

OTTO-VON-GUERICKE-  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG

**COMPUTERSIMULATION  
ORGANISATION  
VIRTUALISIERUNG  
INNOVATION  
DIGITALISIERUNG**

**25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik Magdeburg**

22. und 23. September 2021



Institut für  
Logistik und Materialflusstechnik



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

am 22. und 23. September 2021 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 Logistik und Materialflusstechnik (ILM)



IBAF Engineering GmbH

in fachlicher Trägerschaft  
des VDI-Fachausschusses 307 Schüttgut-Fördertechnik



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

Herausgegeben als Begleitband zur gleichnamigen Fachtagung  
am 22. und 23. September 2021 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.



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 Lizenz (BY-SA). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell, sofern der neu entstandene Text unter derselben Lizenz wie das Original verbreitet wird.

(Lizenz-Text: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>)

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. Schaubilder, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Erschienen 2021 im Universitätsverlag Magdeburg

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2021.

Umschlaggestaltung: Arnhild Gerecke

Druck: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

ISBN: 978-3-948749-04-0

<https://doi.org/10.25673/36794>

---

Alle Rechte vorbehalten

Manuskriptvordrucke. Die Autoren zeichnen für ihre Beiträge selbst verantwortlich. Die Herausgeber übernehmen keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung der Rechte Dritter. Schadenersatz für fehlerhafte, unvollständige oder nicht abgedruckte Beiträge ist ausgeschlossen. Die Reproduktion der veröffentlichten Artikel ist ohne Genehmigung der Herausgeber nicht gestattet.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<i>S. Vollrath, M. Dilefeld, H. Otto, A. Katterfeld</i> Auslegung, Simulation und Realisierung eines Abzugsförderers für das Projekt Chuquicamata Underground.....	5
<i>M. Ziegler</i> Praxiserfahrungen mit BeltGenius – Überwachung und Auswertung des Betriebsverhaltens einer Bandanlage im chilenischen Kupfererzbergbau mittels Digitalem Zwilling.....	21
<i>R. Wirtz, F. Severin, M. Herzog</i> Der Weg zum Hochleistungskipper .....	39
<i>E. Frenzel, S. Kaverinski, P. Martin, P. Sicker</i> FAM Green Power – Nachhaltig in die Zukunft .....	63
<i>C. Kirsch</i> Der Einsatz von Smart Glasses als 'remote'-Lösung in der Schüttgutfördertechnik.....	75
<i>Y. Chumachenko, C. Richter, A. Katterfeld</i> Smart Monitoring im Einsatz: LoRaWAN™ basiertes Sensornetzwerk zur permanenten Überwachung von Förderanlagen.....	83
<i>T. Wendel-Eichholz, F. Leaman Weiffenbach, E. Clausen</i> Automatisierungs- und Überwachungsmethoden mittels Infrarotthermographie in rauen Umgebungen.....	99
<i>R. Schneider, S. Simon, T. Rieder, T. Fritsch, S. Henschler, J. Magister</i> Evaluierung von geeigneten Grenzwerten für die axiale Verschiebbarkeit (Axialspiel) bei Tragrollen ab einer Lagergröße von 6308 und Vorstellung eines neuartigen Axialspielprüfgerätes.....	111
<i>M. Handreg, U. Köhler</i> Konzentriertes Hersteller- und Betreiberwissen in einem gemeinsamen IT-Tool zur systematischen Optimierung von Schüttgutanlagen.....	129
<i>N. Stamm</i> Automatische Lössdeponierung eines Tagebauabsetzers der RWE Power AG .....	137

<i>F. J. Piso, R. Kamps</i> Leichtbaukonzepte am Beispiel von Kranen und Schiffsentladern für den Güterumschlag in Hafenanlagen.....	153
<i>T. Schöneck, M. Golder</i> Mechanische Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken.....	165
<i>Y. Tan, M. Dahlenburg, S. Kessler, J. Fottner</i> Virtual Prototyping mit DEM zur Entwicklung eines Near-Nozzle-Mixing Verfahrens für den additiven 3D Betondruck für den Roboter-Einsatz .....	181
<i>T. Rößler, A. Katterfeld</i> Untersuchungen zur Vorhersage des abrasiven Prall- und Gleitverschleißes auf Basis der Diskrete Elemente Methode.....	197
<i>C. Schmidt, M. Kanus, L. Overmeyer</i> Aufbau von FEM-Gurtmodellen zur Ermittlung des Eindrückrollwiderstandes.....	217
<i>M. Prenner, M. Denzel</i> Dynamisches Übergabesystem zur Reduktion des Partikelbruchs .....	231
<i>J. Lampke, M. Zlatev, S. Weyrauch, H. Müller</i> Materialbrücken, Entmischungen, Staub – Technische Beispiele der Vermeidung durch Sieben und Pelletieren.....	243
<i>R. Bunse, D. Becker</i> Praxisorientierte Explosionsprüfungen an einem Schwingsieb im Originalmaßstab – Neue Lösungskonzepte zum konstruktiven und wirtschaftlichen Explosionsschutz .....	253
<i>K. Rosenberger</i> Optimierung einer Logistikkette mittels cloudbasierter Füllstandsmessung – Bestandsmanagement für Silos und Container.....	263

*Ankündigung:*

26. Fachtagung Schüttgutfördertechnik

14. und 15. September 2022

Technische Universität München



## Geleitwort

Sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,

diese Fachtagung ist einerseits eine Jubiläumsveranstaltung, denn es ist die 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik – auch wenn sie erst 26 Jahre nach der ersten Tagung stattfindet, nachdem die Tagung im letzten Jahr leider pandemiebedingt ausfallen musste. Zu diesem Jubiläum sei den Veranstaltern und Organisatoren der TU München und der Universität Magdeburg, Prof. Johannes Fottner und Prof. André Katterfeld sowie allen im Vorder- und Hintergrund beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ganz herzlich gratuliert.

Ebenfalls gratuliere ich allen Referenten, die die Gelegenheit haben, hier über ihre spannenden Themen zu berichten. Und vor allem gratuliere ich allen Teilnehmern zu der klugen Entscheidung, an dieser Veranstaltung teilzunehmen.

Eine weitere Besonderheit dieser 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik ist die Tatsache, dass sie in diesem Jahr erstmalig unter der fachlichen Trägerschaft des VDI Fachausschusses 307 Schüttgut-Fördertechnik stattfindet. Und das ist der Grund, warum mir die ehrenvolle Aufgabe dieser Begrüßung zufällt. Ich selbst bin Professor für Baumaschinen an der TU Dresden, aber das ist nicht der Grund, warum ich hier stehe: Ich bin auch Vorsitzender des VDI Fachausschusses Schüttgut-Fördertechnik. Und als solcher will ich die Gelegenheit nutzen, Ihnen diesen Fachausschuss und seine Arbeit kurz vorzustellen. Und Sie dabei auch aufrufen, sich selbst mit Ihren Erfahrungen einzubringen. Sei es zeitlich begrenzt bei der Erarbeitung einer bestimmten Richtlinie (RL) oder aber, wenn Sie sich für die Schüttgut-Fördertechnik in ihrer gesamten Breite interessieren und dort Beiträge liefern können, gerne auch als ständiges Mitglied des Fachausschusses.

Aber zunächst ein paar Worte zum VDI: Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) ist mit 140.000 persönlichen Mitgliedern der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands und versteht sich selbst als Sprecher der Ingenieur:innen und der Technik. Gleichzeitig ist der VDI der drittgrößte technische Regelsetzer in Deutschland, der jedes Jahr rund 200 neue oder überarbeitete VDI-Richtlinien veröffentlicht. Die insgesamt aktuell gültigen 1.200 Richtlinien beschreiben den Stand der Technik und sind damit allgemein anerkannte technische Regeln. VDI-Richtlinien zeichnen sich durch besondere Anwendungsnähe aus, sie beschreiben Auswahlkriterien für Maschinen und Komponenten, deren Auslegung und Dimensionierung, die einzuhaltenden Einsatzbedingungen sowie Hinweise zum wirtschaftlichen, zuverlässigen und sicheren Betrieb.

Die Anwendung von VDI-Richtlinien bei der Gestaltung und Auslegung von Maschinen und Anlagen ist nicht vorgeschrieben, ebenso wie die Anwendung von Normen nicht vorgeschrieben ist. Aber: Durch Einhaltung von Normen und Richtlinien ist sichergestellt, dass „mindestens grundlegende, marktübliche Anforderungen“ erfüllt werden, dass also das technische System dem Stand der Technik entspricht. Damit kann der Anwendernutzen der VDI-Richtlinien beschrieben werden:

- Definition eines Qualitätsstandards, Abgrenzungsmöglichkeit für „Qualitätsanbieter“;

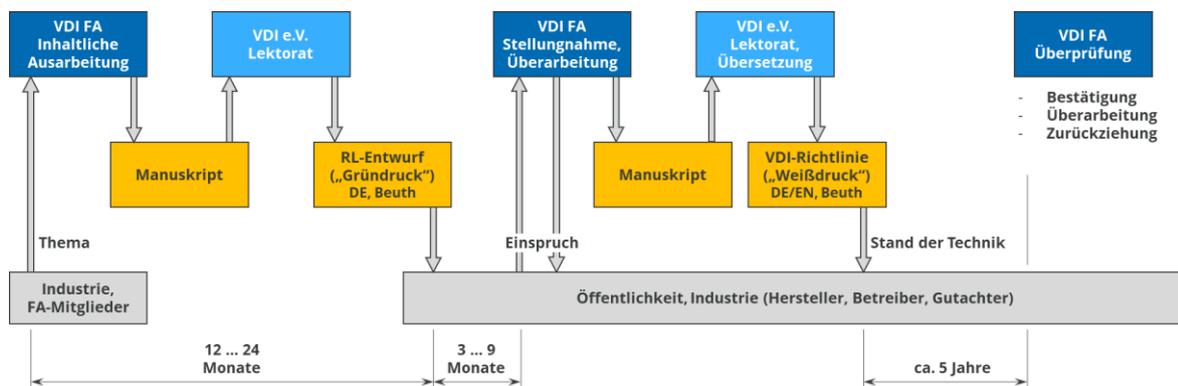
- Gesprächsgrundlage für den Austausch zwischen Betreiber und Hersteller;
- Basis für Spezifikationen und vertragliche Vereinbarungen;
- Grundlage für Streitigkeiten und Gutachten: die Ausführung gemäß VDI-RL spricht für eine Orientierung am Stand der Technik.

Die inhaltliche Verantwortung für die Richtlinienarbeit liegt in den zahlreichen Fachausschüssen, die sich innerhalb der Strukturen des VDI einordnen und deren Arbeit durch ehrenamtliche Mitarbeit getragen wird. Die Fachausschüsse beschäftigen sich mit der Entwicklung, Überprüfung und Aktualisierung von Richtlinien ihres jeweiligen Fachgebietes. Einer dieser Fachausschüsse ist der FA 307 Schüttgut-Fördertechnik innerhalb des Fachbereiches „Technische Logistik“.

Die beteiligten ehrenamtlichen Mitarbeiter:innen profitieren vom Erfahrungsaustausch und von der Erweiterung ihres persönlichen Netzwerkes. In der Regel unterstützt der Arbeitgeber die Mitwirkung im VDI Fachausschuss dadurch, dass ein Anteil der Arbeitszeit für die Gremienarbeit aufgewendet werden kann sowie durch die Übernahme der im Rahmen von Gremiensitzungen anfallenden Reisekosten. Im Gegenzug profitiert der Arbeitgeber durch:

- Vertretung von Standpunkten und Interessen der eigenen Organisation (Definition des Standes der Technik);
- Entsendung von Mitarbeitern als Botschafter und Netzwerker des Unternehmens;
- Informationsvorsprung durch frühzeitige, exklusive Information;
- Qualifizierung von Mitarbeitern, kostengünstige Weiterbildung.

Wie entsteht eine VDI-Richtlinie? Ausgangspunkt ist ein Standardisierungsbedarf, der in der Regel aus der Industrie – meist direkt über die beteiligten Mitarbeiter eines Fachausschusses – identifiziert wird (Bild 1). Sofern der Fachausschuss über die notwendigen Kompetenzen verfügt, benennt er einige seiner Mitglieder als Richtlinien-Arbeitskreis. Bei Bedarf werden weitere externe Experten angesprochen und um Mitwirkung gebeten.



**Bild 1:** Entstehungsprozess einer VDI-Richtlinie

In diesem RL-Arbeitskreis entsteht ein Manuskript, nach inhaltlicher Freigabe des Manuskriptes durch den Fachausschuss kümmert sich dann die VDI Organisation um die redaktionelle Aufbereitung und die Richtlinie wird als „Entwurf“ im BEUTH-Verlag veröffentlicht. Der Zeitrahmen zwischen Anstoß für eine neue RL und Veröffentlichung des

Gründrucks liegt typischerweise bei 12 bis 24 Monaten, allerdings stark abhängig vom Umfang und von der Komplexität des Themas.

Innerhalb einer Frist von 3-9 Monaten können Einsprüche formuliert werden, diese werden im Gremium beraten und entschieden. Der Einsprecher bekommt eine Rückmeldung, bei Bedarf wird die RL inhaltlich angepasst. Abschließend erfolgen die finale redaktionelle Bearbeitung und die Übersetzung durch die VDI-Organisation, bevor die endgültige Richtlinie in deutscher und englischer Sprache über den BEUTH-Verlag veröffentlicht wird.

Damit geht die RL in die Nutzungsphase über, d. h. sie kann beispielsweise von Herstellern, Betreibern und Gutachtern als Grundlage zur Verständigung über den Stand der Technik herangezogen werden. Nach rund 5 Jahren wird eine RL dann durch den Fachausschuss überprüft. Der Ausschuss entscheidet darüber, was mit der RL passiert. Sie wird entweder unverändert bestätigt (die RL ist in der veröffentlichten Fassung weiterhin aktuell und gültig) oder überarbeitet (die RL wird durch den Fachausschuss aktualisiert, evtl. auch erweitert) oder zurückgezogen (Teile der RL entsprechen nicht mehr dem aktuellen Stand, die RL wird vom Ausschuss aber auch nicht überarbeitet). Zurückgezogene RL sind weiterhin existent, werden weiter über den BEUTH-Verlag verkauft und können auch in Vereinbarungen zwischen Hersteller und Betreiber als Grundlage herangezogen werden. Mit der Zurückziehung sind diese RL nicht automatisch „falsch“, es ist nur nicht mehr sichergestellt, dass ein Fachgremium für die Gültigkeit und Aktualität der RL steht.

Der Fachausschuss 307 Schüttgut-Fördertechnik besteht aus rund 30 ehrenamtlich tätigen Erfahrungsträgern der Branche, mit beruflichem Hintergrund vom Anlagenbetreiber über Anlagenbauer, Maschinen- und Komponentenhersteller bis zu Dienstleistern und Hochschulen. Hinzu kommt ein hauptamtlicher wissenschaftlicher Mitarbeiter des VDI. Einmal jährlich trifft sich das Gremium persönlich an wechselnden Standorten, ein zweites Treffen des gesamten Gremiums findet online statt. Daneben treffen sich die auf jeweilige Richtlinienprojekte spezialisierten Arbeitskreise regelmäßig online zur Abstimmung der inhaltlichen Bearbeitung.

Der VDI Fachausschuss 307 ist aktuell verantwortlich für rund 35 gültige VDI-Richtlinien, fünf weitere RL sind in der Entstehungsphase und noch nicht veröffentlicht (Tabelle 1). Wenn Sie dabei einen inhaltlichen Beitrag leisten wollen und können, sprechen Sie den Verfasser gerne an.

Wie eingangs erwähnt, hat der VDI Fachausschuss 307 erstmalig in diesem Jahr die fachliche Trägerschaft der Fachtagung Schüttgutfördertechnik übernommen. Damit stehen wir als VDI Fachausschuss den Veranstaltern TU München und Universität Magdeburg bei der inhaltlichen Ausgestaltung der Tagung beratend und unterstützend zur Seite. Somit fühle ich mich ein kleines bisschen mitverantwortlich für das Gelingen der nun beginnenden Veranstaltung und hoffe noch mehr als sonst, dass alles gelingt, dass wir interessante Vorträge zu hören und sehen bekommen und dass Sie und wir alle auch außerhalb der Vortrags-Sessions in einen guten Austausch kommen.

Prof. Dr.-Ing. Frank Will

Stiftungsprofessur für Baumaschinen, Technische Universität Dresden

Vorsitzender VDI Fachausschuss 307 Schüttgut-Fördertechnik

**Tabelle 1:** Richtlinien in Verantwortung des VDI Fachausschusses 307 Schüttgut-Fördertechnik

RL-Nr.	RL-Thema
2320	Trogkettenförderer
2322	Auslegung und Errichtung von Gurtförderern für Schüttgut
2324	Senkrecht-Becherwerke
2329	Pneumatische Förderanlagen; Grundlagen, Anlagen, Baugruppen
2330 Bl. 1	Schneckenförderer für Schüttgut; Allgemeine Beschreibung
2330 Bl. 2	Schneckenförderer für Schüttgut; Auslegung horizontalen/leicht geneigten Sch.
2330 Bl. 3	Schneckenförderer für Schüttgut; Auslegung von vertikalen Schneckenförderern
2330 Bl. 4	Schneckenförderer für Schüttgut; Auslegung von stark geneigten Schneckenförderern
2333	Schwingförderer für Schüttgut
2341	Gurtförderer für Schüttgut; Tragrollen und Tragrollenabstände
2379	Gurtförderer für Schüttgut; Anfragebogen
2694	Bunker und Silos; Beschickung, Lagerung und Austrag von Schüttgut
3602 Bl. 1 E	Gurtförderer für Schüttgut; Antriebe, Bauarten
3602 Bl. 2 E	Gurtförderer für Schüttgut; Antriebe, Betriebsweise
3603	Gurtförderer für Schüttgut; Spann-, Ablenk- und Umkehrstationen
3604	Gurtförderer für Schüttgut; Übergabeeinrichtungen
3605	Gurtförderer für Schüttgut; Reinigungseinrichtungen
3606	Gurtförderer für Schüttgut; Förderstrecke
3607	Gurtförderer für Schüttgut; Maßnahmen zur Überwachung d.Funktionstüchtigkeit
3608	Gurtförderer für Schüttgut; Fördergurt
3622	Gurtförderer für Schüttgut; Gurttrommeln
3623	Metallabscheider in Gurtförderern und Schüttguttransportanlagen
3671	Pneumatische Förderanlagen; Empfehlungen zu Anforderungen u. Eigenschaften
3970	Leitfaden für die Aufstellung eines Instandhaltungsplans für Stetigförderer
3971 E	Mechanische Steil- und Senkrechtförderer für Schüttgut; Bauarten und Auswahl
3972	Lagerplätze für Schüttgut; Verfahren und stetige Fördereinrichtungen
4435 E	Kurvengängige Gurtförderer für Schüttgut; Bauarten und Auswahl
4436	Messen von Massen- und Volumenströmen in der Schüttgut-Fördertechnik
4437	Plattenbandförderer für Schüttgut; Übersichtsblätter Stetigförderer
4438 E	Schlauchgurtförderer
4456 E	Bandanlagen-Bewertungsanalyse (BBA) zur Effizienzsteigerung i.d. Fördertechnik
4459 E	Gestaltung energieeffizienter Muldengurtförderer
4473	Abrasionsverschleißprüfstand Komp. v. Schüttgutförd.; Verschleißtopfverfahren
xxxx (NEU)	Senkrecht-Becherwerke: Überwachungssysteme
4439 (NEU)	Reduzierung von Staubentwicklung an Gurtübergabestellen und Freilagern
4457 (NEU)	Zellenradschleusen für Schüttgut
4484 (NEU)	Entladesysteme für Schüttgut
5022 (NEU)	Auslegung und Betrieb von Gurtförderern bei tiefen Temperaturen

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Auslegung, Simulation und Realisierung eines Abzugsförderers für das Projekt Chuquicamata Underground

Steffen Vollrath

Mario Dilefeld

Hendrik Otto

André Katterfeld



Steffen Vollrath, M. Eng.  
Dr.-Ing. Mario Dilefeld  
TAKRAF GmbH  
Torgauer Straße 336  
04347 Leipzig



Dr.-Ing. Hendrik Otto  
IBAF GmbH  
Listemannstr. 10a  
39104 Magdeburg



Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg



# Auslegung, Simulation und Realisierung eines Abzugsförderers für das Projekt Chuquicamata Underground

*Das Fördersystem Chuquicamata Underground transportiert gebrochenes Kupfererz aus unterirdischen Silos entlang eines 7 km langen Tunnels an die Oberfläche und überwindet dabei eine Höhendifferenz von 1 km. An der Oberfläche angelangt, wird das Material über einen 6 km langen Langstreckenförderer zur Aufbereitungsanlage transportiert.*

*Dabei setzt das Projekt Chuquicamata Underground mit einer installierten Gesamtantriebsleistung von 58 MW und der weltweit ersten Anwendung des neuentwickelten Stahlseilgurts St 10.000 Maßstäbe in der Fördertechnik.*

*Diese Untersuchung konzentriert sich auf die Auslegung der am Beginn der Förderkette stehenden Abzugsförderer, die gebrochenes Kupfererz aus 60 m hohen, unterirdischen Silos austragen. Dabei werden die Grundlagen der Silotheorie, die Auslegung und konstruktive Umsetzung des Abzugsförderers, die Ermittlung der Abzugswiderstände mittels DEM-Simulation sowie die ersten Ergebnisse aus dem laufenden Betrieb besprochen.*

## 1 Einleitung

### 1.1 Projekt Chuquicamata Underground

Im Jahre 2019 wurde die Erzgewinnung in einer der größten Kupfererzminen der Welt, in Chuquicamata, vom Tagebaubetrieb auf Untertageförderung umgestellt.

Die Mine Chuquicamata befindet sich im Norden Chiles und ist seit 1915 in Betrieb. Besitzer ist Codelco, der staatliche chilenische Bergbaukonzern. Codelco ist der größte Kupferproduzent und der zweitgrößte Molybdänproduzent der Welt.

Durch den Abbau im Tagebaubetrieb in den letzten 100 Jahren entstand eine Mine von 1.000 m Tiefe, 5.000 m Länge und 3.000 m Breite. Nach der Gewinnung des Gesteins durch Bohren und Sprengen wurden Erz und Abraum mit Trucks zur Aufbereitung oder Verkipfung zur Oberfläche transportiert.



**Bild 1:** Übergabestelle vom untertägigen Tunnelförderer zum Überlandförderer

Der Abbau tiefer liegender Erzkörper ist mit diesem Gewinnungs- und Transportverfahren jedoch nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll darstellbar. Zudem führen größere Fahrwege der Trucks, verbunden mit einer erhöhten Fahrzeuganzahl, zu erhöhtem Aufwand für Fahrzeugwartung sowie für Treibstoff und nicht zuletzt zu einer größeren Umweltbelastung.

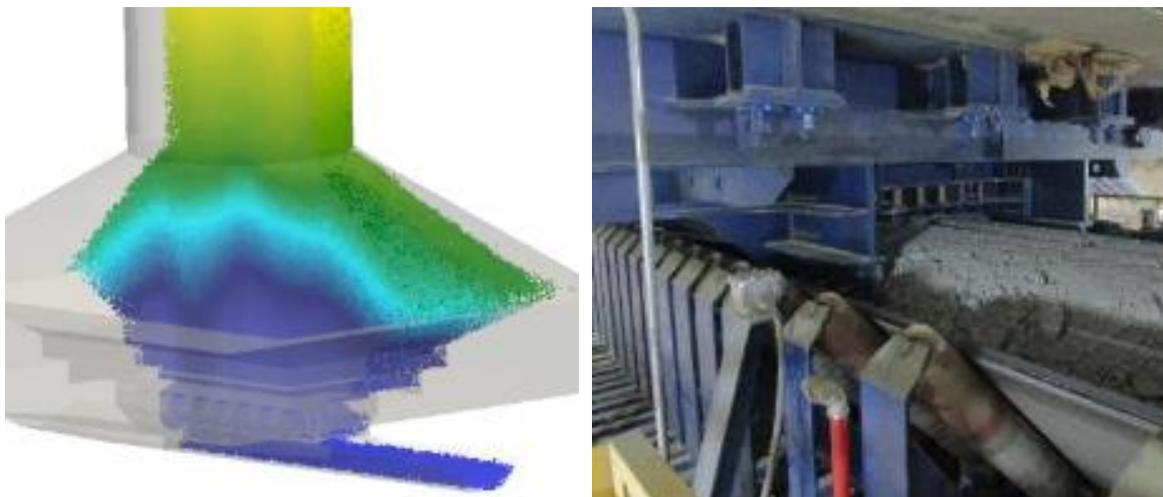
TAKRAF erhielt 2015 den Auftrag, die Ausrüstung für den Transport des untertägig gewonnenen Materials zum übertägigen Aufbereitungsort zu liefern (vgl. Bild 1). Es gibt entlang des Förderweges keine Redundanzen, so dass einer hohen Anlagenverfügbarkeit, einem minimalen Anlagenverschleiß und einer einfachen Wartung der Komponenten eine besondere Bedeutung zukommt.

## 1.2 Untertägiger Siloabzug

Das von TAKRAF gelieferte Fördersystem beginnt mit dem untertägigen Siloabzug. Zwei Materialspeicher in Form vertikaler zylindrischer Öffnungen mit einem Durchmesser von 6 m und einer Höhe von 60 m entkoppeln die Materialströme aus der Gewinnung vom Transport zur Erzverarbeitung.

Zum kontrollierten Materialabzug werden Feeder-Conveyor eingesetzt, die das Material vom Abzugsbereich entlang der 30 m langen Förderstrecke zum Gutübergabepunkt transportieren. Anders als bei klassischen Belt-Feedern, bei denen das Material auf einem annähernd flachen Gurt entlang stehender Schurrenseitenwände bewegt wird, ist bei diesen Feeder-Conveyorn der Fördergurt entlang der gesamten Förderstrecke 45 Grad gemuldet. Schurren gibt es nur im Siloabzugsbereich (vgl. Bild 2). Wie beim Belt-Feeder wird die Fördergutkontur auf dem Gurt durch eine Scherkante vorgegeben. Hier hat die Gutoberfläche statt der vom Belt-Feeder bekannten geraden Kontur die Form eines Kreisabschnitts, die einen maximalen Füllgrad des Förderquerschnitts erlaubt. Der Abzugsgutstrom wird durch die Variation der Fördergeschwindigkeit definiert.

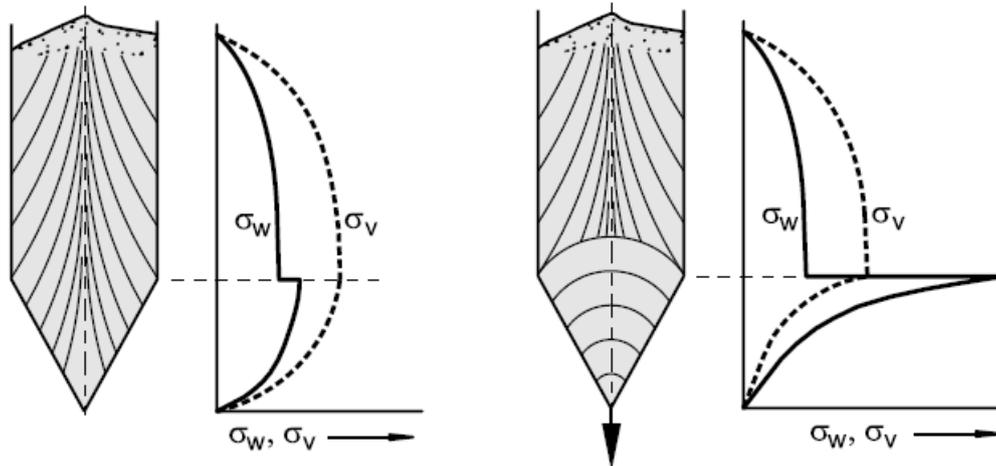
Der Wegfall der stehenden Seitenwände entlang des Förderweges führt zu einem geringeren Verschleiß und somit zu reduziertem Wartungsaufwand, verbunden mit Energieeinsparungen in der Größenordnung von etwa 25 %.



**Bild 2:** Siloabzug in DEM-Simulation und ausgeführte Konstruktion in der Mine

### 1.3 Problemstellung bei der Auslegung des Abzugsförderers

Die Lasten auf das Abzugsorgan und die damit einhergehenden Abzugskräfte sind in großem Maße abhängig vom Spannungsverlauf im darüber liegenden Silo. Bei der Berechnung des Spannungsverlaufes wird in der Literatur zwischen zwei Hauptzuständen unterschieden, dem Füllzustand und dem Entleerungszustand (vgl. Bild 3).



**Bild 3:** Theoretischer Verlauf der Wandnormalspannung  $\sigma_w$  und Vertikalspannung  $\sigma_v$  für den Füllzustand (links) und Entleerungszustand (rechts) [1]

Im Füllzustand wird davon ausgegangen, dass im gesamten Silo, also sowohl im Schaft- als auch im Trichterbereich, ein aktiver Spannungszustand vorliegt. Während der Spannungsverlauf im Schaft im Füll- und Entleerungszustand identisch ist, stellt sich im Trichter durch das Ausbrücken bzw. Abstützen des Materials ein passiver Spannungszustand beim Entleeren ein, welcher zu einer weitaus geringeren Vertikalspannung und damit zu geringeren Kräften am Abzugsorgan führen kann.

Für die Antriebsauslegung des Abzugsorgans sind beide Zustände von Bedeutung, da der Entleerungszustand als Grundlage für die Ermittlung des Beharrungsantriebsmoments dient und der Füllzustand das maximal erforderliche Antriebsmoment bzw. Losbrechmoment bestimmt.

Die Vertikalspannung im Siloschaft wird mit Hilfe der Scheibenelementmethode nach JANSSEN [2] berechnet. Nach der Silotheorie von JANSSEN [2] steigt die Vertikalspannung bei der Befüllung eines Silos mit Schüttgut nicht linear an, wie bei Fluiden, sondern in Form einer e-Funktion. Aus diesem Grund entstehen vergleichsweise geringere Vertikalspannungen. Sie erreichen ein stationäres Maximum, da sich das Schüttgut aufgrund der Wandreibung an der Siloinnenwand abstützt.

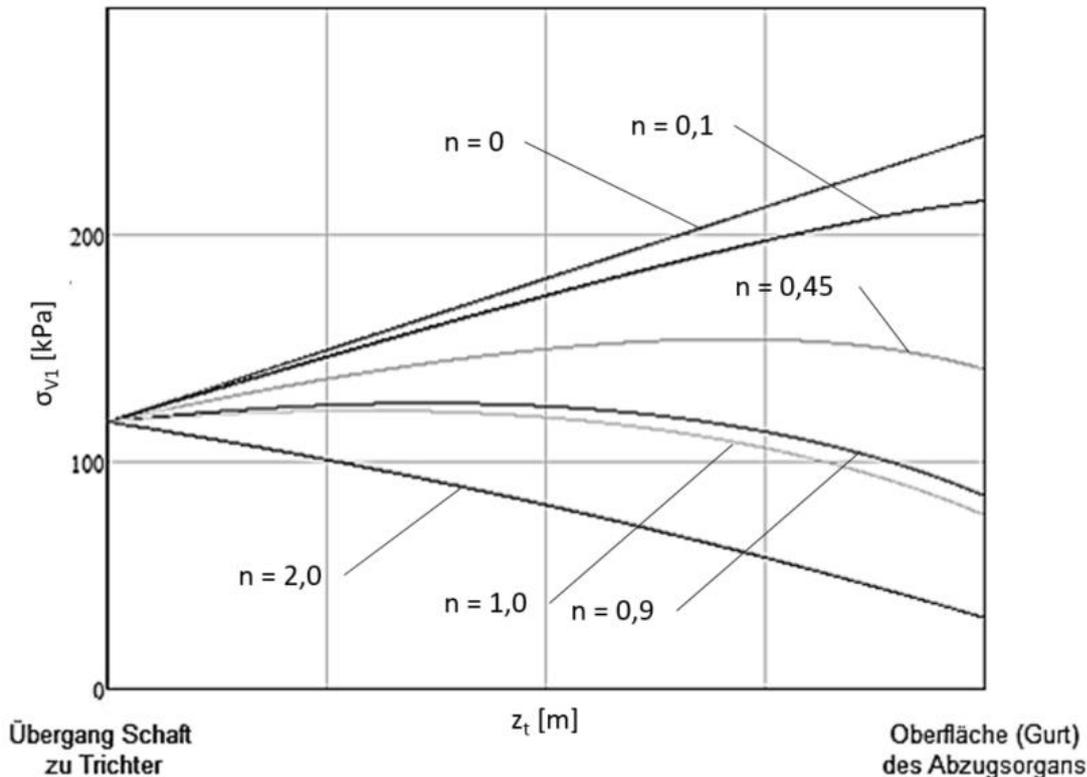
Als weitaus komplizierter erweist sich die Berechnung des Vertikalspannungsverlaufs im Trichter des Silos. Die meisten Ansätze zur Bestimmung der Vertikalspannungen im Trichter basieren auf einem Kräftegleichgewicht, das die Berechnungsmethode nach JANSSEN [2] auf Scheibenelemente im Trichter anwendet.

Die berechneten Vertikalspannungen hängen in großem Maße vom Wert des Parameters  $n$  ab, der wiederum von der Trichtergeometrie  $m$  (keilförmig oder axialsymmetrisch), dem Wandreibungswinkel  $\varphi_w$ , dem Trichterneigungswinkel  $\alpha$  und dem Verhältnis  $K$  der

Wandnormalspannung zur mittleren Vertikalspannung, abhängig ist. Für den Fall  $n = 0$  erhält man einen hydrostatischen Spannungsanstieg im Trichter, der die obere Grenze der physikalisch möglichen Spannungen darstellt.

$$n = (m + 1) \left[ K \left[ 1 + \frac{\tan \varphi_w}{\tan \alpha} \right] - 1 \right] \quad (1)$$

Wie groß der Einfluss des Parameters  $n$  bzw. des Verhältnisses  $K$  der Wandnormalspannung zur mittleren Vertikalspannung ist, verdeutlicht Bild 4.



**Bild 4:** Verlauf der Vertikalspannung  $\sigma_{v1}$  im Trichter über die Tiefe  $z_t$  bei verschiedenen Parametern  $n$

Ausgehend von einem stationären Maximum der Vertikalspannung im Schaft von  $\sigma_{v0} = 120 \text{ kPa}$ , ergeben sich, je nach Wahl des Parameters  $n$ , Vertikalspannungen am Abzugsorgan zwischen  $\sigma_{v1} = 30 \text{ kPa}$  und  $\sigma_{v1} = 245 \text{ kPa}$ .

Zur pauschalen Auswahl des Parameters  $n$  gibt es in der Literatur mehrere Ansätze, die sich so grundlegend unterscheiden, dass man bei den Ergebnissen die bereits angedeutete Streuung erhält.

Bestimmende Faktoren zur Berechnung des Parameters  $n$  sind, wie zuvor bereits beschrieben, die Einordnung der Trichtergeometrie und die Zuordnung des zugehörigen Faktors  $m$ . Aufgrund der besonderen Form des Materialspeichers (vgl. Bild 2) sind die für die Berechnung des Parameters  $n$  notwendigen geometrischen Trichterparameter nicht zweifelsfrei definierbar.

Aus diesem Grund sollte die Auslegung der Feeder-Conveyor und deren Antriebssystem mittels einer DEM-Simulation überprüft und optimiert werden.

## 2 DEM-Simulationen des Feeder-Conveyors

### 2.1 Zielstellung

Grundlegendes Ziel der DEM-Untersuchungen ist es, die Funktionsüberprüfung eines untertägigen Feeder-Conveyors für den Abzug von Kupfererz durchzuführen. Im Zuge des Projekts wurden dazu zwei unterschiedliche Bunker- bzw. die darüberstehenden Silo-Geometrien untersucht und die Ergebnisse gegenübergestellt. Während der Simulationen war neben der Ermittlung der globalen Kräfte  $F_i$  in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung einzelner gutkontaktierender Bauteile der Bunker-Geometrien die Vorhersage der benötigten Abzugsleistung  $P$  für die Auslegung des Antriebes von entscheidender Bedeutung. Weiterhin wurde überprüft, ob unter den gegebenen geometrischen Randbedingungen der geforderte Abzugsmassenstrom von  $I_m = 11000$  t/h erreicht werden kann.

### 2.2 Schüttgut- bzw. Partikelparameter – Kalibrierung

Der Feeder-Conveyor ist für den Abzug von Kupfererz vorgesehen. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die für die DEM-Simulationen verwendeten Schüttgut- und Partikelparameter zusammengefasst.

**Tabelle 1:** Zusammenfassung der Schüttgut- und Partikelparameter für Kupfererz

Schüttgut- bzw. Partikelparameter	Kupfererz
Schüttdichte, $\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1650
Porosität, $\varepsilon$ [-]	0,44
statischer Böschungswinkel, $\varphi_{b,stat}$ [°]	37
reale Korngrößenverteilung, $d_k$ [mm]	0...300
simulierte Partikelgrößenverteilung, $D_{Part}$ [mm]	80...300
Wandreibwert, $\mu_{w,s}$ [-] (Gut vs. Schurrenmaterial)	0,55
Wandreibwert, $\mu_{w,g}$ [-] (Gut vs. Gurtmaterial)	0,65
Wandreibwert, $\mu_w$ [-] (Gut vs. Wand Silo-Schaft)	0,57
Coulombsche Reibung, $\mu_P$ [-]	0,8
Rollreibung, $\mu_R$ [-]	0,5
Partikelsteifigkeit, $E_{Part}$ [Pa]	2,4e7
Querkontraktionszahl, $\nu$ [-]	0,3
Zeitschritt, $\Delta t_{DEM}$ [s]	1e-4

Um in den DEM-Simulationen ein realistisches Verhalten beim Abzug des Bunkers gewährleisten zu können, wurde für die Kalibrierung nicht wie üblich [8] auf die Variation der Partikelreibwerte  $\mu_P$  (Coulombsche Reibung) und  $\mu_R$  (Rollreibwert) mit Hilfe von Böschungswinkelsimulationen zurückgegriffen, sondern es wurden analytische Ansätze, mit denen der theoretische Verlauf der Vertikalspannung bei der Befüllung des Silo-Schafts berechnet werden kann, herangezogen.

Nach der Silotheorie von JANSSEN [2] steigt die Vertikalspannung bei der Befüllung eines Silos mit Schüttgut nicht linear, sondern asymptotisch in Form einer e-Funktion mit negativem Exponenten an. Somit ergibt sich im Vergleich zu einem Fluid eine geringere Vertikalspannung, da sich das Schüttgut auf Grund der Wandreibung an der Siloinnenwand

abstützt. Die Definition eines Silos geht von einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von mindestens  $> 3$  aus. Bei dem hier gegebenen Silo-Durchmesser von  $D_{\text{Silo}} = 6 \text{ m}$  gilt die Definition somit ab einer Höhe von  $h_{\text{Silo}} > 18 \text{ m}$ .

Nach JANSSEN [2] ergibt sich mit den Parametern:

- Silo-Schaft Durchmesser:  $D_{\text{Silo}} = 6 \text{ m}$
- Wandreibwinkel:  $\varphi_w = 30^\circ$  (Erfahrungswert  $\hat{=} \mu_w = 0,57$ )
- Schüttdichte:  $\rho_b = 1650 \text{ kg/m}^3$
- eff. innerer Reibwinkel:  $\varphi_e = 40^\circ$  (Erfahrungswert, da  $\varphi_e \geq \varphi_{b,\text{stat}}$ )
- Silo-Umfang:  $U_{\text{Silo}} = \pi \cdot D_{\text{Silo}} = 18,85 \text{ m}$
- Silo-Querschnitt:  $A_{\text{Silo}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{Silo}}^2 = 28,27 \text{ m}^2$

die höhenabhängige Vertikalspannung zu:

$$\sigma_v(z) = \frac{g \cdot \rho_b \cdot A_{\text{Silo}}}{\lambda \cdot \tan \varphi_w \cdot U_{\text{Silo}}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\lambda \cdot \tan \varphi_w \cdot U_{\text{Silo}} \cdot z}{A_{\text{Silo}}}} \right) \quad (2)$$

Für die Berechnung des Horizontallastverhältnisses  $\lambda$  werden in der Literatur mehrere Angaben gemacht:

- nach Tomas [3]: 
$$\lambda = \frac{1 - \sin^2 \varphi_w - \sqrt{(1 - \sin^2 \varphi_w) \cdot (\sin^2 \varphi_e - \sin^2 \varphi_w)}}{1 + \sin^2 \varphi_w + \sqrt{(1 - \sin^2 \varphi_w) \cdot (\sin^2 \varphi_e - \sin^2 \varphi_w)}} \quad (3)$$

- nach Rankine [4]: 
$$\lambda = \frac{1 - \sin \varphi_e}{1 + \sin \varphi_e} \quad (4)$$

- nach Kézdi [5]: 
$$\lambda = 1 - \sin \varphi_e \quad (5)$$

- nach DIN 1055, Teil 6 [6]: 
$$\lambda = 1,2 \cdot (1 - \sin \varphi_e) \quad (6)$$

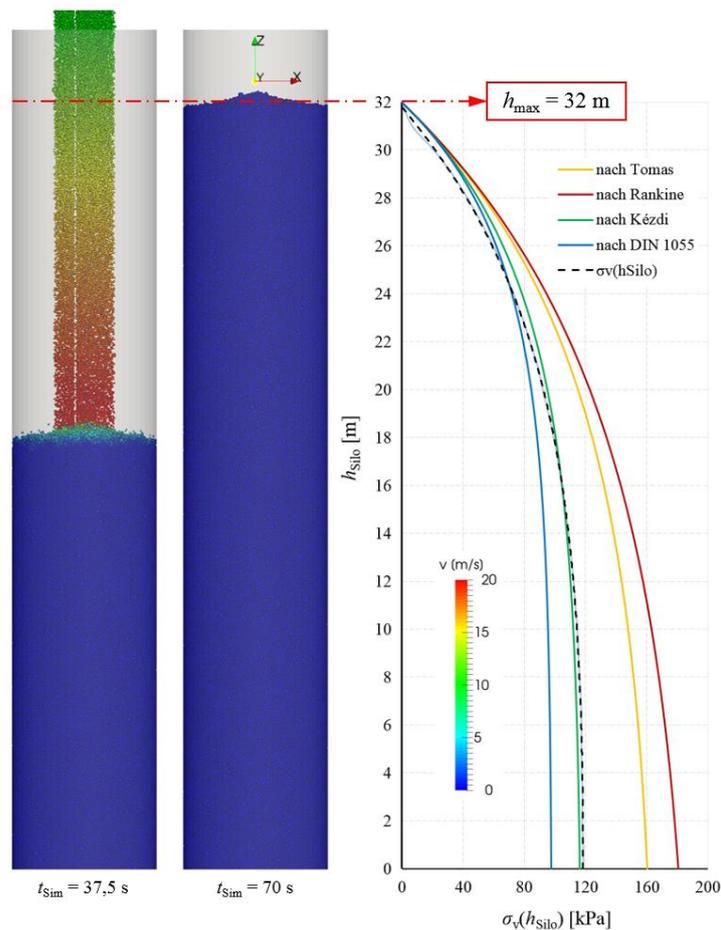
Die Berechnungen nach Tomas [3] und Rankine [4] ergeben i. d. R. zu kleine Werte für  $\lambda$ , was letztendlich zu übermäßig hohen Vertikalspannungen führt. Nach Schwedes und Schulze [7] wird die Berechnung nach Kézdi [5] empfohlen. Eine ähnliche Form der Berechnung liegt der DIN 1055, Teil 6 [6] zugrunde. Hier wurde  $\lambda$  lediglich um 20 % erhöht. Das Horizontallastverhältnis  $\lambda$  nach DIN 1055, Teil 6 [6] sollte bei der Dimensionierung von Austragsorganen (z. B. zur Berechnung der Abzugskraft) aber nicht überschritten werden. Für eine grobe Abschätzung kann der Wert  $\lambda = 0,4$  angesetzt werden. Nach Kézdi ergibt sich für  $\varphi_e = 40^\circ$  ein Horizontallastverhältnis von  $\lambda = 0,357$ .

Das nachfolgende Bild 5 zeigt die theoretischen Vertikalspannungsverläufe in Abhängigkeit der Horizontallastverhältnisse. Nach Kézdi [5] ergibt sich eine konstante, maximale Vertikalspannung von  $\sigma_{v,\text{max}} \approx 120 \text{ kPa}$  ab einer Silo-Höhe von  $h_{\text{Silo}} \approx 32 \text{ m}$ .

Für die numerischen Untersuchungen mit Hilfe von DEM-Simulationen bedeutet das, dass es ausreichend ist, eine befüllte Silo-Schafthöhe von  $h_{\text{max}} \approx 32 \text{ m}$  zu betrachten. Eine höhere Befüllung des Silo-Schafts mit  $h_{\text{max}} \gg 32 \text{ m}$  würde den Wert der maximal auftretenden Vertikalspannung  $\sigma_{v,\text{max}}$  am Silo-Boden nicht ändern.

Um den theoretischen Vertikalspannungsverlauf nach Kézdi [5] auch in der Simulation annähernd zu erreichen, müssen die Partikelreibwerte ( $\mu_P$  – Coulombsche Reibung und  $\mu_R$  – Rollreibwert) und zusätzlich die Partikelsteifigkeit  $E_{\text{part}}$  bei einer definierten Partikelgrößenverteilung  $D_{\text{part}}$  kalibriert werden. Zielgröße ist die maximal auftretende Vertikalspannung  $\sigma_{v,\text{max}}$  am Boden des Silos. Dazu wurden die o. g. Parameter in Kalibrierungssimulationen variiert, bis letztendlich die Zielgröße  $\sigma_{v,\text{max}}$  erreicht wurde. Der Aufbau des Silo-Kalibrierungsmodells erfolgte analog den geometrischen Randbedingungen des theoretisch betrachteten Silo-Schaftes. Gleiches gilt für die Schüttgut- und Partikelparameter.

Die Befüllung des Silo-Schafts erfolgte über eine Simulationszeit von  $t_{\text{sim}} = 65$  s bis zu einer Höhe von ca.  $h_{\text{max}} \approx 32$  m. Abschließend wurde das Partikelsystem bis  $t_{\text{sim}} = 75$  s beruhigt. Während der gesamten Simulationszeit wurden pro Meter Schichtdicke die globalen Spannungen  $\sigma_i$  in x-, y- und z-Richtung im Silo-Schaft gemessen. Die Kombination der jeweiligen Spannungs-Endwerte pro Meter Schichtdicke in z-Richtung ergeben den in Bild 5 dargestellten kalibrierten Vertikalspannungsverlauf  $\sigma_z(h_{\text{Silo}}) = \sigma_z(h_{\text{Silo}})$ .

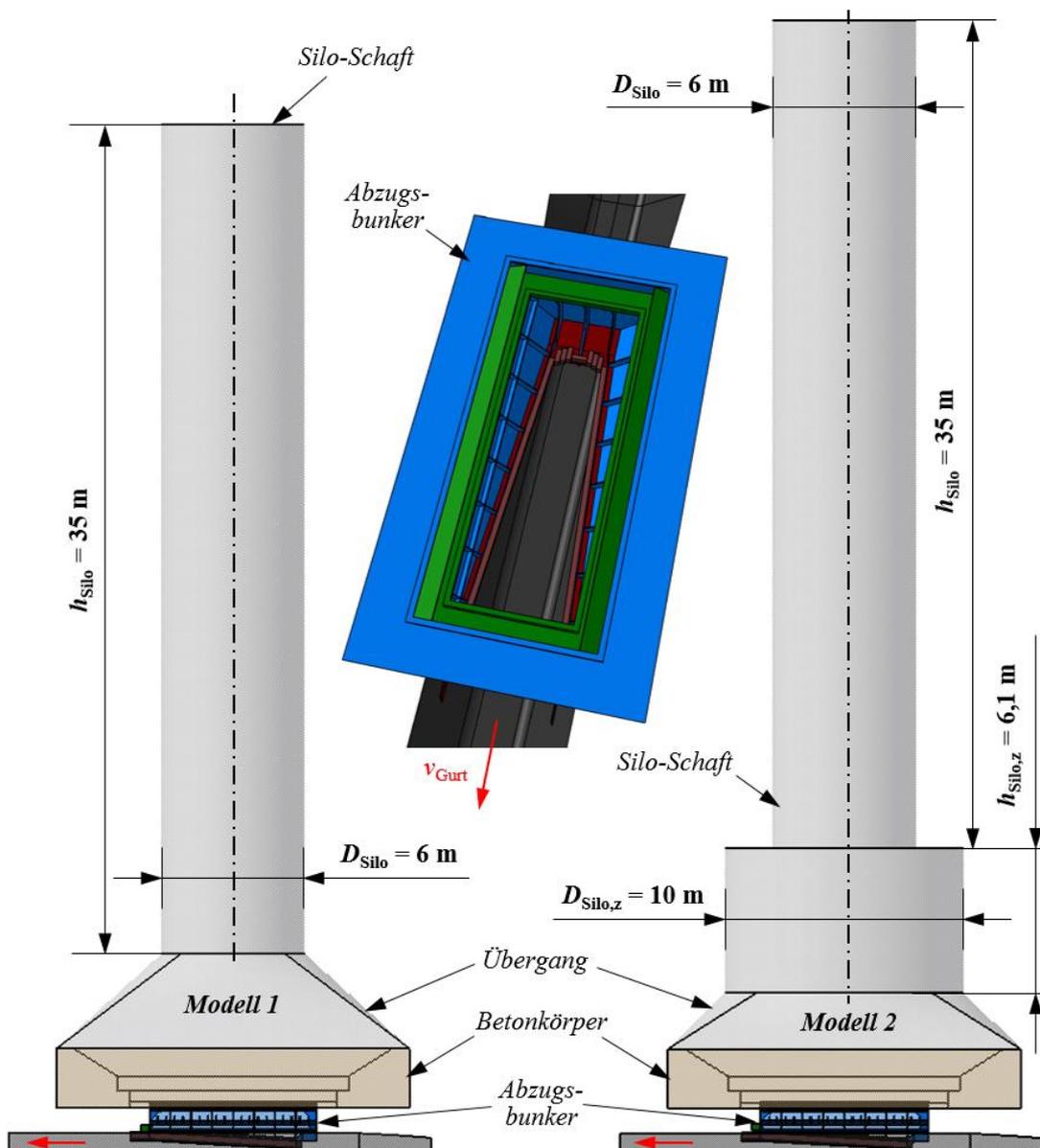


**Bild 5:** Vergleich zwischen theoretischen Vertikalspannungsverläufen und simuliertem Verlauf  $\sigma_v(h_{\text{Silo}})$  für eine Silo-Schaft Befüllung von  $h_{\text{max}} \approx 32$  m

Das Ergebnis zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Vertikalspannungsverlauf nach Kézdi [5]. Insbesondere die End-Zielgröße  $\sigma_{v,\text{max}} \approx 120$  kPa konnte erreicht werden. Mit den kalibrierten Parametern (vgl. Tabelle 1) wurden die nachfolgenden DEM-Simulationen des Feeder-Conveyers durchgeführt.

### 2.3 Simulationsmodell und -ablauf

Das nachfolgende Bild 6 zeigt die Geometrie der untersuchten Simulationsmodelle im direkten Vergleich. Beide Modelle bestehen aus einem Silo-Schaft mit einer Gesamthöhe von  $h_{\text{Silo}} = 35 \text{ m}$  und einem Durchmesser von  $D_{\text{Silo}} = 6 \text{ m}$ , einer Übergangsgeometrie, einem Betonkörper, einem Bunker und einem Abzugsband. Im Gegensatz zu *Modell 1* wurde bei *Modell 2* der Silo-Schaft im unteren Bereich mit einer zusätzlichen Höhe von  $h_{\text{Silo,z}} = 6,1 \text{ m}$  bis hin zur Übergangsgeometrie auf einen Durchmesser von  $D_{\text{Silo,z}} = 10 \text{ m}$  aufgeweitet.



**Bild 6:** Geometrie der Simulationsmodelle, bestehend aus Silo-Schaft, Abzugsbunker und Abzugsband

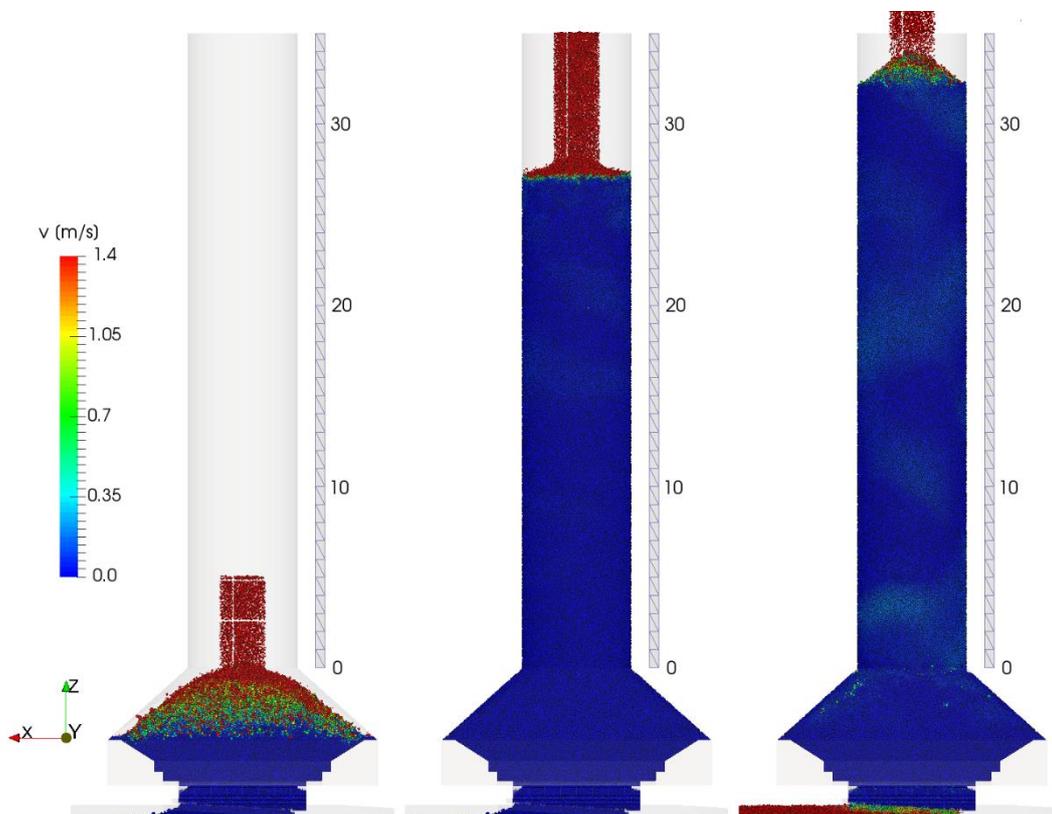
Links: Modell 1; Mitte: Abzugsbunker; Rechts: Modell 2 mit aufgeweitetem Silo-Schaft im unteren Bereich

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die geometrischen Randbedingungen und die für die Simulationen notwendigen Systemparameter beider Modelle zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Zusammenfassung der Schüttgut- und Partikelparameter für Kupfererz

Systemeigenschaften	Modell 1	Modell 2
Abzugsgeschwindigkeit, $v_{\text{Gurt}}$ [m/s]	1,4	1,75
Gurtneigungswinkel, $\delta$ [°]	0	
geforderter Abzugs-Massenstrom, $I_m$ [t/h]	11000	
theo. Abzugsquerschnitt, $A_{\text{th}}$ [m <sup>2</sup> ]	1,323	1,466
Silo-Schaft Gesamthöhe, $h_{\text{Silo}}$ [m]	35	
Silo-Schaft Befüllungs-Höhe von OK-Übergang, $h_{\text{max}}$ [m]	≈ 33-34	
Silo-Schaft Durchmesser, $D_{\text{Silo}}$ [m]	6	
zus. Silo-Schaft Höhe, $h_{\text{Silo,z}}$ [m]	-	6,1
zus. Silo-Schaft Durchmesser, $D_{\text{Silo,z}}$ [m]	-	10
simuliertes Gesamt-Gutvolumen, $V_{\text{Gut}}$ [m <sup>3</sup> ]	≈ 1.600	≈ 1.900

Die Befüllung mit Schüttgut erfolgt in zwei Schritten. Bis zum Zeitpunkt  $t_{\text{Sim}} = 65$  s wird der untere Bereich des Silo-Bunker-Systems befüllt. Nach einer Beruhigungsphase von 5 s bis  $t_{\text{Sim}} = 75$  s erfolgt die Rest-Befüllung des Silo-Schaftes bis auf eine Höhe von ca.  $h_{\text{max}} = 33 - 34$  m. Nach  $t_{\text{Sim}} = 135$  s ist die Befüllung abgeschlossen. Nach einer zweiten Beruhigungsphase von 5 s bis  $t_{\text{Sim}} = 140$  s startet der Abzug mit der jeweiligen Abzugsgeschwindigkeit  $v_{\text{Gurt}}$  (vgl. Tabelle 2). Während des Abzugs wird oberhalb des Silo-Schaftes ein Massenstrom von  $I_m = 11.000$  t/h generiert, um einen annähernd gleichbleibenden Beladungszustand zu gewährleisten (vgl. Bild 7).



**Bild 7:** Links: Befüllung des unteren Bereichs nach  $t_{\text{Sim}} = 50$  s; Mitte: Rest-Befüllung des Silo-Schaftes nach  $t_{\text{Sim}} = 125$  s; Rechts: Abzug nach  $t_{\text{Sim}} = 160$  s (*Modell 1*)

## 2.4 Simulationsergebnisse

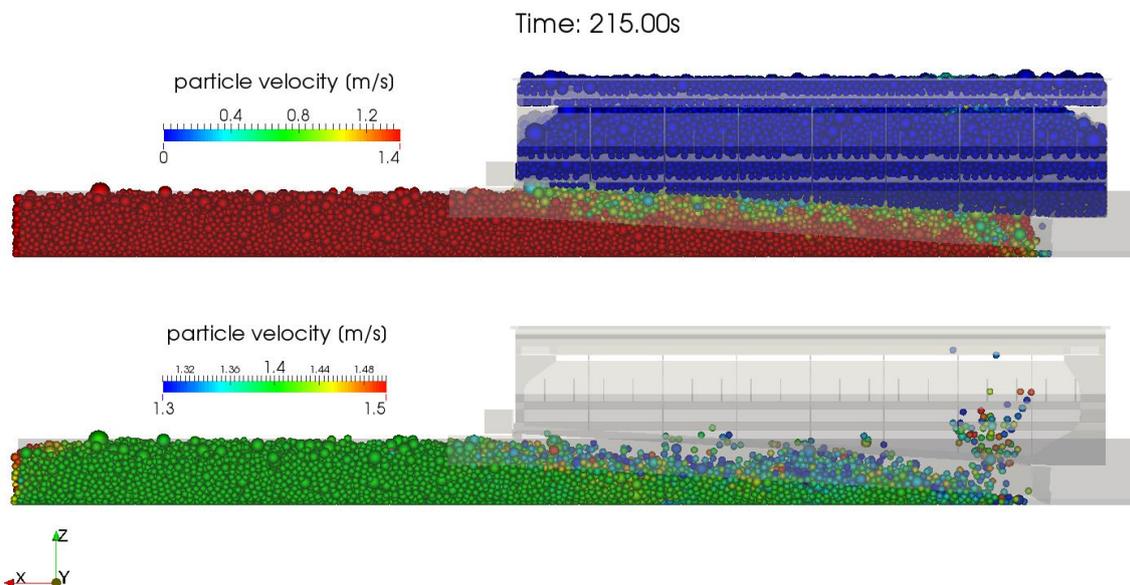
Die Ergebnisse der DEM-Untersuchungen sollten Aussagen über:

1. das **Fließverhalten** unterhalb des Bunkers entlang des Abzugsbandes (Abzugsqualität),
2. den geforderten **Massenstrom**  $I_m = 11.000 \text{ t/h}$  im Vergleich zu den simulierten Abzugs-Massenströmen  $I_{m,Sim}$ ,
3. die globalen **Kräfte**  $F_i$  in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung der einzelnen gutkontaktierenden Bauteile der Bunker-Geometrien (*Ergebnisse können u. a. für nachfolgende FE-Analysen der einzelnen Bauteile verwendet werden; werden außer beim Gurt aber hier nicht weiter betrachtet*) und
4. den **Leistungsbedarf**  $P$  für den Antrieb des Abzugsbandes

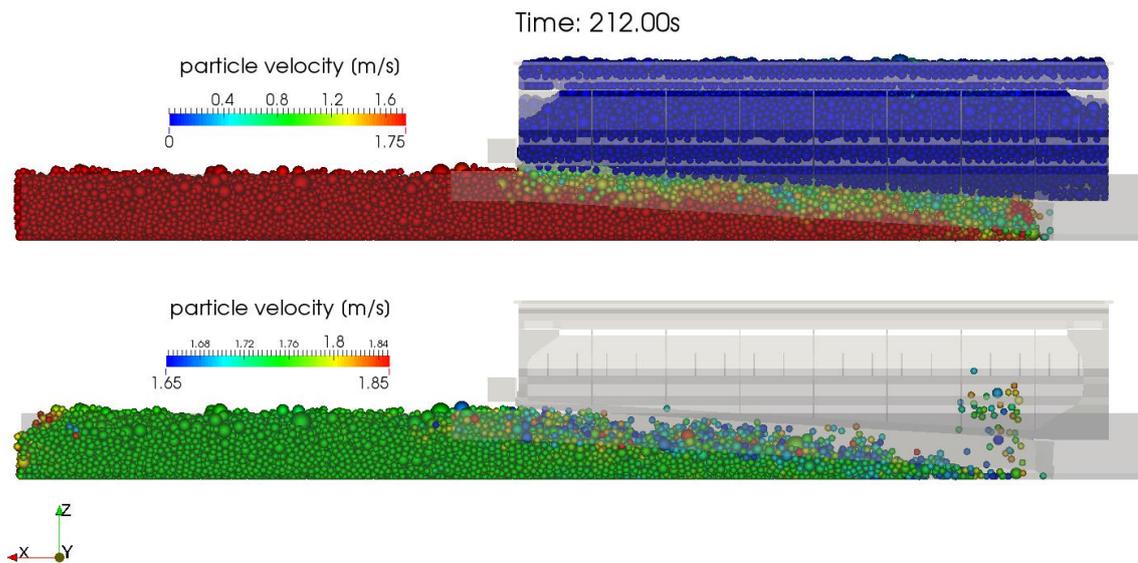
ermöglichen. Dabei schließen die Punkte 2-4 den Befüllungs- und Abzugsprozess mit ein.

### 2.4.1 Fließverhalten

Um ein „gutes“ Fließverhalten des Schüttguts beim Abzug zu gewährleisten, wurde der Abzugsbunker in Abzugsrichtung konisch öffnend konzipiert. Der Öffnungswinkel beträgt ca.  $7^\circ$  (vgl. Bild 6 Mitte). Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Gutbett unterhalb des Abzugsbunkers über die gesamte Abzugslänge aktiviert wird (vgl. Bilder 8 und 9). Es gibt keine Relativgeschwindigkeit zwischen Gut und Gurt, was sich positiv auf den Verschleiß des Abzugsbandes auswirkt, da der Gurt nicht unter dem Gutbett „durchgezogen“ wird. Somit kann das Fließverhalten als optimal bezeichnet werden.



**Bild 8:** Oben: Bunkerabzug nach  $t_{Sim} = 215 \text{ s}$ , rot eingefärbte Partikel bewegen sich mit  $v_{Gurt} = 1,4 \text{ m/s}$ ; Unten: Darstellung der Partikel im Geschwindigkeitsbereich  $v = 1,3 \dots 1,5 \text{ m/s}$ , alle anderen Partikel sind ausgeblendet (*Modell 1*)



**Bild 9:** Oben: Bunkerabzug nach  $t_{\text{Sim}} = 212 \text{ s}$ , rot eingefärbte Partikel bewegen sich mit  $v_{\text{Gurt}} = 1,75 \text{ m/s}$ ; Unten: Darstellung der Partikel im Geschwindigkeitsbereich  $v = 1,65 \dots 1,85 \text{ m/s}$ , alle anderen Partikel sind ausgeblendet (*Modell 2*)

#### 2.4.2 Massenstrom

Ausgehend vom geforderten Massenstrom  $I_m = 11.000 \text{ t/h}$ , ergibt sich bei einer Abzugsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Gurt}} = 1,4 \text{ m/s}$  der theoretische Abzugsquerschnitt zu  $A_{\text{th}} = 1,323 \text{ m}^2$ . Entsprechend wurde der Guthöhenbegrenzer (Shear Gate) in der 1. Simulation (*Modell 1*) für den Abzug eingestellt. Die Simulationsergebnisse des 1. Modells zeigten aber, dass mit dem mittleren simulierten Massenstrom von  $\Delta I_{m,\text{Sim}} = 8.305 \text{ t/h}$  der geforderte Massenstrom  $I_m$  nicht erreicht werden konnte. Der Grund hierfür ist, dass insbesondere große Gutbrocken beim Passieren des Guthöhenbegrenzers nachfolgendes Gut maßgebend behindern. Entsprechend verringert sich der reale Abzugsquerschnitt und somit der Abzugsmassenstrom.

Um den geforderten Massenstrom  $I_m$  zu erreichen, wurden in der 2. Simulation (*Modell 2*) der Abzugsquerschnitt mit Hilfe des Höhenbegrenzers auf  $A_{\text{th}} = 1,466 \text{ m}^2$  eingestellt und die Abzugsgeschwindigkeit gleichzeitig auf  $v_{\text{Gurt}} = 1,75 \text{ m/s}$  erhöht. Der daraus resultierende theoretische Massenstrom wäre mit  $I_{m,\text{th}} = 15.239 \text{ t/h}$  deutlich zu hoch, aber die Simulationsergebnisse zeigen, dass mit  $\Delta I_{m,\text{Sim}} = 11.480 \text{ t/h}$  die Größenordnung des geforderten Massenstroms erreicht werden konnte.

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die theoretischen Abzugsmassenströme  $I_{m,\text{th}}$ , resultierend aus Abzugsgeschwindigkeit  $v_{\text{Gurt}}$  und theoretischem Abzugsquerschnitt  $A_{\text{th}}$ , und die Mittelwerte der Abzugsmassenströme  $\Delta I_{m,\text{Sim}}$  aus den Simulationen zusammengefasst. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass sowohl in der 1. Simulation als auch in der 2. Simulation ein prozentualer Verlust beim Abzug von ca.  $\Delta I_m \approx -24,5\%$  im Vergleich zum theoretisch erwarteten Abzugsmassenstrom  $I_{m,\text{th}}$  auftritt. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch bei den Ergebnissen einer zusätzlichen Simulation des 2. Modells mit einer reduzierten Abzugsgeschwindigkeit von  $v_{\text{Gurt}} = 0,8 \text{ m/s}$ . Aus den Ergebnissen ergibt sich ein nicht wesentlich geringerer prozentualer Verlust von  $\Delta I_m \approx -22,4 \%$ . Es ist davon auszugehen, dass der Unterschied von ca. 2 % im Vergleich zu den

Simulationen 1 und 2 aus der fehlenden Gesamt-Schüttgutsäule resultiert.

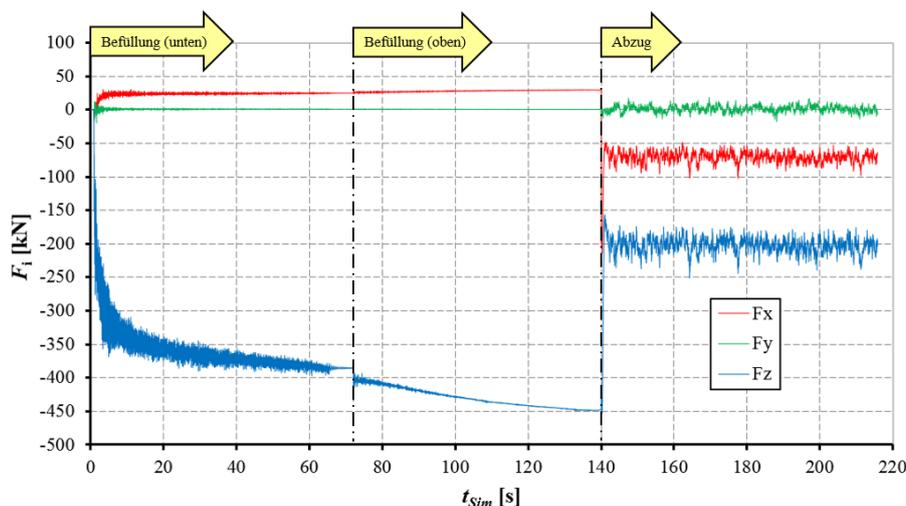
**Tabelle 3:** Vergleich der theoretischen und simulierten Massenströme

Modell	$v_{\text{Gurt}}$ [m/s]	$A_{\text{th}}$ [m <sup>2</sup> ]	$I_{m,\text{th}}$ [t/h]	$\Delta I_{m,\text{Sim}}$ [t/h]	$\Delta I_m$ [%]
1	1,4	1,323	11.002	8.305	-24,5
2	1,75	1,466	15.239	11.480	-24,7
2 (Zusatz)	0,8	1,466	6.966	5.408	-22,4

### 2.4.3 Kräfte

Während der Simulationen wurden die globalen x-, y- und z-Kräfte  $F_i$ , resultierend aus den Partikelkontakten, auf einzelne Bauteile des Abzugsbunkers gemessen. Die Ergebnisse können beispielsweise für eine nachgeschaltete FE-Analyse herangezogen werden. Außer den globalen Kräften auf dem Abzugsband werden diese Ergebnisse aber hier nicht weiter betrachtet.

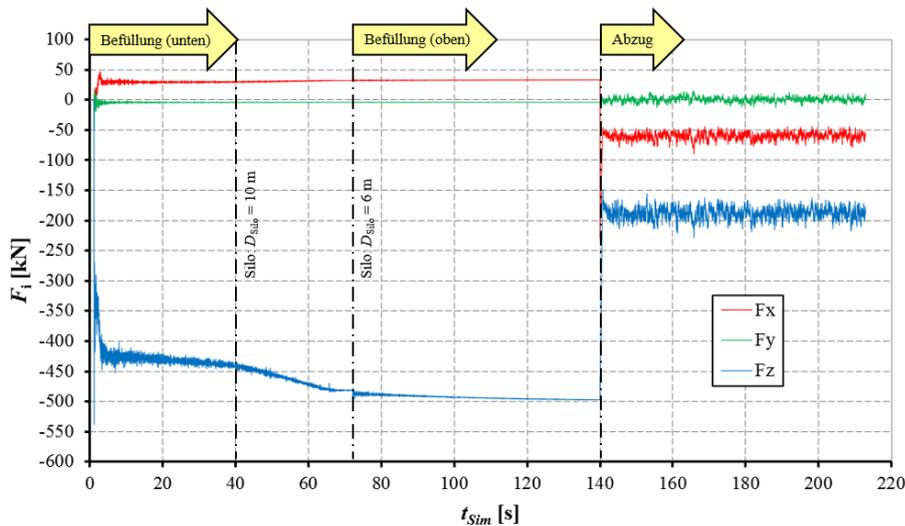
Die Analyse der globalen Kräfte auf dem Abzugsband, insbesondere die entgegen der Förderrichtung (x-Kräfte), sind entscheidend für die Bemessung des Leistungsbedarfs  $P$  für die Auslegung des Antriebs des Abzugsbandes. In den nachfolgenden Bildern 10 und 11 sind grafisch die Messergebnisse der globalen Kräfte  $F_i$  beider Modelle über der Simulationszeit  $t_{\text{Sim}}$  dargestellt.



**Bild 10:** Gemessene globale Kräfte  $F_i$  auf dem Abzugsband für die untere Befüllung, obere Befüllung und den Abzug über eine Simulationszeit von ca.  $t_{\text{Sim}} = 215$  s (*Modell 1*)

Der direkte Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass im stationären Zustand während des Abzugsprozesses ( $t_{\text{Sim}} > 140$  s) beim *Modell 2* geringere mittlere Kräfte mit  $\Delta F_x = -59,6$  kN entgegen der Förderrichtung (x-Richtung) wirken als beim *Modell 1* mit  $\Delta F_x = -71,2$  kN, obwohl beim *Modell 1* der geforderte Massenstrom  $I_m$  nicht erreicht wurde. Das spricht für die angepasste Silo-Form des *Modells 2*, auch wenn die Belastung des Abzugsbandes im stationären Befüllungs-Zustand im Bereich von  $t_{\text{Sim}} = 120 \dots 140$  s eine leicht größere mittlere Kraft in z-Richtung aufweist als beim *Modell 1*. Im Gegensatz dazu ist aber die mittlere Kraft in z-Richtung im stationären Zustand während des Abzugsprozesses ( $t_{\text{Sim}} > 140$  s) beim *Modell 2* mit  $\Delta F_z = -187,6$  kN wiederum geringer als beim *Modell 1* mit  $\Delta F_z =$

–203,2 kN.



**Bild 11:** Gemessene globale Kräfte  $F_i$  auf dem Abzugsband für die untere Befüllung, obere Befüllung und den Abzug über eine Simulationszeit von ca.  $t_{sim} = 215$  s (*Modell 2*)

#### 2.4.4 Leistungsbedarf

Mit einer mittleren Abzugskraft entgegen der Förderrichtung von  $\Delta F_x = -71,2$  kN und einer Fördergeschwindigkeit von  $v_{Gurt} = 1,4$  m/s ergibt sich für das *Modell 1* ein Leistungsbedarf von  $P = 99,7$  kW. Beim *Modell 2* resultiert der Leistungsbedarf mit  $\Delta F_x = -59,6$  kN und  $v_{Gurt} = 1,75$  m/s zu  $P = 104,3$  kW. Beim direkten Vergleich der Leistungsbemessung sind die erzielten Massenströme  $\Delta I_{m,Sim}$  zu berücksichtigen.

Das Ergebnis in der Größenordnung von  $100$  kW deckt sich mit den von TAKRAF vor Ort durchgeführten Leistungs-Messungen an der installierten Anlage und zeigt ein ums andere Mal, dass *professionell* aufgesetzte DEM-Simulationen unter Berücksichtigung vorhergehender Schüttgutanalysen und Kalibrierungen auch derartig komplexe Systeme realitätsnah abbilden und somit für Optimierungen im Vorfeld effizient eingesetzt werden können.

#### Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die analytischen Berechnungsmodelle im Bereich der Silotheorie für komplexe Geometrien wie Auslauftrichter oder Einbauten nicht anwendbar sind. Die unterschiedlichen Modelle und Annahmen können sich hier stark widersprechen. Da den Berechnungen nach Kézdi für zylindrische Silos grundsätzlich vertraut wird, aber eine Analyse des Abzugsbereichs analytisch nicht möglich ist, wurden die Silospannungen als Basiswerte für eine Kalibrierung der DEM-Parameter benutzt. In der DEM-Simulation ist es dann möglich, auch komplexe Auslassgeometrien zu berücksichtigen und direkt den Leistungsbedarf des Abzugsorgans zu bestimmen. Der ermittelte Leistungsbedarf der Abzugsförderer liegt deutlich unter dem des analytischen Modells und konnte durch Messergebnisse an der realen Anlage bestätigt werden.

Es kann somit gezeigt werden, dass durch den Einsatz von DEM-Simulationen auch für entsprechend hohe Spannungen im Schüttgut gute Ergebnisse erzielt werden können.

**Formelzeichen:**

		$\Delta I_m$	prozentualer Massenstromverlust, %
$d_k$	reale Korngrößenverteilung, mm	$P$	Abzugsleistung, kW
$h_{\max}$	Silo-Schaft Befüllungs-Höhe, m	$U_{\text{Silo}}$	Silo-Umfang, m
$h_{\text{Silo}}$	Silo-Schaft Gesamthöhe, m	$V_{\text{Gut}}$	simuliertes Gesamt-Gutvolumen, m <sup>3</sup>
$h_{\text{Silo,z}}$	zusätzliche Silo-Schaft Höhe, m	$\delta$	Gurtneigungswinkel, °
$\Delta t_{\text{DEM}}$	Zeitschritt, s	$\varepsilon$	Porosität, -
$t_{\text{Sim}}$	Simulationszeit, s	$\mu_{w,S}$	Wandreibwert (Gut vs. Schurrenmaterial), -
$v$	Partikelgeschwindigkeit, m/s	$\mu_{w,G}$	Wandreibwert (Gut vs. Gurtmaterial), -
$v_{\text{Gurt}}$	Abzugsgeschwindigkeit, m/s	$\mu_w$	Wandreibwert (Gut vs. Wand Silo-Schaft), -
$A_{\text{Silo}}$	Silo-Querschnitt, m <sup>2</sup>	$\mu_P$	Coulombsche Reibung, -
$A_{\text{th}}$	theoretischer Abzugsquerschnitt, m <sup>2</sup>	$\mu_R$	Rollreibung, -
$D_{\text{Part}}$	simulierte Partikelgrößenverteilung, mm	$\nu$	Querkontraktionszahl, -
$D_{\text{Silo}}$	Silo-Schaft Durchmesser, m	$\rho_b$	Schüttdichte, kg/m <sup>3</sup>
$D_{\text{Silo,z}}$	zusätzlicher Silo-Schaft Durchmesser, m	$\sigma_i$	globale Spannungen in x-, y- und z-Richtung, kPa
$E_{\text{Part}}$	Partikelsteifigkeit, Pa	$\sigma_v$	Vertikalspannung, kPa
$F_i$	globale Kräfte in x-, y- und z-Richtung, kN	$\sigma_{v,\max}$	maximale Vertikalspannung, kPa
$\Delta F_x$	mittlere Kraft in x-Richtung (Abzugskraft), kN	$\varphi_{b,\text{stat}}$	statischer Böschungswinkel, °
$\Delta F_z$	mittlere Kraft in z-Richtung (Vertikalkraft), kN	$\varphi_e$	effektiver innerer Reibwinkel, °
$I_m$	geforderter Abzugsmassenstrom, t/h	$\varphi_w$	Wandreibwinkel, °
$I_{m,\text{th}}$	theoretischer Abzugsmassenstrom, t/h	$\lambda$	Horizontallastverhältnis, -
$\Delta I_{m,\text{Sim}}$	mittlerer simulierter Massenstrom, t/h		

**Quellenverzeichnis:**

- [1] Schulze, D.: Powders and Bulk Solids - Behavior, Characterization, Storage and Flow, Springer Verlag, Berlin, 2008, S. 253
- [2] Janssen, H. A.: Zeitung Verein Deutscher Ingenieure 39 (1895), S. 1045-1049
- [3] Tomas, J.: Partikelmechanik und Schüttguttechnik 5. Silodrücke, Vorlesungsskript: Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2014
- [4] Koenen, M.: Berechnung des Seiten- und Bodendrucks in Silozellen. Centralblatt der Bauverwaltung 16 (1896), S. 446-449
- [5] Kézdi, A.: Erddrucktheorien. Berlin: Springer Verlag, 1962
- [6] DIN 1055, Teil 6: Lasten in Silozellen, Deutsche Norm, 1987
- [7] Schulze, D.; Wilms, H.; Schwedes, J.; Heinrich, H.: Lagern und Fließen von Schüttgütern, Technische Universität Braunschweig, 1992
- [8] Roessler, T.; Richter, C.; Katterfeld, A.; Will, F.: 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. 2018

## **25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021**

**Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung**

---

### **Praxiserfahrungen mit BeltGenius Überwachung und Auswertung des Betriebsverhaltens einer Bandanlage im chilenischen Kupfererzbergbau mittels Digitalem Zwilling**

Manfred Ziegler

---

**VOITH**

Dr.-Ing. Manfred Ziegler  
J.M. Voith SE & Co. KG | VTA  
Voithstraße 1  
74564 Crailsheim



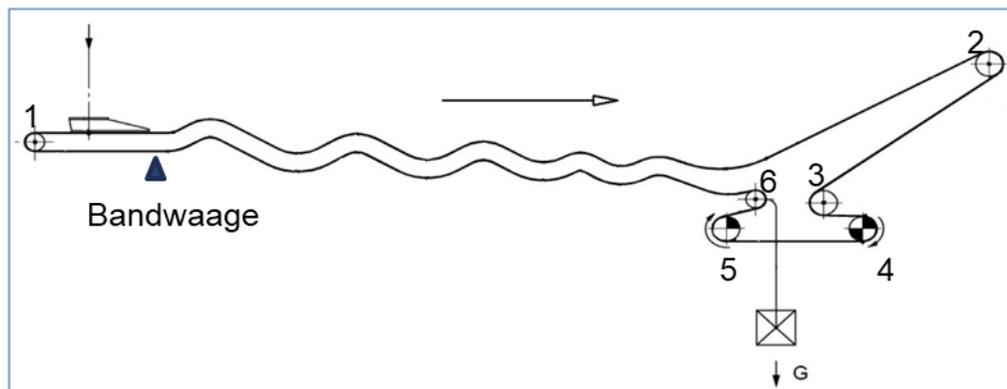
## Praxiserfahrungen mit BeltGenius

Der Beitrag befasst sich mit dem Einsatz eines Digitalen Zwillinges bei der Begutachtung und Optimierung einer Bandanlage im chilenischen Kupfererzbergbau. Anhand dieses Beispiels wird aufgezeigt, dass ein Digitaler Zwilling zunächst nur ein neues (wenn auch mächtiges) Werkzeug ist, mit dem das Anlageverhalten untersucht werden kann. Der Nutzen für den Kunden entsteht zunehmend durch die Implementierung der automatischen Erkennung kritischer Abweichungen vom Sollzustand in Verbindung mit der organisatorischen Festlegung mit dem Kunden, welche Reaktionen auf solche Meldungen erfolgen.

### 1 Problembeschreibung / Aufgabenstellung

Der Kunde, ein chilenischer Bergbaukonzern, betreibt mehrere Kupfererztagebaue. Er möchte den Trend zur Digitalisierung für sich nutzen und konkret sehen, wie er damit seine Produktivität steigern und die Kosten senken kann. Außerdem möchte er seine Energieeffizienz steigern und dies auch dokumentieren können.

Hierzu wurde ein Pilotprojekt vereinbart, in dem das Verhalten eines Overland Conveyors für einen Zeitraum von 12 Monaten retrospektiv mittels BeltGenius analysiert wurde. Ausgewählt wurde eine Bandanlage, die das gewonnene Kupfererz einer Mine vom Primärbrecher zu einem Stockpile befördert. Bild 1 zeigt qualitativ den Höhenverlauf des Gurtes und die Anordnung der Trommeln, Antriebe, Aufgabe, Bandwaage und Spannsystem.



**Bild 1:** Prinzipskizze des Förderers

An dieser Anlage hängt die komplette Förderung eines Tagebaus. Der Betreiber überwacht sehr genau die Produktivität seiner Anlagen und erhofft sich von diesem Projekt konkrete Hinweise zur Verbesserung.

Letztlich ist dies ein klassisches Consulting-Thema, und so wurde es auch bearbeitet – allerdings mit einem neuen Werkzeug und rein virtuell, d. h. ausschließlich auf Basis von technischen Dokumenten und ca. 5 Gigabyte Messdaten.

### 2 Beschreibung der Vorgehensweise mittels Digitalem Zwilling

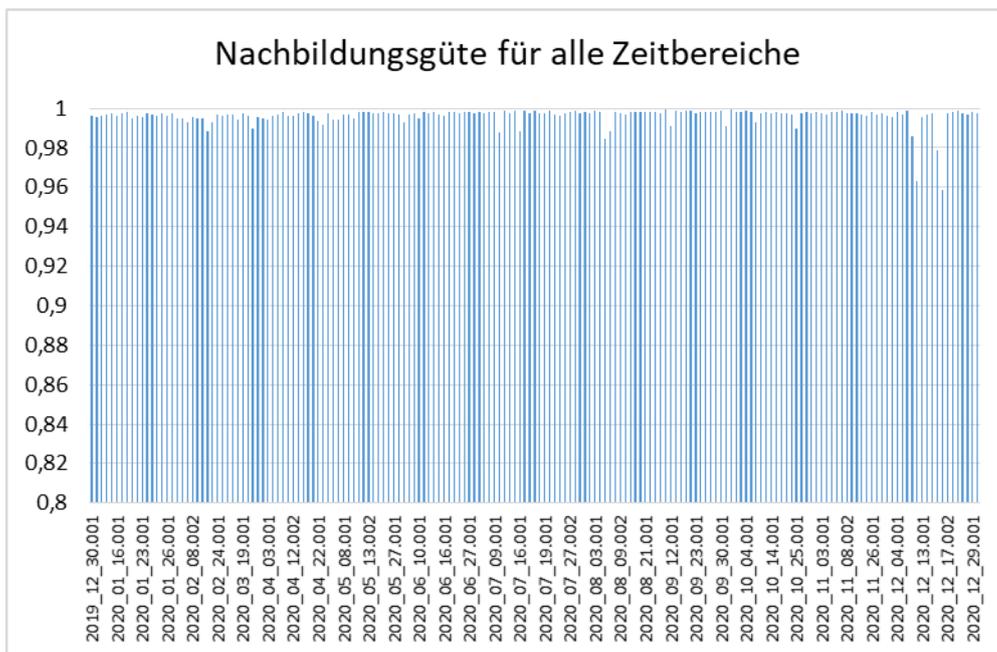
Bei einem klassischen Consulting macht das Nachrechnen der Bandanlage nur einen kleinen Teil der Arbeit aus und umfasst üblicherweise nur die vier extremen Beladungsfälle für Anfahren, Betrieb und Stillsetzen und dient nur zum Bestätigen oder Ausschließen vermuteter Schwachstellen.

In diesem Projekt ist BeltGenius nun das zentrale Werkzeug zur Beurteilung. Der wesentliche Unterschied in der Nachrechnung besteht darin, dass das Berechnungsmodell angepasst wird an die Wirklichkeit und dass die Berechnung mit realen Messdaten erfolgt.

BeltGenius wurde hier schon mal ausführlich vorgestellt [1]. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um ein proprietäres Berechnungsverfahren in Kombination mit einer weitgehend automatischen Auswertung ausgewählter Ergebnisse. Der Rechenkern beschreibt qualitativ die Abhängigkeit der einzelnen Bewegungswiderstände von Beladung, Gurtführung, konstruktiver Ausführung der Tragrollenstationen, Komponenteneigenschaften (Gurt, Tragrollen, Trommeln), Gurtzugkraft und Temperatur und erzielt durch eine automatische Anpassung der Parameter unter Verwendung gemessener Betriebsdaten eine sehr hohe Nachbildungsgüte. Zur Beurteilung der Nachbildungsgüte verwenden wir den Vergleich zwischen der gemessenen und der errechneten Antriebsleistung über alle  $n$  Zeitschritte des betrachteten Zeitraums nach folgender Formel:

$$1 - \frac{\sum_1^n (P_{calc} - P_{mess})^2}{\sum_1^n P_{mess}^2}$$

In diesem Projekt betrug die durchschnittliche Nachbildungsgüte über die kompletten 12 Monate Betriebszeit 0,9962. Bild 2 zeigt die Nachbildungsgüte für alle Zeitbereiche.



**Bild 2:** Nachbildungsgüte für alle Zeitbereiche

Von einer Handvoll Ausreißern abgesehen (hierzu später mehr) war die Nachbildungsgüte über den kompletten Zeitbereich gut, ohne dass eine Neuanpassung der Parameter erforderlich wurde.

Neben den Strukturdaten der Anlage benötigt BeltGenius folgende Messdaten:

- Zeitstempel
- Förderleistung [t/h] --> Position der Bandwaage muss bekannt sein
- Gurtzugkraft [kN] --> Position der Zugkraftmessung (bzw. des Spanngewichts) muss bekannt sein

- Gurtgeschwindigkeit [m/s]
- Umgebungstemperatur [°C]
- Motorleistung 1. Antrieb [kW]
- Motorleistung 2. Antrieb [kW]
- ...
- Motorleistung n. Antrieb [kW]

Eine besondere Herausforderung bei diesem Projekt bestand darin, dass kein Geschwindigkeitssignal verfügbar war und statt der Motorleistungen Messwerte für die Motorströme und der drei Phasen der Versorgungsspannung vorlagen. Mit den Angaben aus den Datenblättern der Motoren konnten daraus die Motorleistungen und –drehzahlen berechnet werden. Es handelt sich hierbei um drei Schleifringläufer mit je 1.250 kW Nennleistung und 1.000 rpm Synchrodrehzahl. Für die Berechnung der Gurtgeschwindigkeit mussten sowohl der Nennschlupf der Motoren wie auch die wirksamen Trommelradien der beiden Antriebstrommeln ermittelt werden. Mit bekanntem Abstand zwischen Aufgabe und Abwurf konnten diese Parameter aus den Verläufen der Motorleistungen beim Auftreten von Förderlücken bestimmt werden.

Bei diesem Offline-Einsatz von BeltGenius werden die Messwerte in einem ersten Schritt in einzelne Zeitbereiche aufgeteilt und aus den Motorströmen und –spannungen die Motorleistungen sowie die Gurtgeschwindigkeit errechnet. Ein Zeitbereich umfasst dabei die Zeit vom Einschalten der Motoren bis zum Stillstand.

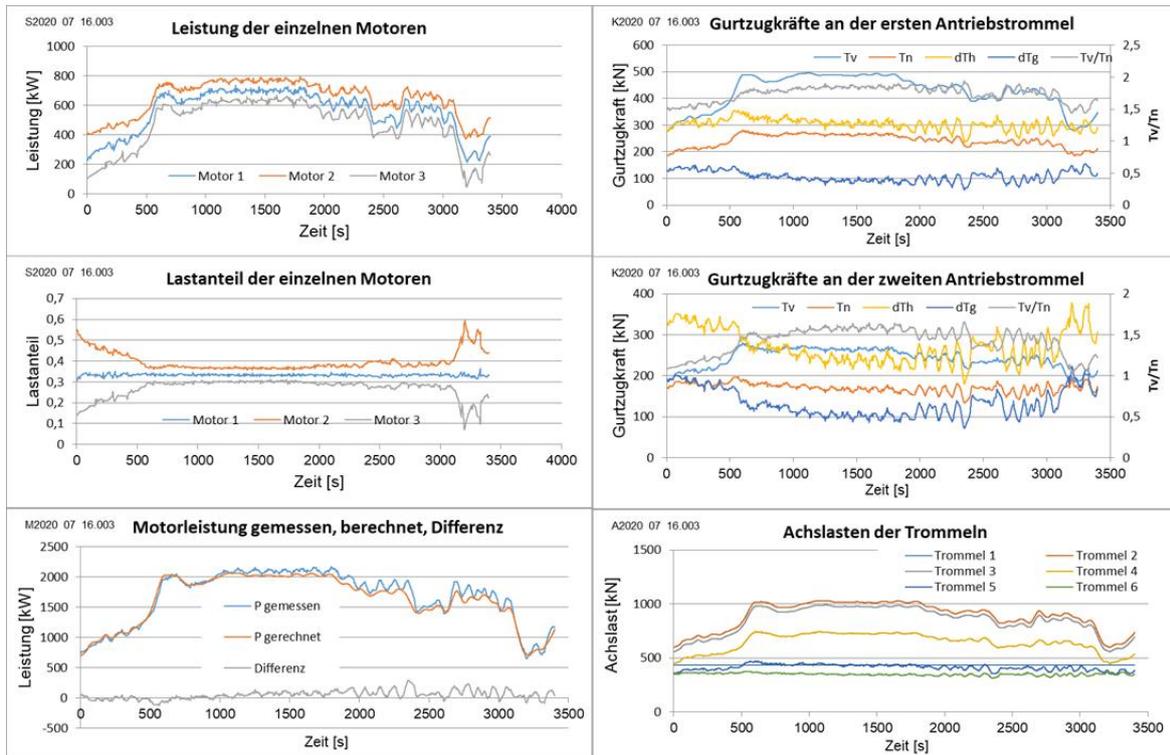
Insgesamt gab es 189 Zeitbereiche, der kürzeste von nur 382 Sekunden am 17.12.2020 ab 07:03:51, der längste von 287 Stunden am 26.1.2020 ab 22:11:34. Die durchschnittliche Betriebsdauer betrug 43 Stunden und 21 Minuten. Zwölf Zeitbereiche reichten für eine sinnvolle Auswertung nicht aus und wurden deshalb übersprungen.

Erläuterung: Die Bandwaage sitzt unmittelbar hinter der Aufgabe. Die Mindestlänge für eine Auswertung ergibt sich aus der Laufzeit von Bandwaage bis Abwurf, damit aus den Signalen der Bandwaage mindestens ein komplettes Beladeprofil erzeugt werden kann.

Nach diesem Präprocessing erfolgt zunächst die Anpassung der Parameter an den aktuellen Zustand der Anlage. Hierfür wird ein repräsentativer Zeitraum ausgewählt und mit einem Optimierungsverfahren ein Parametersatz erzeugt, der die beste Nachbildungsgüte aufweist. Dieser Zeitraum sollte hinreichend lang sein und ein möglichst breites Spektrum an Beladungssituationen abdecken. Der so gefundene Parametersatz wird dann auf mehrere andere, möglichst weit auseinander liegende Zeitbereiche mit anderen Umgebungstemperaturen angewandt. Wenn hierbei größere Abweichungen auftreten sollten, so sind die Ursachen zu ermitteln und zu beseitigen. Meist handelt es sich dabei um Fehler im Strukturdatensatz, d. h., dass Höhenverlauf, Anordnung der Antriebe, der Bandwaage oder des Spannsystems in der Realität anders sind als im Strukturdatensatz abgebildet.

Mit dem gültigen Strukturdatensatz und dem Zustandsparametersatz werden anschließend alle Zeitbereiche nacheinander automatisch durchgerechnet. Hierbei werden für jeden Zeitbereich die Rechenergebnisse in themenspezifische Dateien abgelegt, aus denen die

gewünschten Visualisierungen erzeugt werden. Bild 3 zeigt hierzu einige Beispiele.



**Bild 3:** Ausgewählte Zeitverläufe für einen Zeitbereich

Für die so aufbereiteten 177 Operationen hat BeltGenius alle Messdaten sowie die „virtuellen Messwerte“ überprüft und die Kennzahlen in einer Übersichtstabelle hinterlegt, sodass die interessanten Bereiche durch Filtern und Sortieren leicht identifiziert werden können.

Die Übersichtstabelle ist in der Offline-Version das wichtigste Instrument, um die gesamte Anlage zu beurteilen und schnell Abweichungen zu erkennen.

### 3 Allgemeine Beurteilung der Anlage

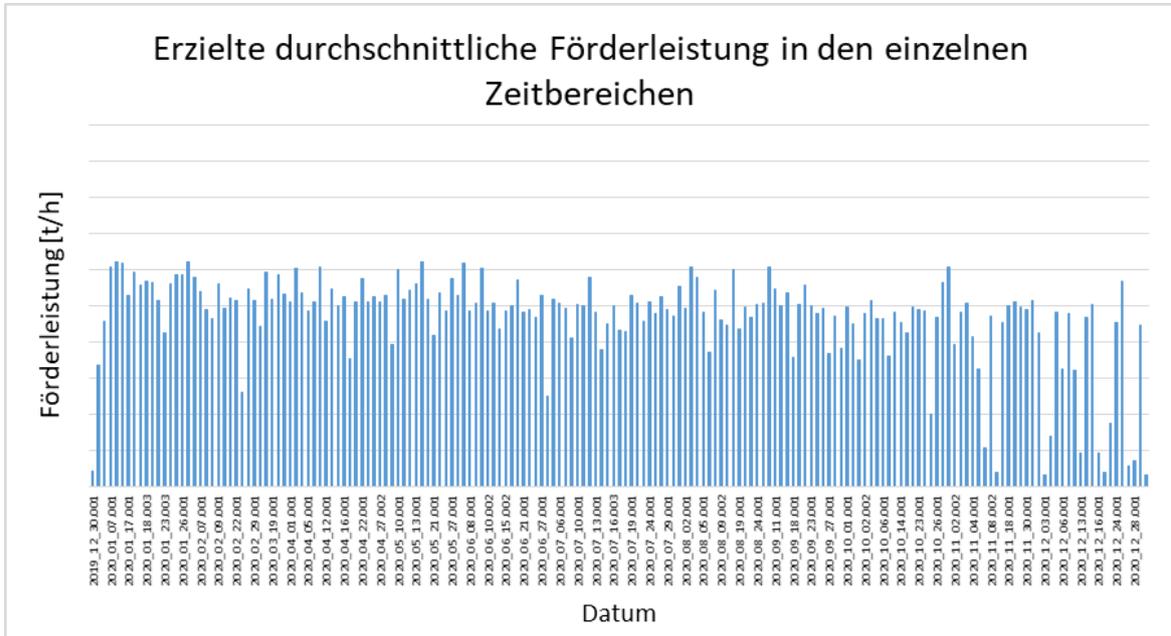
Die Anlage ist insgesamt gut ausgelegt und hatte im Betrachtungszeitraum keine Überlastereignisse. Die Überprüfung der physikalischen Grenzen bezüglich Motorleistung, Gurt-sicherheit und Förderquerschnitt ergab, dass sogar eine Verbesserung der Förderleistung um 2.000 t/h ohne Einschränkungen möglich wäre.

Folgende Kennzahlen ermöglichen einen schnellen Überblick über Ausnutzung und Effizienz der Bandanlage:

- Dauer der einzelnen Betriebszeiten
- Stillstandsdauer zwischen den Betriebszeiten
- Nachbildungsgüte
- Durchschnittliche Förderleistung
- Spezifischer Energieverbrauch je Tonne real und ideal
- Absoluter Energieverbrauch real und ideal

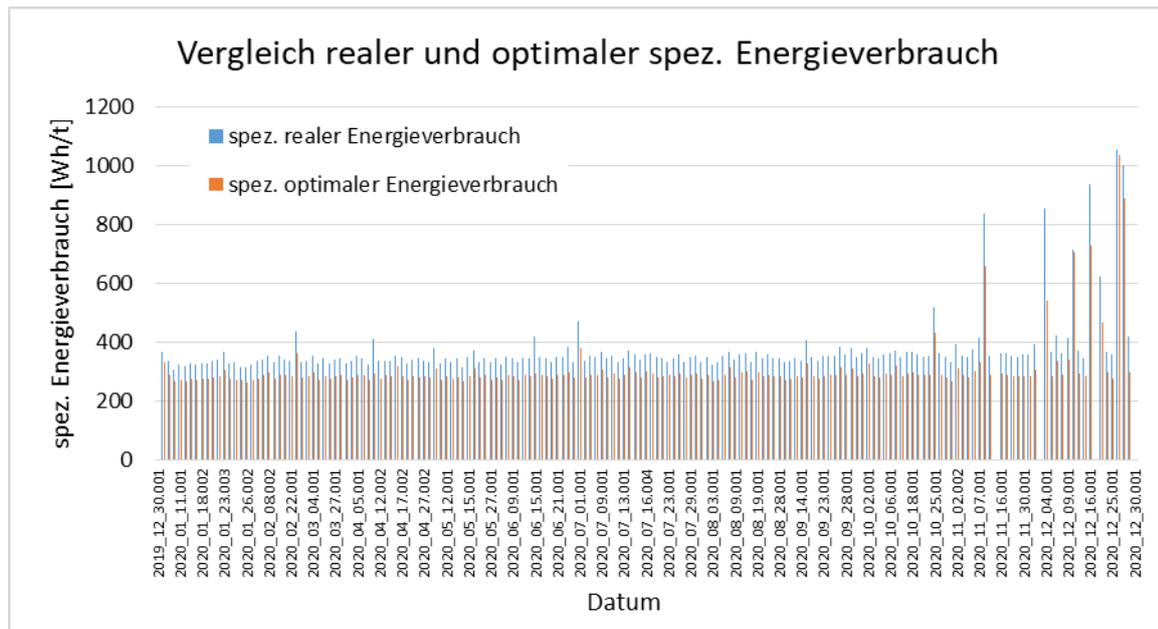
Der Zeitgrad (Betriebszeit/Kalenderzeit) betrug 86,82 %, der Lastgrad 71,8 % (durchschnittliche Förderleistung / Nennförderleistung).

Bild 4 zeigt die durchschnittliche Förderleistung für alle Zeitbereiche. Man sieht die z. T. großen Schwankungen.



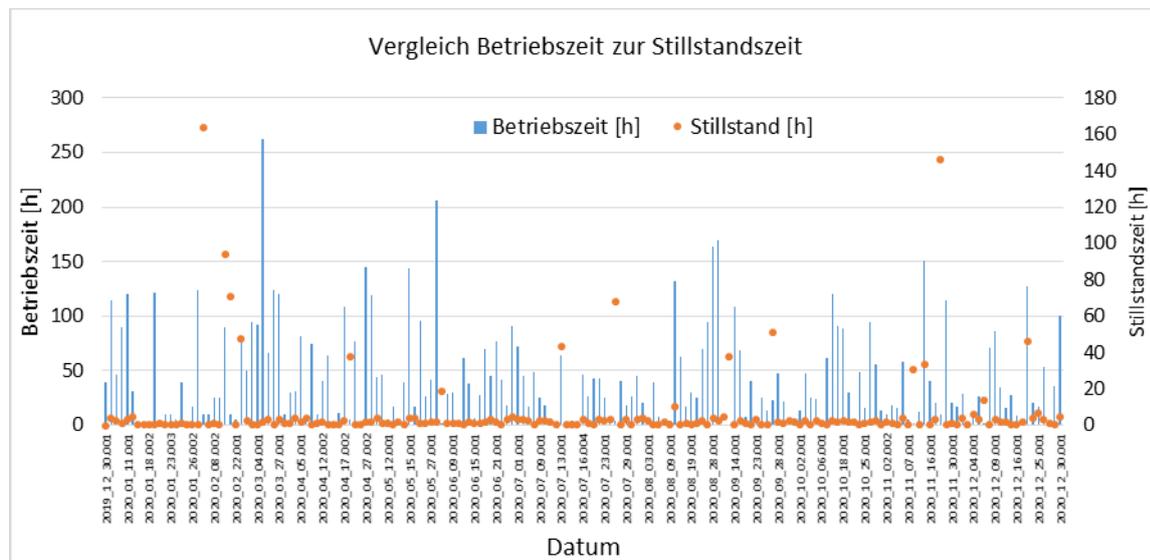
**Bild 4:** Erzielte durchschnittliche Förderleistungen je Zeitbereich

Im Schnitt wurde je Tonne Material 361,3 Wh verbraucht. Bild 5 zeigt für jeden Zeitbereich, welcher spezifische Energieverbrauch angefallen ist und was – bei insgesamt gleicher Fördermenge und –zeit - bei gleichmäßiger Beladung möglich gewesen wäre („optimaler Energieverbrauch“ bzw. „idealer spez. Energieverbrauch“). Das durchschnittliche Einsparpotential durch Vermeidung von Förderlücken und entsprechend niedrigerer – aber gleichmäßiger Beladung wären etwa 20 %. (Eine deutlich größere Einsparung würde sich ergeben, wenn eine gleichmäßig hohe Förderleistung erzielt werden könnte und die Betriebszeit um die vermiedenen Förderlücken gekürzt würde. Das klingt zwar trivial, weil jeder Bergmann sowieso immer eine hohe Förderleistung anstrebt, aber es ist für mögliche Entscheidungen über eine Verbesserung der betrieblichen Organisation hilfreich, das damit erzielbare Einsparvolumen zu kennen.)



**Bild 5:** Vergleich realer und theoretisch optimaler Energieverbrauch pro Tonne

Die Stillstände zwischen den Zeitbereichen dauerten zwischen 6 Minuten und 6 Tagen, 19 Stunden und 40 Minuten. Der durchschnittliche Stillstand betrug 6 Stunden und 40 Minuten. Bild 6 zeigt die einzelnen Betriebszeiten sowie die Dauer der Stillstände dazwischen. Gut zu erkennen die etwa ein Dutzend Stillstände, die länger als einen Tag dauerten.



**Bild 6:** Dauer der einzelnen Zeitbereiche und Stillstände

#### 4 Kennziffern zur Identifizierung von Abweichungen

BeltGenius produziert aus den originären Messwerten eine Vielzahl „virtueller“ Messwerte sowie daraus abgeleitete übergreifende Kennziffern und führt eine automatische Bewertung in Bezug auf vorgegebene Gültigkeitsgrenzen durch. Für jeden Messwert – real oder virtuell - werden je vier Kennzahlen gebildet: kleinster Wert, größter Wert, Durchschnitt und Volatilität sowie Klartextmeldung bei Abweichungen einer der Kennzahlen vom erwarteten Bereich.

Beispiele für übergreifende Kennziffern: Leistungsaufteilung, Bremsenergie, Konfidenz.

In der Offline-Version von BeltGenius, wie sie in diesem Projekt eingesetzt wurde, werden diese Kennziffern in eine Übersichtstabelle geschrieben, wodurch ein schneller Überblick über die Anlage möglich wird und auffällige Zeitbereiche direkt erkennbar werden.

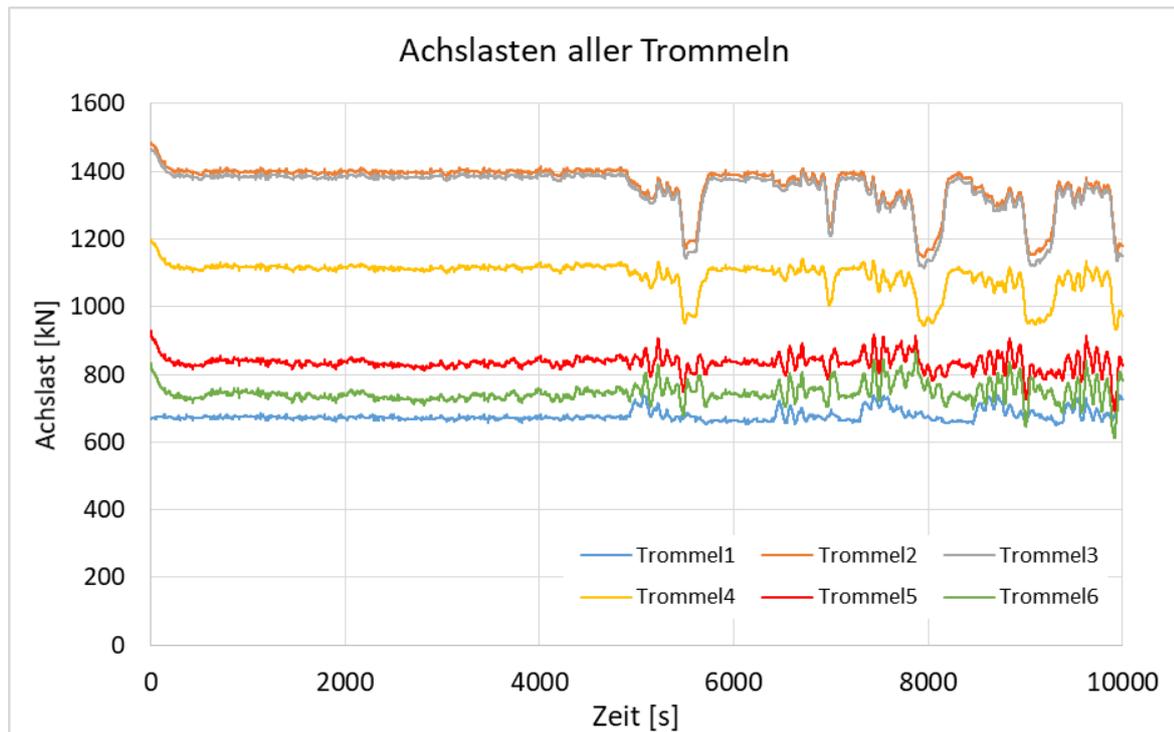
Bei einem permanenten Online-Einsatz von BeltGenius müssen die Festlegung der zulässigen Werte, bei deren Verletzung eine Abweichungsmeldung erfolgen soll, der Inhalt dieser Klartext-Abweichungsmeldungen, die Benennung der Adressaten der verschiedenen Meldungen sowie die Festlegung der daraufhin auszuführenden Maßnahmen in Absprache mit dem Kunden erfolgen, denn dies ist für den betrieblichen Nutzen des Systems von entscheidender Bedeutung.

Für viele Kennziffern ist eine Angabe der unzulässigen Werte vorab nicht möglich. Daher ist in Absprache mit dem Kunden anfangs eine Konzentration auf die wichtigsten Kennziffern erforderlich. Das System wird jedoch mit der entsprechenden Pflege immer umfangreicher und genauer.

## **5 Abschätzung der Komponenten-Lebensdauer**

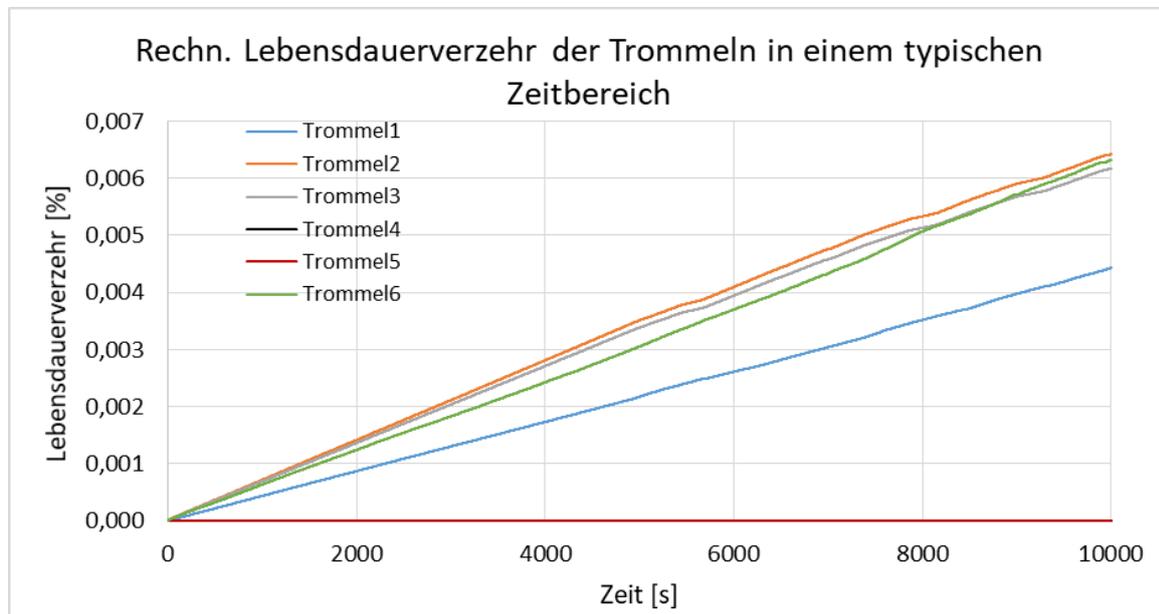
Für die meisten Komponenten ist derzeit keine Erfassung der betrieblichen Beanspruchung verfügbar bzw. aus wirtschaftlichen Gründen nicht installiert. Einziges Beurteilungskriterium ist oftmals lediglich die Einbauzeit. BeltGenius kann jedoch für alle bewegten Teile die relevanten Kräfte bzw. Momente sowie Wege und Drehwinkel lückenlos erfassen. Wenn der Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Lebensdauer verzehr bekannt ist, lassen sich damit Lebensdauer vorhersagen automatisch generieren. Jedoch ist in den meisten Fällen dieser Zusammenhang a priori nicht bekannt oder nur unter Einsatzbedingungen, die deutlich von den aktuellen abweichen. Da solche Vorhersagen aber von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind, ist es sinnvoll, für die verschiedenen Komponenten die jeweiligen Zusammenhänge zu suchen. Hierzu benötigt man – neben Ein- und Ausbaudatum der Komponenten - eine Erfassung aller möglichen Einflussfaktoren, um die verschiedenen Berechnungsansätze auf Korrelation zu den real erzielten Einsatzzeiten zu testen.

Als einfaches Beispiel für eine theoretische Lebensdauerabschätzung mittels BeltGenius sei hier die Beurteilung der Wälzlager der sechs Trommeln nach [4] angeführt. Bild 7 zeigt für einen realen Zeitbereich von 10.000 s den Verlauf der Achslasten dieser sechs Trommeln. Für jede einzelne Sekunde kann die rechnerische Lebensdauer nach [4] für die jeweilige Lagerlast (= halbe Achslast) berechnet werden. Die Aufsummierung der Kehrwerte liefert dann den Lebensdauer verzehr für diesen Zeitbereich.



**Bild 7:** Zeitlicher Verlauf der Achslasten für einen typischen Zeitbereich

Die Trommeln 2 und 3 haben die höchsten Achslasten, sind aber auch mit anderen Wälzlagerausstattungen ausgestattet als die anderen Trommeln. Bild 8 zeigt den prozentualen Lebensdauererzehr für diese 10.000 Sekunden. Die Lager der Trommeln 4 und 5 sind praktisch dauerfest (Kurven für Trommel 4 und 5 liegen übereinander auf der x-Achse).



**Bild 8:** Rechnerischer Lebensdauererzehr der Trommellager nach [4] für einen Zeitbereich

Weitere mögliche Einflussgrößen, die hier nicht berücksichtigt wurden, aber als Daten vorhanden sind: Umgebungstemperatur, Anzahl der Anfahrvorgänge sowie Dauer der Stillstände (und damit der Abkühlzeiten). Mit den real erzielten Einsatzzeiten könnte dann diese theoretische Berechnung verbessert werden. In ähnlicher Weise können andere Komponenten betrachtet werden. Für die Tragrollen sind neben der Gurtgeschwindigkeit

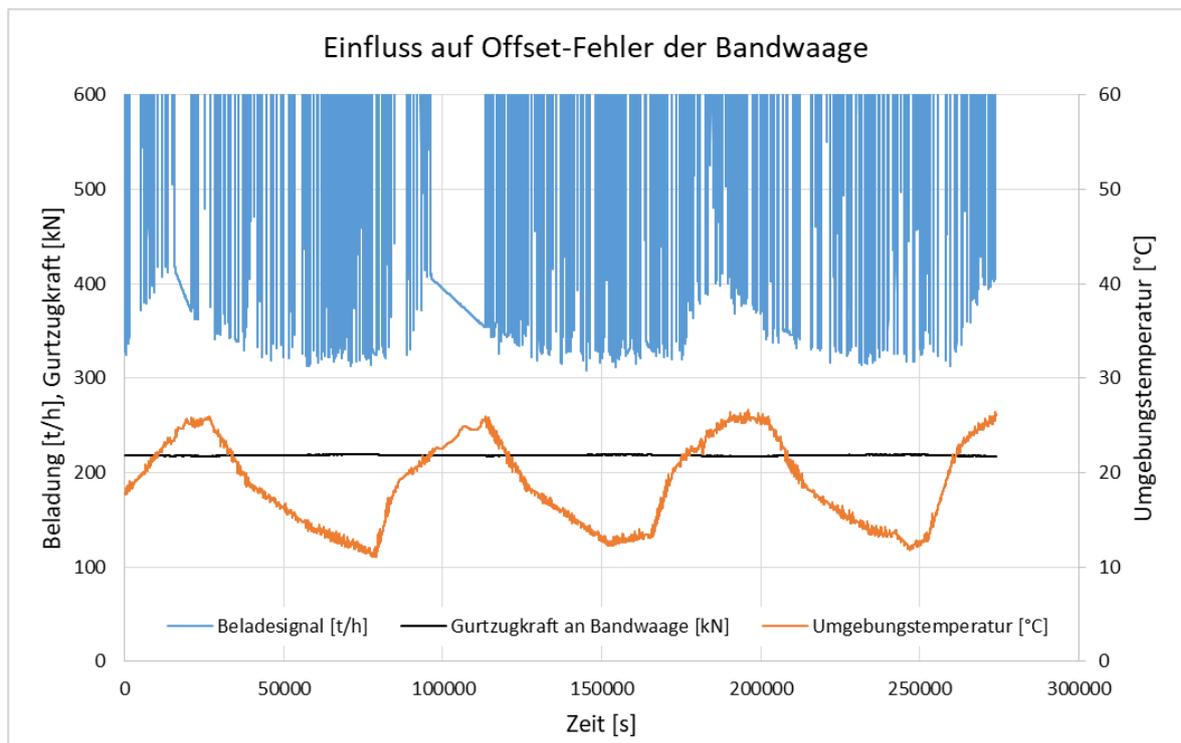
auch die Radiallasten aus Gurt- und Beladegewicht sowie der Orthogonalkomponente der örtlichen Gurtzugkraft verfügbar, für die Gurtverbindungen die schwellende Beanspruchung durch die Gurtzugkraft etc.

## 6 Auffällige Abweichungen

### 6.1 Messfehler der Bandwaage

Die Bandwaage liefert ein Signal in t/h. Dieser Wert wird aus der aktuellen Auflast multipliziert mit der Gurtgeschwindigkeit gebildet. Entsprechend ist das Signal gleich Null, wenn die Anlage steht. Im laufenden Betrieb wird aber immer eine Mindestbelastung > 300 t angezeigt. Bild 9 zeigt einen Zeitbereich über drei Tage, aus dem Folgendes geschlossen werden kann:

- Die Bandwaage hat einen Offset zwischen 300 und 420 t/h, der von der Umgebungstemperatur beeinflusst zu sein scheint: Je höher die Temperatur, desto höher der Offset.
- Dieser Fehler liegt im Bereich von einigen Prozent der Nennförderleistung.
- Der Fehler kann bei höherer Förderleistung größer oder kleiner sein.
- Die örtliche Gurtzugkraft hat keinen Einfluss auf den Offset-Fehler. Es liegt also keine Fehlausrichtung der Bandwaage vor.



**Bild 9:** Illustration des festgestellten Kalibrierungsfehlers der Bandwaage

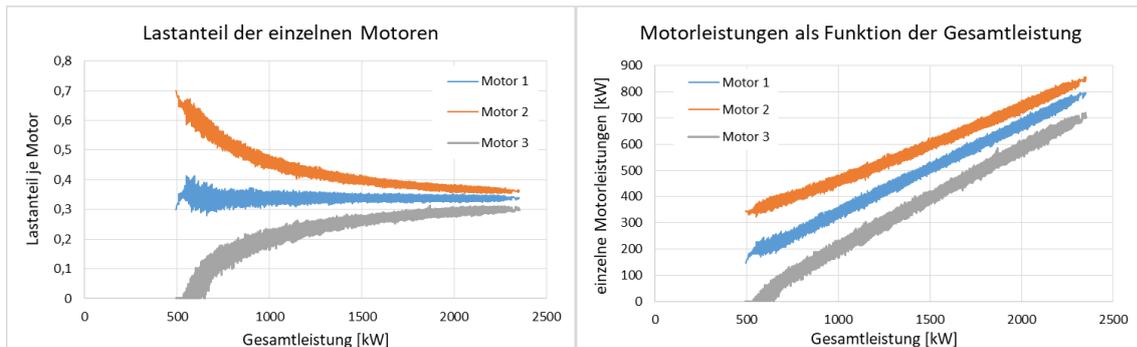
Die Auswirkung eines Kalibrierungsfehlers dieser Größe hängt davon ab, wofür der Betreiber dieses Signal für seine Prozesse nutzt. Die Anpassung des Digitalen Zwillings an die reale Anlage ist davon ebenfalls betroffen. Die Ausreißer in der Nachbildungsgüte (Bild 2) betreffen Zeitbereiche mit einem sehr hohen Leerlaufanteil und sind damit erklärbar.

## 6.2 Schlechte Leistungsaufteilung der Antriebe

Über die kompletten 12 Monate war die Leistungsaufteilung der drei Motoren wie folgt:

- durchschnittliche Leistung Motor 1: 560,55 kW, entspricht 33,73 %
- durchschnittliche Leistung Motor 2: 636,58 kW, entspricht 38,31 %
- durchschnittliche Leistung Motor 3: 464,65 kW, entspricht 27,96 %

Die Leistungsaufteilung ist abhängig vom aktuellen Gesamtleistungsbedarf (s. Bild 10).

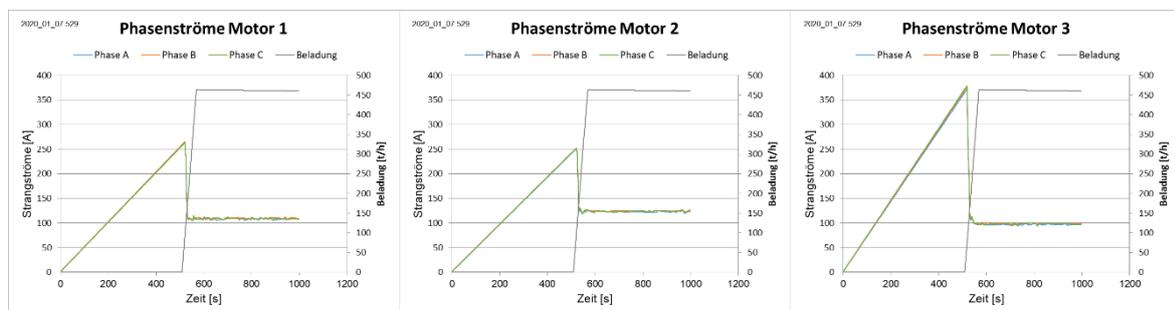


**Bild 10:** Einzelleistung und Leistungsanteil der Motoren als Funktion des Gesamtleistungsbedarfs

Motor 2 wird viel stärker belastet als Motor 3 – insbesondere bei geringem Gesamtleistungsbedarf (leeres Förderband). Die maximal erzielbare Förderleistung ist hiervon jedoch nicht beeinträchtigt, da die installierte Leistung (3 x 1.250 kW) mehr als ausreichend ist. Jedoch: Bei leerem Förderband sinkt die Leistung von Motor 3 auf null! Der zeitweise lastlose Betrieb kann zu Schäden am zugehörigen Getriebe führen. Durch Anpassen der Vorschaltwiderstände kann die Leistungsaufteilung optimiert und dieser schädigende Zustand vermieden werden.

## 6.3 Fehlfunktionen des Flüssigkeitsanlassers

Während des Anfahrvorgangs werden die Momente der Schleifringläufer-Motoren über eine kontinuierliche Veränderung der externen Vorschaltwiderstände gesteuert. Dies geschieht mit einem sog. Flüssigkeitsanlasser, der am Ende des Hochlaufvorgangs kurzgeschlossen wird, so dass danach nur noch die Dauerschleifwiderstände wirksam sind. Bild 11 zeigt die Ströme der drei Phasen für jeden Motor und das Lastsignal der Bandwaage für einen normalen Startvorgang, wie er in 148 der 189 Starts ablief.

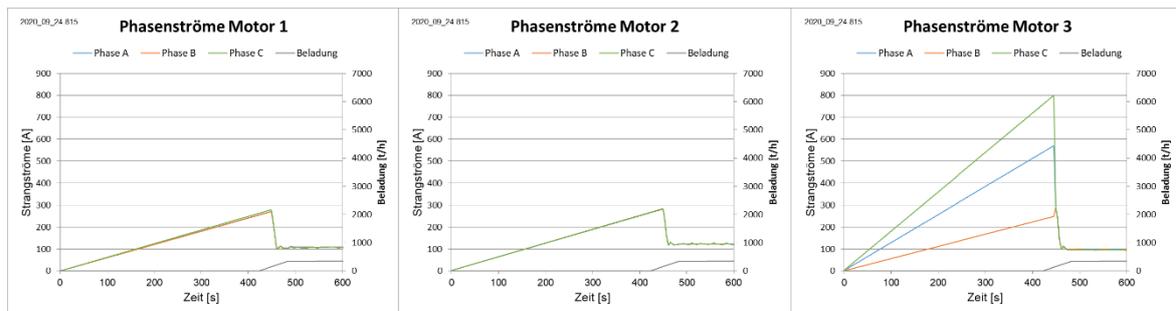


**Bild 11:** Strangströme und Bandwaagensignal während eines normalen Hochlaufs

Der lineare Anstieg des Stroms während der ersten 520 Sekunden zeigt den Einfluss des Flüssigstarters. Motor 3 zieht in dieser Zeit deutlich mehr Strom als Motor 1 und 2 (max.

375 A gegenüber 260 bzw. 250 A). Bei jedem der drei Motoren sind die jeweiligen drei Strangströme aber praktisch identisch. An dem Signal der Bandwaage (Anstieg von 0 auf den Offset-Fehler von 455 t/h in der Zeit von 508 bis 568 Sekunden) lässt sich erkennen, dass die Anlage innerhalb von 60 Sekunden linear auf die Nenngeschwindigkeit beschleunigt.

In 41 der 189 Starts kam es aber zu Abweichungen zwischen den Strangströmen, in 10 Fällen sogar in erheblichem Umfang wie in Bild 12 dargestellt.

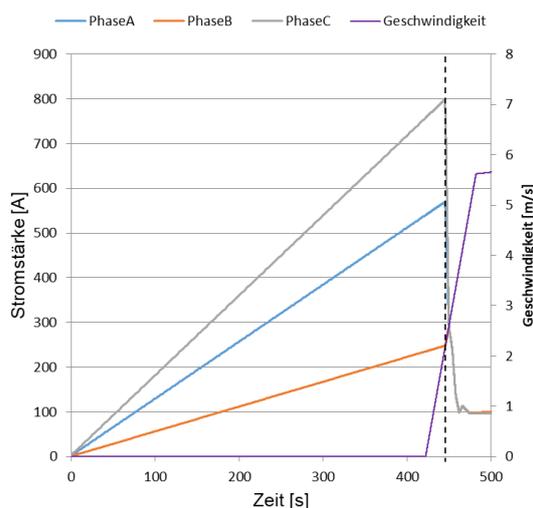


**Bild 12:** Strangströme und Bandwaagensignal während eines fehlerhaften Hochlaufs

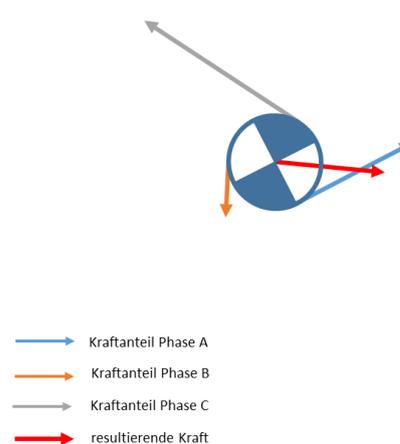
Jede Phase erzeugt eine Kraft auf den Rotor und eine entgegengesetzte Kraft auf den Stator entsprechend ihrem Strom. Diese drei Kräfte haben einen Winkel von 120° zueinander. Solange alle drei Phasen den gleichen Strom haben, sind die Kräfte gleich und erzeugen nur ein Drehmoment, aber keine resultierende Kraft. Asymmetrische Strangströme hingegen verursachen eine beträchtliche exzentrische Kraft (siehe Bild 13). Die Richtung dieser resultierenden Kraft ändert sich mit dem Rotorwinkel. Da alle drei Antriebe diesen Effekt von Zeit zu Zeit zeigen, sind Schäden an den Antrieben sehr wahrscheinlich, solange der Flüssigkeitsstarter diese Exzentrizität verursacht.

2020\_09\_24.815

**Strangströme Motor 3**



**Kräfte an Motor 3 während des Starts**



**Bild 13:** Asymmetrische Strangströme an Motor 3 und resultierende Kraft auf den Rotor kurz vor dem Freischalten des Flüssigkeitsanlassers

Dieser Effekt ist wahrscheinlich die Ursache für den Ausfall des Getriebes von Antrieb 2, das am 2. Oktober 2020 ersetzt wurde.

## 7 Vorgehensweise zum optimalen Betrieb mittels Digitalem Zwilling

Wie bisher gezeigt, liefert der Digitale Zwilling eine Fülle an Informationen, mit denen ein Fachmann eine umfassende Beurteilung des Anlagenzustands vornehmen kann. Ziel ist jedoch, diesen Fachmann durch eigene Reaktionen des Systems zu ersetzen. Die Schwierigkeit besteht darin, dass jede Bandanlage ein Unikat darstellt mit jeweils eigenen Schwachpunkten. Dies bedeutet, dass vor allem bei den ersten Installationen jede Auffälligkeit untersucht wird, um aus den gefundenen Ursachen Algorithmen zu entwickeln, die auf diese Auffälligkeiten künftig angemessen reagieren. Hierzu ist dann auch jeweils mit dem Betreiber festzulegen, wer der Adressat der jeweiligen Abweichungsmeldung ist und welche Reaktion darauf zu erfolgen hat.

Im Folgenden soll die Vorgehensweise zu dieser sukzessiven Anreicherung des Digitalen Zwillings grob skizziert werden.

- „Verankern“: Aufstellung des Digitalen Zwillings, Anpassung an realen Zustand mittels Messdaten und Optimierung der Zustandsparameter, „Basis-Assessment der Anlage“ --> klassisches Consulting mit besseren Mitteln
- Festlegung kritischer Grenzwerte: Für jeden realen und jeden virtuellen Messwert müssen in Abhängigkeit des jeweiligen Betriebszustands (Anfahren, stationärer Betrieb und Stillsetzen) Grenzwerte festgelegt werden (untere Grenze, obere Grenze, zulässige Volatilität)
- Vorläufige Festlegung der Abweichungsmeldungen: Welche Klartextmeldung soll für jede der möglichen Grenzwertverletzungen erzeugt werden?
- Absprache mit Betreiber, wer welche Fehlermeldung erhält und welche Maßnahmen dann getroffen werden
- Optimierung und Pflege des Systems: Ursachenforschung für erkannte Abweichungen, ggf. Anpassung der kritischen Grenzwerte, der jeweiligen Adressaten der Abweichungsmeldung und der einzuleitenden Maßnahmen --> Iteration der letzten drei Schritte

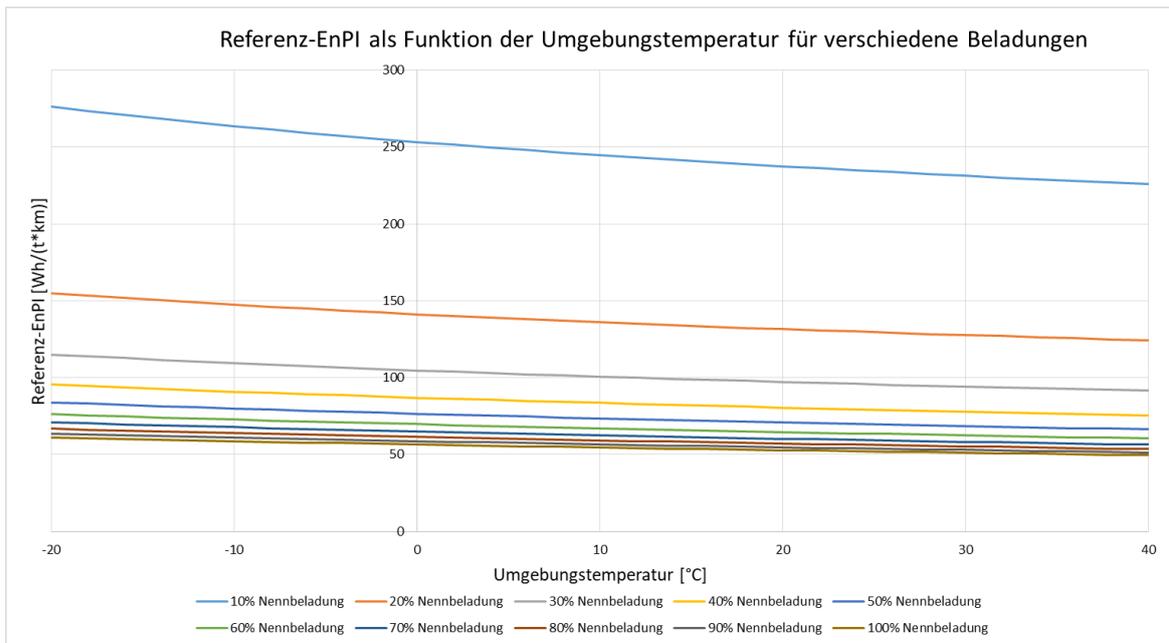
Es muss also ein gewisser Aufwand betrieben werden, um aus einem Digitalen Zwilling ein zunehmend intelligentes Instandhaltungswerkzeug zu machen. Je besser ein Kunde hierbei mitarbeitet, desto größer der erzielte Nutzen.

## 8 Monitoring der Energie-Effizienz mittels Digitalem Zwilling

Obwohl das Thema Energieeffizienz sehr wichtig ist und in der Zukunft noch an Bedeutung gewinnen wird, gibt es bislang keinen genormten Kennwert für die Energieeffizienz einer Bandanlage. Der fiktive Reibbeiwert  $f$  nach [2] ist hierfür ungeeignet, wie an dieser Stelle vor zwei Jahren schon gezeigt wurde [1]. In Zusammenarbeit mit einem weiteren Anlagenbetreiber wurde nach Vorgabe von [3] eine Energiekennziffer entwickelt, die den energetischen Aufwand mit dem Nutzwert einer Bandanlage verknüpft. Der Nutzwert einer Bandanlage ist der Transport von Material über eine vorgegebene Distanz. Die Einheit dieser Kennziffer (Energy Performance Indicator – EnPI) ist daher  $Wh/(t \cdot km)$ . Sowohl der

Energieverbrauch (in Wh) als auch die transportierte Masse (in t) sind gut messbar. Wichtig ist jedoch, diese Kennziffer um die nicht beeinflussbaren Anteile (Hubarbeit!) zu bereinigen. Es bleiben dann aber immer noch Einflüsse, die nicht (Umgebungstemperatur) oder nur durch massiven Eingriff in die Produktion (Größe und Schwankung des Massenstroms) beeinflusst werden können.

Mit dem Betreiber der Bandanlagen, an denen BeltGenius bereits online eingesetzt wird, wurde vereinbart, neben dem Roh-EnPI aus der aktuellen Motorleistung und Fördermenge auch einen normierten EnPI auszuweisen. Dieser Referenz-EnPI gibt an, welcher Energieaufwand für die jeweilige Bandanlage erforderlich ist, um eine Tonne Material bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 15° C und einer konstanten Förderleistung von zwei Drittel der Nennförderleistung einen Kilometer horizontal zu transportieren. Die Werte für die Umgebungstemperatur und die Förderleistung wurden so gewählt, dass sie in etwa dem Jahresmittel dieser Werte entsprechen. Selbstverständlich kann mit dem Digitalen Zwilling auch für jede andere Kombination dieser Parameter der EnPI ausgewiesen werden. Bild 14 zeigt das entsprechende Kennfeld für die chilenische Anlage.



**Bild 14:** Kennfeld für Referenz-EnPI der Beispiel-Anlage

Um Anlagen untereinander vergleichen zu können, wäre es sinnvoll, dass diese oder eine vergleichbare Vorgehensweise in einer Norm festgeschrieben würde.

Auch ohne Norm kann dieses Verfahren jetzt schon eingesetzt werden, um dem Betreiber Hinweise darauf zu geben,

- wie effizient seine Anlage bei verschiedenen Betriebsbedingungen ist
- wie effizient er seine Anlage in der Praxis betreibt.

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie BeltGenius – eine Kombination aus data analytics und einem mathematisch-physikalischen Bandanlagen-Modell, das mit geringem Aufwand an jede Bandanlage angepasst werden kann und diese unter Verwendung realer Messwerte exakt nachbildet - einen schnellen Überblick über den Zustand, die Effizienz und die Ausnutzung der Anlage ermöglicht. Hiermit können Ansatzpunkte zur Verbesserung aufgedeckt und quantifiziert werden. Für den Experten, der eine Anlage optimieren will, ist dies ein viel mächtigeres Instrument als die üblichen Berechnungs- und Simulationstools.

Der Beitrag zeigt auch, wie damit jenseits eines einmaligen Anlagen-Consultings ein dauerhafter Nutzen für den Betreiber geschaffen werden kann. Es genügt nicht, den Kunden mit weiteren Bildschirmen und Online-Grafiken auszustatten, da dieser nicht die Zeit und das Personal hat, damit zu arbeiten. Die Herausforderung besteht darin, aus einem zunächst „passiven“ Digitalen Zwilling ein aktives Monitoring-System zu machen, das selbsttätig Abweichungen erkennt, meldet und die nötigen Maßnahmen initiiert. So lassen sich z. B. zu allen in Kapitel 6 aufgeführten Abweichungen Algorithmen implementieren, welche diese in der Zukunft sicher erkennen und den zuständigen Betreuer entsprechend informieren. Das kann auch ein externer Service-Provider sein, der die Aufforderung erhält, die Elektroden des Flüssigkeits-Anlassers zu tauschen oder die Bandwaage neu zu kalibrieren.

Der Ansatz, mittels eines Digitalen Zwillings Betrieb und Instandhaltung einer Anlage zu optimieren, ist insbesondere bei hochwertigen Investitionsgütern, die in Serie gebaut werden, besonders lukrativ und daher auch schon in einigen Bereichen weit fortgeschritten. Ein gutes Beispiel hierfür zeigt das Youtube-Video <https://youtu.be/2dCz3oL2rTw> für eine 295 MW-Dampfturbine von GE, von der 125 Exemplare installiert sind. Im Vergleich dazu stehen wir in der Schüttgutfördertechnik noch am Anfang, da hier jede Anlage ein Individuum ist und Skaleneffekte sich langsamer einstellen. Dennoch lohnt sich der Aufwand, denn die damit möglichen Verbesserungen und Einsparungen sind auf herkömmlichem Weg nicht zu erzielen.

Zudem kann die Expertise für optimalen Betrieb und Instandhaltung von Bandanlagen bei immer weniger Betreibern vorausgesetzt werden. Es braucht ein Monitoring-System für Bandanlagen, das dieses Expertenwissen zunehmend ersetzt. Ein solches System anzulernen, zu pflegen und zu erweitern erfordert jedoch eine enge Zusammenarbeit mit dem Betreiber.

**Quellenverzeichnis:**

- [1] Ziegler, M.; Gladysiewicz, A.: Digitaler Zwilling als Basis für ein umfassendes Optimierungsinstrument für Bandanlagen. Fachvortrag auf der 24. Fachtagung Schüttgutfördertechnik Magdeburg, 25. und 26. September 2019, ISBN: 978-3-947068-06-7
- [2] DIN 22101: Stetigförderer - Gurtförderer für Schüttgüter - Grundlagen für die Berechnung und Auslegung, Ausgabe 2011-12
- [3] DIN ISO 50006:2017-04: Energiemanagementsysteme - Messung der energiebezogenen Leistung unter Nutzung von energetischen Ausgangsbasen (EnB) und Energieleistungskennzahlen (EnPI) - Allgemeine Grundsätze und Leitlinien (ISO 50006:2014)
- [4] DIN ISO 281:2007: Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Der Weg zum Hochleistungskipper

Rainer Wirtz  
Frank Severin  
Michael Herzog



Dipl.-Ing. Rainer Wirtz (Referent)  
Dipl.-Ing. Frank Severin (Co-Referent)  
Dipl.-Ing. Michael Herzog  
thyssenkrupp Industrial Solutions AG  
Ernst-Heckel-Straße 1  
66386 St. Ingbert



## Der Weg zum Hochleistungskipper

*Länder mit hohem Wirtschaftswachstum wie China und Brasilien oder klassische Rohstoffexportnationen wie Russland und Australien verbessern ständig ihre Hafeninfrastuktur u. a. durch neue leistungsfähige Waggonkippsysteme, um der steigenden Nachfrage nach Import und Export verschiedener Schüttgüter gerecht zu werden. Zudem ist der Transport von Massenschüttgut mittels Zug neben dem Transport auf dem Wasserweg das ökonomischste und auch ökologischste Transportsystem.*

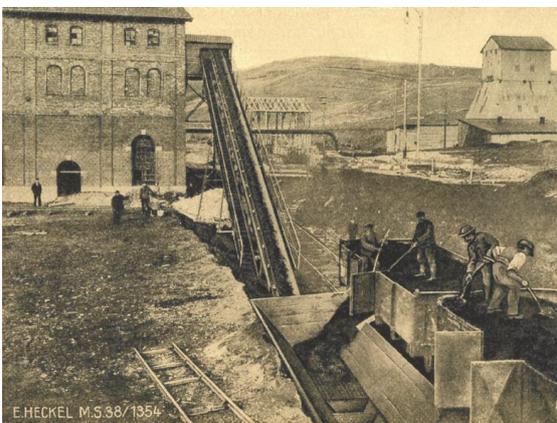
*In diesem Beitrag wird der Aufbau solcher Anlagen vorgestellt. Die verschiedenen Kippersysteme und damit verbundene Subsysteme werden kurz beschrieben, um dem Nichtfachmann einen Überblick über die Technik und Funktion solcher Anlagen zu geben. Außerdem wird am Ende noch anhand ausgeführter Anlagen die Leistungsfähigkeit beschrieben.*

### 1 Historische Entwicklung

Seit den babylonischen und ägyptischen Bauvorhaben ist der Transport von Rohstoffen ein wichtiger Beitrag zu den jeweiligen Gesellschaften.

So wie die Entwicklung der Dampfkraft ist auch die Entwicklung der Schüttguttransporte mit Hilfe von Waggons und deren Entleerung mittels Kipper durch den Bergbau wesentlich vorangetrieben worden. Bereits zu Beginn des industriellen Bergbaus sind Wagen, sogenannte Loren, auf Baumstämmen als Schiene geschoben worden. Im 19. Jahrhundert begann durch die Kraftübertragung mittels Seilen und Ketten sowie die Fortschritte in der Stahlherstellung die Entwicklung von Umlaufsystemen mit Kipperanlagen. Diese Entwicklungen fanden hauptsächlich in den Bergbaugebieten Lothringen, Saar und an der Ruhr statt, in denen der Bergbau ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor darstellte (Bild 1 und Bild 2).

Infolge des Ausbaus der Schienennetze für den Personentransport nahm auch die Bedeutung der Eisenbahn für den Gütertransport zu. Es konnte zum Teil das bestehende und schnell wachsende Schienennetz benutzt werden. Andererseits wurde der Ausbau der Schienennetze auch durch den Gütertransport von den Kohlegruben und Erzminen zu den Stahlwerken beschleunigt.



**Bild 1:** Beladestation um 1900 [Fa. Heckel]



**Bild 2:** Fahr- und drehbarer Waggonkipper [Pohlig]

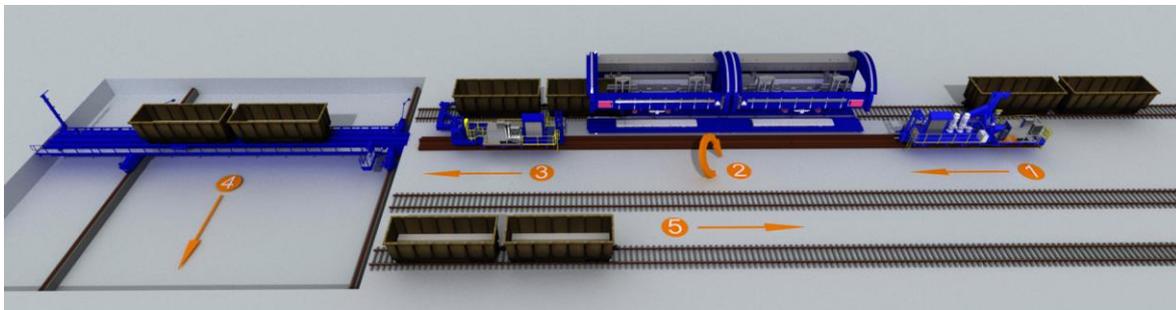
Das manuelle Entleeren der Waggons war zu zeit- und personalintensiv, so dass sehr schnell Entwicklungen zu Kippsystemen für Eisenbahnwaggons angestoßen wurden. Die ersten Systeme waren bedingt durch den Aufbau der Eisenbahnwaggons Stirnkipper, welche den Waggon durch Neigen in Fahrtrichtung entleeren konnten.

Neben den offenen Kastenwagen wurden von den Bahngesellschaften auch Waggons mit Bodenentleerung und Seitenentleerung entwickelt. Diese sind für leicht fließende Schüttgüter und für Schüttgüter, die nur in geschlossenen Waggons transportiert werden können, gut geeignet. Für schwer fließende Schüttgüter und Schüttgüter hoher Dichte sind offene Waggons, welche durch Kippen entleert werden, effektiver und zuverlässiger.

## 2 Kipperanlagen

Waggonkipper werden für die verschiedensten Einsatzzwecke konstruiert. Der häufigste Einsatzfall ist der Umschlag von Massenschüttgütern. Die in den Bergbaugebieten, welche meist im Landesinneren liegen, abgebauten Rohstoffe werden bei langen Transportwegen oft mit der Eisenbahn von den Minen zu den Exporthäfen transportiert. Hier erfolgt der Umschlag von der Schiene auf das Schiff.

Eine Kipperanlage besteht im Wesentlichen aus dem eigentlichen Waggonkipper und einer Zustelleinrichtung, welche die Waggons der Kippeinheit zuführt (Bild 3). Einen wesentlichen Einfluss auf die Gestaltung der Kipperanlage haben das Schüttgut und seine Eigenschaften, die klimatischen Verhältnisse des Standorts und die zur Verfügung stehende Waggonflotte.



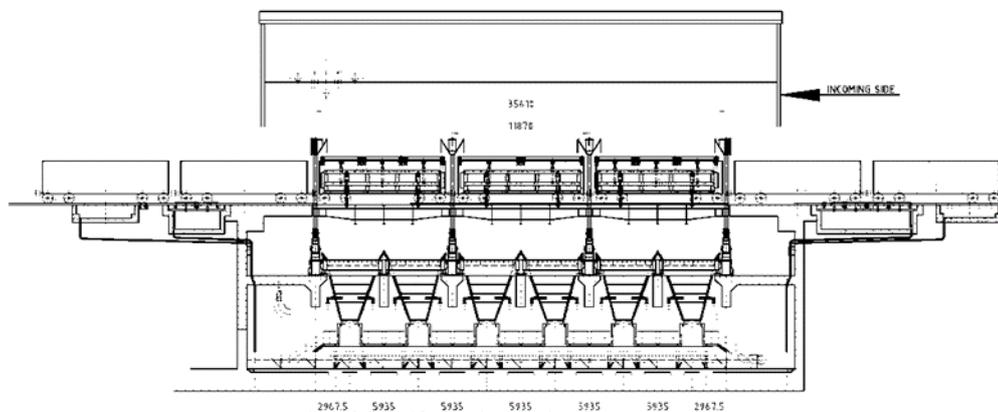
**Bild 3:** Aufbau einer Kipperanlage mit Schiebebühne  
(1 Vorzieheinrichtung, 2 Doppelkipper, 3 Pusher, 4 Schiebebühne, 5 Leergleis)

Die Kipperanlagen lassen sich in drei Grundkategorien einteilen: in Rundkipper, Seitenhochkipper und Sonderbauformen. Die Rundkipper werden unterschieden in solche mit geschlossenem Endschild (O-Typ) und solche mit offenem Endschild (C-Typ). Die Anzahl der gleichzeitig zu kippenden Wagen kann ebenfalls als Einteilungskriterium herangezogen werden. Historisch haben sich die Kipper von den Einfachkippern, welche einen einzelnen, meist entkuppelten Waggon entleeren konnten, über die Doppelkipper zu Dreifachkippern und Vierfachkippern entwickelt. Die Vierfachkipper sind derzeit die größten ausgeführten Kipper, wobei auch bereits Fünffachkipper in der Planung untersucht wurden.

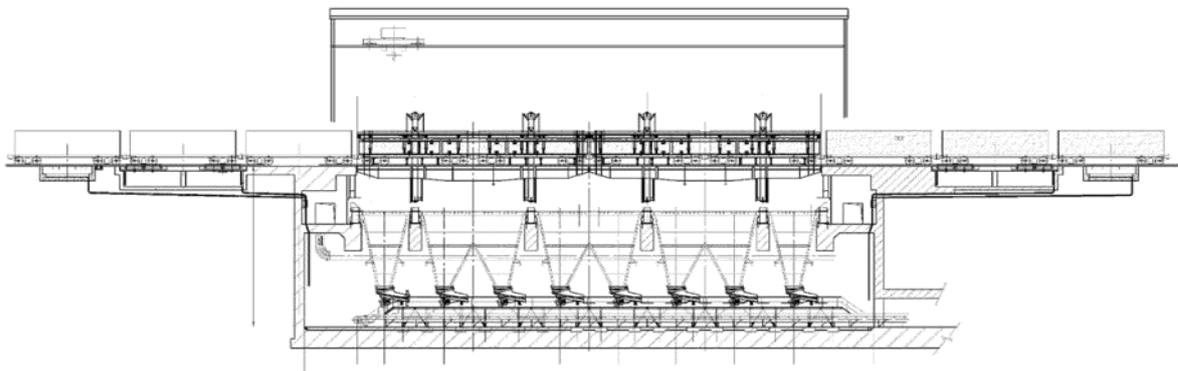
## 2.1 Mehrfachkipper

Mehrfachkipper waren der wesentliche Schritt zu den Hochleistungskippern. Heute sind in vielen Anlagen Mehrfachkipper in parallelen Linien in Betrieb (Bilder 4 bis 6).

Mehrfachkipper sind aus einzelnen Kippern zusammengesetzte Systeme. Bei Doppelkippern wird der Kipper heute in der Regel aus einer Stahlkonstruktion aufgebaut. Dies bietet eine wesentlich höhere Festigkeit als die Kombination aus Einzelkippern. Zudem ist die Synchronisation der Kippbewegung nicht notwendig. Vierfachkipper werden in der Regel aus zwei hintereinandergeschalteten Doppelkippern aufgebaut. Dieser Aufbau bietet eine Redundanz, welche bei Ausfall eines Kippersegments dem Betreiber die Möglichkeit bietet, mit dem verbleibenden Segment den Entladeprozess mit geringerer Leistung weiterzuführen (Bild 7).



**Bild 4:** Dreifachkipper



**Bild 5:** Vierfachkipper

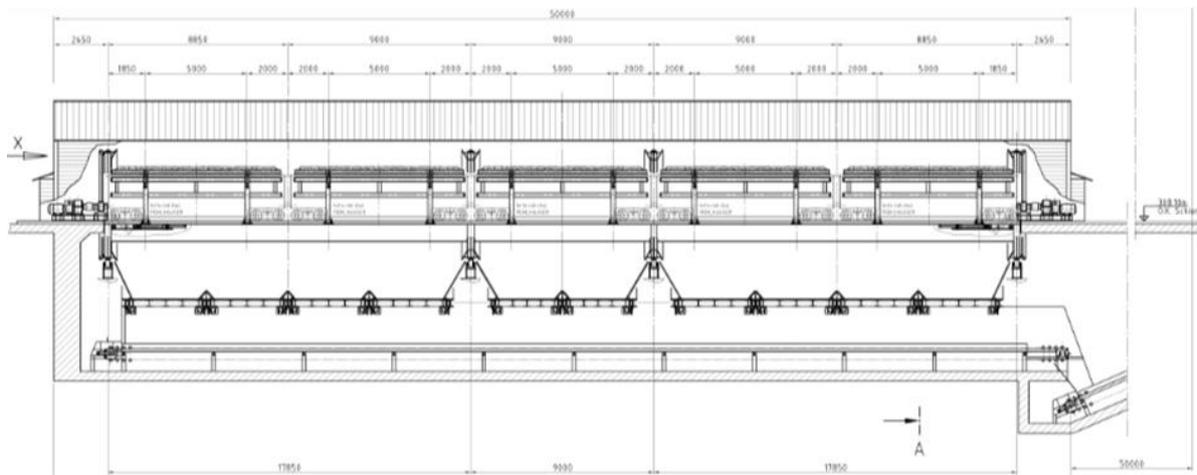


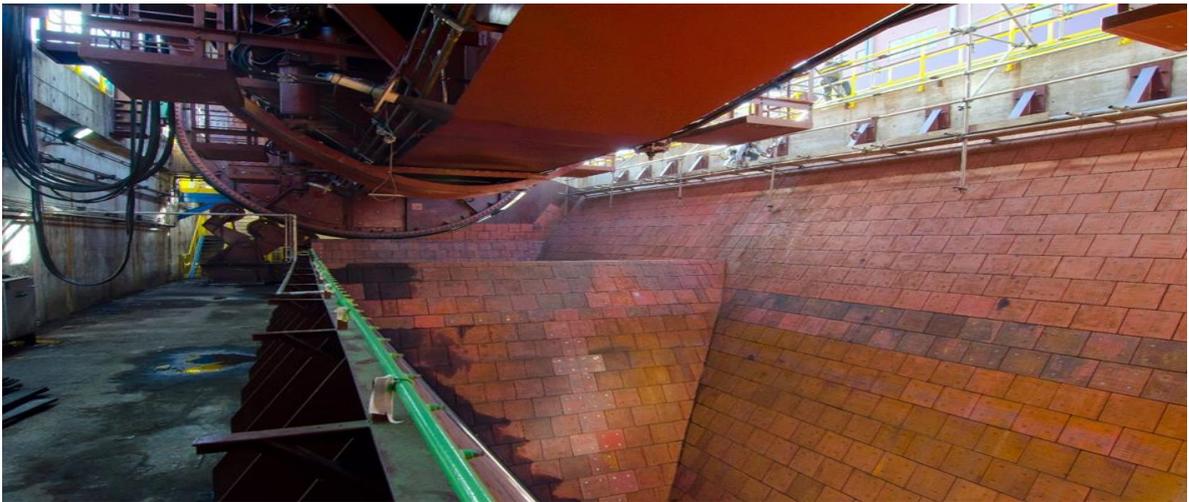
Bild 6: Fünffachkipper



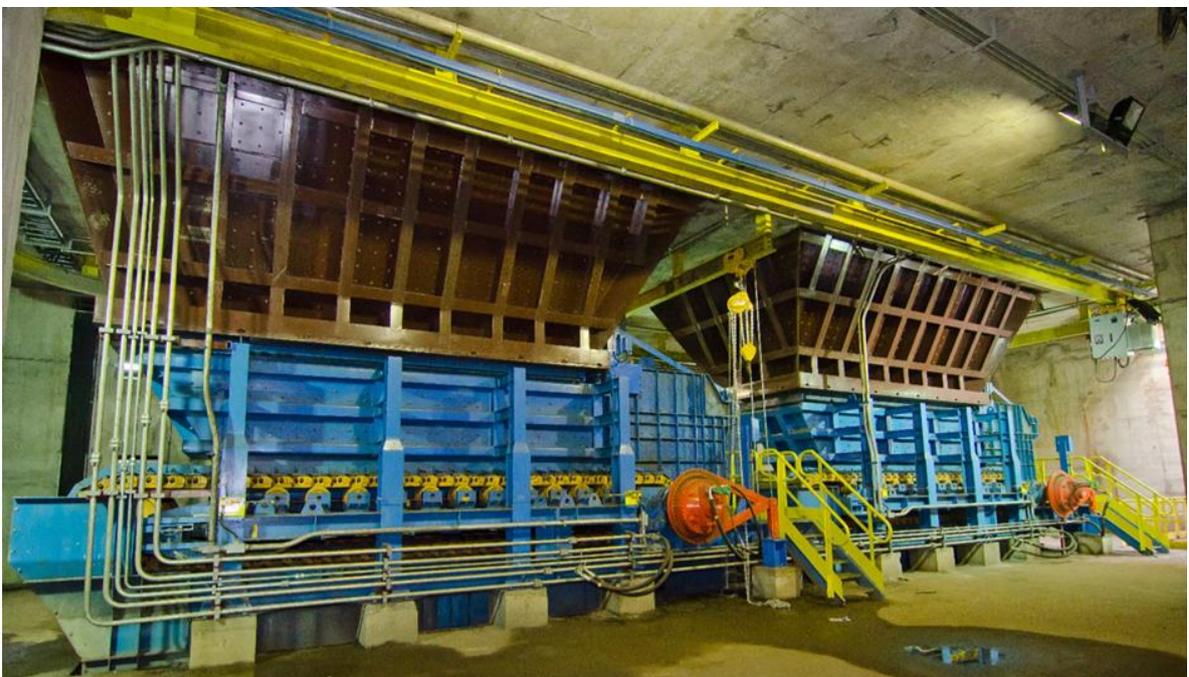
Bild 7: Zwei parallele Vierfachkipper in Caofeidian (China)

## 2.2 Fördertechnische Systeme

Unterhalb der Kippvorrichtung befindet sich ein Bunker zur Aufnahme des aus den Waggons entleerten Schüttgutes (Bild 8). Der Bunker wird in manchen Anwendungen durch einen Rost mit entsprechender Maschenweite abgedeckt. Oberhalb des Rostes kann ein Knollenbrecher eingesetzt werden. Unterhalb des Bunkers ist eine Bunkeraustrageeinrichtung - meist als Plattenband - ausgebildet. Weiter mögliche Abzugsvorrichtungen sind Gurtband, Trogkettenförderer oder Schwingförderer. Das Plattenband fördert das im Bunker befindliche Schüttgut auf einen Muldengurtförderer, welcher das Schüttgut den Einstapelgeräten zum Haldenaufbau zuführt oder auch ggf. direkt einen Schiffsbelader versorgt (Bild 9).



**Bild 8:** Schüttgutbunker unterhalb der Kipperplattform



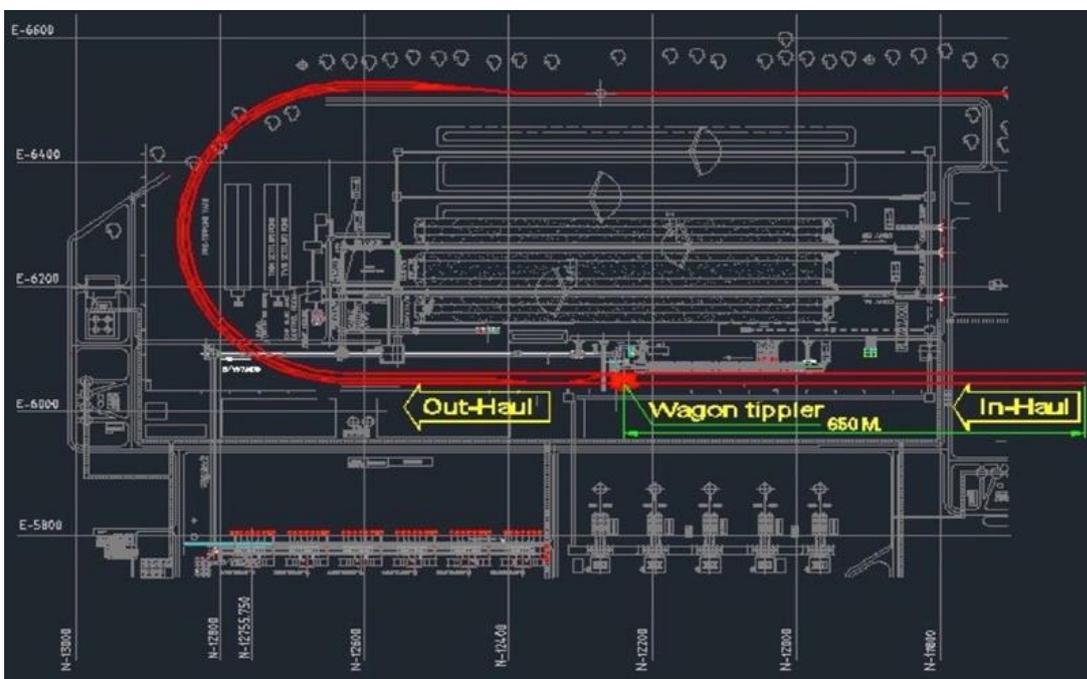
**Bild 9:** Hydraulisch angetriebene Plattenbänder unter den Bunkern



**Bild 10:** Gurtförderer zum Lagerplatz oder Schiffsbelader

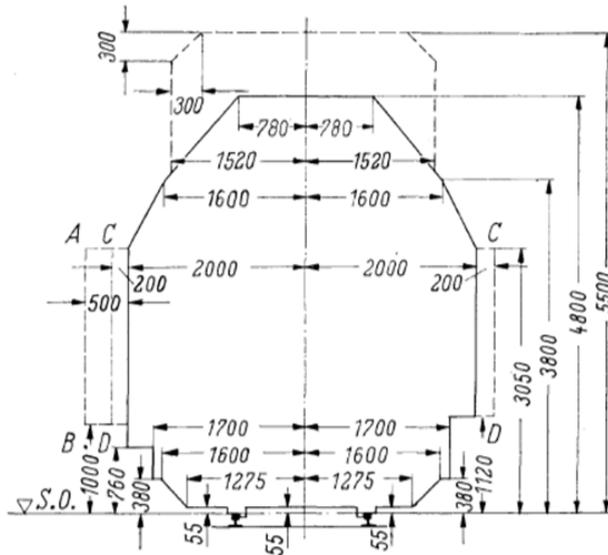
Je nach klimatischen Bedingungen sind der Kippeinrichtung Auftauanlagen vorgeschaltet, welche gefrorenes Gut oberflächlich antauen, um den Entleerungsvorgang möglichst ohne Probleme zu gewährleisten.

Die Schienenführung innerhalb der Anlage wird in solche mit durchgehenden Gleisen, einer sogenannten Gleisschleife, und solche mit parallelen Gleisen unterschieden. Durch den von der Eisenbahn geforderten Mindestradius bei Kurven sind Anlagen mit durchgeführten Gleisen räumlich sehr ausgedehnt. Dagegen bauen parallele Gleise kompakter, haben aber den Nachteil, dass die Waggons über eine Verschiebebühne auf das parallel laufende Gleis verschoben werden müssen. Dazu müssen die Waggons getrennt werden. Zusätzlich befindet sich in den meisten Fällen eine kleine Verschiebeeinheit auf dem Verschiebewagen, um die leeren Waggons von der Schiebebühne auf das Leergleis zu schieben (Bild 11).



**Bild 11:** Beispiel einer Gleisschleife um den Lagerplatz

Entscheidend bei der Anlagendisposition ist das zur Verfügung stehende rollende Material, die Waggons. Die Abmessungen der Waggons können erheblich variieren. Der Grund dafür kann zum einen sein, dass es eine staatliche Eisenbahngesellschaft ist, welche dem Kunden unterschiedliche Waggongrößen zur Verfügung stellt. Ein anderer Grund kann in der Schüttdichte des Schüttgutes liegen. Ein Waggon, welcher für den Transport von Kohle genutzt wird, hat ein größeres Volumen als ein Waggon, der zum Transport von Eisenerz genutzt wird. Die nationalen zulässigen Achslasten sind hierbei zu berücksichtigen. Ein Waggon zum Kohletransport kann natürlich auch mit Erzen beladen werden, allerdings muss dann das geladene Volumen im Verhältnis der Schüttdichte angepasst werden.



**Bild 12:** Lichtraumprofil (Prinzipische Skizze)

In solchen Fällen können also Eisenbahnwagen unterschiedlicher Größen in die Kipperanlage gefahren werden. Die Abmessungen sind aber so, dass immer das sogenannte Lichtraumprofil eingehalten wird. Das Lichtraumprofil (Bild 12) ist eine definierte Umgrenzungslinie, welche von den Bahngesellschaften festgelegt wird, so dass auf der gesamten Schienenstrecke alle angrenzenden Bebauungen entlang der Eisenbahngleise nicht in das Lichtraumprofil hineinragen dürfen. Dieses Lichtraumprofil wird auch in den Kipperanlagen eingehalten. Innerhalb der festgelegten Abmessungen des Lichtraumprofils können die Waggonen in ihrer Länge, Breite und Höhe variieren.

Ein weiterer Unterschied sind die Waggonkupplungen, welche in Drehkupplungen und starre Kupplungen unterteilt werden. Teilweise werden von den Eisenbahnbetreibern auch Mischsysteme eingesetzt, bei denen nur jede zweite, dritte oder vierte Kupplung eine Drehkupplung ist. Je nach Kipperbauart und Anlagenkonfiguration müssen infolge der Kupplungssysteme die Waggonen manuell voneinander gelöst werden.

Eine gute Planung und ein erfahrenes Management beim Betreiben der Anlage stellen sicher, dass bei jedem angelieferten Zugverband an den notwendigen Stellen die entsprechenden Kupplungen eingesetzt sind. Dies ist bereits beim Zusammenstellen eines Zugverbandes zu berücksichtigen. So muss bei einem Einfachkipper zwischen jedem Waggon eine Drehkupplung angebracht sein. Bei Mehrfachkippern kann zwischen den auf der Kippplattform positionierten Waggonen jeweils eine starre Kupplung vorhanden sein, da keine nennenswerte Relativbewegung zwischen den Waggonen der Plattform stattfindet.

Heutige Zugverbände zum Transport der Rohstoffe haben Längen von 80 bis 260 Waggonen. Aufgrund der Rad-Schiene Kraftübertragung durch die Lokomotiven bedeutet dies den Einsatz von bis zu fünf Lokomotiven. Die ziehende Lokomotive fährt häufig beim Bereitstellen des Zugverbandes durch den Kipper hindurch. Die Abmessungen und Gewichte sind bei der Dimensionierung der Plattform zu berücksichtigen. Bei den extrem langen australischen und brasilianischen Zügen wird die in der Mitte des Verbandes angeordnete Lokomotive an einer Stelle eingefügt, an der auch am Zielort in der

Kipperanlage der Zug in zwei oder mehr Teilverbände aufgelöst wird. Jeder Teilabschnitt wird dann in aller Regel parallel arbeitenden Waggonkippern zugeführt.

### 3 Kipperbauformen

#### 3.1 Seitenhochkipper

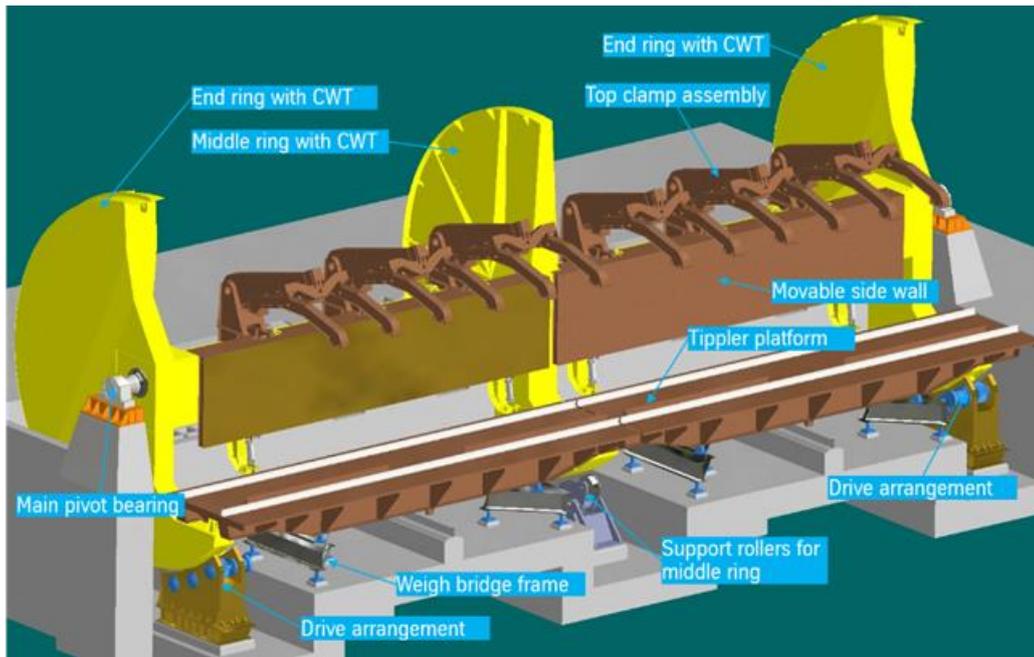
Seitenhochkipper werden vorzugsweise dort eingesetzt, wo nur geringe Umschlagleistungen erforderlich sind oder zu besonderen Zwecken wie der Restentleerung von Eisenbahnwaggon (Bild 13).



**Bild 13:** Seitenhochkipper Bauart thyssenkrupp

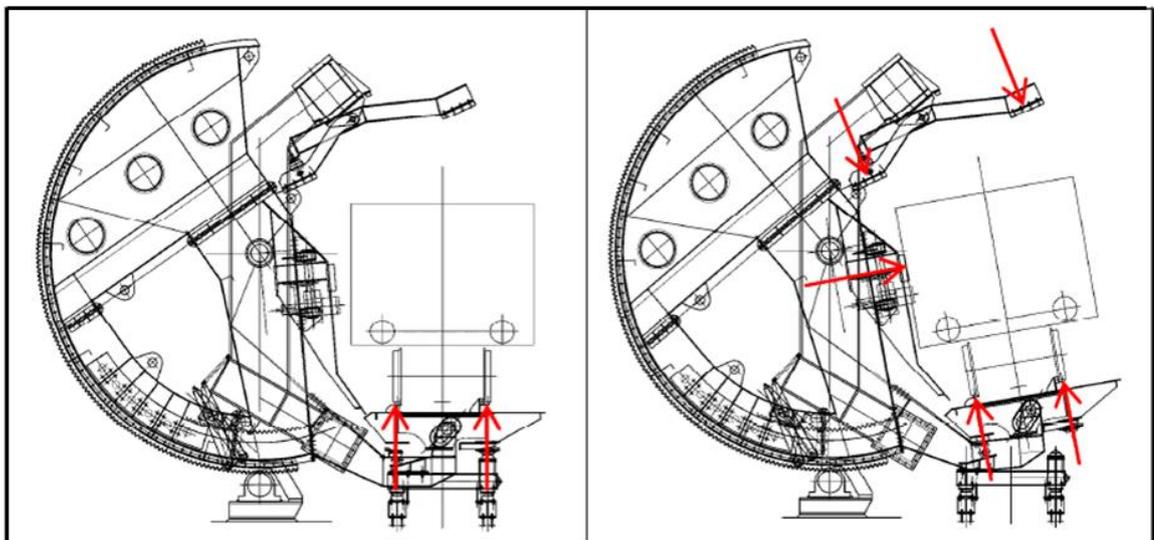
Ein weiterer Grund zum Einsatz eines Seitenhochkippers kann z. B. infolge hohen Grundwasserspiegels sein, so dass der Entladebunker sowie die Abzugseinrichtungen nur in begrenzter Tiefe unter Flur angeordnet werden können. Das Entleeren geschieht durch Drehung um  $150^\circ$  um eine Drehachse, welche seitlich dem Schienenverlauf und ca. 2,5 m oberhalb der Schienen liegt. Da durch diese Anordnung der Drehachse die gesamte Last des vollen Waggons angehoben werden muss, sind hohe Antriebsleistungen erforderlich. Der in Bild 13 gezeigte Seitenkipper benötigt eine Antriebsleistung von 355 kW bei einer Entladekapazität von 15 Waggons/h.

Die Seitenhochkipper werden derzeit nur als Einzelkipper gebaut, jedoch sind bereits Entwicklungen zum Doppel-Seitenhochkipper vorhanden, bisher jedoch noch nicht kommerziell eingesetzt (Bild 14).



**Bild 14:** Doppel-Seitenhochkipper

Die Waggonen werden während des Kippvorganges durch eine mechanische Einrichtung mit selbsttätiger Verriegelung oder eine hydraulisch betätigte Einrichtung gehalten (Bild 15). Die Beschickung des Kippers mit den einzeln abgekoppelten Waggonen erfolgt bei kleinen Leistungen mit Lokomotiven oder schienengängigen Fahrzeugen (UNIMOG), bei hohen Leistungen mit Positioniereinrichtungen.



**Bild 15:** Seitenhochkipper mit Plattform und Halteeinrichtung

Da nur eine Einzelbeschickung des Kippers möglich ist, sind die Zykluszeiten entsprechend groß, so dass die Entladekapazität bei lediglich 10 bis 15 Waggonen/h liegt.

### 3.2 Rundkipper

Neben den Seitenhochkippern sind Rundkipper die gängigste Kipperart (Bilder 16 und 17). Diese entleeren Waggon durch Drehen der Kipperplattform um  $180^\circ$  oder  $360^\circ$  um die Längsachse. Die derzeit gängigste Auslegung der Kipperplattform erfolgt für das gleichzeitige Entleeren von zwei Waggon. Es gibt allerdings auch schon Plattformen, welche für eine Entleerung von bis zu vier Waggon gleichzeitig ausgelegt sind (wobei es auch sehr oft vorkommt, dass zwei Kipperplattformen für das Entleeren von zwei Waggon hintereinandergeschaltet werden). Die Waggon werden dabei während des Entladevorgangs durch vertikal oder horizontal angeordnete, hydraulisch betätigte Haltevorrichtungen sicher und waggonschonend gehalten. Diese sind mit einer automatischen Druckentlastung zum Entspannen der Waggonfedern ausgerüstet.



**Bild 16:** Rundkipper C-Form mit Waggon



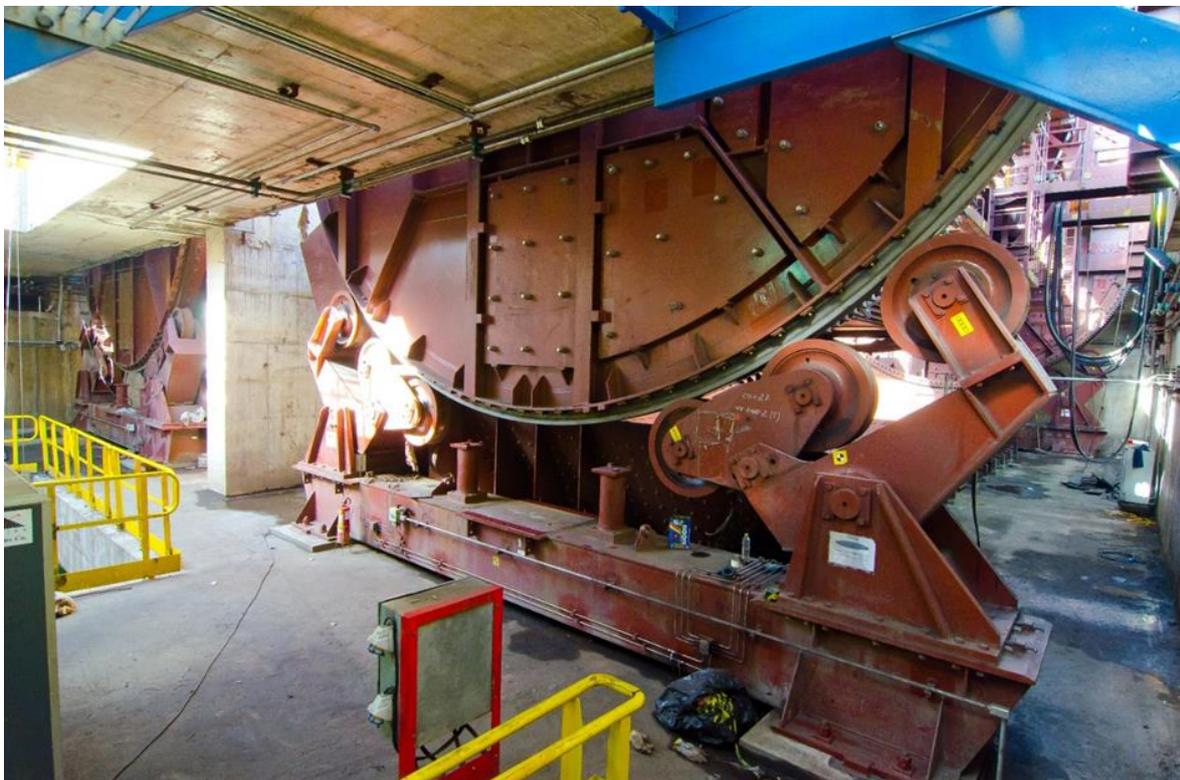
**Bild 17:** Waggonkipper O-Form mit Waggon



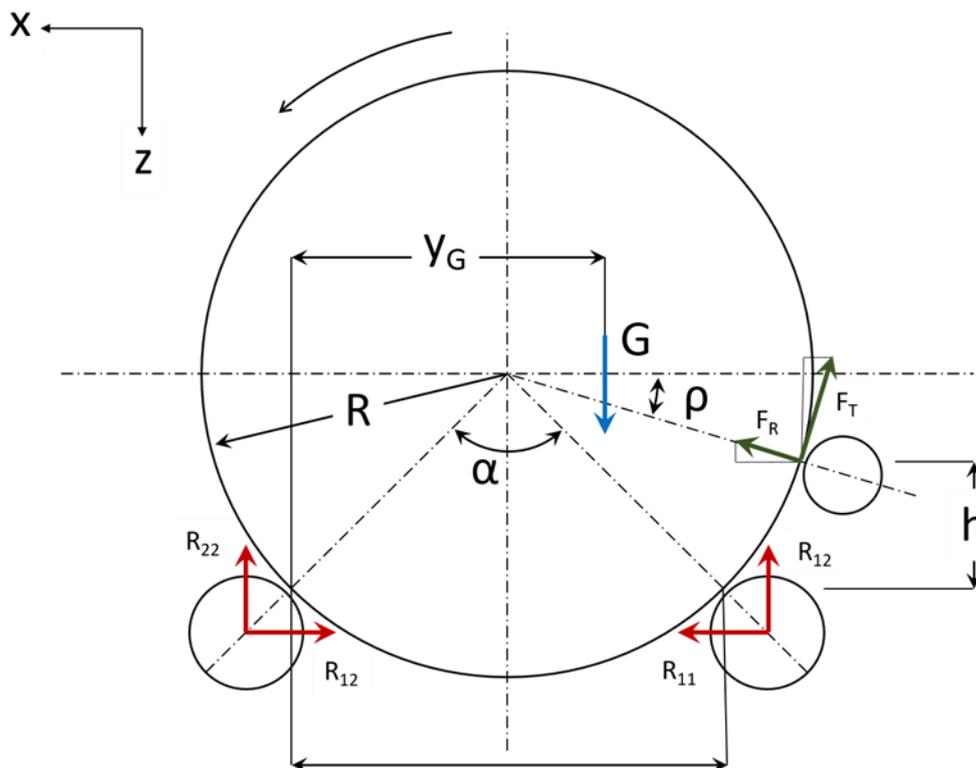
**Bild 18:** Rundkipper beim Entleeren der Waggon

Ein Kriterium für die konstruktive Ausführung der Kipperplattform ist die drehbare oder nicht drehbare Kupplung der ankommenden Waggon untereinander. Sind die Waggon mit

Drehkupplungen ausgerüstet, werden sie im Zugverband gekippt, d. h. ein Abkuppeln der einzelnen Waggon vor der Plattform ist nicht nötig. Drehachse der Kipperplattform und Kupplungsdrehachse müssen dabei zusammenfallen, so dass der erforderliche Durchmesser der Kipperplattform dadurch bereits ein gewisses Maß nicht unterschreiten kann, was sich in einer sehr breiten Bauweise und höheren Antriebsleistungen auswirkt. Der Antrieb des Kippers erfolgt durch zwei sich am linken und rechten Rand der Kipperplattform befindliche Antriebseinheiten, deren Antriebsleistung je ca. 200 kW beträgt. Jede Antriebseinheit treibt ein Ritzel an, welches in eine umlaufend am linken und rechten Rahmenprofil befestigte Zahnstange eingreift. Um ein synchrones Drehen der Kipperplattform zu gewährleisten, sind die beiden Antriebswellen durch Gelenkstangen miteinander gekoppelt. Zur Führung der Kipperplattform während des Drehvorganges werden zusätzliche Laufrollen installiert, welche an einer ebenfalls am linken und rechten Rahmenprofil umlaufend befestigten Laufschiene entlanglaufen (Bilder 18 bis 20).



**Bild 19:** Verlagerung der Rundkipper



**Bild 20:** Graphische Darstellung von Verlagerung und Antrieb der Rundkipper

Ein Unterscheidungsmerkmal der Rundkipper ist, ob diese mit einem geschlossenen Schild ausgeführt werden können oder ob das Schild zur Durchfahrt der Zustelleinheit geöffnet werden muss (C-Form). Da die Kipper meist überdacht oder gar komplett in Hallen installiert sind, ist es mancherorts von Vorteil, wenn die Zustelleinrichtung während des Vorziehens der vollen Waggons und dem gleichzeitigen Ausfahren der bereits entleerten Waggons den Kipper durchfahren kann. Bei Kipperanlagen, bei welchen die Waggons zu trennen sind (wegen nicht vorhandener Drehkupplung), kommen zur Erhöhung der Umschlagleistungen zwei Zustelleinheiten zum Einsatz. Die vor dem Kipper befindliche Zustelleinheit bewegt hierbei den kompletten Zugverband mit gefüllten Waggons, während eine zweite Zustelleinheit auf einer normalerweise parallelen Fahrbahn die leeren Waggons aus dem Kipper ausfährt und die bereits vom Zugverband abgekoppelten Waggons für den nächsten Kippzyklus auf der Plattform bereitstellt. Da eine Zustelleinheit die geladenen Waggons als gesamten Verband bewegen muss, ist diese mit einer sehr hohen Antriebsleistung von 800 kW bis 1200 kW ausgestattet. Bei der die leeren Waggons übernehmenden Zustelleinheit liegt die installierte Leistung bei ca. 200 kW bis 300 kW.

### 3.3 Zustelleinrichtungen

Bei den Zustelleinheiten, welche auch Positioner, Indexer, Vorzieher oder Seitenarmvorzieher genannt werden (Bild 21), gibt es bei den Hochleistungskipperrn heutzutage nur noch zwei Antriebsprinzipien. Die meistgebauten Zustelleinheiten fahren mit Fahrwerken auf Schienen mit einer zwischen den Schienen angeordneten Zahnstange (Bild 22). Der Antrieb erfolgt meist über senkrecht stehende Elektromotoren mit Planetengetrieben. Je nach benötigter Vorziehkraft sind 2 bis 12 Motoren verbaut. Durch

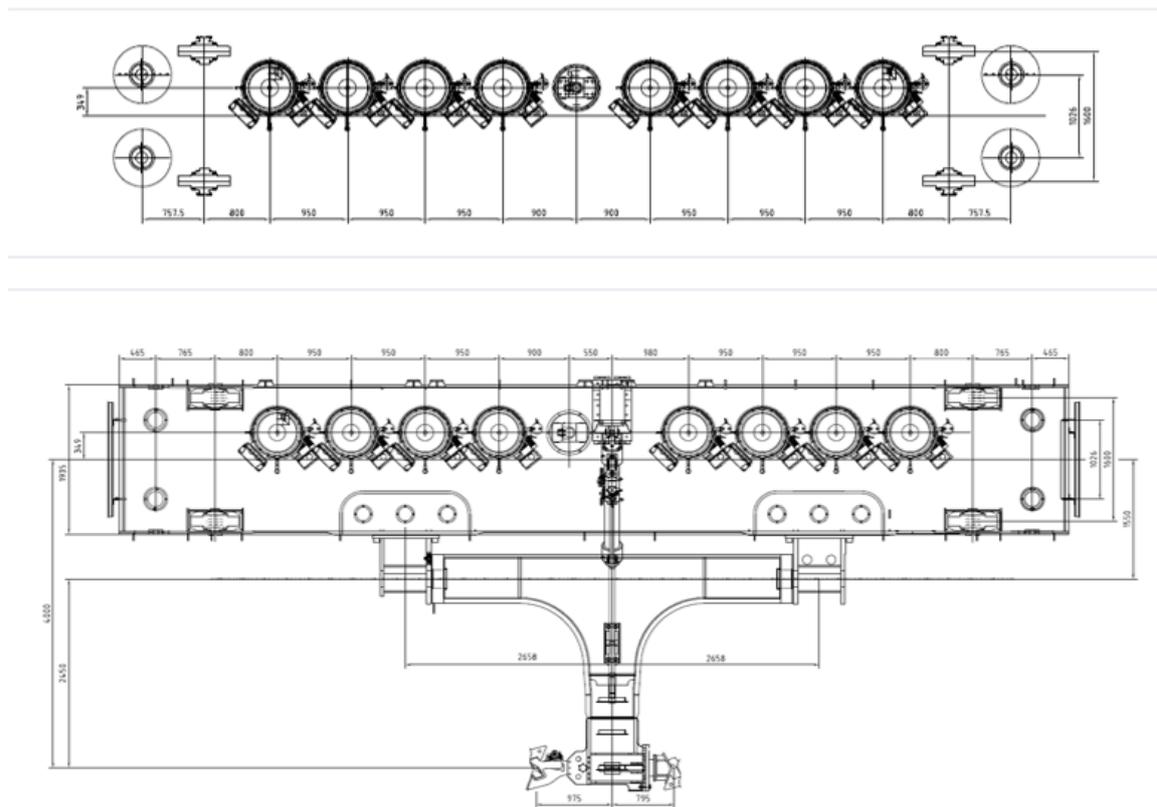
die große Zahl an Antriebsmotoren werden die Zustelleinheiten länger. Wenn aus Platzgründen die Zustelleinheiten kürzer gebaut werden müssen, besteht die Möglichkeit, zwei parallele Zahnstangen anzuordnen und die Antriebsmotoren parallel zu installieren. Diese etwas kompaktere Bauweise bei großer Anzahl Fahrtriebe wird jedoch durch eine schlechtere Zugänglichkeit der Antriebe bei Wartung und Reparatur erkauft.

Das zweite Antriebsprinzip ist der seilgetriebene Fahrtrieb. Hierbei wird die Zustelleinheit mittels eines Seiltrommelantriebes über die Fahrbahn gezogen. Der Vorteil liegt in einer Trennung von Zustelleinheit und dem eigentlichen Fahrtrieb, welcher stationär außerhalb angeordnet werden kann. Nachteilig sind der Seilverschleiß, die Seilschwingung und die notwendige Seilunterstützung aufgrund der langen Fahrwege der Zustelleinheit.

Die Zustelleinheit besitzt einen hydraulisch schwenkbaren Seitenarm. Dieser wird bei Erreichen der entsprechenden Position am Zugverband hydraulisch zwischen die Wagen eingeschwenkt und überträgt die Vorzieherkraft auf den Zugverband.



**Bild 21:** Zustelleinheit (Positioner, Indexer, Vorzieher oder Seitenarmvorzieher)



**Bild 22:** Zustelleinheit mit Antrieben, Fahrwerk und Spurführung

### 3.4 Sonderbauformen der Kipper

#### 3.4.1 Containerkipper

Als Sonderbauformen kann der von thyssenkrupp in Südafrika entwickelte Containerkipper genannt werden (Bild 23 und Bild 24). Der große Vorteil besteht in der Möglichkeit, die eigentliche Aufnahme und Kippeinheit für die Container an einer Standard-Containerbrücke einzusetzen.

Durch das Aufnehmen, Verfahren eines Containers über den Schiffsrumpf und Entleeren des Containers in das Schiff sowie den anschließenden Rücktransport des geleerten Containers auf seinen ursprünglichen Stellplatz ist die Umschlagleistung nur sehr gering. Ein weiterer Nachteil ist die im Vergleich zu Eisenbahnwaggons geringe Tragfähigkeit eines Containers, welche bei Schüttgütern hoher Dichte zu massiven Leistungsverlusten des Containerkippers führt. Dennoch hat der Containerkipper seine Einsatzbereiche wie zum Beispiel beim Umschlag von Holzpellets.



**Bild 23:** Containerkipper

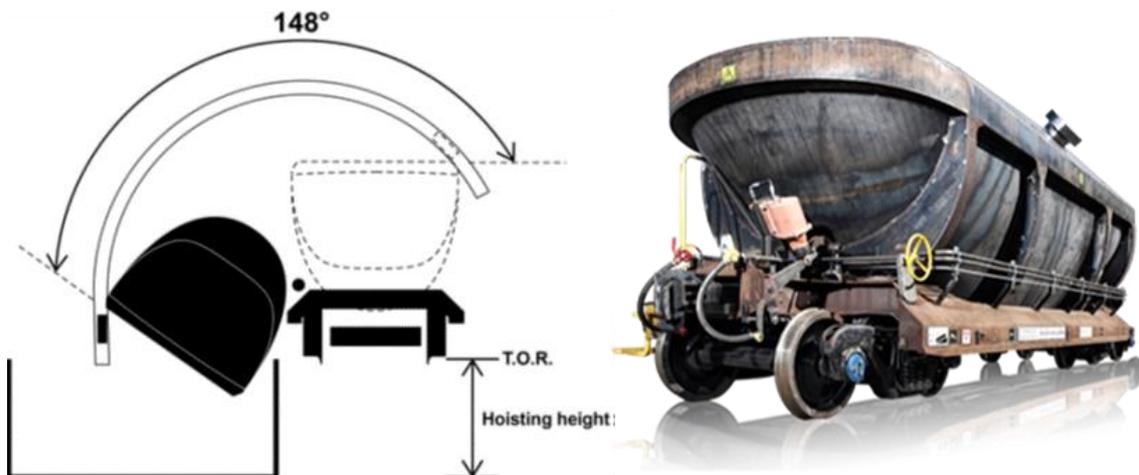


**Bild 24:** Container-Kippvorrichtung beim Leeren eines Containers

### 3.4.2 Helix Dumper

Eine weitere relativ neue Entwicklung stellt der von der Firma Kiruna Wagon in Schweden entwickelte Kipper dar (Bild 25).

Der Helix Dumper benötigt speziell für diese Anlage konstruierte Waggons. Die Lademulde, welche das Schüttgut aufnimmt, hat eine das Entladen des Schüttgutes begünstigende Form und ist einseitig über ein Scharnier mit dem Chassis verbunden. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich oben am Aufbau ein Kipprad, welches in die helixförmige statische Struktur eingreift (Kulissenführung) und durch Vorziehen des Waggons durch die Lokomotive den Oberbau um das Scharnier dreht (Bild 26). Die Entladestation besteht aus einer relativ langen Wendelspirale oberhalb und seitlich des Gleises, deren Mittellinie mit der Drehachse der Wagengelenke zusammenfällt. Wenn die Waggons in die Entladestation einfahren, treten die Kippräder in die Spirale ein, die sie zwingt, angehoben zu werden, seitlich in eine fast auf dem Kopf stehende Position und dann in einer langsamen, sanften Bewegung zurück.



**Bild 25:** Helix-Kipper als kontinuierlicher Seitenkipper [Kiruna Wagon, Schweden]



**Bild 26:** Spiralförmige Kulissenführung [Kiruna Wagon, Schweden]

Der Vorteil des Helix Dumpers ist, dass der Zugverband mit der Lokomotive durch den Kipper gefahren werden kann und keine zusätzliche Zustelleinheit benötigt. Der Nachteil der Konstruktion ist, dass speziell konstruierte Waggons eingesetzt werden müssen, was den Einsatzbereich stark reduziert.

## 4 Interaktion Zustelleinrichtung und Zugverband

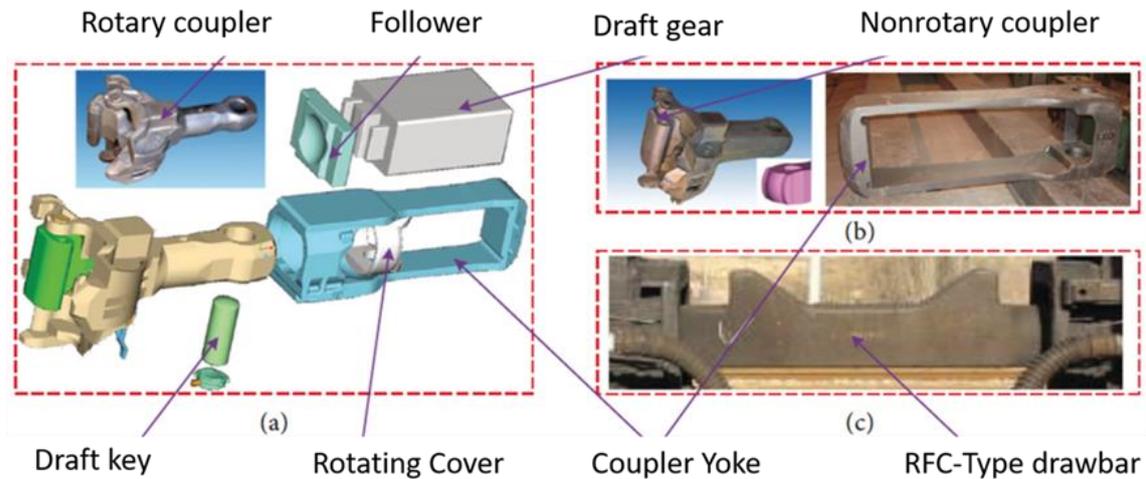
Ein wesentliches Kriterium zur Erreichung einer optimalen Umschlagleistung ist ein Verständnis des Verhaltens eines Zugverbands beim Vorziehen (Bild 27). Im Grunde handelt es sich um eine Kette von Massepunkten, die durch Feder-Dämpfer Elemente verbunden sind. Die Kupplungen zwischen den einzelnen Waggons sind das limitierende Element beim Beschleunigen und Verzögern des Zugverbands mit der Zustelleinheit (Bild 28). Die maximal zulässigen Zug- und Druckkräfte dürfen nicht überschritten werden. Heutige Anlagen sind so programmiert, dass die Beschleunigung der Vorzieher sich dem Entladeprozess kontinuierlich anpasst. Mit fortschreitender Entleerung der Waggons wird die Beschleunigung kontinuierlich erhöht.



**Bild 27:** Zugverband mit 120 Kohlewaggons

Leider findet man in der aktuellen Literatur nur wenige Untersuchungen über das Verhalten von Zügen bei kleinen Geschwindigkeiten und ständigem Stop-and-Go-Betrieb. Thyssenkrupp hat hier durch die vielen hundert bisher gebauten Anlagen und durch selbst finanzierte Forschungen Daten zu dem dynamischen Verhalten der Zugverbände gesammelt. Diese wurden in verschiedene Softwaremodule integriert, so dass thyssenkrupp in der Lage ist, das Verhalten eines Zugverbandes innerhalb der Kipperanlagen, bei niedrigen Geschwindigkeiten, mit guter Näherung vorherzusagen. Dabei werden alle Kräfte an den Kupplungen zu jedem Zeitpunkt der Zugsbewegung simuliert, um eine optimale Vorziehcharakteristik zu erreichen. Steigungen, Gefälle sowie konkave und konvexe Kurven werden berücksichtigt.

Wesentlich für die Genauigkeit der Simulation ist das Simulationsmodell der Kupplung. Das Kupplungsverhalten kann sehr von dem Verhalten einer neuen Kupplung abweichen, da Kupplungen oft Jahre oder sogar Jahrzehnte im Einsatz sind und damit einem Verschleiß unterliegen. Daher kann das Simulationsmodell nur dann sinnvolle Werte liefern, wenn die in den Anlagen verwendeten Kupplungen bekannt und ihre Parameter durch Messungen erfasst wurden.



**Bild 28:** Starre und drehbare Kupplung [6]

## 5 Umschlagleistung

Zweifachkipper wurden ausgiebig eingesetzt, um höhere Entladeraten zu erzielen und die Auslastung der vorhandenen Eisenbahninfrastruktur zu verbessern. In China wurden von thyssenkrupp am Huanghua-Kohleexportterminal neun Doppelrotationskipper installiert, um den Export von 80 Millionen Tonnen Kohle pro Jahr zu erreichen.

Jeder Kipper in diesem Hafen entlädt gleichzeitig zwei Güterwagen mit einem Gewicht von jeweils maximal 98 Tonnen mit einer Leistung von bis zu 33 Zyklen pro Stunde und entlädt so durchschnittlich 4.000 Tonnen Kohle pro Stunde mit einer maximalen Kapazität von 4.500 Tonnen pro Stunde.

In Brasilien sind im Hafen von Porto Sudeste zwei Doppelkipper von thyssenkrupp in Betrieb, die jeweils 2 x 140 T (Bruttogewicht) Waggons mit 40 Abgabespitzen pro Stunde Eisenerz befördern.

In Ust Luga, dem größten Hafen Russlands, wurden von thyssenkrupp zwei Doppelkipper installiert, um Kohle mit einer Umschlagleistung von jeweils 3.500 Tonnen pro Stunde zu entladen.

Der von thyssenkrupp an Tata Steel, Kalinganagar, gelieferte Doppelkipper entlädt 2 x 140 T-Wagen gleichzeitig mit einer Geschwindigkeit von 25 Zyklen pro Stunde und erreicht eine Entladerate von 3.500 Tonnen pro Stunde. Die installierten Kipper entsprechen den neuesten RDSO-Richtlinien und können alle Arten von vorhandenen Kastenwagen sowie die vorgeschlagenen DFC- und Feeder-Routenwagen kippen, die in naher Zukunft für den Transport von Kohle und Eisenerz eingeführt werden sollen.

In Caofeidian in China wurden im Jahr 2016 von thyssenkrupp zwei Kipperlinien installiert, bei der in jeder Linie zwei Tandem-Waggonkipper unmittelbar hintereinander angeordnet wurden, sodass nun 4 Waggons gleichzeitig pro Zyklus entladen werden können. Somit kann man diese Anlage als weltweit ersten 4-fach Kipper betrachten. Die Entladeleistung pro Stunde beträgt 8600 Tonnen pro Entladelinie.

## 6 Ausblick

Gerade im Hinblick auf die Forderungen nach einer nachhaltigen, wirtschaftlichen Rohstoffversorgung stellen Kipperanlagen auch in der Zukunft ein sehr ökonomisch-ökologisches System dar. Der Landtransport von Massenschüttgütern mittels Zug wird in der Zukunft zunehmen. Durch neue Entwicklungen in der Waggontechnik [7] und insbesondere der Entwicklung digitaler Kupplungen [9] werden sich völlig neue Möglichkeiten in der Schüttgutlogistik eröffnen. Die neuen Kupplungssysteme können höhere Kräfte übertragen und automatisch getrennt werden. Dadurch können Züge am Ursprungsort beliebig zusammengestellt werden und am Zielort leicht wieder unterteilt werden. In Zukunft wird die informationstechnische Verbindung von Beladestationen und Entladestationen zunehmen. Die Züge werden zumindest in den großen Rohstoffgebieten zwischen der Beladestation und Entladestation autonom fahren [8]. Der gesamte Prozess von der Mine bis zum Terminal wird hochgradig automatisiert sein. Bereits heute sind unsere Kipperanlagen die am höchsten automatisierten Anlagen.

### Quellenverzeichnis:

- [1] Matthews, V.: Bahnbau. 4., Neubearb. und erw. Aufl. - Stuttgart; Leipzig: Teubner, 1998, ISBN 978-3-519-30113-4
- [2] Iwnicki, S.: Handbook of railway vehicle dynamics, 2006 by Taylor & Francis Group, LLC, ISBN-13: 978-0-8493-3321-7
- [3] Reiplinger, M.: Entwicklung einer betrieboptimierten Alternative zum bestehenden Seitenarmvorzieher eines Waggonkippers, 2007, HTW-Saar
- [4] Bolsöy, B.: Breakthrough performance with the Helix Dumper system, International Heavy Haul Association (IHHA) conference in Narvik, 2019
- [5] Herzog, M.; Severin, F.; Wirtz, R.: Developing the high performance car dumper: Wagon dumper technology and its associated infrastructure, CEMENT INTERNATIONAL 3/2021, VOL. 19
- [5] Sakhardande, Y.; Badhe, R.: Speeding up wagon unloading. bulk-online.com 34 (2014) No. 6
- [6] Kaiyun Wang, X.; Guo, L.; Yang, M.; Lyu, K.; Zhai, W.: Investigation on Derailment of Empty Wagons of Long Freight Train during Dynamic Braking, 2018, DOI: 10.1155/2018/2862143
- [7] Šťastniak, P.; Kurčík, P.; Pavlík, A.: Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform, MATEC Web of Conferences , [https://doi.org/10.1051/mateconf/20182\\_235\\_0](https://doi.org/10.1051/mateconf/20182_235_0) (2018)
- [8] Roker, S.: Rio Tinto delivers iron ore via world's first fully autonomous train, (2018) Dry Bulk, <https://www.drybulkmagazine.com/rail-barge/13072018/rio-tinto-delivers-iron-ore-via-worlds-first-fully-autonomous-train/>

- [9] Development of a concept for the EU-wide migration to a digital automatic coupling system (DAC) for rail freight transportation, Final Report, Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI),  
[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/final-report-dac-study.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/final-report-dac-study.pdf?__blob=publicationFile)



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### FAM Green Power – Nachhaltig in die Zukunft

Erik Frenzel  
Sergej Kaverinski  
Patrick Martin  
Patrick Sicker



Dr.-Ing. Erik Frenzel  
Dr.-Ing. Sergej Kaverinski  
Patrick Martin, M. Sc.  
Dipl.-Ing. Patrick Sicker  
FAM GmbH  
Sudenburger Wuhne 47  
39112 Magdeburg



## FAM Green Power – Nachhaltig in die Zukunft

*Die FAM GmbH führt ihre Geschäfte ressourcenschonend, umweltfreundlich und verantwortungsbewusst. Wir sind uns der globalen Probleme wie Klimawandel, Wasserknappheit, Abholzung oder gefährdete Artenvielfalt bewusst und berücksichtigen diese Herausforderungen bei der Gestaltung unserer Produkte für die Verbesserung der Umwelt. Im Rahmen der Schüttgutförderertechnik-Tagung wird eine Auswahl aus den aktuellen Entwicklungen des weltweit tätigen Anlagenherstellers präsentiert.*

### 1 Das Nachhaltigkeitsprinzip

Nachhaltigkeit und gute Unternehmensführung müssen in der Wirtschaft zum globalen Standard werden, um die Pariser Klimaziele und die Nachhaltigkeitsziele der UN zu erreichen. Doch was ist Nachhaltigkeit? Der Begriff „Nachhaltigkeit“ ist in allen Bereichen des täglichen Lebens allgegenwärtig und dennoch existiert keine konsistente Definition des Begriffs [1].

Im Einklang mit der UN versteht die FAM GmbH „Nachhaltigkeit“ als Kurzform für „Nachhaltiges Wirtschaften“. Eingriffe und Verfahren zur Ressourcennutzung sind daher so zu gestalten, dass ökologische Systeme bis hin zum Weltklima möglichst wenig durch Emissionen belastet werden. Zugleich befindet sich die Welt im Wachstum. Die Weltbevölkerung, der Konsum, daraus der Ressourcenbedarf, der Energiebedarf, alles wächst und dennoch muss es das Ziel sein, Emissionen im Kleinen wie im Großen zu reduzieren.

Die FAM GmbH als globaler Partner für hochwertige und langlebige Geräte und Anlagen stellt sich den damit verbundenen Herausforderungen und Kundenwünschen für ein nachhaltiges Wirtschaften jetzt und in der Zukunft.

Unser oberstes Ziel ist es, zu einer nachhaltigen Umwelt beizutragen und die Ressourcen, die uns zur Verfügung stehen, effizient zu nutzen. Durch die Führung des Managements und das Engagement seiner Mitarbeiter ist FAM bestrebt, umwelt- und sozialbewusst zu handeln und unseren ökologischen Fußabdruck zu minimieren [2]. Bereits bei der Produktplanung haben wir hohe Standards gesetzt, um umweltfreundliche Lösungen, technische Zuverlässigkeit und ein sicheres und gesundes Arbeitsumfeld zu gewährleisten.

Doch wann ist ein Verfahren nachhaltig? Die Komplexität der Nachhaltigkeitsbetrachtung und ihre Umsetzung zeigt ein einfaches Beispiel aus der Bauteilfertigung. Was ist nachhaltiger, Ressourceneinsparung durch reduzierten Materialeinsatz mit höherem Energieaufwand, um die Masse sinnvoll zu entfernen oder ein im Vergleich höherer Ressourcen- und Materialbedarf bei kürzeren Bearbeitungszeiten, was im Gegenzug Energie einspart, die zur Bereitstellung ebenfalls Emissionen mit sich bringt? Die Antwort ist: „Es kommt darauf an...“.

Ist das Fertigungsverfahren hinsichtlich Emissionsreduzierung optimiert? Um welches Material handelt es sich? Wo wird gefertigt oder vielmehr, wie viele Emissionen entstehen aus der Energiebereitstellung? Werden Emissionen aus dem Lebenszyklus von Generatoren auch zur Nutzung erneuerbarer Energien mit bilanziert? Welche Emissionen resultieren aus Transportwegen und so weiter. Die nachhaltigste Lösung direkt zu finden,

ist auf Grund dieser Komplexität oftmals schwer oder nicht möglich. Dennoch ist es lohnenswert, sich auf dem langen Weg zum nachhaltigen Wirtschaften diesen Fragestellungen und anderen Herausforderungen Schritt für Schritt durch einzelne Optimierungsmaßnahmen zu nähern und Emissionen einzusparen.

## 2 Umweltbewusst vor der eigenen Haustür und weltweit

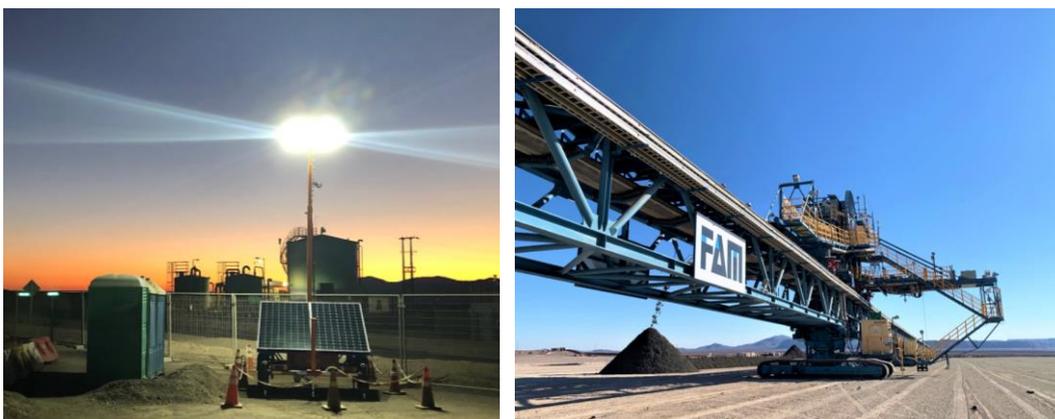
Dass Nachhaltigkeit, Umwelt, Klimawandel und effiziente Ressourcennutzung die wichtigsten Verpflichtungen sind, um sicherzustellen, dass unsere Produkte für uns und unsere Geschäftspartner einen positiven Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz leisten, hat die FAM bereits vor Jahren erkannt und sich verpflichtet, bei der Entwicklung, der Herstellung und dem Betrieb unserer Produkte Auswirkungen auf die Umwelt zu vermeiden.

Um eine kontinuierliche Verbesserung der Umwelteffizienz zu unterstützen und sich an internationalen Anforderungen zu orientieren, hat die FAM Gruppe, beginnend mit der FAM América Latina Maquinarias Ltda. in Chile, ein Umwelt-Managementsystem nach ISO 14001:2015 [3] eingeführt.

Im Zuge dessen wurde beispielsweise für die Nachtbeleuchtung bei der Errichtung von Anlagen und Geräten mit der Nutzung von solarbetriebenen, photovoltaischen Lichttürmen begonnen. Sie ersetzen die traditionellen, mit einem Dieselaggregat betriebenen Lichttürme. Die Vorteile der Solar-Lichttürme sind deutlich:

- keine Treibhausgasemissionen durch Dieselaggregate
- keine Emissionen durch Transport und Betankung von Energieträgern
- keine Schallemission durch Dieselaggregate
- ein im Vergleich zu traditionellen Lichttürmen signifikant verringerter Wartungsaufwand bezüglich Personen- und Materialaufwand

Beispielhaft hierfür ist ein Projekt im Kupfertagebau Minera Spence, Chile, bei der Montage der raupenmobilen Förderbrücke zu nennen (Bilder 1 und 2).



**Bild 1 und 2:** Solarnacht-Beleuchtung (links)  
bei Errichtung der FAM-Förderbrücke in Spence (rechts)

Neben der Reduzierung der medial präsenten Emissionen von Treibhausgasen bestehen ebenso in der Grundversorgung der Teams während der Errichtung Emissionseinsparpotenziale. Um die Rückstände zu reduzieren, die durch den Verbrauch von Wasser in Plastikflaschen entstehen, hat beispielhaft die Montageabteilung in Radomiro Tomic,

Chile, umweltfreundliche und wiederverwendbare Flaschen eingeführt. Hierfür wurde eine Wasserstation innerhalb des Lagers installiert, um Sonneneinstrahlung zu vermeiden und eine angemessene Temperatur für den Verbrauch zu gewährleisten.

Jedes Projekt ist anders, was keine generalisierte Aussage zur Einsparung von Plastikflaschen zulässt, jedoch lässt sich das Einsparpotential der wiederverwendbaren Wassergallonen und Trinkflaschen an einem einfachen Beispiel verdeutlichen. Angenommen, das Montageteam besteht aus 400 Personen. Jeder von ihnen sollte mindestens 3 Liter am Tag trinken, die bisher in Plastikflaschen zu je 1 Liter bereitgestellt werden. Die reine PET-Flasche besitzt eine Masse von mindestens 0,02 kg. Die Errichtung dauert ein halbes Jahr, rund 180 Tage. Somit lassen sich während der Montage mindestens 4.320 kg an Plastik einsparen (Bilder 3 und 4).



**Bild 3 und 4:** Einsatz wiederverwendbarer Trinkflaschen anstelle von Plastikflaschen (Bild 3 ist vor 2020 entstanden, daher sind keine Masken erkennbar)

Auch am Standort der FAM-Firmenzentrale in Magdeburg wurden energetische Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt. Aufgrund der aktiven Positionierung der FAM GmbH für den Umweltschutz wurde das Unternehmen im Juni 2021 als Mitglied in die Umweltallianz Sachsen-Anhalt aufgenommen. Neben der neuen Firmenzentrale, die energetisch auf dem neuesten Stand ist, wurden folgende freiwillige Umweltschutzleistungen als Beiträge zur Umsetzung des Kreislauf-Wirtschaftsprinzips und zur Ressourcenschonung sowie zur Energieeinsparung anerkannt:

- Neuanschaffung einer Nebenstrom-Filtrationsanlage zur Aufbereitung von Hydraulik- und Hydrostatiköl
- Reduzierung des Elektroenergieverbrauches durch den Einsatz moderner LED-Technik im Fertigungsbereich

Beispielsweise durch den Einsatz moderner LED-Technik konnte der Strombedarf zur Beleuchtung des Fertigungsbereichs am Standort Magdeburg um rund 64 % gesenkt werden. Für ein Jahr betrachtet, bedeutet das eine Energieeinsparung von mehr als 250.000 kWh, die nicht emissionsbehaftet zu erzeugen sind.

### 3 Kleine Schritte mit großer Wirkung

Doch nicht nur im eigenen Wirken, sondern auch in Zusammenarbeit mit Kunden und Partnern konnten bereits vielfältige Maßnahmen zur Emissionsreduzierung an Geräten und Anlagen vorgenommen werden. Im Zuge dessen ist die FAM stetig damit befasst,

Emissionen, die aus Herstellung, Betrieb und Verwertung von Anlagen und Geräten resultieren, zu reduzieren und Kunden von Neu- sowie Betreibern von Bestandsanlagen und -Geräten neue Potentiale der Emissionsreduzierung auf dem Weg zum nachhaltigen Wirtschaften aufzuzeigen.

Dabei unterscheiden wir zwischen folgenden Arbeitsrichtungen bzw. Maßnahmen:

### **Virtual Prototyping**

Ein wesentlicher Bestandteil in der Entwicklung effizienter Systeme ist unsere virtuelle Produktenentwicklung, denn jede Anlage und jedes Gerät ist ein kundenspezifisches Unikat und kein Serienprodukt von der Stange. Daher ist es von großer Bedeutung, das Systemverhalten zu verstehen und so zielgerichtet zu optimieren. Zum Einsatz kommen beispielsweise virtuelle Methoden aus den Bereichen:

**Diskrete-Elemente-Methode:** Ohne die Verwendung von Partikelsimulationen ist die Entwicklung von stoffstromoptimierten Anlagen und Geräten in der Schüttguttechnik kaum mehr denkbar. Erst die Analyse des dreidimensionalen, dynamischen Stoffstromverlaufs in verschiedenen Betriebszuständen sowie die Evaluierung des Einflusses von konstruktiven Maßnahmen ermöglichen es, die Effizienz und die Emissionen - beispielsweise der Gutübergabepunkte - zu verbessern.

Die wesentlichen Benefits der DEM-Analyse aus Sicht der Emissionsvermeidung sind die Erkennung von verschleißkritischen Zuständen zur Erhöhung der Standzeiten, die Darstellung konstruktiver Maßnahmen zur Verringerung dynamischer Widerstände der Gutaufgabe, was zugleich die Schädigung des Förderguts reduziert sowie die Schaffung eines stetigen Stoffstroms zur Reduzierung der Staubentwicklung und der stofflichen Emission.

**Dynamische Gurtfördererberechnung:** In Ergänzung zur klassischen, statischen Gurtfördererberechnung findet die dynamische Gurtfördererberechnung Einsatz. Mit Hilfe dieser numerischen Berechnungsmethode lässt sich das transiente Verhalten des dynamischen Gurtförderersystems in verschiedenen Betriebszuständen, wie Anfahren, Bremsen oder Nennbetrieb sowie in variierenden Beladungszuständen simulieren. Das ermöglicht die Untersuchung der Gurtzustände respektive Gurtzugspannung und Gurtdurchhang an kritischen Streckenpunkten des Gurtförderers und nicht zuletzt die Untersuchung des geregelten Antriebssystems.

Die Vorteile der dynamischen Gurtfördererberechnung liegen in der gezielten Auslegung zur Verminderung von Schlupf zwischen Trommel und Gurt, was den Verschleiß reduziert und die Standzeiten verlängert sowie in der Verminderung von kritischen Spannungszuständen im Gurt, die durch die Simulation erkannt werden. Hinzu kommt die Möglichkeit, Belastungen auf den Antriebsstrang besser zu prognostizieren und Optimierungen, beispielsweise der Anfahrzeiten vorzunehmen.

**Virtuelle Inbetriebnahme:** Mit der virtuellen Inbetriebnahme wird die Funktionssicherheit aus dem Wechselspiel von Hardware und Software untersucht. Die Grundlage bildet die virtuelle Abbildung aller mechanischen und elektrischen Baugruppen vom einfachen Temperatursensor über Wechselrichter bis hin zum Motor inklusive der Steuerung. Durch

die Analyse der funktionsrelevanten Abläufe lassen sich somit Programmierung und Hardware vor der physischen Inbetriebnahme kontrollieren und optimieren.

Neben einer hohen Qualitätssicherheit führt die vorgezogene virtuelle Inbetriebnahme zur Verkürzung der realen Inbetriebnahmezeit, was sich in der Reduzierung von Personalzeiten sowie der Leistungsbereitstellung für Inbetriebnahmetests und den damit verbundenen Emissionen widerspiegelt.

### **Stoffeinsatz- sowie Emissionsreduzierung**

Die Einsparung von Primärrohstoffen und den mit ihrer Gewinnung verbundenen Emissionen ist eines der Ziele in der Projektentwicklung auf dem Weg zum nachhaltigen Wirtschaften. Die Grundlage hierfür stellt mit einer Betriebsdauer von mindestens 20 Jahren die Langlebigkeit der Anlagen und Geräte der FAM dar.

Ein Baustein in der Reduzierung des Stoffeinsatzes ist die Senkung des Materialbedarfs durch Massenoptimierung von Bauteilen. Hierfür kommen statische Berechnungsmethoden, u. a. RSTAB oder die Finite-Elemente-Methode, zum Einsatz. Im Kontext der Nachhaltigkeit ist Massenoptimierung bei gleicher Lebensdauer erstrebenswert, da dies sich im Weiteren positiv auf Emissionen in Logistik und Errichtung auswirkt.

Gleichermaßen gilt es, die Emissionen der Anlagen und Geräte im Betrieb zu minimieren. Unterscheiden lassen sich diese in stoffliche und energetische Emissionen.

Die Optimierung der stofflichen Emissionen von Verbrauchsstoffen, wie der Schmierung von Lagern, Winden und Ketten, ist ein Bestandteil des nachhaltigen Betriebs von Anlagen und Geräten. Hierfür sind die Schmiermenge und die Intervalle zu optimieren, um den unnötigen Austrag von Schmiermitteln zu vermeiden. Das lässt sich durch die sinnvolle Einstellung der Zentralschmierung erreichen. Die Einstellung geht jedoch mit einer stetigen Kontrolle der Schmierstellen einher, um die Unter- oder Überversorgung zu vermeiden.

Nicht in jedem Fall lässt sich der stoffliche Austrag in Gänze vermeiden. Ein Beispiel ist die Verlustschmierung der Kratzerketten. Die vollständige Kapselung des Kettensystems wäre sehr aufwendig und störungsanfällig, daher ist der Austrag von Schmierstoff kaum zu vermeiden. In solchen schwer vermeidbaren Fällen kommen biologisch abbaubare Schmierstoffe zum Einsatz, die weniger bedenklich für die Umwelt sind.

Ist der stoffliche Austrag von Schmierstoffen nicht zu vermeiden und sind biologisch abbaubare Schmierstoffe nicht tauglich, lassen sich beispielsweise durch konstruktive Maßnahmen, wie die gezielte Installation von speziellen Wannen unter schmierstoffintensiven oder leckagekritischen Komponenten, wie Winden und Seiltrommeln, Schmutzfangmatten oder Schmutzfangwannen unter Fördergurten, die stofflichen Emissionen von Fördergut oder Schmiermitteln in die Umwelt vermeiden.

Im System Gurtförderer wird die Reduzierung der willkürlichen stofflichen Emissionen durch den seitens der FAM standardmäßig installierten Gurtreiniger unterstützt und so eine gezielte punktuelle Stoffentnahme erreicht.

Für besonders staubanfällige Fördergüter, die zu einem weitreichenden stofflichen Austrag

führen können, werden neben statischen Einhausungen systemspezifische Entstaubungen umgesetzt.

Neben den stofflichen Emissionen gewinnt die Vermeidung der energetischen Emissionen in Form von Schall zunehmend an Bedeutung. Die FAM befasst sich seit Langem mit der Reduzierung der Schallemissionen von Anlagen und Geräten. Beispielhaft für besonders lärmkritische Geräte sind Kratzer zu nennen. Bedingt durch ihre Funktionsweise befinden sich zahlreiche Komponenten im dynamischen Kontakt, wodurch Schall emittiert wird. Mit dem Einsatz speziell entwickelter Rollen, die ein niedriges Rollgeräusch erzeugen, Dämpfern an den Kettenrädern sowie einem optimierten Rechedesign mit reduzierter Geräuschabstrahlung konnte die Schallemission signifikant gesenkt werden.

In stationären und mobilen Geräten und Anlagen, in denen sich generatorische Potentiale erschließen, werden die Antriebsstränge derartig gestaltet, dass sie eine Energierückgewinnung und Einspeisung in das hiesige Stromnetz ermöglichen, anstatt die erzeugte Leistung in Bremswiderständen in thermische Energie umzuwandeln, die dem System verloren geht.

### **Automatisierung und Digitalisierung**

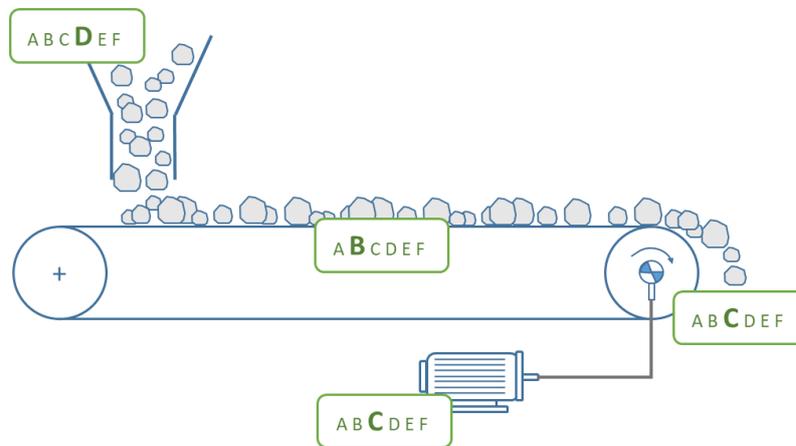
**Condition Monitoring Systeme** gehören längst zum Standard, mit deren Hilfe vorhandene Maschinen- und Prozessdaten übernommen und zur Zustandserfassung sowie zu Diagnosezwecken durch den Betreiber, Hersteller und/oder Instandhaltungs-Dienstleister zu Auswertungen herangezogen werden. Auch beim sog. "Digitalen Zwilling" sind die Daten unabdingbar. Nur durch den Vergleich der Annahmen bei der Erstellung des Anlagen-Modells (wie Förderleistung, Auslastung, Betriebsregime / Einschaltdauer, usw.) mit den realen Betriebsdaten wird es möglich sein, die Verhältnisse zwischen den modellierten (Prognose) und tatsächlichen (Messung) Verläufen zu erkennen, bestimmte Abweichungen festzustellen und wertvolle Erkenntnisse zur Anpassung der Modelle zu gewinnen.

**Haldenmanagementsysteme:** In unserem Sinne verstehen wir darunter einen vollautomatisierten Schüttgutlagerplatz mit folgenden Funktionalitäten aus unserem Kerngeschäft des Materialumschlags: intelligente Planung, Verwaltung und Überwachung von Einlagerungs- und Auslagerungsvorgängen von Lagerplatz-Ressourcen; optimale Vorbereitung von Material-Mischprozessen inkl. Rezeptverwaltung für die Zusammenstellung von verschiedenen Endprodukten aus unterschiedlichen Rohprodukten zur Gewährleistung anforderungsgerechter Materialmischungen. Somit werden die Umschlagprozesse bedarfsgerecht und hocheffektiv durchgeführt.

### **Forschung und Entwicklung**

Gurtt Förderer sind in nahezu jeder Anlage und jedem Gerät der FAM vertreten und maßgeblich für den Schüttguttransport verantwortlich. Eines unserer aktuellen Forschungs- und Entwicklungsprojekte widmet sich daher allein der Untersuchung und Optimierung zur Standardisierung von Maßnahmen für einen ökologischen und energieeffizienten Gurtt Förderer. Im Projekt werden somit Potentiale zur energetischen Optimierung aufgezeigt, die mithilfe verschiedener Simulations- und Berechnungsmethoden untersucht und messtechnisch validiert werden. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk der Erstellung

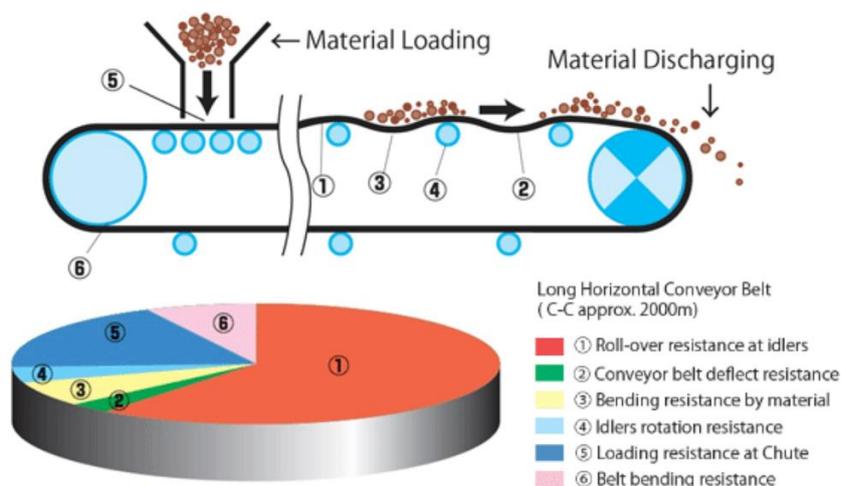
sensorischer Konzepte zur Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung. Im Ergebnis entsteht ein Maßnahmen- und Bewertungskatalog, welcher der Klassifizierung des energie- und ressourceneffizienten sowie ökologischen Designs von Gurtförderern dient (Bild 5).



**Bild 5:** Entwurf der Klassifizierung von Gurtförderern respektive Effizienz- und Ökorating

#### 4 Erhöhung der Energieeffizienz

Wie bereits genannt, ist die Erhöhung der Energieeffizienz von Geräten und Anlagen eines der Themen, welches die FAM und Forscher weltweit beschäftigt. Als zentrale Systemeinheit besitzt der Gurtförderer von der Gutübergabestelle bis zur Antriebslösung im Betrieb hohe Energieeinsparpotenziale. Maßgeblich durch die Reduzierung der Bewegungswiderstände sowie die Optimierung des Betriebsverhaltens kann der Leistungsbedarf des Gurtförderers deutlich gesenkt werden. Einen Überblick über die Verteilung der Widerstände, die im Betrieb eines exemplarischen Gurtförderers von 2000 m Förderlänge entstehen, gibt Bild 6. Es wird deutlich, dass den Großteil des Bewegungswiderstands mit rund 60 % der Eindringrollwiderstand ausmacht. Auch wenn FAM nicht direkt an der Entwicklung von bewegungswiderstandsoptimierten Gurten [4], [5], [6] und Rollen beteiligt ist, unterstützen wir unsere Kunden bei ihrem Einsatz.



**Bild 6:** Schematische Darstellung eines Gurtförderers eines unbekanntem Herstellers mit den Widerstandsarten im Betrieb [7]

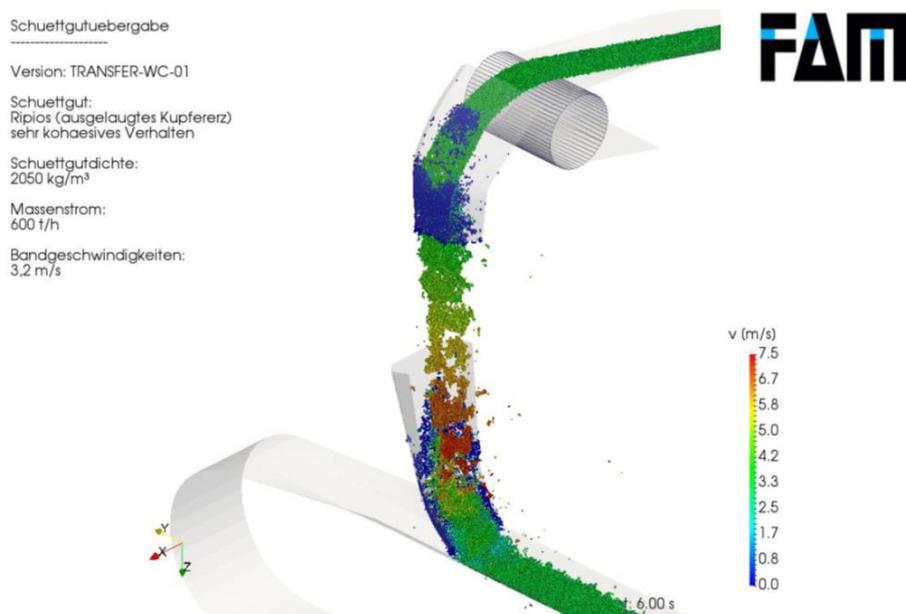
Nichtsdestotrotz zeigt das Beispiel in Bild 6 Segment (5), dass, ungeachtet der genauen

Kenntnis über die Ausführung der Gutaufgabe, diese rund 15 % des Gesamtenergiebedarfs darstellt, obwohl sie auf die Gurtfördererlänge von 2000 m bezogen nur einen Längenanteil von rund 1 % besitzt. Hier besteht somit ebenfalls ein deutliches Energieeinsparpotential und in diesem Bereich ist die FAM aktiv.

Doch woher kommt dieser starke Einfluss? Insbesondere im Bereich der Gutaufgabe wirkt eine Vielzahl von Kräften, die direkt oder indirekt eine Belastung auf den Gurt und somit den Antrieb des Gurtförderers darstellen. Diese lassen sich aufteilen in statische Belastungen, die aus der reinen Auflast der Fördergutmasse resultieren und dynamische Kräfte  $F_{dyn,v}$ , die aus der Änderung der Bewegungsrichtung und –geschwindigkeit des Stoffstroms resultieren, siehe Gleichung (1).

$$\vec{F}_{dyn,v} = \dot{m} \cdot (\vec{v}_{Stoff} - \vec{v}_{Gurt}) \quad (1)$$

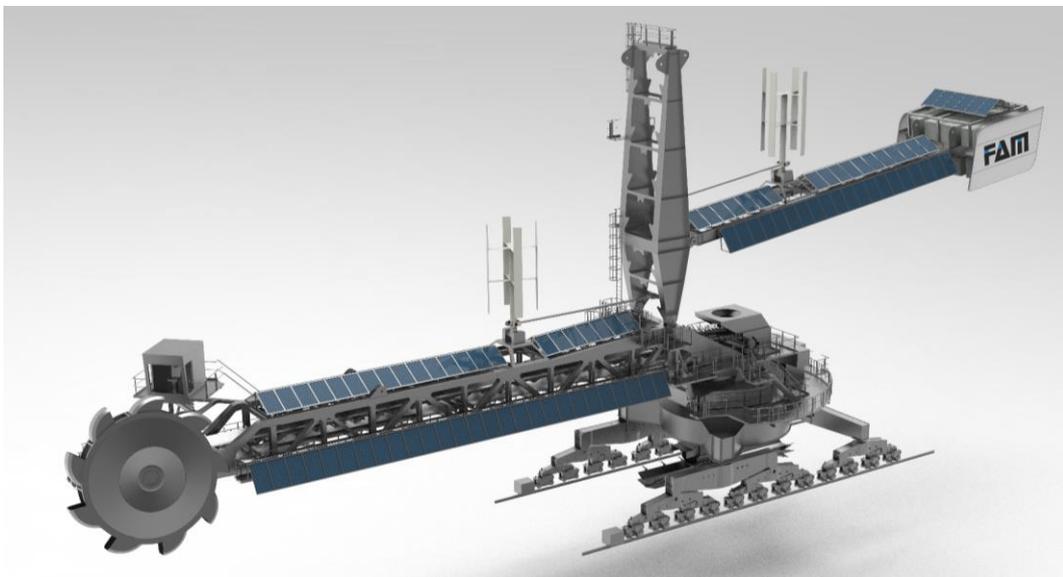
An einem Beispiel verdeutlicht: Fällt der Stoffstrom vertikal auf den Fördergurt, muss er beim Auftreffen seine Bewegungsrichtung signifikant ändern. Hierfür wird der Stoffstrom vertikal verzögert, was stoßartig die Reib-, Eindring- und Rollwiderstände von Gurt und Rollen unter der Gutaufgabe dynamisch erhöht. Zudem ist der Stoffstrom in Fördergurtrichtung von Null oder sogar einer gegenläufigen Geschwindigkeit auf Gurtgeschwindigkeit zu beschleunigen, was wiederum eine Kraft longitudinal zur Förderrichtung erfordert. Diese dynamischen Kräfte schädigen den Fördergurt und die Rollen im Aufgabebereich und erzeugen dynamische Widerstandsanteile, die sich über die gesamte Förderstrecke, wie eine Welle, bis zum Motor übertragen. Dieser erfährt daraus eine Drehzahlreduzierung und muss folglich die Förderstrecke samt Gurt und Fördergut beschleunigen, um wieder die Sollzahl zu erreichen. Dabei zeigen FAM-eigene, Bild 7, und weitere Untersuchungen [8], dass durch konstruktive Maßnahmen und damit eine stetige Stoffumleitung diese dynamischen Anteile deutlich reduzierbar sind. Das verringert nicht nur die Belastungen auf den Antrieb, sondern schont auch Fördergurt und die Rollen im Aufgabebereich.



**Bild 7:** Ausschnitt der FAM-Studie zur Gurtbelastungsreduzierung durch „Hood & Spoon“

## 5 Von der Vision bald zur Realität?

Im abgeschlossenen IDE-Projekt (Integrated Design Engineering) „Green Power“ der FAM in Kooperation mit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik wurden Möglichkeiten der Applizierung regenerativer Energiequellen auf Geräten und Anlagen der FAM untersucht. Es zeigt, dass eine Integration regenerativer Elektroenergiequellen in das FAM-Portfolio möglich ist. Das Baukastenkonzept kann an die Abmessungen und Gegebenheiten der Geräte und Anlagen sowie der Umwelt angepasst werden. Nach dem aktuellen Stand der Technik erreicht die Energieerzeugung durch die Anbringung der Photovoltaik-Module und der Windkraftanlagen jedoch nur einen Teil der erforderlichen Antriebsleistung des in Bild 8 dargestellten Kombigerätes. Nichtsdestotrotz sind die anteilige Bereitstellung weitestgehend emissionsfreier Antriebsleistung oder die Versorgung von Nebenverbrauchern, wie Beleuchtung o. ä., mögliche Schritte auf dem Weg zum nachhaltigen Wirtschaften. Dabei geht der Nutzen von regenerativen Energiequellen in Geräten und Anlagen noch darüber hinaus. Neue Betriebs-, Steuerungs- und Wartungskonzepte erfordern in zunehmendem Maße die kontinuierliche Erfassung des System- und Prozessverhaltens mit einer Vielzahl an Sensoren. Insbesondere bei Anlagen wie Langstreckenförderern, die sich über teils große Distanzen erstrecken, ist die elektrische Versorgung der Sensoren nicht mehr trivial. Während für den Signaltransfer Funklösungen bestehen, ist die elektrische Versorgung deutlich aufwendiger. Der Einsatz von PV-Modulen oder Kleinstwindkraftanlagen ist eine Möglichkeit, diese Sensoren dezentral mit elektrischer Leistung zu versorgen.



**Bild 8:** Designstudie für die Applikation von Solargeneratoren und Windkraftanlagen auf Geräten

## Zusammenfassung

Nachhaltiges Wirtschaften ist zu einer der Maximen der FAM GmbH geworden, um die uns zur Verfügung stehenden Ressourcen sinnhaft und effizient zu nutzen. Im Zuge dessen ist die gesamte FAM Gruppe mit der stetigen energetischen und ökologischen Optimierung ihrer Verfahrensabläufe sowie Anlagen und Geräte befasst.

Wir stellen uns den damit einhergehenden Herausforderungen unter Verwendung von virtuellen Berechnungsmethoden und Qualitätsverfahren sowie der Nutzung neuester Technik aus den Bereichen Digitalisierung und Automatisierung.

Die FAM kann dabei auf langjährige Erfahrungen und zahlreiche technische Lösungen in der Emissionsreduzierung von Anlagen und Geräten zurückgreifen und wird diese auch zukünftig durch den Einsatz innovativer Technologien weiter optimieren, um so die gesteckten Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

### Quellenverzeichnis:

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Nachhaltigkeit>; Zugriff am 11.06.2021
- [2] <https://www.fam.de/unternehmen/unternehmenskultur/index.html>: Firmenauftritt der FAM GmbH; Zugriff am 11.06.2021
- [3] DIN EN ISO 14001:2015: Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Ausgabe 2015-11
- [4] Zhao, X. et al.: Research on Indentation Rolling Resistance Based on Viscoelasticity of Cover Rubber under a Conveyor Belt. *Mathematical Problems in Engineering*, Bd. 2019, 2019 p. 16
- [5] Fenner Dunlop Australia: POWERSAVER™. 2017. verfügbar unter: <https://www.fennerdunlop.com.au/conveyor-products/conveyor-belt/belt-cover-compounds/powersaver-lrr>. [Datum des Zuffriffs 26.04.2021]
- [6] Zhang, Y.: EXTENDED REACH – OVERLAND PIPE CONVEYOR WITH LOW ROLLING RESISTANCE BELT. *bulk solids handling*, Bd. 4, Nr. 33, 2013, p. 13
- [7] Bridgestone Corporation: Image of conveyor belt featuring various degrees of resistance during operation. Abbildung verfügbar unter <https://www.bridgestone.com/corporate/news/2014111801.html>. [Datum des Zuffriffs 18.03.2021]
- [8] Doroszuk, B.; Król, R.: ANALYSIS OF CONVEYOR BELT WEAR CAUSED BY MATERIAL ACCELERATION IN TRANSFER STATIONS, *Mining Science*, Nr. 26, 2019, pp. 189-201

## **25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021**

**Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung**

---

### **Der Einsatz von Smart Glasses als 'remote'-Lösung in der Schüttgutfördertechnik**

Christopher Kirsch



Christopher Kirsch, M. Sc.  
BEUMER Group GmbH & Co. KG  
Oelder Straße 40  
59269 Beckum



# Der Einsatz von Smart Glasses als 'remote'-Lösung in der Schüttgutfördertechnik

*Der Beitrag "Der Einsatz von Smart Glasses als 'remote'-Lösung in der Schüttgutfördertechnik" beschreibt generelle Anwendungsmöglichkeiten der Digitalisierung für die Schüttgutindustrie und stellt die wesentlichen Herausforderungen dar. Am Beispiel eines digitalen Serviceproduktes der BEUMER Group wird erläutert, in welchen Prozessen diese Technologie unterstützend eingesetzt werden kann, welche neuen Geschäftsmodelle sich dadurch ergeben und welchen Funktionsumfang das Produkt dazu benötigt.*

## 1 Einführung

Die BEUMER Group bietet mit 4.500 Mitarbeitern in über 70 Ländern Intralogistiklösungen in den Bereichen Fördern, Verladen, Palettieren, Verpacken, Sortieren und Verteilen an. Als global agierender, familiengeführter Maschinen- und Anlagenbauer hat man bereits im Jahr 2016 erkannt, dass für die eigenen Prozesse, bei Kundenanforderungen und bei der generellen Entwicklung des Marktes das Thema Digitalisierung zunehmend wichtiger wird.

Um diesem Themenfeld tatkräftig zu begegnen, hat sich die BEUMER Group für die Gründung von zwei neuen Standorten, in Berlin und Dortmund, entschieden. In Dortmund sitzt eine interne Einheit namens BG.evolution, welche sich der kundenorientierten Entwicklung von digitalen Prototypen widmet. Im dortigen Prozess werden auf Basis von Marktanalysen und Kundenproblemen anfassbare Prototypen entwickelt, die in Pilotphasen mit Kunden erprobt werden. Ziel ist es, durch diesen agilen Prozess schnell zu einer Entscheidung zu kommen, ob die entwickelte Lösung durch die BEUMER Group zu einem finalen, skalierbaren Produkt entwickelt werden soll oder nicht. In Berlin wurde eine eigene Gesellschaft, die Beam GmbH, gegründet. Ziel der Beam GmbH ist es, mit erfahrenen Gründern Kundenprobleme in der Intralogistik zu lösen und in eigenständige Start-ups zu überführen. So soll durch die Beam und ihre Startups die Logistik der Zukunft geprägt werden. Dabei können diese Start-ups sowohl Lösungen fokussieren, die für Kunden der BEUMER Group ergänzend sein können als auch prinzipiell bestehende Lösungen und Dienstleistungen der BEUMER Group ersetzen können.

In beiden neuen Standorten spielen auch die Industrien, in denen die BEUMER Group als Lieferant für Schüttgutfördertechnik bereits heute tätig ist, eine große Rolle. Im Zuge der Projekte des Standorts in Dortmund wurden dazu der Markt analysiert und eine Vielzahl an Kundenprozessen sowie internen Prozessen aufgenommen. Das Team in Dortmund setzt am Kundenproblem an und sucht nach Technologien (Software und Hardware), die zur Lösung des Problems beitragen können. Im Anschluss entscheidet das Kundenfeedback über die Eignung der Lösung für das Kundenproblem. Ein positives Resultat der durchgeführten Schritte bilden die BEUMER Smart Glasses. Dieses Produkt unterstützt mittlerweile seit drei Jahren Kunden und Mitarbeiter weltweit bei der Bewältigung von täglichen Herausforderungen. Im Folgenden werden zunächst potenzielle Handlungsfelder der Digitalisierung in der Schüttgutfördertechnik erläutert und im Anschluss wird auf die Funktionen der Smart Glasses eingegangen.

## 2 Digitalisierung in der Schüttgutfördertechnik

### 2.1 Möglichkeiten

Die Betreiber von Maschinen und Anlagen sehen sich mit immer stärker wachsenden Anforderungen an die Maschinenverfügbarkeit konfrontiert. Gleichzeitig kann man die notwendigen Rahmenbedingungen zur Gewährleistung einer hohen Maschinenverfügbarkeit, wie beispielsweise die Kosten und verfügbaren Personen, immer schwieriger rechtfertigen. An dieser Stelle kann die Digitalisierung den Maschinen- und Anlagenbauer sowie den Anwender der Maschinen und Anlagen unterstützen. Digitalisierung umfasst in diesem Bereich auf der einen Seite Technologien, welche neue Formen der Interaktion mit Systemen und Daten ermöglichen und auf der anderen Seite gänzlich neue Formen von Prozessen, welche heute noch nicht existieren oder bestehende Prozesse vollständig ersetzen.

Mögliche technologische Bausteine für die Erfüllung dieser Anforderungen in diesen Bereichen sind mobile Anwendungen, welche die Anwender bei ihren Tätigkeiten anleiten und anschließende manuelle Tätigkeiten abnehmen. In diesem Fall könnten es digitale Checklisten im Einsatzfeld der Inspektion und Wartung sein.

Neben mobilen Anwendungen spielen die Vernetzung von Maschinen und die Datenanalyse eine immer größere Rolle. Durch eine kontinuierliche Vernetzung von Maschinen kann eine engere Abstimmung zwischen Maschinen- und Anlagenbauer sowie dem Betreiber erfolgen. Die Integration dieser Daten in Servicekonzepte des Customer Supports ermöglicht es, den Kunden sowohl bei täglichen Entscheidungen als auch bei zukunftsorientierten Planungen mit einer datengestützten Entscheidung zielgerichtet zu unterstützen. Ein wesentlicher Bestandteil für die Datenauswertung ist die Ausstattung der Maschinen mit aussagekräftigen Sensoren oder ggf. sogar Zusatzsensoren, welche ausschließlich der zukunftsorientierten Analyse des aktuellen Maschinenzustands dienen.

Durch die Digitalisierung selbst werden neue Prozesse der Interaktion zwischen Anwender und Anbieter ermöglicht. Hier können neue Technologien für einen vereinfachten audiovisuellen Datenaustausch direkt an der Maschine zielführend sein. Ein Beispiel hierfür sind die BEUMER Smart Glasses, welche im Abschnitt 3 nochmal weiter erläutert werden.

Des Weiteren ergeben sich durch die Digitalisierung (technologisch und prozessual) neue Möglichkeiten für Geschäftsmodelle. Diese Geschäftsmodelle kann der Maschinen- und Anlagenbauer nutzen, um weitere Schnittpunkte mit seinen Kunden zu generieren und langfristige Erfolge zu erzielen. Der Maschinen- und Anlagenbetreiber kann an den neuen Geschäftsmodellen partizipieren, um die Anforderungen an bspw. die Maschinenverfügbarkeit in den ihm gesteckten Rahmenbedingungen (Kosten, Personal etc.) zu erfüllen. Beispiele für Geschäftsmodelle, welche durch Digitalisierung erst ermöglicht wurden, sind unter anderem "Freemium" oder "Pay-per-use". Bei beiden Geschäftsmodellen erhalten die Anwender ein hohes Maß an Flexibilität, können aber gleichzeitig im Bedarfsfall eine volle Leistung zur Erfüllung der Aufgaben in Anspruch nehmen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass insbesondere im Bereich der Schüttgutförderertechnik und den dort geforderten hohen Anforderungen an die Maschinenverfügbarkeit ein hohes Potenzial von Digitalisierung vorhanden ist. Insbesondere in den Tätigkeiten der präventiven Instandhaltung, der Fehlerbehebung sowie der Optimierung werden neue Produkte und Geschäftsmodelle der Maschinen- und Anlagenbauer die Kunden in der Schüttgutindustrie befähigen, ihre Anforderungen an die Maschinenverfügbarkeit zu erfüllen und die Rahmenbedingungen (Kosten, Personal) einzuhalten. Im folgenden Abschnitt werden beispielhafte Herausforderungen für die Digitalisierung im Bereich der Schüttgutförderertechnik beschrieben.

## **2.2 Herausforderungen**

Bei der Digitalisierung – insbesondere in Branchen, in denen Schüttgutförderertechnik eingesetzt wird – gibt es sehr verschiedene Herausforderungen, die es zu meistern gilt, wenn es ein neues digitales Produkt am Markt zu etablieren gilt. Die wesentlichen Herausforderungen sind dabei:

- Konnektivität
- Akzeptanz und
- Robustheit.

Digitalisierung geht in eigentlich jedem Schritt automatisch mit dem Thema "Konnektivität" einher. Ohne eine Verbindung mit unter- oder übergeordneten Systemen, Datenbanken oder Logiken sind einzelne digitale Produkte häufig nur ein Mittel zum Zweck, aber keine nachhaltige, erweiterbare Lösung. Insbesondere in Industrien wie der Zement- oder Miningindustrie stellt die Funkabdeckung für den Einsatz von "plug-and-play" Lösungen eine große Herausforderung dar. Die Netzabdeckung sowie die Angebote der verschiedenen Netzanbieter unterscheiden sich zwischen den geographischen Regionen der Welt sehr stark und somit ist es schwierig für einen Maschinen- und Anlagenbauer ein einheitliches Konzept für den Grundstein der Digitalisierung – die Konnektivität – zu finden.

Eine zweite wesentliche Herausforderung ist die "Akzeptanz" der Anwender der digitalen Lösungen. Hier spielen neben kulturellen Aspekten insbesondere auch die Meinung des Anwenders über den Nutzen sowie dessen Angst vor der Nutzung eine wesentliche Rolle. Durch neue Interaktionsmöglichkeiten zwischen dem Anwender und den digitalen Lösungen wie beispielsweise Sprachbedienungen, Gestensteuerungen oder eine angeleitete Bedienung kann man verschiedene Möglichkeiten anbieten, die Akzeptanz beim Anwender zu vergrößern. Das Thema Akzeptanz ist eine der wesentlichen Herausforderungen im Bereich der Digitalisierung und unabhängig von der Fokusindustrie der Lösung.

Digitale Lösungen im Kontext der Schüttgutindustrie sehen sich neben der Konnektivität und der Akzeptanz auch mit dem Thema Robustheit im operativen Alltag konfrontiert. Insbesondere in staubigen, schwer zugänglichen, abgelegenen und lauten Umgebungen müssen diese digitalen Lösungen auch beim Einsatz mit Handschuhen, Helmen, Schutzbrillen und weiteren Schutzausrüstungen gut funktionieren. Ohne eine Berücksichtigung dieser Anforderungen würde es auf der einen Seite keine Akzeptanz

geben und auf der anderen Seite würde sehr wahrscheinlich die Lebenszeit der digitalen Lösung aufgrund einer verringerten physischen Haltbarkeit nicht die Erwartungen des Anwenders erfüllen.

Im folgenden Abschnitt werden einige Details zum Funktionsumfang der BEUMER Smart Glasses gegeben.

### 2.3 BEUMER Smart Glasses

Mit den Smart Glasses stellt die BEUMER Group ihren Kunden einen "add-on" Service zur Verfügung, welcher zu einem bestehenden Hotline-Vertrag genutzt werden kann. Mithilfe der Smart Glasses wird die Kommunikation zwischen der BEUMER Group und ihren Kunden verbessert, indem verbal geschilderte Störfälle visualisiert werden können. Somit ist die Hotline der BEUMER Group in der Lage, eine zielgerichtetere Störfallbeseitigung durchzuführen und somit dem Kunden effektiv und zielführend zu helfen.



**Bild 1:** Mitarbeiter trägt die BEUMER Smart Glasses

Die Smart Glasses sind ausgestattet mit einer Kamera, einer Datenverarbeitungseinheit und einem Funkmodul. Eine entsprechende Software auf den Smart Glasses kann durch den Bediener mittels der Sprachbedienung oder Bedienung über Knöpfe gestartet werden. Diese Software stellt beispielsweise auf dem Display nach Start der Software eine Servicenummer und ein Passwort bereit. Diese beiden Informationen werden bei einem Telefonat mit der BEUMER Group Hotline übergeben, sodass eine sichere Verbindung zwischen der Datenbrille und der Hotline aufgebaut wird. Die Hotline erhält in der Folge ein Videosignal aus dem Sichtbereich des Brillenträgers, welches die Hotline in der Identifikation des Fehlers bzw. der Fehlerursache unterstützen soll. Gleichzeitig kann eine sprachliche Kommunikation zwischen Brillenträger und Hotline über die Brille erfolgen, sodass das Telefonat beendet und mit beiden Händen frei agiert werden kann. Dem

Brillenträger können visuelle Hinweise (bspw. Handbücher) auf das integrierte Display der Datenbrille projiziert werden.

## 2.4 Einsatzfelder der Smart Glasses

Neben dem im oberen Absatz beschriebenen Einsatzfeld der Störfallbeseitigung haben sich insbesondere durch die Corona Pandemie in den Jahren 2020 und 2021 weitere Einsatzfelder im Bereich der Schüttgutindustrie ergeben. Durch die Pandemie waren Maschinen- und Anlagenbauer sowie Kunden gezwungen, neue Wege bei der Inbetriebnahme, der Optimierung, der Wartung und Reparatur zu gehen, da Reisen aufgrund von Ein- und Ausreisebeschränkungen vielfach nicht möglich waren. In den letzten Jahren konnten dadurch innerhalb der BEUMER Group verschiedene Möglichkeiten evaluiert und als neue Angebote definiert werden:

- 1) **Remote Commissioning:** Die Smart Glasses werden in einem Paket mit weiterem Equipment zum Kunden geschickt, um vor Ort anwesende Techniker bei der Installation der Maschinen, deren Inbetriebnahme und initialen Parametrisierung zu unterstützen. Die Smart Glasses bieten hier den Vorteil, exakt ein Video aus dem Sichtfeld des Bedieners an die Experten der BEUMER Group zu schicken.
- 2) **Remote Inspection & Repair:** Die 'Smart Glasses' wird genutzt, um eine Person remote bei der Durchführung einer Sichtkontrolle, Wartung und/oder Inspektion anzuleiten. Auf Basis der Informationen können eine remote Diagnose vorgenommen und Handlungsfelder definiert werden. Mit der gleichen Technologie können dann auch die Reparaturschritte begleitet und angeleitet werden. Hier ist es dann zudem möglich, ausgewählte dritte Parteien als weitere Experten mit auf das System aufzuschalten. Des Weiteren wird das Augmented Reality Headset der Smart Glasses genutzt, um der Person vor Ort kontext- oder ortsbezogene Informationen just-in-time zu visualisieren, um Sprach- und Wissensbarrieren zu überwinden.
- 3) **Remote Troubleshooting:** Durch die gezielte Bereitstellung von Informationen in dem Augmented Reality-Headset durch Experten der verfügbaren Hotline-Spezialisten können Arbeitsschritte zur Störungsbehebung Schritt für Schritt eingeblendet und somit auch unerfahrene Personen angeleitet werden.

Fokus des Vortrages ist die exemplarische Darstellung von diesen Anwendungsfällen an Praxisbeispielen. Neben detaillierten Informationen zu den Hintergründen, Herausforderungen und Ergebnissen werden auch potenzielle Weiterentwicklungen - insbesondere für die Schüttgutindustrie - dargestellt.

## Zusammenfassung

Der Einfluss der Digitalisierung hat bereits heute sehr starke Auswirkungen auf die Tätigkeiten eines Maschinen- und Anlagenbauers. Anforderungen an die Maschinen, an den Projektablauf und an die Nutzbarkeit der Anlagen haben immer häufiger ihren Ursprung im Themenfeld der Digitalisierung.

Für einen Maschinen- und Anlagenbauer sind dabei zunächst Themenfelder und

Technologien relevant, welche die interne Effizienz verbessern und somit dem Kunden einen spürbar reibungsloseren Projektablauf ermöglichen. Daneben sind es weiterhin Themenfelder und Technologien, welche der spätere Endkunde selbst nutzen kann, um die Maschinen und Anlagen besser warten, betreiben und optimieren zu können.

Die BEUMER Smart Glasses sind ein Beispiel für eine Technologie, welche sowohl das produzierende Unternehmen als auch den Endanwender befähigt, über große Distanzen und auch bei Sprachbarrieren die Kommunikation zu vereinfachen.

Zum einen wird dies durch nutzerfreundliche Videotelefonie, zum anderen durch erste Anwendungsgebiete von Augmented Reality gewährleistet, durch die Anweisungen gezielter gesprochen und bildhaft unterstützt werden können.

Die Erprobung in der Praxis der BEUMER Smart Glasses verlief – unter anderem getrieben durch hohe Reisebeschränkungen – schnell aber durchweg positiv.

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Smart Monitoring im Einsatz: LoRaWAN™ basiertes Sensornetzwerk zur permanenten Überwachung von Förderanlagen

Yevgeniy Chumachenko

Christian Richter

André Katterfeld



Yevgeniy Chumachenko, M.Sc. (Referent)  
Artur Küpper GmbH & Co. KG  
An der Knippenburg 27  
46238 Bottrop



Dr.-Ing. Christian Richter  
Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld  
Institut für Logistik und  
Materialflusstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg



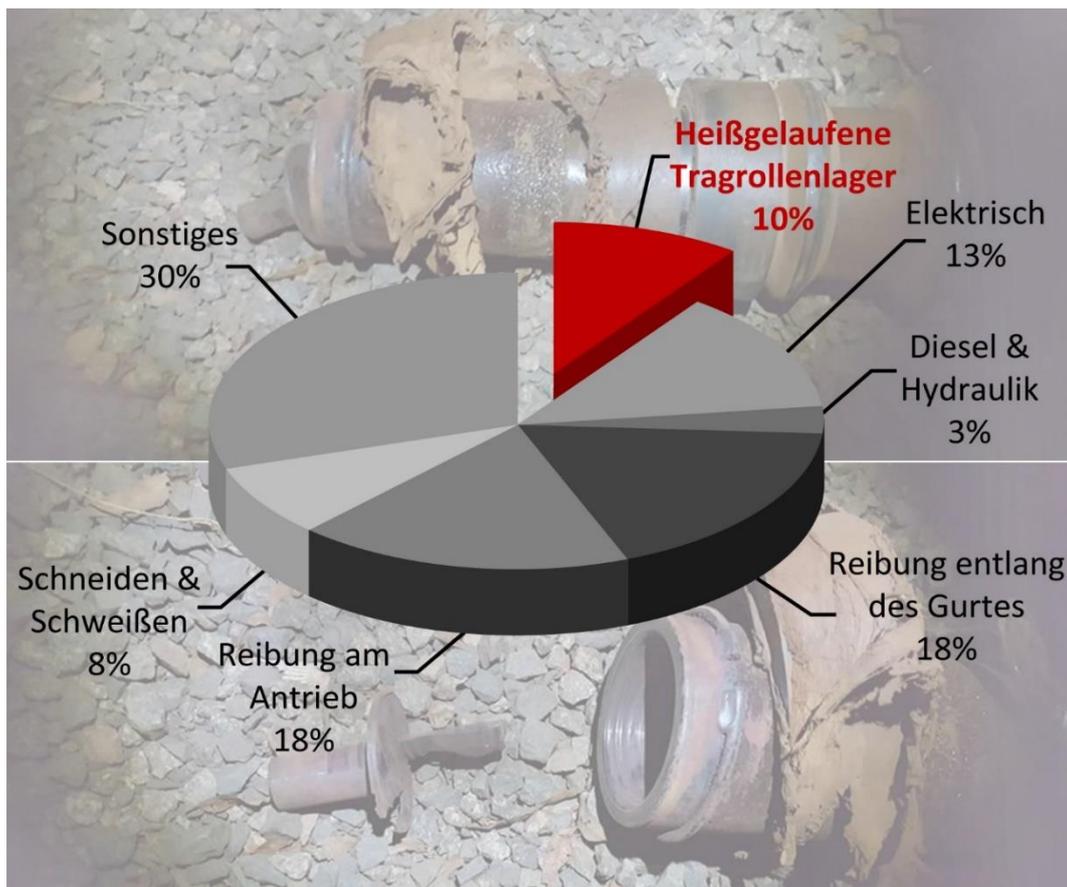
## Smart Monitoring im Einsatz: LoRaWAN™ basiertes Sensornetzwerk zur permanenten Überwachung von Förderanlagen

Lagerschäden und folgende Erhitzung von Tragrollen können einen Brand an einer Förderanlage verursachen. Um Anlagenbetreiber frühzeitig vor einem Ausfall von Tragrollen zu warnen, hat die Artur Küpper GmbH & Co. KG (AKT) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU) ein intelligentes und flexibel anwendbares Überwachungssystem entwickelt.

Ein LoRaWAN™ basiertes Netzwerk aus Sensoren ist ein wesentlicher Bestandteil dieses kontinuierlichen und vollautomatischen IoT Überwachungssystems, welches ungeplante Bandstillstände verhindert und die Produktivität und somit die Wirtschaftlichkeit erhöht.

### 1 Einleitung

Kugellagerschäden führen in den meisten Fällen zur Erhitzung von Tragrollen und können dadurch Ursache ungeplanter Stillstände oder sogar eines Förderbandanlagenbrands mit verheerenden Folgen sein. Im Durchschnitt stellen überhitzte Tragrollen, die sogenannten „Heißläufer“, ca. 10 % der Zündquellen bei einer Förderbandanlage dar (Bild 1).



**Bild 1:** Zündquellen einer Förderbandanlage [2]

Die prozentuale Verteilung der Zündquellen und die Wahrscheinlichkeit einer Brandentwicklung sind von der Qualität und konstruktiven Ausführung der Komponenten sowie von den Betriebsbedingungen vor Ort beeinflusst.

Grundvoraussetzung für die Eliminierung von Heißläufern – und somit für eine signifikante Reduzierung potentieller Zündquellen an einer Förderbandanlage – ist ein rechtzeitiges Erkennen von Kugellagerschäden.

Besonders sinnvoll ist die Zustandsüberwachung der Tragrollen für nichtredundante Förderbandanlagen sowie für Förderbandanlagen mit strengen sicherheitstechnischen Auflagen.

Bereits in der Vergangenheit wurden zahlreiche Versuche unternommen, effektive Systeme bezüglich der Zustandsüberwachung von Tragrollen zu entwickeln und zu etablieren. Doch erst die rasante Entwicklung der Elektronik und der Internet-Technologien innerhalb der letzten Jahre schuf die Grundlage für den wirtschaftlichen Einsatz solcher Systeme.

## 2 Auswahl der passenden Messmethode

Es gibt diverse Methoden der Lagerschadendetektion, die jeweils auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien basieren:

- Akustische Detektion (manuell oder mit Hilfe der Messtechnik),
- Vibrationsmessungen,
- Optische Temperaturmessungen (mit einer Infrarotkamera oder einem Laser),
- Temperaturmessfühler.

Jede dieser Methoden hat spezifische Vor- und Nachteile. Zahlreiche wissenschaftliche Quellen bestätigen die hohe Zuverlässigkeit der auf Temperaturmessungen basierenden Zustandsüberwachung [3]. Dies war einer der Gründe für die Entwicklung und Etablierung des temperaturbasierten Messsystems für Tragrollen.

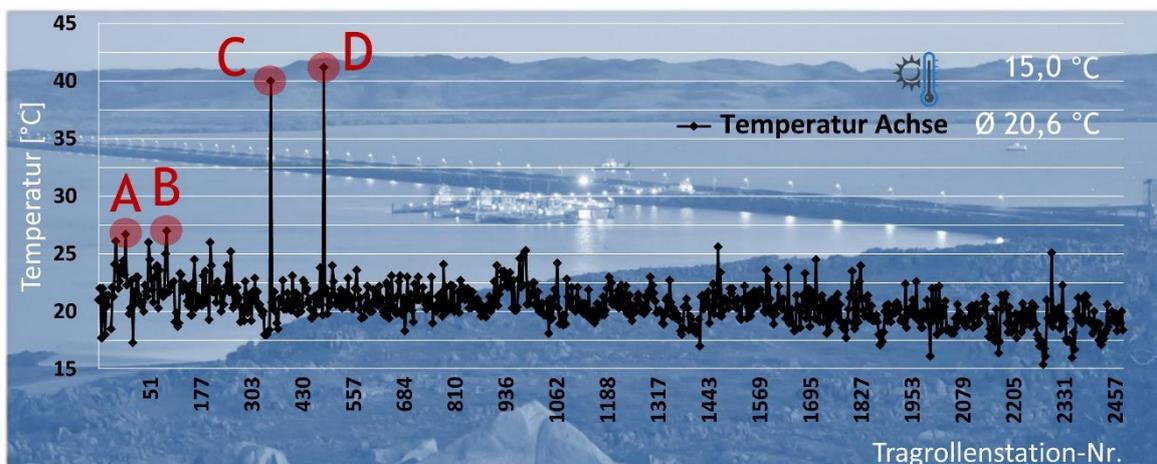


**Bild 2:** Thermoaufnahme einer Tragrolle

In einem 2018 erfolgten Feldversuch haben die durch uns durchgeführten Messungen die hohe Wirksamkeit der Temperaturerfassung für die Zustandsüberwachung der Tragrollen ein weiteres Mal in der Praxis bestätigt. Dabei haben wir die Temperaturen aller zugänglichen Rollen eines Förderers mit einer Infrarotkamera erfasst, protokolliert und anschließend ausgewertet (Bild 2).

Bei der Analyse der Messdaten wurden vier Rollen detektiert, die deutlich erhöhte Temperaturwerte aufzeigten (Bild 3). Eine der markierten Rollen fiel am zweiten Tag der Messungen aus. Weitere drei Rollen wurden einige Tage nach der Messung durch den

Betreiber ausgebaut und später von AKT begutachtet. Bei allen vier Rollen wurde in den nachfolgenden Untersuchungen Lagerversagen in sehr fortgeschrittenem Stadium festgestellt.



Kritische Messwerte	Achse [°C]	$\Delta T$ Umgebung [°C]	$\Delta T$ Durchschnitt [°C]	Reaktion
Rolle A	26,7	11,7	6,1	Markiert und ausgetauscht nach 7 Tagen
Rolle B	27,0	12,0	6,4	Markiert und ausgetauscht nach 7 Tagen
Rolle C	40,0	25,0	19,4	Markiert und ausgetauscht nach 3 Tagen
Rolle D	42,2	27,2	21,6	Ausgefallen am 2. Tag der Messungen

**Bild 3:** Ergebnisse der Auswertung der Temperaturmessung

Diese Erfahrung beweist eindeutig, dass bei einem anwendungsgerechten Rollendesign erhöhte Temperaturen beim Lagerschaden in der Regel bereits mehrere Tage vor dem endgültigen Ausfall der Tragrolle detektiert werden können. Der Betreiber wird somit in den meisten Fällen ausreichend Zeit haben, um den Rollentausch vorzubereiten und in einem geplanten Stillstand durchzuführen.

Selbstverständlich ist diese von AKT Mitarbeitern durchgeführte manuelle Erfassung keine geeignete Methode für eine kontinuierliche und flächendeckende Zustandsüberwachung von Tragrollen. Für kontinuierliche Messungen in engen Zeitfenstern, die notwendig sind, um verfälschende Einflüsse zum Beispiel der Umgebungstemperaturen herausrechnen zu können, wäre ein hoher Personalaufwand vonnöten. Hinzu kommt, dass viele Tragrollen oft nur schwer zugänglich sind.

### 3 Sensing Idler - Funktionsweise

Um Anlagenbetreiber frühzeitig und zuverlässig vor einem Ausfall von Tragrollen zu warnen, hat die Artur Küpper GmbH & Co. KG (AKT) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) der Otto-von-Guericke-Universität (OVGU) ein intelligentes und flexibel anwendbares Überwachungssystem namens Sensing Idler entwickelt. Die Arbeiten wurden bzw. werden im Rahmen der gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsprojekte „Sensing Idler“ und „3iS“ durchgeführt [4]. Das vor kurzem abgeschlossene Projekt „3iS“ wurde im Rahmen des ZIM-Netzwerkes „NekoS“ bearbeitet

und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) gefördert.

Das entwickelte System basiert auf der Internet of Things (IoT)-Technologie und verwendet die LoRaWAN™ Funktechnologie – einen Funkstandard mit besonders hoher Reichweite (bis zu 5 km im offenen Gelände) bei niedrigem Energiebedarf. Diese Besonderheit schafft die Voraussetzung zum Ausbau eines wirtschaftlichen und flexiblen Sensornetzwerkes. In vielen Fällen kann das komplette Betriebsgelände mit nur einem an den Server angeschlossenen Empfänger (Gateway) abgedeckt werden.

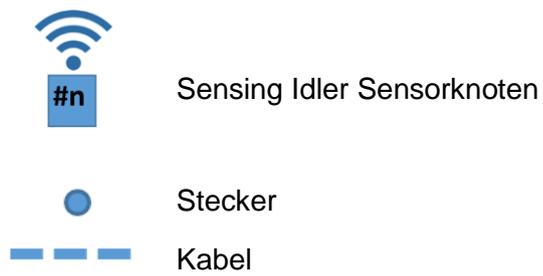
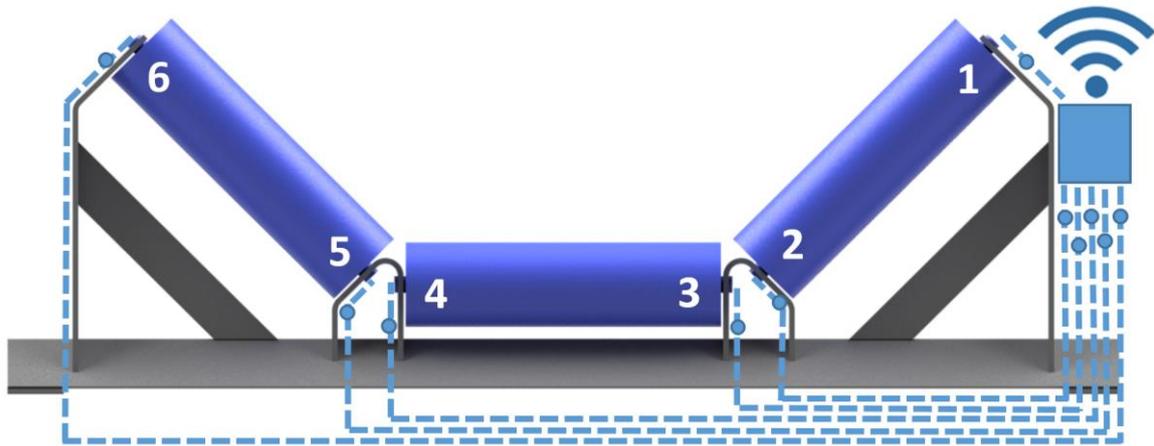
Die Sensorknoten werden von kompakten, austauschbaren Batterien gespeist, die mit einer Ladung den sicheren Betrieb für mehrere Jahre gewährleisten. Lediglich der Empfänger (das Gateway) muss feste Anschlüsse zur Spannungsversorgung (110V - 230V) und evtl. zur Internetverbindung (Ethernet) erhalten.

Pro Tragrolle werden zwei Sensoren direkt unter dem Kugellager eingesetzt. Pro Tragrollenstation wird zudem ein Sensorknoten gut zugänglich an der äußeren Stirnfläche der Station montiert (Bild 4). Der Sensorknoten enthält einen Mikrocontroller, ein Funkmodul und eine Batterie, die in einem dichten Kunststoffgehäuse untergebracht sind (Bild 5).

Temperatursensoren, die in der Achse integriert sind, erfassen die Lagertemperatur kontinuierlich und sind schmutz- und stoßgeschützt. In regelmäßigen Zeitabständen werden die Messwerte der Sensoren von den Sensorknoten automatisch abgefragt. Diese Messwerte werden anschließend per Funk an den mit dem Server verbundenen Empfänger gesendet und in einer speziell entwickelten Cloud ausgewertet.

Werden bei der Auswertung erhöhte Temperaturmesswerte festgestellt, erhält der Bandanlagenbetreiber eine entsprechende Warnung mit allen relevanten Angaben auf sein Smartphone sowie PC und kann umgehend reagieren. Standardmäßig werden die Bezeichnung des Förderers, die Nummer der Tragrollenstation, der Rolle, der Lagerstelle sowie der gemessene Temperaturwert übermittelt.

Der Austausch der Tragrollen und der Batterien erfolgt gemäß der mitgelieferten Bedienungsanleitung. Sensing Idler-Tragrollen sind benutzerfreundlich austauschbar und als Plug & Play-Lösung konzipiert. Die Batterien können in vielen Fällen sogar im laufenden Betrieb gewechselt werden.



**Bild 4:** Aufbauschema einer Sensing Idler Station



**Bild 5:** Sensing Idler Sensorknoten

## 4 Sensing Idler – Smart Monitoring

Durch die Anwendung der Sensing Idler-Technologie werden ungeplante, durch Heißläufer verursachte Stillstände verhindert. Somit werden die Produktivität, die Wirtschaftlichkeit, die Betriebssicherheit und der Arbeitsschutz an der Bandanlage deutlich erhöht.

Das smarte Monitoringsystem zeichnet sich insbesondere durch den vom Institut für Logistik und Materialflusstechnik (OVGU) entwickelten und getesteten Auswertalgorithmus aus. Diese Datenanalyse berücksichtigt die Beeinflussung der Messwerte durch wechselhafte Umgebungstemperaturen, Sonneneinstrahlung, Beschattung oder eine lastbedingte Temperaturerhöhung, die tages- oder jahreszeitenabhängig in allen oder nur in bestimmten Bereichen der Bandanlage auftreten können.

Dieses System basiert auf dem Prinzip der kollektiven Zustandsüberwachung. Wird bei der Messung eine Lagertemperatur ermittelt, die über der für dieses Kollektiv ermittelten kritischen Temperatur liegt (Formel 3), wird eine Warnmeldung an den Betreiber gesendet. Dieses intelligente Vorgehen reduziert die zu übermittelnden Datenmengen und den Datenspeicheraufwand erheblich.

$$\text{Durchschnittliche Kollektivtemperatur: } \bar{T} = \frac{\sum T_{\text{Tragrolle } (1..n)}}{n} \quad (1)$$

$$\text{Max. zulässige Temperaturabweichung: } \Delta T \quad (2)$$

$$\text{Kritische Temperatur: } T_{\text{critical}} = \bar{T} + \Delta T \quad (3)$$

Die Effektivität der kollektiven Zustandsüberwachung wurde erstmals an einem Versuchsförderer am Institut für Logistik und Materialflusstechnik der OVGU experimentell nachgewiesen.

Zusätzlich erfolgt eine weitere Prüfung für jede Rolle: Erreicht die Rolle den Wert der maximal zulässigen Temperatur (variiert in Abhängigkeit der gewählten Tragrollenausführung und/oder der Vorgaben des Betreibers), wird eine entsprechende Warnung an den Betreiber gesendet. Dieses Vorgehen ist z. B. dann notwendig, wenn leicht brennbare Güter in sehr warmen Umgebungen (z. B. Sommerhitze) transportiert werden. Dies schließt die Möglichkeit aus, dass das gesamte Rollenkollektiv zu hohe Temperaturwerte erreichen kann, ohne dass der Betreiber gewarnt wird.

Im Rahmen der Web 4.0-Technologie ist es sehr sinnvoll, die erhobenen Daten statistisch auszuwerten und zu verifizieren. Der Anlagenbetreiber erhält präzise und zuverlässige Angaben über den exakten Einbauort, das Einbaudatum und das Datum des Rollenwechsels. Bereiche mit häufigen Rollenausfällen können durch diese Zustandsüberwachung sehr einfach lokalisiert werden. Mit dieser Auswertung können gezielte Untersuchungen der Ausfallrollen vorgenommen werden. Das Rollendesign kann somit den Einsatzbedingungen angepasst und die Wirksamkeit des optimierten Designs - wie zuvor beschrieben - überprüft werden.

Diese Vorgehensweise empfiehlt sich für vorzeitige Rollenausfälle - aber auch für Langzeituntersuchungen.

Speziell die Langzeituntersuchungen ermöglichen es dem Bandanlagenbetreiber, statistisch abgesicherte Daten zu erheben, um z. B. die Performance verschiedener Rollenanbieter zu vergleichen, aber auch um seine Warenwirtschaft zu optimieren.

Mit den prognostizierten und statistisch abgesicherten Daten ist nahezu eine "Just in Time"-Belieferung möglich, so dass die Bevorratung von Ersatzrollen auf ein Minimum reduziert werden kann. Im Idealfall können die Daten in Echtzeit in das vorhandene ERP-System eingebunden werden. In Verbindung mit dem Lieferanten können Bestellungen automatisch generiert und ausgelöst werden. Die Vorteile für den Betreiber sind eine Verringerung der Lagerflächen und die Reduzierung der Kapitalbindung.

Oftmals werden Tragrollen in sensiblen Förderstrecken präventiv nach einer festgelegten Einsatzzeit ausgetauscht. Durch die permanente Zustandsüberwachung ist diese Vorgehensweise entbehrlich bzw. können die Wechselintervalle an die tatsächlich zu erreichende Lebensdauer angepasst werden. Diese Vorgehensweise reduziert die Kosten des Betreibers, schont Ressourcen und die Umwelt.

Das System Sensing Idler zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität aus. Der Einsatz ist problemlos sowohl in Neuanlagen als auch in bereits bestehenden Anlagen möglich. Die Steuerung des Sensing Idler kann hierbei autark erfolgen, aber auch in ein bereits vorhandenes Überwachungs- und Steuerungssystem integriert werden. Mit dem System Sensing Idler ist nicht nur die Zustandsüberwachung von Tragrollen möglich, es eignet sich auch hervorragend für die Zustands- bzw. Temperaturüberwachung von vielen weiteren Bandanlagenkomponenten, z. B. Trommeln und Antrieben. Die Sensoren sind wasserdicht und für Temperaturen von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+120^{\circ}\text{C}$  geeignet.

Bei der Installation in bereits bestehende Bandanlagen müssen an den vorhandenen Tragrollenstationen keine Veränderungen vorgenommen werden. Die Stationen werden lediglich mit den Sensorknoten sowie kurzen tagebautauglichen Kabeln ausgestattet, die innerhalb der Tragrollenstation die Sensorknoten mit den Rollen verbinden. Die Umrüstung einer Tragrollenstation dauert nur wenige Minuten.

Für neue Förderbandanlagen ist es empfehlenswert, das System Sensing Idler bereits in der Planung zu berücksichtigen. Die Konstruktion der Station wird für die Verwendung mit Sensing Idler optimiert. Hierdurch können z. B. die Befestigungspunkte und Kabelführungen kostenneutral in den Fertigungsprozess der Tragrollenstationen integriert werden.

## 5 Feldversuch

Mitte September 2019 wurde im Rahmen eines Feldversuchs eine Hafenbandanlage in Rotterdam mit dem Sensing Idler System ausgerüstet. An zehn Tragrollenstationen wurden dreißig vorhandene Rollen gegen Sensing Idler-Tragrollen getauscht. Die Installation der Rollen sowie der dazugehörigen Funktechnik erfolgte innerhalb weniger Stunden. Anschließend wurde die Bandanlage wieder in Betrieb genommen (Bild 6).



**Bild 6:** Zehn mit Sensing Idler ausgerüstete Stationen

Im Rahmen dieses Versuchs wurden alle in regelmäßigen Zeitabständen erhobenen Daten erfasst und ausgewertet. Hierdurch konnten mit dem Sensing Idler System verlässliche Erfahrungen unter realen Betriebsbedingungen gesammelt und die einzelnen Zusammenhänge besser visualisiert werden.

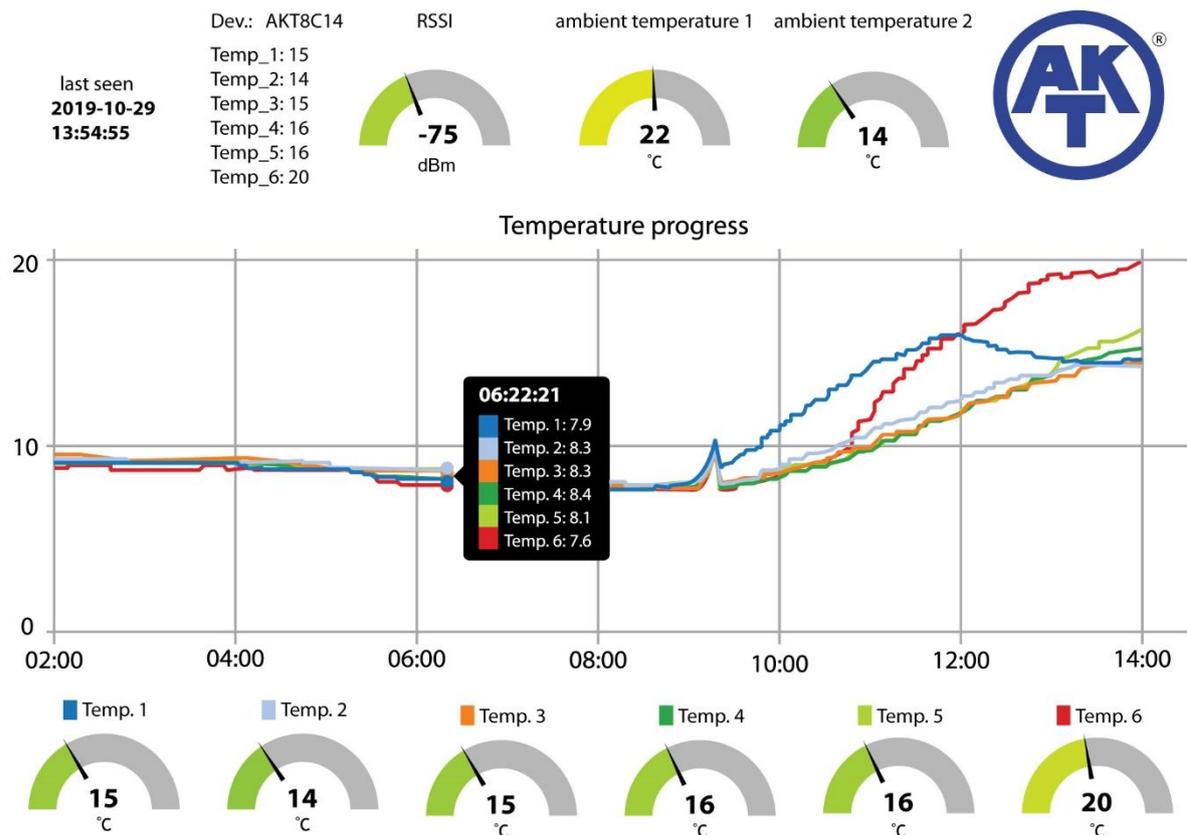
So wurde z. B. ein zusätzlicher Sensorknoten mit den dazugehörigen Sensoren zur Messung der Umgebungstemperatur installiert, um deren Einflüsse sowie die Einflüsse der Sonneneinstrahlung darstellen zu können.

Bild 7 zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe aller Tragrollenkollektive für die letzten 12 Stunden. Den Einfluss der Umgebungstemperatur kann man am sanften Anstieg aller Messkurven nach ca. 09:30 Uhr feststellen. Bedingt durch die Änderung der Position der

Sonne am Himmel, zeigt sich der Einfluss der Sonneneinstrahlung in den zeitlich versetzten Anstiegen der Messkurven (rot und blau) für die äußeren Lager der Seitentragrollen.

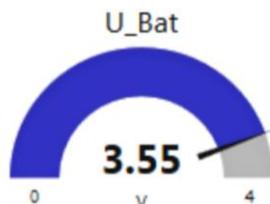
Der kleine Peak von ca. 09:00 Uhr bis ca. 09:30 Uhr mit steilem Anstieg aller Messkurven kennzeichnet die Temperaturerhöhung durch die Inbetriebnahme des Förderers für die Dauer von ca. 10 bis 15 Minuten.

Da die Daten vollautomatisch erfasst und ausgewertet werden, erübrigt sich eine ständige personelle Überwachung. Man kann sich die Daten jederzeit online (und damit ortsungebunden) in Echtzeit anzeigen lassen.



**Bild 7:** Graphische Darstellung der Messdaten der Tragrollenkollektive, die online in Echtzeit angezeigt werden

Im Laufe des Feldversuchs wurde das System Sensing Idler weiter optimiert. So erhält der Betreiber z. B. eine Meldung, falls der Datenfluss blockiert wird (z. B. durch einen Stromausfall oder Störung des Datenanschlusses des Empfängers).

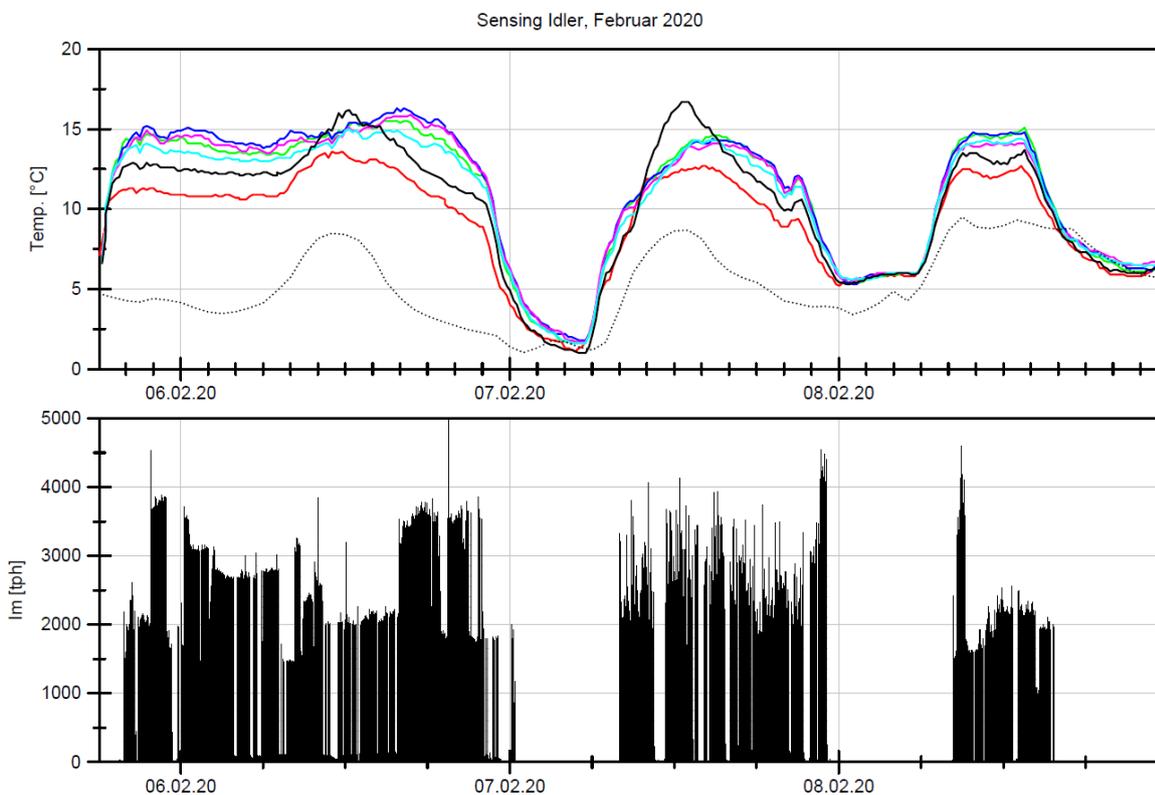


**Bild 8:** Darstellung des Ladezustandes der Batterie

Der Ladezustand der Batterie jedes Knotens wird mit der neuesten Firmware-Version ebenfalls auf dem Dashboard dargestellt (Bild 8). Der Betreiber wird automatisch und

rechtzeitig über den bevorstehenden Batteriewechsel durch eine entsprechende Meldung gewarnt.

Vergleicht man im zeitlichen Verlauf die Daten der mittleren Temperaturen der Tragrollenkollektive (Bild 8) mit der örtlichen Umgebungstemperatur (Punktlinie; [5]) und dem Massenstrom, stellt man fest, dass bei einer Umgebungstemperatur von ca. 5°C der durch die Förderung des Schüttguts hervorgerufene Temperaturanstieg ca. 10°C beträgt. Die Temperaturanstiege hängen eindeutig von der Radiallast auf den Lagern der Tragrollen ab. So kennzeichnen z. B. die schwarze und die rote Messkurve die Außenlager der Seitenrollen. An sonnigen Tagen erreichen die außen liegenden Lager der Seitenrollen durch die Sonneneinstrahlung z. T. sogar höhere Temperaturwerte als die Lager der Mitteltragrollen (z. B. am Mittag des 6. und 7. Februar 2020 auf den Graphiken in Bild 9). Der smarte Auswertalgorithmus berücksichtigt alle diese Einflüsse. Es werden nur dann Warnungen generiert, wenn einzelne Rollen die errechnete zulässige kritische Temperatur überschreiten.

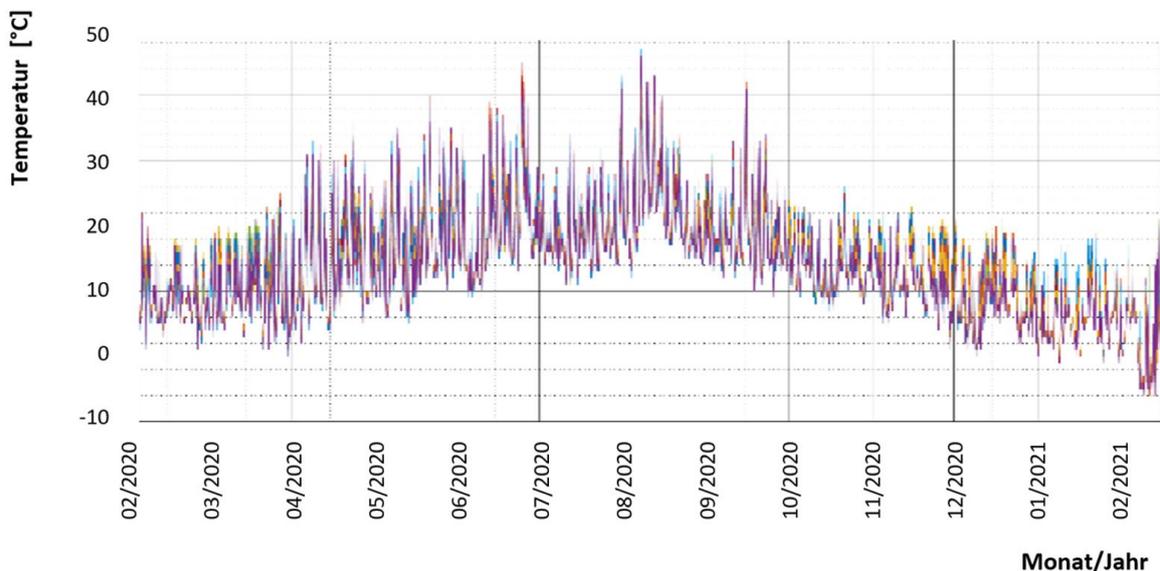


**Bild 9:** Gegenüberstellung des Verlaufs der mittleren Temperaturen der Tragrollenkollektive und der örtlichen Umgebungstemperatur mit dem Verlauf des Massenstroms

Die Funktionalität des Systems wurde durch den Feldversuch nachgewiesen. Alle Komponenten funktionieren zuverlässig auch unter schwierigen Betriebsbedingungen (Kohle- und Eisenerzstaub, Wasser, Salzwasser, ständig wechselnde Betriebszustände, Vibrationen, EMV-Quellen, UV-Strahlen).

## 6 Pilotprojekte im Ausland

Wie bereits erwähnt, wurde im September 2019 eine Hafenanlage in den Niederlanden mit dem Sensing Idler System ausgerüstet. Dieser Feldversuch dauert an und liefert weiterhin wichtige Erkenntnisse (Bild 10).



**Bild 10:** Jahrestemperaturverläufe der Tragrollenkollektive in den Niederlanden

Außerhalb von Europa gelten andere Funkstandards. Der Sensing Idler ist deshalb aktuell in zwei Ausführungen erhältlich: für Europa (Sensing Idler-v1.0-EU868) und für Lateinamerika (Sensing Idler-v1.0-AU915).

Die Zertifizierungsprozesse sind zur Erlangung des Marktzuganges für die jeweiligen Zielländer unabdingbar und leider mit sehr viel Aufwand verbunden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn einzelne bestimmte Länder eigene, zum Teil sehr komplexe, Regelungen aufstellen. Bestes Beispiel ist hier Brasilien. Die Zertifizierung für dieses Land haben wir nun, nach über 6 Monaten, erfolgreich abgeschlossen. Die Zertifizierungen für weitere Zielländer sind in Arbeit und werden in Kürze folgen.

Derzeit werden die kritischen Stellen von neun Förderbandanlagen in einer Eisenerzmine in Brasilien mit Sensing Idler ausgerüstet.

## 7 Integration in vorhandene Systeme

Das Sensing Idler Monitoring System kann sowohl als ein autarkes System aufgebaut werden, als auch in ein bereits vorhandenes Überwachungs- und Steuerungssystem integriert werden. Hierfür kann z. B. die OPC UA Schnittstelle genutzt werden (Bild 11).

„Als offener Schnittstellenstandard ist OPC UA eine zentrale Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung von Industrie 4.0 in die Produktion. OPC UA gewährleistet die Interoperabilität von Maschinen und Anlagen, die sich per Plug & Work nach Bedarf verketteten und umgestalten lassen – plattformunabhängig und herstellerübergreifend.“ [9]

Um eine speziell für die Bergbauindustrie optimierte OPC UA Schnittstelle zu kreieren, beteiligen wir uns an dem Vorhaben „OPC UA Mining Initiative“ der OPC Foundation/des

VDMA (Bild 10).

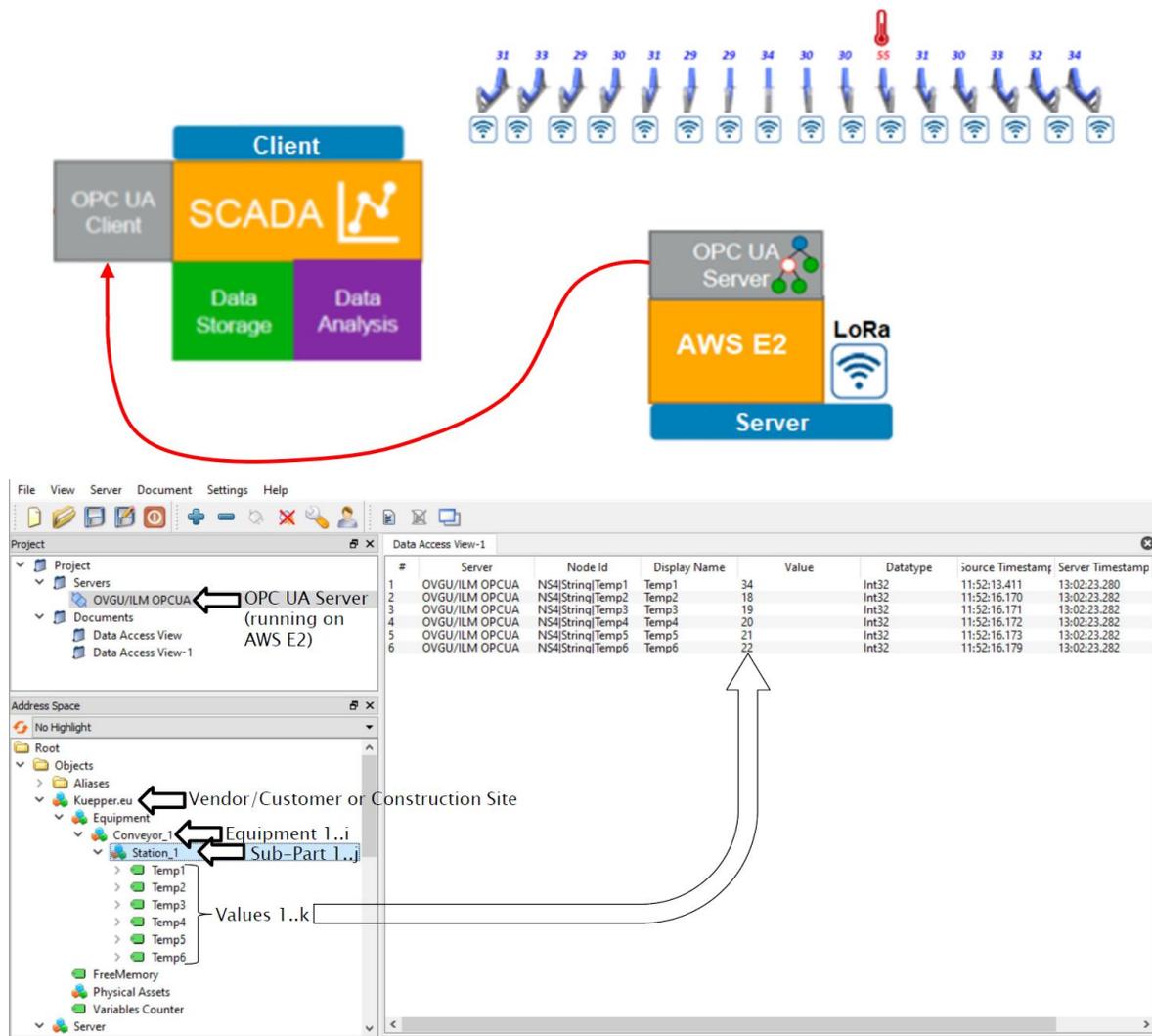


Bild 11: Datentransfer durch Nutzung einer OPC UA Schnittstelle

## Zusammenfassung

Das von der Artur Kupper GmbH & Co. KG (AKT) und dem Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) gemeinsam entwickelte intelligente Web 4.0 Überwachungssystem für die Zustandsüberwachung von Tragrollen funktioniert zuverlässig, ist flexibel anwendbar, verfügt über eine kurze Installationszeit und ist benutzerfreundlich. Mit minimalen Änderungen an der Hard- und Software lassen sich zudem auch die Temperaturen von weiteren Anlagenkomponenten überwachen. Durch eine verlässliche Langzeitstatistik über den Zustand der Tragrollen und weiterer Anlagenkomponenten erhält der Betreiber wichtige Informationen, um die Produktivität erhöhen, Kosten signifikant senken sowie die Betriebs- und Arbeitssicherheit entscheidend erhöhen zu können. Es ist somit eine für die Schüttguttechnik zukunftsweisende Lösung im Rahmen von Web 4.0.

**Quellenverzeichnis:**

- [1] Wahls, A.; Eckardt H.: Neueste Entwicklung von Messtragrollen zur kollektiven Zustandsüberwachung und Instandhaltung von Förderanlagen; Beitrag zur 22. Fachtagung „Schüttgutfördertechnik“, 2017, S. 191-200
- [2] 12<sup>th</sup> U.S./North American Mine Ventilation Symposium. John Ascuaga's Nugget Casino Resort Reno, NV, USA, 11.06.2008. Conveyor Belt Entry Fire Hazards and Control. Michael. A. Hockenberry U.S. Department of Labor – MSHA Approval & Certification Center Triadelphia, WV, USA
- [3] Liu, X.: Prediction of Belt Conveyor Idler Performance. PhD Thesis. TU Delft. 2016
- [4] Katterfeld, A.; Richter, C.; Fessel, K.; Ajmal, M.; Schwandtke, R.; Chumachenko, Y.: 3iS – Intelligent IoT Idler Stations for the Identification of Damaged Idler Bearings; 13<sup>th</sup> International Conference on Bulk Material Storage, Handling and Transportation, 9-11.07.2019, Queensland, Australia
- [5] [www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com), Wetterarchiv, Rotterdam, Niederlande, 05.-08.02.2020
- [6] Katterfeld, A.; Richter, C.; Chumachenko, Y.: Smart Monitoring: Web 4.0 – Internet of Things (IoT); Beitrag zur 24. Fachtagung „Schüttgutfördertechnik“, 2019, S. 33-39
- [7] Katterfeld, A.; Richter, C.; Chumachenko, Y.: Smart Monitoring in der Praxis: Web 4.0 und IoT Technologien steigern Sicherheit und Produktivität von Förderbandanlagen; Beitrag zur 16. Fachtagung „Gurtförderer und deren Elemente“ im HDT Essen, 2020
- [8] Richter, C.; Fessel, K.; Katterfeld, A.: Intelligent IoT Maintenance using LoRaWAN; Smart SysTech 2019; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies, S. 1–5
- [9] [www.vdma.org/opcu](http://www.vdma.org/opcu)



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Automatisierungs- und Überwachungsmethoden mittels Infrarotthermographie in rauen Umgebungen

Tobias Wendel-Eichholz  
Felix Leaman Weiffenbach  
Elisabeth Clausen



Tobias Wendel-Eichholz, M. Sc.  
Dr.-Ing. Felix Leaman Weiffenbach  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen  
Institute for Advanced Mining  
Technologies, RWTH Aachen University  
Wüllnerstr. 2  
52056 Aachen



# Automatisierungs- und Überwachungsmethoden mittels Infrarotthermographie in rauen Umgebungen

*Aufgrund anspruchsvoller Umgebungsbedingungen im Schwermaschinenbau und dabei insbesondere im Bergbau stoßen herkömmliche bildgebende Verfahren, wie z. B. Laserscanner, RGB-Kameras oder im optischen Bereich arbeitende Videosysteme, schnell an ihre Grenzen. Allerdings sind bildgebende Verfahren zur Prozessüberwachung, -automatisierung und -steuerung in vielen Industriezweigen weit verbreitet.*

*Für die herausfordernden und vielfältigen Anwendungsgebiete eignet sich das am Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) bereits seit Jahrzehnten genutzte bildgebende Verfahren basierend auf langwelligen Infrarotkameras (LWIR-Kameras). In vielen industrienahen Projekten kommen LWIR-Kameras aufgrund ihrer Vorteile gegenüber anderen bildgebenden Verfahren wie z. B. Unempfindlichkeit gegenüber Staubpartikeln in der Luft, zur Automatisierung und Prozesssteuerung zum Einsatz. So wurden mittels Bildauswertung der LWIR-Bilder verschiedene Stoffströme in Echtzeit analysiert, Tragrollen an Bandsystemen überwacht oder eine Abscheidung zu heißen Materialien vorgenommen. Die beschriebenen Applikationsbeispiele zeigen einen Teil der Einsatzbereiche LWIR basierter Bildverarbeitung zur Prozess- und Anlagenüberwachung in rauen Umgebungsbedingungen auf.*

## 1 Einleitung

Die zunehmende Erhöhung der Technologisierung, Automatisierung und Digitalisierung ermöglicht dem Bergbau ein Vordringen in immer komplexere und tiefere Lagerstätten. Die Erschließung neuer Lagerstätten führt zu der Notwendigkeit des Transportes größerer Massen. Um die Rohstoff- und Energieversorgung ökonomisch und ökologisch langfristig sichern zu können, bedarf es neuer technischer Lösungen und Prozesse. [1]

Um einen Beitrag zur Automatisierung leisten zu können, bedarf es an die schwierigen Umgebungsbedingungen angepasster Sensoren.

Aufgrund ihrer Eigenschaften eignet sich die Infrarotthermographie (oder auch Wärmebildtechnik) gut für die Prozessautomatisierung und -steuerung in verschiedensten Branchen. Der Einsatz bildgebender Verfahren zur Überwachung von Prozessen bzw. deren Automatisierung ist bereits in vielen Bereichen verbreitet. Als Beitrag zu einem sicheren, effizienten und verantwortungsvollen Bergbau entwickelt das Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University Technologien und Lösungen für die Automatisierung und Digitalisierung von Bergbaumaschinen und -prozessen. Die aktuelle Forschung des AMT konzentriert sich auf die Entwicklung und Anwendung von robusten Sensortechnologien, die der rauen und herausfordernden Bergbauumgebung gewachsen sind. In Kombination mit fortschrittlicher Datenanalytik unter Verwendung anspruchsvoller Methoden und Algorithmen, für verschiedene Bereiche, mit dem Ziel, das autonome Bergwerk der Zukunft zu gestalten. Diese umfassen derzeit Weiterentwicklungen im Bereich der Materialcharakterisierung, Lokalisierung und Navigation für autonome, mobile Maschinen, Zustandsüberwachung, vorausschauende Wartung und Instandhaltung sowie Prozessautomatisierung.

Das AMT forscht seit mehreren Jahren an der Nutzung der Infrarotthermographie für Anwendungen in der Rohstoff- und Schwermaschinenindustrie, in denen herkömmliche

bildgebende oder andere optische Verfahren häufig an ihre Grenzen stoßen. Die Herausforderung, die Technologie im Bergbau in die Anwendung zu bringen, ergibt sich aus den Umgebungsbedingungen dieser Industriezweige. In vielen Projekten erwies sich die langwellige Infrarotthermographie (LWIR) als geeignetes, bildgebendes Verfahren für die rauen Umgebungsbedingungen. Die genutzten Vorteile von LWIR-Kameras sind die Unempfindlichkeit gegenüber Aerosolen in der Luft, wie Staub- oder Wasserpartikeln, als auch gegenüber mechanischen Belastungen, wie z. B. Vibrationen. Weiterhin kommt hinzu, dass LWIR-Kameras rein passiv arbeiten können und daher unabhängig gegenüber den umgebenden Lichtverhältnissen sind. Aus den genannten Gründen qualifiziert sich die Technologie für die Automatisierung und Prozessüberwachung im Berg- und Schwermaschinenbau sowie in weiteren Industriebereichen. Über die Automatisierung und Prozessüberwachung hinaus eignet sich die Infrarotthermographie weiterhin zur Erhöhung der Sicherheit für Mensch und Maschine.

Die Schwerpunkte des AMT liegen unter anderem in der Überwachung von Förderströmen, um z. B. Bandschieflauf zu verhindern und auf der Stoffstromanalyse, um Aussagen über dessen Zusammensetzung und den Gehalt des beförderten Materials treffen zu können. Des Weiteren liegen die Forschungsaktivitäten im Bereich der Temperaturüberwachung zur Brandprävention bzw. der Brandfrühsterkennung, der Personenerkennung sowie der generellen Zustandsüberwachung von Prozessen und Abläufen. [2]

Herausforderungen und Probleme in diesen Anwendungsfeldern könnten ebenfalls mit anderen Technologien gelöst werden. Die Beladung und der Schieflauf können z. B. durch Laserscanner bzw. Endschalter realisiert werden. Eine Aussage über die Zusammensetzung von Stoffströmen kann über das XDR-Verfahren abgebildet werden. Für die Erkennung einer Person auf einem Förderband kann ebenfalls eine transponderbasierte Lösung eine Möglichkeit darstellen. Um absolute Temperaturen messen zu können, kann ein Thermometer genutzt werden.

Alle genannten Lösungen bieten individuelle Vor- und Nachteile. Eine Technologie, welche die bestehenden Lösungen ergänzt oder unter Umständen sogar ersetzen kann, ist die Infrarotthermographie. In Forschungsarbeiten am AMT wurde die Infrarot (IR) Technologie beispielsweise sowohl als alleinstehendes System [3, S. 54], als auch in Kombination mit der Acoustic Emission (AE) Technologie [3, S. 54] [„Für eine Erläuterung der AE Technologie siehe [3, S. 52]“], zur Charakterisierung kontinuierlicher Materialcharakterisierung genutzt.

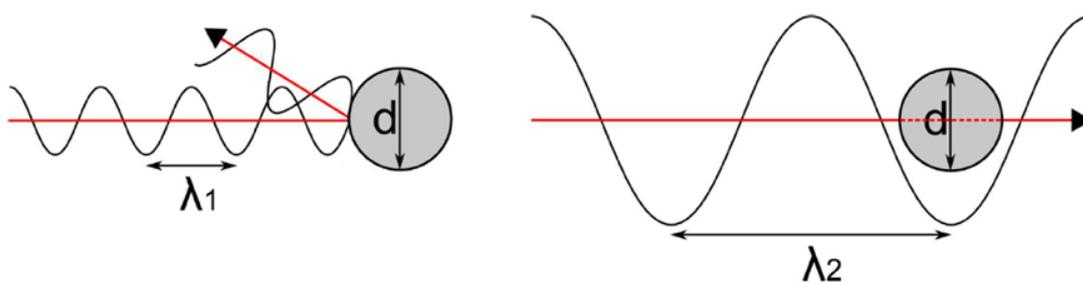
In diesem Kontext werden am AMT seit Jahren erfolgreich ungekühlte LWIR-Kameras eingesetzt. Im Folgenden werden ausgewählte Einsatzfälle für die Prozessüberwachung und –automatisierung exemplarisch aufgeführt und erläutert.

## 2 Grundlagen der Infrarotthermographie

Die Infrarotthermographie hat sich in den letzten Jahrzehnten weiterentwickelt. Dies ist insbesondere auf die enormen Fortschritte im Bereich der Mikrosysteme, der Infrarot-Detektoren und der Computertechnik zurückzuführen. Die Infrarotthermographie macht die für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotstrahlung sichtbar. Auf diese Weise können zusätzliche Informationen gewonnen und komplexe Sachverhalte oder Prozesse vereinfacht werden. [4]

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt gibt Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab. Infrarotstrahlung ist ein Teil dieser elektromagnetischen Strahlung und befindet sich im elektromagnetischen Spektrum zwischen dem sichtbaren Licht und den Mikrowellen. Die emittierte Infrarotstrahlung ist abhängig von der Temperatur des Objekts, des Materials sowie der Oberflächenbeschaffenheit und der Strahlungsrichtung. [5] [6]

Infrarotkameras erfassen die Infrarotstrahlung und stellen sie in Bildern dar. Sie arbeiten häufig im langwelligen Wellenlängenbereich zwischen  $8\ \mu\text{m}$  -  $14\ \mu\text{m}$  und nutzen eines der sogenannten atmosphärischen Fenster. Im atmosphärischen Fenster wird die emittierte, langwellige Infrarotstrahlung kaum von der Atmosphäre behindert. Bild 1 verdeutlicht, dass die Strahlung mit der Wellenlänge  $\lambda_1 < d$  von dem Teilchen/Luftmolekül  $d$  reflektiert wird, während die Strahlung mit der Wellenlänge  $\lambda_2 > d$  dieses passiert. Der Spektralbereich des atmosphärischen Fensters ist somit ideal für die passive Infrarotmessung geeignet. Außerdem wird die Infrarotstrahlung in diesem langwelligen Bereich im Vergleich zum sichtbaren Licht weniger durch Aerosole beeinflusst. Unter anderem aus diesem Grund sind LWIR-Kameras für die Realisierung von Automatisierungslösungen in rauen Umgebungen geeignet. [7] [8]



**Bild 1:** Kurzwelligere Strahlung wird von einem Partikel reflektiert (links), langwelligere Strahlung passiert ihn (rechts)

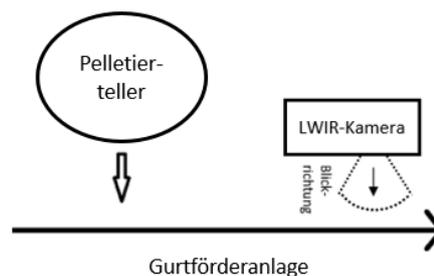
### 3 Anwendungsbeispiele

#### 3.1 Bestimmung von Stoffstromeigenschaften

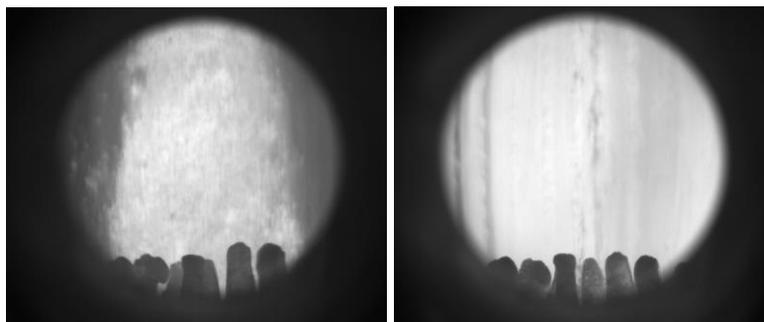
In der mineralgewinnenden Industrie ist die Stoffstromanalyse in einer Vielzahl von Zusammenhängen relevant. Dabei kann sowohl die Menge des Materialflusses als auch dessen Zusammensetzung von Interesse sein. Die unterschiedliche Abstrahlung verschiedener Materialien bzw. die Zustände lassen im Infrarotbereich Rückschlüsse auf die Zusammensetzung oder das Mischungsverhältnis eines Materialstroms zu. [7]

##### 3.1.1 Bestimmung des Feuchtegrades

Im Rahmen eines Projektes wurde der Feuchtegehalt eines Materialstroms analysiert. Ziel des Projektes war es, den Feuchtegehalt von Kraftwerksasche in Echtzeit zu bestimmen, um die Asche in gleichbleibender Qualität der Weiterverarbeitung zuzuführen. Die Asche wird über einen Pelletierteller mit Wasser vermischt. Zum Weitertransport fällt das gemischte Material auf ein Förderband. In Transportrichtung des Förderbandes ist eine LWIR-Kamera montiert, wie in Bild 2 dargestellt. Bild 3 zeigt Infrarotaufnahmen des Mischgutes mit unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten. Die Aufnahme links zeigt zu feuchtes Mischgut, während die Aufnahme rechts zu trockenes Mischgut zeigt.



**Bild 2:** Schematischer Versuchsaufbau



**Bild 3:** Infrarotaufnahme des Mischgutes

Innerhalb der Analyse werden mit Hilfe von Bildauswertungsalgorithmen Kennwerte für die jeweiligen Zustände erzeugt. Die Algorithmen erzeugen einen Vektor im mehrdimensionalen Raum, der die Eigenschaften des Materialflusses beschreibt. Durch Methoden des Machine Learnings wird der generierte Vektor mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einer definierten Mischgutklasse (zu trocken, gewünschter Feuchtegehalt, zu feucht) zugeordnet. [2]

### 3.1.2 Hot-Spot Detektion

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die Analyse mittels LWIR-Kamera ist die Erkennung von erhöhten Temperaturen eines Materialflusses innerhalb eines Trogkettenförderers, einem sogenannten Hot-Spot. Unterschiedliche Temperaturen desselben Materials verursachen einen Unterschied in der Strahlungsintensität, der von der LWIR-Kamera registriert werden kann. Durch entsprechende Bildverarbeitung und -analyse kann das heiße Material zuverlässig erkannt, ein Notprogramm eingeleitet und Brände verhindert werden.

### 3.1.3 Bestimmung von Stoffstromzusammensetzungen

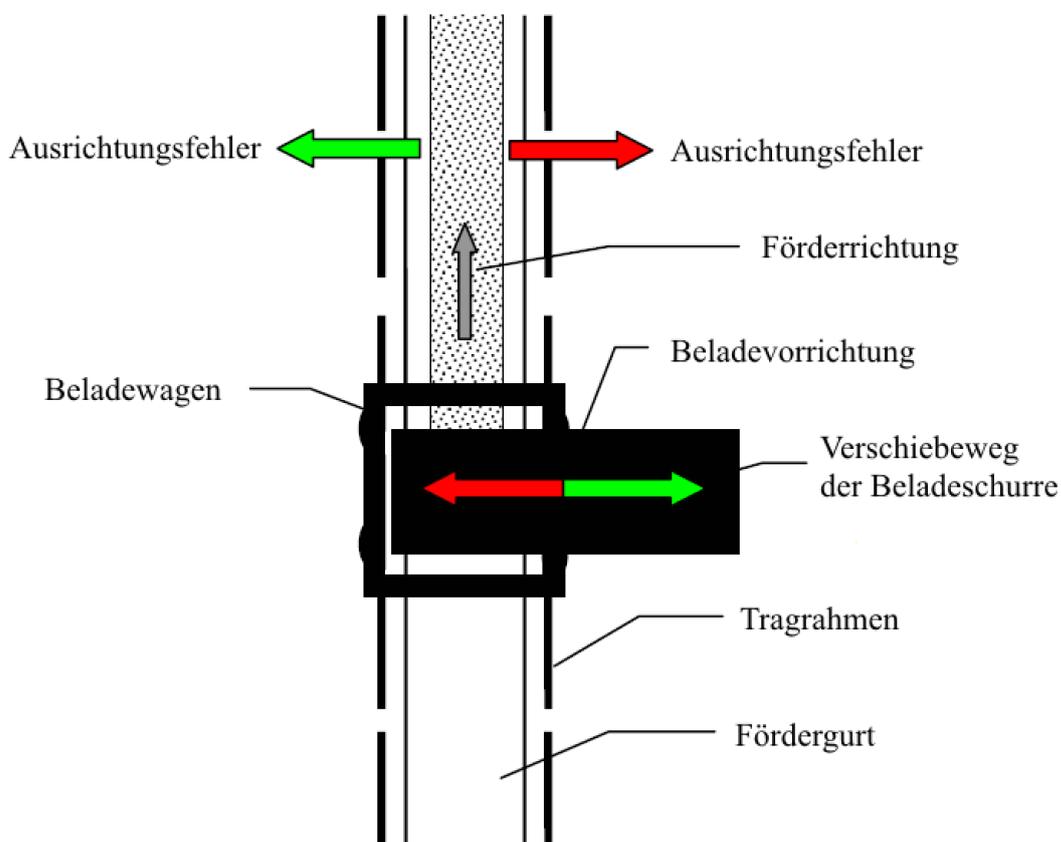
Aufbauend auf den Erfahrungen bei der Analyse unterschiedlicher Feuchtegehalte in Kraftwerksaschen, oder der Hot-Spot Detektion, wurde das Verfahren auf die Analyse verschiedener Bodentypen eines Tagebaus erweitert. Neben der Analyse mittels LWIR-Kamera wurden gleichzeitig AE Daten an verschiedenen Messpunkten erfasst. Um den Materialfluss der verschiedenen Bodenarten optimal erfassen zu können, wurde die LWIR-Kamera mittig über dem Förderband montiert. Die AE-Messpunkte wurden an den Stellen installiert, an denen der Materialfluss einen freien Fall absolviert und auf ein Prallblech trifft, wie an Bandübergabepunkten. Anhand eines Messprotokolls wurden die Bodenarten eindeutig bestimmt und definierten Zeiträumen zugeordnet. Durch die Kombination verschiedener Kennwerte mittels der Methoden des Machine Learnings konnten auf Basis von Trainingsdaten Vorhersagen bezüglich der geförderten Bodentypen, sowohl auf Basis von IR- (vgl. [9]) als auch von AE-Daten, entwickelt werden. Die Genauigkeit der Vorhersagemodelle lag in dieser ersten Machbarkeitsstudie bei über 85 %. Eine zukünftige Kombination der Analysen beider Sensorsysteme wird die Wahrscheinlichkeit der korrekten Zuordnung einzelner Bodentypen weiter erhöhen.

Nach dem gleichen Prinzip wurde ein Versuch innerhalb eines Kalksteinbruchs zur Detektion von flinthaligen und -freien Materialströmen realisiert. Insgesamt wurden vier AE-Messstellen und eine IR-Messstelle innerhalb der Förderanlage installiert. Dazu wurde eine LWIR-Kamera oberhalb eines Förderbandes installiert. Die AE-Sensoren wurden an verschiedenen Bandübergabestellen angebracht. Durch die Auswertung der generierten Daten sowie die anschließende Entwicklung von Trainings- und Vorhersagemodellen konnte je nach Klassifikationsmodell eine Genauigkeit von mehr als 90 % erreicht werden. [3]

## 3.2 Beladungsautomatisierung und Bandschieflauferkennung

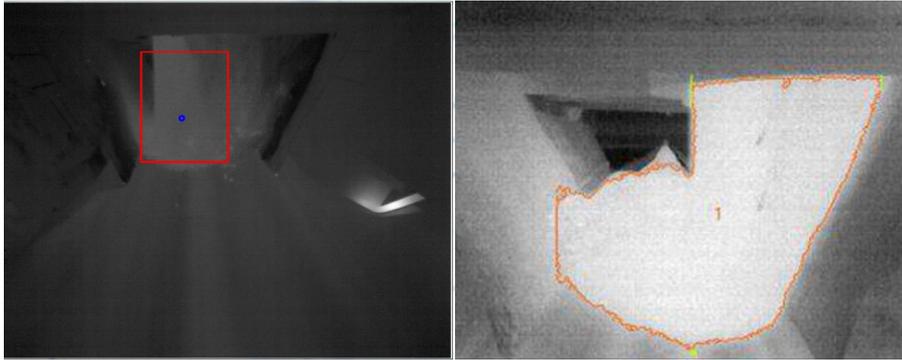
Gurtt Förderer, auch Bandförderer genannt, werden häufig für den Massentransport sowohl im Tagebau als auch im Untertagebau eingesetzt. Die Gesamtlänge aller Gurtt Förderer in einem Tagebau kann mehrere Kilometer betragen. Sie sind aufgrund ihrer strategischen Position für den Massentransport direkt hinter der Bergbauausrüstung unverzichtbar für den Betrieb. Kommt eine Förderanlage zum Stillstand, steht in der Regel auch die vorgelagerte Gewinnungsanlage still und damit möglicherweise auch die Gewinnung des Wertminerals. Aus diesem Grund wurde am AMT im Rahmen eines F&E-Auftrages ein LWIR-kamerabasiertes System zur Überwachung von Bandanlagen entwickelt. [7]

Bild 4 zeigt schematisch die Aufgabenstellung. Bei der mobilen Bandübergabe wird das gewonnene Material über einen Zwischenladewagen auf das Förderband übergeben. Dabei fällt das Material von oben entlang einer Verloaderutsche auf das Förderband. Die Transportrichtung des Förderbandes ist in Bild 4 von unten nach oben. Die Verladeschurre hat mehrere Freiheitsgrade relativ zum Band und kann daher nach rechts und links verschoben und in ihrem Winkel verändert werden. Dadurch kann beispielsweise die Beladeposition optimiert werden. Das Material sollte möglichst mittig auf den Gurtförderer geladen werden, da eine ungleichmäßige Beladung zu einem Ausrichtungsfehler des Gurtes im Gurtförderer führen kann. Eine Fehlausrichtung führt zu erhöhtem Verschleiß und bei extremer Schiefelage des Gurtes zu Schäden an den Gurtkanten und den Gerüsten. [5] [7]



**Bild 4:** Schematische Darstellung der Bandbeladung [5]

Für die Lösung dieser Aufgabenstellung wurden an der mobilen Bandübergabe drei LWIR-Kameras installiert. Eine Kamera nimmt Infrarotbilder von der eigentlichen Materialübergabe im Bereich der Schurre auf (vgl. Bild 5). Durch Auswertung des LWIR-Bildes kann auf den Beladungsquerschnitt geschlossen und dadurch die Position der Materialaufgabe bestimmt werden. [5]



**Bild 5:** Auswertung des LWIR-Bildes  
Beladungsposition (links) und Flächenschwerpunkt (rechts)

Die beiden anderen LWIR-Kameras wurden vor und hinter der Bandübergabestelle, oberhalb des Bandes, mit Blick auf das einlaufende und auslaufende Band installiert. Bild 6 zeigt ein Beispiel für ein Bild des auslaufenden Bandes. Diese Bilder dienen zur Bestimmung der Bandposition, d. h. zur Detektion eines möglichen Bandschieflaufs, sowohl vor als auch hinter der Verladeschurre. [5]



**Bild 6:** Bild des beladenen Fördergurtes [5]

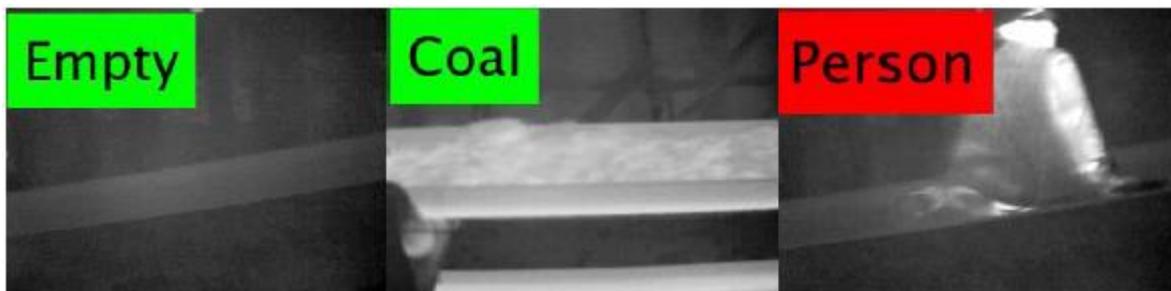
Die Bandposition kann ebenfalls über Bildverarbeitungsalgorithmen ermittelt werden. Dazu wird auf beiden Seiten des Förderbandes, über verschiedene Kantenerkennungsalgorithmen, die Abweichung von der definierten Sollposition der Bandkante ermittelt. Durch die Kombination aller Informationen kann die Position der Schurre und damit die Materialzufuhr durch den Bediener oder ein Automatisierungssystem optimiert werden. Dieses Überwachungssystem ermöglicht eine Erhöhung der Verfügbarkeit bei gleichzeitiger Verschleißreduzierung und damit einhergehend eine Kostenreduzierung. [7]

### 3.3 Erhöhung der Sicherheit durch automatisierte Personenerkennung unter Tage

Basierend auf den in vorherigen Projekten gesammelten Erfahrungen und der einzigartigen Eigenschaften der Infrarotthermographie, war das AMT an der Durchführung eines Projektes beteiligt, in dem die Personenerkennung auf einem Förderband, in der Steinkohle, entwickelt werden sollte.

Die Umsetzung umfasste die Vorverarbeitung mit standardisierten und spezifisch entwickelten Algorithmen unter Laborbedingungen sowie die Messungen unter Bergbau- bzw. Realbedingungen. Zur Entwicklung des Personenerkennungssystems wurde eine Datenbank mit verschiedenen Bildkategorien erstellt. Für jede Bildkategorie wurde ein zusammenfassender, beschreibender Merkmalsvektor konfiguriert, mit dem Ziel, Personen auf einem laufenden Förderband zu erkennen. Die generierten Ergebnisse zur Unterscheidung zwischen Personen und Kohle auf dem laufenden Förderband sowie einem leeren Förderband, ermöglichen eine Personendetektion. [10]

Bild 7 zeigt das Ergebnis des Projektes. Die Unterscheidung zwischen einem leeren Band (links), einem mit Kohle beladenen Band (Mitte) und einer Person auf dem Band (rechts) war erfolgreich. Bei der Erkennung der Personen wurden alle theoretisch möglich einnehmbaren Positionen der Person berücksichtigt. So können schwere Unfälle bei Verpassen des Ausstiegs vermieden werden. Somit trägt das System nicht nur zur Prozessautomatisierung bei, sondern auch zur Erhöhung der Sicherheit.



**Bild 7:** Ergebnis der Personenerkennung [10]

## Zusammenfassung

Der Bergbau wird in der Bevölkerung oft mit einer staubigen, schmutzigen, dunklen und gefährlichen Arbeitsumgebung in Verbindung gebracht. Diese Vermutung liegt auch nicht fern, da Bergleute oft unter schwierigsten Bedingungen arbeiten. Um die Sicherheit und Produktivität eines Bergbaubetriebs bei diesen Bedingungen zu erhöhen, ist die Digitalisierung und Automatisierung bestimmter Prozesse von großer Bedeutung. Aufgrund der Unsicherheit und Unvollständigkeit von Informationen, die für die Prozessautomatisierung notwendig sind, steht die Automatisierung im Bergbau vor einer Vielzahl von Herausforderungen. Eine Herausforderung ist es, die Erfahrung der Bediener und Laboruntersuchungen mit einer Technologie zu vereinen und abzubilden.

Die Infrarotthermographie deckt durch ihre Vorteile, wie die wellenlängenbedingte Unempfindlichkeit gegenüber Partikeln in der Luft, die Unabhängigkeit von externen Lichtquellen, ihre Robustheit und die Möglichkeit, passiv zu messen, ein Spektrum für Lösungsansätze ab, um diesen Herausforderungen zu begegnen.

Aus den aufgezeichneten Rohdaten werden mittels Bildverarbeitung die wichtigsten Informationen extrahiert. So werden z. B. bei der Beladeautomatisierung und der Bandschieflauferkennung geometrische Informationen verarbeitet, um den Beladequerschnitt und den Bandschieflauf zu berechnen. Bei der Bestimmung des Feuchtegrades, der Materialcharakterisierung, der Hot-Spot Detektion und der Personenerkennung basiert die Auswertung auf einer Kombination aus unterschiedlichen Strahlungsintensitäten und geometrischen Informationen.

Durch die bisher erfolgreich absolvierten Projekte ist die Infrarotthermographie in der Lage, einen Beitrag zu Digitalisierungs- und Automatisierungslösungen von Prozessen zu leisten.

**Quellenverzeichnis:**

- [1] Baltes, R.: Einsatzmöglichkeiten von langwelligen Infrarotkameras in rauen Umgebungsbedingungen. Thermographie-Kolloquium 2015
- [2] Eichtopf, B.; Wendel, T.; Baltes, R.; Nienhaus, K.: Applikationsbeispiele von LWIR Kameras zur Prozessüberwachung und Automatisierung. Tagungsband AKIDA 2016, S. 27 – 36, Aachen, 2016
- [3] Wendel, T.; Vraetz, T.; Baltes, R.; Nienhaus, K.; Clausen, E.: Inline-Analysen von Stoffströmen mittels Machine Learning in der Rohstoffindustrie. Georesources (ISSN: 2364-8414), 2019. S. 51 - 56
- [4] Vollmer, M.; Möllmann, K.: Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2013
- [5] Nienhaus, K.; Warcholik, M.; Büschgens, C.; Müller, D.: Belt Positioning and Skewing Revention in Lignite Mining Using Long-Wavelength Infrared Cameras. 12th International Symposium on Continuous Surface Mining (ISCSM), Aachen, 2014
- [6] Schuster, N.; Kolobrodov, V. G.: Infrarotthermographie. Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [7] Bartnitzki, T.: Forschung für den Bergbau 4.0. Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015. S. 234 – 240
- [8] Nienhaus, K.; Pretz, T.; Wotruba, H.: Sensor Technologies: Impulses for the Raw Materials Industry. Shaker, Aachen, 2014
- [9] Wendel, T.: Stoffstromanalyse zweier Mischböden unter Zuhilfenahme von Infrarotthermographie. Masterarbeit an der RWTH Aachen University, Aachen, 2017
- [10] Uth, F.; Polnik, B.; Kurpiel, W.; Kriegsch, P.; Baltes, R.; Clausen, E.: An innovative person detection system based on thermal imaging cameras dedicate for underground belt conveyors. Mining Science (ISSN 2300-9586), Vol. 26, 2019. S. 263 – 276

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### **Evaluierung von geeigneten Grenzwerten für die axiale Verschiebbarkeit (Axialspiel) bei Tragrollen ab einer Lagergröße von 6308 und Vorstellung eines neuartigen Axialspielprüfgerätes**

Robert Schneider

Sylvio Simon

Thomas Rieder

Tim Fritsch

Stephan Herschier

Jan Magister



Robert Schneider, M. Eng. (Referent)

Prof. Dr.-Ing. habil. Sylvio Simon

Thomas Rieder, M. Eng.

Tim Fritsch, M. Eng.

Stephan Herschier, M. Eng.

Jan Magister, M. Eng.

BTU Cottbus-Senftenberg

Universitätsplatz 1

01968 Senftenberg



# **Evaluierung von geeigneten Grenzwerten für die axiale Verschiebbarkeit (Axialspiel) bei Tragrollen ab einer Lagergröße von 6308 und Vorstellung eines neuartigen Axialspielprüfgerätes**

*Umfassende Untersuchungen von Lagerausfällen bei Tragrollen mit einer Lagergröße ab über 6306 ergaben zu geringe Werte für das Axialspiel, welche sich als Schadensursache herausstellten. Da in der DIN 22112 Teil 2 lediglich Grenzwerte für die axiale Verschiebbarkeit für Tragrollen bis zu einer Lagergröße 6306 aufgeführt werden, war eine Bewertung von Tragrollen mit größeren Lagern im Sinne der Qualitätskontrolle bisher nicht möglich.*

*Ausgehend von den Schadensbildern werden die theoretischen Zusammenhänge in Bezug auf den Lagerverschleiß erörtert. In Zusammenhang mit den wirkenden Belastungen auf die Tragrollen werden geeignete Grenzwerte für die axiale Verschiebbarkeit ausgearbeitet, welche die LEAG (Lausitz Energie Bergbau AG) in die aktuellen Lieferanforderungen für Tragrollen aufnahm. Weiterhin wird ein Axialspielprüfgerät vorgestellt, welches im Vergleich zu der vorgestellten Messeinrichtung aus der DIN 22112 Teil 3 präzisere Messergebnisse unabhängig von dem Achsgewicht der jeweiligen Tragrollen liefert.*

## **1 Einleitung**

Gurtt Förderanlagen zählen zu den Stetigförderern und sind geeignet, das Fördergut auch über lange Strecken mit einer hohen Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit zu transportieren. Dabei arbeiten sie äußerst ökonomisch und sind aufgrund ihres geringen Energiebedarfs sehr umweltfreundlich. Ein wichtiges Bauelement des Gurtt Förderers stellt neben dem eigentlichen Fördergurt die Tragrolle dar, welche in Girlanden- oder Stationenanordnung meist zu mehreren tausend Stück in einem Förderer verbaut wird. Sie hat die Aufgabe, den Fördergurt und das Schüttgut zu stützen und zu lenken und soll dabei möglichst langlebig, zuverlässig und geräuscharm arbeiten sowie geringe Kosten in der Beschaffung und Instandhaltung aufweisen. Eigenschaften, welche sich auf den ersten Blick widersprechen, die sich jedoch bei einer konsequenten Anlagenplanung, beginnend bei der Beschaffung und Prüfung der Komponenten bis zur zustandsbezogenen Instandhaltung über den gesamten Einsatzzeitraum des Gurtt Förderers erfolgreich realisieren lassen.

Mit den Untersuchungen an der BTU Cottbus-Senftenberg werden dabei alle Aspekte abgedeckt. Über Laborprüfungen am Tragrollenprüfstand werden die Qualitätskriterien von Tragrollen im Zuge von Präqualifikationen und Wareneingangsprüfungen ermittelt. So lässt sich gewährleisten, dass die ausgerüstete Gurtt Förderanlage im Betrieb mit geringen Geräuschemissionen und Bewegungswiderständen zuverlässig arbeitet. Die neuesten Untersuchungen zum Axialspiel der Tragrollen und dessen Überprüfung lassen Rückschlüsse auf das spätere Laufverhalten der Tragrollen und den Verschleiß der verbauten Wälzlager zu.

## **2 Ausfallursachen von Tragrollen und Schadensbilder**

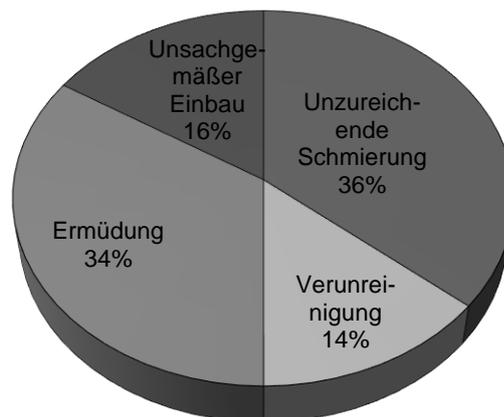
Der häufigste Grund für einen Austausch von Obertrumtragrollen lässt sich auf defekte Wälzlager zurückführen – die eigentliche Ausfallursache liegt jedoch meist nicht im Lager

selbst, sondern an äußeren Faktoren, welche im Folgenden näher beleuchtet werden. Schäden im Bereich des Tragrollenmantels oder der Achse, wie sie durch Überlastung oder Ermüdung entstehen, treten im Vergleich wesentlich seltener auf. Auch hier sind verschiedene Einflüsse ausschlaggebend wie beispielsweise das Zusammenspiel von Mantelgeometrie und Fördergurt, welche an dieser Stelle allerdings nicht weiter behandelt werden sollen.

Hauptsächlich werden in Tragrollen Rillenkugellager eingesetzt. Diese bestehen aus einem Innen- und Außenring mit rillenförmigen Laufbahnen und Kugeln als Wälzkörper. Durch diesen Aufbau ergibt sich eine enge Schmiegun g zwischen den Laufrillen und den Kugeln, was die Aufnahme von Radiallasten aber auch von axialen Kräften in beide Richtungen ermöglicht. Weiterhin sind sie im Betrieb unempfindlich, wartungsfreundlich, kostengünstig und besitzen einen vergleichsweise geringen Schmierstoffbedarf. Diese Eigenschaften prädestinieren sie für den Einsatz in Tragrollen, die in der Regel vom Betreiber nicht gewartet und vom Hersteller mit einer Lebensdauer-Fettschmierung versehen werden. Das raue Einsatzumfeld, dynamische Kräfte und ein Minimum an Zustandsüberwachung stellen weitere besondere Anforderungen an den Aufbau der Tragrollen und insbesondere an die Abdichtsysteme für die Wälzlager.



**Bild 1:** Verschmutztes und durch Korrosion geschädigtes Wälzlager durch Abdichtungsversagen



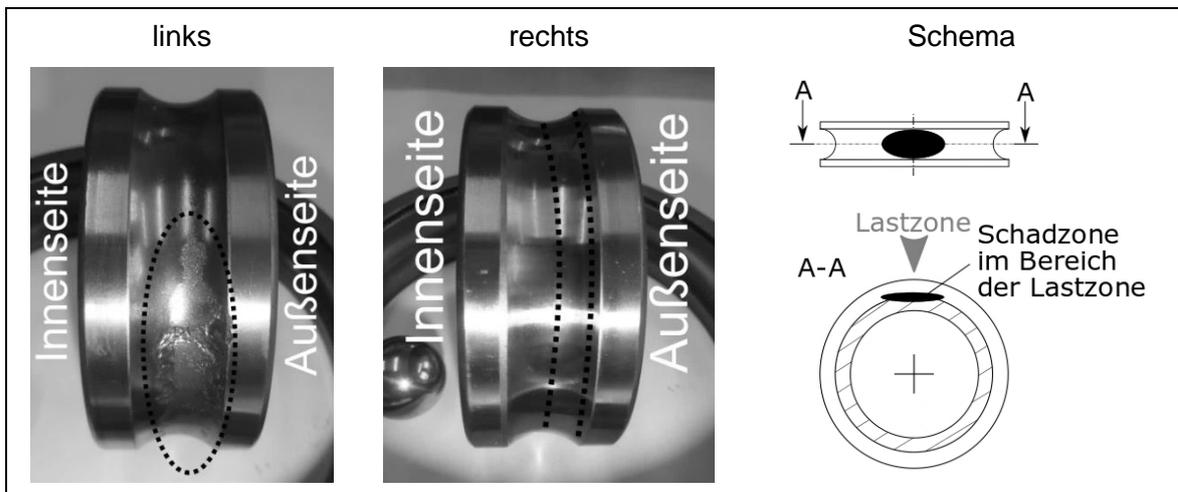
**Bild 2:** Allgemeine Ausfallursache von Wälzlagern nach [1]

Aus einer Statistik über die Ausfallursachen von Wälzlagern, welche durch die SKF GmbH erstellt wurde, geht hervor, dass die Hälfte der Ausfälle auf unzureichende Schmierung oder Verunreinigungen zurückzuführen ist (Bilder 1 und 2). Diese allgemeine Statistik muss jedoch in Hinblick auf die Wälzlager in Tragrollen gesondert betrachtet und interpretiert werden. So können beispielsweise eine unzureichende Schmierung und Verunreinigungen im Lager unter Umständen auf eine Fehlfunktion des Abdichtungssystems zurückzuführen sein, welches die Lager nicht nur nach außen und innen vor eindringenden Fremdpartikeln und Feuchtigkeit schützt, sondern auch ein Verlust von Schmierstoff verhindern soll.

In stetiger Entwicklung haben die Tragrollenhersteller ihre Abdichtsysteme immer weiter verbessert und geben mittlerweile Standzeiten von bis zu 10 Jahren an. [2] Langzeituntersuchungen in den Tagebauen der LEAG belegen die Langlebigkeit und Vorteile von Tragrollen mit einem derartigen Dichtungssystem. [3] Ermüdungsschäden

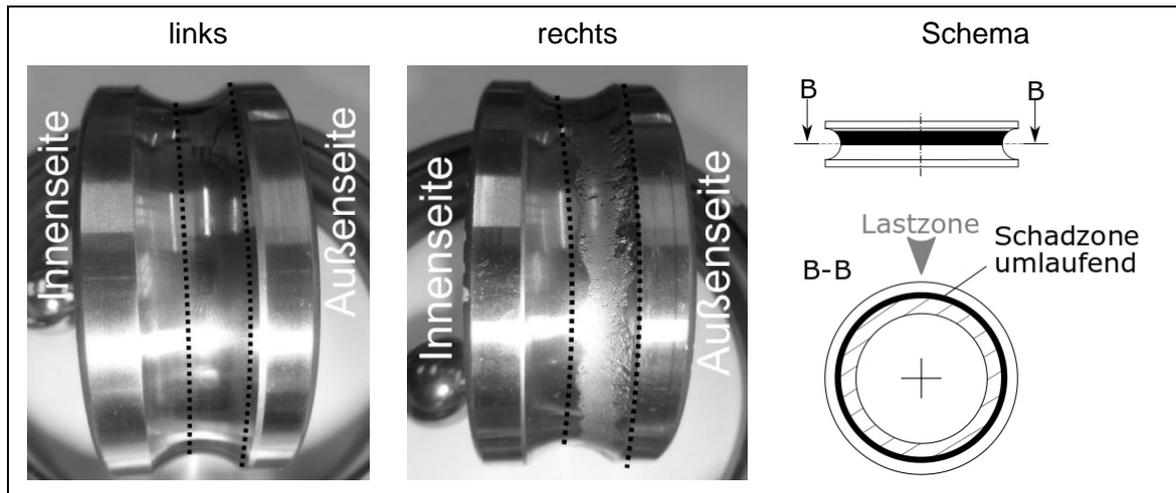
durch Pittingbildung an den Laufflächen der Wälzlagerringe und –kugeln stellt eine weitere entscheidende Ausfallursache für Tragrollen dar. Neben dem normalen Verschleiß können dafür auch eine Überlastung der Wälzlager bzw. eine Unterdimensionierung verantwortlich sein. Die Untersuchungen an Tragrollenlagern an der BTU Cottbus-Senftenberg lassen jedoch den Schluss zu, dass auch ungünstig gewählte Konstruktionen und eine mangelhafte Montage der Wälzlager zu einem beschleunigten Verschleiß und damit zu einer vorzeitigen Ermüdung führen können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen im Folgenden erläutert werden.

An einem Gurtförderer der LEAG kam es nach einer kurzen Einsatzzeit von weniger als zwei Jahren zu deutlich erhöhten Laufgeräuschen, wobei die Ursache im Bereich der Wälzlager zuzuordnen war. Die projektierte mittlere Einsatzzeit der Tragrollen in dieser Gurtförderanlage beträgt sechs bis sieben Jahre. Untersuchungen von mehr als 180 Rückbaurollen aus dieser Gurtförderanlage haben ergeben, dass ein unsachgemäßer Einbau im Sinne von vermindertem Betriebsspiel und zueinander verschobenen Laufbahnen von Innen- und Außenring zu einem stark beschleunigten Verschleiß und Ermüdungsschäden geführt haben. Die entstandenen Pittingschäden äußerten sich in gesteigerten Körperschallwerten, welche zu einer Anregung des Tragrollenmantels führten, wodurch die Laufgeräusche der Tragrollen enorm anstiegen. Durch eine Zerlegung der betroffenen Tragrollen konnte oft eine axial verschobene Laufbahn auf den Ringen festgestellt werden (Bild 3).



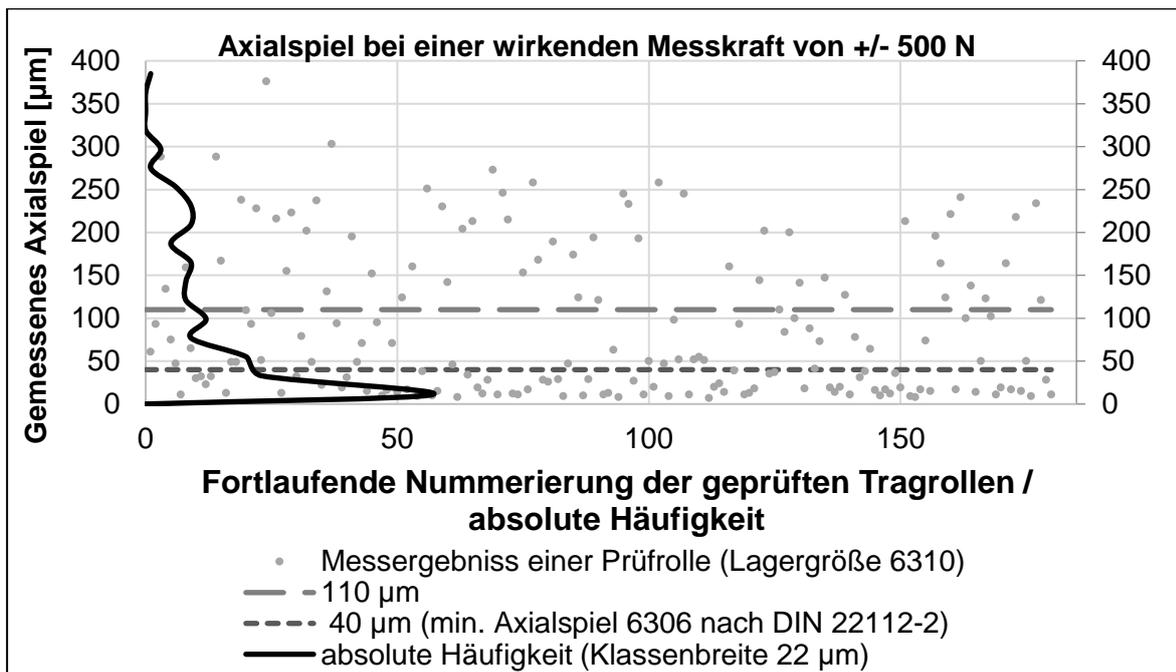
**Bild 3:** Innenringe des linken und rechten Wälzlagers von Tragrolle #1931, auf der linken Seite mit lokal begrenztem Pitting im Bereich der Lastzone, beide Laufbahnen sind leicht nach außen verschoben

Einige Wälzlager wiesen sogar umlaufende Pittingschäden am gesamten Umfang der Innenringe auf, welche völlig untypisch sind, da die Ringe nur punktuell im Bereich der Lastzone belastet werden. Dies spricht dafür, dass die Rillenkugellager sehr hohen axialen Kräften ausgesetzt waren, welche sich ebenfalls durch Verschiebung der Innenringlaufbahnen nach außen bemerkbar machen, aber nicht allein durch die Belastung der Tragrolle im Betrieb hervorgerufen werden können. Durch die axiale Verschiebung bzw. Verspannung der Wälzlagerringe befanden sich alle Wälzkörper permanent im Eingriff und erzeugten ein derartiges Verschleißbild (Bild 4).



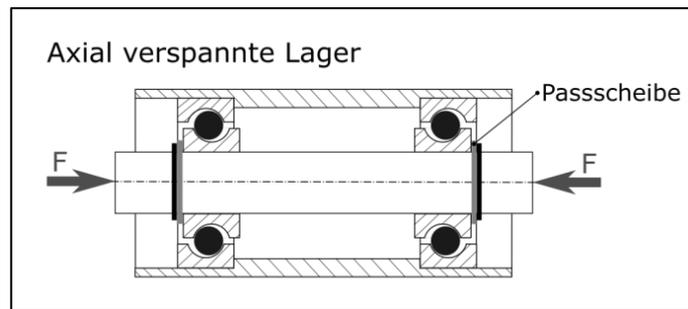
**Bild 4:** Innenringe des linken und rechten Wälzlagers von Tragrolle #1937, auf der rechten Seite mit umlaufendem Pittingschaden, beide Laufbahnen sind stark nach außen verschoben

Eine Überprüfung der axialen Verschiebbarkeit der Tragrollenachse gegenüber dem -mantel hat bei den 180 zurückgebauten Tragrollen mit einer Lagergröße 6310 sehr geringe Axialspielwerte ergeben. 79 dieser Rollen wiesen Werte auf, welche noch unterhalb der Grenzwerte für Tragrollen mit einer Lagergröße von 6306 nach DIN 22112-2 von 40  $\mu\text{m}$  lagen.



**Bild 5:** Ergebnis der Messung des Axialspiels an 180 Tragrollen mit einer Lagergröße von 6310 aus einer Gurtförderanlage

Ursache für die axial verspannten Wälzlager der demontierten Tragrollen waren falsch dimensionierte Passscheiben zwischen den Innenringen und den zur axialen Befestigung verwendeten Sicherungsringen.



**Bild 6:** Axial verspannte Wälzlager an einer Tragrolle aufgrund zu starker Passscheiben; Ergebnis von Demontagen an Rückbaurollen aus einer Gurtförderanlage

Dieser Fehler wäre durch eine Prüfung der axialen Verschiebbarkeit der Tragrollenachse gegenüber dem Tragrollenmantel mit einem geeigneten Messsystem und den Vergleich mit anwendbaren Grenzwerten vermeidbar gewesen. Für die verwendete Wälzlagergröße 6310 sieht die DIN 22112-2 [4] jedoch keine geeigneten Grenzwerte für die axiale Verschiebbarkeit vor, da in ihr lediglich Tragrollen für den Untertageeinsatz bis zu einer Lagergröße von 6306 behandelt werden.

### 3 Evaluierung von Grenzwerten für die axiale Verschiebbarkeit von Tragrollen ab einer Lagergröße über 6306

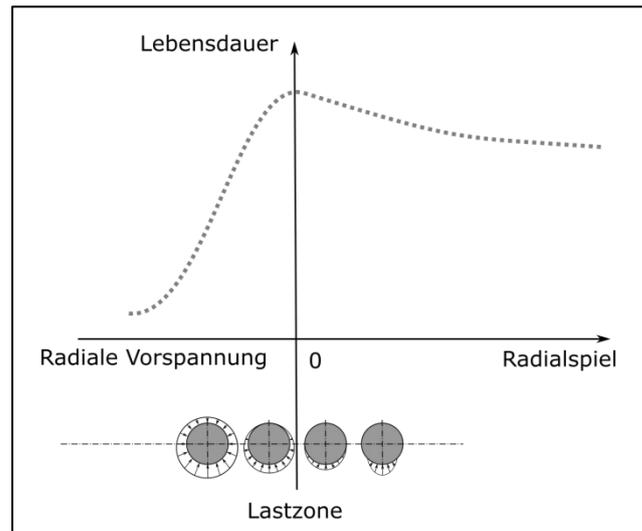
#### 3.1 Zusammenhang von Axialspiel und Radialspiel

Beim Betrieb von Wälzlagern kommt es konstruktionsbedingt zu Kontakten zwischen den Wälzkörpern und Lagerringen. Abgesehen von Schäden aufgrund von unzureichender oder mangelhafter Schmierung führt dieser Effekt zu Ermüdungserscheinungen, welche sich in Form von Abschälungen der Lagerbahnen äußern und eine normale Verschleißerscheinung darstellen. Unterschieden wird dabei zwischen Tiefen- und Oberflächenabschälungen. Der Ursprung der Tiefenabschälung kann entweder an der Oberfläche oder in der Tiefe liegen. Der Materialermüdung liegen dabei hohe spezifische Belastungen zugrunde, welche als direkte Druckbeanspruchung an der Oberfläche bis zu  $3500 \text{ N/mm}^2$  und als Scherbeanspruchung in der Unterschicht bis zu  $1000 \text{ N/mm}^2$  betragen können. [5, S. 56]

Aufbaubedingt werden die resultierenden Spannungen im Wälzlager durch die Anzahl der sich im Eingriff befindlichen Wälzkörper bestimmt. Bei Radiallagern ist diese wiederum abhängig vom vorherrschenden Radialspiel. In der Wälzlagertechnik wird prinzipiell zwischen den Begrifflichkeiten Lagerluft und Betriebsspiel unterschieden. Die Lagerluft (bspw. Lagerluftklasse C3) beschreibt dabei die Verschiebbarkeit des ursprünglichen Wälzlagers ohne das Einwirken äußerer Kräfte wie sie aus Passungen oder Einspannungen resultieren. Das Betriebsspiel berücksichtigt alle Einflüsse auf das Lager im eingebauten Zustand unter Betriebsbedingungen wie Passungsübermaße, Temperaturdehnungen und ähnlichem.

Im Grenzfall, wenn das Radialspiel kleiner oder gleich Null ist (Lager vorgespannt), befinden

sich alle Kugeln gleichzeitig im Eingriff. Wenn das Radialspiel größer Null ist, kann es im Extremfall dazu führen, dass nur eine Kugel im Eingriff ist und die Kraft überträgt (Bild 7).

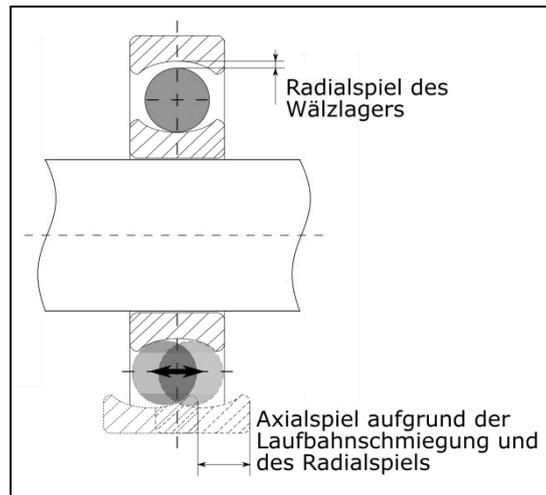


**Bild 7:** Auswirkungen des Radialspiels auf die Lagerlebensdauer und die Ausprägung der Lastzone (vergleiche [5], S. 81)

Das Radialspiel wirkt sich somit auf die Ausprägung der Lastzone und damit auf die entstehenden Spannungen aus. Die Festlegung der dynamischen Tragzahl eines Wälzlagers geschieht unter der Prämisse, dass das Betriebsspiel gleich Null ist und somit die Hälfte der Wälzkörper belastet wird. Eine Erhöhung des Betriebsspiels führt somit in der Theorie immer zu einer verringerten Lebensdauer. Ähnlich verhält es sich mit einer zu hohen Vorspannung, welche dazu führt, dass neben den eigentlichen Betriebslasten noch die Vorspannkräfte aufgenommen werden müssen.

Prinzipiell wirkt sich eine Vorspannung kritischer auf die Lebensdauer aus als das Lagerspiel. [5, S. 81] Eine zu hohe Vorspannung wirkt sich nachteilig auf die Ausbildung eines ausreichenden Schmierfilms zwischen den Kontaktstellen aus, was schlimmstenfalls zur Festkörperreibung führt. Im Schmierstoff vorhandene Verunreinigungen wirken sich unter diesen Voraussetzungen schädlicher auf die Lebensdauer aus, als wenn ein ausreichender Schmierfilm gewährleistet werden kann.

Bauartbedingt besteht bei Rillenkugellagern ein direkter Zusammenhang zwischen dem Radialspiel und der axialen Verschiebbarkeit zwischen dem Innen- und Außenring (Bild 8). Das Verhältnis zwischen Radial- und Axialspiel ist dabei von der Ausführung und Schmiegun der Laufbahnen abhängig und variiert somit zwischen den unterschiedlichen Wälzlagerherstellern geringfügig.



**Bild 8:** Zusammenhang zwischen Radialspiel und Axialspiel bei einem Rillenkugellager

Bei den in diesem Bericht behandelten Wälzlagergrößen 6308, 6310 und 6312 stellt sich beim Betrieb in Tragrollen in Abhängigkeit der konstruktiven Ausführungen und Einsatzbedingungen ein radiales Betriebsspiel von ungefähr 40 bis 50  $\mu\text{m}$  ein. Das sich daraus ergebende Axialspiel kann dadurch etwa 350 bis 450  $\mu\text{m}$  betragen. Ohne die Werte im Detail zu betrachten, ergibt sich der Schluss, dass das Axialspiel bzw. die axiale Verschiebbarkeit eine Größenordnung höher ist als das Radialspiel, wodurch sich die Axialspielwerte messtechnisch deutlich besser erfassen und überprüfen lassen.

### 3.2 Ermittlung von fertigungs- und prüfrelevanten Grenzwerten für die axiale Verschiebbarkeit

Ausgehend vom Spiel der in der Tragrolle verbauten Wälzlager reduziert sich deren Betriebsspiel unter den gegebenen Einsatzbedingungen weiter. Entscheidende Einflüsse dafür liegen hier in der Verformung aufgrund der Betriebslasten und in Temperaturunterschieden zwischen Innen- und Außenring bzw. zwischen Tragrollenmantel und –achse. Unter Beachtung dieser Einflüsse lassen sich die Grenzwerte für das minimal erforderliche Axialspiel der Tragrollen mit den Lagergrößen 6308, 6310 und 6312 unter Prüfbedingungen ermitteln. Während des Betriebs der Tragrollen unter Auflast stellt sich eine geringe Temperaturerhöhung der inneren Bauteile gegenüber den äußeren um etwa sieben Kelvin ein. [6] Der Wälzlagerinnenring dehnt sich dadurch etwas mehr als der Außenring, was zu einer Verringerung des radialen Lagerspiels führt. Darüber hinaus sorgt die größere Längendehnung der Tragrollenachse gegenüber dem –mantel zu einer Verringerung des Axialspiels.

Für die Ermittlung der Längendehnung  $\Delta l$  wird unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , des Temperaturdehnungskoeffizienten  $\alpha$  und der Ausgangslänge  $l_0$  folgende Gleichung verwendet:

$$\Delta l = \Delta T \cdot \alpha \cdot l_0 \quad (1)$$

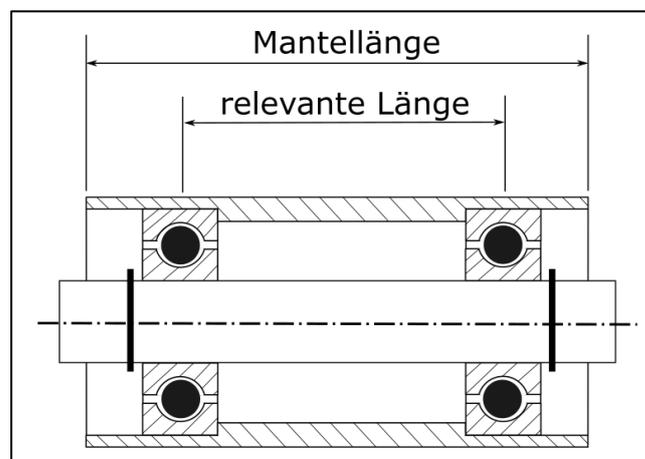
Die Berechnung für die jeweiligen Lagergrößen erfolgt unter Bezug auf den Achsdurchmesser und die maximale Mantellänge der jeweiligen Tragrollentypen (Tabelle 1).

**Tabelle 1:** Minderung der radialen Lagerluft aufgrund eines Temperaturunterschiedes zwischen Tragrollenachse und -mantel

Lagertyp	Achsdurchmesser [mm]	Radialluftverminderung [ $\mu\text{m}$ ]
6308	40	3,64
6310	50	4,55
6312	60	5,46

für  $\Delta T = 7 \text{ K}$  und  $\alpha (\text{Stahl}) = 13 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$

Zur Vereinfachung und da nicht alle Tragrollenausführungen verschiedener Hersteller berücksichtigt werden können, werden für  $l_0$  die Mantellängen der jeweiligen Tragrollentypen angesetzt. Die errechneten Werte fallen demnach tendenziell etwas zu hoch aus (Bild 9).

**Bild 9:** Unterschied zwischen der Mantellänge und der eigentlich für die Berechnung relevanten Länge

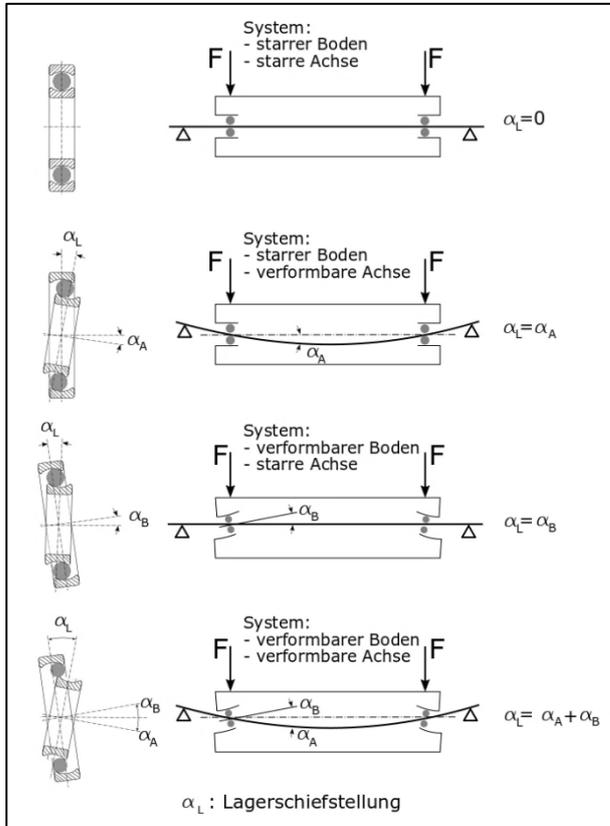
Je nach Ausgangszustand der Tragrolle kann eine temperaturbedingte Längung der Achse auch zu einer Erhöhung des Axialspiels führen. Das ist beispielsweise dann der Fall, wenn die Innenringe bei der Montage durch Passscheiben nach innen verschoben wurden (vergleiche Bild 6). Falls die Lagerinnenringe nicht durch einen derartigen Formschluss auf der Achse in einer Richtung fixiert werden, besteht die Möglichkeit, dass sie sich axial verschieben können (Tabelle 2). Dies ist abhängig vom vorherrschenden Übermaß an der Passung und den auftretenden Axialkräften.

**Tabelle 2:** Minderung der axialen Lagerluft aufgrund einer temperaturbedingten Achslängung gegenüber dem Mantel

Lagertyp	Maximale Mantellänge für Tragrollen mit dem jeweiligen Lagertyp [mm]		Axiale Verschiebung [ $\mu\text{m}$ ]	
	Seitenrolle	Mittelrolle	Seitenrolle	Mittelrolle
6308	850	750	77	68
6310	900	750	82	68
6312	1050	600	96	55

für  $\Delta T = 7 \text{ K}$  und  $\alpha (\text{Stahl}) = 13 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$

Neben den temperaturbedingten Verschiebungen müssen im Wälzlager noch Verformungen aufgrund der Belastungen während des Betriebs aufgenommen werden. Die Auflasten aus Fördergut, -gurt und den Tragrollenbauteilen selbst sorgen für eine Durchbiegung der Tragrollenachse und Deformierung des Lagerhalters (Bilder 10 und 11):



**Bild 10:** Durch die Lagerschiefstellung kann es zu einer Verspannung zwischen Außen- und Innenring kommen (nach [7])

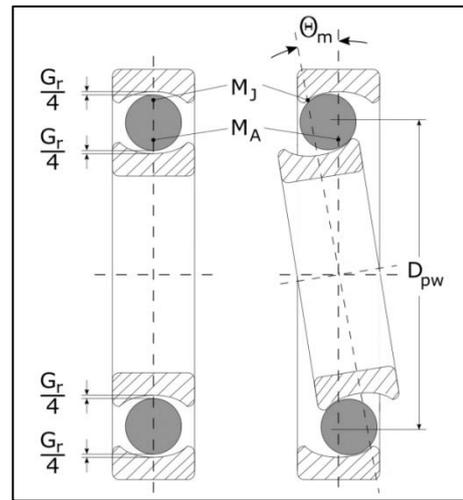
Auf Grundlage real gemessener Tragrollenbelastungen und existierender Bauformen wurde für Mittelrollen eine maximale Lagerschiefstellung von etwa 2,7 Winkelminuten ermittelt. Die Lagerschiefstellung bei Seitenrollen fällt mit 1,8 Winkelminuten trotz der längeren Ausführung geringer aus, da diese im Regelfall weniger Auflast erfahren (Tabelle 3).

Über die Lagerschiefstellung  $\theta_m$  lässt sich unter Verwendung des jeweiligen Teilkreisdurchmessers  $D_{pw}$  der Lagerreihen die Verschiebung in axialer Richtung  $G_a$  ermitteln:

$$G_a = \theta_m \cdot D_{pw} \tag{2}$$

**Tabelle 3:** Errechnete axiale Verschiebung im Wälzlager bei einer Schiefstellung von 2,7' und 1,8'

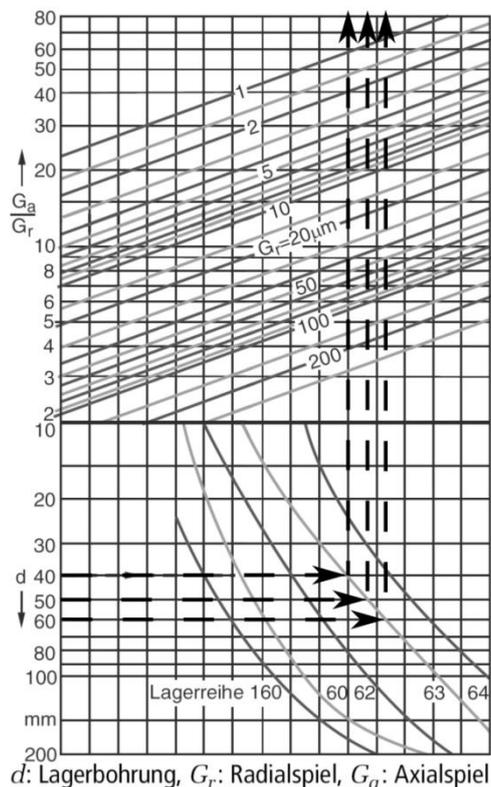
Lagerschiefstellung Lagertyp	2,7' (Mittelrolle) axiale Verschiebung [µm]	1,8' (Seitenrolle) axiale Verschiebung [µm]
6308	51	34
6310	63	42
6312	75	50



**Bild 11:** Mögliche Lagerverkipfung um den Lagermittelpunkt bei ausreichendem Radialspiel nach ([8], S. 143)

Die so ermittelten axialen Verschiebungen aufgrund der Belastung auf die Tragrollen sind nur ein Kompromiss und als Anhaltswerte für die Festlegung der unteren Grenzwerte zu verstehen. Unterstellt wird dabei, dass die Tragrollentypen mit den Wälzlagerarten 6308, 6310 und 6312 entsprechend ihrer Belastung ähnlich ausgelegt sind und eine ähnliche Verformung aufweisen. Eine Berücksichtigung aller Tragrollendimensionierungen und Lastfälle würde eine Vielzahl von unterschiedlichen Grenzwerten ergeben, was in der Anwendung zu kompliziert und nicht praxistauglich wäre - deshalb wird an dieser Stelle auf diesen Kompromiss zurückgegriffen.

Da die Radialluftreduzierung aufgrund der Temperaturdehnung nicht direkt in ein erforderliches Axialspiel umgerechnet werden kann, müssen die Werte anhand des folgenden Diagramms erst umgestellt werden (Bild 12).



**Bild 12:** Zusammenhang zwischen Radial- und Axialluft bei Rillenkugellagern (nach [9], S. 141)

Aus der ermittelten axialen Verschiebung und Wälzlagerluftreduzierung aufgrund der Temperaturunterschiede und der Bauteilverformung werden die unteren Grenzwerte für die axiale Verschiebbarkeit an Tragrollen ermittelt. Diese sind geeignet, um sie für Tragrollen, welche größere Lagerdimensionen als die in der DIN 22112-2 behandelten aufweisen, für die Prüfung der Fertigungs- und Qualitätswerte heranzuziehen.

**Tabelle 4:** Berechnetes Axialspiel aus Lagerschiefstellung sowie axialer und radialer temperaturbedingter Lagerluftverminderung

Lagertyp	Mittelrolle [ $\mu\text{m}$ ]	Seitenrolle [ $\mu\text{m}$ ]
6308	160	
6310	180	
6312	200	210

Die angegebenen Werte für das geringste erforderliche Axialspiel der jeweiligen Tragrollen wurden unter Annahme der ungünstigsten Bedingungen für die Temperaturverhältnisse, Tragrollenabmessungen und stoßartigen Spitzenlasten ermittelt. Für die Angabe als Prüfmaß sind sie deshalb tendenziell zu hoch angesetzt.

Aus diesem Grund wurden in Abstimmung mit der LEAG sowie drei namhaften Herstellern folgende Mindestwerte für die axiale Verschiebbarkeit von Tragrollen in die aktuelle Lieferanforderung der LEAG ([10], S. 9) übernommen (Tabelle 5). Diese liegen ca. 35 % unter den theoretisch errechneten Werten und dienen sowohl den Herstellern bei der Fertigung von Tragrollen sowie auch bei der späteren Qualitätsüberprüfung als Prüfmaß.

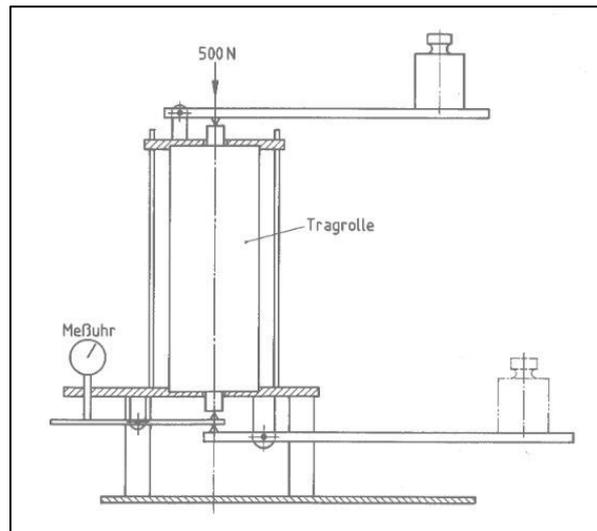
**Tabelle 5:** Mindestwerte der axialen Verschiebbarkeit der sich drehenden gegenüber den feststehenden Tragrollenteilen bei einer wechselseitig wirkenden Kraft von +/- 500 N für Tragrollen mit den Lagergrößen 6308, 6310 und 6312 nach [10]

Lagergröße	minimale axiale Verschiebbarkeit [mm]	maximale axiale Verschiebbarkeit [mm]
6308	0,100	durch Hersteller festzulegen; Axialluftwerte der verwendeten Lagerluftklasse dürfen nicht überschritten werden
6310	0,110	
6312	0,130	
Es darf in keinem Fall zu einem, der axialen Verschiebung geschuldeten, Kontakt der inneren Tragrollenbauteile kommen.		

Entgegen den Vorgaben in der DIN 22112-2 wurde bewusst auf die Angabe von quantitativen maximalen Prüfwerten verzichtet. Durch den Verweis auf die Lagerluftklasse und die Vorgabe von Passungsmaßen an Achse und Lagerhalter ergeben sich für die Tragrollentypen spezifische Werte in der Größenordnung von 0,5 mm. Kommt es zum Überschreiten dieses Wertes ist in den meisten Fällen die Passung am Wälzlagerinnenring lose und der Ring verschiebt sich auf der Achse. Messwerte von deutlich über einem Millimeter bei der Prüfung der Tragrolle wären die Folge und damit unzulässig.

#### 4 Vorstellung des entwickelten Axialspielprüfgeräts und Vergleich mit der Prüfvorrichtung nach DIN 22112-3

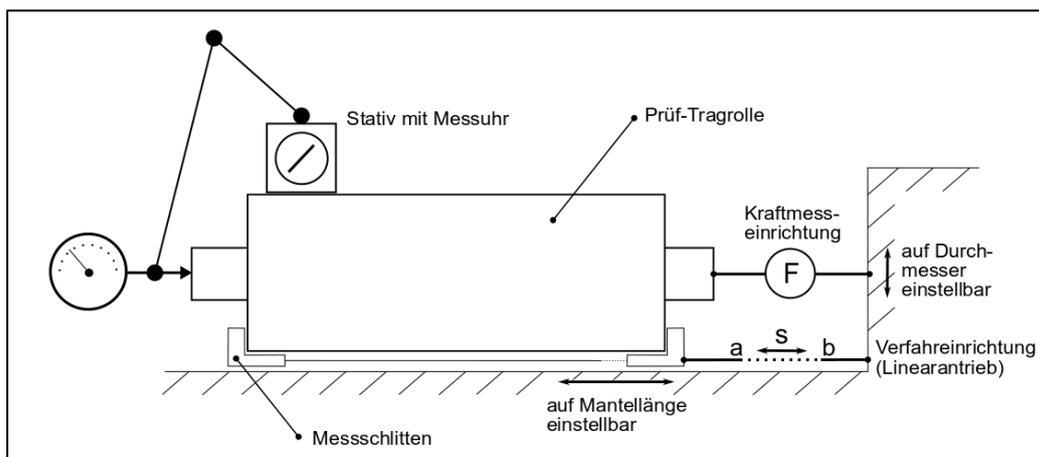
Während der Ausarbeitung geeigneter Grenzwerte für die axiale Verschiebbarkeit bei Tragrollen mit einer Lagergröße von 6308, 6310 und 6312 wurden Nachteile an der Prüfvorrichtung nach DIN 22112-3 [11] festgestellt (Bild 13). Dieser Prüfstand weist einen vertikalen Aufbau auf und ist analog zu den Vorgabewerten aus DIN 22112-2 für die Prüfung von Tragrollen für den Einsatz unter Tage konzipiert und dafür auch durchaus geeignet.



**Bild 13:** Prüfeinrichtung für die axiale Verschiebbarkeit nach DIN 22112-3 [11]

Durch die vertikale Anordnung beeinflusst das Achsgewicht die aufzubringende Prüfkraft dahingehend, dass bei der Verschiebung in die untere Grenzlage die Gesamtkraft zu hoch (Prüfkraft von 500 N zuzüglich Achsgewicht) und bei der Verschiebung in die obere Grenzlage die Gesamtkraft zu gering (Prüfkraft von 500 N abzüglich Achsgewicht) ausfällt. Bei Untertage-Tragrollen beeinflusst dieser Effekt die Messergebnisse kaum, jedoch ist er bei Vorschnitttragrollen mit Gesamtmassen von über 80 kg und Achsmassen von etwa 35 kg nicht mehr zu vernachlässigen.

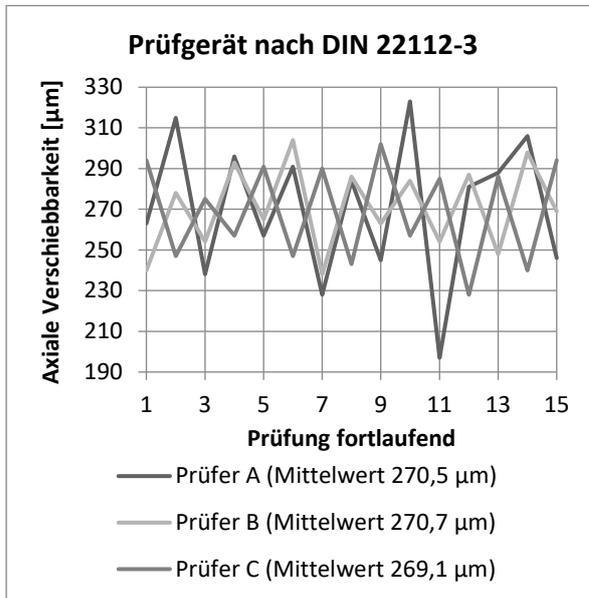
Aus diesem Grund wurde eine neuartige Prüfeinrichtung entwickelt (Bild 14), welche horizontal angeordnet ist und somit unabhängig von der Masse der Prüf-Tragrolle arbeitet. Weiterhin wurde die Krafteinleitung durch Massestücke durch einen Linearantrieb mit Kraftmesseinrichtung ersetzt und damit dem Stand der Technik angepasst. Der Aufbau der neuen Prüfeinrichtung gestattet zudem ein besseres Handling der Prüf-Tragrollen, welche in der Regel horizontal auf Paletten lagern, in die Prüfeinrichtung, wodurch der Prüfablauf deutlich beschleunigt werden konnte.



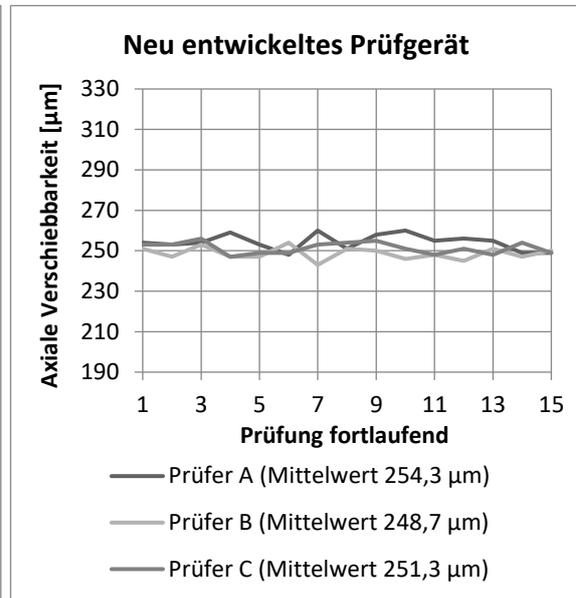
**Bild 14:** Schematischer Aufbau der entwickelten Prüfeinrichtung

Durch die direkte Messung der axialen Verschiebbarkeit zwischen dem Tragrollenmantel und der Tragrollenachse ohne zusätzliche Hilfseinrichtungen werden eventuelle Messfehler durch Gestellverformungen ausgeschlossen. Eine Gegenüberstellung von

Probemessungen an einer Prüf-Tragrolle veranschaulicht die Vorteile des neuen Systems (Bilder 15 und 16):



**Bild 15:** Axiale Verschiebbarkeit der Versuchsrolle mit dem Prüfgerät nach DIN 22112-3 ermittelt

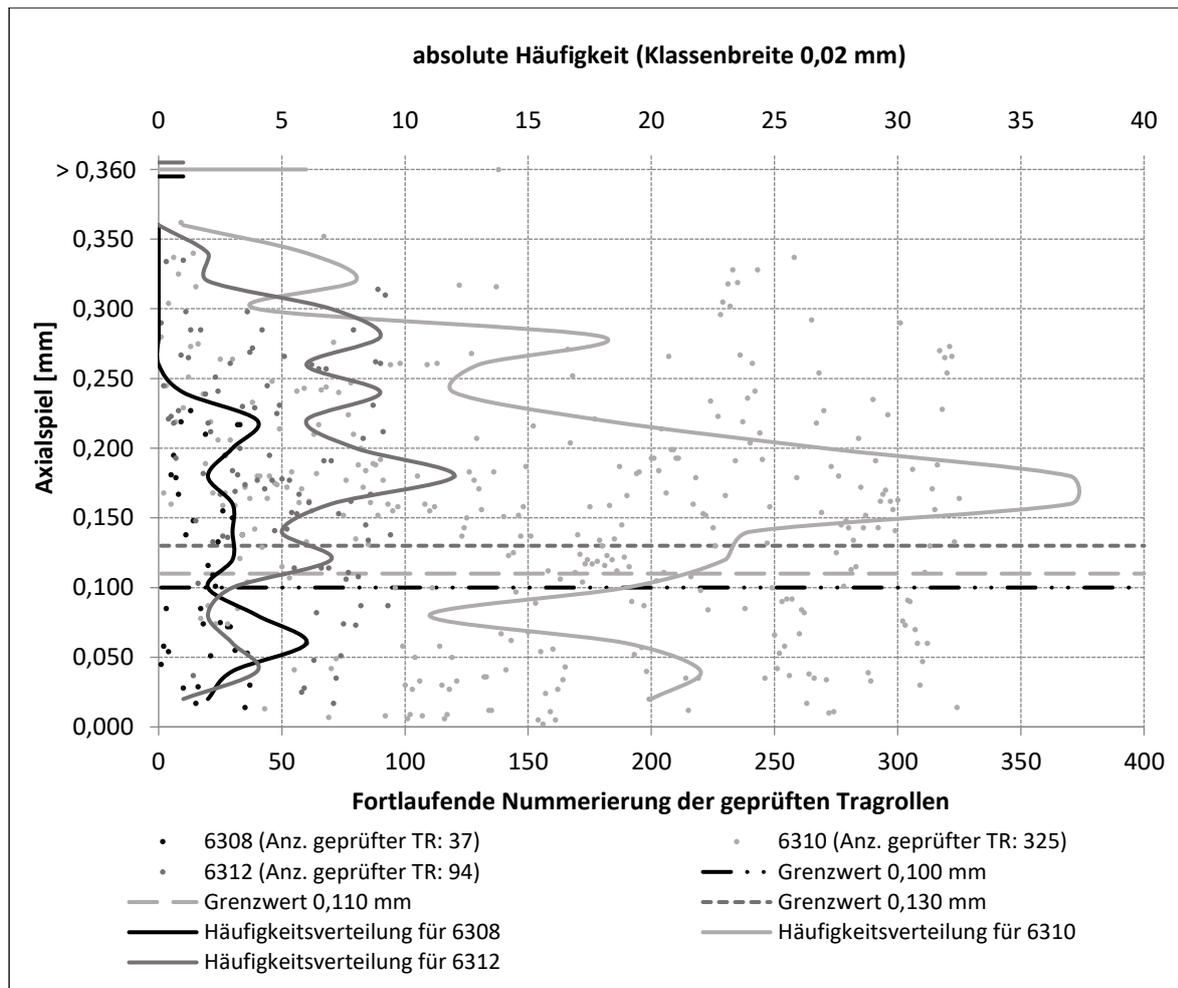


**Bild 16:** Axiale Verschiebbarkeit der Versuchsrolle mit dem neu entwickelten Prüfgerät

Bei der Betrachtung aller Messergebnisse wird ein Unterschied zwischen den Mittelwerten deutlich. Die Werte für die axiale Verschiebbarkeit, welche mit dem Prüfgerät nach DIN 22112-3 ermittelt wurden, liegen im Mittel etwa 19 µm über den Werten der neu entwickelten Prüfvorrichtung. Der Grund hierfür liegt in der Gestellverformung unter der Prüfkraft, welche bei dem Prüfgerät nach DIN 22112-3 teilweise mit erfasst wird. Dieses Gerät liefert somit tendenziell zu hohe Werte für die axiale Verschiebbarkeit. Weiterhin fällt die große Schwankungsbreite bei den Messwerten nach DIN 22112-3 auf. Die Spanne zwischen der größten und der kleinsten gemessenen Axialverschiebung liegt hier bei 126 µm, wohingegen sie bei dem neuem Gerät insgesamt nur bei 17 µm liegt.

Ausgehend von den angestellten Versuchsreihen an der Prüfrolle mit Wälzlager der Reihe 6310 ergibt sich für das Prüfgerät nach DIN 22112-3 ein Messfehler von etwa +/- 25 %. Bei dem BTU-Prüfgerät beläuft sich der Messfehler auf weniger als +/- 4 %. Der Vergleich bedeutet nicht, dass das Verfahren nach DIN 22112-3 grundsätzlich ungenaue Ergebnisse liefert, sondern, dass es nicht auf die Anwendung für größere Tragrollen ab Lagergröße 6308 ausgelegt ist. Aus diesem Grund wurde ein neuer Lösungsansatz ausgewählt.

Im Zuge der Qualitätssicherung und turnusmäßigen Prüfung wurden bisher 456 Tragrollen nach dem neuen Verfahren auf die axiale Verschiebbarkeit der Tragrollenachse gegenüber dem –mantel (Axialspiel) untersucht. Die Ergebnisse sind im folgenden Diagramm (Bild 17) entsprechend des verbauten Wälzlagertyps dargestellt und wurden auf ihre Häufigkeitsverteilung hin untersucht. Weiterhin sind die Grenzwerte nach Tabelle 5 eingezeichnet.



**Bild 17:** Untersuchungsergebnisse von 456 Tragrollen auf das Axialspiel

Aufgrund der geringen Anzahl an geprüften Tragrollen mit 6308er Lager ist hier eine statistische Auswertung nur bedingt möglich.

Die Mittelwerte der Kurven für die Tragrollen mit 6310er und 6312er Wälzlager variieren nur geringfügig voneinander und liegen ungefähr bei 0,175 mm und damit deutlich über den geforderten Mindestwerten. Auffällig sind erhöhte Häufigkeiten von Werten für die axiale Verschiebbarkeit, welche unterhalb der Grenzwerte liegen. Dieses Ergebnis scheint auf einen systematischen Fehler und auf Unzulänglichkeiten im Produktionsprozess der Tragrollen hinzudeuten. Ein Prellschlag mit einem Schonhammer auf das linke und rechte Achsende der Tragrollen brachte den gewünschten Effekt einer Axialspielerrhöhung. Diese Untersuchungsergebnisse führten zu einer Anpassung des Fertigungsprozesses bei den Herstellern.

## Zusammenfassung

Durch eine Analyse einer Charge von ausgebauten Tragrollen einer Gurtförderanlage konnten systematische Wälzlagerschäden festgestellt werden, welche auf eine fehlerhafte Montage während der Tragrollenherstellung zurückzuführen waren.

Dies äußerte sich in zu geringen Werten für die axiale Verschiebbarkeit der Tragrollenachse gegenüber dem Tragrollenmantel. Das führt im Wälzlager zu einem zu geringen Betriebsspiel, wodurch der Schmierfilm nicht ordnungsgemäß ausgebildet werden kann und sich eine ungünstige Ausprägung der Laufbahnen im Lager bildet. Ein beschleunigter Verschleiß mit Pittingbildung, zusätzliche Geräusche und ein damit verbundener vorzeitiger Lagerausfall werden wahrscheinlicher.

Da es in dem für Tragrollen bekannten Normwerk keine Grenzwerte für die axiale Verschiebbarkeit für die betrachteten Tragrollen mit den Lagergrößen 6308, 6310 und 6312 gibt, wurden diese berechnet und in die Lieferanforderung der LEAG übernommen. Grundlagen für die Berechnung der Grenzwerte liefern dabei die temperaturbedingten Verschiebungen in der Tragrolle sowie die Verformungen, die durch die Betriebsbedingungen und Auflasten im Einsatz entstehen.

Eine neu entwickelte Prüfvorrichtung für die axiale Verschiebbarkeit bei Tragrollen ist den Anforderungen an die Prüfung schwerer Tragrollen mit den Lagergrößen ab 6308 angepasst und liefert auch für kleinere Tragrollendimensionen genauere und reproduzierbarere Ergebnisse als die Prüfeinrichtung nach DIN 22112-3. Des Weiteren verbessert sie das Handling während des Prüfablaufs erheblich und reduziert die notwendige Prüfzeit deutlich.

Durch die Erstellung von Grenzwerten für die axiale Verschiebbarkeit von schweren Tragrollen und die Entwicklung eines neuen Prüfgeräts wurde die Qualitätssicherung für die Tragrollenbeschaffung verbessert. Zukünftige Ausfälle aufgrund zu geringer Betriebsspiele der Wälzlager können so bei einer ausreichenden Anzahl von Stichprobenprüfungen vermieden werden. Weiterhin führt ein Rückfluss der Prüfergebnisse bei Unterschreitung der Grenzwerte zu den Herstellern zu einer Anpassung des Fertigungsprozesses und einer Verbesserung der Fertigungsqualität.

Es konnte nachgewiesen werden, dass ein formal auf Wälzlagerschäden beruhender Tragrollenausfall komplexe Ursachen haben kann. Zahlreiche Faktoren wie das Abdichtungssystem, die konstruktive Ausführung, ungünstige Geometrieabweichungen des Tragrollenmantels und die Montage der Einzelteile beeinflussen sich gegenseitig und können zu einer verminderten Einsatzdauer der Wälzlager führen.

**Quellenverzeichnis:**

- [1] SKF GmbH, W. S.: Optimierte Wälzlagerungen und deren Überwachung in hochbelasteten Anwendungen der Schüttgutfördertechnik. In F. f. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Tagungsbericht - 23. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2018 (S. 91-107). München, Technische Universität München, 2018
- [2] Arthur Küpper GmbH & Co. KG.: AKT Trag- und Förderbandrollen – Technologie. Produktbeschreibung unter <https://www.kuepper.eu/qlr-hybrid-abdichtung.html> (Datum des Zugriffs: 12. Mai 2020)
- [3] Schneider, R.; Fritsch, T.: Langzeituntersuchungen an einer Gurtförderanlage im Tagebau Nochten zur Einhaltung eines Instandhaltungspegels bei zustandsbezogener Instandhaltung Lärm, Senftenberg, Institut für Umwelttechnik und Recycling Senftenberg e.V., 2020
- [4] DIN 22112 Teil 2, Gurtförderer für den Kohlenbergbau unter Tage – Tragrollen – Teil 2: Anforderungen, Dezember 2010
- [5] SRN Industry: Hauptkatalog 2009, PDF unter [https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-05/snr\\_general\\_catalogue\\_de.pdf](https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-05/snr_general_catalogue_de.pdf) (Datum des Zugriffs: 24.06.2021)
- [6] Fritsch, T. - Master-Arbeit: Untersuchungen zur Temperaturverteilung in Tragrollen unter realen Bedingungen und deren Auswirkungen auf das Lagerspiel und Laufverhalten, Maschinenbau, Senftenberg, BTU Cottbus-Senftenberg, 2019
- [7] Funke, B.: Qualität und Haltbarkeit von Tragrollen, Die Industrie der Steine + Erden, Heidelberg, Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, März 2015
- [8] Schlecht, B.: Maschinenelemente 2 - Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen, München, Pearson Studium, 2009
- [9] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: Technische Grundlagen Wälzlager – Lagerdaten, unter [http://medias.schaeffler.de/medias/de!hp.tg.cat/tg\\_hr\\*ST4\\_102440715](http://medias.schaeffler.de/medias/de!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_102440715) (Datum des Zugriffs: 21.06.2017)
- [10] Uhlig, A.: Lieferanforderung für Tragrollen, (Lieferanforderung-Nr.: 0314g), Schwarze Pumpe, Lausitz Energie Bergbau AG Hauptwerkstatt, 16. Dezember 2019
- [11] DIN 22112 Teil 3, Gurtförderer für den Kohlenbergbau unter Tage – Tragrollen – Teil 3: Prüfungen, März 1996

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Konzentriertes Hersteller- und Betreiberwissen in einem gemeinsamen IT-Tool zur systematischen Optimierung von Schüttgutanlagen

Martin Handreg

Uwe Köhler

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Dr.-Ing. Martin Handreg  
ABB AG  
Hänchener Straße 14  
03050 Cottbus



Dipl.-Ing. Uwe Köhler  
LEAG  
Leagplatz 1  
03050 Cottbus



# Konzentriertes Hersteller- und Betreiberwissen in einem gemeinsamen IT-Tool zur systematischen Optimierung von Schüttgutanlagen

*Durch die Fusion von zwei Wissensbereichen ergibt sich ein völlig neuer Ansatz im Consultinggeschäft im Bergbau- und Schüttgutbereich. Dabei sollen vorrangig Aspekte der Effizienzverbesserung bedient werden, da aus der eigenen Erfahrung hier umfangreiche Potentiale zur Produktivitätsverbesserung bereits mit geringem Aufwand nutzbar werden. Das dafür entwickelte IT-Tool ist aber auch eine offene Plattform für die datentechnische Integration von mechanischen und elektrischen Komponenten anderer Anbieter.*

## 1 Veranlassung

Nach einer Untersuchung der Fa. McKinsey [1] müssen sich Bergbaubetreiber seit einigen Jahren folgenden Herausforderungen stellen:

- niedriger Erzgehalt in den Flözen
- steigende Teufen und Abraummengen
- Zunahme des Einsatzes kontinuierlicher Bergbautechnik
- vergleichsweise niedrige Gesamtanlageneffektivität
- geringer Nutzungsgrad der verfügbaren Betriebsdaten für Optimierungsanalysen

Dazu kommen inzwischen richtigerweise auch in Ländern, in denen das bisher nicht üblich war (z. B. Russland), regulatorische Anforderungen zur Sicherung der unmittelbaren Rekultivierung und der Rücklagenbildung für die abschließende Sanierung.

Es ist zu erwarten, dass sich diese Anforderungen durch die weltweit geplanten Umstellungen der Energieerzeugungs- und Verbrauchsstruktur und den daraus entstehenden Rohstoffbedarf weiter verschärfen. Eine hocheffiziente Nutzung der betrieblichen Assets ist somit ein wichtiger Beitrag für den Erfolg der Bergbauunternehmen am Rohstoffmarkt.

Mit diesem gemeinsamen Projekt von ABB und LEAG wollen wir eine Neupositionierung im Consultinggeschäft erreichen und vor allem die Potentiale der Effizienzverbesserung nutzbar machen. Mit der Kombination und Konzentration der beiden Wissenswelten kann die gesamte Wertschöpfungskette des Bergbaus von der Exploration bis zur Aufbereitung mit einer detaillierten Behandlung der bergbaulichen Betriebs- und der allgemeinen Stromversorgungstechnik bedient werden.

## 2 Grundlagen der Beschreibung der Anlageneffizienz

Zum generellen Produktivitätsvergleich von Anlagen und Prozessen wird üblicherweise die bekannte Kennziffer der Overall Equipment Efficiency (OEE) genutzt.

Sie ist für ein definiertes Betriebsintervall das Produkt aus den drei folgenden Teilkennziffern:

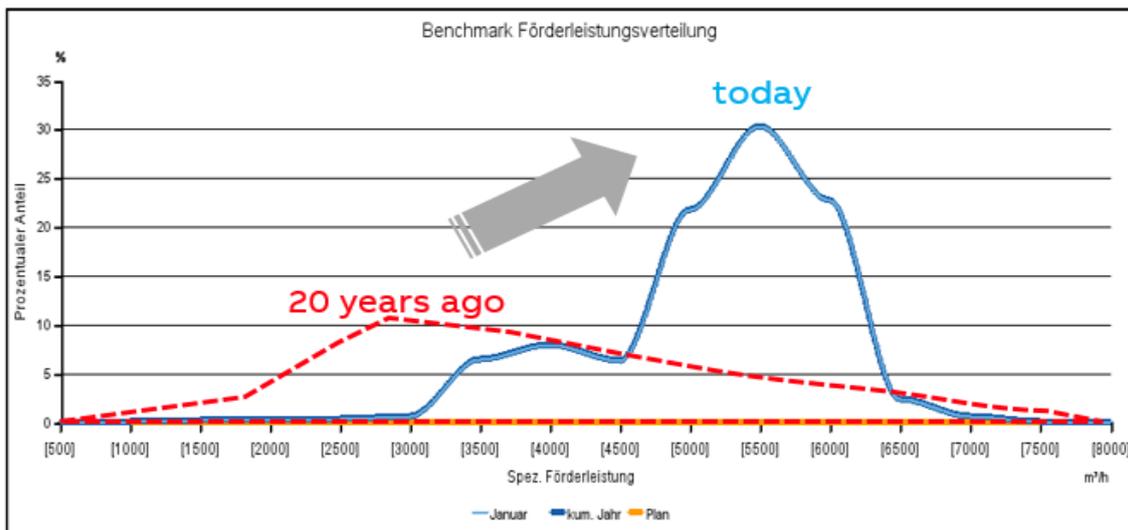
- **Zeitgrad** = realisierte Betriebszeit / geplante Betriebszeit
- **Lastgrad** = genutzte Kapazitätsauslastung / verfügbare Kapazität
- **Qualitätsgrad** = anforderungskonformer Produktionsanteil / Gesamtproduktion

Die Überwachung des **Zeitgrades** ist am weitesten verbreitet. Das hat auch eine historische Basis, da vor der Einführung moderner Messtechnik und Datenübertragung das Handling von Zeitstempeln zu definierten Events stets möglich war.

Viele bestehende Softwarelösungen haben ihren Focus auf diesem Teilgebiet und ermöglichen sehr detaillierte Analysen. Besonders die IT-Produkte der Anlagen- und Komponentenhersteller haben inzwischen sehr entwickelte Zusatzfunktionen zur Ermittlung der Restnutzungsdauer der von ihnen hergestellten Komponenten, damit ungeplante technische Stillstände vermieden werden.

Die Beschreibung des **Lastgrades** ist inzwischen auch keine technische Herausforderung mehr. Die reine Nutzung des Durchschnittswertes ist jedoch aus unserer Sicht ein Verlust an wesentlichen Informationen.

Eine Nutzung der Darstellung einer Verteilfunktion von Zeitanteilen je Lastgradstufe bringt hier wesentliche Zusatzinformationen zum Verhalten der jeweiligen Anlage.



**Bild 1:** Darstellung der Last-Verteilfunktionen

In dieser Darstellung ist deutlich sichtbar, dass in der Vergangenheit (gestrichelte Linie) der Verweilzeitanteil im Teillastbereich sehr groß war und es einige wenige Zeitanteile an der Kapazitätsgrenze gab. In der allgemeinen Kommunikation wurden aber diese „Spitzenwerte“ leider als Benchmark betrachtet.

Warum ist nun eine Nutzungsveränderung in Richtung der durchgezogenen Linie von Vorteil, obwohl keine Häufung im Höchstleistungsbereich nahe der Kapazitätsgrenze erreicht wird?

Die Kostenstruktur der kapitalintensiven Bergbaubranche ist durch einen dominanten Fixkostenanteil gekennzeichnet. Im Verhältnis sind die variablen Kosten (Personal, Energie, Betriebsstoffe; Instandhaltung ...) relativ klein. Bei einer kontrollierten Steigerung der Ausbringungsmenge in solch einer Weise, dass die variablen Kosten **nicht** mit gleicher Rate mitsteigen, sinken sofort die Produktstückkosten.

Da es für diesen komplexen Ablauf mit sehr vielen Variablen bisher keine vollständige,

mathematische Beschreibung gibt, sind also Sorgfalt und ein geeignetes Monitoring in der Transformationsphase dringend zu empfehlen. Erfahrungsgemäß können die Anlagen natürlich auch Leistungen an der Kapazitätsgrenze abfahren. Dabei ist jedoch ein Überfahren der Sicherheitsgrenzen mit Not-Stops und langwierigen, zum Teil kritischen Neustarts verbunden und schon deshalb nicht vorteilhaft.

Weiterhin ist es empirisch bekannt, dass sich der Verschleiß nicht linear zur Kapazitätsauslastung verhält. Im Höchstlastbereich ist mit einer überproportionalen Zunahme des Verschleißes zu rechnen. Eine prinzipielle Vermeidung dieser Bereiche ist deshalb vorteilhaft gegenüber der alten Fahrweise, da weniger technische Störungen mit Stillständen provoziert werden und somit die spezifischen Instandhaltungsaufwendungen sogar sinken können. So entsteht nebenbei auch eine positive Auswirkung auf die zeitliche Auslastung, die wiederum zur Erhöhung der Gesamtaustragsmenge beiträgt und auch die Produktstückkosten senkt.

Im Ergebnis gibt es eine Vergleichsmässigung und Verstetigung der Fahrweise, so dass sich „Aufholfahrten“ nach ungeplanten Stillständen erübrigen. Diese neue Fahrweise könnte man durchaus als „Smoothly Operation“ bezeichnen.

Diese veränderte Fahrweise bringt dem Betrieb unter Umständen auch zusätzliche, positive wirtschaftliche Effekte hinsichtlich der Energiekosten. Durch die Vermeidung von Extremfahrweisen sinkt das Risiko der kostenintensiven Spitzenlastnutzung, bzw. es entfallen die Verluste für betriebsinterne Zwangsmaßnahmen im zeitlichen Betriebsregime oder die Investitionskosten für technische Kompensationsmaßnahmen.

Generell kann gesagt werden, dass sich die Erfassung und Aufbereitung der Daten für den **Zeitgrad** und den **Lastgrad** sehr gut digitalisieren lassen. Somit können für beide Ansätze Lösungen entworfen werden, die die Notwendigkeit der direkten Anwesenheit eines Experten vor Ort in der Phase der Analyse stark reduzieren.

Dagegen ist bei der Bewertung des **Qualitätsgrades** die Anwesenheit vor Ort auf Grund der kaum vorhandenen durchgängigen Digitalisierung aus heutiger Sicht unabdingbar.

### 3 Realisierung

In diesem Projekt haben wir uns entschieden, die verbindenden Bandanlagen zwischen Quellen (Bagger, Brecher; Stacker-Reclaimer...) und Senken (Absetzer, Schiffsbelader, Zugverladungen, Stacker-Reclaimer, ...) als Datenquellen zu nutzen. Natürlich bringt jeder einzelne Gurtförderer auch seine eigenen Randbedingungen in die Datenabbildung ein. Aus unserer Erfahrung gilt das aber vorrangig für den **Zeitgrad**. Der **Lastgrad** der Bandanlage wird nach unserer Erfahrung vorrangig durch das Verhalten von Quelle und Senke determiniert. Somit haben wir eine messtechnische Vereinfachung erreicht, die dem Ziel der Effizienzbewertung einer Gesamtanlage noch hinreichend entspricht. Gemäß unserer Erfahrung liegen die wirksamen Probleme in den allermeisten Fällen vor oder nach der eigentlichen Bandanlage.

Betriebsstörende Schädigungen eines Gurtes durch Steinschläge lassen sich halt nicht durch ein besseres Monitoring der Schadensstellen beseitigen. In solchen Fällen hilft nur

eine scharfe Analytik, beginnend von der Größenverteilung der Steine und ihrer Lage im Gebirge, der Anpassung der Schnittparameter in der Gewinnungstechnologie, über Aushaltungs- oder Abweisungsmaßnahmen am Gewinnungsgerät und den Übergabeschurren bis zur Anpassung von Fallhöhen in den Übergaben. Somit ist das Einbringen der bergmännischen Erfahrungen ein sinnfälliger Beitrag zum Gesamterfolg für den betroffenen Betrieb.

Wie bereits benannt, steht uns noch kein geschlossenes mathematisches Modell zur Beschreibung des Optimalpunktes der Leistungsintensität zur Verfügung. Aus diesem Grund nutzen wir die Verhaltensdaten eigener Anlagen. Das hat für uns den Vorteil, dass wir auch eine geeignete Zuordnung zu den relevanten Lösungsansätzen zur Verfügung haben.

Im konkreten Einsatzfall würde gemäß dem Layout und der Funktion der Kundenanlage der bestehende Datensatz einer entsprechenden eigenen Anlage zum Einsatz kommen. Die Messdauer beträgt mindestens eine Woche. In Absprache mit dem Betreiber muss entschieden werden, inwieweit der konkrete Messtermin saisonale Einflüsse berücksichtigen soll. Zur Datensammlung wird eine Cloudlösung im bewährten ABB-Standard angeboten, abweichende Kundenwünsche können prinzipiell berücksichtigt werden.

Zeitnah nach der Messperiode bekommt der Betreiber ein strukturiertes Vergleichsprofil seiner Anlage gegenüber unserer Anlage. Gemäß der vorgegebenen Veränderungsstrategie (sofort und mit vielen kleinen Maßnahmen oder mit größerer Vorbereitung große Veränderungshübe) gibt es eine Ansatzliste als Primärvorschlag von uns.

Im Rahmen der Prototypentestung wurden diese Arbeitsweise und die erreichten Analyseergebnisse von den beteiligten Partnern als sehr kooperativ, transparent, sinnfällig und nützlich eingestuft.

Bei Akzeptanz oder nach Anpassung kann dieser Vorschlag mit weiteren Kategorien wie Vorbereitungsdauer, Umbauzeit, Grobbudget und sinnfälligen Gruppierungen der Maßnahmen versehen werden. Damit kann dann eine weitere Priorisierungsgenauigkeit für den Betreiber im Sinne einer Programmplanung erzeugt werden.

Nachfolgend kann das Geschäftsmodell gemäß der Interessenlage des Betreibers beliebig gesplittet werden. Die Variantenbreite reicht von Schulung des Betriebspersonals oder dem Basic-Engineering über die Ausführung der Projektleitung bis zum Full-Service.

## 4 Ausblick

Basierend auf einem in einer Vorstudie entwickelten Prototypen für wesentliche Kennziffern, erfolgt derzeit die Weiterentwicklung zum modularen Vollsystem. Dieser Prozessabschnitt wird durch das BMBF für 2 Jahre mit entsprechenden Mitteln für die integrierten Partner aus Wirtschaft und Forschung unterstützt. Ziel ist es, mit höheren mathematischen Verfahren neue, weiterführende Mustererkennungen zu schaffen, um noch schneller und zielgerichteter den Prozess der Maßnahmenzuordnung zu bedienen. Damit wandert das gemeinsame Wissen nachhaltig in ein gemeinsames Werkzeug.

Gleichzeitig werden geeignete Schnittstellen konzipiert, um bisher vernachlässigten Komponenten (Abstreifer, ...) und ihren Herstellern eine Möglichkeit zu bieten, an der Digitalisierung zu partizipieren und ihren spezifischen Beitrag zur Verbesserung der Anlagenperformance beizusteuern.

### Zusammenfassung

Die Integration der Wissenswelten eines Anlagenherstellers und eines Anlagenbetreibers und die nachhaltige Konzentration ihres Wissens in einem gemeinsamen Tool ist eine sehr sinnfällige Herausforderung zur Schaffung von Mehrwert für Anwender im Schüttgutbereich und in naheliegenden Branchen der Logistik.

In Verbindung mit den Potentialen einer zeitgemäßen Digitalisierung kann dieser Vorteil schnell und anwendungssicher andere Anlagenbetreiber vorrangig bei der Verbesserung der Effizienz ihrer Assets unterstützen.

### Quellenverzeichnis:

- [1] McKinsey: Mining next performance horizon. Verfügbar als PDF-Dokument unter <https://www.mckinsey.de/industries/metals-and-mining/our-insights/behind-the-mining-productivity-upswing-technology-enabled-transformation>

(Datum des Zugriffs: 14.01.2021)



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Automatische Lössdeponierung eines Tagebauabsetzers der RWE Power AG

Norman Stamm



Dipl.-Ing. (FH) Norman Stamm  
RWE Power AG  
Technikzentrum Elektrotechnik –  
Fördergeräte und  
Automatisierungsprozesse  
Am Tagebau  
52382 Niederzier



# Automatische Lössdeponierung eines Tagebauabsetzers der RWE Power AG

*Der Tagebau Garzweiler verfügt als Besonderheit im Abbaufeld über bis zu 13 m hohe Lössmächtigkeiten. Dieser fruchtbare Löss wird für die Rekultivierung der Bergbaufolgelandschaft im Tagebau Garzweiler und Hambach benötigt. Lössmengen, die im Tagebau Garzweiler und Hambach nicht direkt dispositiv in der Rekultivierung verwendet werden können, werden in einem Lössdepot zwischengelagert. Dieses wird auf insgesamt 28 m Höhe gefüllt und wird in den Folgejahren sukzessive für die Rekultivierung wieder abgetragen. Für die automatisierte Erstellung des Lössdepots sind einfache Kippfiguren definiert worden. Für den Absetzer 750 und den Bandschleifenwagen (BSW) 941 wurde bis 2018 eine Vollautomatik zur Erstellung dieser Kippfiguren entwickelt, um den Gerätebetrieb effizient und in nachvollziehbaren Prozessen zu gestalten.*

## 1 Einleitung und Motivation

Weiterhin anhaltender Wettbewerbsdruck, insbesondere durch den Umbau des Energiesektors und den Braunkohlenausstieg, zwingt die RWE-Power AG, ihre Prozesse kontinuierlich am Markt weiterzuentwickeln, um die Stromerzeugungskosten weiter zu senken. Ziel ist es, dem Markt weiterhin eine preiswerte, unabhängige und sichere Versorgung mit Strom zur Verfügung zu stellen, um damit die wetter- und tageszeitabhängige regenerative Stromerzeugung aus Wind und Sonne zu ergänzen [4].

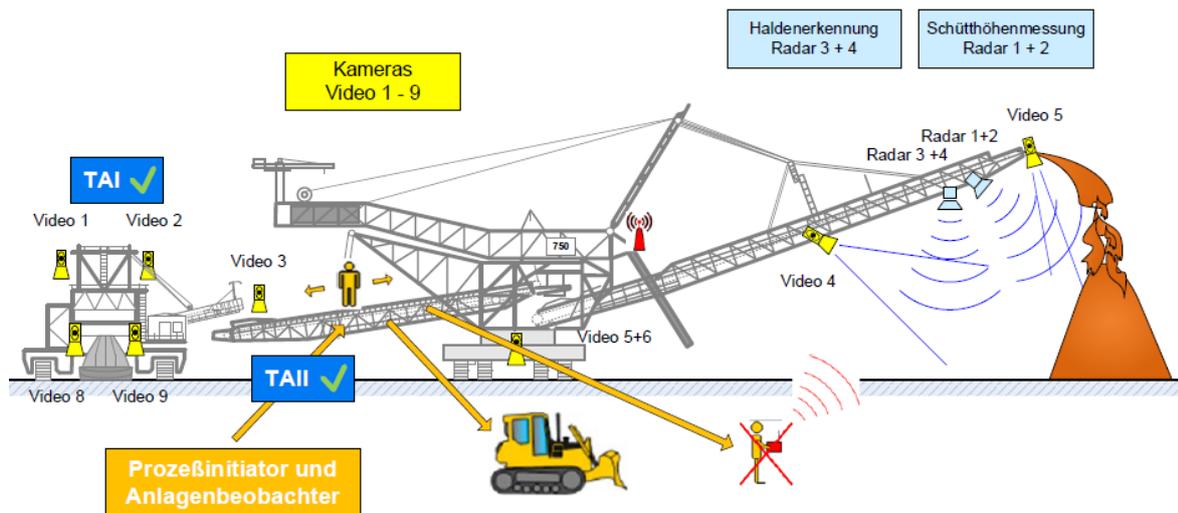
Aufgrund des Braunkohlenausstiegs und der Altersstruktur der Belegschaft ist in den nächsten Jahren mit einem massiven, sozialverträglichen Personalabgang zu rechnen.

Das Projekt automatische Lössdeponierung (ALD) soll helfen, den Personalabbau zu kompensieren und gleichzeitig einen flexiblen Betriebsablauf zu ermöglichen.

## 2 Automatische Lössdeponierung Absetzer 750

Die automatische Lössdeponierung Absetzer 750 setzt auf die vorhandenen Teilautomatisierungsschritte [2] auf. Im Jahr 2003 wurde in einem ersten Schritt die Lenkung des BSWs 941 [3] und im Jahre 2018 in einem zweiten Schritt die Materialübergabe zwischen dem BSW und dem Übernahmehand des Absetzers 750 vollständig automatisiert (vgl. Bild 1). Das Konzept zur Automatisierung des Kippvorganges (ALD) orientiert sich an dem Automatisierungskonzept „fahrerloser Förderbetrieb Bunker“ (FFB) der Bunkerbandschleifenwagen [1]. Der Prozess kann vor Ort am Absetzer und zukünftig im ca. 5 km entfernten zentralen Leitstand des Tagebaus gestartet und beendet (pausiert) werden. Unterstützt wird das Leitstandspersonal durch Kamerabilder vom Arbeitsumfeld des Absetzers und des BSWs.

Der Absetzer muss mit seinem lenkbaren Raupenfahrwerk grundsätzlich parallel zur Bandanlage fahren (vgl. Bild 2). Die Lössdepotgeometrie muss parallel zu dieser Fahrlinie erstellt werden, indem der Absetzer über seine Schwenkwinkel-, Hubwinkel- und Fahrwegmessgeber geführt wird. Zudem wird das Lössdepot 2-lagig gekippt. Beide Unterschiede mussten durch technische Konzepte gelöst werden. Details dazu sind nachfolgend beschrieben.

**ZIELE (Automatik)**

- Lösdeponierung 750 in Hochschüttung
- Fahren + Lenken des Absetzer parallel zur Bandanlage
- Schwenken + Heben des Abwurfbandes
- Kippen auf Soll-Höhe in Hochschüttung (Kegelschalenverfahren) spezieller Haldenprofile (2-lagig auf 15m & 28m)
- Erkennung Annäherung BSW an eine Antriebsstation

**Nicht-ZIELE (Automatik)**

- Tiefschüttung
- Globale, freie Bewegung des Absetzer im Lößdepots
- Positionserfassung (Bandanlage + ABS) mittels GPS
- Erfassung von Gefällen oder Steigungen im Planum, von Hindernissen in Fahrtrichtung → Organisatorische Regelung
- Erkennung von Böschungsumbildungen → Kameraanlage

**Bild 1:** Konzeptübersicht, Ziele und Nicht-Ziele der Automatik**2.1 Randbedingungen**

Voraussetzung für den ALD-Betrieb sind definierte Schüttprofile im Kegelschalenverfahren. Die Kegelschalen werden an die vorhandene Seitenböschung der Hochschüttung angelegt (vgl. Bild 2 unten). Im Kegelschalenverfahren fährt der Absetzer modellgestützt parallel zur Bandanlage und kippt je Betriebsart im Fahr- und Schwenkbetrieb Kegel an Kegel. Erreicht der Abwurfausleger das Ende des gewünschten Schwenkbereiches, wird die Schwenkrichtung geändert und der Absetzer fährt mit seinem Fahrwerk eine definierte Strecke rückwärts. Für die Betriebsart „Stützrippe“ wird der Schwenkwinkel des Absetzers konstant gehalten und die Kegelschalen werden durch Bewegung des Absetzer-Fahrwerkes angelegt. Insgesamt werden die Betriebsarten „Stützrippe“ (Sollkipphöhe 15 m), „Vorplanum“ (ebenfalls Sollkipphöhe 15 m) sowie „Planum“ (Sollkipphöhe 28 m) unterschieden. Die Bewegungen der Anstellantriebe erfolgen automatisch. Nur an den definierten Startpunkten (Stützrippe, Vorplanum oder Planum) kann ein manueller Neustart der Schrittketten erfolgen.

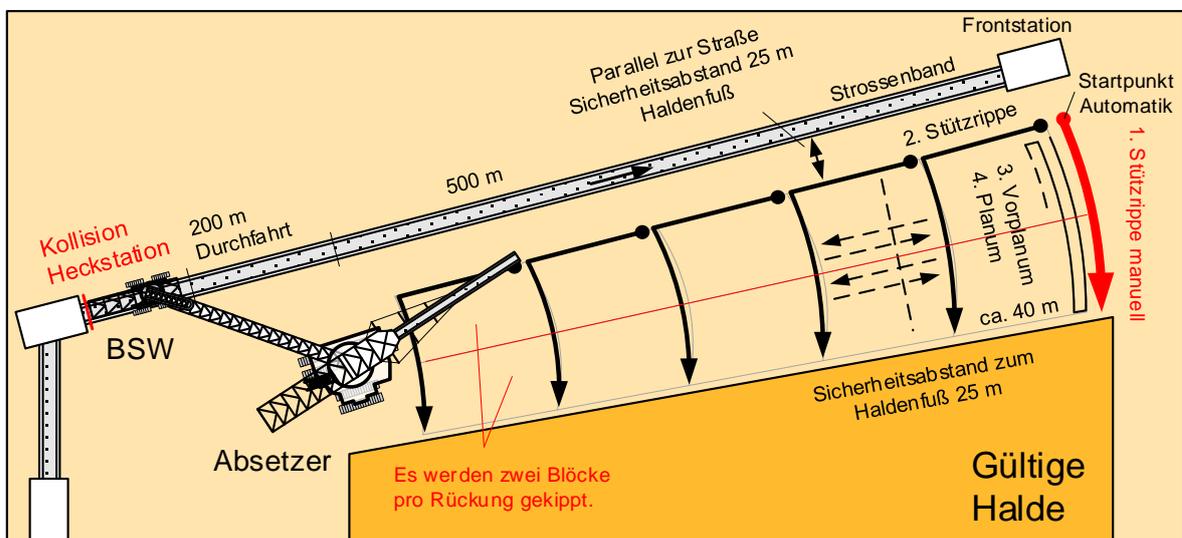
Mit der Produktionsabteilung wurden in der Konzeptionsphase die betrieblichen Randbedingungen abgestimmt, die durch die Automatik zu beherrschen sind.

Diese sind:

- Keine 3-dimensionale Erfassung der Kippgeometrie.
- Nur Kippen einfacher Figuren ausschließlich in Hochschüttung.
- Diese ist 2-lagig unter Berücksichtigung des Setzungsmaßes auf 15 und 28 m zu kippen, seitliche Bermen sind zu erzeugen.
- Zu Beginn muss eine Seitenböschung auf 28 m sowie eine 1.Stützrippe im Block 1 auf 15 m bestehen bzw. muss manuell erstellt werden (vgl. Bild 2 rechts).
- Der Absetzer nebst BSW muss manuell an seine Startposition (Entfernung,

Schwenkwinkel und Hubhöhe Abwurfband) gefahren und die Fahrachse parallel zur Bandanlage ausgerichtet werden.

- Das Kippen der Lösshalde erfolgt dabei nur im Kegelschalenverfahren. Hierbei wird Kegel an Kegel auf eine von der Automatik vorgegebene Soll-Höhe gekippt, danach nimmt der Absetzer durch sein Fahrwerk bzw. Schwenkwerk eine neue Position ein.
- Die verschiedenen Kippfiguren, Stützrippe kippen, Stützrippe schließen, Becken Vorplanum befüllen, Vorplanum befüllen sind in einer Programmsteuerung für die Hochschüttung fest hinterlegt worden (vgl. Abschnitt 2.5.3).
- Das Kippen von Sonderfiguren in Automatik ist nicht vorgesehen, so wird nach ca. 2-Rücklagen der Bandanlage der Heckbereich des Lössdepots manuell befüllt.
- Alle vorhandenen Gerätesteuern und Automaten müssen aktiv und störungsfrei sein.

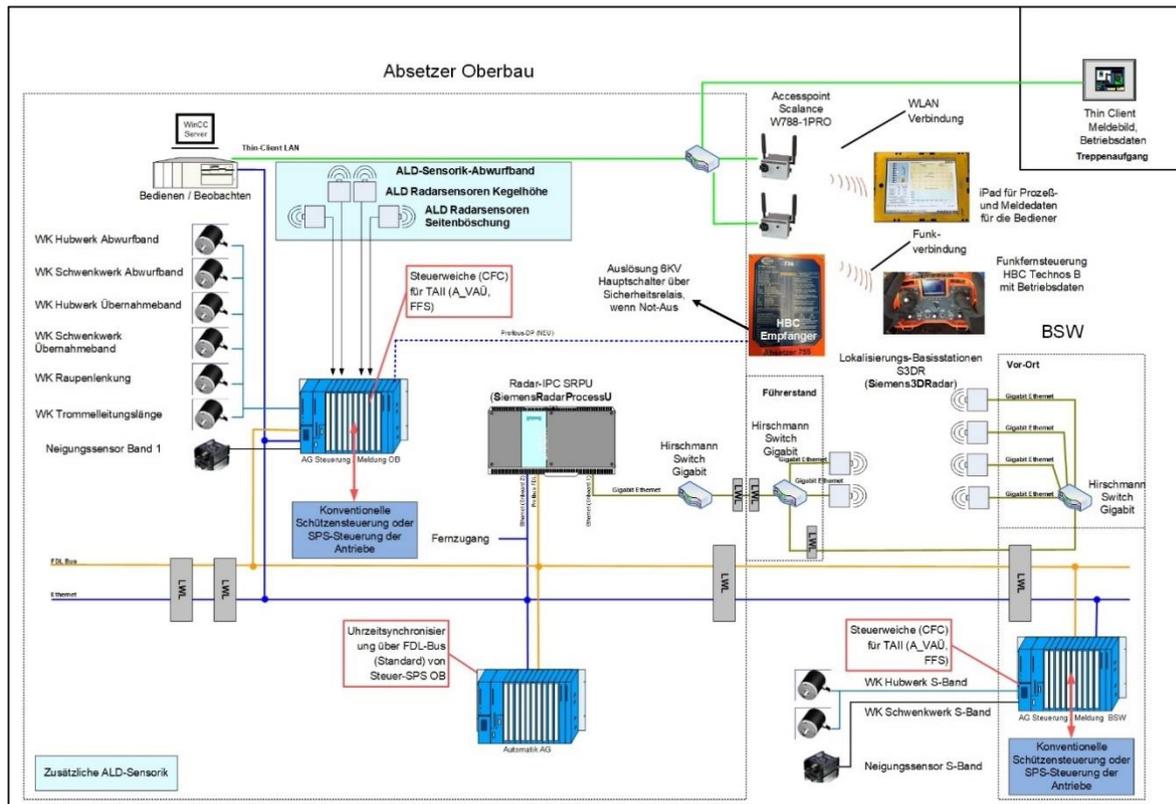


**Bild 2:** Prinzip-Skizze der automatischen Lössdeponierung in Hochschüttung

## 2.2 Systemübersicht

Die automatische Lössdeponierung wurde in die vorhandene Automatisierungslösung auf Basis von Siemens S7-400 Technik in einem separaten Programmteil ergänzt und setzt auf vorhandene Teilautomaten auf. Alle Systeminformationen, wie Winkelstellungen, Abstandsinformationen werden durch Winkelkodierer oder Radarsensoren in der vorhandenen S7-Automatisierung erfasst (vgl. Bild 3). Als Rückfallebene existiert stets die Möglichkeit, die Automatikfunktionen zu deaktivieren und die Geräte manuell zu bedienen.

Um den komplexen Anforderungen gerecht zu werden, wurden die zu realisierenden Automatisierungsfunktionen in einzelne Module gegliedert. Für die verschiedenen Module wurden Automatisierungskonzepte in Schrittkettenform programmiert. Die Gesamtfunktion setzt sich aus ihnen zusammen.



**Bild 3:** Systemübersicht der Automatisierungssysteme mit Sensorik

### 2.3 Risikoanalyse

Die Sicherheit steht bei dem Einsatz neuer Technik grundsätzlich an erster Stelle. Bereits mit Beginn des Projekts wurde auf Basis der Norm DIN EN 12100 eine Risikoanalyse systematisch von einem interdisziplinären Team erarbeitet. In dieser wurden potentielle Gefahren identifiziert und die Anforderungen an den sicherheitsgerichteten Teil der Steuerung ermittelt. Als Ergebnis der Analyse ergaben sich wenige neue Gefahren durch die Automatisierung, die aber technisch hinreichend abgesichert werden konnten.

Eine Kollision des Abwurfbandes mit der Halde war z. B. bereits bisher über Endschalter abgesichert und stellt in der Automatik keine neue Gefahr dar. Allerdings wurde eine zusätzliche Sensorik zur Regelung im automatischen Betrieb nachgerüstet, die den Absetzer so steuert, dass der o. g. Endschalter betrieblich möglichst nicht angefahren wird.

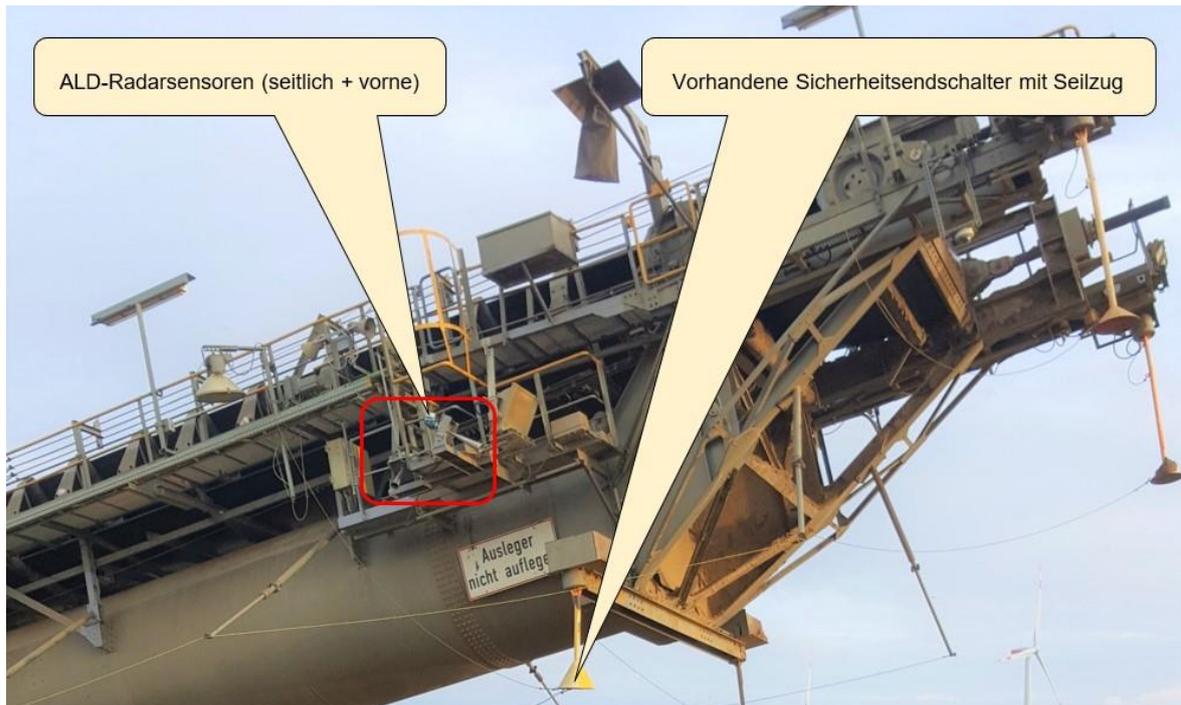
Eine Kollision des BSWs mit der Bandstation kann aufgrund der betrieblichen Einsatzbedingungen nur in Rückwärtsfahrt mit der Heckstation erfolgen. Diese neue Gefahr wird durch eine zusätzliche Kollisionsschutzeinrichtung abgesichert.

Die Risikoanalyse zeigte darüber hinaus, dass die implementierten RWE-Power-Normschaltungen auch den neuen Anforderungen genügen und die Geräte auch mit der automatischen Lössdeponierung nach wie vor sicher betrieben werden können.

## Kollisionsschutzeinrichtungen

### Abwurfband gegen Halde

Ergänzend zu den bereits vorhandenen Sicherheitsendschaltern am Abwurfaufleger (Seilzugbetätigung mit Wirkung auf den Not-Aus-Kreis des Absetzers) wurde für die Automatisierung seitlich jeweils ein 1D-Radarsensor installiert (vgl. Bild 4). Damit wird eine neue Abschaltung realisiert, die beim Unterschreiten des minimalen Abstands zur Böschung die Anstellantriebe Fahr-, Hub- und Schwenkwerk betrieblich stillsetzt, bevor die Seilzugbetätigung anspricht.



**Bild 4:** ALD-Radarsensoren

### BSW-Einlaufteil gegen Heckstation der Bandanlage

Der Kollisionsschutz BSW-Einlaufteil gegen die Heckstation der Bandanlage wurde von bestehenden Automaten übernommen und beruht auf zum Gerüststahlbau isoliert montierten Kollisionsschutzkammern (Eigenentwicklung). Berührt der Kollisionsschutzkammern die Kollisionsschutzgabel am Stahlbau der Heckstation, entsteht ein Erdschluss, der von der Steuerung erkannt wird. Dadurch werden relevante Anstellbewegungen betrieblich stillgesetzt und die automatische Lössdeponierung geht in die Betriebsart „Pause“ über. Vorgeschaltet ist nach dem gleichen Funktionsprinzip eine Vorwarnung, die das automatische Kippen des aktuell laufenden Blockes noch ermöglicht, den Automatikbetrieb aber für einen Folgeblock sperrt. Das Auskippen des Heckbereichs erfolgt dann in gedrehter Gerüststellung im manuellen Sonderbetrieb.

## **2.4 Radarsystem und Sensorik**

Am Abwurfausleger wurden 4 Stück 1D-Radarsensoren vom Typ FMR57 zur Erfassung von Füllständen installiert. Die beiden Vorderen dienen zur Schütthöhenerfassung und Erkennung des Umschwenkpunktes zur Böschung. Die seitlichen Radarsensoren bilden

einen zusätzlichen Kollisionsschutz zur Böschung ab. Alle Sensoren messen den Abstand und liefern Ihre Analogwerte 4-20 mA an die S7-Steuerung. Dort werden die Messwerte in die Einheit Meter skaliert und für die weitere Programmsteuerung genutzt. Vorteil dieser einfachen Sensoren ist, dass diese ohne komplexe Datenumwandlungen und Modelle direkt in der S7-Steuerung verarbeitet werden können und je Programmschritt mit unterschiedlichen Sollwerten verglichen werden können.

Zur Ermittlung der Kegelhöhe und zur Justierung der Sensoren wurden definierte Kegelhöhen gekippt und bei entsprechender Hubhöhe des Abwurfbandes der gemessene Abstand der Radarsensoren der Ist-Schütthöhe zugeordnet. Es gibt keinen direkten, linearen Zusammenhang zwischen Ist-Schütthöhe und dem gemessenen Abstand der Radarsensoren (vgl. Bild 05). Eine direkte Höhenmessung oberhalb des Kegels ist aufgrund der Anordnung der Radarsensoren am Abwurfausleger (vgl. Bild 4) nicht möglich.

Vergleich Radarstrahl-Länge <--> Kegelhöhe					
		Sensor vorne links	Sensor vorne links	entspricht einer Kegelhöhe von	Hubhöhe Abwurf- ausleger
Grenzwert Strahllänge StzR	[m]	16,00	16,00	ca. 15 m	23 m
Grenzwert Strahllänge VPL	[m]	16,00	16,00	ca. 15 m	23 m
Grenzwert Strahllänge PL Block 1	[m]	11,00	11,00	ca. 21 m	25 m
Grenzwert Strahllänge PL Block 2	[m]	10,00	10,00	ca. 29 m	32 m
Grenzwert Strahllänge PL Block 3ff	[m]	10,50	10,50	ca. 28 m	32 m
Istwert Strahllänge	[m]	15,31	15,63		

**Bild 5:** Abstandsmessung ALD-Radarsensoren je Block 1-3ff

### 3D-Gerätemodell

Neben der Erfassung über die Winkelkodierer wurden die systemrelevanten Längen, Breiten und Höhen des Abwurfbandes sowie die Gerätemitte durch Vermessungsingenieure eingemessen und in der Maschinensteuerung als feste Parameter hinterlegt. Diese werden im 3D-Gerätemodell für die Berechnung der Schüttpunkte sowie zur Berechnung der Fahrspur vom Absetzer verwendet. Für das 3D-Gerätemodell wurden neben den Winkelkodierern auch die Radarsensorpositionen am Abwurfband eingemessen.

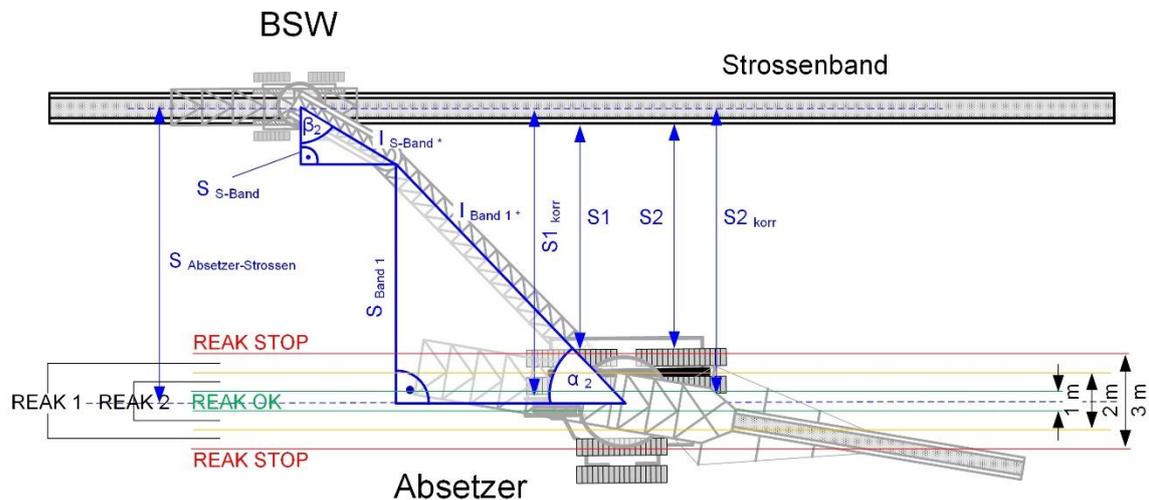
## **2.5 Automatisierungskonzept**

### **2.5.1 Fahrwegsregelung**

Auf Basis der Span- und Schnittiefenautomatik der Baggersteuerung wurde für den Absetzer eine Fahrwegsregelung entwickelt. Der zurückgelegte Weg bei konstanter Fahrgeschwindigkeit auf ebenem Planum wurde für eine definierte Strecke ermittelt und der Anzahl von Drehimpulsen (Ist-Drehzahl) der Fahrwerksmotoren zugeordnet. Diese Erfassung stellte sich als hinreichend genau dar, ist robust und bereits erprobt. Aus der Automatiksteuerung werden somit je Schritt entsprechende Fahrziele in Metern dem Fahrwerk vorgegeben, der Sollwert zwischen 2 Kegeln in der Betriebsart Stützrippe beträgt beispielsweise 3,2 m.

## 2.5.2 Absetzerfahrspurregelung

Über das Gerätemodell der bereits bisher bestehenden Übergabeautomatisierung wird die Verdrehung der Fahrachse zur Bandanlage ermittelt (Ist-Wert). Durch gezielte Lenkimpulse wird diese so korrigiert, dass sich als Ist-Wert für die Fahrachse wieder eine Parallele zur Bandanlage ergibt.



**Bild 6:** Messung Abstand: Absetzer <- -> Bandanlage / Stellung Unterbau

Hierfür wird ein eigens entwickelter kaskadierter Zweipunktregler verwendet, die maximale Abweichung der Fahrspur von ca. +/-50 cm ist zufriedenstellend. Mechanische Lose im Raupenlenkungsantrieb, die berechneten Erfassungen, ein unebenes Planum sowie lose Ketten stellen hier die Störgrößen dar. Eine Abstandserfassung zur Bandanlage mittels Sensorik wäre systembedingt sehr aufwendig und damit teuer geworden.

## 2.5.3 Programmsteuerung

Wie bereits zuvor beschrieben, basiert die Programmsteuerung der ALD auf einer Schrittkettenprogrammierung. In dieser sind die verschiedenen Kippfiguren (siehe Abschnitt 2.1) fest im Programm hinterlegt und werden über eine Parameterschnittstelle mit Einstellwerten versorgt, so können situative Anpassungen übergeordnet vorgenommen werden. Störungen aus den Subsystemen, die einen Schrittwechsel der ALD-Programmsteuerung verhindern, führen zur automatischen Unterbrechung der Kette, alle Anstellantriebe werden angehalten und der Förderweg nach einer Leerlaufzeit für den Absetzer stillgesetzt.

Nach Behebung der Störung kann die automatische Lössdeponierung über das Bedienbild (vgl. Bild 9) im Hauptführerstand fortgesetzt werden, vorausgesetzt die Gerätestellung ist unverändert geblieben oder wurde manuell auf Basis der Parameter des „letzten Schrittes“ wiederhergestellt.

Die Schütthöhenerfassung wurde in einem übergeordneten Modul abgebildet. Dazu werden die beiden vorderen Radarsensoren verwendet, die seitlich auf den gekippten Kegel schauen. Wird der für die Schütthöhe definierte Wert erreicht (vgl. Bild 5), müssen die Signale beider Radarsensoren  $\leq$  dem zugeordneten Wert entsprechen, nun wird in den

nächsten Schritt gewechselt. Dieses Modul wird je Betriebsart mit spezifischen Parametern beschaltet.

Begonnen wird immer in der Betriebsart Stützrippe, hier werden ausgehend von einer vorhandenen Stützrippe Richtung Front in Summe 10 Kegel hintereinander parallel zur Bandanlage gekippt. Der Absetzer wird je Kegel um ca. 3,2 m rückwärtsgefahren. Nach diesen 10 Kegeln wird die Stützrippe durch mehrfaches Rechtsschwenken (je Schritt um 2°) Kegel für Kegel zu geschwenkt (vgl. Bild 7).



**Bild 7:** Automatischer Wechsel aus der Stützrippe an den Anschluss Vorplanum

Nach der Betriebsart Stützrippe wechselt der Absetzer automatisch durch eine Vorwärtsfahrt, verbunden mit einem Linksschwenken, an die Ausgangsposition der Stützrippe, versetzt um einen Kegel nach innen (vgl. Bild 7). Nun wird das Vorplanum (Becken) Kegel für Kegel durch Schwenkschritte befüllt. Die Böschungserkennung für den Umschwenk erfolgt aus dem Vergleich der beiden vorderen Radarsensoren vor und nach einem Schwenk. Sind die beiden Werte nach einem Schwenk annähernd gleich, bedeutet dieses, dass die Böschung erkannt wurde, der Absetzer wird um einen Schritt rückwärtsgefahren und der Abwurfleger schwenkt nach links. Unterschreitet der seitliche Radarsensor dabei den Abstand 7,5 m, bedeutet dieses ein betriebliches Stillsetzen zur Verhinderung einer Kollision zwischen der Böschung und dem Abwurfleger, die ALD geht in Pause. Der linke Umschwenk (Stützrippenseite) erfolgt nicht über die Radarsensoren, sondern über den zuvor gespeicherten Grenzwinkel der Schwenkwinkelautomatik (wird dynamisch angepasst).

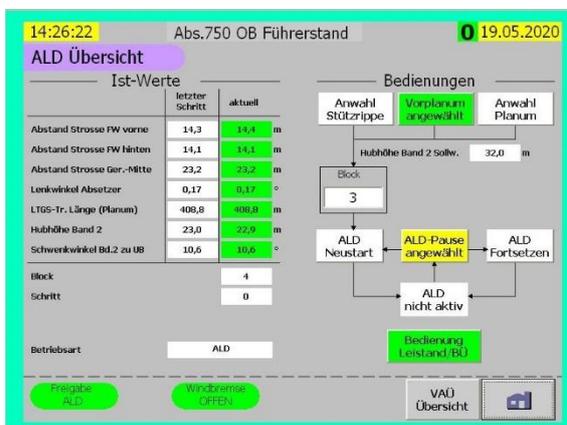
Nach der Betriebsart Vorplanum wechselt der Absetzer automatisch durch eine Vorwärtsfahrt, verbunden mit einem Linksschwenken (vgl. Bild 8) und Heben des Abwurflegers, an die berechnete Startposition für das Planum. Nun wird das Planum ebenfalls Kegel für Kegel durch Schwenkschritte befüllt, danach wechselt der Absetzer automatisch wieder in die Betriebsart Stützrippe und fährt automatisch in den Folgeblock.



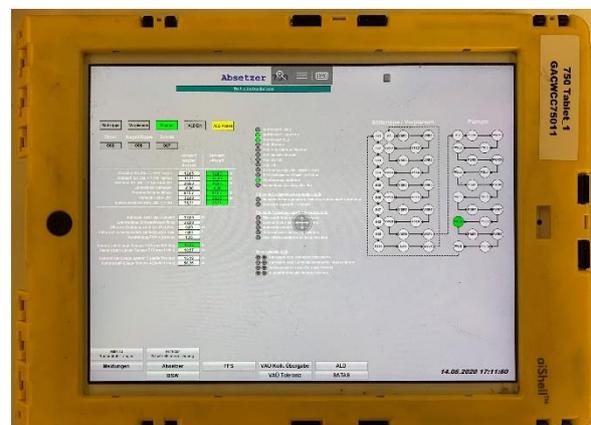
**Bild 8:** Automatischer Wechsel aus dem Vorplanum ins Planum

## 2.5.4 Anlagenvisualisierung

Im Hauptführerstand wurde ein Bedienbild (vgl. Bild 9) zum Starten und Stoppen des automatischen Prozesses sowie der Anwahl der Betriebsarten und Darstellung der Betriebsparameter implementiert. Zudem werden die erweiterten Betriebsparameter (vgl. Bild 11) und die Schrittkettenprogrammierung in dem vorhandenen Visualisierungssystem WinCC des Absetzers abgebildet. Die Darstellungsform der Schrittkette (vgl. Bild 12) wurde erst im Rahmen der Fehlerbehebung während der Optimierungsphase umgesetzt und stellte sich für die Fehlersuche als praktikables Werkzeug dar. Dieses erleichtert im Weiteren die Entstörung durch das Instandsetzungspersonal im operativen Leistungsbetrieb und war auch für die kontinuierliche Verbesserung der Steuerprogramme bei den Inbetriebnahmen eine wertvolle Hilfe. Zusätzlich wurden für den Prozessbeobachter im Rahmen des Test- und Probetriebs die relevanten Informationen der Automatisierungen auf einem mobilen WLAN-iPad dargestellt (vgl. Bild 10).



**Bild 9:** ALD-Bedienbild im Führerstand



**Bild 10:** Mobile Inbetriebnahmeunterstützung

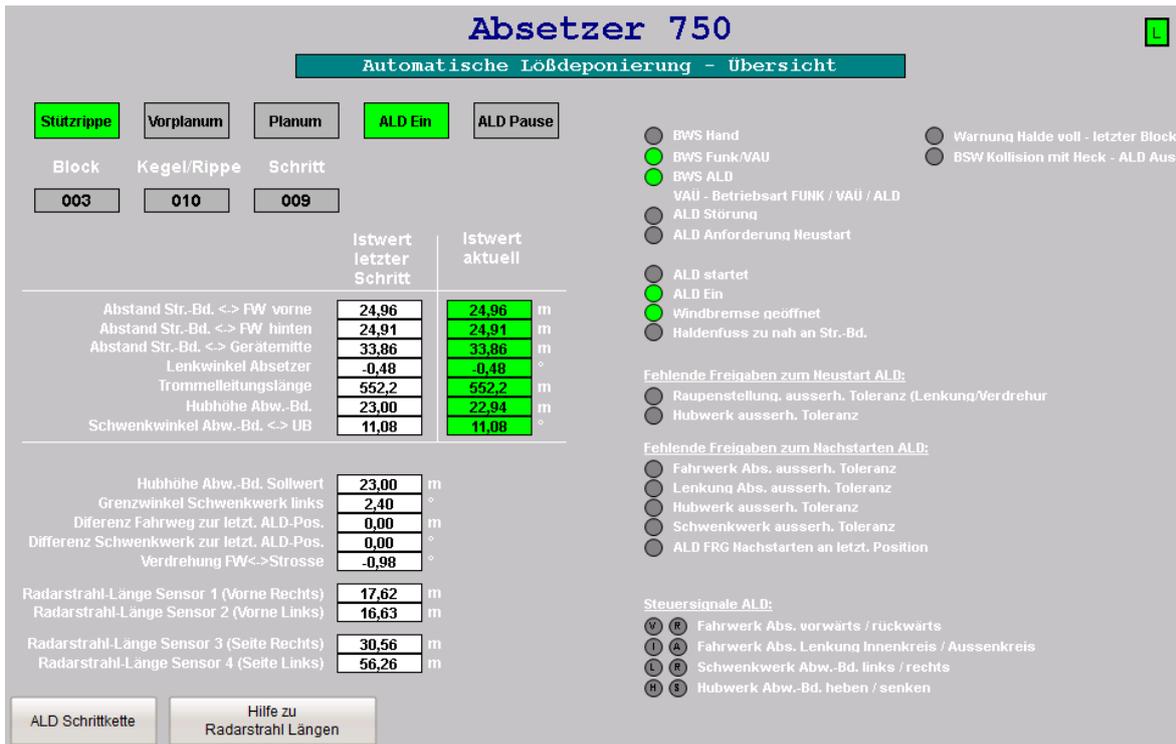


Bild 11: Visualisierung ALD-Übersicht mit Messgrößen und Bereitschaftsmeldungen

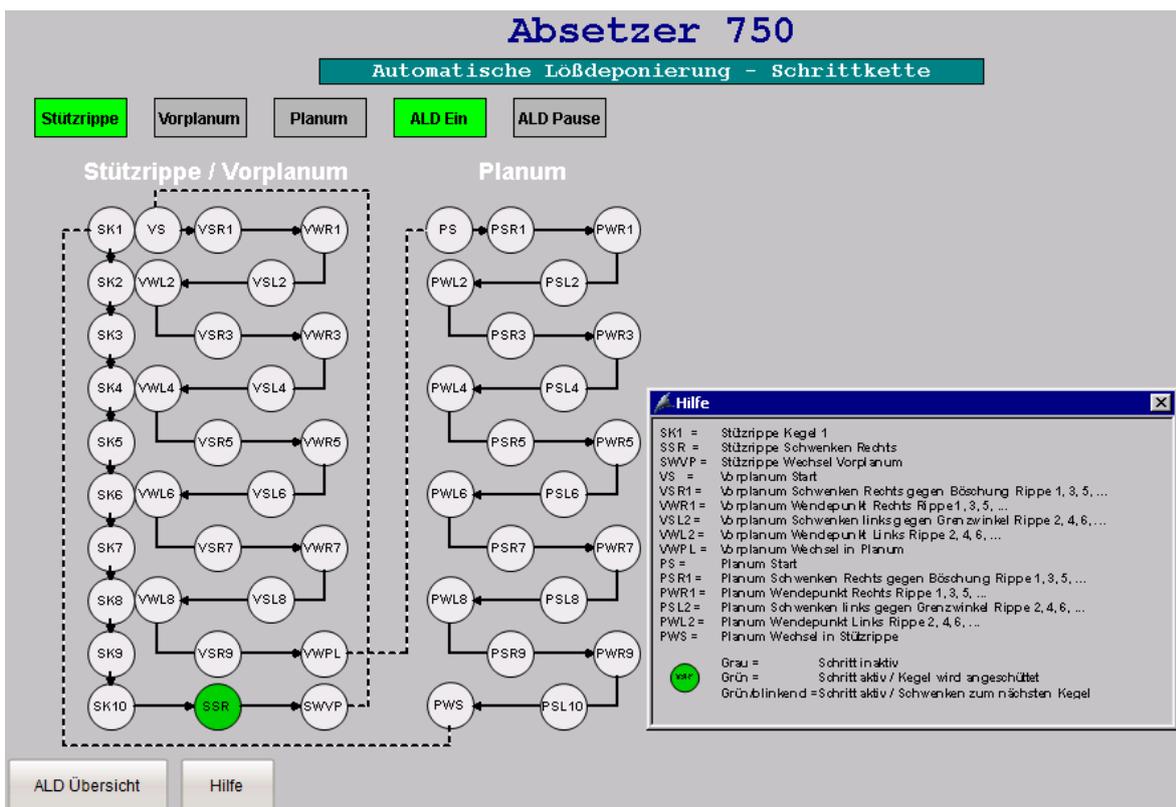


Bild 12: Visualisierung der Schrittkettenprogrammierung, Anzeige je Schritt

## 2.6 Implementierung und Optimierung

Die Montageorte der Radarsensoren wurden vor Ort grob festgelegt und anschließend in der mechanischen 3D-Konstruktion positioniert und überprüft. Danach erfolgt die finale 3D-Konstruktion der Sensorhalterungen. Einstellwerte der Sensoren (Neigung und Winkel) konnten somit für die Einstellung der Sensoren ermittelt werden.

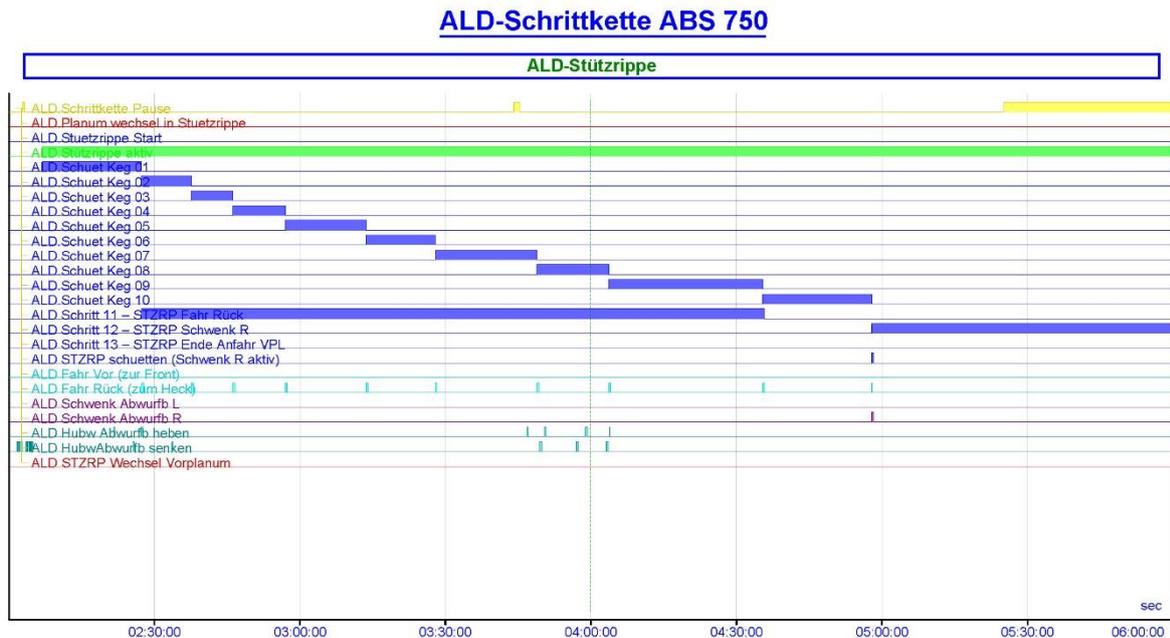
Die Hardwareausrüstung und das Laden der Systemsoftware erfolgten im Rahmen von Planstillständen. Hier wurden ebenfalls die Sensoren montiert und grob eingestellt. Die finale Sensoreinstellung erfolgte im Rahmen von Sonderstillständen, die zeitweise mit Förderung verbunden waren, um definierte Kegelhöhen zu kippen.

Abweichend zur Vorgehensweise bei der Softwareentwicklung der TAIL Absetzer-Übergabeautomatisierung [4] wurde aufgrund der Einmaligkeit dieses Projektes und den damit verbundenen hohen Kosten auf die Abbildung der Maschinensteuerung in einer Simulationsumgebung verzichtet. Betrieblich wird der Absetzer 750 nur zur Lössdeponierung verwendet bzw. bei Ausfall eines anderen Absetzers als Ersatzabnehmer. Erprobungen der ALD-Software konnten somit vor Ort ohne Materialförderung durchgeführt werden. Zur zeitlichen Optimierung dieser Erprobungen wurden Hilfsfunktionen eingebaut, um die einzelnen Schritte zeitoptimiert durchfahren zu können. So konnten vor Ort eine Vielzahl an Fehlerursachen aus der ALD-Software sowie den Subsystemen effizient gefunden und behoben werden.

Die Inbetriebnahme- und Optimierungsphase ist dabei durch die Firma Siemens als Systemintegrator gemeinsam mit den RWE-Projektverantwortlichen und den Kunden (Gerätemannschaft) vor Ort durchgeführt worden. Lösungen und konzeptionelle Anpassungen - insbesondere in der Bedienung und Visualisierung - wurden agil und flexibel vor Ort direkt mit den Produktionsmannschaften besprochen und erprobt.

Für die Inbetriebnahmephase wurde zum Starten und Anwählen der verschiedenen Betriebsarten ein Bedienbild erstellt (vgl. Bild 9), welches im Weiteren durch eine Fernbedienungsmöglichkeit aus dem Leitstand ergänzt wird. Vorteil dieser Vorgehensweise war, dass zunächst eine Prozessstabilität vor Ort ohne zeitliche Bindung des Leitstandspersonals hergestellt werden konnte. Zusätzlich wurden die Inbetriebnahme sowie der Testbetrieb durch mobile Anzeigen der Visualisierungsbilder auf einem iPad unterstützt. Fehler konnten somit schnell erkannt, reproduziert und gelöst werden. Zudem haben die Bedien- und Visualisierungsbilder während des Test- und Probetriebes zum Prozessverständnis bei den Produktionsmitarbeitern beigetragen.

Der Automatikbetrieb wird kontinuierlich durch Messschriebe (iBA-Analyzer) erfasst und täglich mittels eines automatischen Reports ausgewertet. Dadurch können die Fehlerquellen aus den Subsystemen gezielt analysiert und behoben werden. Aktuell sind dies insbesondere noch Fehler aus den Subsystemen, die während der automatischen Wechsel zwischen den Betriebsarten auftreten.



**Bild 13:** Messreport Schritt看ette Stützrippe mit 10 Kegeln

Beispiele für bereits gefundene Fehlerquellen und deren Lösung sind:

1. Trockener Löss hat sich windrichtungsabhängig in den Bündelungstüllen der Radarsensoren angesammelt, welches zu Messfehlern führte. Zur Behebung dieser Ursache wurde an die vorhandenen Spülluftanschlüsse der Radarsensoren getrocknete Druckluft aus dem vorhandenen Luftversorgungssystem des Absetzers angeschlossen, die bei Förderung in regelmäßigen Abständen die Bündelungstüllen der Radarsensoren automatisch frei bläst.
2. Häufige Kollisionsschutzabschaltungen der automatischen Lenkung des BSWs durch ein sehr enges Lichtraumprofil des Fahrwerks zur Bandanlage konnten durch Austausch der Endlagenbegrenzungen in Kollisionsschutzkämme erzielt werden.

## Zusammenfassung

Die Inbetriebnahmen der Automatikfunktionen für den Lössbetrieb sind bis auf wenige Restpunkte abgeschlossen. Im Rahmen der Inbetriebnahmen der letzten Monate konnten bereits wesentliche Optimierungen für einen möglichst störungsfreien Betrieb umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang wurden auch bereits die Bedienmannschaften über den neuen Prozess (Startposition des Gerätes herstellen und Automatik aktivieren) unterwiesen. Seit Mitte 2020 läuft der begleitete Testbetrieb. Die Besatzung beobachtet dabei den Testbetrieb und greift im Bedarfsfalle ein. Das Fehlerverhalten wird dokumentiert und dient zu weiteren Optimierungen. Beispiele für weitere Optimierungen sind neben den bereits genannten z. B. eine Verbesserung der Genauigkeit der Fahrspurregelung durch GPS-Informationen und das Beheben der Fehler aus den Subsystemen, die im Rahmen von Wechseln zwischen den Betriebsarten auftreten. Abschließend werden im vierten Quartal 2021 die Einschaltung der Automatik sowie die Kamerabilder im zentralen Leitstand des Tagebaus aufgeschaltet. Ziel ist es, Ende 2021 mit dem Regelbetrieb der automatischen Lössdeponierung zu starten.

**Quellenverzeichnis:**

- [1] Walter, K. H.; Ballmann, S.: Fahrerloser Förderbetrieb der Haldengeräte im Bunker Fortuna. In: World of Mining, 2003, Ausgabe 55, S. 356 – 377
- [2] Ballmann, S.; Hardt, F.-P.; Kulik, L.: Automatisierungsprojekte an den Großgeräten im Tagebau Hambach. In: Bergbau, 2004, Ausgabe 55, S. 108 – 114
- [3] Pelzer, W.; Jacobs, H.: Fahrerloser Förderbetrieb von Bandschleifenwagen auf Raupenfahrwerken bei RWE Power AG. In: World of Mining, 2005, Ausgabe 57, S. 103 - 112
- [4] Stamm, N.; Piecha, S.; Ballmann, S.: Stand der Großgeräteautomatisierung am Beispiel des Tagebaus Hambach. In: World of Mining, 2018, Ausgabe 70, S. 334 – 345



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

# Leichtbaukonzepte am Beispiel von Kranen und Schiffsentladern für den Güterumschlag in Hafenanlagen

Floris Johannes Piso

Rolf Kamps

---

Lucerne University of  
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE  
LUZERN**

Technik & Architektur

Floris Johannes Piso, M. Sc. Eng.

Prof. Dr.-Ing. Rolf Kamps

Hochschule Luzern

Technikumstrasse 12

CH-6048 Horw



# Leichtbaukonzepte am Beispiel von Kranen und Schiffsentladern für den Güterumschlag in Hafenanlagen

*Die weltweite Marktentwicklung, die Internationalisierung der Unternehmen, die Wahl von Produktions- und Fertigungsstandorten sowie steigende Material- und Energiekosten erfordern einen sparsamen Umgang mit Ressourcen. Der Leichtbau als eine Möglichkeit, Material-, Transport- und Energiekosten zu sparen, ist hier eine der Möglichkeiten, die frühzeitig im Produktentstehungsprozess diese Kriterien berücksichtigt. Dieser Beitrag stellt Ergebnisse einer Untersuchung dar, in der ausgehend von bionischer Inspiration Geometrien und Bauweisen berechnet wurden. Ziele dieser Untersuchung sind Gewichtsreduzierung und Minimierung der Windlasten bei der Konzeptentwicklung von Kranen und Schiffsentladern für den Güterumschlag in Hafenanlagen.*

## 1 Einleitung

Hafenliegekosten können je nach Hafen und Größe des Schiffes 40.000 bis 50.000 € pro Tag erreichen. Um die Liegekosten möglichst gering zu halten, müssen Schiffe in möglichst kurzer Zeit be- und entladen werden. Dies erfordert immer leistungsstärkere Be- und Entladetechnik. Große Hafenkrananlagen und Schiffsentlader werden häufig in Nähe ihres Einsatzortes gefertigt und können bis über 600 t wiegen. Dieses enorme Gewicht muss von den Hafenkaimauern gestützt werden. Hier werden Lösungen notwendig, die Leistungssteigerungen bei minimalem Gesamtgewicht der Anlagen realisieren können. In der Regel werden die Portale und Ausleger in Gitterbauweise als Schweißkonstruktionen geplant und in lokalen Stahlbaubetrieben gefertigt. Bild 1 zeigt einen modernen Hochleistungsschiffsentlader der Fa. Bühler AG in Uzwil mit einer Entladeleistung von bis zu 1.300 t/h.



**Bild 1:** Typischer Aufbau eines Schiffsentladers [Bühler AG Uzwil]

## 1.1 Leichtbaustrategien

Leichtbau ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft. Die Technische Mechanik als eine der alten Wissenschaften wirkt zusammen mit den Werkstoffwissenschaften, den modernen Fertigungsmöglichkeiten und nicht zuletzt der Rechenleistung heutiger Computer. Sauer [Sau-2018] beschreibt folgende Strategien, wie Leichtbauziele erreicht werden können. Hier werden, um einige zu nennen, der Konzept-, System- oder Funktionsleichtbau, der Formleichtbau oder konstruktive Leichtbau, der Stoffleichtbau oder Fertigungsleichtbau aufgeführt. Klein [Kle-2013] beschreibt darüber hinaus Leichtbauweisen wie die Differentialbauweise, die Integralbauweise, die Integrierende Bauweise, die Verbundbauweise sowie die Vollwand- und Schalensysteme.

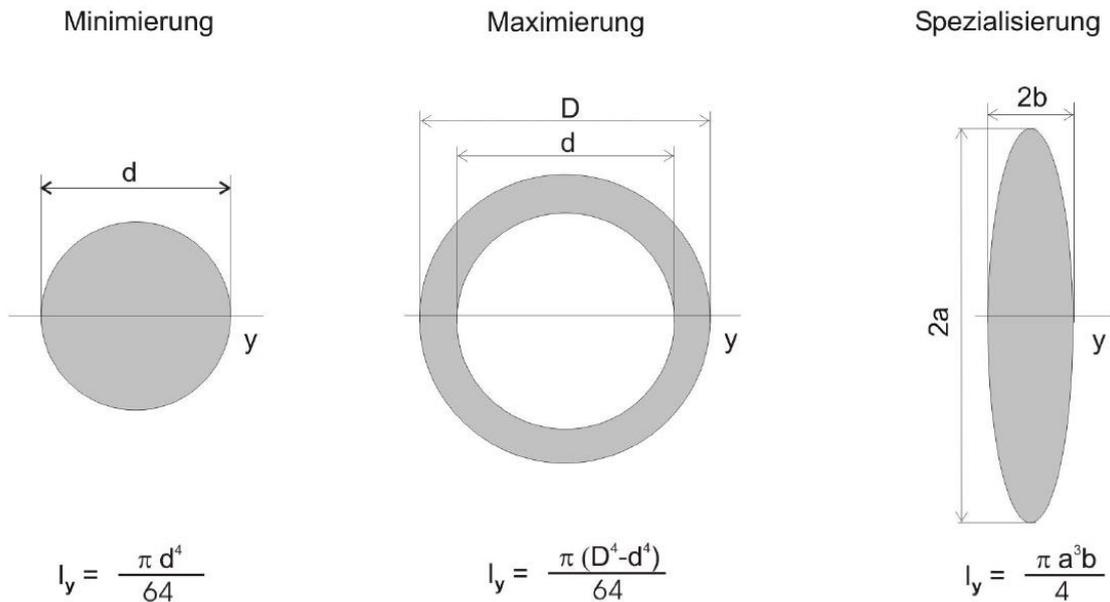
## 1.2 Neuartige Ansätze für den bionischen Leichtbau

In diesem Beitrag werden Leichtbaukonzepte basierend auf Grundideen bionischer Vorbilder untersucht. Nachtigall [Nac-2002] unterscheidet die Begriffe technische Biologie und Bionik. Nachtigall schreibt: „Von Bionik kann immer dann gesprochen werden, wenn die Anregungen aus der Natur gekommen sind.“ Im Verlaufe der Untersuchungen wurden, basierend auf Grunduntersuchungen von Maier [Mai-2015], Vorbilder aus der Natur, hier Radiolarien und Diatomeen, untersucht und als Ausgangsmodelle für umfangreiche Topologie-Untersuchungen verwendet. Dieser Ansatz wurde mit dem Ansatz nach Kappel [Kap-2007] und Mattheck [Mat-2017] verknüpft. Mattheck und Kappel beschreiben einen Ansatz „Denken in Seilen“, in dem die Knicklast bei dünnwandigen Druckstützen mit „Seilen“ erhöht werden kann.

## 1.3 Bionischer Leichtbau aus Sicht der Überlegung: «Denken in Seilen»

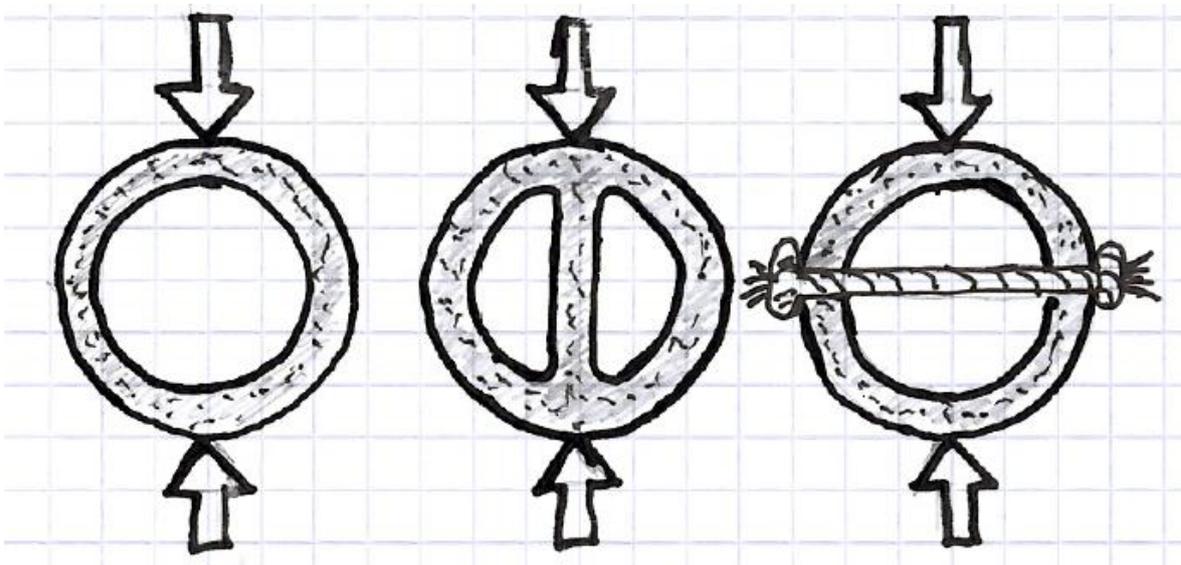
Ohne auf die mechanischen Grundlagen zur Bewegung und Verformung von Körpern unter Einwirkung von Kräften hier im Detail einzugehen, kann festgestellt werden, dass ein ideales Seil ein Konstruktionselement zur Übertragung reiner Zugkräfte ist [vergl. Kap-2007 S7ff]. Biege- und Drucksteifigkeit können nicht übertragen werden. Im idealen Zugseil sind reine Zugspannungen homogen über den Seilquerschnitt verteilt. So kann eine optimale Querschnittsbelastung erreicht werden.

Die Steifigkeit von Bauteilen stellt einen Zusammenhang zwischen aufgebrachten Belastungen und den daraus resultierenden Spannungen und Verformungen dar. Hier wird nach aufgebrachtem Lastfall zwischen Zug, Druck, Biegung, Schub (Scherung) und Torsion unterschieden [Löp-2016]. Wird ein schlanker Stab mit Druckkräften beaufschlagt, versagt er meist schon vor Erreichen seiner Materialdruckfestigkeit durch Ausknickung. Hier spielt das Flächenträgheitsmoment des Stabes eine massgebliche Rolle für die Biegesteifigkeit. Das Flächenträgheitsmoment nimmt mit Abstand zur Biegeachse zu. Kreisrunde Querschnitte besitzen eine nach allen Seiten gleiche Biegesteifigkeit. Die Biegesteifigkeit kann durch die Geometrie bei gleicher Querschnittsfläche optimiert oder spezialisiert werden (siehe Bild 2).



**Bild 2:** Einfluss der Flächenträgheitsmomente auf die Biegesteifigkeit [ Kap-2007]

Rohre versagen in der Regel bei Druck oder Biegung durch eine Querschnittsverflachung. Wird die Querschnittsverflachung durch eine Druckstütze verhindert, muss die Druckstütze vom Querschnitt ausreichend dick sein, um nicht zu knicken. Wird anstelle der Druckstütze ein Zugseil quer zur Lastrichtung gespannt, muss das Seil lediglich gegen Zerreißen ausgelegt werden (Bild 3).



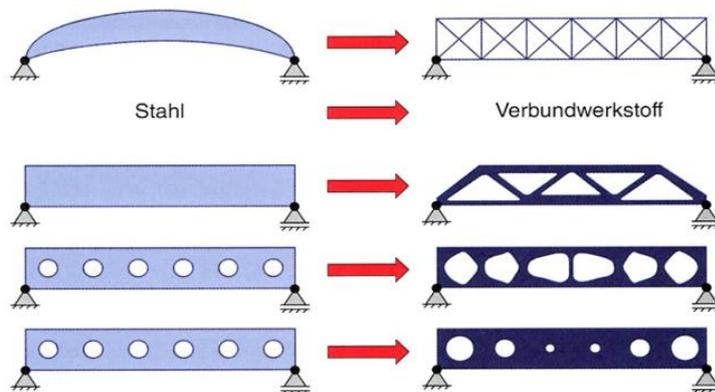
**Bild 3:** Wirkungsweise eines Zugseiles im Rohrquerschnitt (vergl. [Kap-2007])

Dieser Ansatz wurde bei der Gestaltung von schlanken Druckstäben sowohl bei der Auslegung des Portals als auch bei der Gestaltung des Auslegers berücksichtigt.

## 1.4 Konzeptbildung

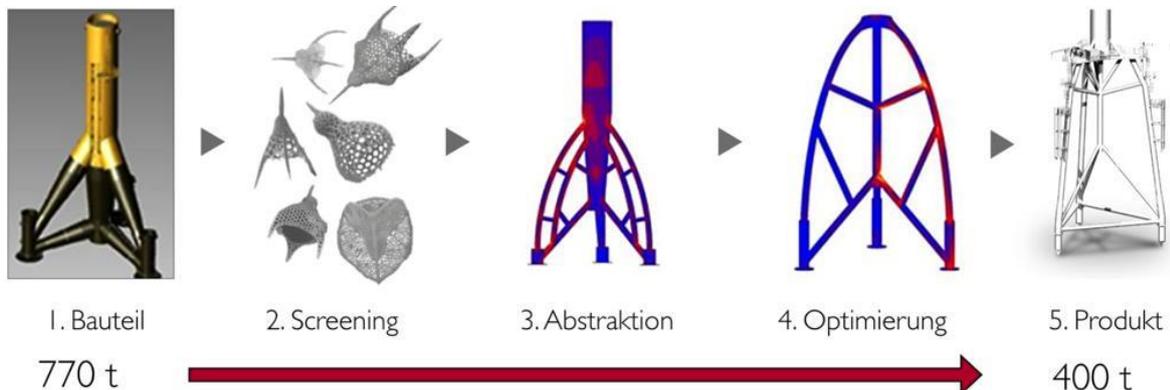
Strukturoptimierungen können in fünf Gruppen mit unterschiedlichen Optimierungscharakteristiken eingeteilt werden (Bild 4) [vergl. [Ben-2004], [Sch-2013]. Folgende Gruppen werden als Optimierungsdisziplinen genannt:

- Wahl der Bauweise
- Wahl der Materialeigenschaften
- Topologie Optimierung
- Formoptimierung
- Dimensionierung (sizing)



**Bild 4:** Fünf Optimierungsdisziplinen (vergl. [Sau-2018])

Die Forderung, dass das neue Konzept nicht in Profil-, sondern in Blechbauweise herstellbar sein muss bedeutete, dass die klassische Gitterbauweise verlassen werden konnte. Bei der Topologie Optimierung wurde der Ansatz von Maier (Bild 5) [Mai-2015] als Ausgangsansatz gewählt.



**Bild 5:** Vorgehensweise bei der Methode Evolutionary Light Structure Engineering ELISE® (vergl. VDI-Richtlinie VDI 6224 Blatt 3 [VDI 2017])

Maier beschreibt in seiner Dissertation die Vorgehensweise zur Auffindung und Bewertung bionisch geeigneter Vorbilder. Hier werden insbesondere Radiolarien und Diatomeen untersucht. Ausgewählt wurden Radiolarien mit Geometrien, die in etwa den Belastungsfall und die Kräfteinleitungs- und Lagerreaktionskräfte darstellen können.

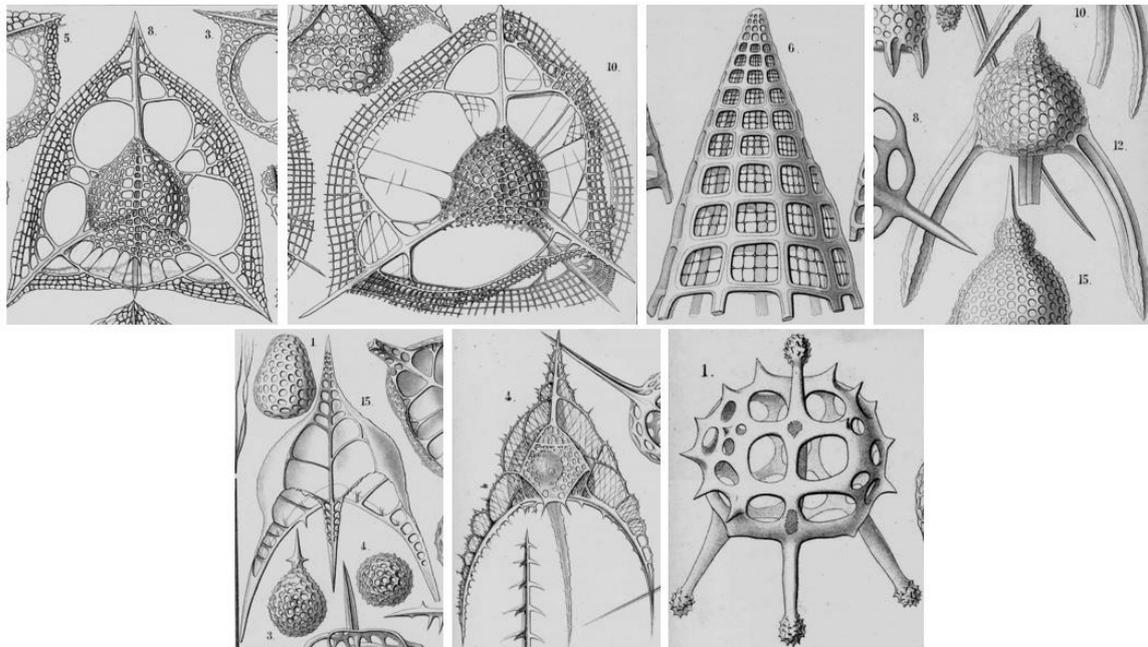
Die gefundenen Geometrievorschlüsse innerhalb der Radiolarien Bauräume als zugelassene Suchräume für Topologie-Programme wurden anschließend mit dem Ansatz von Kappel und Matheck kombiniert. Hier werden den dünnen Druckstäben Versagensrichtungen vorgegeben bzw. die Biegesteifigkeit so ausgelegt, dass eine klare

Versagensrichtung gegeben ist. Der Versagensgrund durch Querschnittsverflachung bzw. die weitere Ausknickung wurden dann aber durch Zugseile verhindert. So entstand ein Konzept aus dünnen Druckstäben mit Zugseilen.

Zur Topologie-Geometriefindung wurden die Softwareprogramme der Autodesk Fusion Generative Design, Topopt (DTU) und Ansys angewendet und die Ergebnisse verglichen.

#### 1.4.1 Vorgehen bei der Betrachtung des Portals

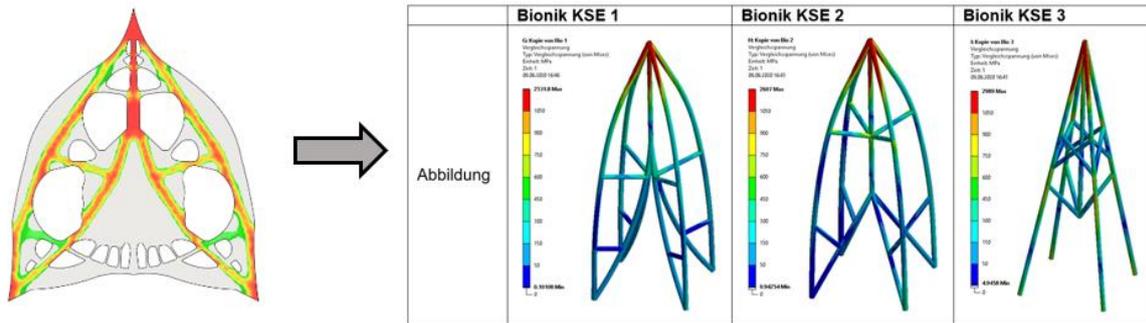
Wie bereits beschrieben, basiert die Vorgehensweise darauf, dass das natürliche Vorbild mit einer Topologie-Optimierung vereint wird. Als Ausgangsgeometrie wurden nur die Strukturelemente der Eukaryoten verwendet, die für einen spezifischen Lastfall relevant sind. Dafür wird in einem zwei- oder dreidimensionalen Raum eine Radiolarie oder Diatomee als Vorbild hinterlegt. Der Algorithmus der Topologie-Optimierung versucht, basierend auf den Lagerungen und Lasten, sich dem natürlichen Vorbild anzunähern. Dabei wird ein Schärfegrad  $\lambda$  eingeführt, welcher die Detailgenauigkeit des natürlichen Vorbildes darstellt [Mai-2015].



**Bild 6:** Wirkungsweise oben, von links nach rechts:  
Clathrocorys murrayi, Clathrocorys teuscheri, Plectopyramis dodecomma, Lychnocanium fortipes;  
unten, von links nach rechts:  
Pteroscenium pinnatum, Pteroscenium arcuatum, Tripospyris capitata [Bio-2020]

Da für das Screening keine Datenbank vorhanden ist, wird auf Zeichentafeln von Ernst Haeckel zurückgegriffen (Bild 6). Dabei wird vor allem darauf geachtet, dass die Radiolarienstruktur nutzbar für die Konstruktion des Portals ist, Auflager- und Kraft-einleitungspunkte besitzt.

Das Ergebnis der Simulation liefert die Bereiche der Radiolarien, die für den Lastfall benötigt werden. Auf diese Weise wird das Vorgehen von Maier näherungsweise kopiert. Die Darstellung (Bild 7 links) zeigt auf, wie hoch die Relevanz der einzelnen Bauteilbereiche im Hinblick auf die Belastung ist. Aus den Ergebnissen werden durch Abstraktion Strukturen entwickelt, die sich in Blechbauweise darstellen lassen (Bild 7 rechts).



**Bild 7:** Entwicklung der Portal Geometrie [Pis-2020]

Diese Konzepte wurden dann mit dem Ansatz von Kappel und Mattheck erweitert. Druckstäben wurde eine Versagensrichtung vorgegeben und dort, wo möglich, Zugseile verwendet. Abschließend wurde das gesamte Bauteil mit einer Spannungsanalyse mit dem Softwareprogramm Ansys berechnet.

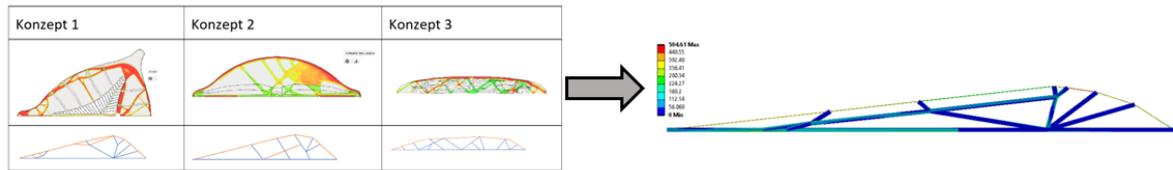
#### 1.4.2 Vorgehen bei der Betrachtung des Auslegers

Analog wurde der Ausleger betrachtet. Dies bedeutet, dass für den Ausleger nach natürlichen Vorbildern mit einem minimalen Breite- zu Längenverhältnis gesucht werden muss (Bild 8).



**Bild 8:** Bionische Vorbilder für den Ausleger [Hae-2015]

Die Simulationen der Hauptspannungsvektoren zeigen die Zug- und Druckbelastungsrichtung der Diatomeen und des Kalkschwammes unter der Berücksichtigung des adaptierten Maximallastfalles (Bild 9). Für alle Simulationen wird deutlich, dass die Zugspannungen jeweils an den Rändern gegenüber zur Belastungsrichtung dominant sind. Die Diatomee *Triceratium moronense* ist im Vergleich zu den anderen Modellen zugdominant. Die Hauptspannungsvektoren in Zugrichtung überwiegen, wodurch dieses natürliche Vorbild am besten zum Kriterium der Zug- und Druckverteilung passt. Aus der Topologie-Optimierung wurde wie beim Portal eine Blechkonstruktion abstrahiert und anschließend mit der Software Ansys eine Spannungsanalyse durchgeführt.



**Bild 9:** Entwicklung der Auslegergeometrie [Pis-2020]

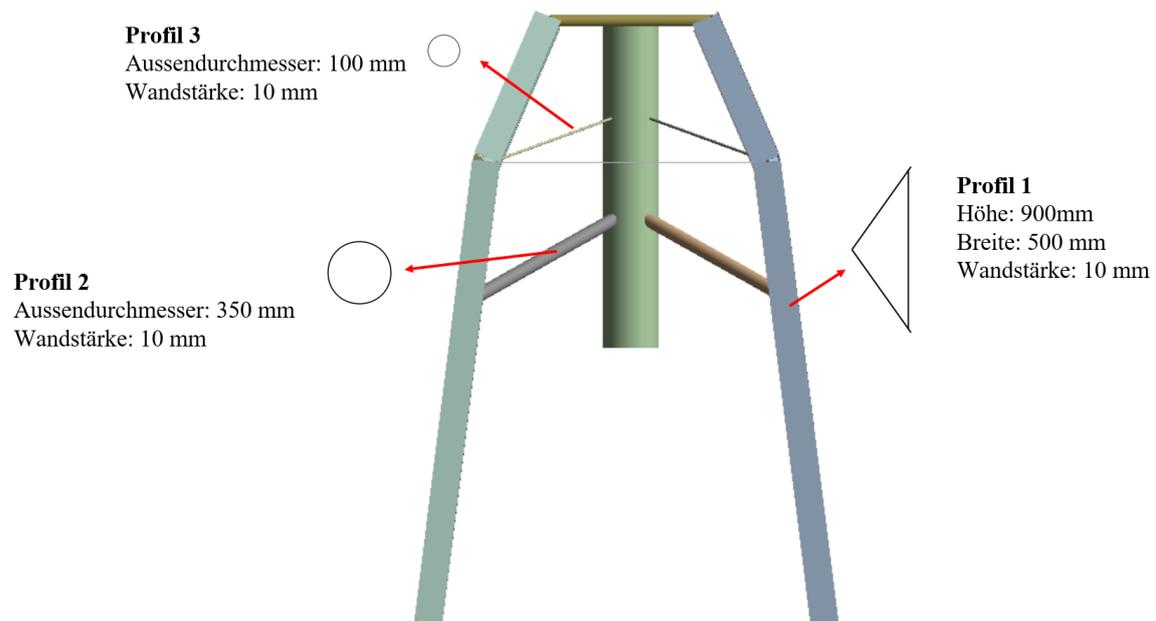
Die Geometrie wurde hinsichtlich Windlast (Oberfläche) und Gewicht optimiert. Hierzu wurden Evolutionsalgorithmen eingesetzt.

## 2 Ergebnisse

Sowohl für das Portal als auch den Ausleger gelten Restriktionen, die eine Adaption der Geometrievorschlüge berücksichtigen müssen. So sind die Bauteilabmessungen, die Aufnahme von Hochleistungsförderelementen, die Beweglichkeit in Hafenanlagen, die sogenannten Kick- und Lupfbewegungen und viele andere Anforderungen zwingend einzuhalten. Dennoch konnten mögliche Konzeptvorschlüge entwickelt werden. Neben den klassischen Ansätzen aus dem Stahlbau wurden auch Ansätze aus dem Bereich der Architektur untersucht [Kni-2019]. Knippers untersucht verzweigte Tragstrukturen nach Vorbild von Baumstrukturen.

### 2.1 Ergebnisse für das Portal

Als Konzept konnte eine einfache Blechkonstruktion entwickelt werden. Die Rohre sind in Schalenbauweise mit Distanzhaltern dem Aufbau von Bambushölzern nachempfunden [vergl. hierzu Kappel 2007].

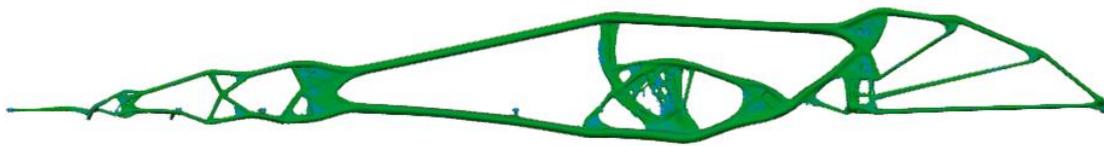


**Bild 10:** Profilquerschnitte eines Portals nach bionischem Vorbild [Pis-2020]

Die Portalstützen sind Blechkonstruktionen mit der Entwicklung von Knickstäben zu Druckbögen. Seile verhindern das Ausbeulen, die Tragfähigkeit und Steifigkeit können so deutlich erhöht werden (Bild 10).

## 2.2 Ergebnisse für den Ausleger

Analog zum Portal wurden ebenso für den Ausleger einfache Blechbauweisen entwickelt. Auch hier sind die Rohrquerschnitte dem Aufbau von Bambushölzern nachempfunden. Der untere Teil des Auslegers ist ein Druckbogen. Die Zugkräfte werden über Seile aufgenommen. Eine Besonderheit bei diesem Konzept ist, dass anstelle der Seilabspannung des Druckbogens das Gewicht des Horizontalförderers verhindert, dass der Druckbogen in die vorgegebene Versagensrichtung ausbeulen kann (Bild 11).



**Bild 11:** Profilquerschnitte eines Auslegers nach bionischem Vorbild [Pis-2020]

## 3 Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine Konzeptbetrachtung. Als Werkstoffe wurden die Stahlsorten S235 und S355 betrachtet. Als Sicherheit wurde mit einer Sicherheit  $\geq 1,6$  gerechnet. Allerdings bleiben die im Kranbau ansonsten üblichen Sicherheiten und Beiwerte weitestgehend unberücksichtigt. In dieser Konzeptstudie sollte nachgewiesen werden, ob sich mit bionischen Leichtbaukonzepten Gewichtsreduzierungen erzielen lassen. Hinzu kommen Forderungen nach der Herstellbarkeit. Die Geometrievorschlüsse aus den Topologie-Untersuchungen lassen sich ohne Abstraktion und Anpassung auf herstellgerechte Fertigungsmethoden eines Stahlbaus nicht herstellen. Hier müssen herstellgerechte Varianten entwickelt und erneut berechnet werden. Gegenüber der Ursprungsvariante lassen sich bei den bereits genannten Einschränkungen der Vorgehensweise bei den Berechnungen in Summe fast 40 % des Stahlbaus an Gewicht einsparen. Auch die Windlastfläche konnte reduziert werden. Hinzu kommt, dass mit der Gewichtsreduktion des Auslegers auch das Gegengewicht reduziert werden kann. Erste Anzeichen, dass die Spannungsschwankungen zwischen maximalen und minimalen Bauteilspannungen kleiner werden, konnten mit dem bionischen Ansatz festgestellt werden. Auf Grundlage dieser Konzeptvorschlüsse sind in weiteren Arbeiten Konzepte und Kranstrukturen zu entwickeln, die dann mit den üblichen Kransicherheiten berechnet werden müssen.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass bionisch inspirierter Leichtbau ein großes Potential aufzeigen kann. Allerdings sind die Topologie-Vorschläge in herstellbare Konstruktionen zu übersetzen. Die Topologie-Software Topopt (DTU) erwies sich als geeignetes Werkzeug für so große Bauteilabmessungen. Ein Hochleistungsschiffsentlader ist bis zu über 30 m hoch und kann eine Auslegerlänge von über 40 m erreichen. Das Topologie-Programm Autodesk Fusion Generative Design konnte hier keine verwertbaren Geometrie-vorschläge berechnen. Die Erweiterung des Ansatzes von Maier mit dem Konzept von Kappel (Denken in Seilen) bringt neue Gestaltungsansätze, die so nicht über die Berechnungsprogramme gefunden wurden. Werden die Bauteile sinnvoll in herstellbare Bauteilgeometrien übersetzt und mit weiteren bekannten Gestaltungsvorschlägen der Bionik ergänzt, wie zum Beispiel die Ausführung der Druckbögen nach dem Prinzip des Bambus oder Schachtelhalms, können erhebliche Gewichtseinsparungen erzielt werden. Diese Untersuchung ist allerdings als Grundlagenbetrachtung zu verstehen, in weiteren Arbeiten müssen die Konzeptvorschläge nach dem Regelwerk für Kransicherheiten überprüft werden.

**Quellenverzeichnis:**

- [Ben-2004] Bendsoe, M. P.; Sigmund, O.: *Topology Optimization (2. Auflage)*; Berlin Heidelberg: Springer, 2004
- [Bio-2020] Biolib.de, Stand 2020, *LEGION III ó NASSELLARIA - Plates 51 to 98*
- [Ham-2015] Hamm, C.: *Evolution of Lightweight Structures Analyses and Technical Applications*; Heidelberg New York London: Springer, 2015
- [Hae-2013] Haeckel, E.: *Kunstformen der Natur* Norderstedt: Vero, 2013
- [Hae-2019] Haeckel, E.: *Kunstformen der Natur* Tafel 31 *Calocyclus*; München: Prestel, 2019
- [Kap-2007] Kappel, R.: *Zugseile in der Natur (Wissenschaftlicher Bericht FZKA 7313)*; Forschungszentrum Karlsruhe, 2007
- [Kle-2013] Klein, B.: *Leichtbaukonstruktion Berechnungsgrundlagen und Gestaltung (10. Auflage)*; Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [Kni-2019] Knippers, J.; Schmid, U.; Speck, T.: *Bionisch Bauen Von der Natur lernen*; Basel: Birkhäuser, 2019
- [Läp-2016] Läßle, V.: *Einführung in die Festigkeitslehre (4. Auflage)*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016
- [Mai-2015] Maier, M.: *Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau (Dissertation)*; Universität Bremen, 2015
- [Mat-2017] Mattheck, C.: *Die Körpersprache der Bauteile Enzyklopädie der Formfindung nach der Natur*; Karlsruher Institut für Technologie, 2017
- [Pis-2020] Piso, F.: *Entwicklung und Verifizierung einer Leichtbaukonstruktion für einen kontinuierlichen Schiffsentlader mit Trogkettenförderer*; Masterthesis, Hochschule Luzern 2020
- [Nac- 2002] Nachtigall, W.: *Bionik Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler (2. Auflage)*; Berlin Heidelberg: Springer, 2002
- [Sau-2018] Sauer, A.: *Bionik in der Strukturoptimierung Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau (1. Auflage)*. Würzburg: Vogel, 2018
- [Sch-2013] Schumacher, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen (2. Auflage)*; Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [VDI 2017] VDI 6224 Blatt 3: *Bionik – Bionische Strukturoptimierung im Rahmen eines ganzheitlichen Produktentstehungsprozesses*. Berlin: Beuth, September 2017

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Mechanische Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken

Tobias Schöneck  
Markus Golder



**FTM**

Dipl.-Ing. Tobias Schöneck (Referent)  
Prof. Dr.-Ing. Markus Golder  
Technische Universität Chemnitz  
Fakultät für Maschinenbau  
Professur Förder- und Materialflusstechnik  
09107 Chemnitz



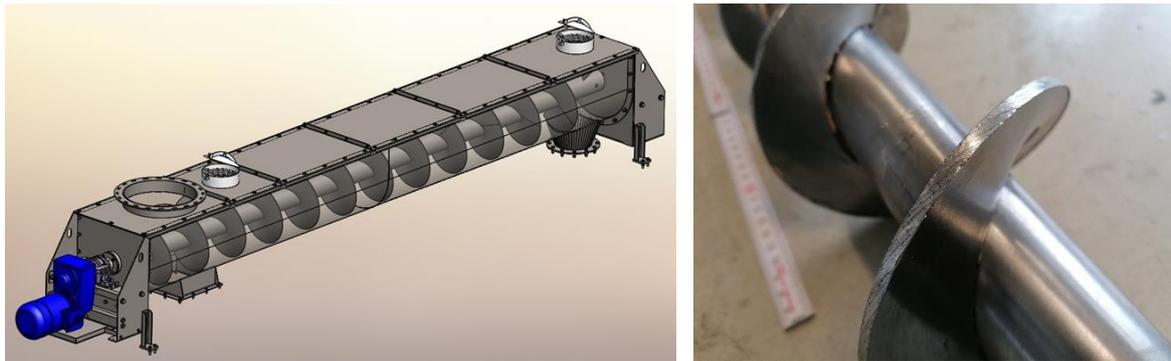
## Mechanische Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken

*In einer Vielzahl von Industriebranchen werden oftmals Schneckenförderer zum Transport von Schüttgütern eingesetzt. Die Anforderungen an deren Konstruktion und Auslegung hängen von den Förderparametern und Schüttguteigenschaften ab. Der Beitrag beschreibt die systematische Analyse von mechanischen Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken mit Hilfe numerischer Simulationen und Parameterstudien. Dazu zählen die Gewichtskräfte der einzelnen Bestandteile, die einwirkenden Kräfte infolge des Förderprozesses und die Förderschneckenengeometrie. Die Relevanz der Durchbiegung liegt in der Kontaktvermeidung zwischen der Schneckenwendel und dem Fördertrog, um plastische Deformationen und zusätzlichen Verschleiß zu unterbinden.*

### 1 Einleitung

Für die Förderung von staubförmigen, feinkörnigen bis stückigen Schüttgütern über kurze bis mittlere Wegstrecken werden Schneckenförderer in vielen Branchen eingesetzt. Dazu zählen u. a. die Roh- und Baustoffindustrie, die Brennstoffindustrie, die Abfallindustrie und die Lebensmittelindustrie. Als etablierte Stetigförderer kommen Schneckenförderer in Form von Transportschnecken, Abzugs- bzw. Austragungsschnecken für die Entleerung von Bunkern und Silos, Verladeschnecken oder Dosierschnecken zum Einsatz. Sie verfügen über einen einfachen und robusten Aufbau sowie eine geringe Störanfälligkeit. Bild 1 (links) zeigt beispielhaft einen Schneckenförderer. [1] [2]

Im Rahmen der Konstruktion und Auslegung ist die VDI-Richtlinie 2330 heranzuziehen. Diese umfasst eine allgemeine Beschreibung von Schneckenförderern und die aktuellen Auslegungsverfahren zur Bestimmung geeigneter Baugrößen und Antriebsleistungen. Des Weiteren stehen die älteren DIN-Normen 15261-1 und 15261-2 zur Verfügung, welche bevorzugte Maße einzelner Konstruktionsparameter empfehlen. Jedoch gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Norm oder Richtlinie, die eine einheitliche Dimensionierung der Förderschnecke als Förderorgan in Abhängigkeit der Belastungen beschreibt. Dadurch erfolgen individuelle und zumeist vereinfachte Berechnungen durch die Hersteller. Als Zielgröße ist die Durchbiegung zu nennen, um einen ausreichenden Schneckenpalt in Abhängigkeit der Eigenschaften des Schüttgutes zwischen der Förderschnecke und dem Gehäuse, dem sogenannten Trog, zu gewährleisten. Der Kontakt beider Komponenten führt zu einem höheren Leistungsbedarf aufgrund der Reibung, zu Deformationen und Verschleiß (siehe Bild 1 rechts). In einzelnen Anwendungsfällen ist der Kontakt sicher zu vermeiden, um das Fördergut nicht zu verunreinigen. [2]

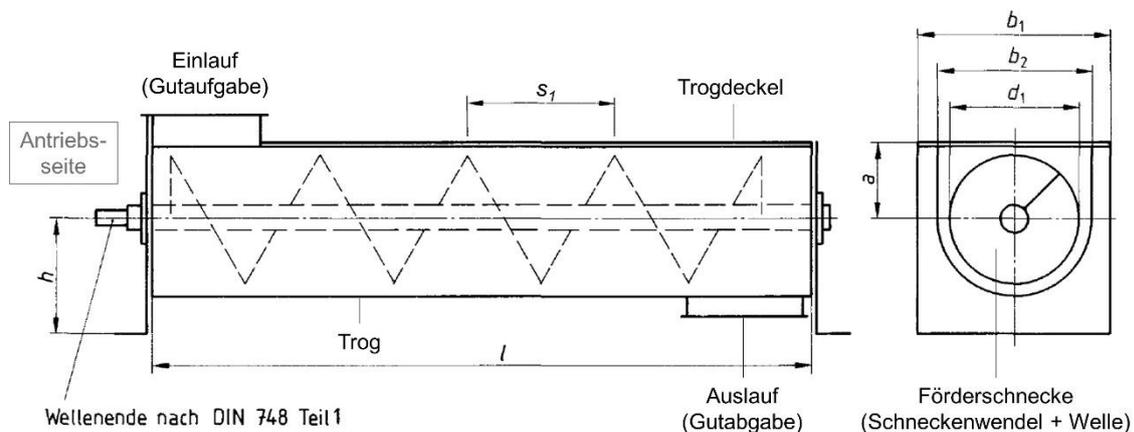


**Bild 1:** Modell eines Schneckenträgerförderers für Schüttgut (links) [3] und deformiertes Schneckenblatt durch kontinuierlichen Kontakt mit der Trogwand während des Betriebs (rechts)

## 2 Stand der Forschung und Technik zu Schneckenträgerförderern

### 2.1 Aufbau und konstruktive Empfehlungen

Schneckenträgerförderer bestehen grundsätzlich aus einem aufgeständerten Trog und einer angetriebenen Förderschnecke, welche sich aus einer Welle und einer aufgeschweißten Schneckenwendel zusammensetzt. Die Förderschnecke ist an beiden Enden gelagert, wobei lange Ausführungen über ein Zwischenlager verfügen können. Bei herkömmlich rieselfähigen, staub- oder feinkörnigen und nicht adhäsiven Schüttgütern kommen Vollschnecken zum Einsatz. Die Herstellung der Schneckenwendel erfolgt entweder einteilig in Form einer gewalzten Schraubenfläche oder mehrteilig über das stirnseitige Verschweißen einzelner Schneckenblätter, welche aus Blechronden geformt werden. Der Trog besitzt einen Einlauf zur Gutaufnahme und am Ende der Förderstrecke einen Auslauf für die Gutabgabe. Durch die kontinuierliche Drehung der Förderschnecke erfolgt über die schraubenförmige Schneckenwendel die Förderung des Schüttgutes zwischen beiden Öffnungen. Bild 2 zeigt schematisch den Aufbau eines Trogschneckenträgerförderers mit der Angabe von relevanten Konstruktionsparametern nach DIN 15261-1 und DIN 15261-2. Dazu zählen der äußere Schneckendurchmesser  $d_1$ , die Schneckenganghöhe  $s_1$ , die Schneckenlänge  $l$ , die Achshöhe  $h$ , das Abstandsmaß  $a$ , die äußere Trogbreite  $b_1$  und die innere Trogbreite  $b_2$ . Hierbei empfehlen die Normen aufeinander abgestimmte Werte. [2]



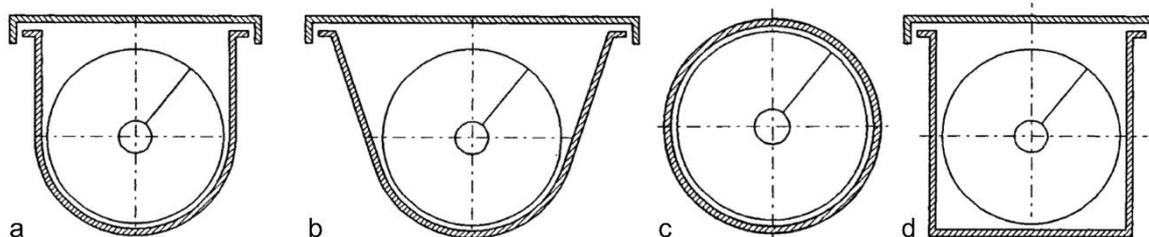
**Bild 2:** Schematischer Aufbau eines Trogschneckenträgerförderers für Schüttgut [nach 4]

In Tabelle 1 sind die Größenempfehlungen für den Schneckendurchmesser  $d_1$  und die Schneckenganghöhe  $s_1$  aufgezeigt. Für die Wertepaare bis zu einem Schneckendurchmesser von 315 mm beträgt das geometrische Verhältnis  $s_1/d_1$  genau 1. Danach erfolgt eine Abnahme. Das Verhältnis hat eine Relevanz bei der Auslegung des Leistungsbedarfs horizontaler bis leicht geneigter Förderschnecken gemäß der VDI-Richtlinie 2330-2. Die Schneckenlänge  $l$  und die innere Trogbreite  $b_2$  sind entsprechend des Anwendungsfalles festzulegen und frei wählbar. Es ist auf einen ausreichenden Schneckenpalt zu achten. [2]

**Tabelle 1:** Empfohlene Schneckendurchmesser  $d_1$  und Schneckenganghöhen  $s_1$  für Schneckenförderer nach DIN 15261-1, DIN 15261-2 und VDI 2330-2 [4] [5] [6]

$d_1$	[mm]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
$s_1$	[mm]	100	125	160	200	250	315	355	400	450	500	560	630
$s_1/d_1$	[-]	1	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,72	0,63	0,56	0,5

Als weiterer Konstruktionsparameter gilt die Blechdicke eines Schneckenblattes bzw. der Schneckenwendel nach DIN 15261-2. Diese kann 1 mm bis 10 mm betragen. Zudem empfiehlt die Norm, die Welle aus einem Vollmaterial mit Durchmessern bis zu 125 mm oder einem nahtlosen Stahlrohr mit Durchmessern bis zu 193,7 mm nach DIN 2448 (heute DIN EN 10220 für nahtlose und geschweißte Stahlrohre aus Baustahl oder DIN EN ISO 1127 für nichtrostende Stahlrohre) zu fertigen. In der Praxis können Abweichungen in Form anderer Blechdicken oder Durchmesser auftreten. Als Werkstoffe für Förderschnecken kommen herkömmliche Baustähle oder nichtrostende Stähle bei Anwendungen in der Lebensmitteltechnik zum Einsatz. Hierbei können größere Wellen aus Kostengründen auch aus einem Baustahl mit einer zusätzlichen Plattierung aus nichtrostendem Stahl auf der äußeren Manteloberfläche des Rohres bestehen. Die baulichen Ausführungen des Troges können halbrundförmig oder rohrförmig sein. Bild 3 zeigt die unterschiedlichen Varianten. Ergänzend ist die Form des Doppeltroges für zwei parallellaufende Förderschnecken zu nennen. Während bei horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderern vorzugsweise ein U- oder V-Trog eingesetzt wird, erfolgt bei vertikalen Schneckenförderern ausschließlich die Verwendung eines Rohrtroges.



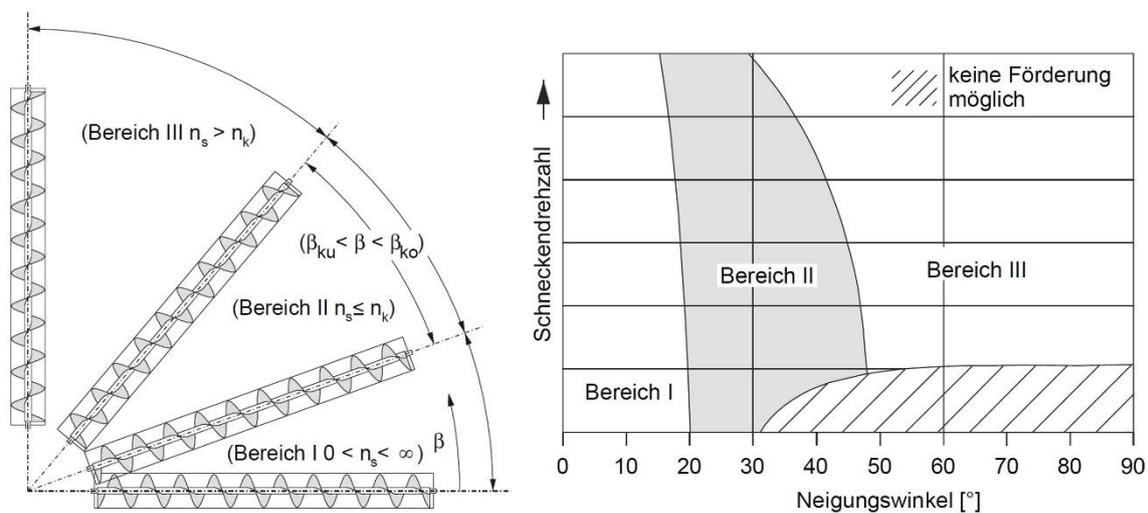
**Bild 3:** U-Trog (a), V-Trog (b), Rohrtrog (c) und scharfkantiger U-Trog (d) als Ausführungen [2]

## 2.2 Förderbereiche und Füllungsgrad

Der Fördervorgang bei Schneckenförderern hängt maßgeblich von der Einbaulage ab. Es erfolgt eine Unterscheidung in drei charakteristische Bereiche. Dazu zählen die horizontale bis leicht geneigte Förderung, die stark geneigte Förderung und die vertikale Förderung. Bei horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderern bis zu einem Neigungswinkel von  $20^\circ$  wird das Schüttgut von der Schneckenwendel am Boden des Troges vorwärtsbewegt. Die axial zurückgelegte Wegstrecke entspricht einer Schneckenganghöhe pro Umdrehung.

Hingegen läuft das Schüttgut bei vertikalen Schneckenförderern mit der Förderschnecke um. Infolge der wirkenden Zentrifugalkräfte verschiebt sich das Schüttgut an die Rohrwand. Wenn die Reibkraft des Schüttgutes am Rohr größer als die Reibkraft des Schüttgutes an der Schneckenwendel ist, tritt eine vertikale Förderung ein. Deshalb müssen derartige Schneckenförderer eine Schneckendrehzahl  $n_s$  oberhalb der kritischen Drehzahl  $n_k$  aufweisen. In Bild 4 werden die drei Bereiche verdeutlicht. Dabei stellt der Bereich II einen Übergangsbereich bis zur kritischen Drehzahl für die vertikale Förderung dar. [2]

Neben der Einbaulage und der damit verbundenen Förderrichtung stellt der Füllungsgrad  $\varphi$  einen relevanten Betriebsparameter dar. Dieser kennzeichnet das Verhältnis zwischen dem zu fördernden Massenstrom und dem theoretisch maximal erreichbaren Massenstrom bei vollständig gefülltem Schneckenförderer. Der Füllungsgrad hängt von den konstruktiven Parametern und von den Schüttguteigenschaften sowie der Fördergeschwindigkeit ab. [1]

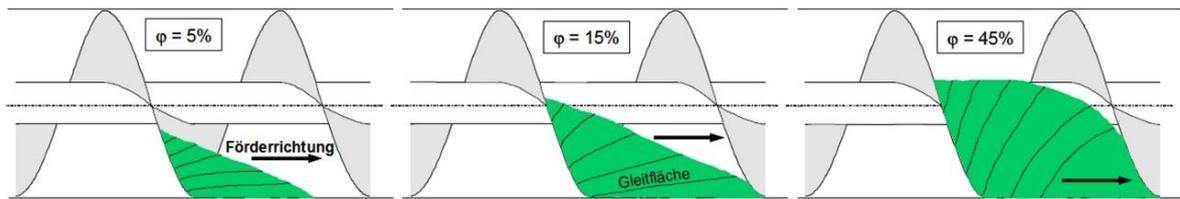


**Bild 4:** Einteilung des Fördervorganges bei Schüttgut in drei charakteristische Bereiche analog der Einzelkörperförderung nach Böttcher (links) und qualitative Darstellung in Abhängigkeit des Neigungswinkels und der Schneckendrehzahl nach Vollmann (rechts) [1]

Für die Schneckenförderung von Schüttgütern werden durch die DIN 15262, FEM 2121 und VDI 2330-2 konkrete Füllungsgrade in Bezug auf die Schüttguteigenschaften empfohlen. Es erfolgt die allgemeine Ansetzung [2] [7] [8]:

- $\varphi \approx 0,45$  für leicht fließende, kaum schleißende Schüttgüter (z.B. Getreide, Mehl)
- $\varphi \approx 0,30$  mäßig schleißende, körnige bis stückige Schüttgüter (z.B. Salz, Sand)
- $\varphi \approx 0,15$  schwere, stark schleißende, aggressive Schüttgüter (z.B. Asche, Kies)

In horizontalen Schneckenförderern stellt sich eine Verteilung des Schüttgutes nach Bild 5 in Abhängigkeit des Füllungsgrades ein. Hierbei bösch sich das Schüttgut an dem treibenden Schneckenblatt innerhalb eines Schneckengangs auf. Mit zunehmendem Füllungsgrad werden die Gleitlinien der einzelnen Gutschichten steiler. Dadurch erhöhen sich die rotatorischen Geschwindigkeitskomponenten des Schüttgutes und somit auch die äußeren Umfangsgeschwindigkeiten. Als Folge kommt es auf Höhe der Schneckenwelle bei zu hohen Füllungsgraden zu einem Überwerfen des Schüttgutes über die Welle, sodass Teile in den vorherigen Schneckengang zurückgelangen. [9]



**Bild 5:** Gutverteilung und Gleitlinien bei horizontalen Schneckenförderern für unterschiedliche Füllungsgrade im Betrieb [9]

### 2.3 Auslegung von horizontalen bis leicht geneigten Schneckenförderern

Die Auslegung von horizontalen Schneckenförderern zur Bestimmung der erforderlichen Baugröße und Antriebsleistung erfolgt heutzutage nach VDI 2330-2 für Schneckenförderer mit einem Neigungswinkel bis zu  $20^\circ$ . Diese präzisiert das frühere Berechnungsverfahren nach DIN 15262, welches übereinstimmte mit der FEM-Richtlinie 2121. Durch umfassende Forschungsarbeiten am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der TU München konnten die Anwendungsgrenzen erweitert werden. Das Auslegungsverfahren bezieht sich auf gleichmäßig beschickte Transportschneckenförderer, welche für leicht fließende bis hin zu stärker schleißenden Schüttgütern zum Einsatz kommen. Es ist ungeeignet für Sonderbauformen wie Dosierschnecken mit Füllungsgraden von 95 bis 100% oder Abzugsschnecken. [2] [6] Die Auslegung von Schneckenförderern hängt von folgenden Kenngrößen ab [1]:

- Konstruktionsparameter
- Betriebsparameter
- Schüttguteigenschaften

Diesbezüglich zeigt die VDI 2330-2 eine methodische Vorgehensweise auf. Zunächst ist der angestrebte Volumenstrom  $\dot{V}$  oder der Massenstrom  $\dot{m}$  zu definieren. Mit Hilfe der Gleichung (1) ist eine Umrechnung über die Schüttdichte  $\rho_s$  möglich.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_s} \quad (1)$$

In Bezug auf das Schüttgut kann im Anschluss der Füllungsgrad gemäß der Empfehlungen laut Kapitel 2.2 festgelegt werden. Es ist zu bemerken, dass die Werte bei zunehmender Neigung definiert zu reduzieren sind. Nach der Festlegung des Füllungsgrades folgt die bevorzugte Auswahl des Schneckendurchmessers  $d_1$  und der Schneckenganghöhe  $s_1$  nach Tabelle 1. Hierdurch lässt sich über Gleichung (2) die Schneckendrehzahl  $n$  ermitteln.

$$n = \frac{\dot{V}}{\varphi \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_1^2 \cdot s_1} \quad (2)$$

Die Schneckendrehzahl sollte einen Wert von  $4 \text{ s}^{-1}$  nicht überschreiten. Andernfalls ist eine Anpassung der Schneckengeometrie erforderlich. Nach Erfüllung der Bedingung kann die Antriebsleistung  $P_A$  des Schneckenförderers über Gleichung (3) berechnet werden. Diese addiert sich aus der Gesamtreibleistung  $P_{\text{Reib}}$  und der Hubleistung  $P_{\text{Hub}}$  bei geneigten Schneckenförderern. In Abhängigkeit der Betriebsparameter ist dafür der horizontale Verschiebewiderstandsbeiwert  $\lambda_h$  zu ermitteln. Dieser setzt sich aus dem horizontalen

Schüttgutbeiwert  $\lambda_{S,h}$ , dem Geschwindigkeitsbeiwert  $\lambda_n$  und dem Neigungsbeiwert  $\lambda_\beta$  zusammen. Zudem fließen die Förderstrecke  $L$  und die Förderhöhe  $H$  in die Berechnung ein. Es ergibt sich die resultierende Gleichung (6).

$$P_A = P_{Reib} + P_{Hub} \quad (3)$$

$$\text{mit } P_{Reib} = \lambda_h \cdot \dot{V} \cdot \rho_S \cdot g \cdot L = (\lambda_{S,h} \cdot \lambda_n \cdot \lambda_\beta) \cdot \dot{V} \cdot \rho_S \cdot g \cdot L \quad (4)$$

$$P_{Hub} = \dot{V} \cdot \rho_S \cdot g \cdot H \quad (5)$$

$$P_A = \dot{V} \cdot \rho_S \cdot g \cdot (\lambda_{S,h} \cdot \lambda_n \cdot \lambda_\beta \cdot L + H) \quad (6)$$

Der horizontale Schüttgutbeiwert  $\lambda_{S,h}$  hängt vom geometrischen Verhältnis  $s_1/d_1$  und dem Verschiebewiderstandsbeiwert  $\lambda_{DIN}$  nach DIN 15262 für das jeweilige Schüttgut ab (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Für die Ermittlung des Geschwindigkeitsbeiwertes  $\lambda_n$  ist für eine Schneckendrehzahl  $n$  ab  $2,5 \text{ s}^{-1}$  die Gleichung (7) zu verwenden. Die Koeffizienten sind ebenfalls abhängig vom Verhältnis  $s_1/d_1$  (siehe Tabelle 2). Bei kleineren Drehzahlen ist der Geschwindigkeitsbeiwert  $\lambda_n$  gleich 1. Zuletzt berechnet sich der Neigungsbeiwert  $\lambda_\beta$  nach Gleichung (8) über den Neigungswinkel  $\beta$ . Bei horizontalen Schneckenförderern beträgt der Neigungsbeiwert 1.

$$\lambda_n = A \cdot n^2 + B \cdot n + C \quad \text{für } n \geq 2,5 \text{ s}^{-1} \quad (7)$$

$$\lambda_\beta = 0,045 \cdot \beta + 1 \quad \text{mit } \beta \text{ in } [^\circ] \quad (8)$$

**Tabelle 2:**

Horizontaler Schüttgutbeiwert  $\lambda_{S,h}$  und Koeffizienten für Geschwindigkeitsbeiwert  $\lambda_n$  [6] [7]

$s_1/d_1$	$\lambda_{S,h}$	A	B	C
[-]	[-]	[s <sup>2</sup> ]	[s]	[-]
1,2	$0,70 \cdot \lambda_{DIN}$	0,108	-0,366	1,32
1,1	$0,73 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,240	1,12
1,0	$0,75 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,234	1,13
0,9	$0,80 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,336	1,39
0,8	$0,85 \cdot \lambda_{DIN}$	0,072	-0,324	1,45
0,7	$0,90 \cdot \lambda_{DIN}$	0,036	-0,252	1,34
0,6	$0,95 \cdot \lambda_{DIN}$	0,036	-0,192	1,24

**Tabelle 3:**

Verschiebewiderstandsbeiwert  $\lambda_{DIN}$  nach DIN 15262 [7]

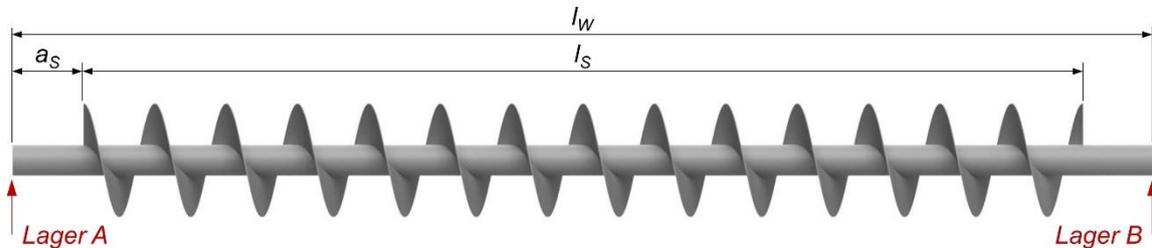
Material	$\lambda_{DIN}$
	[-]
Gerste	1,9
Hafer	1,9
Kies	3,0
Kohle, stückig	2,2
Mehl	1,9
Sand, trocken	3,0
Weizen	1,9

### 3 Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken

#### 3.1 Referenzförderschnecke und FEM-Modell

Im Rahmen der Ermittlung von Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken erfolgen numerische Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM). Hierfür gestaltet es sich zweckmäßig, eine Referenzförderschnecke zu definieren und ein parametrisches CAD-Modell zu generieren. Dadurch können einzelne Konstruktionsparameter variiert und deren Einflüsse auf die Durchbiegung ermittelt werden.

Das Modell umfasst eine Welle mit einem Rohrquerschnitt und eine Schneckenwendel (siehe Bild 6). Die Ausbildung der Schweißnähte zwischen Schneckenwendel und Welle bleibt unberücksichtigt, da bei vielen Anwendungen nur abschnittsweise Schweißnähte gezogen werden. Als Ausnahme gilt die Lebensmitteltechnik, wo aus Hygienegründen durchgängige Doppelkehlnähte geschweißt sind. Die Wellenstümpfe in den Lagerbereichen werden bei der Modellierung ebenso vernachlässigt.



**Bild 6:** Vereinfachte Referenzförderschnecke zur theoretischen Ermittlung von mechanischen Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken

Im Modell erfolgt eine Differenzierung der Längen in die Wellenlänge  $l_w$  als reduziertes Maß auf den mittleren Lagerabstand und die Länge  $l_s$  der Schneckenwendel. Hierbei liegt der Anfang der Schneckenwendel um das Maß  $a_s$  vom Lager A entfernt.

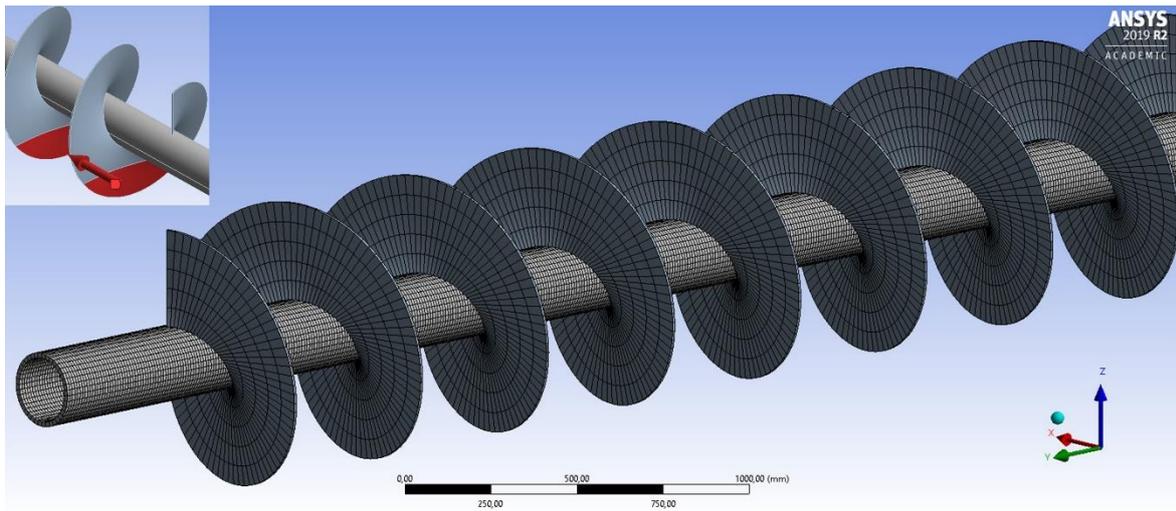
**Tabelle 4:** Grundlegende Abmessungen der Referenzförderschnecke

Schneckenparameter			
Schneckendurchmesser	$d_1$	[mm]	800
Schneckenlänge	$l_s$	[mm]	7000
Schneckenanfangspunkt	$a_s$	[mm]	500
Schneckenganghöhe	$s_1$	[mm]	500
Blechdicke	$s_2$	[mm]	8

Wellenparameter <sup>1</sup>			
Außendurchmesser	$d_a$	[mm]	219,1
Wandstärke	$t$	[mm]	14,2
Wellenlänge	$l_w$	[mm]	8000

<sup>1</sup> Rohrmaße nach DIN EN 10220 [10]

In Tabelle 4 sind die grundlegenden Abmessungen der Referenzförderschnecke definiert. Der Fokus der theoretischen Untersuchungen liegt auf der Variation einzelner Schneckenparameter. Diesbezüglich ist die Einflussnahme der Eigenmassen auf die Durchbiegung der gesamten Förderschnecke festzustellen. Weiterhin soll mit Hilfe des Modells geprüft werden, inwieweit sich Belastungen aus der Schüttgutförderung auf die Durchbiegung der Welle auswirken. Bild 7 zeigt das vernetzte FE-Modell der Referenzförderschnecke. Als Werkstoff wurde der Baustahl S235JR mit einem Elastizitätsmodul von 210 GPa und einer Dichte von  $7850 \text{ kg/m}^3$  definiert [11].



**Bild 7:** FEM-Modell der Referenzförderschnecke zur theoretischen Ermittlung von mechanischen Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken

## 3.2 Wirkende Belastungen

### 3.2.1 Eigenmassen und Gewichtskräfte

Die Eigenmasse der Förderschnecke resultiert aus allen Einzelmassen der Komponenten, aus denen sich die Förderschnecke zusammensetzt. Dazu zählen:

- Welle mit Wellenstümpfen (ggf. mit Plattierung)
- Schneckenwendel
- Ergänzende Funktionskomponenten (z. B. gegenläufige Schneckenblätter)
- Schweißnähte

Hervorzuheben sind die Eigenmassen der Welle, der Schneckenwendel und möglicher weiterer Komponenten auf der Welle. Die Wellenstümpfe für die Lagersitze an den Enden der Welle und die Schweißnähte verfügen über vergleichsweise geringe Eigenmassen, welche bei den nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt werden.

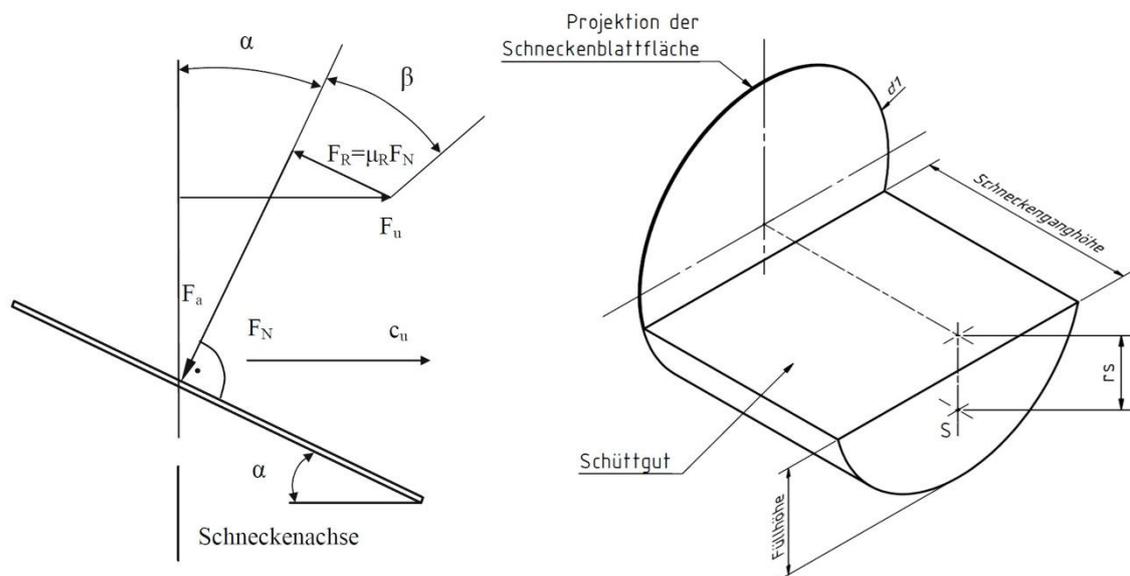
Bei der Modellbildung im Rahmen der FEM-Simulation erfolgt die Berücksichtigung der Eigenmassen als Eigengewichte durch das Volumen der Komponenten, der Dichte des Werkstoffes und der Erdbeschleunigung. Daraus resultiert eine volumetrische Verteilung der Belastung. In Tabelle 5 werden die kumulierten Gewichtskräfte und die Ergebnisse der Berechnung aufgezeigt. Die Durchbiegung der einzelnen Welle ohne Schneckenwendel beträgt 3,723 mm. Die gesamte Förderschnecke erfährt eine Durchbiegung von 6,803 mm.

**Tabelle 5:** Eigenmassen, Eigengewichte und Durchbiegung der Referenzförderschnecke

		Welle	Schneckenwendel	Förderschnecke
Eigenmasse	[kg]	574	428	1002
Gewichtskraft	[N]	5629	4197	9826
Numerische Durchbiegung	[mm]	3,723	-	6,803

### 3.2.2 Kräfte und Momente aus der Förderung

Als weitere Belastungen sind die Kräfte und Momente aus der Förderung anzuführen. Hierbei wirken axiale und tangentielle Kräfte an jedem einzelnen Schneckenblatt aufgrund der Wechselwirkung mit dem Schüttgut. Die radialen Kräfte können in der Betrachtung durch einen zu geringen Einfluss vernachlässigt werden. In Bild 8 links werden die Axialkraft  $F_a$  und die Umfangskraft  $F_u$  an einem Schneckenblatt in horizontaler Ebene dargestellt. Es ist aus dem Kräftegleichgewicht zu erkennen, dass das Schüttgut eine Normalkraft  $F_N$  bewirkt und eine Reibkraft  $F_R$  durch das Gleiten des Schneckenblattes am Schüttgut während der Drehung hervorruft. Der Winkel  $\alpha$  stellt die Neigung des Schneckenblattes im Schwerpunkt des Schüttgutes dar. Hingegen errechnet sich der Reibungswinkel  $\beta$  aus dem Gleitreibungskoeffizienten  $\mu_R$  des Schüttgutes gegenüber dem Schneckenmaterial.



**Bild 8:** Kräfte am Schneckenblatt bei der Förderung (links) [12] und vereinfachtes Ersatzmodell zur Angriffsfläche der anteiligen Axialkraft auf ein Schneckenblatt (rechts)

Mit Hilfe der folgenden Gleichungen können die Axialkraft und die Umfangskraft an einem einzelnen Schneckenblatt über die Blattanzahl  $z$  einer Schneckenwendel ermittelt werden. Als Kraftangriffspunkt ist der Schwerpunkt  $S$  des Schüttgutquerschnitts am Schneckenblatt nach Bild 8 rechts definiert. Hierbei besteht die vereinfachte Annahme, dass das Schüttgut gleichmäßig am Boden des Trogs zwischen zwei Schneckenblättern verteilt ist (abweichend zu Bild 5 mit der realen Gutverteilung). Der Abstand  $r_s$  ergibt sich aus der Füllhöhe  $h_1$  und dem Schneckendurchmesser über eine trigonometrische Beziehung.

$$F_a = \frac{2 \cdot P_A}{r_s \cdot \pi \cdot n \cdot z \cdot \tan(\alpha + \beta)} \quad (9)$$

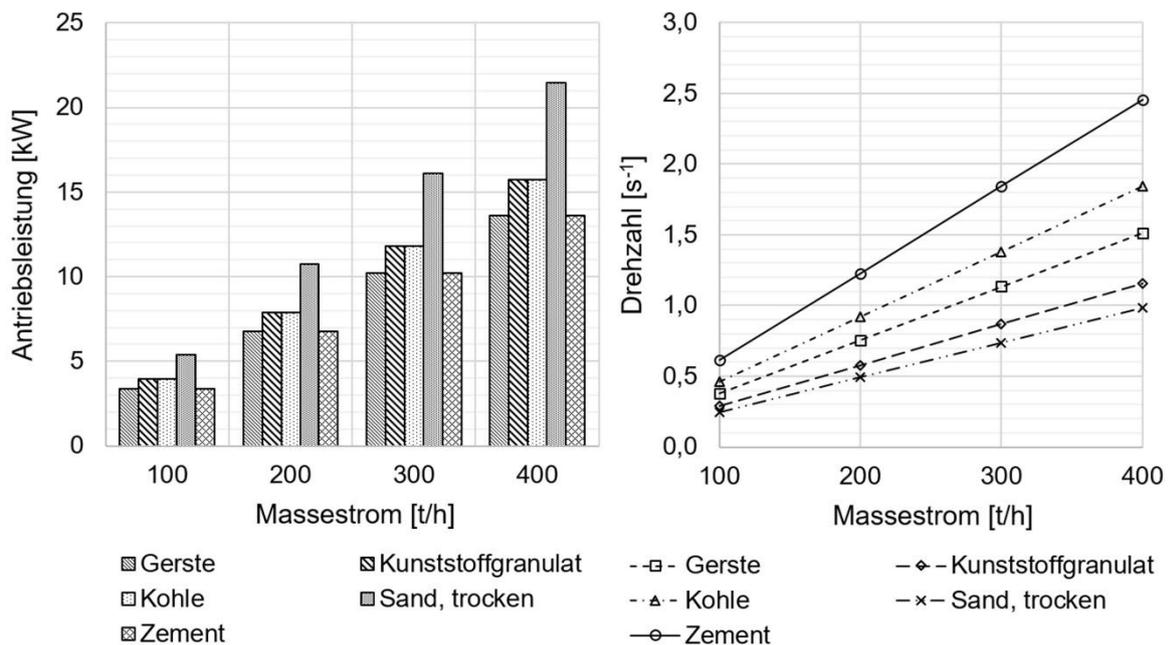
$$F_u = F_a \cdot \tan(\alpha + \beta) \quad (10)$$

Zur Ermittlung des Einflusses der einwirkenden Kräfte infolge des Fördervorgangs auf die Durchbiegung der Förderschnecke werden beispielhaft die Schüttgüter laut Tabelle 6 für die FEM-Simulation anhand der Referenzförderschnecke herangezogen. Dabei erfolgt eine Differenzierung des Füllungsgrades gemäß VDI 2330-2 für das jeweilige Schüttgut.

**Tabelle 6:** Beispiele von Schüttgütern für die FEM-Simulation mit der Referenzförderschnecke

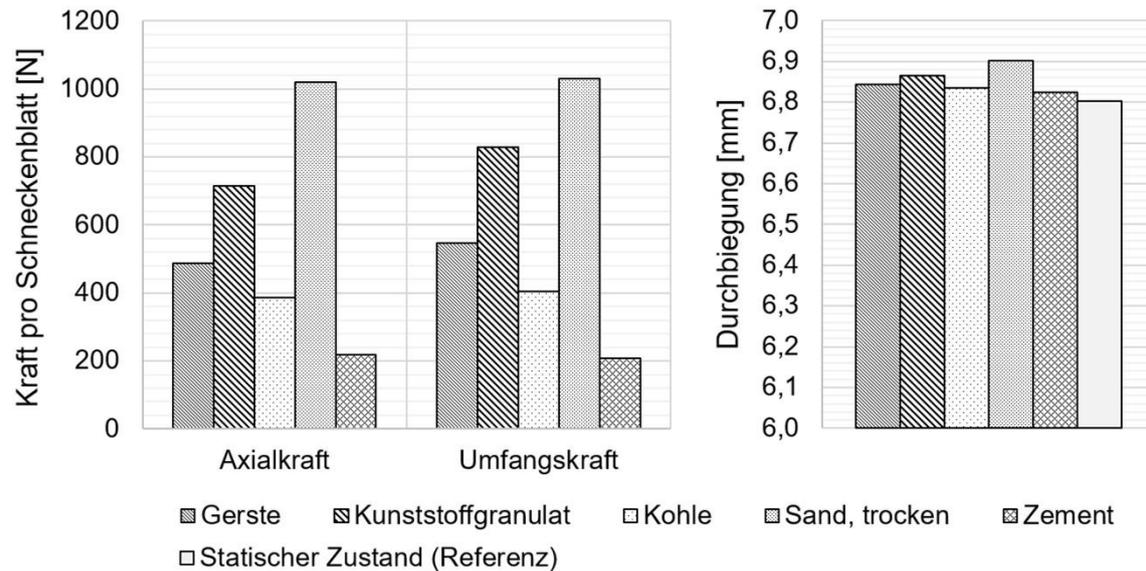
Schüttgutklasse			leicht fließend, kaum schleißend	mäßig schleißend, körnig bis stückig	schleißend, aggressiv		
Füllungsgrad	$\varphi$	[%]	45	30	15		
Füllhöhe	$h_1$	[mm]	166	272	368		
Schüttgut			Gerste	Granulat <sup>2</sup>	Kohle	Sand <sup>3</sup>	Zement
Schüttdichte <sup>1</sup>	$\rho_s$	[kg/m <sup>3</sup> ]	650	850	800	1500	1200
Verschleibewiderstandsbeiwert <sup>1</sup>	$\lambda_{DIN}$	[-]	1,9	2,2	2,2	3,0	1,9
Gleitreibungswert <sup>1</sup>	$\mu_R$	[-]	0,47	0,49	0,53	0,51	0,55

<sup>1</sup> Laut [6] [7] [13] [14] / <sup>2</sup> Kunststoff / <sup>3</sup> trockener Zustand



**Bild 9:** Antriebsleistung in Abhängigkeit des Massenstroms für die verschiedenen Schüttgüter (links) und dazugehörige Drehzahlen (rechts)

Die Ergebnisse der Förderparameter für die Schüttgüter sind in Bild 9 aufgezeigt. Die zunehmende Leistung in Bezug auf die Erhöhung des Massenstroms ist ausschließlich auf die Drehzahlsteigerung zurückzuführen. Unabhängig des Massenstroms bedarf es für ein Schüttgut stets des gleichen Antriebsmoments, welches maßgeblich von den Eigenschaften des Schüttgutes, dem Füllungsgrad und der Förderlänge bestimmt wird. Daraus resultieren für sämtliche Massenströme einheitliche Axial- und Umfangskräfte an einem Schneckenblatt, welche für die ausgewählten Schüttgüter in Bild 10 links angegeben sind.



**Bild 10:** Wirkende Kräfte am Schneckenblatt bei der Förderung der verschiedenen Schüttgüter (links) und Durchbiegung der Förderschnecke im Vergleich zum statischen Zustand (rechts)

Im Rahmen der FEM-Simulation zur Ermittlung der Durchbiegung ist die Axialkraft, welche ein Biegemoment mit Hilfe des Abstandes  $r_s$  erzeugt, zu berücksichtigen. Die Ergebnisse in Bild 10 rechts zeigen, dass im Vergleich zur Durchbiegung der Förderschnecke aufgrund des Eigengewichts im statischen Zustand nur eine geringfügige Erhöhung bei der idealen Förderung festzustellen ist. Die Abweichungen sind in Tabelle 7 aufgeführt.

**Tabelle 7:** Maximale Erhöhung der Durchbiegung bei der Förderung verschiedener Schüttgüter im Vergleich zur Durchbiegung der Förderschnecke im statischen Zustand

Schüttgut		Gerste	Granulat	Kohle	Sand	Zement
Abweichung	[%]	0,6	0,9	0,5	1,4	0,3

### 3.3 Biegesteifigkeit bei variierenden Schneckenparametern

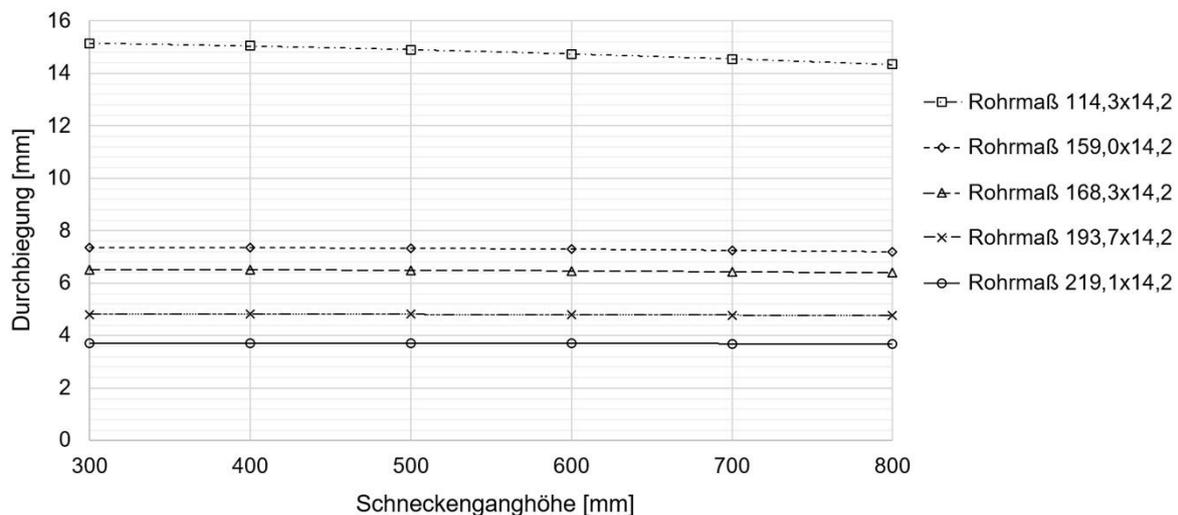
Die Durchbiegung einer Förderschnecke ist abhängig von deren Biegesteifigkeit. Die Welle stellt hierbei die wichtigste Komponente dar. Jedoch ist zu prüfen, in welchem Maß die Schneckenwendel die Biegesteifigkeit erhöht. Durch eine Parameterstudie in Abhängigkeit des Schneckendurchmessers, der Schneckenganghöhe und der Blechdicke besteht die Möglichkeit, deren Einflüsse auf die Durchbiegung zu bestimmen. Allerdings führt eine Variation der Parameterwerte zu unterschiedlichen Eigenmassen der Schneckenwendeln. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen und die statische Belastung konstant zu gestalten, werden bei der FEM-Simulation nur die Steifigkeitskennwerte berücksichtigt und die Dichte der Schneckenwendel gleich Null gesetzt. Die Ergebnisse können anhand der Durchbiegung einer Welle ohne Schneckenwendel bewertet werden. In Tabelle 8 sind für ausgewählte Stahlrohre mit genormten Abmaßen nach DIN EN 10220 die Werte auf Basis analytischer und numerischer Berechnungen aufgezeigt.

**Tabelle 8:** Analytische und numerische Durchbiegung der Welle für ausgewählte Stahlrohre

Rohrmaß <sup>1</sup>	Analytische Durchbiegung	Numerische Durchbiegung
	[mm]	[mm]
114,3x14,2	15,302	15,316
159,0x14,2	7,389	7,403
168,3x14,2	6,531	6,546
193,7x14,2	4,824	4,839
219,1x14,2	3,708	3,723

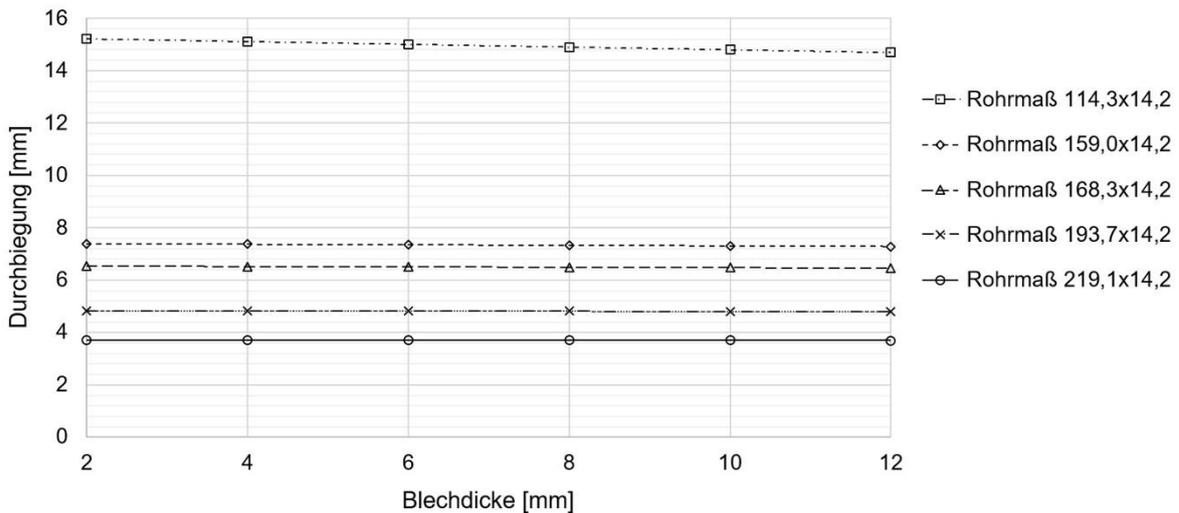
<sup>1</sup> Laut [10]

Die Ergebnisse zur Durchbiegung der Förderschnecke in Abhängigkeit der Veränderung des Schneckendurchmessers von 300 mm bis 1300 mm zeigen, dass die Gesamtsteifigkeit nicht wesentlich zunimmt. Die Durchbiegung bleibt nahezu konstant. Hingegen beeinflusst die Schneckenganghöhe die Durchbiegung der Förderschnecke laut Bild 11 geringfügig. Bei kleineren Rohrmaßen nimmt die Gesamtsteifigkeit der Förderschnecke zu. Jedoch ist zu bemerken, dass das Niveau der Durchbiegung hierbei sehr hoch ist. In der Praxis sind geringere Werte anzustreben, wo der Einfluss der Schneckenganghöhe deutlich abnimmt. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der Variation der Blechdicke nach Bild 12. Diese führt ebenso nur bei kleinen Rohrmaßen zu einer etwas höheren Gesamtsteifigkeit.



**Bild 11:** FEM-Ergebnisse zur Durchbiegung der Förderschnecke in Abhängigkeit der Schneckenganghöhe ohne Berücksichtigung der Gewichtskraft der Schneckenwendel

Im Vergleich der erzielten FEM-Ergebnisse in Abhängigkeit der einzelnen geometrischen Parameter der Schneckenwendel zur numerischen Durchbiegung der einzelnen Welle für das jeweilige Rohrmaß ergeben sich die prozentualen Abweichungen nach Tabelle 9. Die maximalen Werte treten stets bei kleinen Rohrmaßen auf. In Bezug auf eine sinnvolle Begrenzung der Durchbiegung sind angemessene Rohrmaße zu wählen. Am Beispiel der Referenzförderschnecke mit einem Rohrmaß von 219,1x14,2 betragen die Abweichungen zwischen 0,4 % und 1,1 %, welche einen vernachlässigbaren Einfluss aufzeigen.



**Bild 12:** FEM-Ergebnisse zur Durchbiegung der Förderschnecke in Abhängigkeit der Blechdicke der Schneckenwendel ohne Berücksichtigung der Gewichtskraft der Schneckenwendel

**Tabelle 9:** Maximale Verringerung der Durchbiegung für alle Varianten von Schneckendurchmessern, Schneckenganghöhen und Blechdicken im Vergleich zur numerischen Durchbiegung der Welle

Rohrmaß	Schneckendurchmesser	Schneckenganghöhe	Blechdicke
	[%]	[%]	[%]
114,3 x 14,2	2,8	6,4	4,1
159,0 x 14,2	1,0	2,8	1,6
168,3 x 14,2	0,9	2,4	1,3
193,7 x 14,2	0,6	1,6	0,9
219,1 x 14,2	0,4	1,1	0,7

## Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag bezieht sich auf die systematische Ermittlung und Quantifizierung mechanischer Einflussgrößen auf die Durchbiegung von horizontalen Förderschnecken. Dazu zählen wirkende Belastungen und geometrische Parameter der Förderschnecke. Es erfolgt hierbei u. a. eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Komponenten mit deren Eigengewichten. Zudem werden anhand ausgewählter Schüttgüter, wie z. B. Gerste oder trockener Sand, die einwirkenden Axialkräfte und Umfangskräfte auf ein Schneckenblatt während des Fördervorgangs bestimmt. Mit Hilfe von FEM-Simulationen anhand einer Referenzförderschnecke mit einem Schneckendurchmesser von 800 mm und einer Förderlänge von 7000 mm hat sich feststellen lassen, dass die Eigengewichte maßgeblich für die Durchbiegung verantwortlich sind. Die Kräfte aus der Förderung erhöhen die Werte nur geringfügig mit einer maximalen Abweichung von 1,4 %. Der Einfluss des Schneckendurchmessers, der Schneckenganghöhe oder der Blechdicke der Schneckenwendel auf die Durchbiegung ist ebenfalls niedrig. Die Biegesteifigkeit der Förderschnecke hängt vorrangig von der Wellengeometrie ab. Größere Durchmesser bewirken bei Zunahme der einzelnen Parameter eine Verringerung der Durchbiegung um maximal 1,1 %. Die Bestimmung der Einflussgrößen stellt die Basis für die künftige Erstellung eines Berechnungsmodells zur Dimensionierung von horizontalen bis leicht geneigten Förderschnecken für die Praxis dar.

**Quellenverzeichnis:**

- [1] Günthner, W.; Fottner, J.; Rong, O.: Empirische Entwicklung von Kenngrößen zur Auslegung von Hochleistungs-Schneckenförderern für Schüttgut. Abschlussbericht zu IGF-Vorhaben 12453 N/1. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München: 2002
- [2] VDI 2330-1: Schneckenförderer für Schüttgut – Allgemeine Beschreibung. VDI-Richtlinie, September 2013
- [3] Ebken exakt: Konstruktion mit Plan – Schneckenförderer [online]. Herausgegeben von F. Ebken. Juli 2021 [Zugriff am: 05. Juli 2021]. Verfügbar unter: <https://www.ebken-exakt.de/foerdertechnik/>
- [4] DIN 15261-1: Stetigförderer – Schneckenförderer – Anschlussmaße. Deutsche Norm, Februar 1986
- [5] DIN 15261-2: Stetigförderer – Schneckenförderer – Schneckenblatt. Deutsche Norm, Februar 1986
- [6] VDI 2330-2: Schneckenförderer für Schüttgut – Auslegung von horizontalen und leicht geneigten Schneckenförderern. VDI-Richtlinie, September 2013
- [7] DIN 15262: Stetigförderer – Schneckenförderer für Schüttgut – Berechnungsgrundsätze. Deutsche Norm, Januar 1983
- [8] FEM 2121: Stetigförderer – Schneckenförderer für Schüttgut – Empfehlungen für die Berechnung horizontaler und leicht geneigter Schneckenförderer. Dt. Nationalkomitee der FEM, VDMA, Fachgemeinschaft Fördertechnik, Ausgabe D, 1999
- [9] Rong, O.: Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, TU München: 2004
- [10] DIN EN 10220: Nahtlose und geschweißte Stahlrohre – Allgemeine Tabellen für Maße und längenbezogene Masse. Deutsche Norm, März 2003
- [11] thyssenkrupp Materials Services GmbH: Werkstoffdatenblatt – Warmgewalzter unlegierter Baustahl – S235Jxx. materials4me. Essen, 2007
- [12] Surek, D.: Pumpen für Abwasser- und Kläranlagen. Auslegung und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014
- [13] VDI 2330-3: Schneckenförderer für Schüttgut – Auslegung von vertikalen Schneckenförderern. VDI-Richtlinie, September 2013
- [14] MOLLET Füllstandtechnik GmbH: Schüttgewicht und Schüttgutdichten. Internetseite des Unternehmens. [Zugriff am 14.07.2021]. Verfügbar unter: <https://www.mollet.de/info/schuettgutdichte.html>

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

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

Yuan Tan

Maximilian Dahlenburg

Stephan Kessler

Johannes Fottner



Yuan Tan, M. Sc.

Maximilian Dahlenburg, M. Sc.

Akad. Dir. Stephan Kessler

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml - Lehrstuhl für Fördertechnik

Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstraße 15

85748 Garching



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

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

### 1 Roboter-Entwicklungen und -Einsätze für die Schüttgutförder-technik

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

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

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

Beim 3D Geländebaggern wird der Fahrer unterstützt durch einen SOLL–IST-Vergleich der Aufmaßkontrolle. Das Gelände ist vermessen über Laser Theodolit (IST) und die aktuelle Position der Schaufelschneide des Baggers ist bestimmt über die vermessene Maschinenposition über Differential–GPS und die Stellung der Baggerkinematik über Winkelaufnehmer-IMUs. Der Fahrer bekommt das Gelände mit einem Rot–Grün–Netz (Bild 1) angezeigt, d. h. Rot ist noch ab- oder aufzutragen und Grün heißt finished, das Endmaß ist erreicht.



**Bild 1:** Geländenetz beim 3D Geländebaggern [1]

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

Stereotype Transporte von Erdreich und Schüttgütern übernehmen mittlerweile selbstfahrende Mulden, z. B. der Volvo-Truck (Bild 2).



**Bild 2:** Volvo-Truck [3]

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



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

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

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

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

### **2.1 Projekt und Förderung**

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

### **2.2 Material, Problemstellung und Ziel**

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



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

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

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

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

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

### 2.3 Systembeschreibung und -funktion von PAMEC

Ein Prototyp des Misch- und Zuführsystems wurde erfolgreich entwickelt und gebaut. Das in Bild 5 abgebildete Mischsystem wurde in Anlehnung eines Trogmischers ausgelegt und mit einem Innendurchmesser von  $D_{iMFa} = 240$  mm dimensioniert, um die geforderte Mindestdruckgeschwindigkeit von  $v = 3$  m/min einhalten zu können.



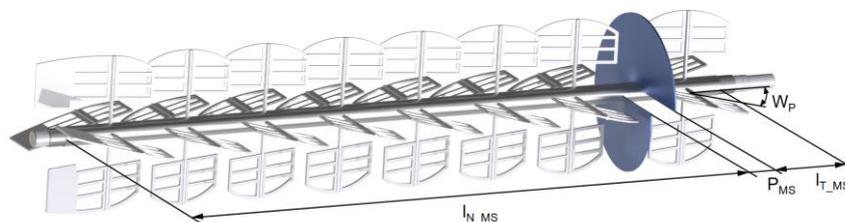
**Bild 5:** Links: Querschnitt des Mischsystems ohne Antriebselemente mit dem Zulaufbereich rechter Rand, Nassmisch- und Förderbereich Mitte und Kompressionsbereich links vertikal angeordnet; Rechts: Gesamtansicht des Mischsystems „near-nozzle-mixing“ aus DFG-SFB TRR277

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



**Bild 6:** Volumetrische Schüttgut-Dosiereinheit FlexWall40 [11]

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

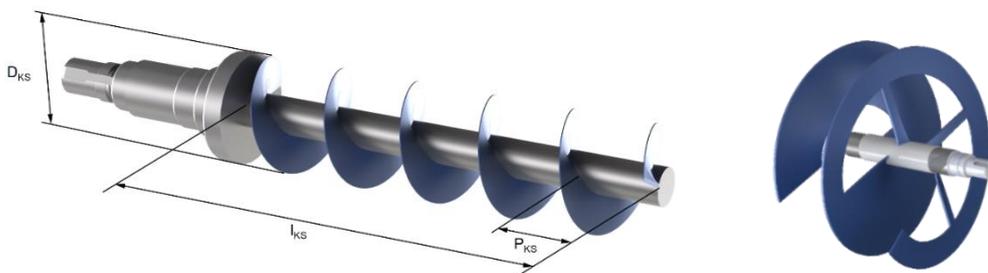


**Bild 7:** Mischwelle mit Mischpaddeln (rechts), Schott (blau) und vier Endpaddeln (links)

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

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

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



**Bild 8:** Links - Kompressionswelle mit Vollschncke aus dem Kompressionsbereich, Rechts - Förderwelle mit Teilbandschncke aus dem Förderbereich

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

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

eine zweite verbesserte Version vorbereitet. Mithilfe des digitalen Zwillings aus dem Virtual Prototyping lassen sich Ergebnisse der DEM-Simulationen direkt ins digitale Format migrieren, um diese in virtuellen Funktionstests zu validieren.

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

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

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

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

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

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

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

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

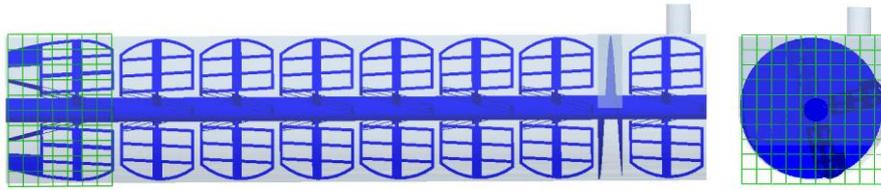
Hierbei ist  $N$  die Gesamtzahl der Zellen in der Stichprobe,  $n_i$  und  $N_i$  ( $i= 1, 2, 3... N$ ) bezeichnen die Anzahl einzelner Partikel (A) sowie der Gesamtpartikel in  $i$ -Zelle und  $n_{sum}$  stellt die Gesamtpartikelzahl aus allen Zellen in der Stichprobe dar.  $n_i/n_{sum}$  bezeichnet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

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

## 4 Modellaufbau für die DEM-Simulation zur Mischungsverhältnis-Untersuchung

### 4.1 Basismodellaufbau

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



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

## 4.2 Simulierte Partikel- und Betriebsparameter

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

**Tabelle 1:** Partikelparameter in EDEM

	Schüttdichte [ $\text{kg/m}^3$ ]	Partikel-Radius [mm]	Poissonzahl
<b>Zement</b>	2000	1,5	0,25
<b>Zuschlagstoff</b>	1450	2	0,35
<b>Wasser</b>	1000	2	0,25

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

**Tabelle 2:** Betriebsparameter der Simulationen

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

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

## 5 Ergebnisse und Diskussion

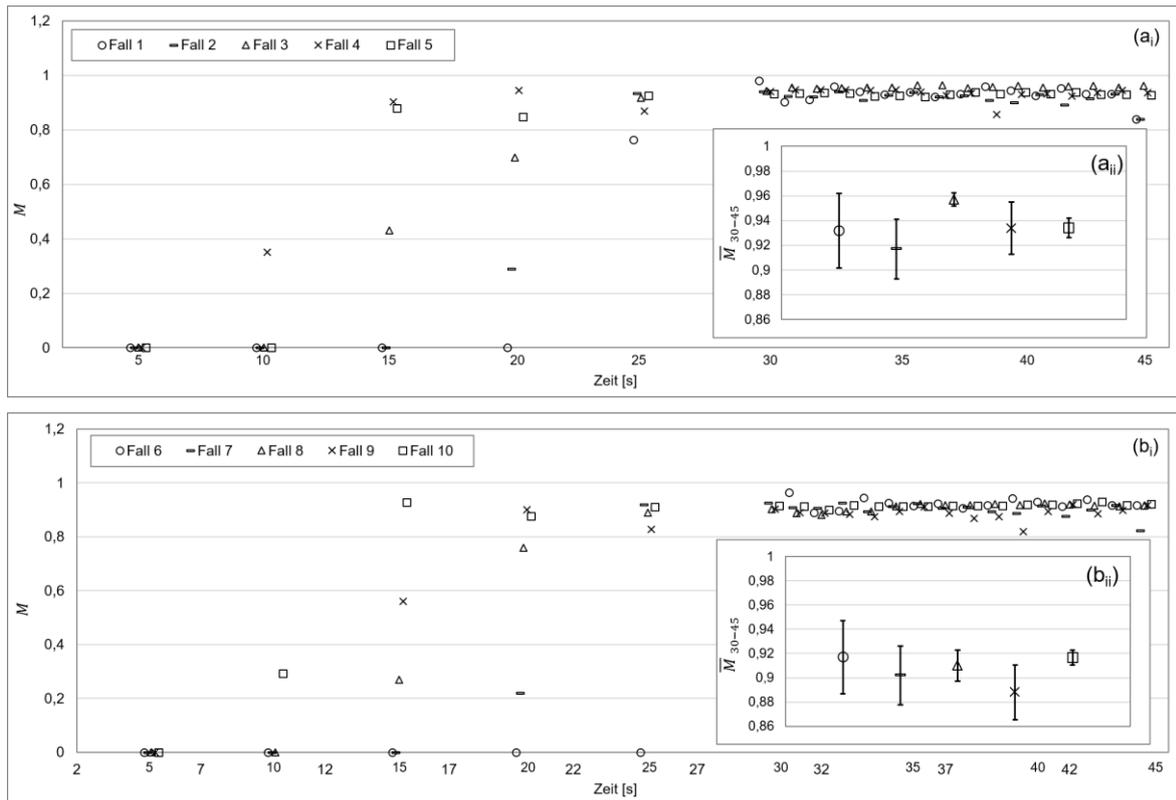
Die DEM ist hervorragend geeignet, das Virtual Prototyping der Entwicklung eines Stetigförderers als Analysewerkzeug zu begleiten. In der Entwurfsphase und für die Grobkonstruktion genügt es, anerkannte bzw. bekannte Stoffwerte und Modelle anzusetzen. Hiermit können bereits der Massenstrom und die benötigte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

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

### 5.1 Bewertung des Mischzustandes

In der Auswertung des Massenstroms ist zu erkennen, dass die Mischungen aller Simulationsfälle ab ca. 30 s einen stabilen Zustand, d. h. eine gute Durchmischung  $M > 0,9$  erreichen. Es wird deswegen der Mischungsindex alle 5 s innerhalb von 0-30 s und alle 1 s innerhalb von 30-45 s skaliert. Wie in Bild 10 veranschaulicht, sind die Ergebnisse der Stichprobenanalysen nach Lacey zur Ermittlung der Mischungsindexe dargestellt. Hierzu ist ein Würfel der Seitenlängen von 250 x 250 x 170 mm am Ausgang des Mischers angesetzt und gleichmäßig in 10 x 10 x 7 kleine kubische Zellen unterteilt.

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



**Bild 10:** Lacey Mischungsindex über der Zeit

Legende - a<sub>i</sub>: alle protokollierten Indexe bei 15° Anstellwinkel und a<sub>ii</sub>: Mittelwert der Indexe zwischen 30-45 s bei 15° Anstellwinkel

Legende: - b<sub>i</sub>: alle protokollierten Indexe bei 20° Anstellwinkel und b<sub>ii</sub>: Mittelwerte der Indexe zwischen 30-45 s bei 20° Anstellwinkel

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

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

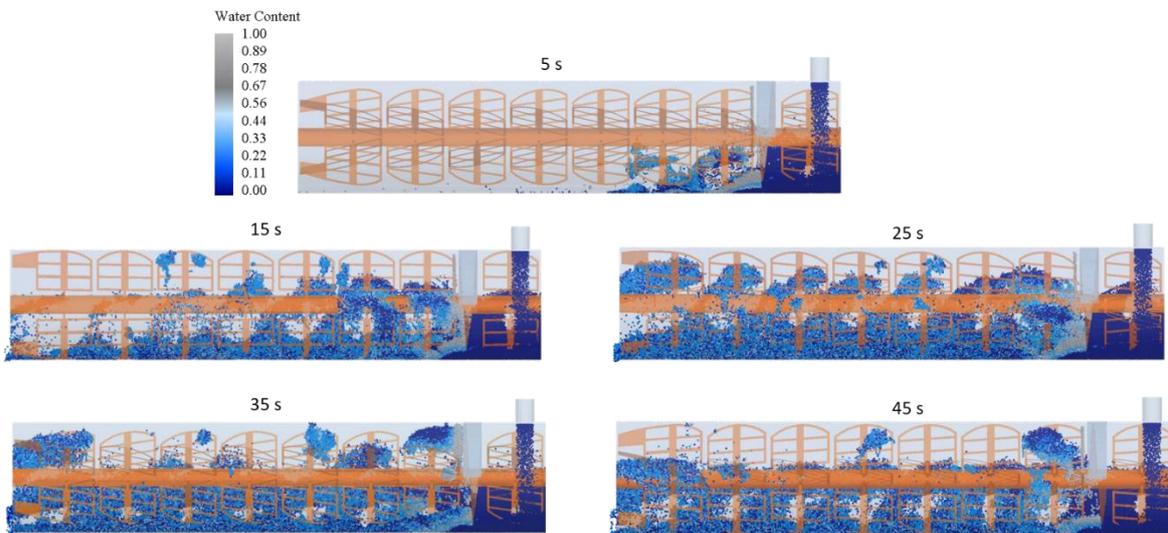
Eine wichtige Erkenntnis ist, dass praktisch unabhängig von der Drehzahl eine robuste Durchmischung mit  $M > 0,9$  ab 30 s bei Paddeln mit 15° Anstellwinkel vorliegt. D. h., auch der energetisch günstigere Langsamläufer erzielt die gewünschte Durchmischung.

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

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

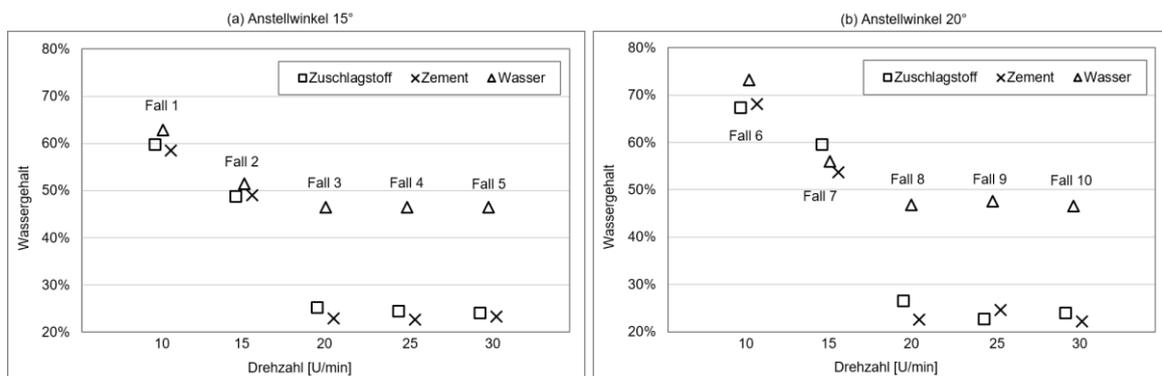
### 5.2 Darstellung und Bestimmung des Wassergehaltes in der Mischung

Im Bild 11 sind die Screenshots der Near-Nozzle-Mischung für die Wasseraufnahme einer DEM-Simulation nach Zeitschritten dargestellt. Hier werden praktisch das Anlaufverhalten und der Übergang in den quasistationären Zustand dargestellt. Wie bei den Mischungsuntersuchungen nach Lacey ist ersichtlich, dass man ab ca. 25 s in einen quasistationären Zustand im hinteren Bereich des Mixers kommt. Bei dieser Simulation Fall 3 (15° Anstellwinkel und Drehzahl 20 U/min) fällt auf, dass eine Klumpenbildung stattfinden kann. In der Kombination von Mischung und Förderung der Paddel werden geklumpfte Partikel vom Trogboden zum oberen Teil des Trogs geworfen. D. h., hier liegen kleine Plantschverluste vor, die sowohl energetisch als auch mischtechnisch nicht erwünscht sind.



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

Die Abbildungen zeigen, wie die Wasseraufnahme nach dem Einlauf und zwei Paddelgängen im Mixer bereits relativ homogen erfolgt ist. D. h., nach zwei Mischstellen, jeweils mit vier Paddeln, ist die Verteilung schon relativ homogen und tendiert zu engen Werten. Das ist eine wichtige Erkenntnis für die benötigte Mindestlänge des Mixers für die 2. Prototypen-Konstruktion. Im folgenden Bild 12 wird die Durchfeuchtung quantitativ dargestellt und der aufgenommene Wassergehalt auswertbar.



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

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

## Zusammenfassung

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

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

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

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

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

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

## Danksagung

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

## Quellenverzeichnis:

- [1] Maschinenteknik Schrode Werksfoto 2018
- [2] VDMA Info Tage zu Bauen 4.0., 4.5. bis 6.5.2021 - <https://www.verbundprojekt-bauen40.de/blog-Infotage>
- [3] Volvo Werksfoto zur bauma 2019
- [4] CON – Print 3D reinforced, TU Dresden, Institut für Baustoffe  
<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/ifb/das-institut/news/CONPrint3D>
- [5] BFT International. [https://www.bft-international.com/de/artikel/bft\\_Deutschlands\\_erstes\\_Gebaeude\\_aus\\_dem\\_3D-Drucker\\_3582812.html](https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Deutschlands_erstes_Gebaeude_aus_dem_3D-Drucker_3582812.html)
- [6] Kloft, H.; Gehlen, C.; Dörfler, K.; Hack, N.; Henke, K.; Lowke, D.; Mainka, J.; Raatz, A.: TRR 277: Additive Fertigung im Bauwesen; Bautechnik 98, H. 3, S. 222 – 231, 2021, Berlin, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG
- [7] Matthäus, C.; Henke, K.; Talke, D.; Kränkel, T.: Leichtbeton-3D-Druck – Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton; BBSR-Online-Publikation, 05/2021, Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2021
- [8] MAI International GmbH: MAI® MULTIMIX-3D – Spezialisierte Mörtelmischpumpe für den 3D-Betondruck [online]. Herausgegeben von MAI International GmbH 2020 [Zugriff am: 05. Juli 2021]. Verfügbar unter: <https://www.mai.at/de/3d-druck/mairmultimix-3d/>
- [9] Matthäus, C.; Back, D.; Weger, D.; Kränkel, T.; Scheydt, J.; Gehlen, C. (2020): Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. In: Bos, F., Lucas, S., Wolfs, R., Salet, T. (eds) Second

- RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. DC 2020.  
RILEM Bookseries, vol 28. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_32)
- [10] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Poraver® Leichtfüllstoff [online]. R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH September 2016 [Zugriff am: 05. Juli 2021].  
Verfügbar unter: [https://www.r-g.de/wiki/Poraver%C2%AE\\_Leichtf%C3%BCllstoff](https://www.r-g.de/wiki/Poraver%C2%AE_Leichtf%C3%BCllstoff)
- [11] Brabender Technologie GmbH & Co. KG: CAD Modell FlexWall40.  
Verfügbar unter: <https://www.brabender-technologie.com/>.
- [12] Lacey, P.: Developments in the theory of particle mixing; Journal of applied chemistry, 1954; 257-268
- [13] Godlieb, W.: DEM and TEM simulations of solid mixing in a gas-solid fluidized bed. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 9-11 December 2009
- [14] Rhodes, M.: Introduction to Particle Technology.2008
- [15] DEM Solutions, Altair Engineering, Inc. Troy, Michigan, USA, EDEM 2021

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

# Untersuchungen zur Vorhersage des abrasiven Prall- und Gleitverschleißes auf Basis der Diskrete Elemente Methode

Thomas Rößler

André Katterfeld



Thomas Rößler, M. Sc. (Referent)

Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld

Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik

Institut für Logistik und Materialflusstechnik

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Universitätsplatz 2

39016 Magdeburg



# Untersuchungen zur Vorhersage des abrasiven Prall- und Gleitverschleißes auf Basis der Diskrete Elemente Methode

*In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Kalibrierung von Verschleißsimulationen auf Basis der Diskrete Elemente Methode (DEM) vorgestellt. Durch dieses Verfahren soll es zukünftig möglich sein, auf Basis von DEM-Simulationen den zu erwartenden Verschleiß an beliebigen Anlagen zu simulieren und vorherzusagen. Zu diesem Zweck werden, aufbauend auf theoretischen empirischen Modellen, verschiedene Ansätze zur Modellierung vorgestellt und nachgewiesen, dass es durch Kombination der unterschiedlichen Modelle möglich ist, sowohl Prall- als auch Gleitverschleißphänomene realitätsnah zu simulieren. Hierzu werden experimentelle Referenzuntersuchungen zum Prall- und Gleitverschleiß durchgeführt und die Resultate mit den berechneten Ergebnissen aus den Verschleißsimulationen verglichen.*

## 1 Einleitung

Im Bereich der Baumaschinen- und Schüttguttechnik ist der Hauptgrund für Anlagenausfälle und Stillstandszeiten der hohe Verschleiß, der durch die Handhabung von abrasiven, mineralischen Schüttgütern und Pulvern entsteht. Dieser Verschleiß ist dabei durch die Funktion der Förderanlage oder Baumaschine bedingt und lässt sich nicht gänzlich vermeiden. Bild 1 zeigt typische Beispiele für stark verschlissene Anlagenbauteile in der Fördertechnik, die aus einer ungeeigneten Auswahl von Verschleißschutzmaterialien resultieren und einen Ausfall der Anlagen verursachen können.



**Bild 1:** Typische Beispiele für Verschleiß in der Fördertechnik aus der industriellen Praxis [1]

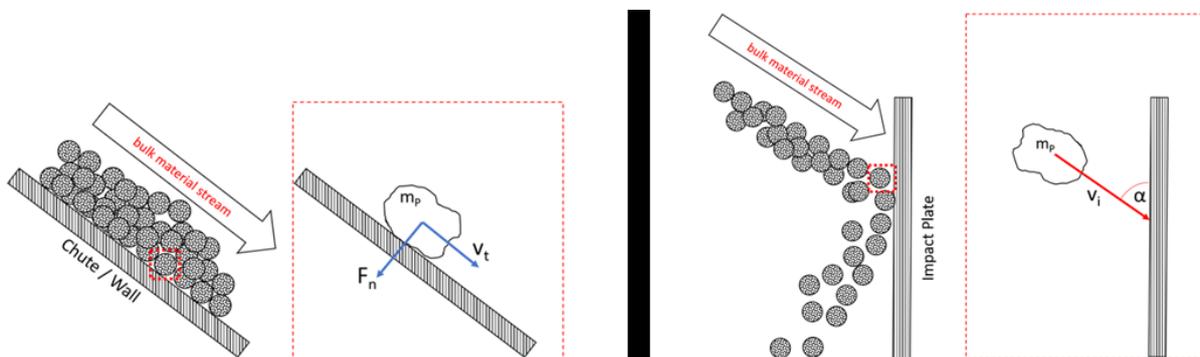
Im Mittelpunkt der Betrachtung steht folglich die optimale Auswahl des Verschleißschutzes. Da Verschleißschutzmaterialien in der Regel aus besonders hochwertigen Werkstoffen gefertigt werden, ist eine geeignete Auswahl vorzunehmen und eine Überdimensionierung aus wirtschaftlichen Gründen zu vermeiden. Die Komplexität des Verschleißes ergibt sich aus der Überlagerung verschiedener Wirkmechanismen. Diese setzen sich häufig aus Abrasion, Adhäsion und Erosion zusammen. In der Schüttguttechnik ist der abrasive Verschleiß die Hauptursache für Verschleiß bei Prozessen, bei denen die Bauteiloberflächen durch einen gleitenden oder aufprallenden Schüttgutstrom beansprucht werden. Beispiele für abrasiven Verschleiß bilden die Lagerung von Schüttgütern in Silos [2], bei denen das Schüttgut entlang der Silowände und -böden gleitet oder die Förderung von Schüttgütern in Übergabestellen, wie beispielsweise Rockboxen oder Schurren, bei denen der Materialstrom von einer Fördereinheit auf eine weitere übergeben wird [3]. Die Auswahl eines geeigneten Verschleißschutzes muss daher stets unter Berücksichtigung

der auftretenden Verschleißart, der spezifischen Anlagengeometrie und des realen Schüttgutes getroffen werden.

Numerische Computersimulationen auf Basis der Diskrete Elemente Methode (DEM) bieten die Möglichkeit, das Schüttgutverhalten unter Berücksichtigung realer Bauteilgeometrien zu analysieren. Die DEM erfordert meist sehr stark idealisierte Simulationsmodelle in Bezug auf die Abbildung des realen Schüttgutes. Die DEM-Parameter müssen durch aufwendige Kalibrierungsprozeduren bestimmt werden, um ein reales Schüttgutverhalten in der Simulation zu gewährleisten. Unter Kalibrierung wird dabei eine Prozedur zur inversen Parameterfindung verstanden, bei der experimentelle Untersuchungen mit Ergebnissen von Simulationsserien mit variierenden Parametern verglichen werden. Dadurch sind DEM-Simulationen grundsätzlich in der Lage, für den Verschleiß ursächliche Kräfte und Relativgeschwindigkeiten zwischen Bauteil und Schüttgut zu berechnen. Das bedeutet, dass mit der DEM der Wirkmechanismus des abrasiven Verschleißes an beliebig komplizierten Bauteiloberflächen identifiziert werden kann. Für eine quantitative Verschleißprognose auf DEM-Basis müssen jedoch Verschleißkoeffizienten in geeigneten Experimenten ermittelt und in der DEM kalibriert werden.

## 2 Grundlagen des abrasiven Verschleißes

Eine besondere Form des Abrasivverschleißes ist der erosive Verschleiß, bei dem die einzelnen Schüttgutpartikel frei gegeneinander und entlang der Wandoberfläche beweglich sind. In Abhängigkeit der Relativbewegung zwischen dem Schüttgutkollektiv und der Bauteiloberfläche wird der erosive Verschleiß in Korngleitverschleiß und Prall- bzw. Schrägstrahlverschleiß unterschieden (Bild 2).



**Bild 2:** Beanspruchung einer Oberfläche durch Gleit- (links) und Prallverschleiß (rechts)

Bewegt sich das lose Schüttgut unter geringer Verdichtung parallel entlang einer Bauteiloberfläche, handelt es sich um Korngleitverschleiß (Bild 2, links). Die einzelnen Partikel können sowohl eine Roll- als auch eine Gleitbewegung durchführen. Ist die Bewegung des Schüttgutstromes bzw. der einzelnen Schüttgutpartikel nicht parallel zur Grundkörperoberfläche und stattdessen durch einen Aufprall unter einem bestimmten Winkel gekennzeichnet, liegt Prall- bzw. Schrägstrahlverschleiß vor (Bild 2, rechts). In der Kontaktzone kommt es somit zu einer gleitenden bzw. stoßenden Bewegung zwischen dem Grundkörper und den Schüttgutpartikeln. Im Folgenden soll der Begriff abrasiver Gleitverschleiß (in Analogie zum engl. „Sliding Wear“) verwendet werden, wenn die dominante Bewegung das Gleiten parallel zur Bauteiloberfläche ist. Ist die

Hauptbewegungsrichtung hingegen nicht parallel zur Bauteiloberfläche, so wird der Verschleiß als Prallverschleiß (in Analogie zum engl. „Impact Wear“) bezeichnet.

Zur Modellierung des Gleitverschleißes wird der Kontakt eines einzelnen Partikels mit der Wandoberfläche betrachtet (Bild 2, links). Das Partikel kann dabei sowohl gleiten als auch rollen, wobei das Rollen einen geringen Einfluss auf die Entwicklung des Verschleißes hat, sodass eine reine gleitende Bewegung vereinfacht angenommen werden soll. Das Problem wird auf die Betrachtung zweier gegeneinander gleitender Festkörper reduziert. Grundlage für die analytische Beschreibung des Volumenverlustes durch abrasiven Gleitverschleiß sind die experimentellen Untersuchungen von Archard [2] und Rabinowicz [3]. Das Verschleißmodell von Archard besagt, dass das verschlissene Volumen eines metallischen Stiftes sowohl proportional zur wirkenden Normalkraft  $F_n$  als auch zum zurückgelegten Weg  $\Delta s$  und umgekehrt proportional zur Härte  $H$  der Verschleißfläche des weicheren Kontaktpartners ist,

$$V_{\text{Sliding,Archard}} = \frac{K}{H} F_n \Delta s . \quad (1)$$

Der Faktor  $K$  stellt eine dimensionslose Verschleißkonstante dar, die die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass es zur Ausbildung eines Kontaktes mit Materialaustrag kommt. Die lineare Abhängigkeit des Verschleißvolumens von der Härte ist nach [4] allerdings nur für reine Metalle gültig. Aus diesem Grund wird die Archard Gleichung auch häufig vereinfacht geschrieben,

$$V_{\text{Sliding,Archard}} = k F_n \Delta s , \quad (2)$$

wobei  $k$  den nun dimensionsbehafteten Verschleißkoeffizienten in  $[m^2/N]$  darstellt, der sowohl die Härte als auch weitere unbestimmte Faktoren des Kontaktes berücksichtigt, die den Verschleiß beeinflussen, wie beispielsweise Partikeleigenschaften (Härte, Zerbrechlichkeit, Form, Größe), Wandeigenschaften (Härte, Rauigkeit, Elastizität) oder Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur). Der Wert des Verschleißkoeffizienten  $k$  muss dabei experimentell bestimmt werden, wobei dieser auch von der Art der Bestimmung abhängig sein kann.

Während das Archard Modell unabhängig von den Wandmaterialien als allgemeingültig betrachtet werden kann, ist die Entwicklung des Verschleißes bei prallender Beanspruchung einer Oberfläche stark von der Art des Wandmaterials abhängig (Bild 3, links). Bei duktilen Werkstoffen wird das Material überwiegend durch eine schneidende Bewegung aus dem Material herausgetrennt, sodass insbesondere flache Aufprallwinkel kritisch sind und der maximale Materialverlust häufig bei Aufprallwinkeln zwischen  $15^\circ$  und  $30^\circ$  zu beobachten ist. Demgegenüber ist bei spröden Werkstoffen der Materialabtrag durch ein Herausbrechen von oberflächennahen Schichten gekennzeichnet, sodass insbesondere Aufprallwinkel senkrecht zur Oberfläche kritisch sind.

Zur Beschreibung des Prallverschleißes bei duktilen Werkstoffen wird häufig das Verschleißmodell nach Finnie [5,6] verwendet, das besagt, dass das ausgetragene Volumen proportional zu einer Energie  $E_{\text{Finnie}}$  ist, die den Verschleiß verursacht, sodass für den Aufprall eines Einzelpartikels vereinfacht gilt,

$$V_{\text{Impact,Finnie}} = k_{\text{Impact}} E_{\text{Finnie}} , \quad (3)$$

mit dem Verschleißkoeffizient  $k_{\text{Impact}}$  und der Energie  $E_{\text{Finnie}}$ ,

$$E_{\text{Finnie}} = \frac{1}{4} \frac{1}{2} m v^n f(\alpha), \quad (4)$$

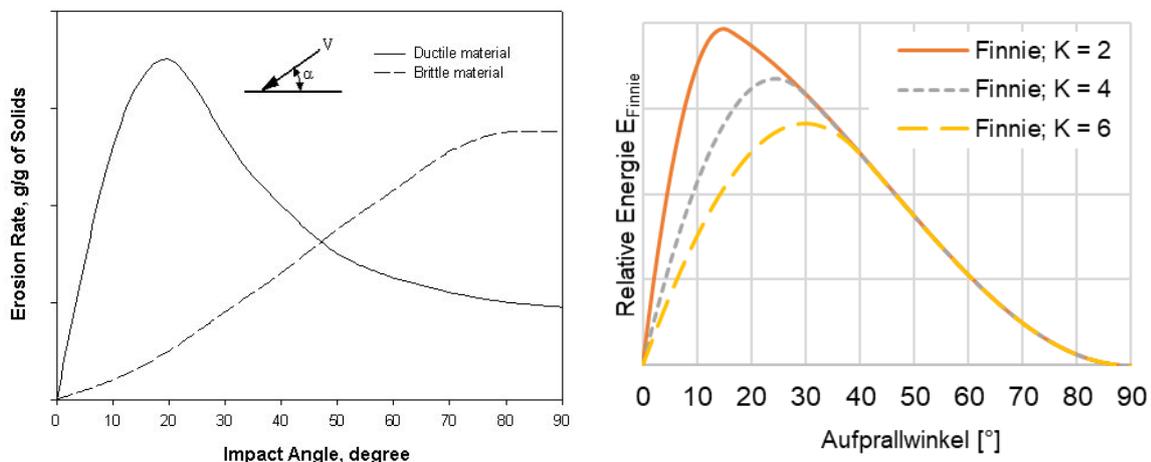
mit:  $m$  Masse des Partikels  
 $v$  Geschwindigkeit des Partikels  
 $n$  Geschwindigkeitsexponent zwischen 2 ... 2,5

und der Winkelfunktion,

$$f(\alpha) = \begin{cases} \frac{2}{K} [\sin(2\alpha) - \frac{7}{K} \sin(\alpha)^2] & \forall \tan(\alpha) \leq \frac{K}{7} \\ \frac{2}{7} \cos(\alpha)^2 & \forall \tan(\alpha) > \frac{K}{7} \end{cases}, \quad (5)$$

mit  $K$  Verhältnis Normalkraft zur Tangentialkraft.

Das Verhältnis der Normalkraft zur Tangentialkraft  $K$  bestimmt die Lage des Winkels des maximalen Verschleißes und wird häufig als Reziproke des Reibwertes angenommen, wobei Finnie [5,6] explizit darauf hinweist, dass dieser Wert im Zeitpunkt des Pralls nicht direkt gemessen werden kann. Typischerweise liegen die Werte zwischen 2 und 6, wodurch sich die in Bild 3 (rechts) gezeigten Verläufe der Verschleißenergie  $E_{\text{Finnie}}$  mit den maximalen Verschleißwinkeln ergeben.



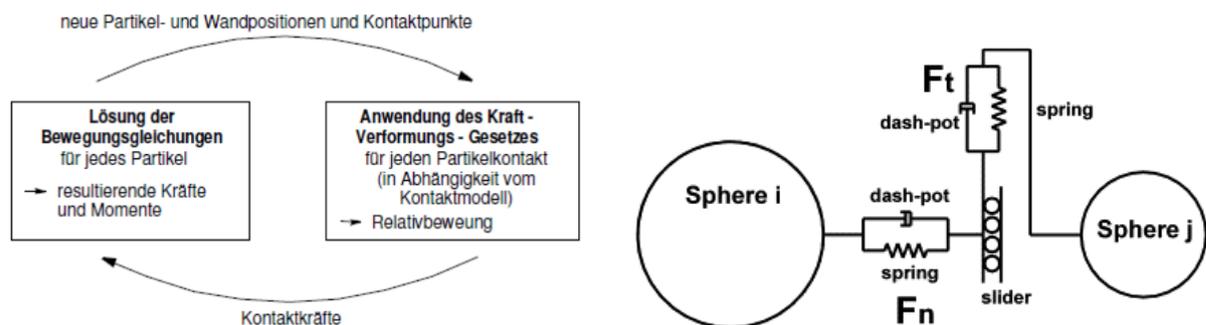
**Bild 3:** Qualitativer Verschleiß in Abhängigkeit des Aufprallwinkels für duktile und spröde Werkstoffe [7] (links); Theoretischer Verlauf des Finnie-Modells in Abhängigkeit des Normal-Tangential-Kraft-Verhältnisses  $K$  für ein Einzelpartikelkontakt (rechts)

Vergleicht man den qualitativen Verlauf des Prallverschleißes bei einem Partikelstrom (Bild 3, links) mit dem eines Einzelpartikels nach Finnie (Bild 3, rechts), ist zu erkennen, dass nach dem Finnie-Modell bei einem Aufprallwinkel von  $90^\circ$  kein Verschleiß zu erwarten wäre, während die Experimente zeigen, dass ein signifikanter Verschleiß entsteht. Dieses ist zum einen dadurch zu erklären, dass in einem Materialstrom von der Oberfläche zurückspringende Partikel mit anderen Partikeln kollidieren und so einzelne Partikel teilweise nicht unter dem idealen Winkel von  $90^\circ$  erneut auftreffen. Zum anderen können beim wiederholten senkrechten Auftreffen einzelner Partikel ebenfalls Materialstücke aus der Wandoberfläche ausgetragen werden.

Unter der Annahme, dass sich Verschleißvorgänge allgemein im Falle des Gleitens durch das Archard Modell und im Falle des Prallens durch das Finnie-Modell beschreiben lässt, bilden diese Modelle die Grundlage für die Implementierung und Modellierung in der DEM.

### 3 Verschleißmodelle in der Diskrete Elemente Methode

Grundlage der DEM ist die Berechnung der wirkenden Kräfte zwischen den Partikeln bzw. zwischen einem Partikel und einer angrenzenden Fläche. Dabei werden die Partikel und Wände zu Beginn der Simulation mit einer Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeit generiert. Anschließend wird für jedes Partikel auf Basis der Summe der einwirkenden Kräfte (Kontakt-, Gravitationskräfte) eine resultierende Kraft ermittelt. Durch die Lösung der Newtonschen Bewegungsgleichung wird für jedes Partikel  $i$  des Mehrkörpersystems durch zweifache zeitliche Integration über einen kurzen Zeitschritt die neue Position und Geschwindigkeit für jedes Teilchen bestimmt. Die Verschiebung der Teilchen führt zur Neubildung und Auflösung von Kontakten, sodass nach jedem Integrationsschritt eine erneute Ermittlung der Kontaktpaare erfolgen muss. Dieser Ablauf aus Kontakterkennung und Integration der Bewegungsgleichungen ist in Bild 4 dargestellt.

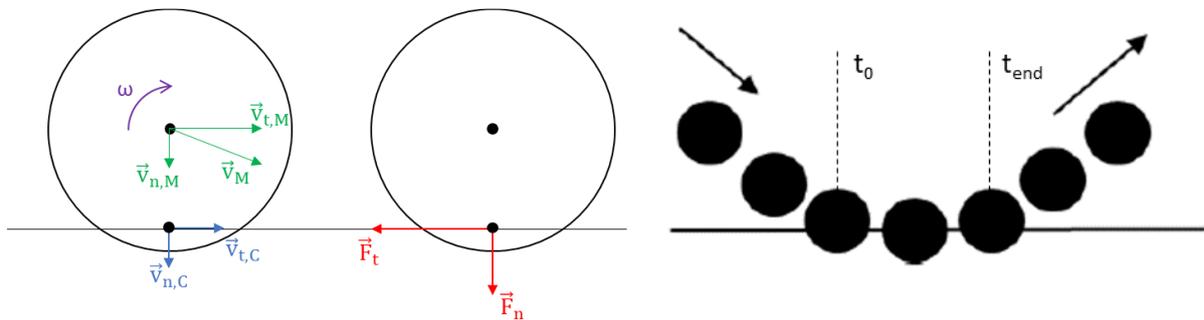


**Bild 4:** Berechnungszyklus der DEM nach [8] und klassisches DEM-Kontaktmodell nach [9]

Die auf ein Partikel wirkenden Kräfte werden anhand geeigneter Kontaktmodelle ermittelt. Dabei wird der Ansatz starrer Partikel mit weichen Kontakten verwendet, bei dem die Kontaktinteraktion auf einer virtuellen Überlappung zwischen den einzelnen Partikeln untereinander bzw. zwischen den Partikeln und den Wandelementen beruht. Durch diese Überlappung wird eine Rückstellkraft zwischen den Partikeln bewirkt, die durch geeignete Kontaktmodelle (z. B. lineares Federmodell, nicht lineares Modell nach Hertz-Mindlin) berechnet werden kann. Während des Kontakts kann Energie durch Berücksichtigung einer Dämpferkraft (meist viskoses Dämpfungsmodell) sowie durch Reibung (Coulomb'sche Gleitreibung und Rollreibung) dissipiert werden (Bild 4). Zur Simulation der Kräfte wird in diesem Beitrag das Kontaktmodell nach Hertz-Mindlin (no-slip) angewendet. Es enthält überwiegend bekannte Materialparameter und beschreibt jeweils die Normal- und Tangentialkräfte, die auf ein Partikel an den Kontaktstellen wirken.

Im Folgenden werden z. T. aus der Literatur bekannte Verschleißmodelle in die Software LIGGGHTS implementiert. Da aus der Literatur die Bezeichnungen, insbesondere der verwendeten Geschwindigkeiten, nicht immer eindeutig ersichtlich sind, zeigt das folgende Bild 5 schematisch die an einem Partikel während des Kontaktes mit einer Wand wirkenden Geschwindigkeiten und Kräfte (Bild 5, links). Im rechten Teil des Bildes 5 ist die Auflösung

eines Prallkontaktes über mehrere Zeitschritte dargestellt. Im Zeitschritt  $t_0$  beginnt der Kontakt zwischen der Oberfläche und dem Partikel und dauert mehrere Iterationsschritte, bis er im Zeitpunkt  $t_{\text{end}}$  endet.



**Bild 5:** Geschwindigkeiten und Kräfte eines Partikel-Wand-Kontaktes (links); Prinzip der Kontakthistorie eines zeitdiskret aufgelösten Kontaktes in der DEM (rechts)

### Gleitverschleißmodelle:

Die Gleitverschleißmodelle sollen bei der Berechnung nur aktiviert werden, wenn der Fall des Gleitens angenommen werden kann. Dementsprechend erhalten diese Modelle als Nebenbedingung, dass der Winkel zwischen der Oberfläche und der Bewegungsrichtung des Partikels kleiner als  $1^\circ$  sei. Die Berechnung der eingetragenen Energie entspricht der Summe der Energien der einzelnen Zeitschritte während des Kontaktes zwischen Partikel und Wand, beginnend vom Zeitpunkt  $t_0$  bis zum Zeitpunkt  $t_{\text{end}}$ .

#### Modell G-I: Archard

$$E_{\text{Archard},G-I} = \sum |F_n v_{t,C}| dt, \quad \forall \quad \alpha \leq 1,0^\circ \quad (6)$$

#### Modell G-II: Tangentiale Energie

$$E_{\text{TE},G-II} = \sum |F_t v_{t,C}| dt, \quad \forall \quad \alpha \leq 1,0^\circ \quad (7)$$

### Prallverschleißmodelle – Finnie-Modelle:

#### Modell P-I: Finnie (Masse)

$$E_{\text{Finnie},P-I} = m v^{2,3} f(\alpha) \quad \forall \quad \alpha > 1,0^\circ \quad \text{und } t = t_0, \quad (8)$$

mit  $f(\alpha)$  gem. Gleichung (5).

Die Berechnung der Verschleißenergie entspricht der theoretischen Formel nach Finnie. Die Berechnung für einen Aufprall findet nur einmal zum Zeitpunkt  $t = t_0$  statt. Während des restlichen Kontaktes findet keine Berechnung der Energie statt.

Modell P-II: Finnie (max. Force)

$$E_{Finnie,P-II} = \sum |\vec{v}_M| |\vec{F}| f(\alpha) \quad \forall \quad v_n < 0 \text{ m/s} \wedge v_M > 10^{-7} \text{ m/s} \quad (9)$$

mit

$$f(\alpha) = \begin{cases} \frac{2}{K} \left[ \sin 2\alpha - \frac{K}{2} \sin^2 \alpha \right] & \forall \quad \tan \alpha \leq \frac{K}{6} \\ \frac{1}{3} \cos^2 \alpha, & \forall \quad \tan \alpha > \frac{K}{6} \end{cases} \quad (10)$$

Dieses Modell entspricht der Standardimplementierung in der Software LIGGGHTS, welche versucht, statt auf Basis der Partikelmasse den Kontakt über die Kontaktzeit auf Basis der wirkenden Gesamtkraft und der Geschwindigkeit aufzulösen. Dabei ist anzumerken, dass im Gegensatz zu der zuvor beschriebenen allgemeinen Form des Finnie-Modells lediglich eine bestimmte Form für den Fall, dass das Normal-Tangential-Kraftverhältnis  $K = 2$  beträgt, implementiert wurde.

Modell P-III: Finnie (Fixed Angle)

Ausgehend von dem Problem der sich verändernden Winkel und tangentialen Kraft, wurde eine weitere Version des Finnie-Modells mit Winkelfunktion implementiert:

$$E_{Finnie,P-III} = \sum \frac{|\vec{F}_n|}{\sin \alpha_{t_0}} \frac{|\vec{v}_n|}{\sin \alpha_{t_0}}^{1,3} f(\alpha_{t_0}) \quad \forall \quad \alpha > 1,0^\circ \text{ und } v_n < 0 \quad (11)$$

Bei dieser Implementierung werden aus Normalkraft und Normalgeschwindigkeit eine fiktive Kraft und eine Geschwindigkeit berechnet, die während des Kontaktes entlang der initialen Bewegungsrichtung des Partikels zum Zeitpunkt  $t_0$  wirken. Dieses Modell hat den Vorteil, dass die während des Kontaktes zum Teil un stetigen Veränderungen der tangentialen Geschwindigkeit und der tangentialen Kraft nicht berücksichtigt werden.

Modell P-IV: Finnie (SIEM)

Das SIEM Modell entspricht einer Implementierung auf Basis der tangentialen Kräfte und Geschwindigkeiten, wobei die Autoren in [10] zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen das SIEM Modell den Verlauf des Finnie-Modells sehr gut abbilden kann. Gleichzeitig entspricht das Modell bei einer parallelen Bewegung des Partikels zur Wandoberfläche dem Gleitmodell der tangentialen Energie G-II unter Nebenbedingungen. Für die Berechnung der Verschleißenergie gilt:

$$E_{Finnie,P-IV} = \sum |\vec{F}_t \cdot \vec{v}_{t,C}| dt, \quad \forall \quad \vec{F}_t \cdot \vec{v}_{t,C} < 0 \text{ und } \vec{F}_t \cdot \vec{v}_M < 0 \quad (12)$$

Modell P-V: Normalenergie

Im voranstehenden Kapitel zur theoretischen Beschreibung wurde angemerkt, dass das Finnie-Modell die Verschleißenergien, die bei einem nahezu senkrechten Aufprall auftreten, nur bedingt beschreiben kann. Aus diesem Grund empfehlen einige Autoren, zusätzlich den Eintrag der Normalenergie während des Aufpralls zu berücksichtigen. Die eingetragene Energie entspricht dabei der Summe der in jedem Zeitschritt berechneten Normalenergien,

unter der Bedingung, dass sich das Partikel auf die Wand zu bewegt:

$$E_{NE,P-V} = \sum |F_n v_{n,C}| dt, \quad \forall \quad v_n < 0 \quad (13)$$

Durch die dargestellten Modelle werden somit die unterschiedlichen Beanspruchungsfälle einer Oberfläche durch ein Einzelpartikel, die zu einem Verschleiß führen, abgedeckt. Der Gesamtverschleiß eines Bauteils würde sich folglich als Summe der einzelnen Modelle, gewichtet durch einen Verschleißkoeffizienten  $k$ , ergeben. Da die Gleitmodelle (G-I und G-II) und die Prallmodelle (P-I bis P-IV) jeweils die gleichen Effekte beschreiben, wäre zu erwarten, dass sich der Gesamtverschleiß aus der Kombination eines Gleitmodells und eines Prallmodells zuzüglich des Prallmodells der Normalenergie ergibt. Somit würde für die Berechnung des Gesamtverschleißes als Volumenverlust gelten:

$$V_{ges} = V_{Gleiten} + V_{Prall} = \sum_{i=I}^{II} k_{G-i} E_{G-i} + \sum_{j=I}^{IV} k_j E_{P-j} + k_{P-V} E_{P-V} \quad (14)$$

Zur Ermittlung der jeweils am besten geeigneten Modelle und der Verschleißkoeffizienten  $k$  werden experimentelle Referenzwerte benötigt, deren Bestimmung im nachfolgenden Kapitel gezeigt wird.

## 4 Experimentelle Verschleißuntersuchungen

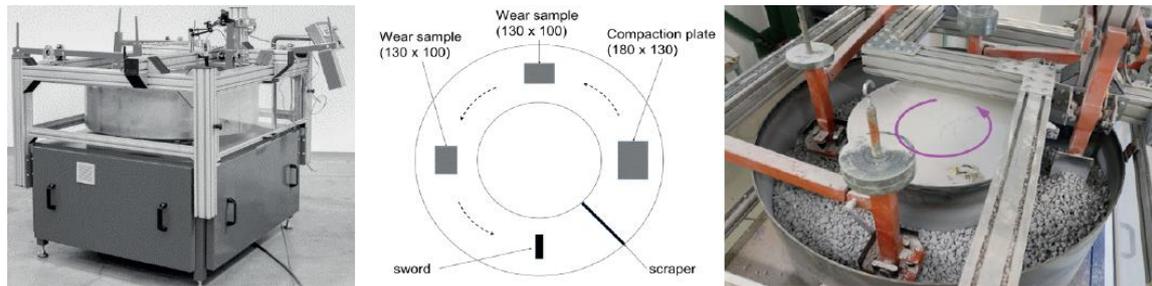
### 4.1 Aufbau der Versuchsstände und Versuchsmaterialien

Generell existieren in der Schüttguttechnik keine standardisierten Experimente zur Bestimmung der Verschleißkoeffizienten für gleitende und prallende Beanspruchungen. So könnte eine Bestimmung anhand von Einzelkornversuchen erfolgen, beispielsweise durch das Schießen einzelner Körner auf eine Probenplatte unter variierenden Winkeln oder das Gleiten eines Einzelpartikels auf einer Probenplatte, wie in einem Pin-on-Disc-Versuch [11]. Diese Verfahren benötigen in der Regel eine Vielzahl an Versuchen, um eine repräsentative Aussage zu ermitteln, da die Korneigenschaften innerhalb des Schüttgutes stark variieren können. Zudem könnten durch das Fixieren eines Einzelkorns wie im Pin-on-Disc-Versuch die typischen freien Interaktionen der Partikel untereinander und mit der Bauteiloberfläche, wie sie in der industriellen Anwendung auftreten, verloren gehen. Aus diesem Grund sind Experimente anzustreben, bei denen die Schüttgut-Bauteil-Interaktion möglichst der der industrienahen Anwendungen entspricht.

#### Aufbau des Gleitverschleißversuchsstandes

Für die experimentellen Versuche zum Gleitverschleiß wurde ein Versuchsstand in Anlehnung an [12,13] entwickelt und aufgebaut. Das folgende Bild 6 zeigt den funktionalen Aufbau anhand einer Prinzipskizze. Der Versuchsstand besteht aus einem mit Schüttgut gefüllten rotierenden Trog mit einem Innendurchmesser von 500 mm und einem Außendurchmesser von 1000 mm und ermöglicht eine stufenlose Geschwindigkeitsvariation von 1 U/min bis 20 U/min. Bezogen auf eine ideale Kreisbahn in der Mitte der Trogrinne ( $r = 0,375$  m), entspricht dieses einem tangentialen Geschwindigkeitsbereich von 0,039 bis 0,785 m/s. Entsprechend der definierten Füllhöhe wird ein Abstreifer installiert, der eine ebene Schüttgutoberfläche während des Versuchs gewährleistet. Dieses ist notwendig, da das Schüttgut kontinuierlich durch einen Pflug durchmischt wird. Die Durchmischung des Schüttgutes soll gewährleisten, dass es zu einer

gleichmäßigen Abnutzung des Schüttgutes während der Versuchsdauer kommt.



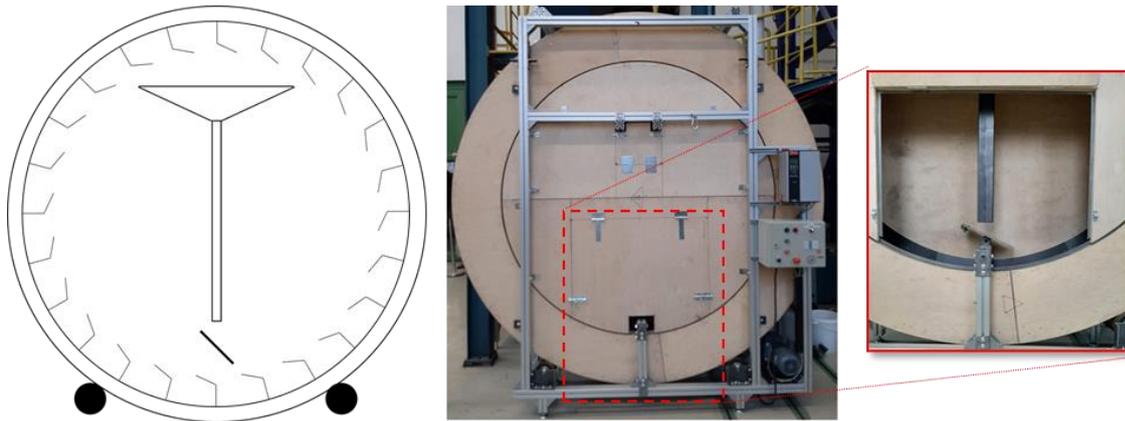
**Bild 6:** Aufbau des realen Versuchsstandes (links), Prinzipskizze in der Draufsicht (Mitte), realer Versuchsstand während einer Verschleißmessung (rechts)

Die einzelnen Verschleißprobenplatten werden an Halterungen am unteren Ende der Lastarme mittels Spannpratzen befestigt. Das Prinzip der Lastarme zur normalen Kräfteinleitung auf die Probenplatten entspricht dabei einer gegengewichtig gelagerten Wippe. Durch das Auflegen von Gewichten werden definierte Normallasten auf die einzelnen Verschleißprobenplatten aufgebracht. Zusätzlich können die Verschleißproben gegenüber der Horizontalen um einen Anlaufwinkel zwischen  $0^\circ$  und  $3^\circ$  eingestellt werden, wodurch ein Einsinken bzw. ein Überfließen der Verschleißproben verhindert werden soll.

Die Messungen des Verschleißes durch Bestimmung des Masseverlustes erfolgen dabei für die dargestellten Verschleißproben, während die Kompaktierungsplatte lediglich für eine konstante Vorverdichtung des Schüttgutes zur Gewährleistung konstanter Bedingungen dient. In den folgenden Untersuchungen werden die Probenplatten bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 12 U/min (mittlere tangentielle Geschwindigkeit 0,475 m/s) mit 2 kg, 4 kg und 6 kg Normallast beansprucht.

#### Aufbau des Prallverschleißversuchsstandes

Zur Untersuchung des Prallverschleißes wird ein sogenannter Prallradversuchsstand verwendet (Bild 7). Der Versuchsstand besteht aus einer auf zwei Reibrädern gelagerten Trommelscheibe mit einem Durchmesser von 2700 mm und einer Tiefe von 300 mm. Im Inneren des Rades befindet sich ein Aufgabetrichter mit einem 1350 mm langen, quadratischen (60 x 60 mm) Fallrohr. Während der Versuche wird das Schüttgut im unteren Bereich der Trommelscheibe durch die innen liegenden Becher aufgenommen und im oberen Bereich in den Aufgabetrichter abgegeben. Unter dem Einfluss der Schwerkraft fällt das Schüttgut durch das Fallrohr vertikal nach unten und prallt auf eine am Ende des Fallrohres befindliche Verschleißprobenplatte. Nach dem Aufprall fließt das Schüttgut in den unteren Bereich der Trommelscheibe, wo es durch die Becher erneut aufgenommen wird.



**Bild 7:** Aufbau des Versuchsstandes als Prinzipskizze in der Frontansicht (links);  
 realer Versuchsaufbau im geschlossenen Zustand (Mitte);  
 realer Versuchsaufbau im geöffneten Zustand mit Blick auf die Probenaufnahme und Fallrohr  
 (rechts)

Durch Einstellung der Verschleißprobenplatte unterhalb des Fallrohres können Aufprallwinkel zwischen  $15^\circ$  und  $90^\circ$  realisiert werden. Die Aufprallgeschwindigkeit des Schüttgutes ergibt sich aus der Länge des Fallrohres und beträgt ca. 5 m/s. Die Rotationsgeschwindigkeit der Trommelscheibe ist in einem Bereich zwischen 0,5 U/min und 2,5 U/min stufenlos einstellbar, wodurch in Abhängigkeit der zu wählenden Schüttgutmasse unterschiedliche Massenströme realisiert werden können. In den folgenden Untersuchungen werden 60 kg (5 kg x 12 Becher) bei einer Rotationsgeschwindigkeit von 0,5 U/min verwendet. Daraus folgt ein mittlerer Massenstrom von 1 kg/s bzw. 3,6 t/h.

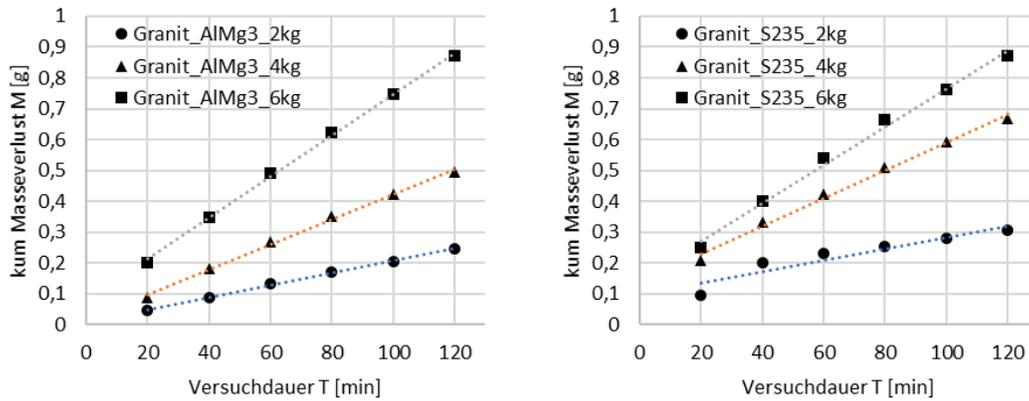
### Probenmaterialien

Für die experimentellen Untersuchungen wird Granitsplit 5/8 mm mit einer Mineralhärte von 7 bis 8 Mohs [8], einer Schüttdichte von  $1193 \text{ kg/m}^3$  und einer Korngrößenverteilung bis 10 mm verwendet. Als Wandmaterialien werden Proben aus einer Aluminiumlegierung AlMg3 und aus Baustahl S235-JR verwendet. Die Aluminiumlegierung hat eine Dichte von  $2660 \text{ kg/m}^3$  und eine Vickershärte von 64 HV. Der Baustahl hat eine Dichte von  $7840 \text{ kg/m}^3$  und eine Vickershärte von 128 HV. Die Wandreiwerte des Granitsplitts betragen 0,42 gegenüber der Aluminiumlegierung AlMg3 und 0,37 gegenüber dem Baustahl S235-JR.

## **4.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen**

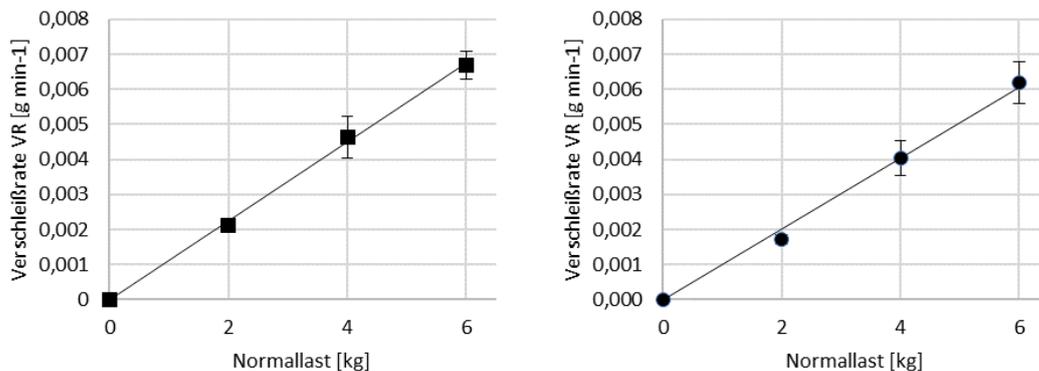
### **4.2.1 Ergebnisse der Gleitverschleißversuche**

Die Gleitverschleißversuche wurden bei einer mittleren Geschwindigkeit von 0,47 m/s ( $U = 12 \text{ U/min}$ ) durchgeführt. Ein Versuch dauert zwei Stunden, wobei in einem Intervall von 20 Minuten die Proben entnommen, gereinigt und die Masseverluste der Proben durch Auswiegen mittels Feinwaage bestimmt werden. Das folgende Bild 8 zeigt exemplarisch den Masseverlust der Proben aus AlMg3 und S235-JR über der Versuchsdauer. Die Annahme eines linearen Verschleißes über der Zeit bzw. über der Verschleißstrecke im untersuchten Bereich kann als gültig erachtet werden.



**Bild 8:** Experimentelle Messungen des Masseverlustes für AlMg3 (links) und S235-JR (rechts) bei unterschiedlichen Belastungen

In Bild 9 sind die Verschleißraten, die der Steigung der voranstehenden Geraden entsprechen, über der Normallast dargestellt, wobei es sich um die Mittelwerte der Wiederholungsversuche handelt. Die Annahme einer linearen Abhängigkeit des Verschleißes von der wirkenden Normallast kann ebenfalls als gültig erachtet werden.



**Bild 9:** Experimentelle Verschleißraten bei unterschiedlichen Belastungen für AlMg3 (links) und S235-JR (rechts)

Für die massebezogenen Verschleißraten der Proben folgt:

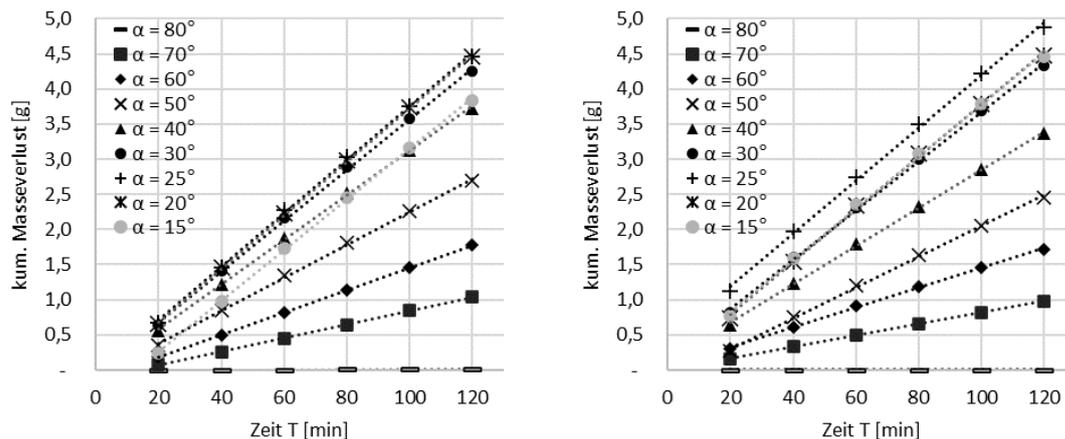
$$VR_{M, \text{Granit-AlMg3}} = 0,00113 \frac{\text{g}}{\text{kg min}} \quad (15)$$

$$VR_{M, \text{Granit-S235}} = 0,00101 \frac{\text{g}}{\text{kg min}} \quad (16)$$

Diese Verschleißraten entsprechen den Referenzwerten für die Kalibrierungssimulationen.

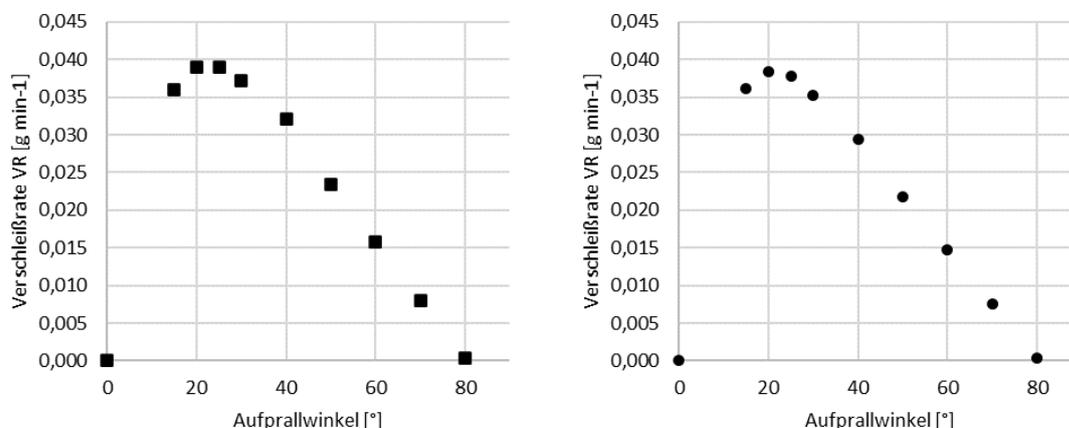
## 4.2.2 Ergebnisse der Prallverschleißversuche

In den Prallverschleißversuchen werden die Masseverluste der Proben für unterschiedliche Aufprallwinkel zwischen  $15^\circ$  und  $80^\circ$  bestimmt. Ein Versuch dauert zwei Stunden, wobei in einem Intervall von 20 Minuten die Proben entnommen, gereinigt und die Masseverluste der Proben durch Auswiegen mittels Feinwaage bestimmt werden. Das folgende Bild 10 zeigt exemplarisch den Masseverlust der Proben aus AlMg3 und S235-JR. Die Annahme eines linearen Verschleißes über der Zeit im untersuchten Bereich kann als gültig erachtet werden.



**Bild 10:** Masseverluste bei variierenden Aufprallwinkeln für AlMg3 (links) und S235-JR (rechts)

In Bild 11 sind die Verschleißraten, die der Steigung der voranstehenden Geraden entsprechen, über dem Aufprallwinkel dargestellt, wobei es sich um die Mittelwerte der Wiederholungsversuche handelt. Für die Proben AlMg3 ist der kritische Aufprallwinkel zwischen  $20^\circ$  und  $25^\circ$  zu erwarten, während bei der Proben S235-JR der kritische Aufprallwinkel nahe  $20^\circ$  zu erwarten ist. Der allgemeine Verlauf der Kurven stimmt gut mit den aus der Theorie zu erwartenden Verläufen und den Verläufen aus der Theorie nach Finnie überein. In beiden Fällen zeigt sich, dass bei einem Aufprallwinkel von  $80^\circ$  nahezu keine Verschleiß gemessen wird. In diesem Fall fließt das Schüttgut im Experiment nicht von der Probenplatte ab und es kommt zu einem Aufbau eines Schüttguthaufens.



**Bild 11:** Experimentelle Verschleißraten bei unterschiedlichen Aufprallwinkeln für AlMg3 (links) und S236-JR (rechts)

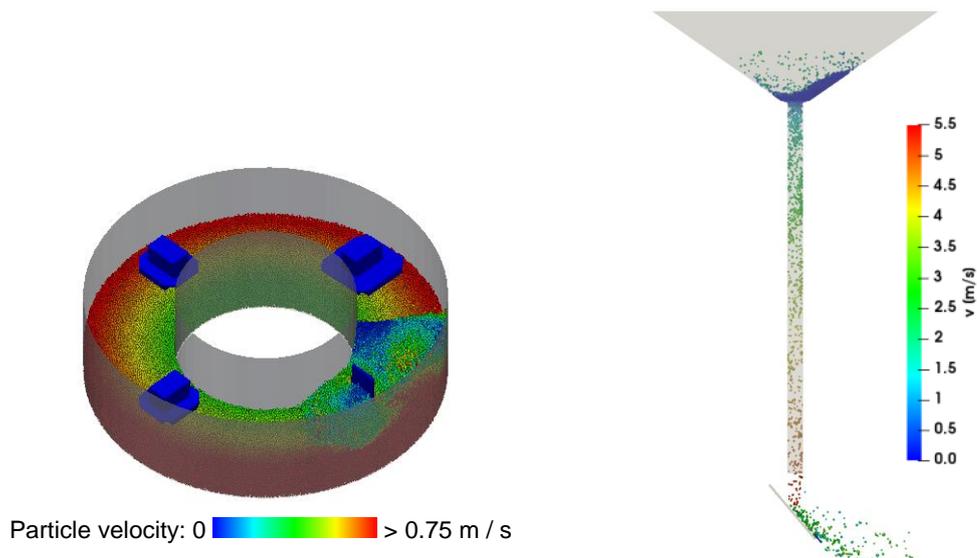
## 5 DEM Simulationen

Zur Durchführung der Verschleißsimulationen werden die DEM-Parameter in Tabelle 1 verwendet. Diese ergeben sich auf Basis zuvor durchgeführter Kalibrierungssimulationen. Genauere Informationen zur Kalibrierung können u. a. aus [14–16] entnommen werden.

**Tabelle 1:** DEM Material und Kontakteigenschaften

Eigenschaft	Einheit	Wert
Partikeldichte	kg/m <sup>3</sup>	2146
Schermodul	Pa	10e+8
Poissonzahl	-	0,30
Rücksprungzahl	-	0,40
Reibbeiwert Granit vs. Stahl	-	0,37
Reibbeiwert Granit vs. AlMg3	-	0,42
Reibbeiwert Granit vs. Granit	-	0,30
Rollreibungswert		0,80
Partikelgröße	-	6,5 mm bis 11 mm
Zeitschritt	s/step	1e-5

Das Bild 12 zeigt den Aufbau der Simulationsmodelle des Gleit- (links) und des Prallversuchsstandes (rechts). Die Einfärbung der Partikel kennzeichnet in beiden Fällen deren aktuelle Geschwindigkeit. Die vertikale Belastung der Lastarme in der Gleitverschleißsimulation (links) wird durch eine gekoppelte DEM-MB-Simulation realisiert. Dadurch können die Platten in Abhängigkeit von den auf diese wirkenden Kräften bewegt werden. Für weitere Grundlagen der DEM-MB-Kopplung sei auf [17,18] verwiesen. In der Simulation können die Positionen und Winkeleinstellungen sowie die Belastungen der einzelnen Proben und die Geschwindigkeit des Trogs 1:1 aus den Experimenten übernommen werden. Für die Simulation des Prallversuchsstandes wurden Vorsimulationen durchgeführt, bei denen der entstehende Massenstrom ermittelt wurde. In den hier gezeigten Seriensimulationen wird der Massenstrom vereinfacht innerhalb des Trichters generiert. Im Gegensatz zum idealen Massenstrom von 1 kg/s weicht dieser leicht ab und beträgt 0,92 kg/s.



**Bild 12:** Aufbau der Simulationsmodelle des Gleitverschleißes (links) und des Prallverschleißes (rechts)

Ziel der Kalibrierung ist es, die Verschleißkoeffizienten  $k$  des Kontakts eines einzelnen Partikels mit der Oberfläche für die einzelnen Verschleißmodelle (Kapitel 3) zu kalibrieren und durch geeignete Kombination der Modelle die experimentellen Verschleißraten der Probenplatten aus den Gleit- und Prallversuchen abzubilden. Dabei sollen jeweils ein Finnie-Prallmodell, das Normalenergiemodell und ein Gleitmodell kombiniert werden, sodass die Abweichungen der Verschleißraten der Probenplatten aus Experiment und Simulation minimiert werden. Durch dieses iterative Vorgehen erhält man als Lösungen, dass die folgenden zwei Kombinationen der Modelle am besten geeignet sind.

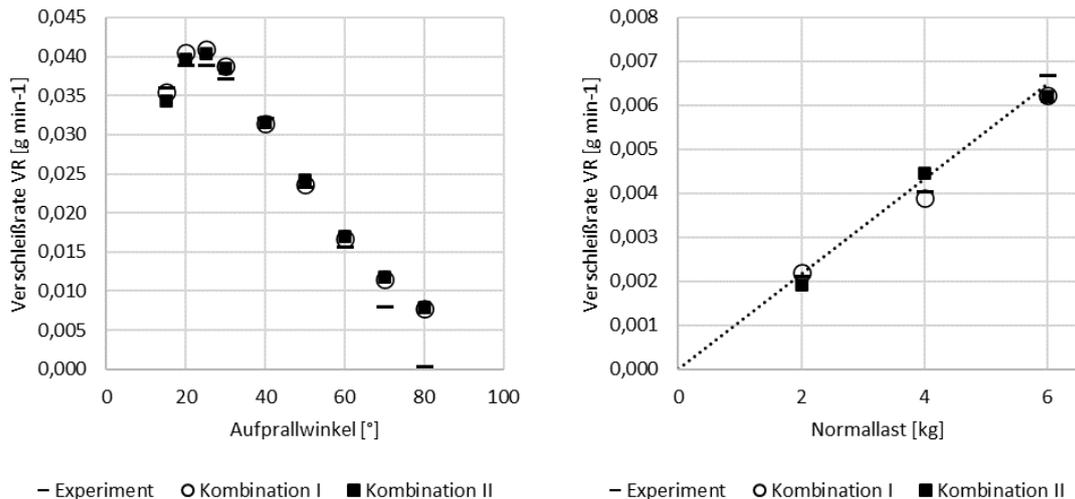
Kombination I:

$$VR = \frac{k_{P-I} E_{Finnie,P-I} + k_{P-V} E_{NE,P-V} + k_{G-I} E_{Archard,G-I}}{\Delta t} \quad (17)$$

Kombination II:

$$VR = \frac{k_{P-III} E_{Finnie,P-III} + k_{P-V} E_{NE,P-V} + k_{G-I} E_{Archard,G-I}}{\Delta t} \quad (18)$$

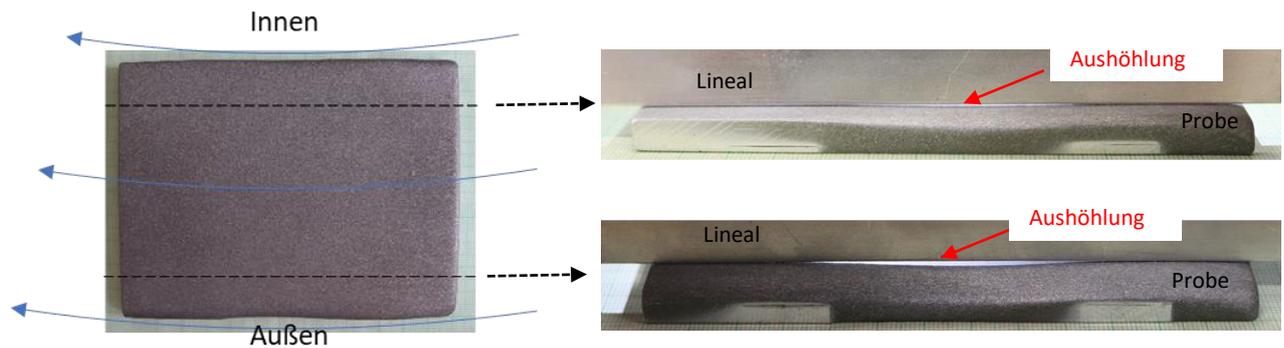
Unter Verwendung der kalibrierten Verschleißkoeffizienten  $k$  für die einzelnen Modelle ergeben sich für die beiden Kombinationen die folgenden simulierten Verschleißraten aus dem Prallversuch und dem Gleitversuch, beispielhaft dargestellt im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen der Aluminiumlegierung AlMg3 (Bild 13).



**Bild 13:** Vergleich der experimentellen Verschleißraten mit den simulierten Verschleißraten für die Kombination unterschiedlicher Verschleißmodelle für Prall- (links) und Gleitversuche (rechts)

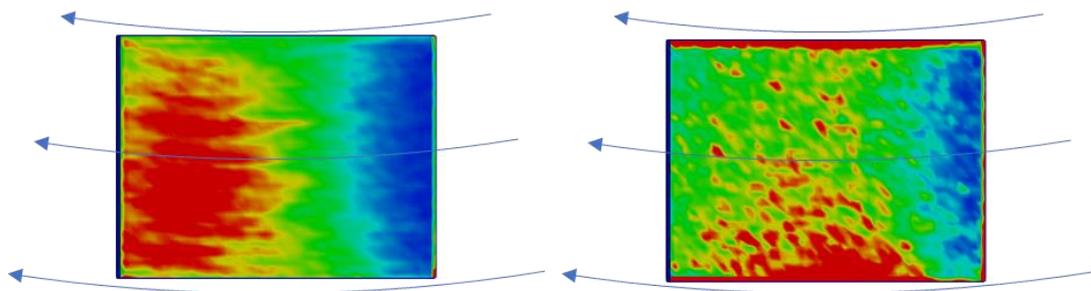
Bild 13 zeigt, dass die beiden Kombinationen die experimentellen Ergebnisse gut abbilden. Bei den Prallversuchen (links) werden sowohl der allgemeine Verlauf als auch die Verläufe bei kritischen Aufprallwinkeln zwischen 20° und 25° gut abgebildet. Lediglich bei einem Aufprallwinkel von 80° wird bei beiden Kombinationen eine deutlich zu hohe Verschleißrate berechnet. Dieses ist darauf zurückzuführen, dass sich in der Simulation während der Messung noch kein Haufwerk auf der Probenplatte ausgebildet hatte und es so zu keinem passiven Schutz durch das Schüttgut wie im Experiment kommt. Die Simulationen im Gleitversuch (rechts) zeigen ebenfalls für beide Kombinationen den experimentellen linearen Verlauf der Verschleißrate in Abhängigkeit der Normallast. Die durchschnittlichen Abweichungen über alle Messpunkte (ohne Aufprallwinkel 80°) betragen für die Kombination I 7,5 % und für die Kombination II 9,2 %.

Unter Betrachtung der Verschleißraten kann kein Qualitätsunterschied zwischen den beiden Kombinationen festgestellt werden. Aus diesem Grund wird als zusätzliches Kriterium das Verschleißbild herangezogen. Bild 14 zeigt das Verschleißbild einer AlMg3 Probenplatte der Gleitverschleißversuche bei einer Normallast von 4 kg. Die blauen Pfeile kennzeichnen dabei die Bewegungsrichtung des Schüttgutes unter der Probe während des Versuches (Bild 14, links). Anhand der leichten Aushöhlung in der Mitte der unteren Kante ist zu erkennen, dass es an dieser Position zu einem erhöhten Verschleiß der Probe kommt. Diese Aushöhlung ist auch auf der Oberfläche der Probenplatte zu erkennen. Die Aushöhlung liegt in der Mitte der Platte längs zur Bewegung des Schüttgutes und nimmt von innen nach außen zu, wie das Lichtspaltverfahren an den beiden markierten Stellen qualitativ sehr gut verdeutlicht.



**Bild 14:** Verschleißbild einer AlMg3 Probe bei einer Normallast von 4 kg zur Verdeutlichung der verschleißinduzierten Formveränderung nach ca. 100 km

Im Vergleich zum Experiment (Bild 14) zeigt das nachfolgende Bild 15 das simulierte Verschleißbild für die beiden Kombinationen der Verschleißmodelle nach Gleichung (17) und Gleichung (18). Die Einfärbungen der Platte kennzeichnen die lokale Verschleißverteilung, wobei rote Bereiche einen hohen Verschleiß und blaue Bereiche einen niedrigen Verschleiß signalisieren.



**Bild 15:** Qualitatives Verschleißbild der Simulationen einer Probenplatte bei einer Normallast von 4 kg für die Verschleißmodellkombinationen I (links) und II (rechts)

Der qualitative Vergleich des Verschleißbildes zeigt, dass die beiden Kombinationen der Verschleißmodelle trotz annähernd gleicher simulierter Verschleißraten (vgl. Bild 13) zu grundsätzlich unterschiedlichen Verschleißbildern führen. Die Kombination I zeigt einen in Bewegungsrichtung des Schüttgutes deutlich zunehmenden Verschleiß. Im Gegensatz dazu zeigt die Kombination II einen Verschleiß, der - wie in den Experimenten - durch einen erhöhten Verschleiß in der Mitte der Probenplatte längs zur Bewegungsrichtung des Schüttgutes gekennzeichnet ist. Wie in den Experimenten nimmt dieser Verschleiß von innen nach außen deutlich zu.

Aufgrund des Unterschieds der qualitativen Verschleißbilder der Modellkombinationen wird gefolgert, dass die Kombination II deutlich besser geeignet ist, den realen Verschleiß sowohl quantitativ als auch qualitativ abzubilden. Da sich die beiden Kombinationen im Wesentlichen durch die Auswahl des Finnie-Modells unterscheiden, kann gezeigt werden, dass bei dichten Schüttgutströmen - wie im Gleitverschleißversuch - die Verwendung des Finnie-Modells unter Verwendung der Partikelmasse (Gleichung 8) den entstehenden Verschleiß durch schräg aufkommende Partikel unterschätzt.

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie es auf Basis der Diskrete Elemente Methode möglich ist, unterschiedliche Verschleißmodelle zu implementieren und auf Basis von geeigneten experimentellen Referenzuntersuchungen zu kalibrieren. Als Referenzexperimente werden ein Gleitverschleißversuch und ein Prallverschleißversuch verwendet, die es ermöglichen, die Entwicklung des Verschleißes bei einer freien Schüttgut-Bauteil-Interaktion zu ermitteln, wie sie bei industrienahen Anwendungen zu erwarten ist. Die Experimente bestätigen, dass die aus der Theorie bekannten Modelle, das Archard Modell zur Beschreibung von Gleitverschleiß und das Finnie-Modell zur Beschreibung des Prallverschleißes, bei duktilen Werkstoffen gültig sind.

Die Grundidee der auf den Experimenten aufbauenden Kalibrierung der DEM Verschleißmodelle basiert darauf, dass auf Basis des makroskopischen Verschleißes/der makroskopischen Verschleißraten der experimentellen Proben, Verschleißkoeffizienten für den Kontakt eines Einzelpartikels mit der Oberfläche in der DEM ermittelt werden können. In den DEM Simulationen wird gezeigt, dass unterschiedliche Ansätze zur Implementierung der Modelle existieren, wobei es durch die Kombination unterschiedlicher Modelle möglich ist, den entstehenden Verschleiß der Proben aus den experimentellen Untersuchungen abzubilden. Bei einer Betrachtung des Verschleißes bzw. der Verschleißraten als einzige Referenz zwischen den Experimenten und der Simulation, ohne Berücksichtigung des Verschleißbildes, existieren mehrere Kombinationen der DEM Verschleißmodelle, die diese vorhersagen können, sodass eine Differenzierung der Qualität der Modelle nicht möglich ist. Erst durch die zusätzliche Betrachtung der Verteilung der Verschleißzonen auf der Oberfläche der Proben kann eine eindeutige Auswahl der Modelle und der zugehörigen Verschleißkoeffizienten getroffen werden.

Um den Nachweis der allgemeinen Gültigkeit der vorgestellten Methode zu erbringen, werden derzeit am Lehrstuhl Förder- und Materialflusstechnik Validierungsversuche im Technikumsmaßstab durchgeführt. Zukünftig soll es mit dem gezeigten Vorgehen möglich sein, auf Basis von kalibrierten DEM Verschleißsimulationen den zu erwartenden Verschleiß beliebiger Anlagenkomponenten vorherzusagen. Dadurch können bereits während der Planungsphase verschleißoptimierte Designs berücksichtigt und geeignete Verschleißschutzwerkstoffe ausgewählt werden. Zusätzlich sind Aussagen zur Lebensdauer und zu den Wartungsintervallen des Verschleißschutzes möglich.

### Quellenverzeichnis:

- [1] Bauer, D.: Anlagen-Werterhaltung durch sinnvollen Verschleißschutz, Dortmund, 2012
- [2] Archard, J. F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces, Journal of Applied Physics 24 (1953) 981–988
- [3] Rabinowicz, E.; Tanner, R. I.: Friction and Wear of Materials, Journal of Applied Mechanics 33 (1966) 479
- [4] Gahr, K.-H. Z.: Wear by hard particles, Tribology International 31 (1998) 587–596

- [5] Finnie, I.: Erosion of surfaces by solid particles, *Wear* 3 (1960) 87–103
- [6] Finnie, I.: Some observations on the erosion of ductile metals, *Wear* 19 (1972) 81–90
- [7] Nandre, B. D.; Desale, G. R.: Study the Effect of Impact Angle on Slurry Erosion Wear of Four Different Ductile Materials, *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 7561–7570
- [8] Kunze, G.; Katterfeld, A.; Richter, C.; Otto, H.; Schubert, C.: Plattform- und softwareunabhängige Simulation der Erdstoff-Maschine Interaktion, Fachtagung Baumaschinentechnik 2012 : Energie, Mechatronik, Simulation; [20.-21. September 2012, Dresden] ; Tagungsband (2012) 251–262
- [9] Chung, Y.-C.; Ooi, J. Y.: A study of influence of gravity on bulk behaviour of particulate solid, *Particuology* 6 (2008) 467–474
- [10] Zhao, Y.; Ma, H.; Xu, L.; Zheng, J.: An erosion model for the discrete element method, *Particuology* 34 (2017) 81–88
- [11] Chen, G.: Surface wear reduction of bulk solids handling equipment using bionic design, TRAIL, Delft, The Netherlands, 2017
- [12] Roberts, A. W.; Wiche, S. J.: Prediction of lining wear life of bins and chutes in bulk solids handling operations, *Tribology International* 26 (1993) 345–351
- [13] Wiche, S. J.; Keys, S.; Roberts, A. W.: Abrasion wear tester for bulk solids handling applications, *Wear* 258 (2005) 251–257
- [14] Roessler, T.; Katterfeld, A.: Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using upscaled particles, *Powder Technology* 330 (2018) 58–66
- [15] Rößler, T.; Katterfeld, A.: Development of a standardized procedure for the calibration of DEM abrasive wear simulations, CHoPS 2018 : 9th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids : at the Greenwich Maritime Campus, London, 10-14 September 2018 (2018)
- [16] Richter, C.; Rößler, T.; Kunze, G.; Katterfeld, A.; Will, F.: Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – Part II: Efficient optimization-based calibration, *Powder Technology* 360 (2020) 967–976
- [17] Richter, C.: Gekoppelte Diskrete Elemente und Mehrkörpersimulation am Beispiel von Becherförderern, Universitätsbibliothek Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2020
- [18] Richter, C.; Roessler, T.; Otto, H.; Katterfeld, A.: Coupled discrete element and multibody simulation, part I: implementation, verification and validation, *Powder Technology* 379 (2021) 494–504

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Aufbau von FEM-Gurtmodellen zur Ermittlung des Eindrückrollwiderstandes

Carsten Schmidt

Malte Kanus

Ludger Overmeyer



Carsten Schmidt, M. Sc.  
Malte Kanus, M. Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Transport-  
und Automatisierungstechnik  
An der Universität 2  
30823 Garbsen



# Aufbau von FEM-Gurtmodellen zur Ermittlung des Eindrückrollwiderstandes

*In diesem Beitrag werden, basierend auf der Finite-Elemente-Methode entwickelte Gurtmodelle zur simulativen Bestimmung des Eindrückrollwiderstandes beschrieben. Anhand von reinen Materialparametern erlauben diese Rückschlüsse auf den zu erwartenden Eindrückrollwiderstand, ermöglichen eine größere Voranalyse potentieller Mischverhältnisse von Gurtelastomeren und resultieren folglich in Kostenersparnissen.*

## 1 Einleitung

In Zeiten stetig wachsender Globalisierungsprozesse kann seitens Entwicklungs- und Schwellenländern eine starke wirtschaftliche Angleichung zu westlichen Industriestaaten verzeichnet werden. Dieser Trend macht sich insbesondere im Elektrizitätsbedarf sowie in steigenden Wachstumszahlen im Infrastruktursektor, wie bspw. der metallurgischen Industrie oder auch der Zementindustrie bemerkbar und resultiert in steigenden Fördervolumina von Schüttgütern. Um global wettbewerbsfähig agieren zu können, spielen kostengünstige und effiziente Transportlösungen somit eine wichtige Rolle. Hierbei liefern kontinuierliche Transportprozesse mittels Gutförderanlagen eine effiziente Lösungsoption.

Diese bestehen im einfachsten Falle aus einem um zwei Trommeln gespannten endlosen Fördergurt, der primär als Zug- und Tragorgan dient. Neben den Trommeln, bei denen eine als Antriebs- und die andere als Spanntrommel fungiert, werden zur Stützung des Gurtes sowie zur Formgebung des zu fördernden Materials im gesamten Verlauf Tragrollen eingesetzt. Ein Großteil der im Betrieb anfallenden Bewegungswiderstände wird durch die Materialzusammensetzung des Fördergurtes vorgegeben.

Im Obertrum beträgt die Summe aus Tragrollenlaufwiderstand und Eindrückrollwiderstand (ERW) rund 70 %, im Untertrum 90 % des Hauptwiderstandes [1], wodurch eine weitere Erforschung des ERW somit großes Potential zur Optimierung von Gutförderanlagen bietet. Die experimentelle Bestimmung des ERW erfolgt derzeit nach dem in DIN EN 16974 [2] genormten Prüfverfahren und setzt einen endlosen Prüfgurt voraus. Die Entwicklung energieeffizienter Fördergurte ist daher kostenintensiv.

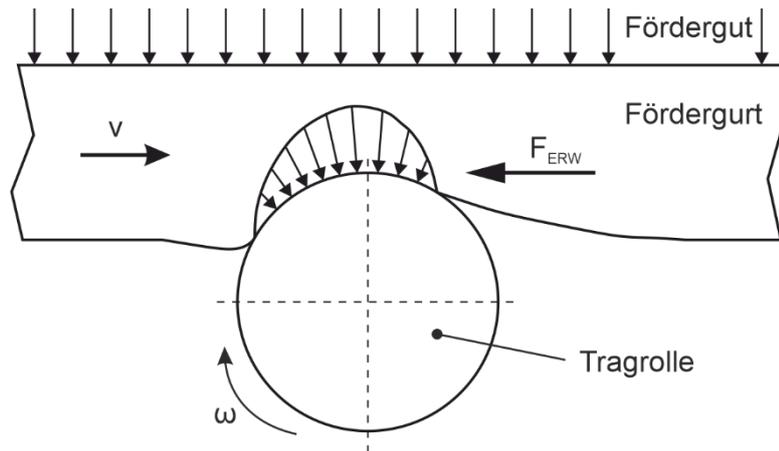
Einen Anteil zur Kostenreduktion sollen die in diesem Beitrag beschriebenen Gurtmodelle liefern, welche basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) entwickelt werden. Anhand von reinen Materialparametern dienen sie der simulativen Abschätzung des zu erwartenden ERW und ermöglichen somit größere Voranalysen potentiell geeigneter Mischverhältnisse von Gurtelastomeren. Dadurch ist es möglich, den Entwicklungsprozess wesentlich effizienter zu gestalten und eine engere Vorauswahl an Gurtmischungen in Form eines Prüfgurtes unter realitätsnahen Bedingungen nach [2] zu testen.

## 2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden zunächst Informationen über die Entstehung des Eindrückrollwiderstandes vermittelt sowie auf Grund des hohen Materialeinflusses auf den ERW die wichtigsten Eigenschaften von Elastomeren erläutert. Darauf folgen Schilderungen zur Simulation des technisch-physikalischen Prozesses mittels FEM.

## 2.1 Eindrückrollwiderstand

Zur horizontalen Stabilisierung des Gurtes finden überwiegend Tragrollen Verwendung. Durch das Gewicht des Fördergurtes sowie des zu fördernden Schüttgutes kommt es im Kontaktbereich zwischen Tragrolle und Gurt zu einer Deformation und hierdurch zu einem der Förderbewegung entgegengesetzten Widerstand, dem folgend mit  $F_{ERW}$  bezeichneten ERW. Die Deformation setzt sich, wie in Bild 1 verdeutlicht, aus einer beim Auflaufen auftretenden Stauchung und einer beim Ablaufen sichtbaren Rückdehnung des laufseitigen Gummis zusammen.



**Bild 1:** Kontaktsituation zwischen Tragrolle und Gurt nach WENNEKAMP [3]

Basierend auf dem Hertz'schen Kontakt zweier elastischer Körper treten im Kontaktbereich sowohl Druck- als auch Schubspannungen auf, wobei die maximale Druckspannung in der Tragrollenmitte zu finden ist. Bedingt durch unregelmäßige Deformationen im Auflauf- sowie Ablaufbereich, ergeben sich lokale Geschwindigkeitsunterschiede, welche in selbigen Bereichen durch Schubspannungen ausgeglichen werden müssen. [4]

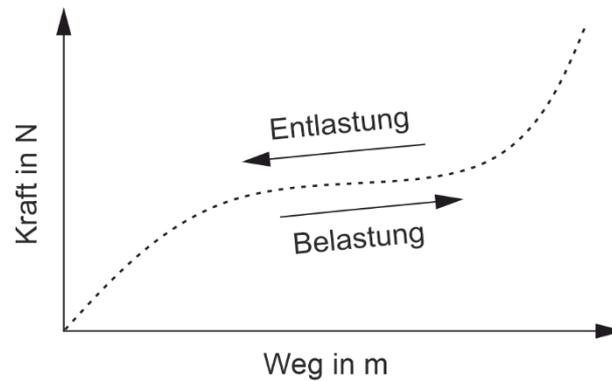
Neben den später näher beschriebenen Materialeigenschaften von Elastomeren unterliegt der ERW weiteren Einflussgrößen. So nimmt er mit sinkender Laufseitendicke oder steigendem Rußanteil ab, steigt jedoch bei geringen Umgebungstemperaturen stark an. [5]

Auch die gewählten Prozessparameter beeinflussen den ERW stark. So sinkt er mit steigenden Rollendurchmessern hyperbolisch ab. Steigende Vertikallasten hingegen sorgen für einen progressiven Anstieg. Werden Erhöhungen der Fördergeschwindigkeit vorgenommen, wirken sich diese wiederum mit einem degressiven Anstieg aus. [6]

## 2.2 Eigenschaften der Elastomere

Neben technologischen Eigenschaften eines Fördergurtes wie z. B. der Dauer-, Abrieb- oder Reißfestigkeit, nehmen insbesondere mechanische Eigenschaften der verwendeten Gurtelastomere, bspw. Viskoelastizität oder Dämpfung, Einfluss auf den ERW.

Elastomere bestehen aus ungeordneten miteinander verknäulten Molekülketten, die durch Einwirkung externer Spannungen ausgerichtet werden und somit im unbelasteten Zustand eine größere Entropie aufweisen. Dieses Phänomen wird Entropieelastizität genannt und sorgt für das in Bild 2 visualisierte, in weiten Bereichen reversible Verformungsverhalten.



**Bild 2:** Verformungsverhalten eines Elastomers unter quasistatischer Belastung

Innerhalb des reversiblen Bereiches besitzen Elastomere ein hyperelastisches Verhalten, welches sich in E-Modulen von  $0,1 \text{ N/mm}^2$  bis  $100 \text{ N/mm}^2$  und Bruchdehnungen von rund 300 % bis 600 % bemerkbar macht [7]. Überschreiten die Belastungen jenen Bereich, kommt es innerhalb des Materials zu irreversiblen Verschiebungen der Molekülketten. Dieser Vorgang entspricht dem viskosen Verhalten von Flüssigkeiten. Somit weisen Elastomere ein viskoelastisches Materialverhalten auf, welches durch Temperatur, Verformungsgeschwindigkeit (eingebrachte Frequenz), Zeit sowie Vernetzungsgrad der Molekülketten beeinflusst wird. Zur simulativen Beschreibung dieses Verhaltens basiert die Arbeit auf dem Modell eines linearen Standardfestkörpers, bestehend aus mechanischer Feder und einem dazu parallel geschalteten Maxwell-Modell. [8]

Werden Elastomere großen Verformungen ausgesetzt, kommt es zu Spannungsrelaxation. Dieses Phänomen ist als Mullins Effekt bekannt und wird anhand von zyklischen Hystereseschleifen sichtbar. Mit zunehmender Zyklenzahl tritt ein interner Spannungsabfall auf, der schließlich einen stationären Zustand einnimmt. [9]

Mit zunehmendem Anteil additiver Füllstoffe (wie bspw. Ruß) nimmt der Einfluss externer Amplituden auf den ERW zu. Der so genannte Payne Effekt senkt folglich die reversibel gespeicherte Energie und resultiert in einer Reduktion des experimentell bestimmbar dynamischen Speichermoduls des Elastomers. [10]

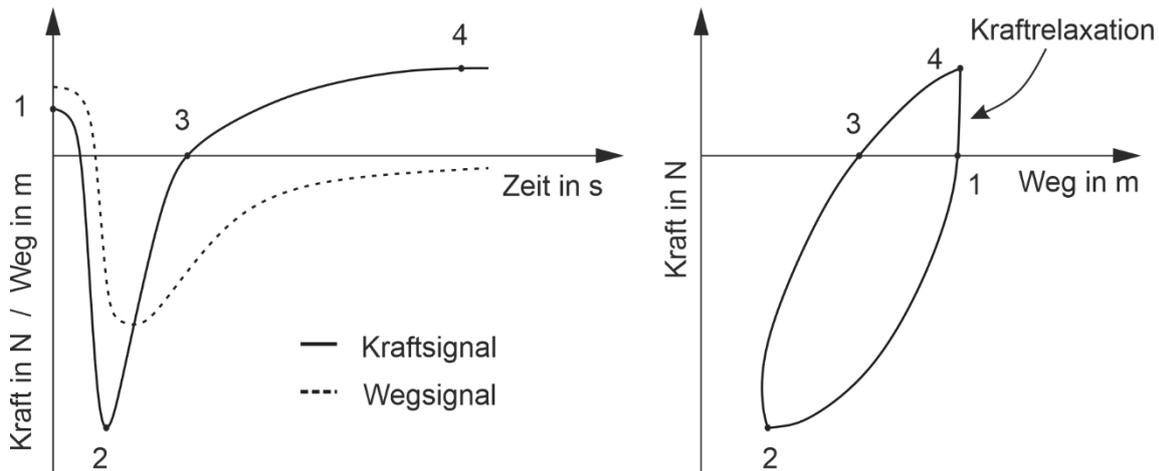
Neben dem nichtlinearen Spannungs-Dehnungsverhalten (vergl. Bild 2) kommt es auf Grund innerer Entropieänderungen zu Energiedissipation. Ein Teil der zur Verformung verwendeten mechanischen Arbeit erhöht die thermische Energie des Systems und sorgt neben einer Temperaturerhöhung dafür, dass die gespeicherte Systemenergie nach der Belastung geringer als die eingebrachte Verformungsenergie ist. Hierin begründen sich die guten, dämpfenden Eigenschaften von Elastomeren, welche über den Verlustfaktor  $\tan(\delta)$  beschrieben werden. Nach Gleichung (1) gibt er das Verhältnis zwischen gespeicherter (elastischer) Energie  $E'$  und dissipierter (thermischer) Energie  $E''$  an.

$$\tan(\delta) = \frac{E''}{E'} \quad (1)$$

Zur Beschreibung der Steifigkeitseigenschaften findet der Dynamische Schubmodul  $G^*$  Anwendung. Nach Gleichung (2) folgt er aus dem Verhältnis von Initialspannung  $\tau_0$  und Scheramplitude  $\gamma_0$ .

$$G^* = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (2)$$

Sowohl Verlustfaktor als auch Dynamisches Schubmodul lassen sich experimentell mit Hilfe einer 2-fach Probe bestimmen. Hierzu kann die Probe mit einem harmonischen oder peakförmig, periodischen Wegsignal erregt werden. Wie aus Bild 3 hervorgeht, hängt das Wegsignal einer peakförmig erregten Probe dem vorausgegangenen Kraftsignal nach. Die Kraft-Weg-Antwort liefert eine Hysteresekurve, dessen Fläche der dissipierten Energie eines Scherzyklus entspricht.



**Bild 3:** Hysteresekurve (rechts) in Folge peakförmiger Erregung (links) nach KÖNIG [4]

### 2.3 Finite-Elemente-Methode

Technisch-physikalische Prozesse können anhand von (partiellen) Differentialgleichungen sowie Integralgleichungen mathematisch beschrieben und folgend numerisch gelöst werden. Eine robuste Beschreibung des Kontaktproblems zwischen Tragrolle und Fördergurt kann durch die hier angewendete Mortar Methode [11] und die damit verbundene surface-to-surface-Formulierung gewährleistet werden. Zur Diskretisierung des realen, kontinuierlichen Feldproblems in endliche Finite Elemente (FE), auf welche wiederum die stationäre Kinematik angewendet werden kann, findet das Programm ABAQUS Verwendung.

Jedem FE wird eine materialspezifische Steifigkeitsmatrix zugewiesen, aus deren Summe die Gesamt-Steifigkeitsmatrix  $\underline{\underline{K}}$  des Systems hervorgeht. Mit der Kraftantwort  $\vec{F}$  folgt durch Umstellung des tensoriellen Hooke'schen Federgesetzes der in (3) definierte Verschiebungsvektor  $\vec{U}$ , welcher Rückschlüsse auf die inneren Kräfte sowie Systemspannungen liefert.

$$\vec{U} = \underline{\underline{K}}^{-1} \cdot \vec{F} \quad (3)$$

Zur Modellierung des isotropen Materialverhaltens von Elastomeren wird die von BESDO [12] implizierte detaillierte Herleitung elastischer, viskoser sowie reibungstechnischer Eigenschaften angewendet. Folglich setzt sich die Spannungsantwort eines Elastomers aus Summe eines elastischen, eines viskosen und eines Zusatz-Spannungsanteils, zusammen. [12]

Unter Verwendung des Neo-Hooke'schen Gesetzes dient ein hyperelastisches Stoffgesetz als Grundlage des elastischen Spannungsanteils. Dieser hängt lediglich vom messbaren Schubmodul  $G$  sowie dem Kompressionsmodul  $K$  ab. Für inkompressible Materialien wie Elastomere, gilt  $K \rightarrow \infty$ .

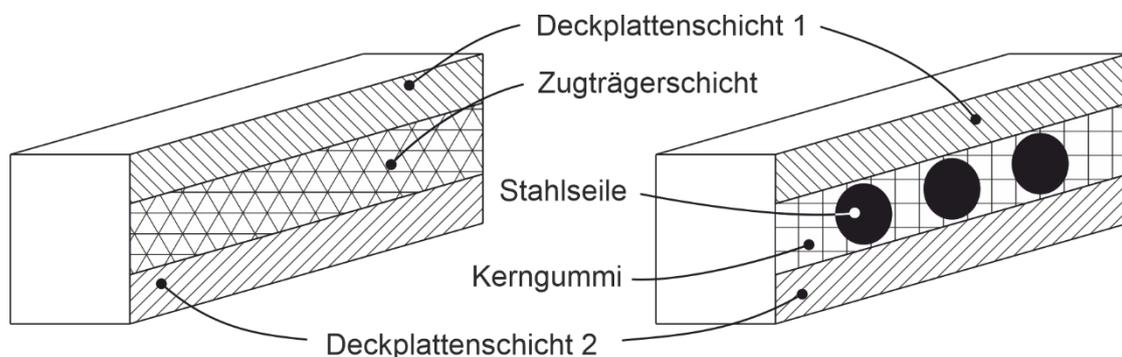
Die dämpfenden Eigenschaften von Elastomeren werden durch den viskosen Spannungsanteil beschrieben. Hierbei wird nach [12] der Frequenzeinfluss auf die Materialdämpfung berücksichtigt.

Bedingt durch die Coulomb'sche Reibung zwischen den Molekülketten, treten innerhalb eines Elastomers Zusatzspannungen auf. Diese sind quasi-geschwindigkeitsunabhängig und werden primär durch Gestaltänderungen beeinflusst. In Folge großer Deformationen weisen Elastomere ein entfestigendes Verhalten auf, weshalb in der vorliegenden Arbeit die von IHLEMANN [13] formulierte Definition Anwendung findet.

### 3 Aufbau der FEM-Gurtmodelle

Generell bestehen Fördergurte aus einer tragseitigen und laufseitigen Deckplattenschicht sowie einer für die Förderbewegung notwendigen Zugträgerschicht. Alle Schichten besitzen speziell auf ihre Beanspruchungsbedingungen angepasste Eigenschaften, wie bspw. eine erhöhte Verschleißfestigkeit der Tragseite, wodurch sich ein komplexer Aufbau ergibt. Hinsichtlich angestrebter Simulationen zur Ermittlung des ERW ist daher ein vereinfachtes Rechenmodell zwingend notwendig.

Eine Möglichkeit stellt das von OEHMEN [14] eingeführte Schichtenmodell dar, welches sich aus drei homogenen Schichten zusammensetzt (vergleiche Bild 4). Für die beiden Deckplattenschichten wird ein isotropes Materialverhalten angenommen, wodurch sich die Steifigkeit in alle Richtungen gleich auswirkt. Somit sind unter anderem die Gestaltänderungshypothese von Mises, die Schubspannungshypothese von Tresca und Mohr-Coulomb oder auch die Hauptnormalspannungshypothese von Rankine zur Beschreibung solch deformierbarer Körper anwendbar. Konträr hat die Zugträgerschicht ein orthotropes Materialverhalten, da der – am Beispiel eingesetzter Stahlseile – auftretende Elastizitätsmodul richtungsabhängig ist. In Förderrichtung weist diese Art der Zugträger die größte Steifigkeit auf, wohingegen der geringste Wert orthogonal dazu, in Querrichtung zu finden ist. [14]



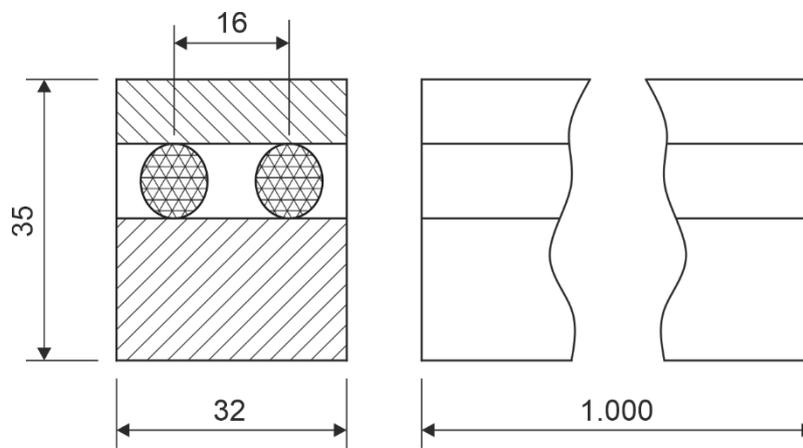
**Bild 4:** Schichtenmodell nach OEHMEN [14] (links); Erweitertes Schichtenmodell (rechts)

Das Schichtenmodell entspricht der simpelsten Näherung eines Fördergurtes und ermöglicht geringe Rechenleistungen. Diesem Beitrag vorausgehende Simulationen eines FEM-Modells, basierend auf dem Schichtenmodell [14], liefern jedoch ab Belastungen von  $> 5 \text{ kN/m}$  keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Für eine realitätsnahe Simulation ist somit eine Konkretisierung der zuvor homogenisierten Zugträgerschicht erforderlich. Im vorliegenden Beitrag wird hierfür das in Bild 4 visualisierte Erweiterte Schichtenmodell herangezogen. Es ergibt sich aus einer Gurtmatrix, bestehend aus zwei Deckplattenschichten und dem Kerngummi, sowie den eingesetzten Stahlseilen.

### 3.1 Konstruktiver Aufbau

Als Grundlage der hier beschriebenen Simulation dient eine am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) durchgeführte ERW-Prüfung eines Stahlseilfördergurtes. Das folgend beschriebene Gurtmodell stellt einen Teilausschnitt dieses Prüfgurtes dar. Es wird durch eine Tragrolle mit 159 mm Durchmesser belastet, wodurch ein direkter Vergleich zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen möglich ist.

Wie Bild 5 entnommen werden kann, besteht das verwendete FEM-Gurtmodell aus einer laufseitigen und einer tragseitigen Deckplattenschicht sowie der Zugträgerschicht. Diese setzt sich wiederum aus zwei Seilen und dem verbindenden Kerngummi zusammen. Sowohl für die Deckplattenschichten als auch das Kerngummi wird ein isotropes Materialverhalten nach OEHMEN herangezogen. [14]



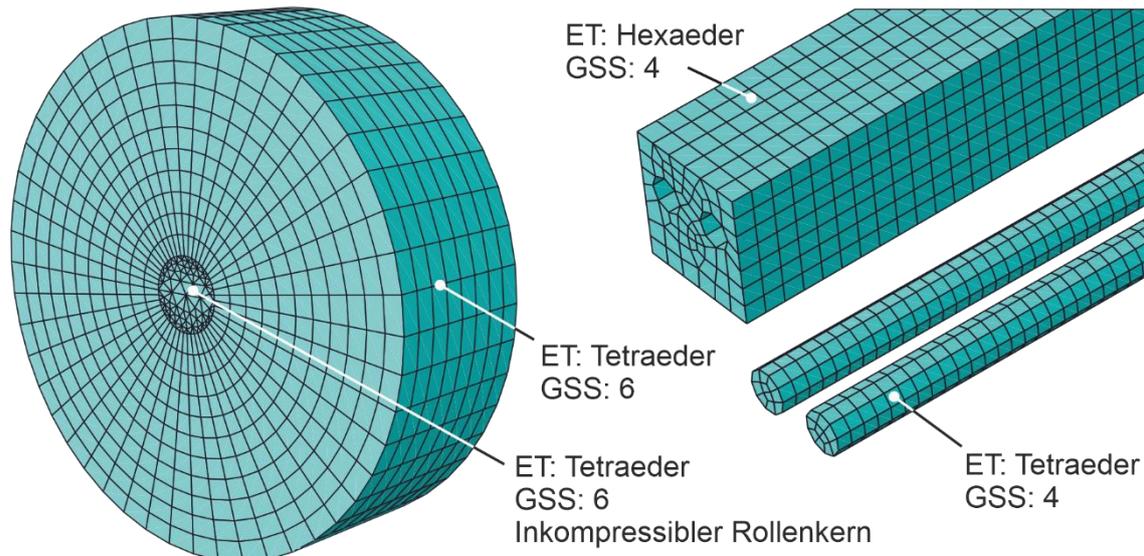
**Bild 5:** Konstruktiver Aufbau des FEM-Gurtmodells (Maße in mm)

Die Elastizitätseigenschaften der verwendeten Stahlseile  $E_{Seile}$  lassen sich mit Hilfe von Gleichung (4), unter Verwendung des E-Moduls für Stahl  $E_{Stahl}$  und eines Füllfaktors  $f_{füll}$  nach DIN 3051-3 [15] berechnen. In Abhängigkeit der Seilart können Füllfaktoren aus Tabellenwerken, bspw. [15], entnommen werden.

$$E_{Seile} = f_{füll} \cdot E_{Stahl} \quad (4)$$

### 3.2 Gitternetzstruktur und Materialparameter

Zur Simulation des Abrollverhaltens runder Objekte auf annähernd geraden Oberflächen werden die Kontaktpartner mittels FE diskretisiert. Hierfür dienen verschiedene Elementtypen, welche in Kombination mit der gewählten Knotengenauigkeit globale Gitternetzstrukturen ergeben. Für die verwendete Tragrolle, die eingesetzten Seile sowie die Gurtmatrix können die herangezogenen Modellierungsparameter der schematischen Darstellung in Bild 6 entnommen werden. Hierzu zählen der Elementtyp (ET) sowie die gewählte Knotengenauigkeit (in ABAQUS auch Global-Seed-Size (GSS) genannt).



**Bild 6:** Gitternetzstruktur von Tragrolle (links), Gurtmatrix (rechts, oben) und Seilen (rechts, unten)

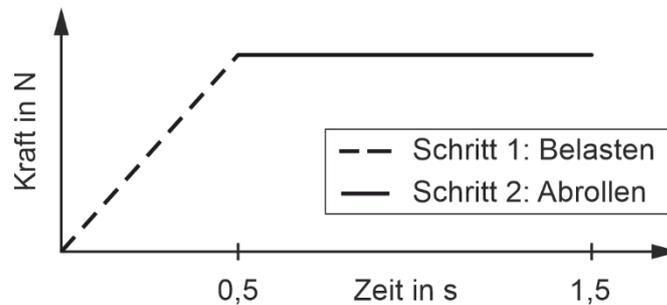
Um einen stabilen Berechnungsprozess gewährleisten zu können, müssen insbesondere zylindrische Oberflächen durch die Elementtypen hinreichend genau angenähert werden. Daher werden zur Darstellung der Tragrolle als auch der eingesetzten Seile Tetraeder verwendet. Die Gurtmatrix, bestehend aus laufseitiger sowie tragseitiger Deckschicht und Kerngummi, kann hinreichend genau mittels Hexaeder approximiert werden.

Für die FEM-Analyse werden den Modellen zwei Materialien hinterlegt. Für Stahl, wie er für die Tragrolle und die Seile benötigt wird, finden generelle Angaben über das Elastizitätsmodul, die Poisson-Zahl und die Dichte Verwendung. [16]

Die Eigenschaften des Elastomers, wie Schubmodul und Dichte, stammen aus am ITA durchgeführten dynamischen Untersuchungen des zugrunde liegenden Prüfgurtes. Zur Beschreibung der Hyperelastizität wird das Neo-Hooke'sche Gesetz ausgewählt. Dämpfende Einflüsse sowie Kriechvorgänge werden mittels hinterlegten Hysterese-Parametern berücksichtigt.

### 3.3 Zeitschritte und Wechselwirkungen

Um eine stabile Berechnung zu gewährleisten und eine Verbesserung des Konvergenzverhaltens zu erzielen, werden die Simulationen in zwei diskrete Zeitschritte unterteilt, welche in Summe den in Bild 7 visualisierten Gesamtablauf von 1,5 s ergeben.



**Bild 7:** Schematische Darstellung der Zeitschritte

In Schritt 1, dem Belasten, erfolgt innerhalb eines Zeitraumes von 0,5 s die inkrementelle Einleitung der Vertikallast auf die Tragrolle. Die hervorgerufenen Deformationen der laufseitigen Deckschicht können in ausreichender Genauigkeit mit Hilfe statischer Berechnungen durchgeführt werden. Die benötigte Abrollbewegung der Tragrolle auf dem Gurt findet folglich in Schritt 2 - dem Abrollen - statt. Zur Einhaltung der gewünschten Prüfgeschwindigkeit des Gurtes von 1 m/s ist hierfür ein Zeitraum von 1 s nötig. Da es durch die eingesetzten Elastomere und deren hyperelastisches Verhalten innerhalb des Materials zu sich ändernden kinetischen Energien kommt, handelt es sich bei Schritt 2 um ein implizites, dynamisches Problem. Aufgrund der dämpfenden Eigenschaften von Elastomeren ist jedoch gegeben, dass das Verhältnis von Anregungsfrequenz zu Eigenfrequenz einen Erfahrungswert von 1/5 nicht überschreitet. Demzufolge ist eine quasi-statische Berechnung möglich, wodurch sich der Rechenaufwand bei identischer Genauigkeit deutlich reduziert.

Zwischen den beiden Kontaktpartnern herrscht ein hard-contact, um unerwünschte Nebeneffekte infolge eines rechnerischen Eindringens der Tragrolle in die Gurtmatrix zu vermeiden. Tangential zur Rollenoberfläche wird penalty friction in Kombination mit isotropen Materialeigenschaften vorgegeben. Der Reibkoeffizient beträgt hierbei 0,4 und es liegt unter endlichem Gleiten ein elastischer Schlupf von 0,2 % vor.

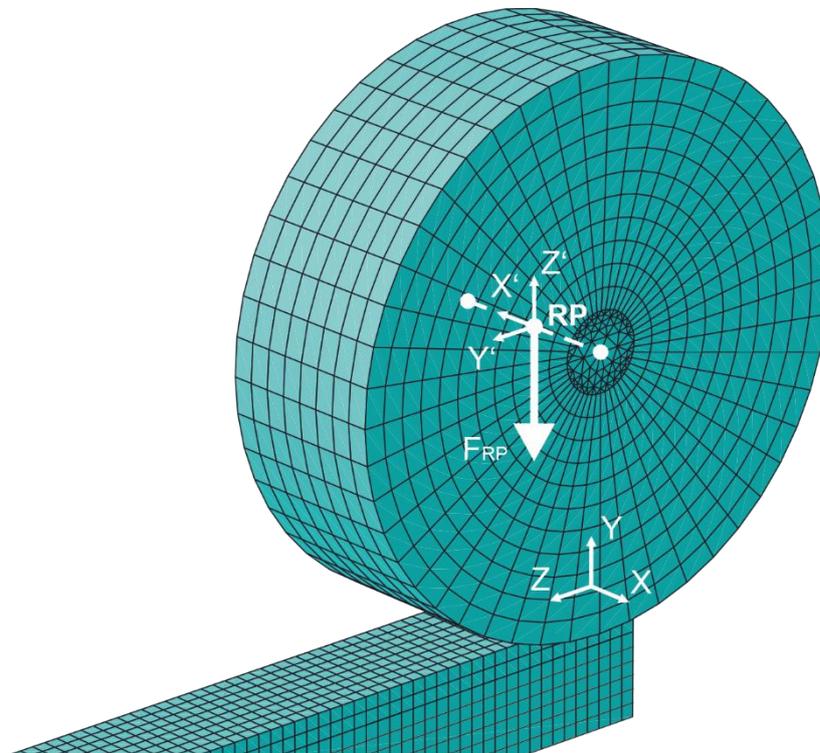
### 3.4 Krafteinleitung und weitere Systemparameter

Für die zugrunde liegende ERW-Prüfung findet der in WENNEKAMP [3] angepasste Prüfstand Anwendung. Hierbei wird eine 500 mm lange Tragrolle mit einem Durchmesser von 159 mm auf den umlaufenden Gurt aufgedrückt. Die Krafteinleitung erfolgt hierbei symmetrisch über die äußeren Lagerpunkte der Rolle, wodurch eine breitebezogene Ladung über die gesamte Gurtbreite induziert wird.

Neben verschiedenen Umgebungstemperaturen, in diesem Beitrag  $-30\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ ,  $20\text{ °C}$  sowie  $40\text{ °C}$ , wird auch der Einfluss wechselnder Auflasten überprüft. Hierzu dienen breitebezogene Auflasten von  $5.000\text{ N/m}$  und  $10.000\text{ N/m}$ . Bei einer Gurtbreite von  $32\text{ mm}$  ergeben sich hieraus die vertikal im Referenzpunkt (RP) eingeleiteten Punktlasten  $F_{RP}$  von  $160\text{ N}$  bzw.  $320\text{ N}$ .

Wie Bild 8 entnommen werden kann, befindet sich der RP im Massenschwerpunkt der Tragrolle. Mittels kinetischer Kupplung ist der Tragrollenkern fest an den RP gebunden. Dadurch sind seine Freiheitsgrade und infolgedessen die der gesamten Tragrolle, alleine durch den RP definiert.

Somit übernimmt der Tragrollenkern neben den Bewegungen auch das steife, inkompressible Materialverhalten eines Punktes und stellt eine homogene Krafteinleitung sicher.



**Bild 8:** Krafteinleitung in die Tragrolle unter Verwendung von ABAQUS

Zur Aufnahme der Bewegungswiderstände wird im RP der Tragrolle ein Field Output generiert, dessen Werte graphisch dargestellt werden. Hierbei werden die Reaktionskräfte des X'-Y'-Z'-Systems aufgezeichnet und im Weiteren zur Berechnung des simulierten ERW verwendet.

#### 4 Datenauswertung

Anhand des zuvor beschriebenen Ablaufes ergeben sich die simulierten Werte des ERW aus der aufgezeichneten Kraftantwort in Y'-Richtung.

Zur Vernachlässigung hoher Losbrechmomente infolge der Beschleunigungsphase wird lediglich der stationäre Betriebszustand betrachtet. Für das 32 mm breite Gurtmodell berechnet sich demnach der simulierte ERW  $F_{ERW,32}$  aus dem Mittelwert der Messwerte dieses Zeitintervalls.

Um einen direkten Vergleich von Simulation und realer ERW-Messung zu ermöglichen, ist im nächsten Schritt eine Umrechnung auf den simulierten ERW  $F_{ERW,1000}$  bei einer Gurtbreite von 1.000 mm notwendig.

Hierfür werden die jeweiligen breitebezogenen Widerstandskräfte  $b_{ERW,32}$  und  $b_{ERW,1000}$  wie in Gleichung (5) bestimmt.

$$b_{ERW,32} = \frac{F_{ERW,32}}{32 \text{ mm}} \quad , \quad b_{ERW,1000} = \frac{F_{ERW,1000}}{1.000 \text{ mm}} \quad (5)$$

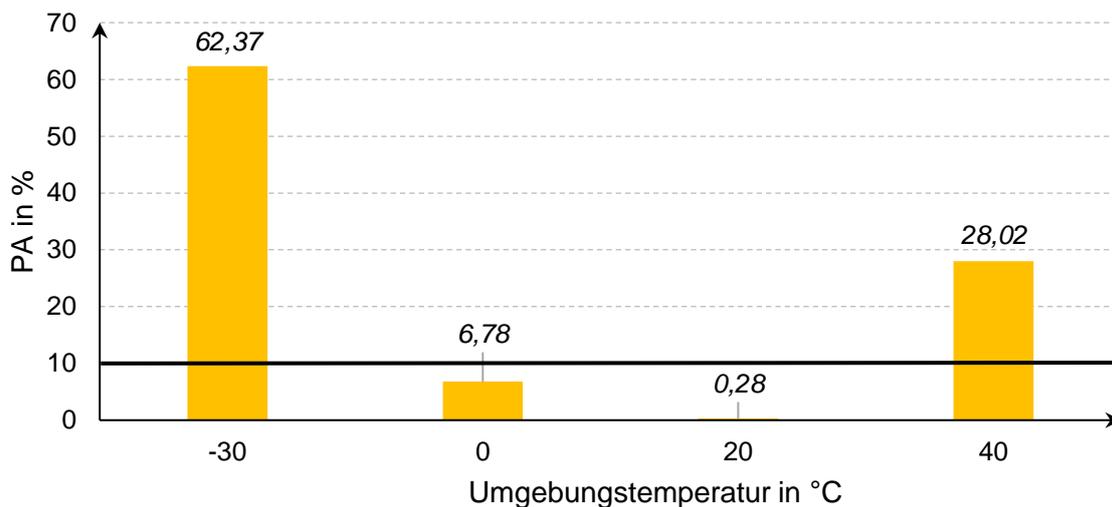
Unter der Annahme  $b_{ERW,32} = b_{ERW,1000}$  wird hierfür die in (6) definierte Umrechnung benutzt.

$$F_{ERW,1000} = \frac{F_{ERW,32} \cdot 1.000 \text{ mm}}{32 \text{ mm}} \quad (6)$$

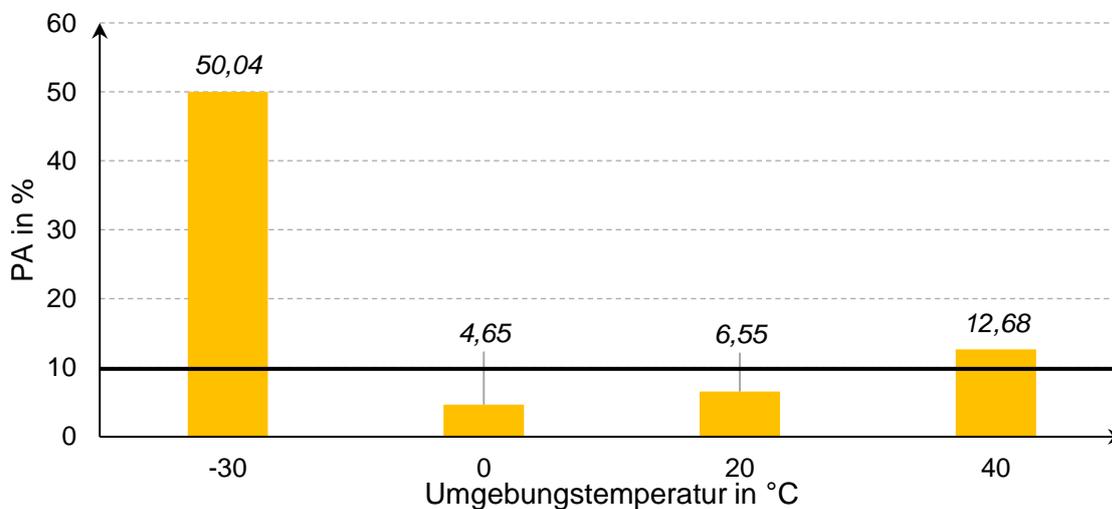
Mit dem errechneten ERW  $F_{ERW,1000}$  erfolgt im letzten Schritt der Vergleich mit den experimentell am ITA erhobenen Messergebnissen (ME). Aus Vertraulichkeitsgründen werden in diesem Beitrag keine Absolutwerte verwendet, sondern mit Gleichung (7) die absolute prozentuale Abweichung (PA) zum ME bestimmt.

$$PA = \left| \frac{F_{ERW,1000} - ME}{ME} \right| \cdot 100 \quad (7)$$

In Abhängigkeit der induzierten Auflast sowie der vorherrschenden Umgebungstemperatur können die Ergebnisse den Diagrammen in Bild 9 und 10 entnommen werden. Es sei angemerkt, dass auf Grund von Materialversprödung oder ähnlichen zeitabhängigen Einflüssen auf das Verhalten von Elastomeren, Abweichungen zwischen Simulation und Messung von 10 % als hinreichend genau angesehen werden können.



**Bild 9:** Simulationsabweichungen bei 5.000 N/m Auflast



**Bild 10:** Simulationsabweichungen bei 10.000 N/m Auflast

Zu Beginn werden die generierten Simulationsergebnisse hinsichtlich des theoretischen ERW-Verhaltens bei wechselnden Temperaturen sowie Auflasten auf Sinnhaftigkeit geprüft. Hierbei kann den Daten entnommen werden, dass mit Anstieg der Auflast von 5.000 kN/m auf 10.000 kN/m ebenfalls ein Anstieg des ERW zu verzeichnen ist. Des Weiteren ist, unabhängig von der angesetzten Auflast, ein deutlicher Anstieg des ERW mit sinkender Temperatur erkennbar. Beide Verhalten entsprechen den theoretischen Erwartungen und belegen die generelle Plausibilität des eingesetzten Simulationsmodells.

Wie den Diagrammen aus Bild 9 und Bild 10 entnommen werden kann, liegen die prozentualen Abweichungen im Temperaturbereich von 0 °C bis 20 °C in einem akzeptablen Rahmen von 10 %. Sowohl für -30 °C als auch 40 °C ist die Simulation hingegen nicht in der Lage, den realen ERW adäquat abzubilden. Erklären lässt sich dieses Phänomen durch den nichtlinearen Temperatureinfluss auf die hyperelastischen Eigenschaften von Elastomeren, welcher durch das Simulationsmodell noch nicht hinreichend genau abgebildet werden kann.

Unabhängig von der Auflast liegen die Simulationsergebnisse im Temperaturbereich von 0 °C bis 40 °C jeweils über den korrespondierenden Messergebnissen. Hierdurch resultieren die FEM-Gurtmodelle in einer generell konservativen Simulation des ERW.

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein FEM-Gurtmodell zur Ermittlung des ERW entwickelt sowie getestet. Als Ziel gilt die Ermöglichung im Vorfeld einer praktischen ERW-Prüfung stattfindender Vorversuche verschiedenster Mischverhältnisse eines Gummimaterials. Dies ermöglicht erste Rückschlüsse auf den auftretenden ERW, wodurch gezieltere Prüfungen vorgenommen und folglich ein Beitrag zu Kostenreduktionen geleistet werden kann.

Zur Simulation des infolge von Rollkontakten zwischen Gurt und Tragrolle auftretenden ERW wird die Simulationssoftware ABAQUS herangezogen. Das untersuchte FEM-Gurtmodell entspricht dem Erweiterten Schichtenmodell, einer Weiterentwicklung des Schichtenmodells nach OEHMEN [14]. Es folgt aus einer Gurtmatrix, bestehend aus zwei Deckplattenschichten und dem Kerngummi sowie eingesetzter Stahlseile.

Als Grundlage der hier beschriebenen Simulation dient eine am ITA durchgeführte ERW-Prüfung eines Stahlseilfördergurtes. Mit einer Fördergeschwindigkeit von 1 m/s bei Umgebungstemperaturen von -30 °C, 0 °C, 20 °C sowie 40 °C sowie unter Einfluss breitebezogener Auflasten von 5.000 N/m und 10.000 N/m sind die Simulationsbedingungen somit identisch mit denen der vorangegangenen praktischen Prüfung. Die Materialeigenschaften des verwendeten Elastomers entsprechen ebenfalls denen des getesteten Fördergurtes und entstammen vorangegangenen Arbeiten.

Der Einfluss wechselnder Temperaturen sowie Auflasten auf den ERW kann in den Simulationen dargestellt werden. Für die Temperaturen von 0 °C und 20 °C weichen die Simulationsergebnisse lediglich um 10 % von den realen Messungen ab und liefern eine konservative Simulation des ERW. Auf Grund des nichtlinearen Temperatureinflusses auf die hyperelastischen Eigenschaften von Elastomeren ist das FEM-Gurtmodell hingegen für -30 °C als auch 40 °C nicht in der Lage, den realen ERW adäquat abzubilden.

**Quellenverzeichnis:**

- [1] von Daake, S.: Berechnungsmodell zur Ermittlung des Eindrückrollwiderstandes von Schlauchgurtförderern, 2018, Dissertation, Hannover
- [2] DIN EN 16974, Fördergurte – Gurtbreitenbezogener Eindrückrollwiderstand – Anforderungen, Prüfung; 11-2016
- [3] Wennekamp, T.: Tribologische und rheologische Eigenschaften von Fördergurten, 2008, Dissertation, Hannover
- [4] König, J.: Modellierung des stationären Laufs eines Fördergurtes über eine Tragrollenstation, 2003, Dissertation, Hannover
- [5] Hintz, A.: Einfluss des Gurtaufbaus auf den Energieverbrauch von Gurtförderanlagen, 1993, Dissertation, Hannover
- [6] Schwarz, F.: Untersuchungen zum Eindrückrollwiderstand zwischen Fördergurt und Tragrolle, 1966, Dissertation, Hannover
- [7] Popov, V.: Kontaktmechanik und Reibung: Viskoelastische Eigenschaften von Elastomeren, 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015
- [8] Rinnbauer, M.: Technische Elastomerwerkstoffe – Basis für Hightech-Lösungen in der Dichtungs- und Schwingungstechnik, 1. Auflage. München: Verlag Moderne Industrie, 2006
- [9] Cantournet, S.; Desmorat, R.; Besson, J.: Mullins effect and cyclic stress softening of filled elastomers by internal sliding and friction thermodynamics model. Ort: Internal Journal of Solids and Structures, München, 2009, S. 2255 - 2264
- [10] Böhm, J.: Der Payneeffekt: Interpretation und Anwendung in einem neuen Materialgesetz für Elastomere, 2001, Dissertation, Regensburg
- [11] Puso, M. A.; Laursen, T. A.: A mortar segment-to-segment contact method for large deformation solid mechanics. Ort: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, S. 601 - 629
- [12] Besdo, D.; Oehmen, K. H.: Modellentwicklung zur rechnerischen Nachbildung des Laufs eines Fördergurtes über Tragrolle, Tragrollenstuhl bzw. Girlande, 2002, Abschlussbericht, Hannover
- [13] Ihlemann, J.: Kontinuumsmechanische Nachbildung hochbelasteter technischer Gummiwerkstoffe, 2003, Dissertation, Hannover
- [14] Oehmen, K. H.: Einfluss vertikaler und horizontaler Kurven auf die Dehnungsverteilung in Fördergurten - Theorie und Anwendung. Ort: Braunkohle 31, Nr. 12, 1979, S. 340-347
- [15] DIN 3051-3, Drahtseile aus Stahldrähten – Grundlagen, Berechnung, Faktoren; 03-1972
- [16] Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung, 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2011

## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Dynamisches Übergabesystem zur Reduktion des Partikelbruchs

Michael Denzel

Michael Prenner



Dipl.-Ing. Michael Denzel  
Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Prenner  
Montanuniversität Leoben  
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik  
und Bergwirtschaft - Fördertechnik und  
Konstruktionslehre  
Franz-Josef-Straße 18  
A-8700 Leoben



# Dynamisches Übergabesystem zur Reduktion des Partikelbruchs

*Übergabeschurren zwischen Gurtbandförderern führen in Abhängigkeit des transportierten Schüttgutes, speziell bei großen Übergabehöhen, zur Schüttgutdegradation. Dieses Verhalten ist speziell für Hochofensinter problematisch, da das dabei entstehende Feinkorn (Rückgut) unter hohem Energieaufwand erneut gesintert werden muss. Durch die Verwendung einer neuartigen dynamischen Übergabeschurre kann die Rückgutproduktion an Übergabestellen signifikant reduziert werden. Derartige Schurren können mittels der Diskrete Elemente Methode (DEM) unter Einsatz geeigneter Kalibrationsmethoden vorab virtuell auf ihre Funktion hin getestet werden.*

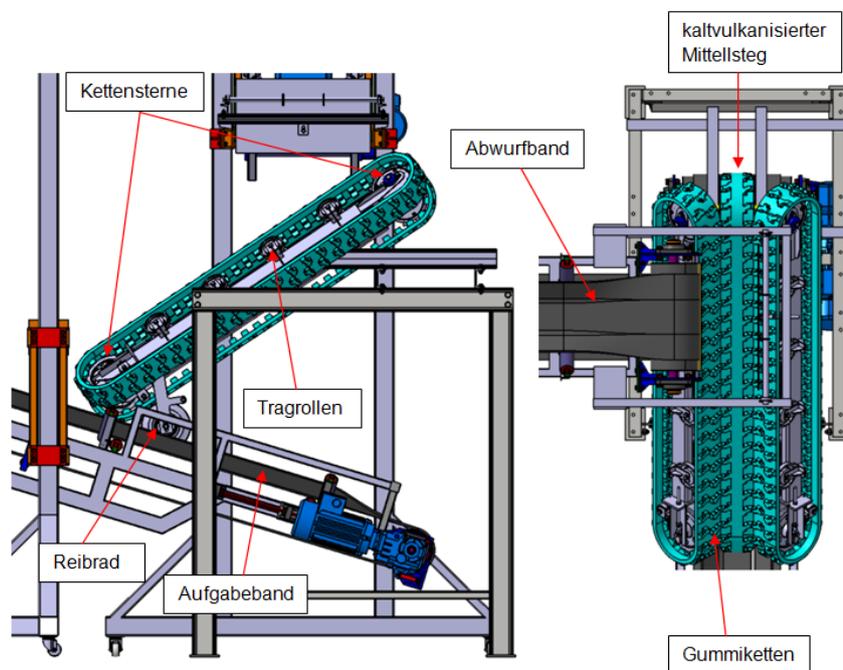
## 1 Einleitung

Hochofensinter weist ein sehr inhomogenes Materialverhalten auf und ist je nach Herstellungskonfiguration mehr oder weniger fest bzw. fragil. Diese Eigenschaft führt innerhalb der notwendigen Transport-, Lager- und Siebprozesse zu Partikelbrüchen. Im Nachfolgenden wird speziell auf das Bruchverhalten an Übergabestellen zwischen Gurtbandförderern eingegangen. An Übergabestellen besitzt das Schüttgut aufgrund des Höhenunterschiedes und der Fördergeschwindigkeit der beteiligten Gurtbandförderer oft einen hohen Energieinhalt. Durch den Übergabevorgang kann das Schüttgut stark abgebremst werden, wodurch die Bewegungsenergie zum Großteil in Schüttgut- und Anlagenverschleiß umgewandelt wird. Innerhalb des von der EU geförderten RFCS-Projektes MinSiDeg wird derzeit nach Lösungen gesucht, den Sinterzerfall signifikant zu reduzieren. Um das Bruchverhalten des Sinters besser zu verstehen, wurde eine "Schüttgutkanone" entwickelt, die einzelne Sinterpartikel geschwindigkeitsgesteuert gegen ein definiertes Hindernis schießt und den dabei entstehenden Kornzerfall misst. Die Messergebnisse dienen auch zur Bruchparameterkalibration der für das Projekt notwendigen durchzuführenden Diskrete Elemente Simulationen. Der Lehrstuhl entwickelt derzeit in einem Parallelprojekt in Kooperation mit den Firmen ScrapeTec Trading GmbH, ScrapeTec GmbH und Wanggo Gummitechnik GmbH eine dynamische Übergabeeinrichtung, die in Bezug auf die Anwendbarkeit zur Partikelbruchreduktion hin untersucht wurde.

## 2 Dynamisches Übergabesystem

Das Funktionsprinzip und der Aufbau des Systems sind in Bild 1 dargestellt. Die dynamische Übergabeschurre „FlowScrape“ besteht im Wesentlichen aus einer Art Gurtförderer, der zwischen dem Abwurfband und dem Aufgabeband montiert wird. Das Übergabesystem wird aus mindestens drei zu einer Muldung zusammengeführten Gummiketten aufgebaut. Der Kettenaufbau und die dazugehörigen Tragorgane sind an die Funktion von Gummikettenbaggerfahrwerken angelehnt. Eine kardanische Verbindung der Kettenräderachsen (Turasse) sorgt für den Gleichlauf der Ketten. Der Antrieb der Übergabeketten kann auf zwei Arten realisiert werden. Grundsätzlich sollte der Antrieb über ein Reibrad durch das Aufgabeband passieren. Die mittlere Kette wird dafür auf das Reibrad gepresst, wobei das Reibrad zusätzlich auf das Aufgabeband gepresst wird. Das Kettensystem ist dafür drehbar (parallel zu den Trommelachsen des Aufgabebandes)

aufgehängt. Sollte die Eigenmasse der Übergabeketten nicht ausreichen, kann zusätzlich eine Anpressvorrichtung implementiert werden. Alternativ zum Reibradantrieb kann das System auch elektromotorisch angetrieben werden. Je nach Schüttguteigenschaften des transportierten Schüttgutes kann die Abdichtung der Kettenlängsübergänge wie folgt realisiert werden: Bei Schüttgütern ohne Feinanteil können die Kettenlängskanten zur Abdichtung aneinandergespreßt werden. Auf Grund von Fertigungstoleranzen der Ketten entstehen beim Aneinanderpressen der Kanten aber immer kleine, sich öffnende und wieder schließende Spalten, durch die Teile der Feinfraktion durchrieseln können. Bei feinkörnigem Schüttgut werden die äußeren Ketten mit der mittleren Kette überlappt ausgeführt, um eine Abdichtung zu gewährleisten und somit ein Durchrieseln des feinkörnigen Schüttgutes zu vermeiden. Je nach Größe des erforderlichen Neigungswinkels der Übergabeketten können diese mit oder ohne Querstollen ausgeführt werden. Die dynamische Übergabevorrichtung wurde zum Patent angemeldet, siehe [1].



**Bild 1:** Erster Prototyp der dynamischen Übergabeeinrichtung „FlowScape“ [2]

Das Übergabesystem hat neben der Reduktion des Partikelbruchs noch weitere Vorteile. Im Vergleich zu herkömmlichen starren Übergabeschuppen ist der Schuppenverschleiß nicht "punktuell", sondern verteilt sich auf die gesamte umlaufende Kettenoberfläche. Eine signifikant längere Standzeit ist dadurch zu erwarten. Das System ist immer mit einer gerichteten Übergabe in Förderrichtung des Aufgabebands verbunden. Dadurch muss das Schüttgut weniger beschleunigt werden (Reduktion der Antriebsleistung) und es tritt eine geringere Gurtbelastung und somit geringerer Verschleiß des Aufgabeförderers auf. Bei ausreichendem Massenstrom und Höhenunterschied reichen die entstehenden Hangabtriebskräfte aus, um die Bewegungswiderstände des Kettensystems zu überwinden. Die dynamische Schuppe muss dann durch das Aufgabeband oder den elektrischen Antrieb gebremst werden. In diesem Fall tritt eine gewisse Energierückgewinnung auf. In Kombination mit der Reduktion der Antriebsleistung des Aufgabebands und der Energierückgewinnung entsteht ein energieeffizientes System.

Aufgrund der konstruktiven Ausführung sind Verstopfungen durch Anbackungen unwahrscheinlich. Lediglich massive unbeabsichtigte Überschüttungen können zu Problemen führen. Im Vergleich zu herkömmlichen Beschleunigungsbändern verfügt das Kettensystem über eine zentrale Führungseinrichtung an der Kettenlaufseite. Durch diese Zwangsführung kann es zu keinem Gurtschieflauf unabhängig von der Aufgaberichtung kommen.

### 3 Vergleichende Versuche mit herkömmlicher Übergabeschurre

Um die Reduktion der Belastungen auf das Schüttgut während der Übergabe mit dem „FlowScrape“ zu quantifizieren, wurde der daraus resultierende Partikelbruch mit jenem bei Übergabe mit einer herkömmlichen Schurre verglichen. Die herkömmliche Übergabeschurre besteht aus einer quaderförmigen Holzkonstruktion mit einer Prallplatte aus Stahl an der Hinterwand und zusätzlichen Abdeckungen in Gurtnähe, um Materialverlust zu verhindern, siehe Bild 4. Der Großteil des Schüttgutes kollidiert dabei mit der Prallplatte und fällt anschließend auf den abführenden Gurt. Die Gesamtfallhöhe beträgt 1600 mm. Die Versuchsreihe wurde am institutseigenen Förderkreislauf durchgeführt, siehe Bild 2. Dieser besteht aus 4 Gurtbandförderern mit 400 mm Breite, deren Neigungen, Muldungen und Geschwindigkeiten jeweils individuell verstellbar sind. Drei der vier Übergabestellen sind mit einfachen Prallplatten ausgestattet. Eine Übergabestelle ist als Prüfstand vorgesehen, um dort verschiedenste Übergabesysteme montieren und im Kreislauf testen zu können.



**Bild 2:** Institutseigener Förderkreislauf mit „FlowScrape“ am Prüfstand

Die Vorgehensweise wird anhand der vom Hersteller vorgesehbten Größenfraktion 31,5 - 50 mm beschrieben, da dies die kritische Fraktion für den Partikelbruch darstellt. Davon wurden pro Versuch 10 kg Material verwendet. Die tatsächliche Partikelgrößenverteilung wurde jeweils vor den Versuchen mittels einer eigens konzipierten, partikelschonenden Sortierrinne ermittelt, diese ist in [3] näher beschrieben. Da die Partikelgrößenverteilung innerhalb der Größenfraktion schwankt und der Sortiervorgang von der Ausrichtung der

Partikel in der Sortierrinne abhängt, wurden die Proben jeweils 3-mal sortiert und davon das arithmetische Mittel als Partikelgrößenverteilung vor dem Bruch definiert. Bei gleichbleibenden Gurtgeschwindigkeiten und Fallhöhen wurden 6 Versuche mit dem „FlowScrape“ (Bild 3) und 5 Versuche mit einer herkömmlichen Schurre (Bild 4) als Übergabeeinrichtung durchgeführt. Beim „FlowScrape“ wurde zusätzlich eine Prallplatte am oberen Ende montiert, um Materialverlust zu verhindern und den „FlowScrape“ mittig zu beladen. Es wurde jeweils eine 10 kg Schüttgutprobe am Anfang des zuführenden Gurtes händisch aufgegeben und verteilt, sodass keine Partikel übereinanderliegen. Die Gurtgeschwindigkeiten des zu- und abführenden Gurtes betragen 1,5 m/s. Die Schüttgutprobe wurde am Ende des abführenden Gurtes in einer Kunststoffwanne gesammelt. Die Fallhöhe in die Kunststoffwanne war ebenfalls bei allen Versuchen gleich. Im Anschluss wurde wiederum die Partikelgrößenverteilung nach dem Versuch durch 3-maliges Sortieren in der Sortierrinne gemessen.



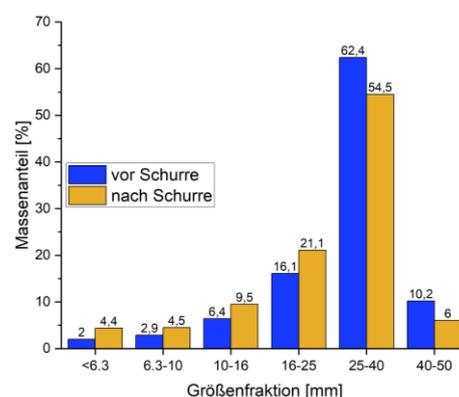
**Bild 3:** „FlowScrape“ als Übergabeeinrichtung



**Bild 4:** Herkömmliche Übergabeschurre

In Bild 5 ist die massenbezogene Partikelgrößenverteilung vor und nach der Übergabe mit einer herkömmlichen Schurre dargestellt. Die Partikelgrößenverteilung vor und nach Übergabe mit dem „FlowScrape“ ist in Bild 6 ersichtlich. Die Werte ergeben sich jeweils aus dem arithmetischen Mittel aller 6 Versuche mit herkömmlicher Übergabeschurre bzw. 5 Versuche beim „FlowScrape“.

Einen direkten Vergleich des Partikelbruchs



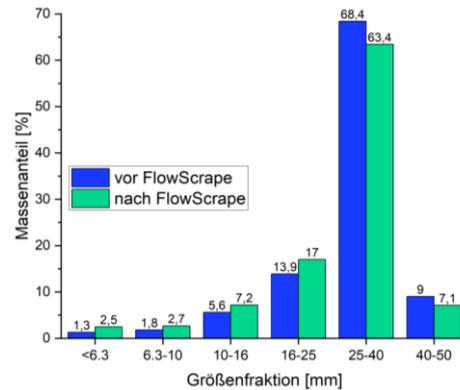
**Bild 5:** Partikelgrößenverteilung vor und nach herkömmlicher Übergabeschurre

zwischen „FlowScrape“ und herkömmlicher Übergabeschurre zeigt Bild 7. Hierbei ist die jeweilige Zunahme der Massenanteile pro Größenfraktion abgebildet. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl bei „FlowScrape“ als auch bei der herkömmlichen Übergabeschurre die größeren Partikel eher zum Bruch neigen und die Massenanteile bei den Größenfraktionen 25-40 mm und 40-50 mm jeweils abnehmen. Zugleich nehmen die Massenanteile der kleineren Größenfraktionen zu.

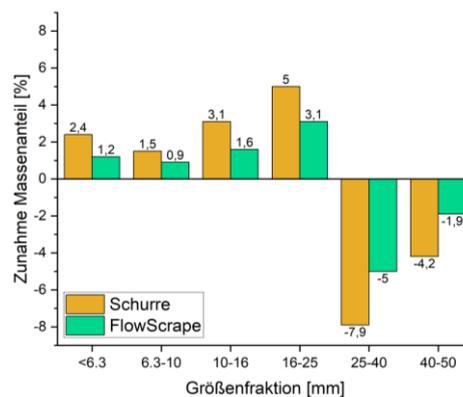
Der signifikante Unterschied bei den Zu- und Abnahmen der Massenanteile zwischen „FlowScrape“ und herkömmlicher Übergabeschurre beweist, dass bei Übergabe mit dem „FlowScrape“ weniger Partikelbruch stattfindet. Vor allem beim für die Stahlindustrie so relevanten Feinmaterial (Rückgut, < 6,3 mm) ist der Unterschied gravierend. Demnach wird bei Übergabe mit dem „FlowScrape“ 50 % weniger Feinmaterial erzeugt im Vergleich zur Übergabe mit einer herkömmlichen Schurre.

#### 4 Bruchversuche

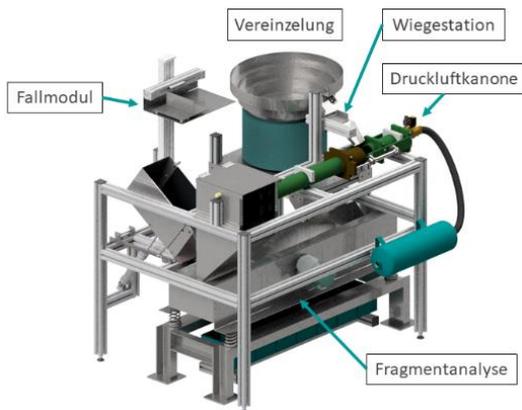
Zur Analyse des Bruchverhaltens und für die Kalibration des Simulationsmodells wurden Einzelpartikelbruchversuche mit dem in den Versuchen verwendeten Hochofensinter durchgeführt. Dabei wurde das Bruchverhalten von insgesamt 300 Partikeln der Größenfraktion 31,5–50 mm mittels eines speziell entwickelten automatischen Einzelpartikelbruchprüfstandes analysiert. Der Prüfstand, siehe Bild 8, besteht aus einer automatischen Zuführung, einer Wiegestation, einer Druckluftkanone, einer automatischen Fragmentanalyse und einem Fallmodul. Die Partikel werden dabei einzeln verwogen, mit einer definierten Geschwindigkeit gegen eine Stahlplatte geschossen und die Partikelgrößenverteilung wird nach dem Bruch analysiert. Der Prüfstand ist in [3] näher beschrieben. Die Ergebnisse der Bruchversuche sind in Bild 9 ersichtlich. Mit zunehmendem massenspezifischen Energieeintrag nimmt der Massenanteil der größeren Körner exponentiell ab und der Anteil der kleineren Fraktionen nimmt dementsprechend zu.



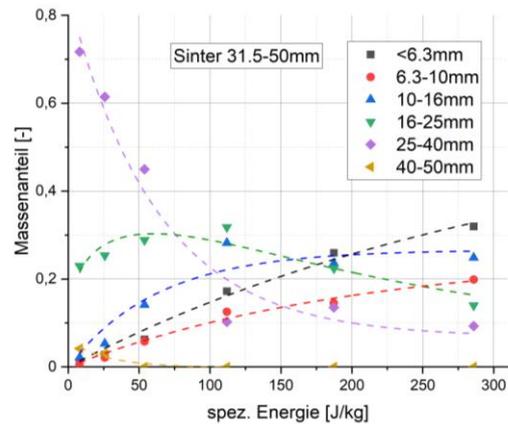
**Bild 6:** Partikelgrößenverteilung vor und nach „FlowScrape“



**Bild 7:** Zunahme der Massenanteile bei „FlowScrape“ und herkömmlicher Übergabeschurre



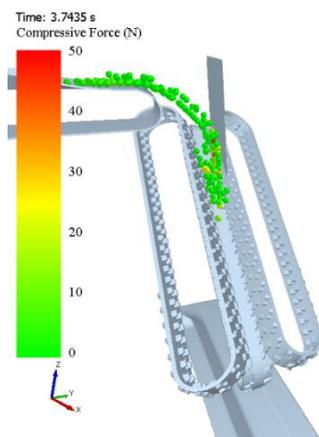
**Bild 8:** Automatischer Prüfstand zur Einzelpartikelbruchprüfung



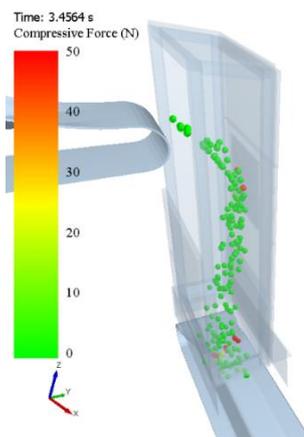
**Bild 9:** Bruchverhalten von Hochofensinter der Größenfraktion 31.5-50 mm

## 5 Simulation

Sowohl die Übergabe mittels „FlowScrape“ (Bild 10) als auch durch eine herkömmliche Schurre (Bild 11) wurden mittels der DE-Software EDEM simuliert. Die Stollenbewegungen an den Gummiketten des „FlowScrapes“ wurden mittels Translation und Rotation entlang der Umlaufkurve realisiert. Die verwendete Größenfraktion 31.5-50 mm wurde durch runde Partikel mit 40 mm Durchmesser dargestellt. Aus den Bruchversuchen ist die durchschnittliche Partikelmasse dieser Größenfraktion bekannt (60 g). Die daraus resultierende Partikelzahl (167) bei einer Schüttgutprobe von 10 kg wurde auch in der Simulation auf den zuführenden Gurtbandförderer platziert. Die Dichte der Partikel ( $1788 \text{ kg/m}^3$ ) wurde an Partikelanzahl und Probenmasse angepasst. Reibungsparameter wurden mittels Schüttkegel- und Abgleitversuchen ermittelt [4]. Die Stoßzahlen für Sinter-Sinter, Sinter-FlowScrape, Sinter-Gurt und Sinter-Stahl wurden mittels Rücksprungversuchen und HighSpeed-Aufnahmen aus zwei Perspektiven bestimmt [5]. Um die Kontaktkräfte auf die einzelnen Partikel ausreichend exakt detektieren zu können, müssen Zeitschritt und Speicherintervall entsprechend klein sein. Ein Optimum zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand wurde bei dieser Partikelgröße bei  $10^{-4} \text{ s}$  gefunden [2].



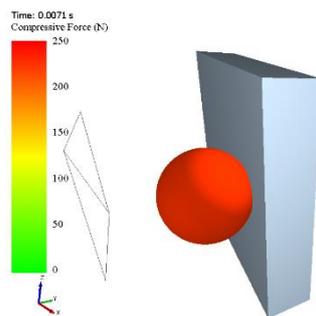
**Bild 10:** DE Simulation der Übergabe mittels „FlowScrape“



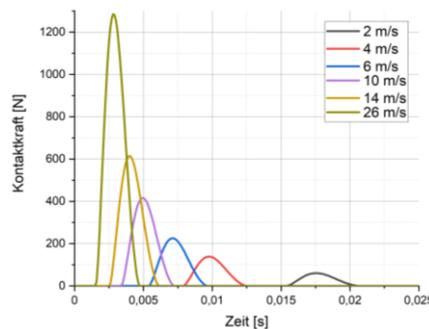
**Bild 11:** DE Simulation einer herkömmlichen Übergabeschurre

## 6 Partikelbruchvorhersage

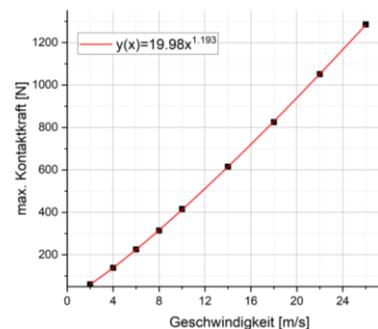
Um den Partikelbruch mittels Simulation vorhersagen zu können, wurde folgender Ansatz gewählt: Ein Partikel bricht, wenn er eine bestimmte Kontaktkraft erfährt. Die dazu benötigten Kontaktkräfte wurden mittels Kalibration des Bruchversuchs ermittelt, siehe Bild 12. Dazu wurde der Prallversuch gegen eine Stahlplatte mit verschiedenen Geschwindigkeiten simuliert, siehe Bild 13. Zeitschritt und Speicherintervall wurden auch hier mit  $10^{-4}$  s definiert, um die Kontaktkraft ausreichend genau zu ermitteln. Mit dem nichtlinearen Zusammenhang zwischen maximaler Kontaktkraft und Geschwindigkeit beim Aufprall, siehe Bild 14, und den Ergebnissen der Bruchversuche (Bild 9), kann anschließend eine Vorhersage über einen eventuellen Partikelbruch getroffen werden. Um einen unnötig niedrigen Zeitschritt und damit höhere Rechenzeiten zu vermeiden, wurden in der Simulation sehr geringe E-Module gewählt. Um das unterschiedliche Dämpfungsverhalten der Kontaktpartner und damit den Einfluss auf die Kontaktkraft zu berücksichtigen, wurden die E-Module von Stahl, Gurt und „FlowScrape“ allerdings im richtigen Verhältnis zueinander definiert. Der E-Modul von Sinter wurde auf den kleinstmöglichen Wert gesetzt. Die Stoßzahlen tragen ebenfalls zur Dämpfung bei, wurden aber anhand der Versuchsergebnisse von [5] definiert.



**Bild 12:** Kalibration Bruchversuch



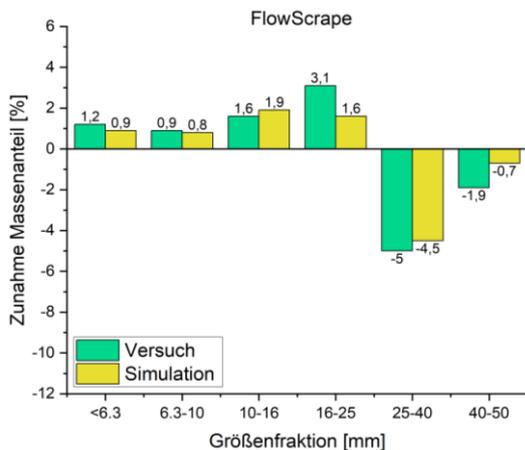
**Bild 13:** Kontaktkraft bei versch. Geschwindigkeiten



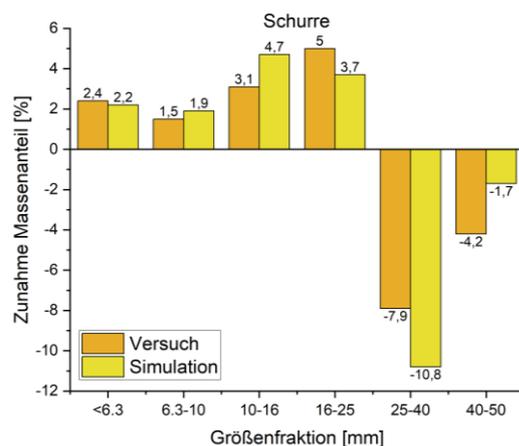
**Bild 14:** Zusammenhang zwischen max. Kontaktkraft und Geschwindigkeit

Für die Partikelbruchvorhersage muss die Kontaktkraft jedes Partikels über die gesamte Förderdauer individuell betrachtet werden. Da EDEM jeweils nur Kontaktkraft oder Partikel-ID exportieren kann, wurde ein Matlab-Skript programmiert, das die Ergebnistabellen entsprechend verknüpft, sodass für jeden Partikel jederzeit die Kontaktkraft ermittelt werden kann. Sowohl beim „FlowScrape“ als auch bei der herkömmlichen Übergabeschurre gibt es jeweils zwei Ereignisse, die hauptsächlich für den Bruch verantwortlich sind. Die Kollision mit der Prallplatte bzw. die Aufgabe auf den „FlowScrape“ und der Fall auf den abführenden Gurt. Somit wurden jeweils der größte und zweitgrößte Spitzenwert der Kontaktkraft (mit entsprechender Prominenz) für jeden Partikel ermittelt. Anschließend wurden Kraftintervalle definiert und die Anzahl der Partikel mit Spitzenwert im jeweiligen Intervall gezählt. Dafür wurde jeweils für den größten und zweitgrößten Spitzenwert ein Histogramm erstellt. Der Mittelwert des Kraftintervalls wurde dann mithilfe des Zusammenhangs in Bild 14 in eine korrespondierende Geschwindigkeit umgerechnet. Allein mit der Geschwindigkeit kann die massenspezifische Energie [J/kg] berechnet werden und anhand der

Bruchversuchsergebnisse (Bild 9) die zu erwartende Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch ermittelt werden. Die berechnete Partikelgrößenverteilung nach dem entsprechenden Spitzenwert wurde dann mit der Partikelanzahl pro Kraftintervall gewichtet, womit sich die Partikelgrößenverteilung der gesamten Schüttgutprobe nach der größten auftretenden Belastung ergibt. Der Vorgang wurde für den zweitgrößten Spitzenwert der Kontaktkraft wiederholt und die Zu- bzw. Abnahmen der Massenanteile der jeweiligen Größenfraktionen zu den Ergebnissen des größten Spitzenwertes addiert. Auch die Simulationsergebnisse zeigen den partikelschonenden Effekt bei Übergabe mit dem „FlowScrape“. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchen in Bild 15 und Bild 16 zeigt teils größere Abweichungen bei den größeren Fraktionen, aber eine nur geringe Abweichung bei den kleineren Fraktionen. Vor allem beim Feinmaterial wird im Versuch nur 0,3 bzw. 0,2 % mehr Feinmaterial produziert, als mittels Simulation vorhergesagt. Dies kann daran liegen, dass der Fall in die Kunststoffwanne am Ende des abführenden Gurtes in der Simulation nicht berücksichtigt worden ist und beim 3-maligen Sortieren der Fragmente nach dem Versuch zusätzlich Feinmaterial erzeugt wird.



**Bild 15:** Partikelbruch beim „FlowScrape“



**Bild 16:** Partikelbruch bei herkömmlicher Übergabeschurre

## 7 Ausblick

Eine bessere Übereinstimmung der Versuchs- und Simulationsergebnisse wird erwartet, wenn auch in der Simulation die entsprechende Partikelgrößenverteilung der Schüttgutprobe berücksichtigt wird, anstatt die Simulation mit einem Durchschnittspartikel durchzuführen. Des Weiteren sollte vor allem bei größeren Schüttgutproben der E-Modul von Sinter ebenfalls im richtigen Verhältnis zu den Kontaktpartnern definiert werden, um die Kollision der Partikel untereinander richtig zu werten. Ein großer Nachteil dieses einfachen Partikelbruchmodells ist, dass ein Partikel nach einem Bruch nicht als gebrochen berücksichtigt werden kann. Dies ist zwar bei einfachen Fördervorgängen mit wenigen Partikeln vernachlässigbar, ist aber weniger geeignet für komplexe Vorgänge mit größerem Massenstrom. Um den Partikelbruch und vor allem die Feinguterzeugung mittels DE-Simulation genauer vorherzusagen, wird derzeit ein neues Partikelbruchmodell entwickelt, welches den Partikelbruch selbst simuliert und einfacher mit den Bruchversuchen zu kalibrieren sein wird.

## Zusammenfassung

Zur Reduktion des Partikelbruchs wird eine dynamische Übergabevorrichtung „FlowScrape“ vorgestellt, die aus mehreren, zu einer Muldung zusammengeführten gleichlaufenden Gummiketten besteht und mittels Reibrad am abführenden Gurt angetrieben wird. Um den partikelschonenden Effekt zu quantifizieren, wurden vergleichende Versuche mit einer herkömmlichen Übergabeschurre als Referenz durchgeführt. Die Versuche wurden jeweils mit 10 kg Hochofensinter durchgeführt und zeigen eine deutliche Reduktion des Partikelbruchs, vor allem beim Feinmaterial. Die Feinmaterialerzeugung bei Übergabe mit dem „FlowScrape“ reduziert sich um 50 % gegenüber der herkömmlichen Übergabeschurre. Zusätzlich wurden beide Übergabesysteme mithilfe der DEM simuliert. Ein Modell zur Vorhersage des Partikelbruchs wurde vorgestellt, welches auf den Spitzenwerten der Kontaktkraft jedes einzelnen Partikels basiert und mithilfe von Bruchversuchen kalibriert wurde. Die Bruchversuche wurden mit einem speziell entwickelten automatischen Prüfstand zur Einzelpartikelbruchprüfung durchgeführt, welcher eine effiziente Analyse der Bruchcharakteristik von Schüttgütern ermöglicht. Die Simulationsergebnisse weichen bei den kleineren Fraktionen und beim Feinmaterial nur geringfügig von den Versuchsergebnissen ab. Bei den größeren Fraktionen kommt es zu größeren Abweichungen von den Versuchsergebnissen, weshalb derzeit mithilfe eines neuen Ansatzes ein genaueres Partikelbruchmodell entwickelt wird.

### Quellenverzeichnis:

- [1] Dünwald, W.; Prenner, M (2019): Vorrichtung zum Leiten eines von einem Abwurfende oder Austragsende einer Fördereinrichtung abfließenden Materialstroms. Patentnr. DE 10 2019 108 687 A1. Deutschland
- [2] Kogler, P. (2020): Analyse von Kontaktvorgängen und Optimierung von fördertechnischen Anlagen hinsichtlich Partikelbruchs bei Sinter. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben
- [3] Denzel, M.; Prenner, M. (2021): Minimierung des Sinterzerfalls mittels DEM. Berg- und Huettenmaennische Monatshefte (BHM) 166(2):76–81. doi:10.1007/s00501-021-01081-7
- [4] Prenner, M. (2018): Simulationsparameterstudie - Sinterbunker. Projektbericht, Montanuniversität Leoben
- [5] Brugger, M. (2021): Rücksprungverhalten von Hochofensinter. Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Materialbrücken, Entmischungen, Staub – Technische Beispiele der Vermeidung durch Sieben und Pelletieren

Jan Lampke  
Metodi Zlatev  
Sandra Weyrauch  
Hagen Müller

---

**HAYER & BOECKER**



INSTITUT

Dr.-Ing. Jan Lampke  
Dr.-Ing. Metodi Zlatev  
Sandra Weyrauch  
Dr.-Ing. Hagen Müller (Referent)  
HAYER Engineering GmbH  
Halsbrücker Str. 34  
09599 Freiberg



## **Materialbrücken, Entmischungen, Staub – technische Beispiele der Vermeidung durch Sieben und Pelletieren**

*Der ungehinderte Materialfluss ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Anlagen zur Aufbereitung mineralischer Rohstoffe. Daher ist bereits während der Planungsphase darauf zu achten, dass die damit einhergehenden Anforderungen berücksichtigt und durch die Anlagenkomponenten erfüllt werden können. Durch Flexibilisierung der Materialströme innerhalb der Anlage lassen sich Betriebsstörungen gezielt vermeiden und durch Verwertung bisher nicht genutzter Stoffströme kommerzieller Mehrwert erreichen.*

### **1 Einleitung und Problemstellung**

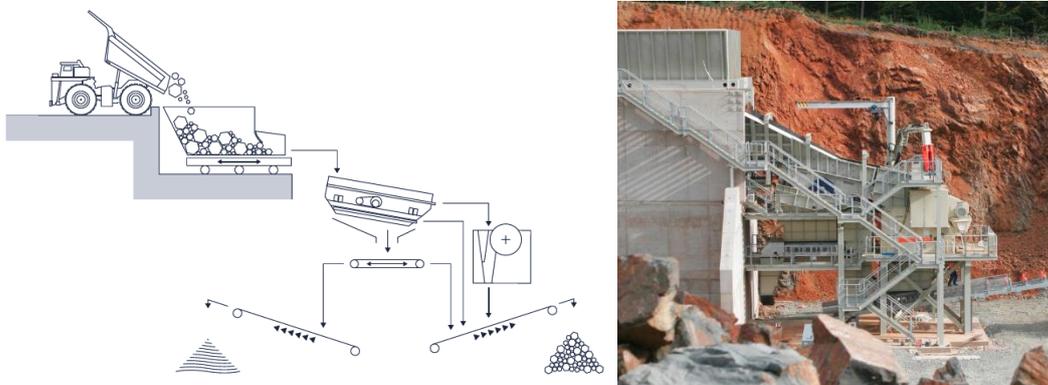
In Abhängigkeit der geologischen Genese besitzt jede Lagerstätte individuelle Stoffeigenschaften in Abhängigkeit ihres Lagerstättentyps (z. B. Locker- oder Festgestein; Erz oder Sekundärrohstoff etc.). So können in Klüfte und Spalten abgelagerte bindige bzw. klebrige Bestandteile zu großen Problemen hinsichtlich eines störungsfreien Materialflusses während der Aufbereitung, insbesondere bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen, führen. Der Anlagenbetreiber hat neben dem störungsfreien Anlagenbetrieb weiterhin ein größtmögliches Interesse, die eigenen Vorkommen vollständig zu nutzen und dabei auch minderwertigere Qualitäten so aufzubereiten, dass normgerechte Produkte erzielt werden bzw. durch Nutzung von neuen Verfahren bisher nicht verwendeten Stoffströmen (Stäube, Füller etc.) einen kommerziellen Wert zu verleihen.

Diese Gesichtspunkte sind bei der Planung von Aufbereitungsanlagen entsprechend zu berücksichtigen. Voraussetzung dafür ist eine intensive Aufnahme und Untersuchung der Lagerstätte hinsichtlich ihrer Eigenschaften. Diese können unter anderem durch Gesteinsanalysen beschrieben werden. Diese erlauben die Ermittlung von quantitativen Kennwerten, welche eine Bewertung der Gesteine hinsichtlich ihrer Brechbarkeit, der Korngrößen- und Formverteilung der Brechprodukte, des Verschleißes an den Arbeitsorganen von Aufbereitungsmaschinen und -anlagen sowie den erforderlichen Energieaufwand zur Zerkleinerung ermöglichen [1]. Weiterhin sind für die verschiedenen Verfahrensschritte Versuche im Technikum unabdingbar. Die individuelle Untersuchung der Schüttguteigenschaften des Aufgabematerials sowie der Zwischen- und Endprodukte zur Auslegung und Gestaltung wichtiger Anlagenteile und Übergabestellen wie Trichter, Schurren und Leitbleche ist erforderlich, sodass in ihnen Brückenbildung, Materialablagerungen und Entmischungen während allen Betriebsspektren vermieden werden. Im Folgenden werden aus Sicht eines Anlagenbauers beispielhaft Möglichkeiten zur Vermeidung von Materialflussstörungen im Anlagenbetrieb sowie zur Flexibilisierung des Betriebsregimes aus den Bereichen Sieben und Pelletieren vorgestellt.

### **2 Flexible Vorabscheidung von bindigem Material in Vorbrechanlagen**

Beim Abbau von Festgesteinslagerstätten steht das Bohren und Sprengen an erster Stelle des Gewinnungsprozesses. In der Regel liegt dann ein grobstückiges Sprengaufwerk mit

einer Korngröße von etwa 0/1500 mm vor. Ebenfalls können im Haufwerk vorhandene Störstoffe (bindige Feianteile) enthalten sein, welche nach dem Sprengen in der Regel fein verteilt vorliegen. Durch eine zeitaufwendige selektive Gewinnung kann eine erste Vorsortierung des Wertstoffs mit dem Bagger erfolgen. Eine andere Möglichkeit bietet eine flexibel gestaltete, mehrstufige Vorbrechanlage mit Vorabsiebung, mit deren Hilfe gezielt störstoffbehaftete Körnungen aus dem Prozess ausgeschleust werden können. Dadurch kann eine erhebliche Menge an Störstoffen bereits vor der Primärzerkleinerung ausgeschleust werden. HAVER NIAGARA bietet zwei Varianten von Vorbrechanlagen an. Die Basis-Variante (siehe Bild 1) entlastet den Primärbrecher mit Hilfe einer HAVER NIAGARA Exzentrersiebmaschine. Ein zusätzliches Siebdeck erlaubt es, bei Bedarf ungeeignete Steinerde abzuschneiden. Ist der Siebdurchgang für die Weiterverarbeitung ungeeignet, so kann er direkt abgeschieden werden. Verbessern sich Vorkommen oder Verwendungsmöglichkeiten, so wird der Siebdurchgang der Produktion zugeführt.



**Bild 1:** HAVER Vorbrechanlage Basis-Variante

Die zweite Variante (siehe Bild 2) ermöglicht eine optimale Ausnutzung des Vorkommens. Hiermit hat der Kunde die größtmögliche Flexibilität und Wirtschaftlichkeit für die Primärbrechstufe, insbesondere bei inhomogenen Vorkommen. Bei guten Vorkommen kann das gewonnene Material komplett der Produktion zugeführt werden.



**Bild 2:** HAVER Vorbrechanlage Master-Variante

Bei qualitativ minderwertigen Vorkommen kann die Steinerde gezielt auf einer zweiten Siebmaschine abgeseibt werden. Die wertvollen Gesteinskörnungen werden der Produktion zugeführt und nur das ungeeignete erdige Material wird auf der Halde abgeschieden. Bei sehr schwierigen Vorkommen kann es von Vorteil sein, die Steinerde komplett abzuscheiden.

Eine der wichtigsten Komponenten einer jeden Vorbrechanlage ist der Vorabscheider. Durch seinen Einsatz wird die Anlage effizient, verschleißarm und produktiv. Exzentrersiebe sind zur Vorabscheidung und Klassierung weltweit im Einsatz [3]. Insbesondere bei der Klassierung von grobstückigem Material wie Wasserbausteinen, der Verarbeitung von siebschwierigem Material (z. B. klebriges und/oder stark verschmutztes Material) sowie bei hohen Aufgabelleistungen bis zu 2500 t/h und stoßweiser Materialaufgabe sichern Exzentrersiebe zuverlässig eine den Qualitätsanforderungen entsprechende Produktion [4,5]. Typische Einsatzgebiete sind dabei die Erz-, Hartstein- und Kalksteinaufbereitung.

Herzstück bei allen HAVER Exzentrersieben ist der bewährte Exzenterantrieb. Das Antriebssystem erzeugt eine gleichbleibende, lastunabhängige Kreisschwingungsbewegung des Siebkastens unter allen Betriebsbedingungen. Leistungselement der Schwingbewegung ist eine vierfach gelagerte Welle, auf deren exzentrischen Teil die Sieblager angeordnet sind. Diese Anordnung gewährleistet den stets gleichbleibenden Schwingkreis und somit auch die konstante Materialbeschleunigung, die wiederum eine verstopfungsfreie Absiebung sicherstellt. Die Massenausgleichsmechanik gewährleistet eine perfekte Laufruhe des Siebes. Somit werden die Anforderungen an erhöhte Produktivität, definierte Fehlkornanteile und maximierte Gutkornausbeute bei allen Einsatzbedingungen erfüllt. [6]

Das Produkt aus Vorbrechanlagen wird in der Regel in nachgeschalteten Brechstufen weiter zerkleinert und das anfallende Brechgut in Kornfraktionen zerlegt, die anschließend je nach Qualitätsanforderungen wieder zu definierten Sieblinien zusammengesetzt werden. Zur Realisierung der verfahrenstechnischen Prozesse „Zerkleinern“ und „Klassieren“ steht eine große Vielfalt von Maschinen und Apparaten verschiedener Hersteller zur Verfügung. Für die richtige Auswahl der erforderlichen Zerkleinerungs- und Klassiertechnik sind verschiedene Kriterien zu berücksichtigen, wie z. B.:

- Eigenschaften des zu zerkleinernden und zu klassierenden Gutes (z. B. mineralogische und chemische Zusammensetzung, Aufgabekorngröße, Abrasivität, Festigkeitseigenschaften und Härte, Roh- und Schüttdichte, Oberflächenfeuchte etc.)
- Granulometrische Kennwerte, wie z. B. Kornbereiche der gewünschten Kornfraktionen sowie deren Ausbeute (Mengen); Kornform

Im Rahmen einer physikalisch-technischen Charakterisierung werden von der Gesteinskörnung wichtige Kennwerte wie Gesteinsrohndichte und Schüttdichte, Oberflächenfeuchte und Wasseraufnahmefähigkeit, Gesteinsfestigkeit und –härte, die Abrasivität und die Bruchzähigkeit aufgenommen. Die Kornzusammensetzung einer Gesteinskörnung ist, ebenso wie deren Kornformen, bestimmend für die Packungsdichte des Haufwerkes, die wiederum ausschlaggebend für die Verarbeitungs- und Lagereigenschaften ist. Diese Kennwerte können auch innerhalb eines Vorkommens stark

variieren, so dass dem auch bei der Planung der Aufbereitungsanlage insbesondere hinsichtlich deren Flexibilität Rechnung getragen werden muss. Die Auswahl einer Siebmaschine und die Festlegung ihrer Konfiguration sind dabei von vielen Einflussgrößen abhängig. Um hohe Produktqualitäten und -mengen gewährleisten zu können, ist eine ausreichend große Siebfläche und für jeden Trennschnitt eine optimale Sieböffnung (Größe und Form) festzulegen. Für große Durchsatzmengen ist eine möglichst große Sieböffnung vorteilhaft. Für eine trennscharfe Siebung sind, bezogen auf den jeweiligen Trennschnitt, enge Sieböffnungen günstig, um die Fehlkornanteile im Siebrückstand bzw. -durchgang in vorgegebenen Grenzen halten zu können, weiterhin sind Verweilzeit und Schichthöhe wichtige Parameter bei der Siebklassierung. Mit Hilfe von Versuchen können diese Vorgaben überprüft und anschließend bei der Umsetzung der Anlage garantiert werden.

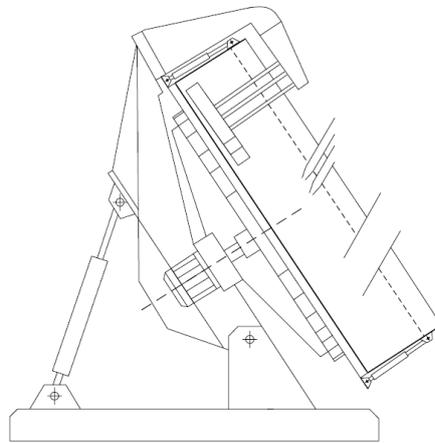
### **3 Nutzung von Stäuben und Füllmaterial durch Pelletieren**

Die Zerkleinerungseigenschaften des Aufgabematerials und die richtige Auswahl eines geeigneten Zerkleinerungsaggregates beeinflussen maßgeblich die Korngrößenverteilung und den dabei entstehenden Feinanteil. Um die Normanforderungen hinsichtlich der Korngrößenverteilung für Baustoffe insbesondere bei Edelsplitten erfüllen zu können, werden verschiedene Klassierstufen eingesetzt, um die Kornverteilungskurve entsprechend anpassen zu können. Hierbei fallen unterschiedliche Mengen an Stäuben bzw. Füllmaterial an, für welche nur schwer weitere Verwendungsmöglichkeiten zu finden sind. Durch eine Agglomeration insbesondere der Pelletierung lassen sich diese Stoffströme unter Zusatz eines Bindemittels sehr gut in neue Produkte mit veränderten Transport-, Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften verarbeiten. So lassen sich durch die Pelletierung Produkte mit den verbesserten Eigenschaften hinsichtlich

- der Riesel- und Streufähigkeit,
- Gewährleistung der Staubfreiheit,
- Vermeidung von Entmischungen,
- Erzeugung enger Partikelgrößenverteilungen,
- Erzeugung definierter Partikelgrößen,
- Verbesserung der Dosierbarkeit und –genauigkeit,
- Steigerung der Effizienz bei Lager- und Transportprozessen erzeugen.

Die durch die Pelletierung erzeugten künstlichen Gesteinskörnungen sind nach der Norm DIN EN 12620 Gesteinskörnungen mineralischen Ursprungs, die in einem industriellen Prozess unter Einfluss thermischer oder sonstiger Veränderung oder aus Recyclingmaterial entstanden sind, beispielsweise künstlich hergestellte, gebrochene und ungebrochene, dichte und porige Gesteinskörnungen aus Flugaschen oder Schlacken. Eine weitere effiziente und wirtschaftliche Möglichkeit stellt dabei die Aufbauagglomeration im Pelletierteller dar. Mit diesem Verfahren können Reststoffe zu hochwertigen Bauzuschlagsstoffen verarbeitet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Einsatzmaterialien in einem bestimmten Korngrößenbereich fein verteilt vorliegen, rieselfähig und somit dosierfähig sind.

Ausschlaggebend für die Bildung von Agglomeraten sind anziehende Kräfte zwischen den Partikeln. Bei der Aufbauagglomeration im Pelletierteller wirken hauptsächlich kapillare Bindungskräfte, welche durch Partikelkollisionen verursacht werden. Die notwendigen Relativbewegungen im Materialbett werden in einem geneigt-rotierenden, flachzylindrischen Behälter gebildet (Bild 3).



**Bild 3:** Schematische Darstellung eines Pelletiertellers mit höhenverstellbarem Tellerrand

Das feindisperse Aufgabematerial wird, entsprechend der Agglomerationsaufgabe, an exponierter Position in das Innere des Prozessraumes aufgegeben. Durch die Behälterrotation wird das Feingut in Abhängigkeit vom Mitnahmekoeffizienten, der Drehzahl und dem Anstellwinkel bis zur tellerhöchsten Stelle mitgerissen und rollt anschließend auf dem Materialbett ab. Zur Erzeugung der Haftbedingungen wird das Material mit Bindemittel, meist Wasser, besprüht. In diesem feuchten Materialbett bilden sich durch irreguläre, zufällige Teilchenberührungen Flüssigkeitsbrücken, wodurch Zusammenschlüsse einzelner Partikel entstehen. Diese Pelletkeime werden auf dem Feingut im Materialbett nach oben transportiert, wobei sich weitere Partikel und Pelletbruchstücke anlagern. Aufgrund der zufälligen Teilchenbewegung werden zudem trennende Kräfte wie Abrasion, Bruch oder Zerfall der Pellets wirksam. Daher liegen im Materialbett des Pelletiertellers gleichzeitig Aufgabegut, Pelletkeime und Pellets sowie deren Bruchstücke und Abriebmaterial vor. Haben die gebildeten Pellets in Abhängigkeit von den gewählten Einstellparametern die gewünschte Größe, werden sie durch den Segregationseffekt und die Schwerkraft über den Tellerrand ausgetragen. Durch diesen Segregationseffekt wird im Gegensatz zur Pelletiertrommel eine sehr enge Pelletgrößenverteilung im Austrag erreicht. Aufgrund des kontinuierlichen Rollvorganges werden vornehmlich kugelförmige Agglomerate mit einer homogenen Grünfestigkeit gebildet. Industriell werden Pelletierteller mit Durchmessern von 1,0-7,6 m eingesetzt. Im Laborbetrieb werden jedoch vorwiegend Pelletierteller mit einem Durchmesser von lediglich 0,3-0,4 m verwendet. Der Massenstrom liegt je nach Tellerdurchmesser und Pelletierbarkeit des Materials zwischen 0,6 und 150 t/h bei installierten Antriebsleistungen von 1,0-255 kW. Die erzeugten Pellets weisen meist einen Durchmesser von 3-20 mm auf. Durch Variation der Einstellparameter Neigungswinkel, Tellerdrehzahl, Flüssigkeitsanteil, Füllungsgrad und geometrisches Teller Verhältnis können die Pelletqualität und der Massenstrom beeinflusst werden. Einen signifikanten Einfluss hat auch die Position der Materialaufgabe, der Bedüsungseinrichtung

sowie der Abstreifer. Nachfolgend wird mittels Beispielen aus unterschiedlichen Branchen das Potenzial der Aufbauagglomeration im Pelletierteller veranschaulicht. Zur praxisrelevanten Forschung benutzt HAVER Engineering Pelletierteller mit einem Durchmesser von 1,0 m. Durch die Integration einer Bandwaage wird ein kontinuierlicher Prozess mit Durchsätzen von bis zu 500 t/h ermöglicht. Mittels Computer-Partikel-Analyse (CPA) können zudem die Pellets online hinsichtlich der Korngröße, Korngrößenverteilung sowie der Kornform analysiert werden. Somit ist ein belastbares Scale-up der Versuche möglich (Bild 4).



**Bild 4:** Füllmaterial im Pelletierteller bei Auslegungsversuch und Produkt

Die vorkonditionierten Einsatzstoffe werden in einem Mischer mit Bindemittel (in der Regel Zement) homogenisiert und durch Wasserzugabe für den Pelletierprozess vorbereitet und anschließend kontinuierlich dem Pelletierteller dosiert aufgegeben. Durch Variation der Maschinenparameter (Drehzahl, Neigung und Tellerrandhöhe) am Pelletierteller lassen sich künstliche Zuschlagsstoffe in unterschiedlichsten Korngrößenbereichen präzise herstellen. Durch den Einsatz von Zement als Bindemittel kann auf eine thermische Trocknung verzichtet werden und die Grünpellets härten selbstständig auf einer Halde aus. Nach der Aushärtung der Pellets können diese in einer Brech- und Klassieranlage weiterverarbeitet und als künstliche Gesteinskörnung für die Betonproduktion verwendet werden. Aufgrund der geringen Schüttdichte der Agglomerate können diese auch als Leichtzuschlagsstoffe eingesetzt werden.

## Zusammenfassung

Bereits bei der Anlagenplanung werden die Grundlagen für eine höchstmögliche Flexibilisierung und somit Wirtschaftlichkeit für den späteren Anlagenbetrieb gelegt. So bieten sowohl der Einsatz einer Vorabscheideranlage zur Abscheidung von bindigen Materialien am Prozessbeginn einer Aufbereitungsanlage als auch das Pelletieren von Stäuben und Füllmaterial am Prozessende Möglichkeiten der Vermeidung von Materialflussproblemen und durch Erzeugung neuer verkaufsfähiger Produkte der Generierung eines wirtschaftlichen Mehrwertes.

### Quellenverzeichnis:

- [1] Popov, O.; Lieberwirth, H.; Folgner, T.: Produkteigenschaften und Systemkenngrößen – Quantitative Charakterisierung der Festgesteine zur Prognostizierung des Gesteinseinflusses auf relevante Produkteigenschaften und Systemkenngrößen. AT Mineral Processing 07-08/2014 (Teil 1) und 10/2014 (Teil 2)
- [2] Zlatev, M.: Optimierung der Brechsandherstellung für die Trockenmörtelindustrie. AT Mineral Processing 11/2016
- [3] <http://www.georesources.net/index.php/german-news/weiteres-grossprojekt-zwischen-haver-niagara-gmbh-und-cemex-kies-splitt-gmbh>
- [4] Vorbrechanlage und Wasserbausteinaufbereitungsanlage im Sauerland. AT Mineral Processing 05/2015, S. 20-22
- [5] TU Bergakademie Freiberg, Symposium 2009, Vortrag Herr Scharf und Herr Glaser, Einsatz einer mobilen Vorsiebanlage mit schwerer Exzenter-Siebmaschine in der Gewinnung von Naturstein
- [6] Vibrationssiebmaschinen für den Einsatz in Recyclinganlagen; Firmenschrift HAVER Niagara



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

### Praxisorientierte Explosionsprüfungen an einem Schwingsieb im Originalmaßstab

–

### Neue Lösungskonzepte zum konstruktiven und wirtschaftlichen Explosionsschutz

Roland Bunse

Dominik Becker



**REMBE**® Research + Technology Center GmbH

Dipl.-Ing. Roland Bunse (Referent)

Dominik Becker, B. Sc.

REMBE®

Research + Technology Center GmbH

Zur Heide 39

59929 Brilon



# Praxisorientierte Explosionsprüfungen an einem Schwingsieb im Originalmaßstab

*Neue Lösungskonzepte zum konstruktiven und wirtschaftlichen Explosionsschutz*

## 1 Idee zur Einführung einer Maschine mit Vorteilen bei Sicherheit und Wirtschaftlichkeit

### 1.1 Konventionelle Siebe unter sicherheitstechnischen Aspekten

Konventionelle Schwingsiebe, wie sie häufig in der Holzwerkstoffindustrie eingesetzt werden, unterliegen hohen Anforderungen an Durchsatz und Robustheit, bei gleichzeitigem Wunsch nach geringem Gewicht, um die bewegte (Tara-)Masse klein zu halten. Bei der Herstellung von Spanplatten werden typischerweise 3 bis 5 Siebfraktionen erzeugt.

Aus explosionstechnischer Sicht stellen diese Art von Sieben eine besondere Herausforderung dar. In der Regel sind die Siebe dem Spänetrockner nachgeschaltet. Bei Fehlfunktion des Trockners und/oder der nachgeschalteten Kühlstrecke kann es zum Eintrag von wirksamen Zündinitialen in das Sieb kommen. Aufgrund des Separationsprozesses ist im Siebgehäuse hinreichend explosionsfähiger Staub ( $d < 500 \mu\text{m}$ ) vorhanden, so dass es mit dem Luftsauerstoff zu einer spontanen Entzündung und damit zur Staubexplosion kommt.

Die Schwingsiebe sind durch den Hersteller in der Regel mit Berstscheiben zur Explosionsdruckentlastung auf dem obersten Deck ausgestattet. Da die Siebe meistens im Gebäude aufgestellt sind, entlasten die Berstscheiben Flamme und Druckwirkung direkt am Aufstellungsort. Diese Bereiche sind häufig in Zone 22 eingeteilt, d. h. dort ist mit massiven Staubablagerungen zu rechnen. Die ausgestoßene Druckwelle erzeugt dann durch Aufwirbeln weitere explosionsfähige Atmosphäre, welche unmittelbar entzündet wird. Diese sogenannte Sekundärexplosion ist meist schlimmer als das Initialereignis und führt zu katastrophalen Schäden an Gebäuden und bedingt Personenschäden bis hin zu Toten. Zahlreiche dokumentierte Ereignisse innerhalb der letzten Jahre zeigen das Gefährdungspotential deutlich auf.

Konstruktive Schutzmaßnahmen - wie z. B. flammenlose Druckentlastung - sind technisch möglich, jedoch werden diese aufgrund der höheren Kosten und der zusätzlichen Schwungmasse gleichermaßen von Betreibern und Herstellern abgelehnt. Explosionsunterdrückung ist ebenfalls zu teuer und die Wirksamkeit bzw. die Gefahr von Fehlauslösungen, verbunden mit hohen Wartungskosten wird von den Anwendern nicht akzeptiert.

Ein neues Konzept wurde daher gesucht, welches sowohl die wirtschaftlichen Aspekte als auch die sicherheitstechnischen Anforderungen miteinander vereint.

## 1.2 Anforderungen an eine neue Siebkonstruktion unter sicherheitstechnischen Aspekten

Im Vordergrund der Neuentwicklung des Siebes stehen natürlich die wirtschaftliche Ausführung und die Erfüllung der Siebaufgabe, denn das sind die Kenngrößen, mit denen Kunden gewonnen werden können und die zu dem gewünschten Markterfolg führen. Leichtbauweise bei vergleichbaren Explosionsdruckstoßfestigkeiten war nur eine Anforderung zu diesem Thema. Eine verstellbare Siebneigung erlaubt, die Durchsatzmengen besser zu kontrollieren bei gleichbleibendem Siebergebnis.

Die verheerenden Explosionsereignisse der Vergangenheit zeigen nur zu deutlich auf, dass im Bereich konstruktiver Explosionsschutz auch etwas getan werden musste. Ein vollkommen neuer Ansatz, bei dem die Druckentlastungsflächen nicht mehr auf dem oberen Deck platziert werden, sondern in einen Mittelschacht entlasten, der die Explosion wiederum nach oben richtet, wo diese dann auf einen Flammenabsorber trifft, war die erste Idee.

Das wäre eine platzsparende, sekundärexplosionsfreie Lösung, die zudem noch mit geringen Zusatzgewichten am Sieb auskommen würde (Bild 1).



Bild 1: Konzeptstudie Siebmaschine

## 2 Design Studie des Prototyps mit technologischen Vorteilen und Anforderungen an den konstruktiven Explosionsschutz

### 2.1 Berechnung der mechanischen Festigkeit des neuen Siebgehäuses

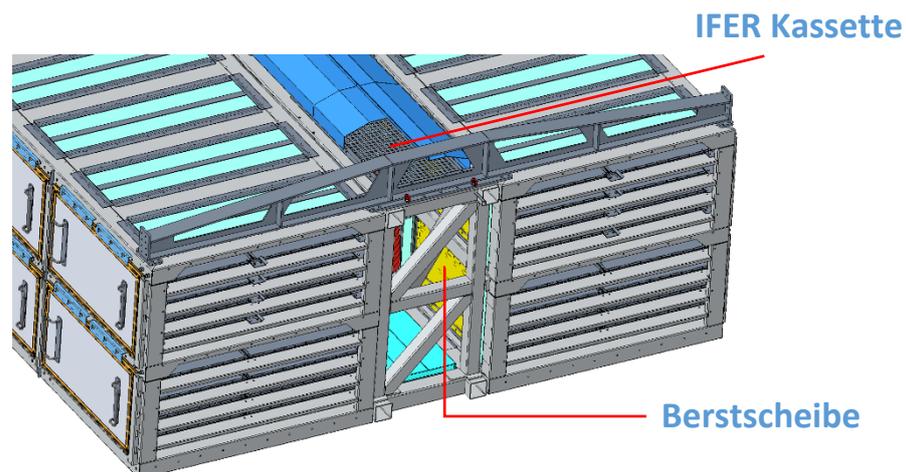
Mit Hilfe der Finiten Elemente Berechnungsmethode (FEM) wurde das neue Gehäuse berechnet. Da die Sicherheitsbeiwerte und auch die Werkstoffkenndaten eher konservativ angesetzt sind, kommt man mit dieser Methode zu guten, aber nicht optimalen Ergebnissen.

In einer Vorstudie zu diesem Projekt wurde von den Ingenieuren das Berechnungsmodell anhand von Explosionsprüfungen an definierten Mustergehäusen validiert. D. h., die Verformungen, welche nach einer realen Explosion in einer bestimmten Geometrie mit bekannten Werkstoffkennwerten nachgewiesen werden konnten, wurden so lang iterativ berechnet, bis Realität und Berechnungsmodell übereinstimmten. Erst nun wurde die neue Gehäuseform mit diesen Parametern designed. Eine Gehäusefestigkeit mit um 0,3 bar reduziertem Explosionsüberdruck wurde ausgewählt und konstruiert. Die Anzahl und Größe der Druckentlastungsflächen wurden festgelegt.

### 3 Simulation von Staubexplosionen und deren Auswirkungen durch GEXCON

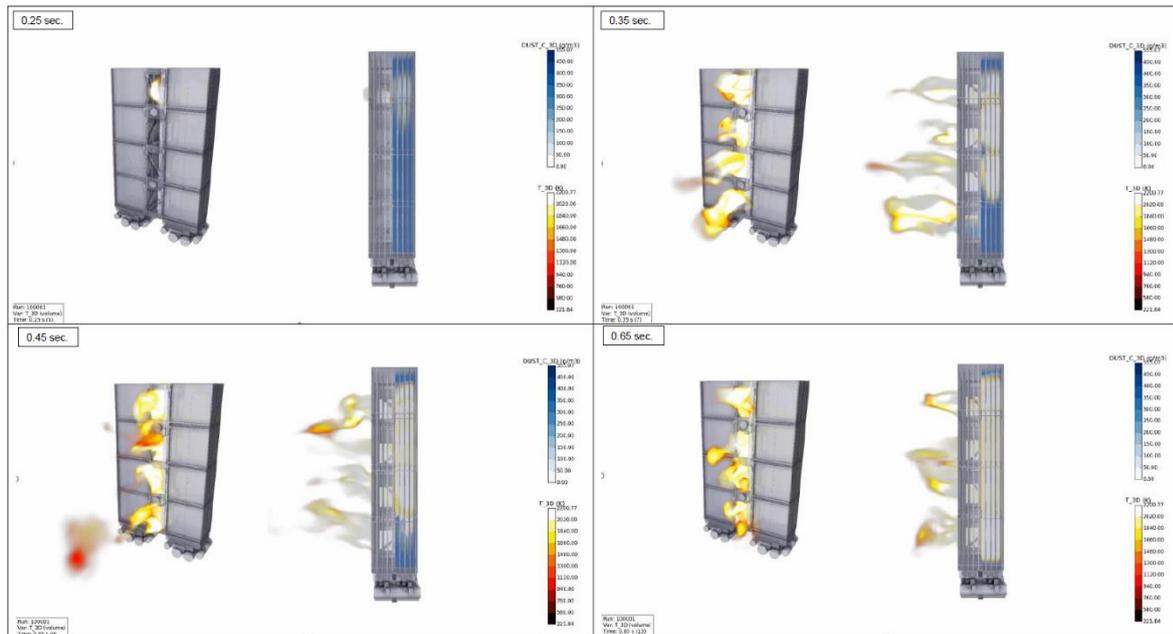
Die Berechnung zur Dimensionierung von Explosionsdruckentlastungsflächen erfolgt gemäß der gültigen Norm DIN EN 14491 [1]. Als Ergebnis kann entweder die erforderliche Fläche bei festgelegtem reduzierten Explosionsdruck oder eben umgekehrt ausgegeben werden. Diese Norm ist empirisch erarbeitet worden, birgt aber hier auch einen gesunden Sicherheitsfaktor. Beim Design der Siebgehäuse ist der Einbauraum der Berstscheiben sehr limitiert (Bild 2). Die Druckstoßfestigkeit ist ebenfalls auf Grund der Gewichtseinsparung auch nur im begrenzten Maße zu erweitern.

Seit einigen Jahren haben sich Softwaresimulationen zur Beurteilung der Staubverteilung in Gehäusen bewährt. Ausgehend von der Kenntnis dieser Verteilung und unter Berücksichtigung der Verbrennungsdynamik ist ein Softwaretool Flacs-Dust (DESC) entwickelt worden. Die Berechnungsverfahren sind anhand von hunderten Experimenten verifiziert und validiert worden. Die eher konservativen Ergebnisse der Norm können mit DESC deutlich präzisiert werden.



**Bild 2:** Aufbau Siebgehäuse

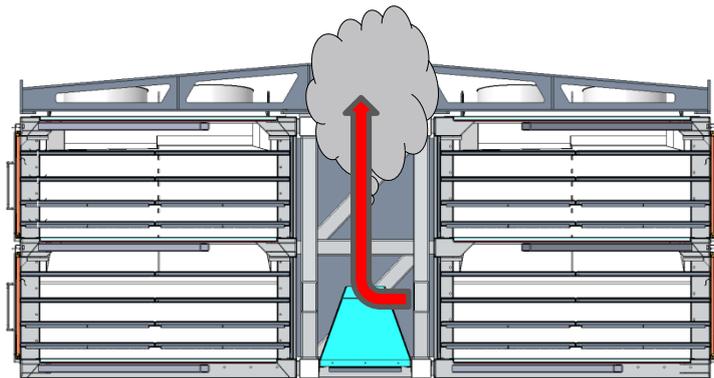
Die nachfolgenden Darstellungen im Bild 3 zeigen die jeweiligen Simulationsstufen:



**Bild 3:** Simulation der Druck- und Flammenausbreitung

So sehr diese Software auch ausgereift und an vielen Fällen validiert ist, so bleiben dennoch einige Fragestellungen unbeantwortet bzw. obliegen einer Abschätzung:

- Wie ist die Staubverteilung innerhalb der Siebböden?
- Wie wirkt sich die 90° Umlenkung der Berstscheibe aus?
- Wie reagiert der Flammenabsorber?
- Gibt es eine nennenswerte Abkühlwirkung der Siebe?



**Bild 4:** Darstellung der Druckentlastungsrichtung

Belastbare Antworten können nur reale Explosionsprüfungen an vergleichbaren Bauteilen liefern. Eine Skalierung ist in diesem besonderen Fall nicht möglich, da die Verhältnisse an einem Siebkörper nicht unbegrenzt skalierbar sind.

Die Entscheidung wurde getroffen, ein Sieb im Maßstab 1:1 zu bauen und den Explosionsprüfungen zu unterziehen.

## 4 Bau eines Prototyps mit der spezifizierten mechanischen Festigkeit

Entsprechend der Designvorgaben wurde ein Prototyp im Maßstab 1:1 konstruiert. Da das Explosionsgeschehen von einer der 4 Kammern ausgeht, wurde das Prüfmuster entsprechend angefertigt. Der Mittelkanal mit dem Flammenabsorber wurde komplett ausgeführt.



**Bild 5:** Prüfmuster im Maßstab 1:1 inkl. Mittelteil und Flammenabsorber

## 5 Prüfung des Prototyps

### 5.1 Validierung der Simulation

In einer Reihe von Voruntersuchungen wurde die Staubwolkenerzeugung innerhalb der Siebkammern überprüft. Die heftigsten Explosionsereignisse wurden verzeichnet, wenn keiner der Siebböden installiert war. Das hatte die Simulation auch so vorherbestimmt.

Die Berechnungen zur mechanischen Festigkeit entsprechend der FEM konnten bestätigt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden verschiedene Bauteilkonstruktionen überprüft und optimiert.

### 5.2 Anpassungen des Designs

Die weiteren Untersuchungen wurden dann mit der realen Ausstattung der Siebkammer vorgenommen. Kleinere Anpassungen - insbesondere wirtschaftliche Optimierungen - wurden vorgenommen und gleichzeitig mit geprüft. Die Konstruktion wurde so auf das

maximale Sicherheitsniveau angehoben unter gleichzeitiger Minimierung des wirtschaftlichen Aufwandes.

## **6 Überprüfung des verbesserten Designs und Zertifizierung durch GEXCON**

Nachdem alle Optimierungsschritte abgeschlossen waren, wurde das endgültige Design dem Notified Body GEXCON vorgestellt. In gemeinsamen Explosionsprüfungen konnte die einwandfreie Funktion der neuartigen Form der Druckentlastung bestätigt werden. Es konnte während der Prüfungen kein Flammenaustritt aus den Siebkammern oder dem Mittelgehäuse festgestellt werden. Die Dokumentation der Prüfungen erfolgte gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 [2]. Mehrere Hochgeschwindigkeitskameras und Druckerfassungssysteme haben die Prüfungen aufgezeichnet und diese wurden in Zusammenarbeit mit GEXCON analysiert und bewertet.

## **7 Zertifizierung des Designs gem. EN 14460:2018 (+ Validierung des Berechnungsmodells)**

Die EN 14460:2018 „Explosionsfeste Geräte“ [3] beschreibt die Anforderungen an Geräte folgendermaßen:

„Diese europäische Norm legt die Anforderungen an explosionsfeste Geräte fest, die einer im Innern erfolgenden Explosion standhalten werden, ohne zu bersten und ohne gefährliche Auswirkungen auf die Umgebung hervorzurufen. Sie ist auf Geräte (Behälter und Systeme) anwendbar, bei denen Explosionen eine außergewöhnliche Belastung darstellen.“

Diese Anforderungen wurden sowohl per Simulation als auch mit realen Explosionsprüfungen nachgewiesen. Ein sicherer Einsatz des Siebgehäuses kann unter Einhaltung der bestimmungsgemäßen Verwendung attestiert werden.

Als wertvolle Ergänzung ist die Validierung des FEM Berechnungsverfahrens zu bewerten, denn mit Kenntnis der richtigen Parameter der Software können zukünftig auch andere Bauteile dimensioniert und hinsichtlich Verformungen und Explosionsfestigkeit bewertet werden.

## Zusammenfassung

Die systematische Vorgehensweise unter Einbindung der Simulation von Staubexplosionsereignissen, der Berechnung von Bauteilfestigkeiten mit der Finiten Elemente Methode FEM sowie der Validierung durch reale Explosionsprüfungen hat sich als erfolgreich gezeigt.

Die Vorherbestimmung komplexer Explosionsvorgänge ist heutzutage mit modernen und validierten Softwaretools in guter Näherung möglich. Um die so ermittelten Explosionsbelastungen für die Bauteile wirtschaftlich abfangen zu können, müssen rechnergestützte Berechnungsverfahren angewendet werden, um die plastische Verformung beurteilen zu können. Der experimentelle Nachweis mit realen Explosionsprüfungen zeigt ggf. nicht erkannte Schwachstellen auf bzw. kann bei Überdimensionierung auch zu Einsparungen an Werkstoff und/oder Bauteilen führen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand für die Explosionsprüfungen ein erheblicher Erkenntnisgewinn mit massivem Einsparpotential für die Serienfertigung der Siebe erzielt werden konnte.

### Quellenverzeichnis:

- [1] DIN EN 14491:2012: Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen, Oktober 2012, Beuth Verlag, deutsche Fassung
- [2] DIN EN ISO/IEC 17025:2018: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, März 2018, Beuth Verlag, deutsche Fassung
- [3] DIN EN 14460:2018: Explosionsfeste Geräte, April 2018, Beuth Verlag, deutsche Fassung



## 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021

Computersimulation – Organisation – Virtualisierung – Innovation – Digitalisierung

---

# Optimierung einer Logistikkette mittels cloudbasierter Füllstandsmessung - Bestandsmanagement für Silos und Container

Kristina Rosenberger



# Optimierung einer Logistikkette mittels cloudbasierter Füllstandsmessung – Bestandsmanagement für Silos und Container

## 1 Einleitung

Ein exaktes Bestandsmanagement von Schüttgütern und Flüssigkeiten ist für die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks sowie für die Senkung der Logistikkosten unabdingbar. Darüber hinaus trägt die Füllstandsüberwachung dazu bei, dass regelmäßig benötigte Produkte wie Baustoffe, Bauchemie, Salz, Holz-Pellets, Getreide oder Futtermittel zuverlässig verfügbar sind.

Mit Sensorik zur cloudbasierten Füllstandsmessung:

Die zuverlässige Erfassung des Füllstandes durch einen Sensor bildet die Grundlage für ein cloudbasiertes Bestandsmanagement. Die Erhebung zusätzlicher Informationen wie beispielsweise der GPS-Position, des Lagewinkels und der Temperatur rundet die Datenerfassung ab. Mit einem skalierbaren digitalen Service werden die Daten aggregiert, aufbereitet und visualisiert.



**Bild 1:** Systemaufbau Cloudbasierte Füllstandsmessung

## 2 Anwendungen

Der Füllstandssensor Micropilot FWR30 sorgt für die kosteneffiziente Digitalisierung von Füllstands-Messstellen beim Einsatz von Intermediate Bulk Containern oder Silos. So lässt sich mit wenig Aufwand eine berührungslose Bestandsüberwachung von Flüssigkeiten und Schüttgütern durchführen, die verlässliche Daten liefert, wo bisher nur Vermutungen möglich waren.

Der Industrial Internet of Things-(IIoT)-Sensor vereinigt High-End-Messtechnologie mit benutzerfreundlichen, digitalen Services in einem kosteneffizienten Gerät. Die Einsatzbereiche sind Füllstandsmessung und Bestandsüberwachung von mobilen und stationären Silos.

Informationen über Anlagenbestände sind in vielen Branchen essenziell. In der Schüttgutindustrie kommen sowohl Schüttgüter wie Gips, Salz, Sand und Kies, aber auch Flüssigkeiten wie Verflüssiger für die Betonherstellung in IBCs zum Einsatz. Schüttgüter und Flüssigkeiten müssen am Bau oder auch in der Betonherstellung für den Produktionsprozess stets in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

### 2.1 Sensortechnologie

Der smarte 80 Gigahertz Sensor von Endress+Hauser ermöglicht die Messung von Füllständen in mobilen Behältern, in denen dies bislang schwer möglich war. Üblicherweise werden IBCs dort eingesetzt, wo es keine Stromanbindung zum Prozessleitsystem gibt und die Kabelverlegung für die Füllstandsmessung unwirtschaftlich ist.

Die cloudbasierte Lösung liefert genaue, jederzeit abrufbare Informationen über Füllstände, die Umgebungstemperatur, die Messwerthistorie und den Batteriestatus.

Auf Grundlage von Telemetriedaten liefert der Sensor Informationen zum Standort (GPS) der Lagertanks und Silos. Beim Unter- oder Überschreiten frei definierbarer Grenzwerte verfügt der Micropilot FWR30 über eine Alarmfunktion.

### 2.2 Digitaler Service

Je nach Anforderung der jeweiligen Anwendung kann der Micropilot FWR30 mit unterschiedlichen digitalen Services verknüpft und alle Daten können über verschiedene Endgeräte wie Smartphone, Tablet oder Desktop-Computer abgerufen werden. Durch diese einfache Digitalisierung der Messstellen bekommen Unternehmen detaillierte Daten für die Auswertung.

Um die größtmöglichen Vorteile und Einsparungen in den Bereichen Logistik, Umwelt und Effizienz zu ermöglichen, bietet Endress+Hauser eine vollumfängliche Lösung für das Bestandsmanagement von Tanks, Silos und Containern an. Die Kombination aus Füllstandsmessung, Messwertübertragung und Bestandsmanagement mit der Software SupplyCare ermöglicht die volle Transparenz über Lagerkapazitäten unterschiedlichster Behälter, Produkte und Standorte. Aus der langjährigen Erfahrung, welche Endress+Hauser mit Kunden aus verschiedensten Industrien machen durfte, zeigten sich übergreifend gültige Schemata.

Die Effizienz der Lieferkette steigt mit der Einbindung von unterschiedlichen Personen innerhalb von Unternehmen, aber auch firmenübergreifend, in ein zentrales System mit konsistenten Daten. Voraussetzung hierfür ist ein rollenbasiertes Benutzerkonzept, welches Berechtigungen so vergibt, dass ein Benutzer nur die Informationen bekommt, welche er benötigt und auch nur die Aktionen ausführen kann, für diese er sich verantwortlich zeigt.

Ein ERP-System kann die Realität vor Ort nicht direkt veranschaulichen, da es durch die Flexibilität auch Komplexität abbildet und der Datenfluss meist unzureichend oder fehlerbehaftet ist. Deshalb bietet SupplyCare eine einfache, realitätsnahe und anschauliche Benutzeroberfläche und zugleich eine bidirektionale Kommunikation zu ERP-Systemen.

Die kontinuierliche Überwachung von Beständen in ausreichender Genauigkeit mit einem preiswerten System ist besonders in Schüttgutwendungen eine große Herausforderung. Deshalb hat sich Endress+Hauser in den letzten Monaten diesem Thema in der Software SupplyCare gewidmet und mit Hilfe von neuen Kalkulationsmethoden, in Kombination mit dem batteriebetriebenen Sensor Micropilot FWR30, die Genauigkeit der Masseberechnung in Silos revolutioniert.





[www.ilm.ovgu.de/schuettgut](http://www.ilm.ovgu.de/schuettgut)

Institut für Logistik und Materialflusstechnik  
Fakultät für Maschinenbau  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg



39106 Magdeburg  
Universitätsplatz 2  
Gruson Gebäude (Geb. 10)

Telefon: 0391 - 67 58604  
Telefax: 0391 - 67 42646  
[ilm@ovgu.de](mailto:ilm@ovgu.de)

ISBN-13: 978-3-947068-06-7