und damit die Produktionsmengen abhängig sind von dem Anteil an Gutkorn. Die Anteile an Über- und Unterkorn, welche in Siebanlagen abgetrennt werden und den Granulationsprozess erneut durchlaufen, sind in diesen Prozessen zu minimieren. Durch die verstärkte Verwendung von günstigeren Ausgangsstoffen und Recyclingmaterialien (d) ist eine zuverlässige Erkennung von Störstoffen ein weiteres Anwendungsgebiet für eine optische Qualitätskontrolle, um die Prozesssicherheit und Produktreinheit zu gewährleisten.

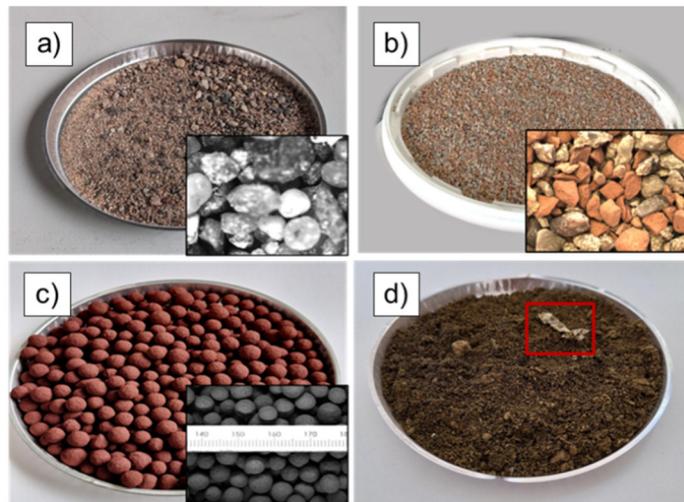


Bild 2: Typische Materialien und Aufgabenstellungen zur optischen Qualitätsbeurteilung:
 a) Überkornerkennung (Sand), b) Bewertung von Mischverhältnissen (Ziegelschutt),
 c) Bestimmung der Korngrößenverteilung (Granulate) und d) Erkennung von Störstoffen
 (Recyclingmaterial)

Die dargestellten Beispiele verdeutlichen den vielseitigen Einsatz optischer Systeme zur inline-fähigen Erfassung materialrelevanter Eigenschaften in der Schüttgutverarbeitung.

2.2 Robuste Kamerasysteme zur Inline-Messung

Für die optische Erfassung von Schüttguteigenschaften direkt im Prozess ist der zuverlässige Betrieb von Kamerasystemen unter industriellen Bedingungen entscheidend. Eine besondere Herausforderung besteht in der großen Vielfalt möglicher Einbaupositionen: Kamerasysteme müssen häufig in bestehenden Anlagen nachgerüstet werden und sich flexibel an unterschiedliche Prozesssituationen anpassen lassen. Typische Installationsorte sind Fördereinrichtungen wie Vibrorinnen oder Förderbänder, aber auch Prozessaggregate wie Mischer und Granulierteller.

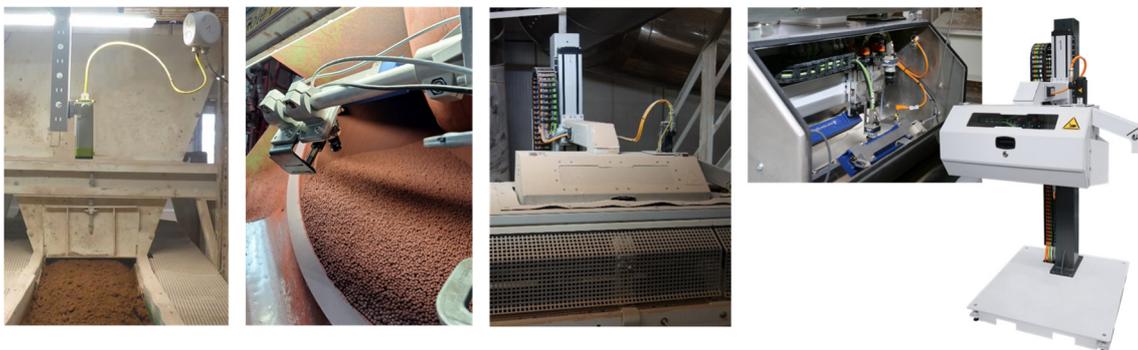


Bild 3: Robuste Kamerasysteme in verschiedenen Einbaupositionen

Bild 3 zeigt beispielhaft verschiedene robuste Kamerasysteme, die sich für den Einsatz in solchen Umgebungen eignen. Um die Funktion der Sensorik auch in staubintensiven Produktionsbereichen dauerhaft sicherzustellen, kommen in der Praxis mit Überdruck beaufschlagte Schutzgehäuse, automatische Reinigungsmechanismen sowie temperaturstabile Baugruppen zum Einsatz. Diese Maßnahmen sorgen dafür, dass die

Kameras wartungsarm arbeiten können und ein freies Sichtfeld auf das Fördergut erhalten bleibt – eine wesentliche Voraussetzung für die zuverlässige Erfassung von Partikeleigenschaften im laufenden Betrieb.

2.3 Einsatz von KI-Modellen zur Partikelvereinzelung und Erkennung von Konsistenzunterschieden

2.3.1 KI-Partikelvereinzelung und Ableiten von Kennwerten

In Bild 4 sind die Ergebnisse von zwei KI-Modellen zur Partikelvereinzelung und die Ableitung der Kennwerte aus den segmentierten Partikeln schematisch dargestellt. Aus den Bildern werden, nach Verwendung verschiedener Vorverarbeitungsschritte zur Optimierung der Bildqualität, durch Anwendung verschiedener KI-Modelle zur Instanz-Segmentierung, die Einzelpartikel erfasst. Je nach Material werden vortrainierte KI-Modelle verwendet oder eigene Modelle zur Partikelvereinzelung trainiert.

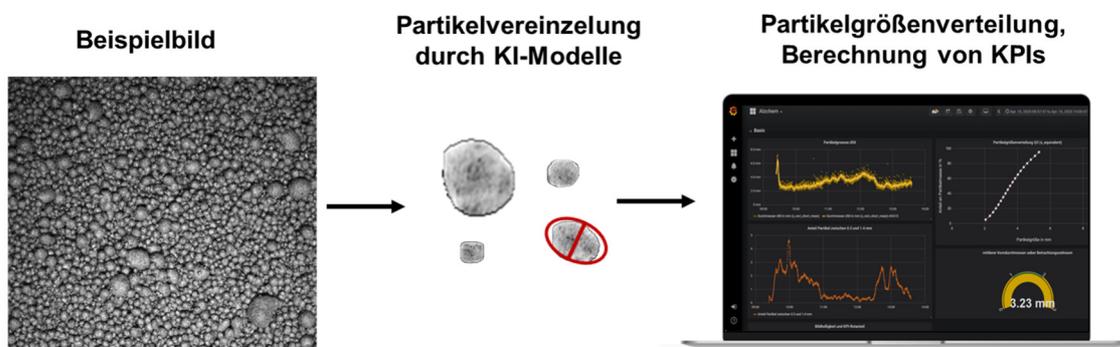


Bild 4: Partikelvereinzelung durch KI-Modelle und Berechnung der Partikelgrößenverteilung und weiterer Kennwerte/KPIs aus den erkannten Partikeln

Aus den Ergebnissen dieser Partikelvereinzelung können dann im nächsten Schritt die relevanten Qualitätsparameter, Kornform, Oberflächenstruktur oder Partikelgröße, berechnet werden.

2.3.2 Einsatz von Deep-Learning zur Quantifizierung von Konsistenzunterschieden

Um eine optische Konsistenzbeurteilung für Materialien, die nicht über Einzelpartikel beschrieben werden können, zu ermöglichen, wird ein Ansatz aus dem Bereich des Tiefen Lernens (Deep Learning) verwendet. Spezielle neuronale Netze, deren Architektur für Bildverarbeitungsaufgaben optimiert sind, können zur Prädiktion von Materialeigenschaften (Konsistenzen, Feuchte, etc.) verwendet werden [1]. Wie in Bild 5 veranschaulicht, wird hier ein Modell mit Bildern, die den relevanten Schwankungsbereich der Zielgröße repräsentieren, trainiert. Im gezeigten Beispiel ist die Vorhersage der Feuchte aus Bildern des Materials aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenstruktur möglich.

Diese erfahrungsbasierte Vorhersage ist für eine Vielzahl an Anwendungsbereichen übertragbar und kann optisch unterscheidbare und sich wiederholende Zustände in Echtzeit beurteilen und so in verschiedenen Prozessen eine relevante Messgröße zur Stabilisierung und Optimierung der Betriebsweise bereitstellen.

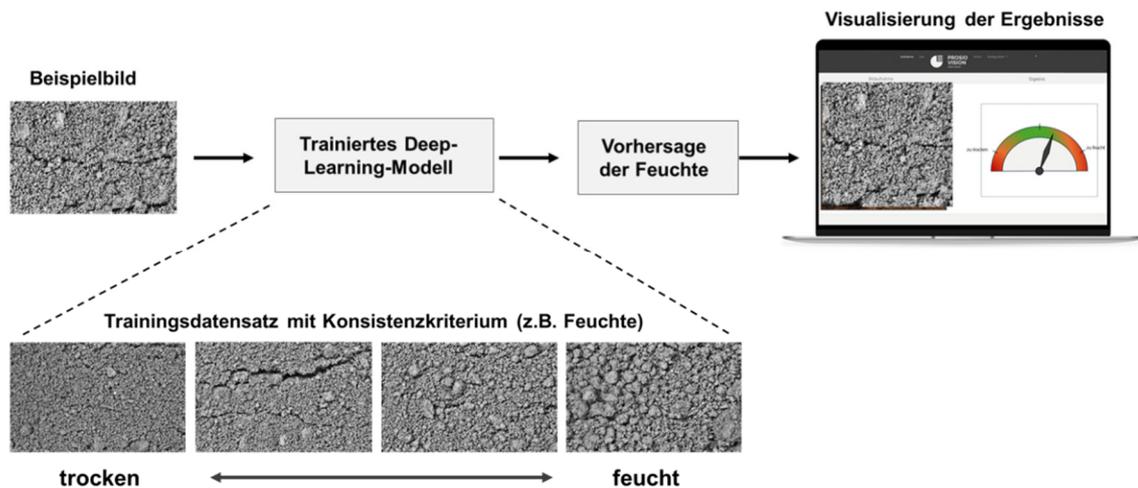


Bild 5: Partikelvereinzelung durch KI-Modelle und Berechnung der Partikelgrößenverteilung und weiterer Kennwerte/KPIs aus den erkannten Partikeln

3 Potenzial der Inline-Messung zur Prozessoptimierung

Die vorgestellten KI-basierten Systeme zur optischen Qualitätsüberwachung bieten nicht nur eine Momentaufnahme der Produktqualität, sondern eröffnen ganz neue Möglichkeiten zur Prozessführung in der Schüttgutverarbeitung. Durch die kontinuierliche Datenerfassung direkt im laufenden Betrieb lassen sich Trends und Abweichungen frühzeitig erkennen – ein entscheidender Vorteil gegenüber stichprobenbasierten Laboranalysen. Die gewonnenen Informationen über Partikelgrößenverteilungen, Mischungsverhältnisse oder Konsistenzmerkmale können direkt zur Regelung oder Steuerung nachfolgender Prozessschritte verwendet werden.

Da in den meisten Prozessen neben den optisch erfassten Qualitätsparametern weitere Prozessgrößen für die Optimierung und Regelung berücksichtigt werden müssen, bietet Eirich durch das Produkt *LogLizer* die Möglichkeit, Prozessdaten aus unterschiedlichen Steuerungen und der Anlagenperipherie zu erfassen und zentral in einer gemeinsamen SQL-Datenbank zu speichern. Diese Datenbasis bildet die Grundlage für eine datengetriebene Optimierung.

Durch eine datenbasierte Prozessoptimierung lässt sich eine höhere Reproduzierbarkeit bei gleichzeitig geringerem Rohstoff- und Energieeinsatz erzielen – insbesondere in Anlagen, die mit schwankenden Eingangsmaterialien arbeiten.

Zusammenfassung

Die Maschinenfabrik Gustav Eirich verfolgt mit dem Einsatz KI-gestützter Bildverarbeitungslösungen einen zukunftsweisenden Ansatz zur Optimierung von Schüttgutprozessen. Optische Inline-Messsysteme ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung relevanter Qualitätsparameter direkt in der Linie. Robuste Kamerasysteme in Kombination mit intelligenten Auswertelgorithmen erlauben die zuverlässige Erkennung von Partikeleigenschaften und Materialzuständen – auch unter industriellen Bedingungen. Durch den Einsatz moderner Deep-Learning-Verfahren können darüber hinaus auch komplexe Materialzustände wie Konsistenz oder Feuchte automatisiert beurteilt werden. Die gewonnenen Informationen dienen nicht nur der Qualitätssicherung, sondern stellen eine wertvolle Grundlage für die datenbasierte Prozessregelung dar. Damit leisten KI-gestützte Systeme einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung, Ressourcenoptimierung und Produktionssicherheit in der Schüttgutindustrie.

Quellenverzeichnis:

- [1] Zhao, X., Wang, L., Zhang, Y. *et al.* A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artif Intell Rev* 57, 99 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>

29. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2025

Schüttgutfördertechnik am Puls der Zeit

Gyraton® **Präzisionsmischer für große Schüttgut-Chargen, der bei minimaler Motorleistung ideale Mischgüten erzeugt**

Stefan Ruberg



Dipl.-Ing. Stefan Ruberg (Referent)

amixon GmbH

Halberstädter Straße 55

33106 Paderborn

Gyraton®

Präzisionsmischer für große Schüttgut-Chargen, der bei minimaler Motorleistung ideale Mischgüter erzeugt

1 Präzisionsmischen

Wir sprechen vom Präzisionsmischen disperser Güter, wenn die Mischgütevarianz einer Pulverzusammensetzung von 1 zu 100.000 reproduzierbar kleiner als 5 % ist.

Solche Präzisionsmischer gibt es von vielen verschiedenen Herstellern in unterschiedlichsten Bauformen. Einige Mischer haben horizontal gelagerte, andere vertikal gelagerte Mischwerkzeuge. Allen gemeinsam ist, dass ihre spezifische Antriebsleistung selten kleiner als 18 kW pro Tonne Mischgut ist. Der Grund dafür ist, dass die Mischwerkzeuge von Präzisionsmischern eine Mindestdrehfrequenz benötigen.

Im Folgenden wird ein neuartiges Mischsystem vorgestellt, das mit extrem geringen Antriebsleistungen große Schüttgutvolumen ideal homogenisieren kann (Bild 1).



Bild 1: Gyraton® Mischer

2 Vorstellung des Unternehmens amixon GmbH

Die amixon GmbH mit Sitz in Paderborn fertigt Aufbereitungsmaschinen für disperse Güter. Es werden nur Systeme aus eigenen Entwicklungen bzw. Patenten gefertigt. Im Mittelpunkt stehen dabei Verfahren, die mit Mischen zu tun haben.

Mit mehr als 150 Mitarbeitern fertigt amixon® alle Komponenten der Apparate selbst. Ausgenommen sind lediglich Motoren und Getriebe (Bild 2).



Bild 2: Blick in die Fertigung

Die amixon®-Fertigung befasst sich nur mit eigenen Patenten und Entwicklungen (Bild 2). Dazu gehören:

- Präzisionsmischer
- Vakuum-Kontaktrockner
- Synthesereaktoren und
- Apparate für die Aufbauagglomeration.

Die dispersen Feststoffe können dabei trocken, feucht oder suspendiert vorliegen. amixon® ist ein Synonym für vertikal arbeitende Präzisionsmischer. Zwei unserer Systeme verfügen über druck- und vakuumfeste Mischräume. Sie fungieren als Synthesereaktoren oder als Vakuum-Kontakt-Trockner.

Seit unserer Gründung im Jahr 1983 haben wir viele Varianten von Vertikalmischern entwickelt und erfolgreich auf dem Markt eingeführt. Unsere Maschinen sind weltweit im Einsatz.

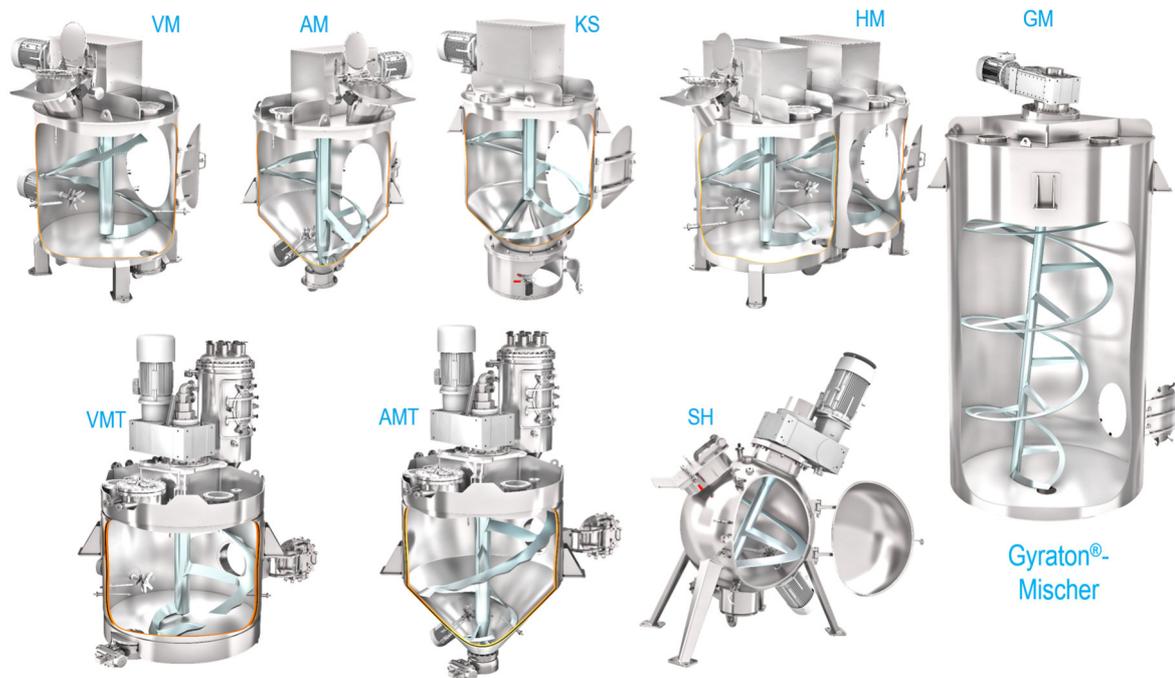


Bild 3: Fabrikationsprogramm von amixon®

Ein Pulvermischprozess ist niemals frei von Begleiteffekten. Diese können mal mehr, mal weniger sichtbar sein. Es geht um: Desagglomerieren, Benetzen, Ummanteln, Aufbaugranulieren, Entfeuchten oder chemische Synthesen,

Durch die Art des Mischens können solche Begleiteffekte unterdrückt oder begünstigt werden. Die Begleiteffekte sind für die verschiedenen Branchen von unterschiedlich großer Bedeutung.

- In der **pharmazeutischen Galenik** geht es um die Desagglomeration und die Feinstverteilung der Wirkstoffe in Trägerstoffen.
- Im Bereich **Lebensmittel/ Diätetik** geht es um schonende Flüssigstoffbeimischungen und den Erhalt der Pulverform und -struktur.
- In der **Synthesechemie** geht es um schnelle und vollständige Stoffumsetzungen bei effizienter Wärme- und Stoffübertragung.
- In der **Polyindustrie** geht es um Farbaufbereitungen und Oberflächenbehandlungen.
- In der **Pulvermetallurgie bzw. Ingenieurkeramik** geht es um vollständige Partikelummantelungen mit nanoskalaren Additiven. Dies ist für effiziente Kalzinierungsprozesse wichtig.
- In der **Biotechnologie** geht es um die schonende Vermischung bei wechselnden Stoffkonsistenzen und um extreme Hygienestandards.

3 Pulvermischer und Vermeidung von Kontamination

Wenn Pulvermischbetriebe einen optimal geeigneten Mischer beschaffen wollen, investieren sie viel Zeit in die Evaluierung.

- Wie werden die Güter in den Mischer eingetragen und ausgetragen?
- Wie schnell erfolgt das Mischen?
- Wie groß ist der Energieeintrag, wenn Pulver zu benetzen sind?
- Wie schnell und wie gut kann sich der Mischer entleeren?
- Kann der Mischer mit variablen Füllgraden genutzt werden?
- Wie stark verändert sich die Granulometrie der Pulver, wenn empfindliche Pulverkomponenten beteiligt sind?
- Welche Reinigungsregime können angewandt werden: trocken, feucht oder nass? Manuell oder automatisch?
- Wie lange dauert die Stillstandszeit bei einer Nassreinigung einschließlich der Trocknung?
- Wie hoch ist der Wartungsaufwand?
-

Im Idealfall kann die Reihenfolge der verschiedenen Mischaufträge so optimiert werden, dass auf eine Reinigung verzichtet werden kann. In einer Gewürzfabrik organisiert das PPS-System beispielsweise mehrmals täglich die Auftragsabwicklung neu. Dies erfolgt nach Maßgabe der aktuellen Auftragslage und der verfügbaren Rohstoffe.

Ziel ist es dabei immer, den Selbstentleerungs- und Selbstreinigungseffekt zu nutzen und manuelle Reinigungen einzusparen. Dies bedingt eine flexible und weitgehend kontaminationsfreie automatisierte Rohstofflogistik.

4 Dreidimensionale Umschichtung in einem Vertikal-Helixmischer

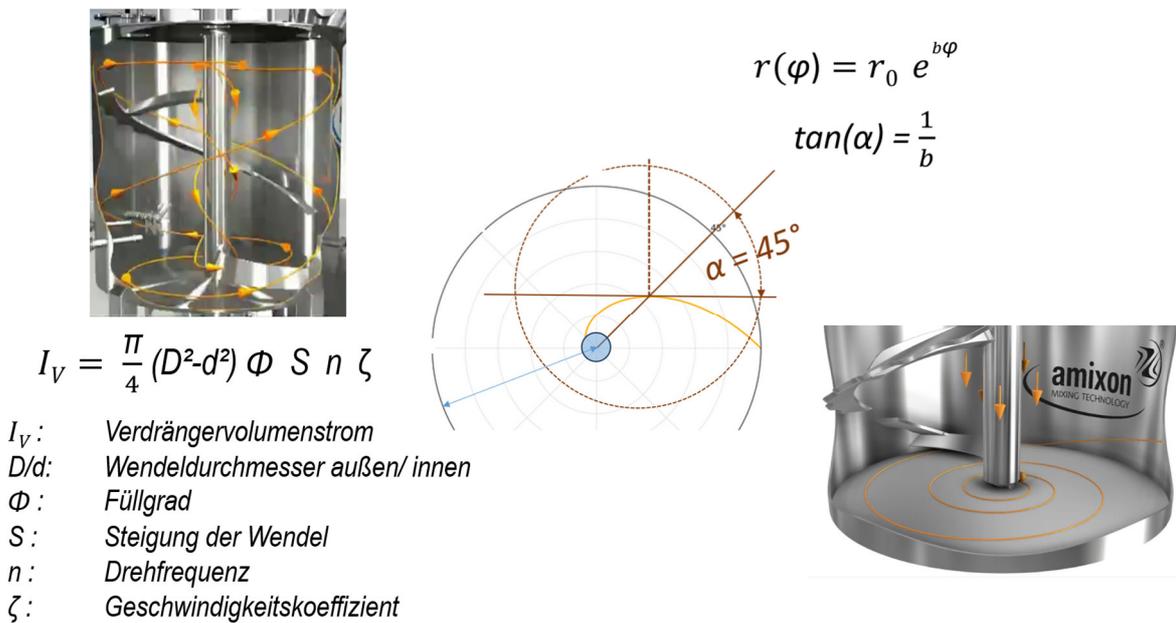


Bild 4: Dreidimensionale Umschichtung im Vertikal-Helixmischer

Auf der linken Seite in Bild 4 sehen Sie, wie wir die vertikale Förderung in unseren Mixern berechnen. Dies ist ein Maß für die Mischintensität: Wie oft dreht sich das Mischwerkzeug, bis das gesamte Volumen einmal umgewälzt wird? Alles, was das Mischwerkzeug aufwärts fördert, fließt im Zentrum des Mischraums abwärts. Entscheidend ist, dass die Güter unten im Mischraum radial verströmt werden. Nur dann sind sie an der Aufwärtsförderung beteiligt.

Rechts in Bild 4 sehen Sie, wie eine Partikel von einem rotierenden Mischwerkarm agitiert wird. Es folgt der Zwangsbewegung des Mischwerkarms. Gleichzeitig bewegen sich die Mischgüter von innen nach außen. Je stärker die Krümmung des Mischwerkarms ist, desto stärker ist diese Radialbewegung. Im vorliegenden Fall ist der Arm wie eine logarithmische Spirale geformt. Dadurch arbeitet der Mischwerkarm wie ein Räumarm. Tausende Anwendungen bestätigen, das funktioniert auch bei feuchten und schlecht fließenden Schüttgütern wirkungsvoll.

Die Erfahrung lehrt aber auch, dass eine raumbeherrschende Totalverströmung nur bei einer Mindestdrehfrequenz stattfindet. Diese beträgt mindestens 8 bis ca. 12 rpm. Je schlechter die Fließfähigkeit der Mischgüter und je größer die Mischcharge, desto höher ist sie zu bemessen.

5 Homogenisierung großer Schüttgut-Chargen

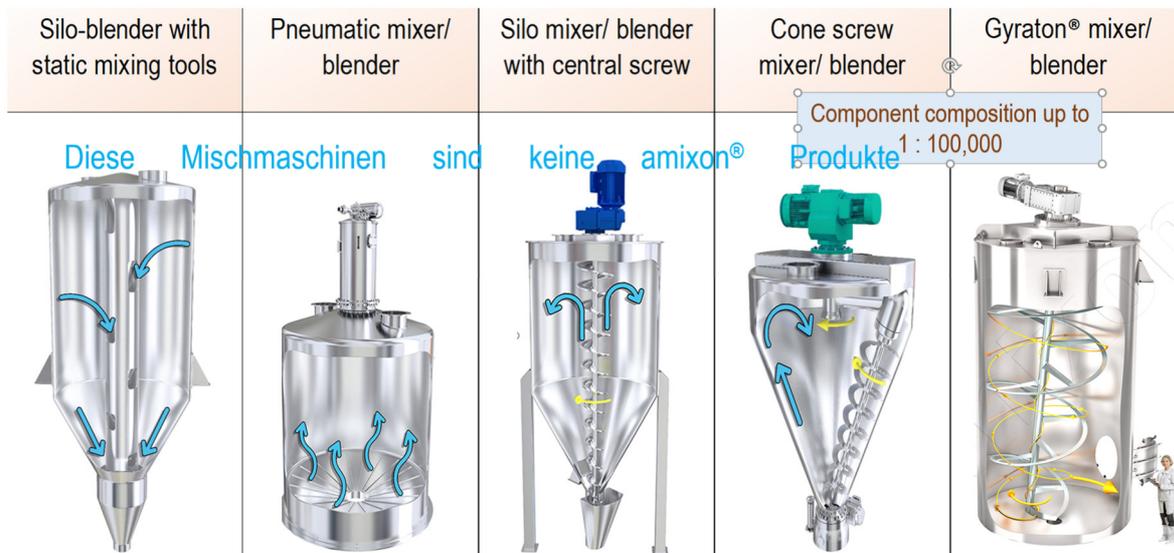


Bild 5: Bauarten von Groß-Chargenmischern

Wir sehen hier im Bild 5 typische Mischapparate für große Chargen. Dazu gehören Silosysteme mit Einbauten und statischen Schikanen, pneumatische Mischer mit porösem Boden und Zentralschneckenmischer. Rechts sehen wir zwei Gattungen, die sehr hohe Mischgüten erzeugen können.

Von Präzisionsmischern sprechen wir, wenn ein Mischer Komponentenzusammensetzungen bis 1 zu 100 000 vermischen kann und der Mischgüte-Variationskoeffizient reproduzierbar unter 5 % liegt. Diese Anforderung erfüllen beide rechts dargestellten Mischer.

Beide Mischsysteme verfügen über Förderschnecken oder Förderwendeln. In beiden Fällen führen die Mischwerkzeuge zwei Bewegungen zeitgleich aus: Die Rotation um ihre Werkzeug-Achse und eine überlagerte Präzessionsbewegung.

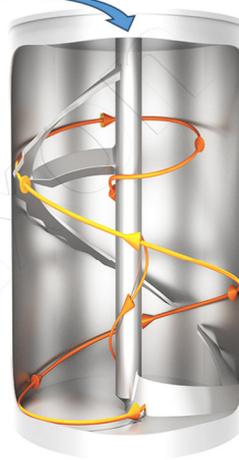
Neu ist das Mischsystem Gyraton®.

6 Großchargen-Homogenisierung in der Praxis – früher und heute

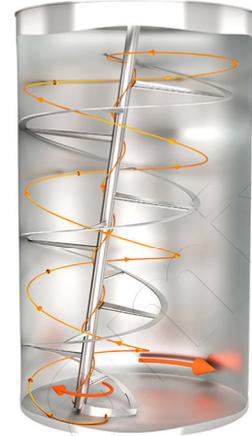
amixon® Mischer für 20 m³-Chargen in der Pulvermetallurgie



Homogenisierung Nichteisen-Metallpulver: Drehfrequenz mindestens 8 rpm



Einwellenmischer mit 140 kW Motorleistung. Mischzeit ca. 15 Minuten



Gyraton® Mischer mit 24 kW Motorleistung. Mischzeit ca. 90 Minuten

Bild 6: Preiswerte Variante der Großchargenhomogenisierung

Die drei in Bild 6 links dargestellten amixon®-Mischer wurden vor mehr als 15 Jahren von uns geliefert. Für eine 20-m³-Charge benötigen wir rund 140 kW Antriebsleistung, weil das Schraubenband mit einer Mindest-Drehfrequenz rotieren muss, um eine ideale Mischgüte zu erzielen.

Mit dem heutigen Wissensstand würden wir hier drei Gyration®-Mischer installieren. Da werden pro Mischer nur ca. 24 kW Antriebsleistung benötigt. Dann beträgt die Mischzeit zwar 90 Minuten. Das ist jedoch völlig ausreichend, da pro Schicht nur eine Charge produziert und abgefüllt werden kann. Die Investitions- und Betriebskosten sinken deutlich.

Selbstverständlich sinkt auch der Verschleiß. Er nimmt in etwa proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ab.

7 Es ist wenig wirtschaftlich, Präzisionsmischer extrem groß zu bauen.

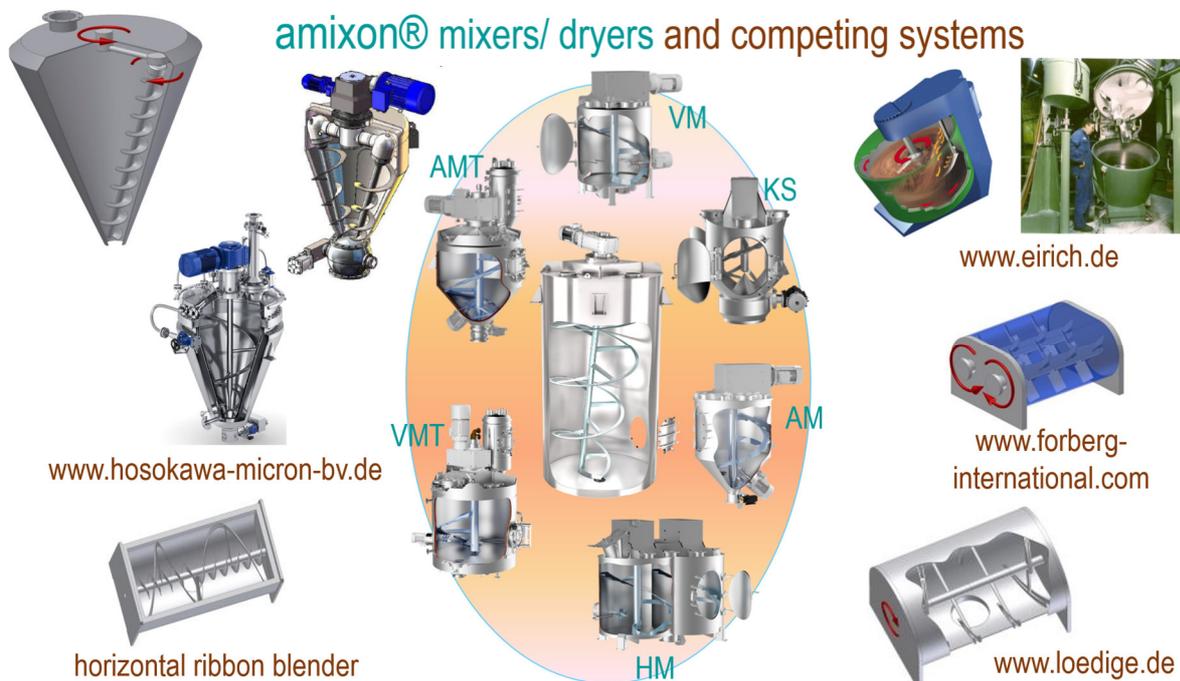


Bild 7: Präzisionsmischer verschiedener Hersteller

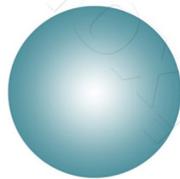
Grundsätzlich kann jeder Präzisionsmischer so konstruiert werden, dass er Großchargen von 50, 70 oder 100 m³ bewältigen kann. Dabei ist es übrigens egal, ob die Mischwerkswelle horizontal oder vertikal gelagert ist (Bild 7).

Ausschlaggebend ist der Faktor Wirtschaftlichkeit. Alle Präzisionsmischer benötigen eine relativ hohe spezifische Antriebsleistung. Diese beträgt selten weniger als 18 kW pro t Mischgut.

Im Folgenden befassen wir uns mit der Ermittlung der Mischgüte, die ein Gyration-Mischer erreichen kann. Es wird vermutet, dass dieser auch dann exzellente Mischgüten erzeugt, wenn sein Mischwerk besonders langsam rotiert.

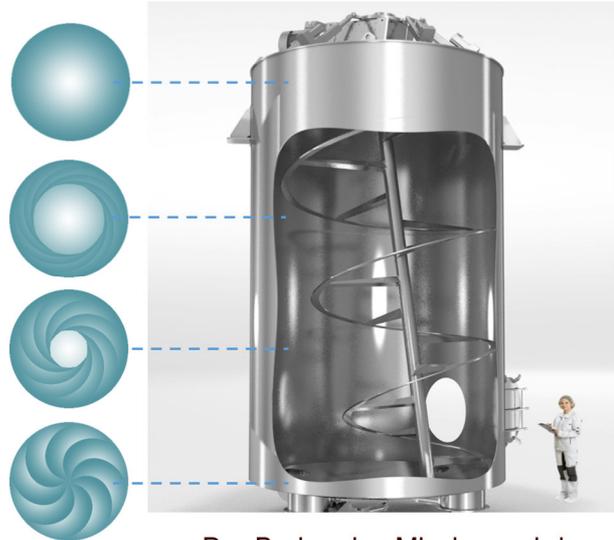
8 Mischgüthenachweis für den Gyration® Mischer

Einwellenmischer



Wendelmischwerkzeug ist ortsfest gelagert

Gyration® Mischer



Der Boden des Mixers wird zyklodisch überstrichen

Bild 8: Mischwerkrotation

links: ohne Präzessionsüberlagerung; rechts: mit Präzessionsüberlagerung

Links im Bild 8 ist ein Vertikal-Einwellenmischer der Firma amixon® zu sehen. Wenn dessen Mischwerkwendel langsamer als 8 rpm rotiert, werden die Güter zwar sicher aufwärts gefördert. Allerdings kommt unten die Radialverströmung zum Erliegen. Die Güter werden nur im Kreis gedreht. Es findet keine vollständige Durchströmung statt. Hohe Mischgütern sind so nicht erzielbar.

Das Helix-Mischwerkzeug des Gyration®-Mischers ist oben kardanisch gelagert. Der Boden des Gyration-Mischers ist ein Hohlkugelabschnitt. Die überlagerte Bewegung aus Präzession und Rotation erzeugt auf dem Boden eine zyklodische Bewegung. Verschiedenste Zirkulationsprofile sind möglich. Der Rotationsmittelpunkt wandert auf einer Kreisbahn. Jede Zone wird gleich gut agitiert. Möglicherweise kann man den Gyration®-Mischer deswegen mit extrem niedrigen Drehfrequenzen betreiben.

Es wird ein Gyration®-Mischer mit einer Chargengröße von 3 m³ zum Zweck der Erprobung gebaut. Darin werden sehr feine anorganische Stoffe wie Kaolin und Farbpigmente gemischt. Darüber hinaus wird fein gemahlene Calciumcarbonat befeuchtet und mit Farbpigmenten gemischt. Der Mischeffekt, der visuell wahrnehmbar ist, scheint beeindruckend.

Trockene wie feuchte Pulver werden gleichmäßig eingefärbt. Der Füllgrad beträgt stets 3 m³. Die kleinen Pigmentadditive werden stets an derselben Stelle hinzugefügt. Wir schütten sie als Letztes in die Mitte des Mischraums. Das ist die Zone, in der die Präzessionsbewegung der Mischwerkhelix am wenigsten ausgeprägt ist.

Alle bisher gewonnenen Ergebnisse sind vortrefflich. Im Anschluss werden weitere Mischgütetests mit wissenschaftlicher Unterstützung durchgeführt. Dabei handelt es sich um

einen amtlich zertifizierten Qualitätsnachweis für Futtermittel. Damit kann die Homogenität von Komponentenzusammensetzungen bis 1:100.000 nachgewiesen werden.

Es wird feingemahlene Nutztierfutter für Schweine und Rinder eingefüllt. Genau 1.500 kg. Das entspricht einem Chargenvolumen von ca. 2800 Liter. Als Tracer wird eine Substanz namens Patentblau verwendet. Patentblau ist extrem farbintensiv, wasserlöslich und feindispers. Es liegt desagglomeriert und trocken vor. 15 Gramm Patentblau wird von oben ins Zentrum des Mischraums geschüttet (Bild 9). Anschließend wird der Mischprozess gestartet. Insgesamt werden drei Versuche durchgeführt. Einzig die Drehfrequenz des Mischwerkzeugs wird variiert. Dabei bleibt das Verhältnis der Präzessions- zur Rotationsfrequenz gleich.



Bruttovolumen: 3,7 m³
Maximales Chargenvolumen:
ca. 3 m³



- Getreidefutter für Nutztiere: Trocken, fein gemahlen;
Schüttdichte 0,55 kg/dm³
1500 kg
- Tracer: Patentblau (Natriumsalz).
Grün-blaues Pulver, sehr fein, leicht, kristallin, trocken, rieselfähig, gut in Wasser löslich, sehr stark färbend:
Partikelgröße ca. 0,5 bis 1 µm,
Schüttdichte ca. 0,025 g/dm³
15 g
- Zusammensetzung 1: 100 000

Bild 9: Versuchsanordnung und Blick in den Gyraton®-Mischer und Zugabe des Tracers Patentblau

Nach einer genau definierten Anzahl von Umdrehungen wird das Mischwerkzeug gestoppt. An zehn verschiedenen Stellen des Mischraumes werden Proben von jeweils 30 Gramm entnommen. Diese werden in kleine Beutel dicht verpackt. Im Labor werden davon 15.000 mg entnommen und in eine normierte Küvette gefüllt. Anschließend wird eine definierte Menge Reinstwasser zugegeben.

Nach einer standardisierten Lösungszeit entsteht eine homogene Lösung. Eine monochromatische Lichtquelle durchstrahlt die Küvette. Ein Photodetektor misst die Lichtintensität einer Küvette mit klarem Wasser und der Probe. Die Lichtabsorption ist proportional zur Farbstoffkonzentration in der Probe.

Die Ergebnisse sind beeindruckend. Der Gyraton® Mischer erzeugt stets gleichbleibende Mischgütern, unabhängig von der Werkzeuggeschwindigkeit (Bild 10). Allein die Anzahl der Umdrehungen ist entscheidend für den Mischerfolg. Offensichtlich verfügen wir hier über ein Mischsystem, das sich für große Chargen skalieren lässt. Mit sehr kleinen Antriebsleistungen lassen sich ideale Mischgütern erzielen.

Gyraton® mixer measured mixing qualities

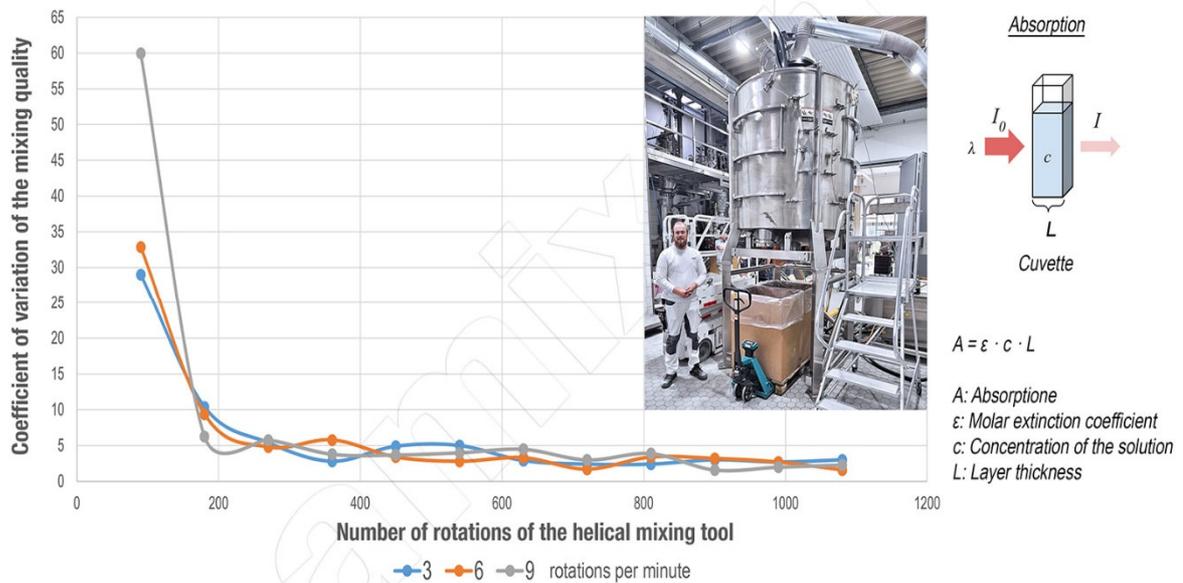


Bild 10: Offensichtlich ist der Mischgüteverlauf unabhängig von der Drehfrequenz des Helix-Mischwerkzeugs.

9 Einordnung der Ergebnisse von Mischgütern im Kontext anderer Präzisionsmischer

Um die Ergebnisse zur Mischgüte besser einordnen zu können, vergleichen wir sie mit denen unserer etablierten Präzisionsmischer. Hierzu liegen uns zahlreiche Referenzwerte vor. Sie stammen aus den unterschiedlichsten Branchen und beziehen sich auf die verschiedensten Produkte (Bild 11).

Wir können insofern nachweisen, dass dieser Gyraton®-Mischer unter den von uns gewählten Betriebsbedingungen ideale Mischgütern erzeugt.

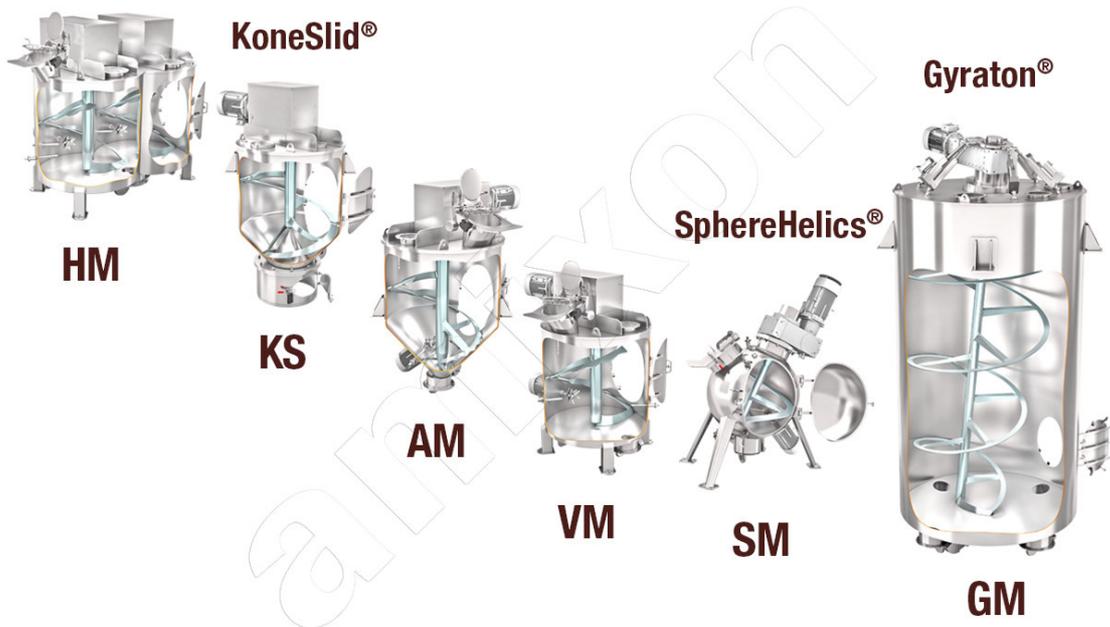


Bild 11: Fabrikationsprogramm der amixon GmbH

10 Große Flexibilität und Einsatzvielfalt

Es scheint in weiten Bereichen gültig zu sein, dass die Drehfrequenz des Gyraton-Mischwerkzeugs, multipliziert mit dessen Mischzeit, eine Konstante ergibt:

$$\text{Drehfrequenz} \cdot \text{Mischzeit} = C_1 \quad (1)$$

Aus der langjährigen Betriebspraxis ist bekannt, dass das Antriebsdrehmoment vertikaler Wendelmischer weitgehend konstant bleibt, solange ein „Schubmischen“ stattfindet. Insofern gilt auch, dass das Produkt aus Antriebsleistung und Mischzeit konstant ist:

$$\text{Antriebsleistung} \cdot \text{Mischzeit} = C_2 \quad (2)$$

In der Regel werden ohnehin keine hohen Anforderungen an die Mischzeit eines Silomischers gestellt. Die Zeit der Einlagerung wird für die Homogenisierung genutzt.

Wenn also keine Eile geboten ist, kann der Gyraton® Mischer beispielsweise mit der momentan verfügbaren Solarenergie vom Dach betrieben werden. Am Ende ist eine große Pulvercharge ideal genau homogenisiert.

Nehmen wir einmal an, dass im Hamburger Hafen ein 40-Fuß-Hochseecontainer angeliefert wird. Dieser ist mit gemahlenem Erz seltener Erden gefüllt. Dann stellt sich die Frage nach dem tatsächlichen Gehalt an seltenen Erden. Ein 40-Fuß-Hochseecontainer hat ein Volumen von ungefähr 70 m³.

Ein Gyraton®-Mischer mit 70 m³ Nutzinhalt kann hier einen wertvollen Dienst leisten, denn er homogenisiert die Ware preiswert. Dafür benötigt er beispielsweise einen halben oder einen ganzen Tag. Anschließend wird im Mischraum eine Produktprobe entnommen und analysiert. Nach der Analyse steht zweifelsfrei fest, wie viel Wertstoff sich in dieser Lieferung befindet und wie der Wert der Lieferung abzurechnen ist.

Zudem können die vielen nachgelagerten Aufbereitungsschritte sehr viel besser optimiert und gesteuert werden.

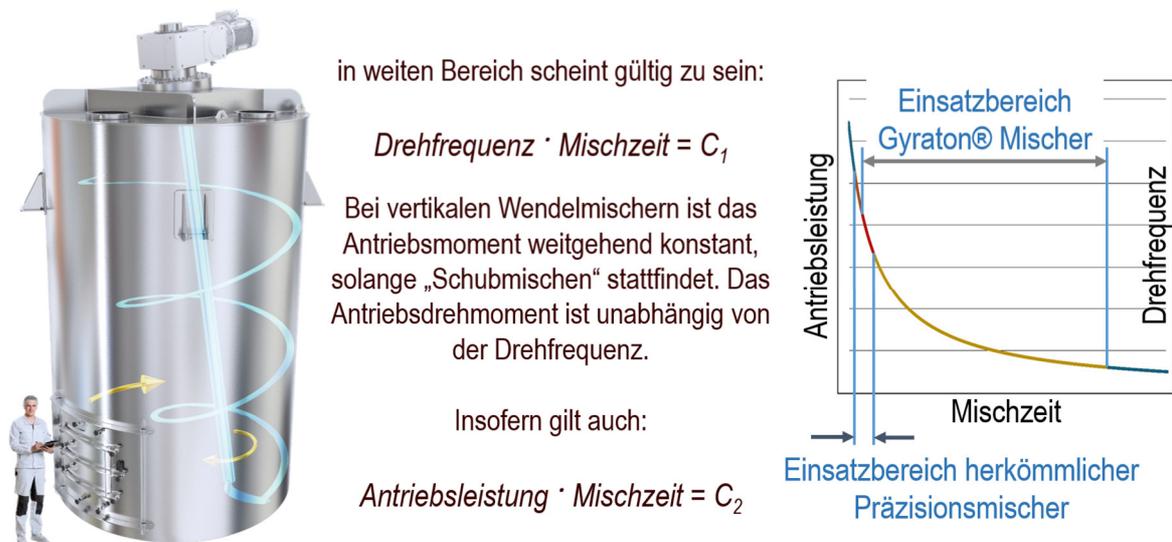


Bild 12: Das Einsatzspektrum ist breit.
Je nach Leistungsbereitstellung verändert sich die Mischzeit.

Ähnliche Fragestellungen ergeben sich auch beim Einkauf großer Mengen von Kunststoffen, Gewürzen, Kaffee oder Tee.

11 Ausblick und Zusammenfassung

Es gibt gute Gründe, davon auszugehen, dass das Gyraton-Mischsystem interessante Vermarktungschancen bietet (Bild 13).

Überall, wo Grundstoffaufbereitung stattfindet – insbesondere auch bei der Gewinnung von Alkalimetallen, wozu auch die Lithiumgewinnung gehört –, fallen große Mengen an Rohstoffen an. In guten Vorkommen beträgt die Lithiumanreicherung allenfalls 0,006 %. Um 1 kg reines Lithium zu gewinnen, müssen 16,7 t Rohmasse aufbereitet werden. Oder um 1 kg batterietaugliches 1 kg Lithiumhydroxid-Monohydrat zu erhalten, müssen 4,8 t Rohmaterial geschürft und verarbeitet werden.

Die Prozessketten sind lang und umfassen unter anderem die Zerkleinerung, Klassierung, Dichtentrennung, Suspendierung in Aufschlusssäuren, chemische Extraktion, Fällung, Flockung, Sedimentation, Filtration, Trocknung, Kalzinierung und Mahlung. Immer sollte sich eine Homogenisierung anschließen. Sie steht am Anfang der jeweils nächsten Prozessstufe.

Je homogener die Ausgangsstoffe vorliegen, desto effizienter kann der nächste Prozess gesteuert werden und desto höher sind die Ausbeuten. Dies gilt in ähnlicher Form auch für das Recycling und für vielstufige Verfahren in der Synthesechemie.

pharmazeutische
Wirkstoffe



Bauchemie,
Recyclingindustrie



Chemie und
Lebensmittelindustrie
Stabilisatoren,
Verdickungsmittel,
Trägerstoffe,



das Periodische System der Elemente

H																		He																																																																									
Li		Be		Wasserstoff (Gas)										Metalle								Edelgase		Anionen				Kationen		Li		B		C		N		O		F		Ne																																																	
Na		Mg		Alkalimetalle										Hauptmetalle								Lanthanoide		Übergangsmetalle		Halbmetalle		Azblode		Edelmetalle		Al		Si		P		S		Cl		Ar																																																	
K		Ca		Erdsalkalimetalle										Hauptmetalle								Lanthanoide		Übergangsmetalle		Halbmetalle		Azblode		Edelmetalle		K		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr																																													
Rb		Sr		Yttrium										Hauptmetalle								Lanthanoide		Übergangsmetalle		Halbmetalle		Azblode		Edelmetalle		Rb		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe																																													
Cs		Ba		Lanthanoide										Hauptmetalle								Lanthanoide		Übergangsmetalle		Halbmetalle		Azblode		Edelmetalle		Cs		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn																																													
Fr		Ra		Actinoide										Hauptmetalle								Lanthanoide		Übergangsmetalle		Halbmetalle		Azblode		Edelmetalle		Fr		Au		Pt		Ag		Cu		Ni		Co		Fe		Mn		Cr		V		Ti		Sc		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr	
La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr																																	

Erz- und
Grundstoffauf-
bereitung



Bild 13: In nahezu allen Branchen der Stoffaufbereitung liegen Schüttgüter trocken, feucht oder suspendiert vor.



Bild 14: Die Grundstoffaufbereitung erfordert lange Prozessrouten. Zu Beginn sind große Rohstoffmengen zu verarbeiten.

Große Chargen sind bei der Herstellung von pharmazeutischen Basis-Wirkstoffen (API) zu homogenisieren. Gleichermäßen sind Trägerstoffe und funktionelle Additive für Pharmazeutika, Nährstoffe, Stärkederivate, Methylcellulose, Pektin und Gelatine großvolumig zu homogenisieren.

Quellennachweis: Amixon GmbH

www.fmt.ovgu.de/schuettgut

Institut für Engineering von Produkten und Systemen
Fakultät für Maschinenbau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

39106 Magdeburg
Universitätsplatz 2
Gruson Gebäude (Geb. 10)

Telefon: 0391 - 67 58604
www.ieps.ovgu.de

ISBN: 978-3-948749-55-2