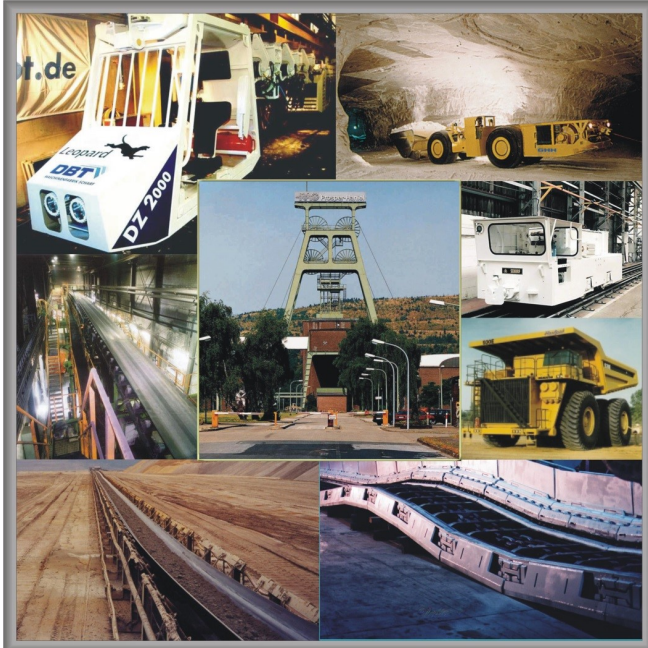


10. Kolloquium Fördertechnik im Bergbau



Institut für Bergbau
Technische Universität Clausthal
26. und 27 April 2022

Tagungsband

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Kolloquium Fördertechnik im Bergbau 2022

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld

Organisation: Sandra Nowosad, M.Sc.

Redaktion: Jan Hußmann

Langefeld, O. (Hrsg.):

Fördertechnik im Bergbau

10. Kolloquium, TU Clausthal,

26. und 27. April 2022

© Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2022

Telemannstraße 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld

www.papierflieger-verlag.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, Clausthal-Zellerfeld, 2022

ISBN 978-3-86948-860-8

© 2022 bei den Autoren der Beiträge. Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich. Der Herausgeber übernimmt keine Verantwortung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Vorwort	VI
Univ.-Prof. Dr.-Ing. O. Langefeld	
Verzeichnis der Aussteller	IX
Verzeichnis der Werbeseiten	IX
Rohstoffe für den Klimaschutz	1
Prof. Dr. W. Frenz RWTH Aachen University	
Rohstoffpolitik und Bergbautechnik EITI-Globaler Motor für Good Governance und Blue Mining Neue Strukturen für Förderländer und Abnehmer	5
Ass. d. B. F. W. Wagner D-EITI	
Quo vadis Normung Unterstützt die Normung die Trends im Bergbau?	7
J. Lehmann VDMA Mining	
Optimierung der Logistik unter Tage mit Einsatz von mathematischen Lösungsverfahren	11
Dr. M. Schulze, D. Marx K+S Aktiengesellschaft	
Unterstützung und Optimierung der Planungs- und Förderprozesse mit Hilfe von 3D-Modellen in den Tagebauen der RWE Power AG	23
M. Wolters, T. Bauer, C. Schmitt, C. Winkler RWE Power AG	
Automatisierungsprojekte und Assistenzsysteme zur Effizienzsteigerung des Bunker- und Großgerätebetriebs in den Tagebauen der RWE Power AG	27
N. Stamm RWE Power AG	
Gurtlenkrolle mit Monitoringfunktion	33
Dr. mont. M. Prenner, J. Müller Montanuniversität Leoben	
Weiterbildung an der FWT	47
Dr. M. Richter FWT Clausthal-Zellerfeld	
Schäden und fehlerhafte Ausführungen an Förder- und Führungsgerüsten	53
A. Hachmann AHA Prüfung und Abnahme	
Der denkmalgerechte Ersatzneubau des Fördergerüstes des Forschungs- und Lehrbergwerks „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg	59
D. Bodenstab SCHACHTBAU NORDHAUSEN GmbH	
Praxisbeispiele aus der Betonlogistik im Schachtbau eine fördertechnische Herausforderung	61
T. Ahlbrecht Redpath Deilmann GmbH	

Mechanische Gewinnungsbohrgeräte für den Reef- und Gangerz bergbau	65
M. Trenke Perforator GmbH	
Schachtsanierung Atomforschungslabor Mol mit wiederverwendbarem Fördersystem	75
J. Kölmel, D. Zelienska THYSSEN SCHACHTBAU GmbH	
Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern	83
N. Bertrams BGE Technology GmbH	
Partikelbruch in der Fördertechnik – Prüfmethodik und Simulation mittels Diskrete Elemente Methode	89
M. Denzel Montanuniversität Leoben	
PRomining – Erhöhung der Auslastung von Fördergeräten durch Partizipation an der internetbasierten Plattform-Ökonomie	103
J. Lassen, M. Braun, A. Henning RWTH Aachen University; J. Müller, G. Hoeborn FIR e.V. an der RWTH Aachen	
Rail-Running Conveyors: A disruptive new beltconveying technology	109
S. Ebert, M. Lurie thyssenkrupp Industrial Solutions; Prof. C. Wheeler The University of Newcastle	
Theorie und Praxis eines digitalen Zwillings für optimalen Betrieb und Instandhaltung von Bandanlagen	131
Dr. M. Ziegler J.M. Voith SE & Co. KG, Crailsheim	
Produktentwicklung Mid-Size LHD – Vom LH514 zum LH515i	147
L. Kröger Sandvik Mining & Construction Central Europe GmbH	
Ein Beitrag zur Reduzierung von Arbeitsunfällen mit mobilen Fahrzeugen in der Rohstoffindustrie	157
F. Uth, A. E. Kianfar, M. Sherikar, P. Paehge SPHEROID Technologies	
Potential erneuerbarer Energieerzeugung für die Steine- und Erden-Industrie	169
Dr. C. Weigel, T. Hardebusch TU Clausthal	
Chronik der Fachtagung	193

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Gäste in Clausthal,

Als ich dieses Vorwort schrieb, betrug die Corona-Inzidenz in unserem Landkreis gerade 1767. Das sind Werte, bei denen wir vor einem Jahr gar nicht das Haus verlassen hätten. Was hat sich verändert?

Alles!

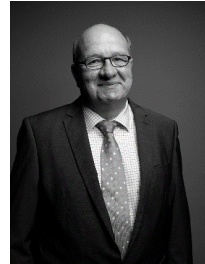
Die Ansteckungsgefahr scheint höher zu sein, doch die tödliche Bedrohung durch die Pandemie ist weitgehend abgeschwächt. Die Menschen sind müde geworden in ihrer Isolation und wollen wieder leben. Insofern freue ich mich, dass wir uns wieder zu einem typischen Clausthaler Kolloquium treffen. Aber auch die Welt verändert sich gerade in großen Schritten. Wenn Sie auf mein Vorwort vor zwei Jahren schauen, finden Sie einen Hinweis auf den 75. Geburtstag der Vereinten Nationen. Ich schrieb damals:

„Persönlich habe ich den Eindruck, dass alle Errungenschaften – vor allem nach dem Ende des kalten Krieges – mit Macht zurückgedreht werden:

- Freihandel wird durch Protektionismus ersetzt,
- humanitäre Hilfe durch Gleichgültigkeit und Abschottung,
- Kooperationen von Staaten durch Austritte aus Gemeinschaften
- Gespräche zur Verständigung durch Hassparolen
- Diplomatie durch Kriegsdrohungen.

Die Welt verändert sich gerade dramatisch und viele unserer althergebrachten Werte mit ihr. Nun kann man anführen, dass sich die Welt und die Werte im Laufe der Jahrhunderte immer verändert haben, um sich den Rahmenbedingungen anzupassen. Das Streben der letzten 75 Jahre war allerdings geneigt die Lebenssituation der Menschen zu verbessern. Ich wage zu bezweifeln, dass die derzeitigen Veränderungen diesem Anspruch gerecht werden.“

Leider ist das vor zwei Jahren Gesagte eingetreten. Und das, obwohl Trump nicht wiedergewählt wurde. Despoten treten die Freiheit mit Füßen und der Welthandel kommt zum Erliegen. Europa rüstet auf und meldet Autarkieziele an. Das hat es in der Geschichte alles schon gegeben. Die Vereinten Nationen sind zu einem Kaffeekränzchen degradiert. Wir alle hoffen, dass es noch zu einem guten Ende kommt, aber die Welt wird völlig anders sein, als sie noch vor ein paar Jahren war.



Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Oliver Langefeld

Was können wir Ingenieure tun?

Auch daran hat sich nicht viel geändert! In jeder Hinsicht ist es wichtig, jetzt die Technologieführerschaft in gewissen Bereichen zu halten oder zu erlangen. Der Mittelstand in Deutschland muss stark bleiben und durch Forschung seitens der Universitäten tatkräftig unterstützt werden. Auch hier wiederhole ich gerne einen Satz von vor zwei Jahren:

„Qualität und Innovation haben sich immer ausgezeichnet und werden auch in Zukunft ein Motor der Wirtschaft sein.“

Für die Fördertechnik, als ein sehr wichtiger und großer Bereich des deutschen Maschinenbaus, ist das von hoher Bedeutung. Aber auch die Aufbereitungstechnik, vor allem im Bereich des Recyclings, wird immer wichtiger und kann ein Innovationsmotor werden. Mit gesteigerten Recyclingquoten lässt sich Europa viel schneller in Richtung der Rohstoffautarkie bringen. Wobei eine vollständige Autarkie vermutlich unmöglich ist. Sicherlich wird aber auch der Bereich Militärtechnik in Zukunft wieder erheblichen Aufwind bekommen, ob man nun dazu steht oder nicht.

Die Hochschulen unseres Landes stehen ebenfalls vor Veränderungen. Mein Wunsch, dass jeder junge Mensch ein ½ Jahr im Ausland verbringen sollte, um ausschließlich Toleranz zu lernen, rückt in noch weitere Ferne. Wie gehen wir mit unseren vielen Kooperationen um? Clausthal hat rund 50 % ausländische Studierende aus über 100 verschiedenen Nationen und sehr viele Kooperationen mit diesen Ländern. Wie werden sich diese freundschaftlichen Bündnisse weiterentwickeln? Für die chinesischen Kooperationen, welche gerade für Clausthal eine große Rolle spielen, sehe ich große Schwierigkeiten.

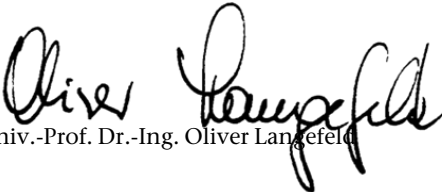
Aber nun zurück zu „unserem“ Kolloquium. Ich freue mich sehr, dass es nach über zwei Jahren wieder stattfinden kann und ich denke, wir haben auch wieder ein attraktives Programm zusammen gestellt. Nach einer Einführung zum allgemeinen Thema Rohstoffe und Politik, sprechen wir über Optimierung und Automatisierung der Fördertechnik, über Bandanlagen und mobile Fahrzeuge in Theorie und aus Erfahrungsberichten.

Ein solches Kolloquium trägt nicht zuletzt dazu bei, den Studierenden die Aufgabenstellungen und Probleme der Bergbauindustrie näher zu bringen. Es kann eine Basis sein, um sich zu treffen, Abschlussarbeiten anzubahnen und abzusprechen und letztlich neue Mitarbeiter beziehungsweise Arbeitgeber näher kennen zu lernen. Das ist sicher für die Industrie und für die Studierenden von besonderem Interesse. Nutzen Sie bitte diese Chance.

An dieser Stelle möchte ich schon einmal allen danken, die an der Vorbereitung und Durchführung dieses Kolloquiums mitgewirkt haben: den Verfassern, den Vortragenden, den Moderatoren und vor allem den Mitarbeitern meines Instituts, insbesondere Frau Sandra Nowosad, M.Sc., die die Organisation in diesem Jahr federführend übernommen hat.

Den Teilnehmern an dieser Veranstaltung danke ich für ihr Interesse und wünsche allen fruchtbare Anregungen und Gespräche.

Mit Clausthaler Glückauf


Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld

Verzeichnis der Aussteller

Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH – Mining Report Glückauf

Epiroc Deutschland GmbH

GDMB e.V.

Georesources Portal

Kiepe Electric GmbH

Sandvik Mining and Construction Central Europe GmbH

Scrapetec Trading GmbH

Verzeichnis der Werbeseiten

Brenk Systemplanung GmbH	22
Clausthal Executive School	52
Epiroc Deutschland GmbH	102
GlobalRock GmbH	82
Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH	32
Kiepe Electric GmbH	64
Redpath Deilmann GmbH	4
RWE Power AG	26
Sandvik Mining and Construction Central Europe GmbH	146
Schachtbau Nordhausen GmbH	58
Thyssen Schachtbau Holding GmbH	74

Rohstoffe für den Klimaschutz

Prof. Dr. W. Frenz

RWTH Aachen University

Der Klimaschutz steht seit dem Klimabeschluss des Bundesverfassungsgerichts (BVerfG) ganz oben. Es sind bereits jetzt anspruchsvolle Minderungsziele zu setzen, damit nicht die jungen Generationen Lasten tragen müssen, die sie nicht mehr zu bewältigen vermögen. Das BVerfG geht von einem tiefgreifenden Umbau von Produkten, Dienstleistungen, Infrastrukturen und aller CO₂-relevanter Betätigungen aus, so auch im Verkehrssektor (BVerfG, Beschl. v. 24.03.2021 – 1 BvR 2656/18 u.a., ECLI:DE:BVerfG:2021:rs20210324.1bvr265618, Rn. 249). Dafür bedarf es der notwendigen Rohstoffe, zum Beispiel für Elektroautos und deren Lithium-Batterien.

Da es für Deutschland vor allem um den Zugang zu Rohstoffen geht, ist näher zu prüfen, wie dieser zu sichern ist. Der erste Ansatzpunkt ist das EU-Kartellrecht mit den Zugangsansprüchen zu „essential facilities“ und Plattformen etwa auch im Rahmen der Digitalisierung. Dafür stehen die Urteile Microsoft I und II sowie aktuell die Beispiele Amazon und Apple Store. Solche unabdingbaren Grundlagen für die Entwicklungen und Produkterzeugungen bilden auch Rohstoffe, zumal für den Klimaschutz.

Das EU-Kartellrecht wirkt für Unternehmen, die im EU-Binnenmarkt tätig sein. Inwieweit lässt sich dem WTO-Recht ein solcher Zugangsanspruch entnehmen? Dieses verpflichtet Staaten. So verhält es sich aber auch mit der Europäischen Menschenrechtskonvention (EMRK). Ihr entnahm der Gerichtshof von Den Haag in seinem Urteil vom 26.05.2021 (Gerichtshof Den Haag, Uitspraak op 26.05.2021 – C/09/571932 / HA ZA 19-379, ECLI:NL:RBDHA:2021:5337) gleichwohl Pflichten für Unternehmen: Shell muss seine CO₂-Emissionen als größerer Emittent als manche Staaten um 45 % bis 2030 im Vergleich zu 2019 reduzieren. Ohne eine solche Verpflichtung von Unternehmen lassen sich nämlich die staatenbezogenen Umweltpflichten aus Art. 8 EMRK praktisch nicht realisieren.

Inwieweit lassen sich Regeln in internationale Abkommen einbringen und festschreiben, welche den Zugang zu den für den Klimaschutz notwendigen Rohstoffe sichern? Im Zuge der Corona-Krise wurde die (ausnahmsweise) Aufhebung des Patentschutzes zugunsten eines besseren weltweiten Impferfolges durch US-Präsident Biden ins Gespräch gebracht. Inwieweit müssen dann auch Staaten seltene Rohstoffe zur Verfügung stellen – und zwar gerade zugunsten von Staaten mit besonderer Vorbildfunktion für den Klimaschutz?

Hier kommt spezifisch für Deutschland der BVerfG-Klimabeschluss ins Spiel. Die internationale Dimension des Klimaschutzgebotes nach dem Umweltstaatsziel des Art. 20a GG verpflichtet insbesondere die Bundesregierung, im Rahmen internationaler Abstimmung (zum Beispiel durch Verhandlungen, in Verträgen oder in Organisationen) auf Klimaschutz hinzuwirken. Die Chancen der Effektivierung nationaler Klimaschutzanstrengungen sind "zugleich in internationaler Einbindung" zu suchen, selbst wenn ein Klimaschutzabkommen einmal nicht zustande kommt (BVerfG, ECLI:DE:BVerfG:2021:rs20210324.1bvr265618, Rn. 201 a.E.).

Damit muss Deutschland auch seine Versorgung mit für den Klimaschutz notwendigen Rohstoffen sicherstellen. Nur so kann es ein Musterbeispiel für den Klimaschutz werden, worauf das BVerfG zielt. Hat Deutschland durch seine ambitionierten Anstrengungen internationales Vertrauen gestärkt, wie es das BVerfG (Rn. 203) postuliert, müsste es ihm besonders leichtfallen, in internationalen Verträgen Klauseln zu verankern oder zu entsprechenden bilateralen Vereinbarungen zu gelangen, welche die Versorgung mit Rohstoffen für den Klimaschutz erfüllen. Dazu besteht dann auch eine entsprechende verfassungsrechtliche Pflicht, welche Deutschland bei seinem Agieren auf internationaler Ebene auch im Hinblick auf die Rohstoffversorgung erfüllen muss.

Ebenfalls auf EU-Ebene muss Deutschland dann darauf einwirken, dass die Versorgung mit Rohstoffen für den Klimaschutz sichergestellt ist. Das gilt vor dem Hintergrund, dass der Europäische Gerichtshof im CETA-Verfahren (EuGH, Gutachten 1/17 vom 30.04.2019, ECLI:EU:C:2019:341) ein gemischtes Abkommen angenommen hat. Dabei sind die Anforderungen auch für Rohstoffvereinbarungen und -klauseln aus EU-Recht einzuhalten, so die Wahrung von Mindeststandards im Umwelt- und Menschenrechtsbereich.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Gretchenfrage, inwieweit mit Staaten Rohstoffabkommen geschlossen werden können, die für den Klimaschutz unverzichtbar sind, wenn dort beim Abbau unabdingbare Umwelt- und Menschenrechtsstandards nicht eingehalten werden. Was geht dann vor – Klimaschutz hierzulande oder Menschenrechte beziehungsweise Umweltschutz in anderen Staaten? Oder welche Mechanismen können entwickelt und implementiert werden, um in anderen Staaten nicht verzichtbare Standards zu wahren? Inwieweit können diese in Klimaabkommen Eingang finden – als unabdingbare Grundlage eines ambitionierten Klimaschutzes?

Diese Fragen stellen sich auch abseits des Klimaschutzes. So sind für die Digitalisierung und andere Entwicklungen Rohstoffe unabdingbar. Am besten wäre die Entwicklung eines Regelwerks für Rohstoffe, welches allen Staaten Zugang gewährt und zugleich für die weltweite Einhaltung von Mindeststandards beim Abbau sorgt. Um dieses auf den Weg zu bringen, könnte Deutschland – wie beim Klimaschutz vom BVerfG vorgegeben – zusammen mit der EU eine Vorreiterrolle spielen. Es könnte durch den Zugang zu eigenen Rohstoffen und Vertragsklauseln für einen umwelt- sowie menschenrechtsgerechten Abbau ein Musterbeispiel bilden und so internationales Vertrauen zu stärken, welches für einen möglichst breiten Rohstoffaustausch und -zugang unabdingbar ist.

Prof. Dr. Walter Frenz
frenz@bur.rwth-aachen.de

RWTH Aachen University
Lehr- und Forschungsgebiet Berg-, Umwelt- und Europarecht
Wüllnerstraße 2
52062 Aachen

Füllort im Schacht,
Slavkalyi Bergewerk Nezhinsky,
Belarus

**ANY MINERAL.
ANY GEOLOGY.
ANYWHERE.**

Seit mehr als 130 Jahren sind wir weltweit im Schachtbau zu Hause und haben über 550 Schächte mit mehr als 230.000 m Tiefe abgeteuft.

Wir sind Mitglied der auf allen fünf Kontinenten tätigen Redpath Gruppe, die zu den globalen Marktführern der „mining contractors“ zählt.

Wir bieten unseren Kunden das komplette Spektrum von der Vor- und Ausführungsplanung über den Bau, Wartung, Umbau und Sanierung bis zur Verwertung an.



REDPATH DEILMANN

REDPATH DEILMANN GmbH

Haustenbecke 1

44319 Dortmund, Germany

Tel.: +49 231 2891 395/396



www.redpathdeilmann.com

Rohstoffpolitik und Bergbautechnik

EITI-Globaler Motor für Good Governance und Blue Mining

Neue Strukturen für Förderländer und Abnehmer

Assessor des Bergfachs F. W. Wagner

Mitglied der MSG D-EITI / Deutschland – Extractive Industries Transparency Initiative / Initiative für Transparenz im rohstoffgewinnenden Sektor – Deutschland

Der internationale Bergbau und die weltweite Rohstoffwirtschaft stehen heute mehr denn je im gesellschaftlichen Focus. Einerseits soll eine ständig gesicherte Versorgung mit Rohstoffen, insbesondere der sog. Verknappungsrohstoffe für Hightech-Produkte und Energiewende sicherstellt werden, andererseits sollen Rohstoffe nachhaltig und sauber gefördert und bereitgestellt werden. Im Umfeld einer solchen globalen Rohstoff- und Politiklandschaft können technologische Lösungen allein diesem Anspruch nicht mehr gerecht werden. Es bedarf neuen Ansätzen, die intermediär sozioökologische und sozioökonomische Modelle nachhaltig mit dem Lebenszyklus der bergbaulichen Vorhaben verbinden, und Synergien für die Zukunft, wie zum Beispiel nach dem Blue Mining Modell von vorneherein einbeziehen.

Die Initiative Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) steht mit Ihren 55 Mitgliedsstaaten und ihrer paritätischen MSG-Struktur heute schon für eine vorbildliche Implementierung von Good-Governance im Kampf für einen weltweiten Bergbau ohne Korruption und Ausbeutung. Die Erweiterung des EITI Standards nach der Weltkonferenz von Paris 2019 zur Erhebung von Sozial- und Umweltdaten hat die Diskussion insbesondere der Aufnahme von Fragestellungen auch zur Energie- und Klimabilanz von Rohstoffvorhaben in den MSG'en vieler Mitgliedsstaaten angestoßen.

Die Verknüpfung von solchen Ansätzen schon im Vorfeld von Rohstoffprojekten mit der konkreten Umsetzung durch moderne Bergbautechnik und nachhaltiger Energie-Effizienz eröffnet völlig neue Perspektiven auf dem Weg zu einer gerechteren und nachhaltigeren Bergbau- und Rohstoffwelt. Die Entwicklung von EITI zu einer zunehmenden Auseinandersetzung mit den Themen eines global auch energetisch nachhaltigen Bergbaus erfordert schon bis zur nächsten EITIWeltkonferenz 2023 Lösungsansätze, die eine Aufnahme in den EITI Standard zulassen.

Dabei spielt auch die ökonomische Umsetzbarkeit solcher Modelle eine nicht zu unterschätzende Rolle, da das EITI Konzept durch die Zusammensetzung der MSG'en gleichermaßen den Anforderungen von Wirtschaft- und Regierungen gerecht werden müssen. Eine Weiterentwicklung von Good Governance Modellen im Sinne des EITI-Standards mit dieser Zielrichtung wird dabei zusätzliche erhebliche strukturelle Veränderungen bei den Anforderungen sowohl

für Abnehmer- wie Förderländer von Rohstoffen bedeuten. Hier sind die bestehenden Erfolge im Good Governance Bereich ein erster starker und belastbarer Pfeiler für einen solchen Prozess.

Die technisch ergonomische Einbindung von Konzepten im Sinne der globalen Aufgaben des Klimawandels erfordert aber weitergehende Konzepte insbesondere von nachhaltigen Energienutzungskonzepten als Nutzungs- und Nachnutzungsmodelle für die Lebenszyklen von Bergwerksbetrieben. Hier bietet unter anderem gerade das Blue-Mining-Konzept für viele Förderländer anpassungsfähige Ansätze für neue ganzheitliche Lösungen in der Zukunft. Die Verknüpfung von solchen Ansätzen schon im Vorfeld von Rohstoffprojekten mit der konkreten Umsetzung durch moderne Bergbautechnik und nachhaltige Energie- Effizienz am Beispiel von EITI eröffnet völlig neue Perspektiven auf dem Weg zu einer gerechteren und nachhaltigeren Bergbau- und Rohstoff-Welt.

Assessor des Bergfachs Friedrich Wilhelm Wagner
info@assdb.de

Hombergstraße 35 f
45549 Sprockhövel

Quo vadis Normung

Unterstützt die Normung die Trends im Bergbau?

J. Lehmann
VDMA Mining

Der Bergbau an sich wie auch die Hersteller von Bergbaumaschinen und -ausrüstungen haben sich sehr herausfordernden Trends zu stellen. Dies betrifft auf der einen Seite Themen aus den Bereichen Automation, Digitalisierung und Interoperabilität sowie auf der anderen Seite auch die Themen alternative Antriebskonzepte, Elektrifizierung / CO₂-Reduzierung. Welche Rolle spielt hier die Normung und wie kann diese, die Entwicklungen positiv beeinflussen oder unterstützen?

Wie ist der Stand der Normung im Bergbau? Es gibt international viele nationale und teils regionale Normen, Standards und Richtlinien, die von Seiten der Hersteller und Betreiber, beachtet werden müssen. Diese Situation ist gerade für Hersteller nicht optimal, da sich hierdurch die Konstruktion von Maschinen und die Gestaltung der Lösungen für Anforderungen sehr stark unterscheiden. Außerdem spielen rechtliche Anforderungen, wie im europäischen Raum die Maschinenrichtlinie, eine große Rolle und beeinflussen die Normung. Erschwerend kommt dann noch die aktuelle Überarbeitung der europäischen Maschinenrichtlinie hinzu, die dazu führt, dass die bestehenden europäischen Sicherheitsnormen überarbeitet werden müssen.

Lösung dieses Problems – Engagement bei der aktiven Erarbeitung von internationalen harmonisierten europäischen Standards für den Bergbau, die international akzeptiert werden.

Wie realistisch ist dieses Szenario? Leider nicht sehr... **Aber...** Es werden genau solche Standards benötigt, um Lösungen für die anstehenden Herausforderungen anbieten zu können.

Die Automation und Digitalisierung im Bergbau benötigen Standards, um nicht hohe Aufwendungen für die Einbindung neuer Maschinen und Systeme zur Integration dieser in die jeweilige vorhandene Systemlandschaft der Betreiber zu erzeugen. Betreiber beklagen schon seit längerem die fehlende Interoperabilität von Maschinen und Systemen. Gerade Interoperabilität stellt einen wichtigen Baustein in der Automation und Digitalisierung dar. Aber, sie ergibt sich nicht von allein. Es werden hierzu Schnittstellen, Referenzarchitekturen, Kommunikationsstandards und Sicherheitsstandards benötigt.

Hierzu hat sich auf internationaler Ebene (ISO) das Gremium „Advanced automated mining systems“ (ISO/TC 82/SC 8) gegründet und sich zunächst der folgenden Themen angenommen:

- Specification of interoperability of teleoperated, autonomous, and manned mining equipment
- Reference framework and architecture for advanced automation and autonomy
- Fleet Management System (FMS) interface
- Remote stop function for mining equipment

Zusätzlich zu diesen Projekten werden gemeinsam mit einem weiteren Normungsgremium drei weitere Projekte bearbeitet.

- Autonomous machine safety
- Collision awareness and avoidance
- Secure high speed mobile data communication

Dies zeigt auch die neuen Herausforderungen in der Normung, es sind nicht mehr Projekte einer einzelnen Branche, sondern es besteht die Notwendigkeit interdisziplinär zusammenzuarbeiten und die Anforderungen gemeinsam zu erarbeiten und festzulegen, über Branchengrenzen hinweg.

Was war der Auslöser für die Gründung dieses internationalen Normungsgremiums (Sub Committee)?

Das Gremium hat sich die Aufgabe gegeben, die Entwicklung von Standards zur Unterstützung der Konstruktion, der Entwicklung und des Einsatzes hoch automatisierter und autonomer Prozesse, Technologien, Ausrüstungen und Systeme im Bergbau voranzutreiben. Es soll hierdurch eine schrittweise Verbesserung im Bergbau in Bezug auf Sicherheit, Produktivität und Kosten im Zusammenhang mit der Einführung und Nutzung innovativer und autonomer Bergbauprozesse, -technologien, -ausrüstungen und -systeme erfolgen. Um die Bergbauindustrie bei der Erreichung der oben genannten Ziele zu unterstützen, ist eine strukturierte und organisierte Entwicklung von Standards für den Bergbau, die Automatisierung und die Autonomie speziell für den Bergbaubereich notwendig. Es sollen Normen und Referenzmodelle erarbeitet werden, um alle Akteure der Branche, die an der Entwicklung von Lösungen und Produkten für das integrierte Bergbau-Gesamtsystem beteiligt sind, anzuleiten und zu unterstützen.

In Verbindung mit der raschen Verbesserung der technologischen Möglichkeiten bietet sich die Gelegenheit, Integrationsmethoden, Automatisierung und Autonomie anzuwenden und zu nutzen, so dass Bergbauunternehmen schrittweise Verbesserungen bei Sicherheit, Produktivität und Kosten erzielen können. Das geplante Normungsprogramm, das sich auf automatisierte und autonome Bergbauprozesse konzentriert, soll einen direkten und großen Nutzen für den technologischen Fortschritt und die Innovation in der Bergbauindustrie haben.

Mit die größte Herausforderung besteht in der Gewinnung der notwendigen Experten zur Bearbeitung der Projekte. Auf nationaler Ebene ist die Gewinnung der Experten auf Grund der geringeren Reisetätigkeiten einfacher. Sobald Auslandsreisen notwendig werden, wird es schwieriger, die Experten für eine Mitarbeit zu motivieren. Die Nutzung von Online-Tools für Sitzungen ist jedoch auch keine optimale Lösung, da bei diesen Sitzungen berücksichtigt werden muss in welchen Zeitzonen sich die Teilnehmer befinden. Im Bergbau sind zum Beispiel die Zeitzonen von Kanada bis Australien abzudecken. Hierdurch ergeben sich keine Zeitfenster bei denen nicht einige der Anwesenden entweder früh morgens oder spät in der Nacht an diesen Sitzungen teilnehmen müssten. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Bearbeitung und Diskussion hierdurch nicht verbessert wird. Allgemein akzeptierte Standards zeichnen sich dadurch aus, dass die Experten gemeinsam die Anforderungen ausführlich diskutieren und abstimmen.

Hinzu kommt, dass nun nicht nur Experten einer Fachrichtung benötigt werden, sondern aus den verschiedenen Bereichen, um diese Standards mit den unterschiedlichen Anforderungen zu entwickeln. Dies zeigt sich insbesondere bei der Entwicklung von Standards bei der Berücksichtigung von alternativen Antrieben bei mobilen Anwendungen. Hier wird die Expertise nun noch aus den Bereichen der Steuerungs- und Elektrotechnik benötigt, sowie die Kenntnis über bestehenden Standards aus diesen Bereichen. Hinzu kommt noch die Berücksichtigung der Rahmenbedingungen für die Einsatzfälle der entsprechenden Maschinen und Systeme. Zudem zeigt sich auch, dass der Einsatz neuer Lösungen in einigen Bereichen durch bestehende Normen ausgeschlossen wird. Hier wird von Seiten der Hersteller nach Lösungen gesucht, wie eine Anpassung der Norm die Sicherheitsanforderungen bei dem Einsatz der neuen Lösungen in gleicher Weise berücksichtigt, ohne dass das Sicherheitsniveau abgesenkt wird.

Welche Trends sind erkennbar? Die Bedeutung der nationalen Normung im Bergbau nimmt ab, dafür gewinnt die internationale Normung einen immer höheren Stellenwert. Die europäische Normung im Bergbau kämpft mit dem Rückgang an Ländern, die aktiv mitarbeiten, und einem gleichzeitigen Sinken der Bereitschaft, aktiv die Projekte voranzubringen. International werden die Projekte nun stark aus Nord- und Südamerika, Südafrika und Australien getrieben. Hier zeigt sich, wo die Märkte des Bergbaus liegen. Wichtig für die Zukunft wird es sein, die bestehende Expertise zu nutzen und in die Normungsprojekte einzubringen. Made in Germany hat im Bergbau immer noch einen hohen Stellenwert. Durch die Normung kann dies entsprechend unterstrichen werden.

Jörn Lehmann

joern.lehmann@vmda.org

VDMA e.V.

– VDMA Mining –

Lyoner Strasse 18

60528 Frankfurt am Main

Optimierung der Logistik unter Tage mit Einsatz von mathematischen Lösungsverfahren

Dr. M. Schulze, D. Marx
K+S Aktiengesellschaft

Abstract

Das Transportwesen der Grube Zielitz stellt eine komplexe Planungsaufgabe mit dem Ziel, die eingesetzten Kapazitäten – hier Mitarbeiter und Fahrzeuge – effizient einzusetzen, dar. Die Minimierung von Fahrwegen und Leerfahrten unterstützt dabei wesentlich die Einhaltung der Arbeitsplatzgrenzwerte und leistet einen deutlichen Beitrag zur ressourcenschonenden Transportlogistik. Zur Lösung des Planungsproblems müssen die Kapazitäten der Transportfahrzeuge, die Transportbedürfnisse in den verschiedenen Bereichen sowie die Entfernungen zwischen Be- und Entladepunkten berücksichtigt werden. Im Rahmen einer Forschungs-kooperation wurde für den Standort ein mathematischer Optimierungsansatz entwickelt, der in das bestehende Betriebsführungssystem integriert werden konnte und eine Erzeugung von Tourenplänen ermöglicht.

1 Grundlagen Transportwesen Zielitz

Die grundsätzliche logistische Anbindung des Grubenbetriebes Zielitz erfolgt über einen Schacht mit 7,5 m Durchmesser. Dieser dient, neben dem gesamten Personentransport im Regelbetrieb, der Versorgung mit Betriebsstoffen, Ersatzteilen und weiteren Gütern. Abbildung 1 zeigt richtungsabhängig den Güterstrom.

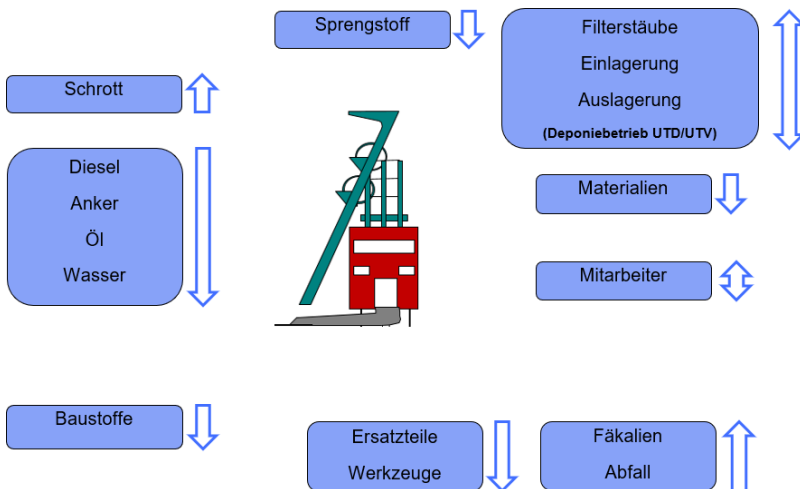


Abbildung 1: Übersicht des Güterstroms

Logistisch stellt dieser Schacht somit die Verbindung für den gesamten Materialumschlag zwischen über Tage und der Grube dar und bildet aufgrund seiner Auslastung einen systemkritischen Engpass als Versorgungsschacht.

Die Rohsalzförderung erfolgt über einen weiteren Schacht und kann bei dieser Betrachtung außer Acht gelassen werden.

Das Grubenfeld umfasst aktuell eine Fläche von 60,1 Quadratkilometern. Die Hauptausrichtung erfolgt dabei nach Westen. Dies bedeutet auch, dass die zu überwindenden Entfernungen in Bezug auf den Versorgungsschacht stetig anwachsen. Dies musste in der Vergangenheit mit steigendem Technik- und Personalaufwand kompensiert werden.

Ein komplementärer Ansatz stellt die Optimierung des Versorgungsprozesses unter vorhandener Ressourcenlage dar. Hierbei ist nicht nur die Anzahl der Transporte pro Schicht (Abbildung 2) ausschlaggebend. Die in den letzten Jahren durch die EU definierten Umweltfaktoren¹ sind ebenso zu berücksichtigen. So spielt die Verbrennung fossiler Treibstoffe, hier Diesel, eine maßgebliche Rolle bei der Einhaltung geltender Arbeitsplatzgrenzwerte.

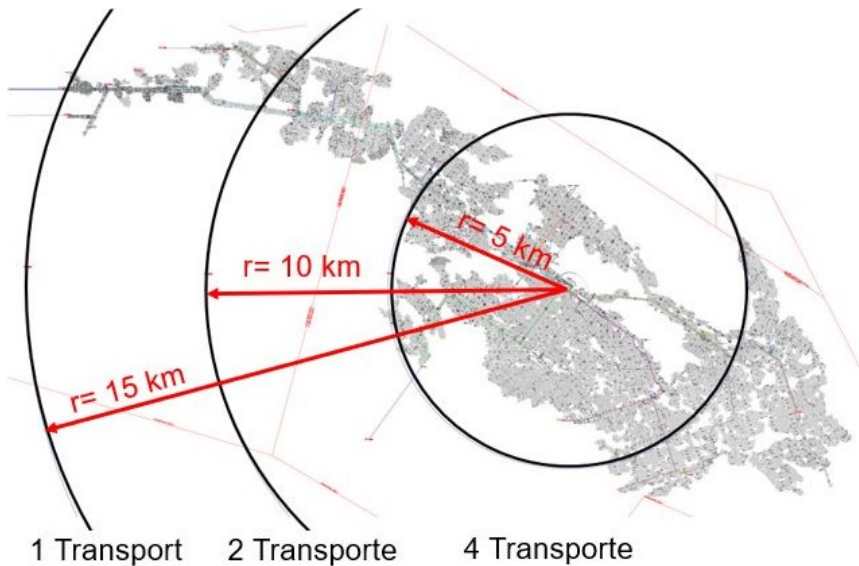


Abbildung 2: Transportleistung pro Schicht und Grubenausdehnung

¹ Hier seien insbesondere die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 402, 554 sowie 900 zu nennen.

Die allgemeinen Anforderungen an eine grubenweite Logistik lassen sich somit wie folgt zusammenfassen:

1. Wirtschaftliche Abbildbarkeit
2. Ressourcenschonender Einsatz von Personal, Technik und Betriebsstoffen
3. Transparente, definierte und sichere Prozesse
4. Gewährleistung und Maximierung der Versorgungssicherheit

2 Pilotprojekt Diesel-Logistik

Aufgrund der nachfolgend genannten, sehr speziellen Herausforderungen wurde in der Grube Zielitz zunächst ein Pilotprojekt realisiert, um die grundsätzliche Machbarkeit unter den genannten Anforderungen nachfolgender Projekte zu gewährleisten.

Insbesondere der Gewinnung von Informationen im laufenden Prozess kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Einschränkend sind dabei zu nennen:

- keine Positionsbestimmung von Fahrzeugen, Transportgütern und Personen (wie beim GPS)
- keine permanente Datenanbindung von IT-Werkzeugen möglich (wie im Mobilfunk/WLAN)
- kaum nutzbare Geodaten zur Entfernungsberechnung (wie OpenStreetMap)
- keine fertige Softwarelösung (ähnlich marktüblicher Dispositionssoftware)
- erschwerte Kommunikation während des Transportvorgangs

Inhalt des Pilotprojektes sollte es sein, die Versorgung der Grube mit Dieseldieselkraftstoff zu analysieren und Potentiale zur Optimierung abzuleiten.

Die Eckdaten zum vorhandenen Prozess sind:

- 25 Tankstellen auf 60,1 km² verteilt (Abbildung 3 zeigt eine typische Tankstelle)
- Kapazitäten dieser Tankstellen von 4.000 - 10.000 l
- 6,1 Mio. Liter Dieseldieselverbrauch pro Jahr
- Transportfahrzeuge vom Typ Taurus
- 9 Abroll-Dieseldieselcontainer



Abbildung 3: Reviertankstelle (RTS) 13 Grube Zielitz

Das Ziel des Pilotprojektes bestand darin, den Aufwand zur Versorgung der Tankstellen in Bezug auf die gefahrene Strecke zu reduzieren. Daraus resultierte auch eine Reduktion des Personaleinsatzes. Dazu war es nötig, den Zustand vor Projektbeginn als Referenz zu erfassen, um spätere Maßnahmen bewerten zu können. Zu diesem Zweck fand eine Ermittlung der Anzahl der Befüllungen pro Tankstelle statt.

Basierend auf diesen Vorbereitungen wurden folgende Maßnahmen zur Prozessoptimierung ergriffen:

1. Ausstattung der Tankstellen mit Füllstandsüberwachung (Sensoren)
2. Visualisierung der Daten
3. Schwellwert-Vorgaben für jede Tankstelle (Trigger für Anfahrt)
4. Sinnvolle Clusterbildung von Tankstellen
5. Computergestützte Auftragsgenerierung zum Ausfahren inkl. Route

Wie in Abbildung 4 zu erkennen, konnten die Befüllungshäufigkeit pro Monat um circa 60 % gegenüber dem gemittelten Referenzwert (Juli 16 – Januar 17) reduziert werden.

Im Kontext zur Optimierung der oben genannten Clusterbildung und der zu fahrenden Route, war es notwendig, ein digitales Streckennetz zu entwickeln und zu etablieren (Abbildung 5 zeigt das Streckennetz inklusive der Standorte der Tankstellen). Dies ermöglicht es, computergestützte Tourenplanungen durchzuführen.

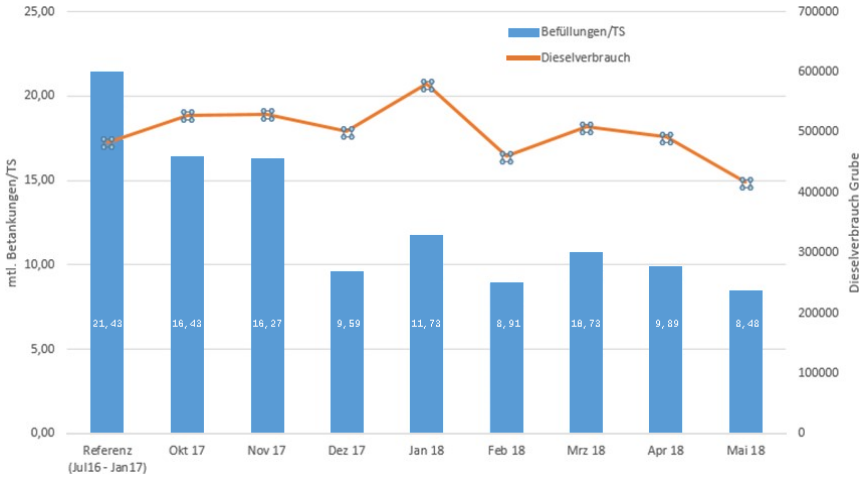


Abbildung 4: Durchschnittliche Befüllungen pro TS

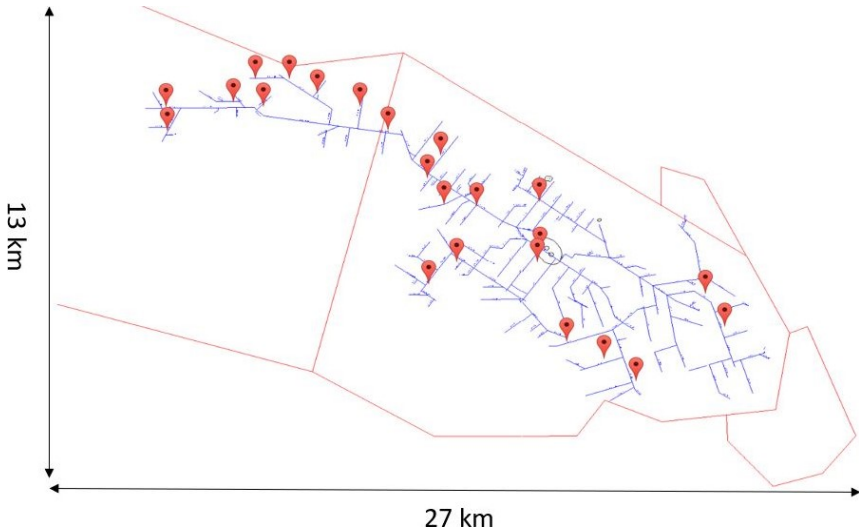


Abbildung 5: Schematische Darstellung digitales Streckennetz

Das Pilotprojekt war somit erfolgreich und gab Anlass für weitere logistische Optimierungen. Es musste davon ausgegangen werden, dass sich auch in anderen Teilbereichen derartige Effekte heben lassen. Auch zeigte sich, dass das Personal für computergestützte Arbeitsvorschläge sensibilisiert werden konnte.

3 Optimierung der grubenweiten Transportlogistik

In einem nächsten Schritt hin zur ganzheitlichen computergestützten Optimierung der Transportlogistik wurden zunächst rein containerbasierte Transporte betrachtet (Abbildung 6 zeigt einen Transport eines Abrollcontainers mit Neureifen).



Abbildung 6: Beladener Abrollcontainer mit Neureifen

Im Fokus standen hierbei somit die An- und Ablieferung von leeren beziehungsweise vollen Abrollcontainern, die grubenweit zu verschiedenen Zwecken benötigt werden. Darauf aufbauend wurde in der nächsten Phase der Transport von weiteren Materialien (Schütt- und Stückgüter) abgebildet. Im Zuge dieser Betrachtung musste auch das digitale Streckennetz erweitert werden, da die im Rahmen des Pilotprojektes betrachteten Standorte der Tankstellen nun nicht mehr ausreichten. Folglich musste eine Vielzahl von möglichen Be- und Entladepunkten mit den entsprechenden Verbindungen in das Streckennetz integriert werden. Zur Unterstützung der Lokalisierung und damit verbundenen Erhöhung der Datenqualität wurden zudem Abrollcontainer mit RFID Transponder versehen, die über einen zentral installierten Empfänger am Ein- und Ausgang des Seilfahrtsschachtes eine Ortung ermöglichen. Zusätzlich gestattet diese Installation eine vollautomatische Statusänderung von bestehenden Transportaufträgen und entlastet somit spürbar die manuelle Datenpflege. In nachfolgender Tabelle 1 sind zusammenfassend einige Kennzahlen dargestellt, die erkennen lassen wie sich der Ansatz der Optimierung der Transportlogistik vom Prototypen der Diesel-Logistik hin zu einer erweiterten Betrachtung entwickelt hat.

Tabelle 1: Skalierung der Ansätze

	Prototyp Diesel-Logistik	Grubenweite Transportlogistik
Anzahl Fahrzeuge	4	26
Anzahl Mitarbeiter	4	17
Anzahl Abrollcontainer	9	528
Anzahl Materialarten	1	101
Streckennetz (Anzahl Punkte / Anzahl Strecken)	< 70 / < 200	2050 / 2198

4 Auftragsmanagementsystem

Mit dem im Rahmen des Projektes zunehmenden Umfang musste auch eine EDV-gestützte Handhabung des Transportgeschehens einhergehen. Hierzu wurde ein Auftragsmanagementsystem (Abbildung 7) etabliert, das eigens zum Anlegen, Bearbeiten sowie Rapportieren von Transportaufträgen entwickelt wurde und in das bestehende Betriebsführungssystem (BFS) eingebettet werden konnte. Auch auf organisatorischer Ebene wurde mit der Schaffung einer Logistikwarte, die im 3-Schicht-Betrieb besetzt ist, die Basis für eine ganzheitliche Transportlogistik gelegt.

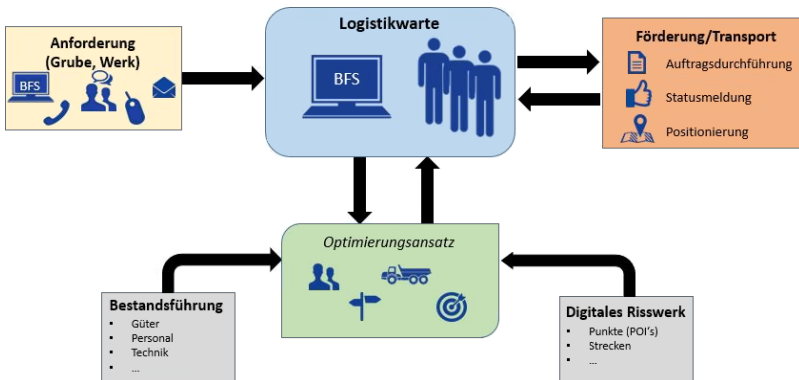


Abbildung 7: Auftragsmanagementsystem

Im Rahmen einer Forschungsk Kooperation mit dem Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre und Unternehmensforschung der TU Clausthal wurde ein Optimierungsansatz entwickelt, der mittels einer Schnittstelle in das Auftragsmanagementsystem integriert wurde. Der Ansatz ermöglicht eine automatisierte Erzeugung von Tourenplänen für die kommende Arbeitsschicht. Die Optimierung hat dabei zum Ziel, möglichst viele Transportaufträge pünktlich durchzuführen und dabei die eingesetzten Kapazitäten, hier Mitarbeiter und Fahrzeuge, so effizient wie möglich einzusetzen. Insbesondere die dadurch verfolgte Minimierung von Fahrwegen und Leerfahrten unterstützt uns zusätzlich bei der Einhaltung der Arbeitsplatzgrenzwerte.

Aus wissenschaftlicher Sicht handelt es sich in unserem Fall um ein spezielles Tourenplanungsproblem. Diese Art von Problemen gehören zur Klasse der kombinatorischen Optimierungsprobleme [2]. Unter der Tourenplanung wird im Allgemeinen ein Planungsvorgang verstanden, bei dem Transportaufträge zu Touren gruppiert und in eine Reihenfolge gebracht werden. Dabei wird in der Regel eine Tour von einer Person und einem Fahrzeug durchgeführt. Dieser Planungsprozess ist in allen Bereichen bedeutend, in denen eine Vielzahl von Aufträgen und Touren geplant werden muss. Beispiele für typische Tourenplanungsprobleme sind die Belieferung von Filialen, der Einsatz von Servicepersonal, die Abholung von Post, die Personenbeförderung und die Mülleinsammlung. Ein Transportauftrag besteht meist darin, eine bestimmte Anzahl Einheiten eines Gutes von einem Start zu einem Ziel zu bringen. Für die Tourenplanung ergeben sich daraus die folgenden beiden Teilprobleme:

- Clusterung (Zuordnungsproblem): gibt an, welche Aufträge zu einer Tour zusammengefasst werden
- Routing (Reihenfolgeproblem): definiert, in welcher Reihenfolge die Punkte innerhalb einer Tour bedient werden.

Zielsetzung einer Tourenplanung ist zum Beispiel die Minimierung der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge, der zurückgelegten Strecke, der Einsatzzeit, des NO_2 -Ausstoßes oder einer komplexeren Kostenfunktion. Beim Standardproblem der Tourenplanung liegen alle Start- oder Zielpunkte in einem Depot und es steht dort eine begrenzte oder unbegrenzte Zahl von identischen Fahrzeugen mit beschränkter Kapazität zur Verfügung. In der Realität wird die Aufgabenstellung noch durch viele weitere Restriktionen erweitert. Beispielsweise betrachtet man mehrere Depots, einen heterogenen Fuhrpark oder Vorrangbeziehungen zwischen Aufträgen. Eine andere mögliche Zusatzaufgabe ist die Betrachtung von Zeitfenstern, innerhalb derer ein Fahrzeug beim Kunden eintreffen muss, um die von einem Zeitfenstermanagement vergebenen oder gebuchten Slots einzuhalten. Die zu lösende praktische Problematik der Tourenplanung wird aufgrund der eben aufgeführten zusätzlichen Restriktionen im Allgemeinen zu umfangreich sein, um mit exakten mathematischen Verfahren kombinatorisch (zum Beispiel durch eine vollständige Enumeration aller Möglichkeiten) lösbar zu sein. In diesen Fällen kommen meist sogenannte heuristische Verfahren zum Einsatz, die zwar nur suboptimale Ergebnisse liefern, deren Qualität jedoch für die Praxis ausreichend ist. Zur Lösung des grundlegenden Problems stehen Algorithmen (Eröffnungsverfahren) zur Verfügung, die Anfangslösungen erzeugen. Mit Verbesserungsverfahren wird dann getestet, wo und wie sich die Anfangslösung noch verbessern lässt [2]. Eine detaillierte Beschreibung des für unsere Problemstellung der untertägigen Transportlogistik entwickelten Lösungsverfahrens kann in [1] gefunden werden.

5 Praktische Umsetzung

Das im vorangegangenen Abschnitt erläuterte Auftragsmanagementsystem wurde in einer ersten Version bereits Anfang 2020, nach erfolgter Schulung der Kollegen der Logistikwarte, produktionsunterstützend eingesetzt. In nachfolgender Abbildung 8 ist zu erkennen, wie sich die Anzahl der durch das Auftragsmanagementsystem erfassten Transporte (vergleiche „*Transporte im BFS*“) über die Zeit entwickelt hat. Hierbei ist festzuhalten, dass der Verlauf mit der stufenweisen Weiterentwicklung einhergeht. Zu Beginn des Jahres 2020 wurden noch rein containerbasierte Transporte abgebildet. Mit zunehmender Mächtigkeit des Auftragsmanagementsystems wurde es möglich, das gesamte Transportgeschehen in Bezug auf Güter und Transporttechnik abzubilden. Neben saisonalen Effekten (Krankenstände, Betriebspausen) haben wir mittlerweile ein sehr stabiles Niveau von circa 1100 Transporten pro Monat.

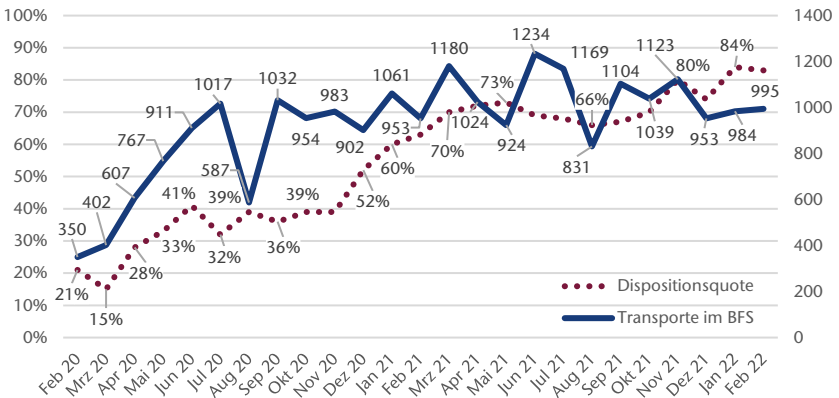


Abbildung 8: Kennzahlen

Abbildung 8 zeigt zudem die Kennzahl *Dispositionsquote*, die sich als Quotient aus der durch das Auftragsmanagementsystem optimierten Anzahl durchzuführender Transporte und der Gesamtzahl der Transporte definieren lässt. In der Grafik ist deutlich zu erkennen, dass die Dispositionsquote in den vergangenen beiden Jahren stetig angestiegen ist, was in der immer weiter optimierten Systemstabilität als auch in der zunehmenden Akzeptanz der Mitarbeiter begründet ist. In der aktuellen Phase hat sich die Kennzahl bei über 80 % eingependelt, was ein sehr gutes Ergebnis für alle Projektbeteiligten darstellt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine Dispositionsquote von 100 % nur schwer erreichbar ist und damit auch nicht als Zielwert in Frage kommt, was im Wesentlichen an den schwer antizipierbaren Transportbedarfen liegt, die während der Schicht operativ entstehen.

Die für einen Mitarbeiter für eine Schicht durch das Auftragsmanagementsystem vorgeschlagene Anzahl durchzuführender Transporte variiert zwar in Abhängigkeit von der jeweiligen Transportlast, ist aber über die letzten Monate bei durchschnittlich sechs bis neun Transportaufträgen einzustufen. Einen Auszug aus einem konkreten Arbeitsauftrag, der für den Mitarbeiter die durchzuführenden Transportaufträge in der Schicht angibt, ist in der nachfolgenden Abbildung 9 zu sehen.

K+S Gruppe
Werk Zielitz

Transportauftrag
Ressort: Förderung/Transport



Seite: 1 / 1

Auftragnehmer:		Schicht: M		
Fahrzeug: Taurus29		Standort: AP Absicherung / 1-11 E-07 n.W		
Nr	Ort	Tätigkeit	Ladungsträger	Material/Fracht
1	WP Absicherung / 1-11 E-07	Start		
2	AP Absicherung / 1-11 E-07 n.W	Fahrzeug+TD		
3	AP Transport / 1-11 E-12^	aufnehmen(P)	IBC 1	
4	Schacht #2 / nördl. Zufahrt	positionieren		
5	Schacht #2 / südl. Füllort^ <i>Bemerkung: rote Kiste</i>	aufnehmen(P)	Magazin 5	
6	Schacht #2 / nördl. Zufahrt	liefern		Magazinmaterial,4VPE
7	AP ZAP / 1-12 E-02^	aufnehmen(P)	ZAP P4	
8	Schacht #2 / nördl. Zufahrt	liefern		Müllcontainer (voll),2Stk
9	Schacht #2 / südl. Füllort <i>Bemerkung: Dieseltour</i>	aufnehmen(P)	DK4	
10	Schacht #2 / nördl. Zufahrt <i>Bemerkung: Dieseltour Ende</i>	positionieren		
11	Laugengroßbehälter / 1-11 E-11	aufsatteln(P+M)	(Edelstahl4;Edelstahl5) Lauge	
12	21-08 E-55	positionieren		Lauge
13	KFZ Elektrik^	aufnehmen(P)	USA53	
14	KFZ GG	liefern		BM-Arm,1Stk
15	Magazin (0300) / Querschlag 2^	aufnehmen(P)	Magazin 2	
16	Schacht #2 / nördl. Zufahrt	positionieren		
17	WP Absicherung / 1-11 E-07 <i>Bemerkung: Fahrweg(im): 57863</i>	Ende		
18	Magazin (0300) / Querschlag 2 <i>Bemerkung: rote Kiste</i>	liefern+aufnehmen(P)	Magazin 4	Magazinmaterial,4VPE
19	TS 12 / 7-23 S-14 <i>Bemerkung: Dieseltour</i>	liefern+aufnehmen(P)	DK4	Diesel,4500l
20	TS 07 / 6-19 N-12 <i>Bemerkung: Dieseltour</i>	liefern+aufnehmen(P)	DK4	Diesel,2220l
21		Pausenstart+Pausenende		
22	AP Transport / 1-11 E-13	positionieren+aufnehmL3P)		

Abbildung 9: Tourenplan eines Mitarbeiters

Zum Tourenende meldet der Mitarbeiter den Status der einzelnen Transportaufträge an die Logistikwarte. Hier wird das Auftragsmanagementsystem mit diesen Informationen aktualisiert, sodass die kommende Arbeitsschicht einen integren Datenbestand vorfindet und ein neuer Planungslauf gestartet werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit aktuellem Stand des Projektes konnte gezeigt werden, dass auch unter den schwierigen Rahmenbedingungen in einer untertägigen Grube das Transportgeschehen EDV-gestützt abgebildet und in mehreren Stufen optimiert werden konnte.

In weiteren Phasen gilt es nun, insbesondere folgende Aspekte zusätzlich zu integrieren, um eine ganzheitliche Betrachtung der Werkslogistik zu berücksichtigen:

- Umgang im Auftragsmanagementsystem mit während der Schicht aufkommenden dringenden Transporten
- Anbindung des Teilsystems „Über Tage“, um vor- oder nachgelagerte Prozesse einfließen lassen zu können
- Machbarkeitsstudie einer mobilen Anwendung, um mittels geeigneter Endgeräte einen noch effizienteren Prozess in Verbindung mit einer hohen Datenqualität zu realisieren.

Aus Unternehmensperspektive kann zudem eine Skalierbarkeit des Systems auf weitere Standorte der Gruppe untersucht werden, um auch dort mögliche Synergien zu heben.

7 Quellen

- [1] Beckmann, A.; Zimmermann, J. (2022): Multi-start Heuristics for Unit-Capacity Orienteering Problems, noch nicht veröffentlicht, eingereicht bei: Operations Research Proceedings 2021
- [2] Heiserich, O.-E.; Helbig K.; Ullmann, W. (2011): Logistik. Eine praxisorientierte Einführung. 4. Aufl., Wiesbaden, 2011

Dr. Marco Schulze

marco.schulze@k-plus-s.com

K+S Aktiengesellschaft
Bertha-von-Suttner-Straße 7
34131 Kassel

Daniel Marx

daniel.marx@k-plus-s.com

K+S Minerals and Agriculture GmbH
Farsleber Straße 1
39326 Zielitz



Bergbau-Dienstleistungen

Berater - Planer - Qualitätssicherer - Fachgutachter



Vor- & Nachsorge

Umweltschutz
Immissionsschutz
Strahlenschutz
NORM
Sanierungskonzepte
Langzeitsicherheit



Betriebe

Tagebaue
Bergwerke
Versatzbergwerke
UTDs
Endlager



Planung & Optimierung

Logistik
Betriebsabläufe
Prozessoptimierung
Systembetrachtung



Investition & Genehmigung

Machbarkeitsstudien
Kostenmodelle
Betriebspläne
Genehmigungen
Verwaltungsverfahren



Unterstützung und Optimierung der Planungs- und Förderprozesse mit Hilfe von 3D-Modellen in den Tagebauen der RWE Power AG

M. Wolters, T. Bauer, C. Schmitt, C. Winkler
RWE Power AG

Die Planung und Steuerung der drei Braunkohlen-Tagebaue der RWE Power AG im Rheinland ist eine komplexe Aufgabe. In den vergangenen Jahrzehnten wurden Systeme entwickelt, mit denen sowohl die operativen Betriebe zeitaktuell dargestellt sowie auf deren Basis die Planungsprozesse gesteuert werden können. Die Daten werden unter anderem als Grundlage für die kurz- und langfristige Einsatzplanung (Geräteinsatzsteuerung) und der Tagebauentwicklung genutzt. Die Daten fließen in die markscheiderische Erfassung und Vektorisierung der Tagebaumodelle ein. Im Vortrag wird zudem vorgestellt, wie die Genese der Digitalisierung der Materialflussverfolgung erfolgte und genutzt wird.

1 Einleitung und Motivation

Anhaltender Wettbewerbsdruck zwingt die RWE Power AG ihre, für die Planung und den Betrieb der Tagebaue notwendigen Prozesse, kontinuierlich weiter zu digitalisieren, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Ziel ist es, dem Markt weiterhin eine preiswerte, hoch verfügbare und damit sichere Versorgung mit Strom zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig werden die behördlich geforderten und weitere Qualitätsanforderungen durchgängig eingehalten.

Mit Hilfe der hier vorgestellten betriebsunterstützenden Systeme, wurden die zentralen Prozesse zur Planung und dem Betrieb der Tagebaue erheblich verschlankt. Die Planung der Großgeräteeinsätze, die Disposition von Kohlen und Abraum, die Erfassung des Betriebsfortschrittes und die Erstellung der Tagebau Aufmaße wurden effizienter.

Die Einsatzzeiten der Großgeräte werden durch die Systeme weiter optimiert. Der Personalbestand konnte angepasst werden.

2 Planungsprozess

Bevor ein Tagebau aufgeschlossen wird, werden Erkundungsbohrungen in einem für die Lagerstättenerkundung erforderlichen Raster durchgeführt. Die Lage und Beschaffenheit der verschiedenen Horizonte wurden bestimmt, um die Werthaltigkeit zu ermitteln. Im rheinischen Revier steht eine Kartografie in ausreichender Güte für die Erschließung der Kohle zur Verfügung.

Die Daten der Lagerstätte werden zu einem Geländemodell verarbeitet. Zwischen den Messpunkten wird interpoliert. Es entsteht in erster Iteration ein aussagefähiges Geländemodell, welches für den Aufschluss des Tagebaus und die Verlaufsplanung herangezogen wird.

Das Geländemodell wird in der nächsten Detaillierungsstufe in ein präziseres Planungssystem (Abkürzung LAVA, Lagerstätten-Verwaltung und Auswertung) überführt. Darin werden für jedes Großgerät Einsatzpläne generiert und digital dem Anwender bereitgestellt. Die Einsatzpläne enthalten die für den Betrieb notwendigen Informationen.

3 Durchführung und IST-Erfassung

Durch eine kontinuierliche Ermittlung der Schaufelradpositionen der Schaufelradbagger auf der Gewinnungsseite und der Position der AbwurfAusleger der Absetzer auf der Verkippungsseite mittels Satellitentechnik, sowie der Ermittlung der Kippenoberfläche mittels Laser-/Radarscanner, wird ein zeitaktuelles, dreidimensionales Modell der Bereiche Gewinnung und Verkippung des Tagebaues aufgebaut. Das dazu verwendete System beziehungsweise der Zusammenschluss aus drei Systemen lautet **SAMASA** (SABAS, MAFLU, SATAS) und ist das zentrale Betriebsführungssystem des Tagebaus.

In dem System **SABAS** (satellitengestützte Baggereinsatz Steuerung) wird ein dreidimensionales Modell der Gewinnungsseite aufgebaut und der Arbeitsfortschritt ständig aktualisiert. Das System erhält außerdem den von der Planung bereitgestellten Geräteeinsatzplan. Es werden dem Großgeräteführer die erforderlichen Abstände zwischen dem Ist- und Plangelände berechnet und angezeigt. Weiterhin werden markante Bereiche im Gebirge (z. B. Brunnen) kenntlich gemacht. SABAS ist mit seinem Datenbestand auch Stützpfiler für die Teilautomation der Großgeräte.

In gleicher Weise wie das SABAS System für Bagger, wird das **SATAS** (Satellitengestützte Absetzereinsatz Steuerung)-System auf der Absetzerseite verwendet. Als Grundlage dient ein Kippenmodell, welches auf Basis der Positionsinformationen der Abwurftrammel eines Absetzers und der geförderten Massen, ständig aktualisiert wird.

Die Güte der Modellierung des verkippten Materials wird durch Laser-/Radarscanner auf den Absetzern erhöht. Es fließen die detektierten Veränderungen vor Ort in die Modellierung mit ein. So kann die betriebliche Disposition mit ausreichend präzisen und zeitaktuellen Daten arbeiten und die operativen Belange erfüllen.

Aus der Planung wird die Sollvorgabe in das Kippenmodell übernommen und dargestellt. Der Absetzerführer erhält eine dreidimensionale visuelle Unterstützung zur Umsetzung der Kippvorgaben. Die Positionsdaten des Absetzers sind unter anderem Grundlage für die Teil-Automation des Verkippungsbetriebes.

Die Verbindung zwischen der Gewinnung und Verkipfung sind die Bandanlagen. Sie werden über das Materialflusssystem MAFLU (Materialflussverfolgung) digital abgebildet. Die gewonnenen Daten der geförderten Schüttgüter werden zeitaktuell durch das System SABAS in das Transportmodell MAFLU gegeben. SABAS erhält die Daten und verwendet sie bei der Verkipfung. Es werden auch Daten zur Anlagen- und Prozessdiagnose mit den folgenden Funktionen ausgetauscht:

- Beladung/Time Tracing (aktuelle und historische Zurückverfolgung der Fördersituation)
- Transportanzeige für den Absetzerführer
- Bestimmung von massen- und volumenbezogenen Rest- und Fehlmengen auf den Bandanlagen)

Als weitere Unterstützung für die übergeordnete Steuerung und Disposition dient der SAMASA-Büroclient zur Anzeige der im gesamten System SAMASA verarbeiteten Daten. Hiermit können aktuelle (15 min) 3D Bilder des Tagebaus, sowie die Positionen der Großgeräte im internen IT-Netz oder auf mobilen Geräten angezeigt werden.

4 Übertragung IST-Erfassung in Planungsstand

Das durch die Gewinnung und Verkipfung in SAMASA erzeugte 3D Gelände wird auch zu Punktflächen weiterverarbeitet und an das System ATAMO (automatisiertes Tagebaumodell) übertragen, welches in der Markscheiderei genutzt wird. ATAMO bildet automatisiert den aktuellen Geometriestand des Einsatzgebietes eines Baggers oder Absetzers als technische Fläche ab. Dazu verwendet es als initiale Grundlage die Luftbilddauswertung der regelmäßigen Befliegungen. Die SAMASA-Punktflächen werden manuell vektorisiert und Bruchkanten erzeugt. Datenlücken können z. B. mit Aufmaßdaten geschlossen werden. Die erstellten und teilweise bearbeiteten Flächen werden über einen WFS (Web Feature Service) dem Planungstool LAVA zur Verfügung gestellt. Dadurch können erstens die Restmassen in den bestehenden Geräte Einsatzplänen genau bestimmt und für die tagesscharfe Disposition von Material auf der Kippe oder Kohlebereitstellung verwendet werden. Zweitens wird das bestehende LAVA Geländemodell für die weitere Planung von Geräte-Einsatzplänen aktualisiert.

Dipl. Ing. (FH) Marc Wolters

marc.wolters@rwe.com

RWE Power AG
Technik Braunkohle
Elektrotechnik - Digitaltechnologie
Am Tagebau
52382 Niederzier



RWE

Weltweit tätig, mit dem Herzen in der Region.

Wir vergessen nicht unsere Wurzeln, auch wenn wir weltweit in den Ausbau erneuerbarer Energien investieren – für eine sauber, sichere und bezahlbare Energieversorgung. Voller Energie sind wir auch in Zukunft ein verantwortungsvoller Partner für die Menschen vor Ort. Die neue RWE. Klimaneutral bis 2040.

[rwe.com](https://www.rwe.com)

Automatisierungsprojekte und Assistenzsysteme zur Effizienzsteigerung des Bunker- und Großgerätebetriebs in den Tagebauen der RWE Power AG

N. Stamm

RWE Power AG

Seit Mitte der neunziger Jahre werden bei der RWE Power AG die Förderanlagen in aufeinander aufbauenden Projekten automatisiert. Die neuen Systeme tragen nennenswert dazu bei, dass die geringer werdende Belegschaft kompensiert wird und die Kosten sinken. Beginnend mit den Kohlebunkern wurden mit den am Markt immer leistungsfähigeren technischen Möglichkeiten, auch Teile der Bagger und Absetzer automatisiert.

Darüber hinaus befinden sich Assistenzsysteme im Praxisbetrieb und werden noch installiert, die das Bedienpersonal entlasten und zur weiteren Steigerung der Effizienz beitragen. Hierbei spielen Videoassistenzsysteme aktuell eine dominierende Rolle.

1 Einleitung und Motivation

Weiterhin anhaltender Wettbewerbsdruck, insbesondere durch den Umbau des Energiesektors und dem Braunkohlenausstieg, zwingt die RWE-Power AG ihre Prozesse kontinuierlich 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 Tageszeit abhängige regenerative Stromerzeugung aus Wind und Sonne zu ergänzen.

Ohne die Automatisierungsvorhaben der letzten 20 Jahre, wäre ein sozial-verträglicher Personalabbau zur Reduzierung der Fixkosten und damit der Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit der Braunkohlenverstromung nicht möglich gewesen. Wesentliches Ziel dabei ist, neben der Personalkostenreduzierung, die Vergleichsmäßigung der Förderprozesse auf Basis der Betriebsführungssysteme und den Geräteautomatisierungen, um Überlastungen zu verhindern und den Verschleiß zu reduzieren.

Gespiegelt an der verbleibenden Restlaufzeit der Tagebaue, werden aktuell keine komplexen Automatisierungsvorhaben weiterverfolgt. Aufgrund der gegebenen Wirtschaftlichkeit liegen dabei aktuell Videoassistenzsystem im Fokus, die kostengünstig, flexibel und schnell umgesetzt werden können, um damit eine Förderung mit situativ, reduziertem Bedienpersonal und gleichzeitiger Entlastung dieser zu ermöglichen.

2 Bagger-Automatisierung

Vorläufer zur eigentlichen Baggerautomatisierung wurden bereits in den 90er Jahren diverse Subsysteme am Bagger teilautomatisiert und im Weiteren auch auf andere Förderanlagen, wie Absetzer und Band-schleifenwagen (BSW) übertragen. Basis dieser Entwicklungsarbeit war die modulare Projektierung und Programmierung.

Beispiele für diese Module sind **Gurtgeradelaufsteuerungen, Ketten- und Schmieranlagen**, Leitungs- und Schlauchtrommeln mit Umrichter Antrieb zur **automatischen Überfahrt von Kabeleinlassstellen**. Insbesondere die Gurtgeradelaufsteuerungen wurden kontinuierlich weiterentwickelt. Begonnen wurde mit einfacher Ultraschallsensorik und Hydraulikaggregaten ohne Wegerfassung, die im Weiteren durch 1D-Radarsensoren mit Linearantrieben ersetzt wurden. Die **Kettenschmieranlagen** wurden hinsichtlich Ihrer Befüllung und Verbrauch optimiert.

Neben den bereits in den 90er Jahren entwickelten Geräteführerautomatiken und -hilfen, wurde das Assistenzsystem zur Gerätepositionsdatenerfassungen im Jahre 2009 eingeführt. Dieses System speist mit den Gerätepositionsdaten das Betriebsführungssystem **SAMASA** (Satellitengestützte Bagger, Materialfluss & Absetzersteuerung). Diese Geländemodelldaten werden dem Geräteführer in den Führerständen inkl. der hinterlegten, digitalen Einsatzpläne angezeigt. Im Rahmen einer weiteren Effizienzsteigerung werden diese Informationen zudem mobilen Endgeräten angezeigt, sodass der Vorarbeiter eines Baggers den Prozess vor Ort, flexibel überwachen kann.

Die weiterführende Automatisierung der Bagger ist dabei schrittweise mit Erhöhung der Komplexität erfolgt. Es wurden zunächst einfache Automatisierungen umgesetzt und sukzessive mit den gewonnenen Erfahrungen Optimierungen eingebracht. Nach Abschluss sind diese in die Entwicklung komplexerer Automatiken, zum Beispiel der vollautomatischen Übergaberegelung der Absetzer (VAÜ) eingeflossen.

Als Revierprojekt wurden die Leitungstrommelantriebe aller Fördergeräte ab 2005 einheitlich mit Umrichterantrieben und Winkelkodierer zur Pendelstellungs- und Trommellängenerfassung ausgerüstet. Diese Technik ermöglichte, die **Einspeisestelle automatisch zu überfahren**. Früher mussten zwei Bediener vor Ort sein und die Einspeisestelle im Handbetrieb überfahren. Diese Automatik ist ein Modul der Vollautomatik der Beladewagen.

Die Teilautomatik Beladewagen (TA 1) wurde primär zur Leistungssteigerung und zur Unterstützung in den Jahren ab 2000 eingeführt. Sie besteht aus einer automatischen Beladepopfsteuerung, ähnlich einer Gurtgeradelaufsteuerung. Sie hat zum Ziel, dass die abführende Bandanlage stets gerade in der Bandachse geführt wird. Die Ausrichtung des Beladewagens erfolgte dabei von Hand vor Ort zu

Beginn einer Schicht. Im Weiteren konnte der Beladewagen aus dem Hauptführerstand des Baggers nach Erreichen der Brückenverschiebung eng oder weit manuell verfahren werden.

Zur Effizienzsteigerung wurden im Rahmen der Teilautomatik Beladewagen einzelne **Beladewagen mit Funkfernsteuerungen** ausgerüstet. Damit konnte die schichtweise Ausrichtung optimiert vom Planum ohne einen weiteren Einweiser erfolgen. Heute ist diese Technik aufgrund der Vollautomatik nur noch selten in Betrieb.

Im Jahr 2020 wurde der Bagger 292 im Tagebau Hambach mit einer **Funkfernsteuerung für dem Baggerbetrieb** in Anlehnung zur Ausrüstung der automatisierten Absetzer für den Betrieb im Ton-Eisen-Stein ausgerüstet. Die Förderung von Ton-Eisenstein mit ihren speziell entwickelten Baggerschaukeln erzeugen enorme Erschütterungen in den Führerständen, die nicht durch besonders gefederte Sitze und Schwingungsautomatik kompensiert werden konnten. Daher wurden den Besatzungen das Baggern mit einer Funkfernsteuerung ermöglicht, um die physikalischen Belastungen auf den Körper in diesen besonderen Fördersituationen zu reduzieren.

Im Jahr 2005 wurde die bisherige Automatik der Beladewagen im nächsten Schritt so weit entwickelt, dass kein Beladewagenfahrer im Regelbetrieb mehr notwendig ist. Basisentwicklungsarbeit hat hierfür die Automatisierung der Raupenlenkung der Bandschleifenwagen der Absetzer (TA 1) ab 2003 geleistet. Die gewonnenen Erkenntnisse konnten für die Weiterentwicklung der Kollisionsschutzeinrichtungen und Sensorik (Radar) genutzt werden.

Unterschied zu bisherigen Vollautomatiken der Kohlebunker mit Schienenfahrwerken und definierten Halden war, dass diese Vollautomatik sich an der rückbaren Bandanlage automatisch ausrichtet, ohne eine definierte Erfassung zur Bandachse mittels Zahnsegmente zu nutzen. Dies wäre, aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit des Planums, technisch kaum zuverlässig umsetzbar gewesen.

Der **vollautomatische Beladewagen (VAB)** basiert auf fünf Radarsensoren, die die Strossenbandachse sowie den seitlichen Abstand des Beladewagens nebst Verdrehwinkel erfassen und den Beladewagen inkl. Verschiebeband und Beladekopf automatisch an der Bandanlage ausrichten. Gerätespezifisch wurden zwei unterschiedliche Sensoranordnungen nach grundsätzlich ähnlichen Regelungsprinzipien für Beladewagen mit Dreibeinraupenfahrwerken und Beladewagen mit Schwenkband und Trichterwagen (Bagger 275) entwickelt. Letztere sind heute wegen der sukzessiven Außerbetriebnahme von Fördergeräten im Rahmen des Kohleausstiegs nicht mehr im Einsatz. Insgesamt sind 18 Beladewagen automatisiert.

3 Absetzer-Automatisierung

Mitte der 90er Jahre wurden zur Leistungssteigerung erste Absetzer mit **Funkfernsteuerungen für den Schwenkbetrieb** ausgerüstet.

Ab 2003 wurden die **Raupenlenkungen** der Bandschleifenwagen in einem ersten Automatisierungsschritt **teilautomatisiert** (TAI). Als Sensoren wurden zwei Laserscanner eingesetzt (damaliger Stand der Technik), die seitlich über eine Abstandsmessung die Lage der Feuerlöschleitung erfasste. Sie war entlang der Bandanlage montiert. In der Automatisierungstechnik wurde daraus eine Bandachse gebildet und beide Raupenlenkungen über separate Regelkreise angesteuert. Einer von beiden Laserscannern ist am heb- und senkbaren Auflaufteil befestigt, sodass neben der Fahrachse auch die Hubwinden-Lageregelung des Auflaufteils geregelt werden konnte. Kollisionen zu den Bandgerüsten werden durch Knickstabsonden oder Lichtschranken geschützt. Aufgrund von Verschmutzung mussten die Laserscanner umfangreich durch Gehäuse geschützt und zudem regelmäßig gereinigt werden. Im Jahr 2008 wurde die nicht mehr verfügbare Regelungstechnik abgelöst. In einem weiteren Schritt wurden ab 2014 die vorhandenen stör- und verschmutzungsanfälligen Laserscanner (zu diesem Zeitpunkt auch nicht mehr lieferbar) durch in Summe drei 1D-Radarsensoren getauscht. Hier wurden die Erfahrungswerte und Konzepte des vollautomatischen Beladewagen (VAB) übernommen. In Summe wurden im Revier 17 Bandschleifenwagen umgerüstet.

Aufbauend auf die zuvor beschriebene BSW-Automatik wurde im Jahr 2006 ein erster 2-Bandabsetzer ohne Stützwagen mit Radarsensoren mit einer **vollautomatischen Übergaberegulation** (VAÜ) ausgerüstet. Aufgabe des Geräteführers im Handbetrieb ist, die Materialübergabe zwischen Absetzer und Schwenkband vom Bandschleifenwagen immer in Deckung zu halten. Die Funktion wurde durch die Automatik nachgebildet. Basis für diese Regelung sind vorhandene Winkelkodierer, das nachgerüstete Radarsystem zur Erfassung der Übergabe und ein in der Automation abgebildetes 3D-Gerätemodell. Die Anstellbewegungen des Absetzers wurden dabei auf eine Funkfernsteuerung mit Not-Aus Funktion überführt. Fahrbefehlen des Absetzers über Funkfernsteuerung folgt der Bandschleifenwagen mit der automatischen Übergabe selbständig. Zur Kollisionsschutzüberwachung der fliegenden Materialübergabe, ist unter dem Schwenkband des BSWs ein elektrisch isoliert montiertes Kollisionsschutzseil montiert. Eine Kollision wird durch einen Erdschluss erkannt, das Gerät angehalten und das Schwenkband angehoben. Zudem ist ein Softwarekollisionsschutz auf Basis des Gerätemodells implementiert. Ab 2010 wurde dieses Pilotprojekt sukzessive im Rahmen von Planstillständen auf weitere Absetzer, unter anderem auch mit Stützwagen übertragen und gerätespezifisch weiterentwickelt. Seit 2016 wurden umgerüstete Anlagen nach einem Test- und Probetrieb in den 2-Mannbetrieb überführt. Heute sind in Summe zwölf Absetzer mit dieser Technik in Betrieb. Der letzte Absetzer befindet sich aktuell in der Ausrüstung.

Die **automatische Lössdeponierung** (ALD) am Absetzer 750 setzt auf die bereits vorhandenen Teilautomatisierungen der automatischen Lenkung am BSW und der vollautomatischen Übergabe und Leitungstrommel auf. Für ALD wurden zur Schütthöhen- und Böschungserfassung zusätzliche Radarsensoren am Abwurfband sowie insgesamt neun Videokameras, eine automatische Lenkungsregelung für den Absetzer sowie eine Programmsteuerung für die automatische Verkipfung ergänzt. Die Lössdeponierung erfolgt im Kegelschalenverfahren. Hier fährt der Absetzer modellgestützt parallel zur Bandanlage und kippt im Blockbetrieb Kegel an Kegel. Die einzelnen Schritte sowie Stellungswechsel zwischen den Betriebsarten erfolgen automatisch, basierend auf einer Schrittkettenprogrammierung der Automation.

4 Ausblick

Wegen der kürzeren Laufzeit der Tagebaue, aufgrund des Kohleverstromungs-Beendigungs-Gesetzes, verlagert sich der Schwerpunkt der Automatisierungsprojekte. Der Focus der weiteren Effizienzsteigerung des Großgerätebetriebs liegt im Bereich der Videoassistenzsysteme und der Prozessverbesserung von Teilprozessen. Beispiel hierfür ist das derzeit installierte Kameraassistenzsystem für Schaufelradbagger. Anzeigen mittels mobiler Endgeräte ermöglichen neben der mobilen Betriebsführung auch effizientere Instandsetzungen am Großgerät. Weitere Entwicklungsschritte von Industrie 4.0 zu Industrie 5.0 sieht RWE Power in der Nutzung vorhandener und noch zu entwickelnder Algorithmen unter Nutzung der sog. künstlichen Intelligenz. Bereits in den vorhandenen IP-Kamera-technik integrierte Algorithmen ermöglichen weitere Schritte, indem die Bedien- und Überwachungsmöglichkeiten vom Gerät in einen zentralen Leitstand verlegt werden (Fernsteuerung Absetzer aus Leitstand). Dadurch wäre eine weitere Reduzierung der Bedienmannschaft vor Ort möglich, da ein zentral arbeitender Bediener die parallele Bedienung und die Überwachung mehrere Absetzer durchführen kann. Voraussetzungen dafür sind leistungsfähige Netzwerkstrukturen und die Entwicklung betriebstauglicher Auswertungen.

Dipl. Ing. (FH) Norman Stamm
norman.stamm@rwe.com

RWE Power AG
Technik Braunkohle
Elektrotechnik-Förderanlagen
Am Tagebau
52382 Niederzier

PAUS MINING & TUNNELING

Ihr Partner, wenn es um spezialisierte Maschinen- und Fahrzeuglösungen für den untertägigen Einsatz geht



Mehr erfahren
Sie auf unserer
Homepage

Hermann Paus Maschinenfabrik

Siemensstr. 1-9 48488 Emsbüren

Tel.: +49 5903 707-0

info@paus.de

www.paus.de



Gurtlenkrolle mit Monitoringfunktion

Dr. mont. M. Prenner, J. Müller
Montanuniversität Leoben

Kurzfassung

„Durch die Überwachung der Anlagenparameter von Gurtbandförderern kann deren Verfügbarkeit und die Funktion deutlich verbessert werden. In Zusammenarbeit mit der Firma ScrapeTec Trading GmbH wurde am Lehrstuhl für Bergbaukunde – Fördertechnik und Konstruktionslehre ein Gurtschieflauf- und Korrektursystem für Gurtbandförderer entwickelt, welches mit einer Monitoringfunktion ausgestattet ist. Bei diesem System handelt es sich um eine Gurtlenkrolle, die das seitliche Verlaufen des Gurtes durch das automatische Verstellen der Rollenrotationsachse bis zu einem bestimmten Grad verhindert. Durch die Positionsüberwachung der Rotationsachse und weiterer Gurtparameter kann zum einen der auskorrigierte Gurtschieflauf detektiert werden und zum anderen auf Grund von charakteristischen Bewegungsmustern des Lenksystems auf den schieflaufverursachenden Fehler rückgeschlossen werden.“ [5]

1 Gurtlenkeinrichtungen

„Gurtbandförderer für Schüttgüter sind sehr energieeffiziente und im Allgemeinen betriebssichere Anlagen zum stetigen Transport von sehr großen, aber auch kleinen Massenströmen. Trotz der allgemeinen Betriebssicherheit können Anlagenkomponenten aus verschiedensten Gründen ausfallen. Typische Schäden sind zum Beispiel der Ausfall von Tragrollen durch Lagerschäden, der Gurtausfall durch Oberflächenverschleiß oder verschlissene Gurtreiniger. Ein nicht zu unterschätzendes Problem ist der sogenannte Bandschieflauf, der unter anderem durch defekte Anlagenkomponenten verursacht werden kann. Darunter versteht man das seitliche Verlaufen des Fördergurtes 90° zur Förderrichtung. Dieser Schieflauf kann verschiedenste Ursachen aufweisen. Eine exzentrische Bandbelastung, schlecht ausgeführte Gurtverbindungen (Spleißstellen), Gurtbeschädigungen, defekte Tragrollen, Anlagenverschmutzungen, quer zur Förderrichtung auftretende Kräfte, verursacht durch die Schüttgutaufgabe, die Streckenführung und viele mehr können der Grund für einen derartigen Schieflauf sein. Um einem möglichen Bandschieflauf entgegenzuwirken, werden verschiedenste Systeme eingesetzt. Häufig werden Tragrollen auf Sturz gestellt. Darunter versteht man das statische Verdrehen der äußeren Lasttrumtragrollen um einen gewissen Winkel zur Förderrichtung. Durch diese Verdrehung entstehen Kräfte in Richtung der Tragrollenstuhlmittle, die den Gurt in seine Sollposition zurückleiten. Neben dieser statischen Gurtlenkung werden auch unterschiedliche dynamische Verfahren beziehungsweise Einrichtungen verwendet, die grundsätzlich auch auf der Verstellung von Tragrollen beruhen.

Beispiele dafür sind der Tru-Trainer der Firma ASgCO [1], der PT SMART™ BELT TRAINER der Firma FLEXCO [2], das Martin®-Tracker™-System der Firma Martin Engineering [3] usw. Zur Gurtzentrierung werden auch ballige Trommeln oder V-förmig gemuldete Lehrtrumtragrollenstühle, die auf die Gurtlaufseite angepresst werden eingesetzt.

Ein weiteres Gurtlenksystem ist der sogenannte "PrimeTracker", der von der Firma ScrapeTec Trading GmbH [4] vertrieben wird. Dieses System beruht auch auf dem Prinzip der Verdrehung von Rollen beziehungsweise Trommeln zur Gurtlenkung. In Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Bergbaukunde – Fördertechnik und Konstruktionslehre mit der Firma ScrapTec wurde die Funktion des "PrimeTrackers" um eine Monitoringfunktion erweitert. [5]

2 PrimeTracker

„Der "PrimeTracker" besteht aus einer rotierenden Rolle, die über zwei Wälzlager und ein Rohr mit einem zentralen Gummilager mit einer feststehenden Achse verbunden ist. Das zentrale Lager erlaubt eine Achsschiefstellung der Rollenrotationsachse zur feststehenden Achse. Durch das Verdrehen der Rolle entsteht eine Sturzstellung der Rolle, die den Gurt beim Auftreten eines Gurtschieflaufes in seine Ausgangslage zurückbewegt. Das System und das Funktionsprinzip sind in Abbildung 1 dargestellt.“ [5]

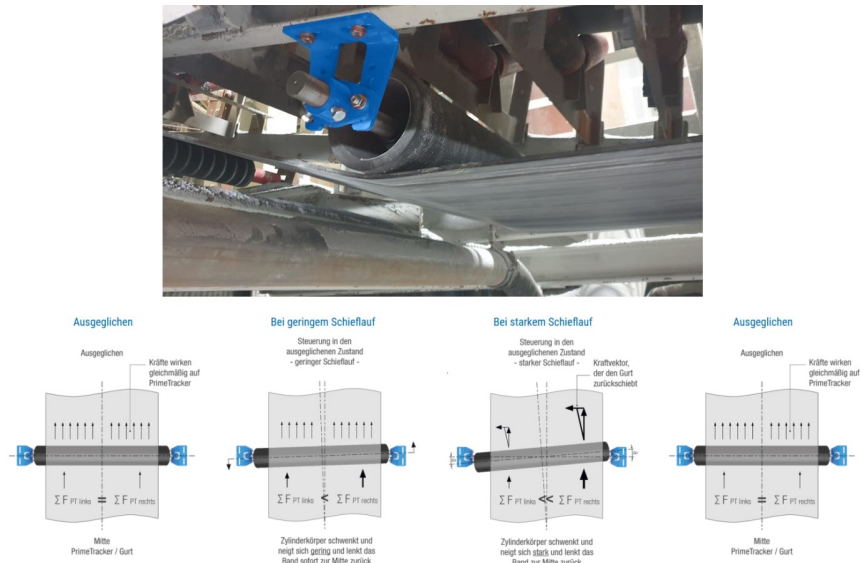


Abbildung 1: Funktionsprinzip des "PrimeTrackers" [4]

„Die Verdrehung der Rotationsachse zur feststehenden Achse soll nun für Monitoringaufgaben herangezogen werden, da die Verstellung bzw. der Bewegungsablauf mit auftretenden Anlagenfehlern verknüpft werden kann. Um die Bewegung der Rotationsachse zur feststehenden Achse messen zu können, wurde das System mit Ultraschallsensoren zur Entfernungsmessung ausgestattet. Dabei misst je ein Sensor den Abstand in Förderrichtung und 90° zur Förderrichtung. Für den Labormessaufbau wurden noch zusätzliche Sensoren in den für die Untersuchungen verwendeten Gurtbandförderer implementiert.“ [5]

3 Monitoringsystem – Messaufbau

Der "PrimeTracker" mit dem zugehörigen Monitoringsystem beziehungsweise Messequipment wurde in den lehrstuhleigenen Förderkreislauf – bestehend aus vier Gurtbandförderern mit je circa 5 m Förderlänge – in einen der vier Förderer eingebaut (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Gurtbandförderer der Testanlage mit eingebautem "PrimeTracker" – Tragseite

Für den „PrimeTracker“ bestehen zwei unterschiedliche Einbaumöglichkeiten. Das System lenkt den Gurt grundsätzlich über das Leertrum, wobei die Lenkrolle entweder über die Tragseite oder die Laufseite eingreifen kann. In Abbildung 2 und Abbildung 3 ist der „PrimeTracker“ so montiert worden, dass die Rolle auf die Tragseite des Gurtes im Leertrum angepresst wird. Die alternative Einbaumöglichkeit mit Anpressen der Rolle auf die Laufseite des Gurtes im Leertrum ist in Abbildung 1 zu sehen. Die im Nachfolgenden beschriebenen Untersuchungen beziehen sich auf die Gurtlenkung über die Tragseite, da in diesem Fall ein stabilerer Gurtlauf bei der vorhandenen geringen Gurtbreite von 400 mm eingestellt werden konnte.



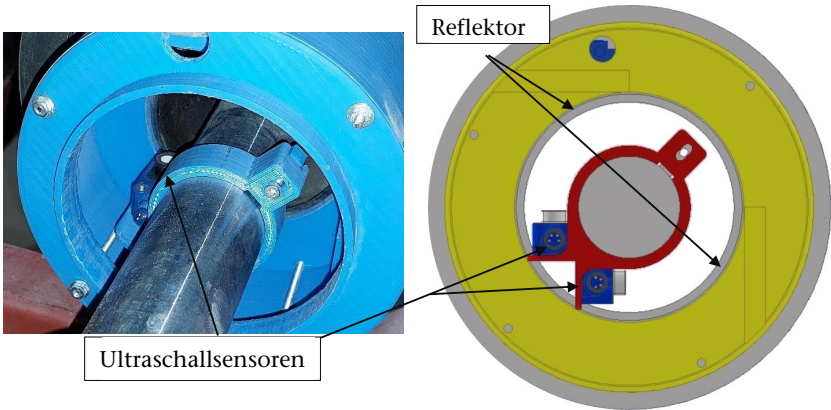
Abbildung 3: "PrimeTracker" auf die Gurttragseite aufgedrückt

Für die durchgeführten Versuchsreihen wurden insgesamt sechs Messstellen eingerichtet (siehe Abbildung 4).

Die Ultraschallsensoren und der Drehzahlsensor wurden in den „PrimeTracker“ eingebaut, wobei die Ultraschallsensoren als eigentliches Monitoringsystem gedacht sind. Der Lasersensor zur Messung der Gurtposition auf der Antriebstrommel wird nur für den Laborbetrieb benötigt, um das Rückstellverhalten des Systems zu messen und zu überwachen. Der Kontrastsensor wird ebenfalls für den Laborbetrieb benötigt, um die Gurtumlaufposition mit auftretenden Ereignissen synchronisieren zu können. Die Messung der Umlaufposition kann auch für Industrieanwendungen sinnvoll sein. Je nach Anwendungsfall besteht die Möglichkeit, den verwendeten Sensor durch zum Beispiel einen Halleffektsensor zu ersetzen. [5]

„Für die Implementierung der Ultraschallsensoren und des Drehzahlsensors muss der „PrimeTracker“ mit zusätzlichen Bauteilen ausgerüstet werden. Hierfür wird eine Montagevorrichtung für die Ultraschallsensoren benötigt, welche auf die stillstehende Achse des Systems aufgezogen werden muss. Zur Reflektion der Ultraschallsignale müssen zusätzlich Reflektionsflächen, die sich mit der Rollenverstellung mitbewegen, eingebaut werden. Diese Flächen rotieren nicht mit der Rolle mit. Sie bewegen sich lediglich mit der Schiefstellung der Rollendrehachse. Die zusätzlich benötigten Bauteile sind in Abbildung 4 ersichtlich. Der Drehzahlsensor wird ebenfalls mit dem Bauteil zur Realisierung der Reflektionsflächen verbunden.

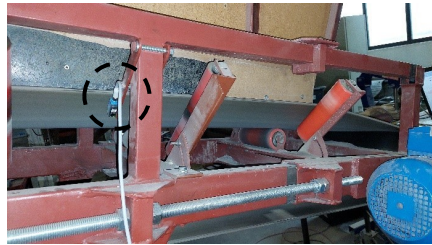
In Abbildung 4 ist weiters ein Laufrad ersichtlich, das exzentrisch auf den Gurt angepresst werden kann. Die Anpresskraft wird dabei durch eine Kraftaufnehmer aufgezeichnet. Mit diesem Laufrad kann zB. eine exzentrische Bandbelastung simuliert werden.“ [5]



Ultraschallsensoren zur Messung der Verdrehung der Rotationsachse



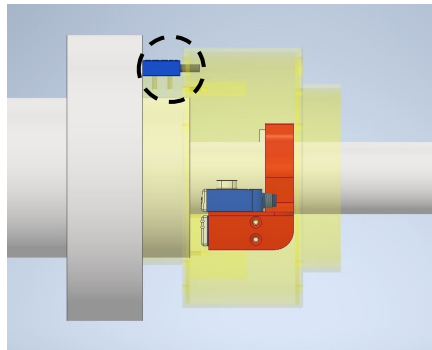
Lasersensor zur Messung der Gurtposition an der Antriebstrommel – strichlierter Kreis



Kontrastsensor zur Messung der Gurtumlaufposition – strichlierter Kreis



Messung der Anpresskraft Laufrad auf den Gurt



Drehzahlsensor – strichlierter Kreis

Abbildung 4: Eingerichtete Messstellen [5]

4 Durchgeführte Messungen

„Um die Funktion der Lenkeinrichtung in Verbindung mit dem implementierten Monitoringsystem überprüfen zu können, werden vordefinierte Fehler in den Gurtförderer eingebaut. Bevor ein spezifischer Fehler eingebracht wird, muss ein Kalibrationslauf durchgeführt werden, um in weiterer Folge die Abweichungen von der Ausgangsmessung dokumentieren und bewerten zu können. In Abbildung 5 ist die Kalibrationsmessung für den Lasersensor, die Ultraschallsensoren und den Etikettensensor dargestellt.

Bei dieser Kalibrationsmessung ist gut zu erkennen, dass die Gurtkante eine periodische Bewegung ausführt. In Abbildung 5 ist dies anhand der zweiten Messkurve von oben für den Laserabstandssensor dargestellt. Die Ursache für die aufgezeichneten Schwankungen ist durch Fertigungsungenauigkeiten begründet, die sowohl auf einer variierenden Gurtbreite als auch auf einer unexakten Gurtverbindung beruhen. Nach einer kurzen Einlaufphase tritt eine periodische Schwingung auf, wobei ein Ausschlag (Peek) kurz vor dem Kurvenmaximum zu beobachten ist. Der Peek wird durch die Gurtverbindungsstelle verursacht. Dieser Ausschlag ist auch auf der Messkurve des Etikettensensors (erste Kurve von oben in Abbildung 5) beobachtbar. Für die Impulserzeugung wurde eine Farbmarkierung auf der Laufseite am Gurt aufgebracht, die allerdings nur einen schwachen Spannungsimpuls lieferte. Einen deutlich ausgeprägteren Impuls verursacht die Gurtverbindungsstelle auf Grund einer unterschiedlichen Gurtoberflächenstruktur. Der kleine Ausschlag in der ersten Messkurve von oben, in Abbildung 5, befindet sich jeweils kurz nach dem Maximum der zweiten Messkurve von oben. Der größte Ausschlag der Etikettensormesskurve ist dabei kurz nach dem Peek der zweiten Kurve von oben zu finden. Diese Ausschläge werden durch die Verbindungsstelle verursacht, wobei der Etikettensensor auf Grund der versetzten Position (siehe Abbildung 4) etwas später ausschlägt. Betrachtet man nun die Messkurve des Ultraschallsensors für die „vertikale“ Position der Drehachse (dritte Kurve von oben in Abbildung 5), so lässt sich dieses Ereignis ebenfalls anhand eines kurzzeitigen Maximums erkennen und zuordnen. Das Ereignis ist in Abbildung 5 durch die strichlierte Linie für eine Periode gekennzeichnet. Die Messkurve für die „horizontale“ Position der Drehachse (vierte Kurve von oben in Abbildung 5) liefert einen regelmäßigen Verlauf ohne ausgeprägte kurzzeitige Ausschläge.“ [5]

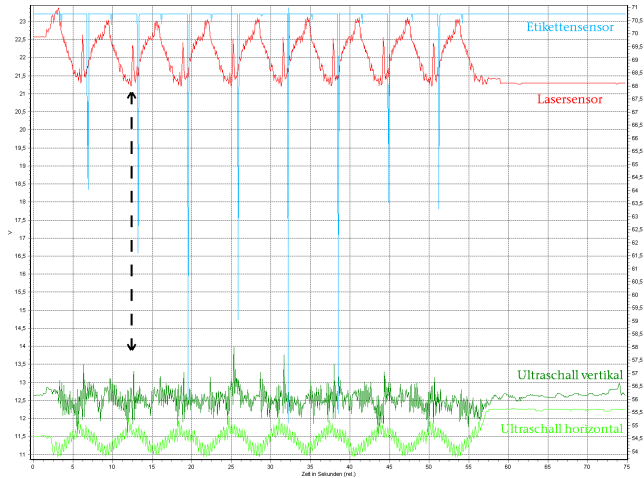


Abbildung 5: Kalibrationsmessung [5]

4.1 Messungen mit definierten Fehlern

„Um die Monitoringmöglichkeiten und die Funktionalität des Systems zu untersuchen, wurden Versuche mit verschiedenen in das Fördersystem eingebrachten Fehlern durchgeführt.

Folgende Fehler wurden eingebracht:

- Exzentrische Bandbelastung mittels Laufrad bei 75 N, 125 N, und 200 N auf der rechten Gurtseite in Förderrichtung, so wie 125 N und 225 N auf der linken Seite



Abbildung 6: Durch Laufrad einseitig belasteter Gurt

- Mit Schraubzwingen blockierte Laufrollen auf der rechten Seite in Förderrichtung



Abbildung 7: Mit Schraubzwingen blockierte Laufrollen [5]

- Ungleichförmig angepresster Gurtreiniger – Spalt zwischen Gurt und Abstreifer auf der rechten Seite in Förderrichtung



Abbildung 8: Ungleichförmig angepresster Gurtabstreifer [5]

Alle Versuche (mit Ausnahme der blockierten Tragrollen) führen zu einer Verschiebung des Gurtes auf der Antriebstrommel sowie zu einer Verstellung der Rollendrehachse des „PrimeTrackers“ zur stillstehenden Achse. Der Verlauf der Gurtverschiebung ist in Abbildung 9 dargestellt.

Die Darstellung verdeutlicht, dass ein Gurtschieflauf trotz „PrimeTracker“ auftrat. Der Schieflauf ist abhängig von der Belastungsintensität und dem Ort der Einbringung des Fehlers. Der „PrimeTracker“ sollte eigentlich die Verschiebung des Gurtes an der Trommel durch seine last- beziehungsweise fehlerabhängige Sturzstellung, bis zu einer gewissen Belastungshöhe, vermeiden. Der Grund für seine eingeschränkte Funktion ist in den Laborbedingungen zu finden. Der verbaute Gurt mit 400 mm Breite liegt außerhalb des Spezifikationsbereichs (Gurtbreite zwischen 500 mm und 2000 mm) für das Einsatzgebiet des „PrimeTrackers“.

Eine eingeschränkte Lenkfähigkeit ist dadurch gegeben. Ein Ablaufen des Gurtes von der Antriebstrommel wird aber verhindert. Für die Überprüfung der Eignung als Monitoringsystem spielte diese Einschränkung aber keine Rolle, da der „PrimeTracker“ messbar auf in das Fördersystem implementierte Belastungen beziehungsweise Fehler reagierte.

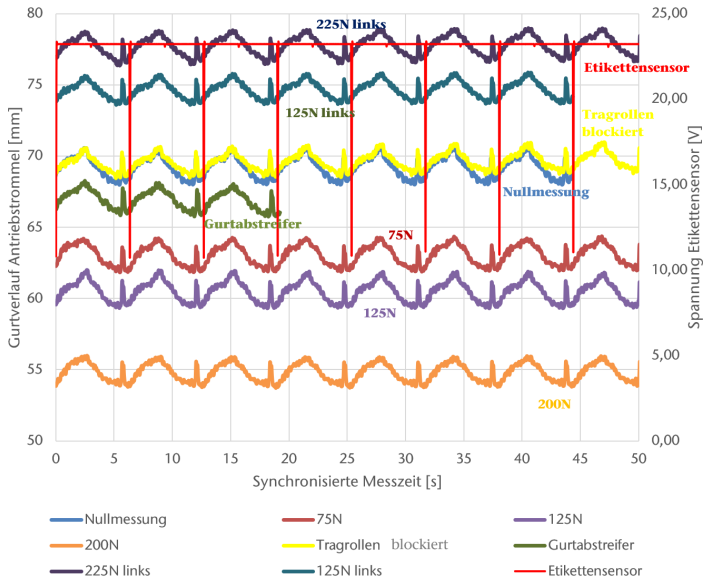


Abbildung 9: Gurtverschiebung auf der Antriebstrommel [5]

Das Verhalten des „PrimeTrackers“ bei unterschiedlichen zusätzlichen Gurtbelastungen ist in Abbildung 10 zu sehen. Die zugehörige Definition der Bewegungsrichtungen ist in Abbildung 11 dargestellt.

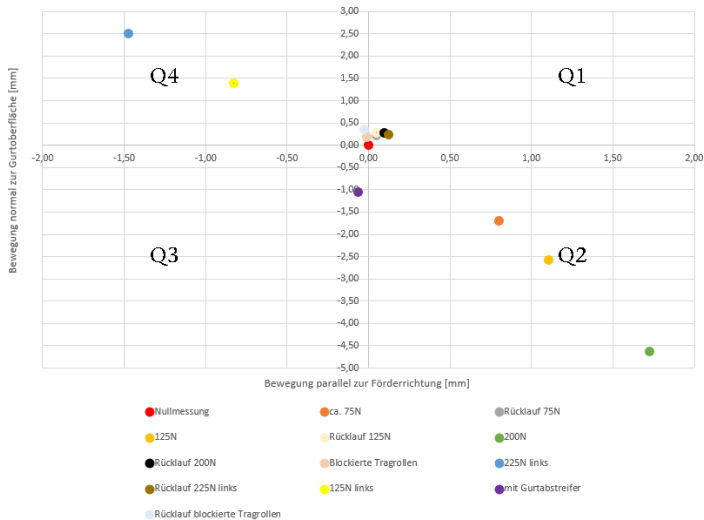
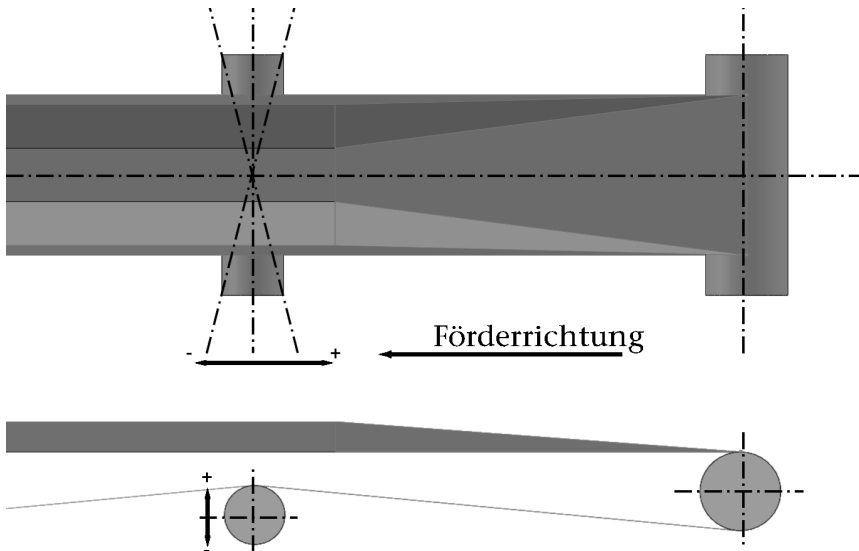


Abbildung 10: Bewegungsmuster des "PrimeTrackers" bei unterschiedlicher Gurtbelastung [5]



Bezogen auf die linke Rollenseite in Förderrichtung.

Abbildung 11: Definition der Bewegungsrichtungen [5]

Um einen aufgebracht Fehler einem Bewegungsmuster des „PrimeTrackers“ zuordnen zu können, können verschiedene Wege verfolgt werden. Eine aufwändige und datenintensive Möglichkeit ist die Analyse des gesamten periodischen Schwingungsmusters der beiden Messkurven, eventuell unter Einbindung von Extremwerten. Bei der in Abbildung 10 dargestellten Auswertung wurde ein einfacherer Weg besprochen, der ebenfalls die Möglichkeit der Fehlerzuordnung bietet. Hier wurden die Messkurven für die Bewegung parallel zur Förderrichtung und normal zur Förderrichtung nach der Einlaufphase jeweils gemittelt und in das Quadrantendiagramm eingetragen. Dadurch ist eine eindeutige Zuordnung durch einen spezifischen Datenpunkt für die eingebauten Fehler möglich. Als Nullpunkt (siehe Abbildung 10) wurde die Kalibrationsmessung herangezogen. Bei allen Messungen wurden die mittleren Auslenkungen unter den jeweiligen Lasten bestimmt. Um das Rückstellverhalten des „PrimeTrackers“ nach der Entfernung der jeweiligen Last zu bestimmen, wurden weitere Messungen mit Ausnahme des Gurtabstreifers durchgeführt. Dies geschah immer im Anschluss an die jeweilige Messung mit aufgebrachtem Fehler. In Abbildung 10 sind die Rücklaufpunkte aller Belastungszustände in unmittelbarer Nähe des Startpunkts zu sehen. Die geringen Abweichungen vom Nullpunkt liegen ungefähr im Bereich der Messtoleranz von 0,1 mm der verwendeten Ultraschallsensoren.

Weiters ist erkennbar, dass kein eindeutig messbarer Effekt durch das Blockieren der beiden Tragrollen (auf der rechten Gurtseite in Förderrichtung) auftritt. Die gemessene Auslenkung des „PrimeTrackers“ liegt innerhalb der Messtoleranz und kann daher nicht bewertet werden. Die nur durch den Gurt belasteten und blockierten Tragrollen verursachen in diesem Fall keinen messbaren Gurtschieflauf.

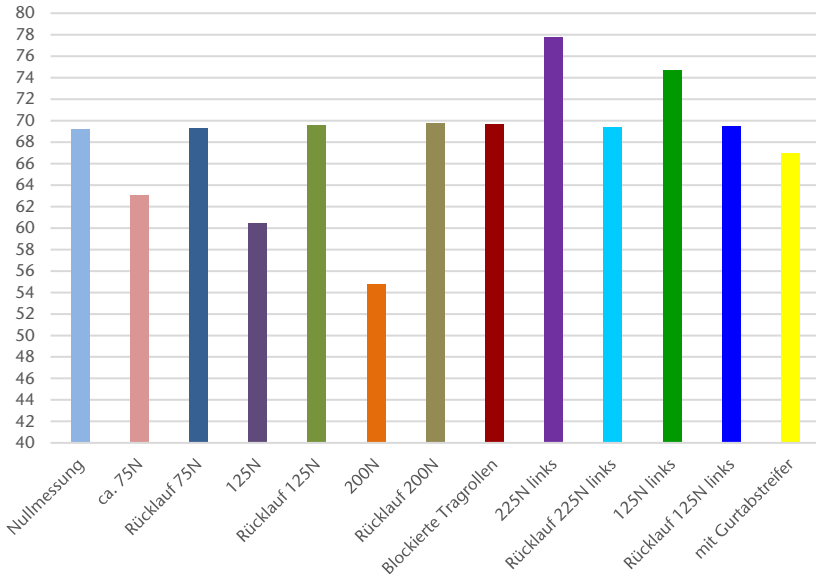


Abbildung 12: Mittlerer Gurtverlauf auf der Antriebstrommel [5]

Das in Abbildung 10 ersichtliche Verhalten wird durch die Messung des Gurtverlaufes an der Antriebstrommel (siehe Abbildung 12) bestätigt. Abbildung 12 zeigt den mittleren Verlauf des Gurtes auf der Antriebstrommel, gemessen mit einem Laserabstandssensor. Auch hier liegt zum Beispiel der Verlauf auf Grund der blockierten Tragrollen innerhalb der Messtoleranz (± 1 mm) des Lasersensors. Alle anderen Messungen liefern aber auch hier einen charakteristischen Wert für die jeweilige Belastung. Die Abweichung für die Gurtrückstellung nach der Wegnahme der jeweils aufgebrachtten Last liegt ebenfalls innerhalb der Messtoleranz. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich der Gurt nach der Beseitigung eines Fehlers immer wieder in seine ursprüngliche Ausgangslage zurückbewegt.

Wichtig ist, dass bei beiden Messpositionen („PrimeTracker“ und Antriebstrommel) unterschieden werden kann, ob der Fehler auf der linken oder rechten Gurtseite aufgetreten ist.

Der Gurtreiniger, welcher eine (in Förderrichtung betrachtet) linksseitige Zusatzbelastung am Gurt verursacht, zeigt ein von den Versuchen mit dem Laufrad abweichendes Fehlerbild (siehe Abbildung 10). Der Fehler liegt jetzt nicht mehr im vierten Quadranten (Q4), sondern im dritten Quadranten (Q3). Dieses Verhalten kann nicht mit der Methode der Positionsmessung des Gurtes an der Trommel aufgezeichnet werden. Wesentliche Informationen werden durch diese Methode unterschlagen. Bei einer industriellen Anwendung wird der Verlauf des Gurtes auf der Trommel ohnehin bis zu einer gewissen Belastung vermieden. Eine Fehlerdetektion ist daher in diesem Fall im industriellen Maßstab nicht möglich.

Die bisher getätigten Untersuchungen verdeutlichen, dass die Messungen am „PrimeTracker“, in Verbindung mit der Vierquadrantenmethode, ein vielversprechendes Monitoringverfahren für unterschiedliche Fehlersituationen, die während des Betriebes von Gurtbandförderern auftreten können, liefern. Die Verstellung des „PrimeTrackers“, in Abhängigkeit der auftretenden Anlagenfehler, entspricht dabei den Gesetzmäßigkeiten von auf Sturz gestellten Standardtragrollen zur Reduktion bzw. Vermeidung des Gurtschieflaufes.“ [5]

4.2 Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Rollenverstellung bei wiederkehrend auftretenden Fehlern

Für ein derartiges Monitoringsystem ist die Reproduzierbarkeit der Messungen bei wiederkehrend auftretenden gleichen Fehlern essentiell. Um die Reproduzierbarkeit zu bestätigen, wurden weitere Messungen mit exzentrischer Bandbelastung durch ein Laufrad (siehe Abbildung 6) durchgeführt. Die Belastung durch das Laufrad hat den Vorteil, dass der aufgebrachte „Fehler“ exakt wiederholt werden kann, da die Belastung durch den verwendeten Kraftaufnehmer wiederkehrend genau einstellbar ist. Der Gurt wurde immer an der gleichen Position auf der linken und rechten Gurtseite mit 50 N, 100 N, 150 N und 200 N belastet. Vor der Nullmessung wurde der Gurt vorkonditioniert, das heißt der Förderer wurde für eine gewisse Zeit eingeschaltet und über das Laufrad mit 200 N belastet. Nach Wegnahme der Last wurde der Förderer erneut über eine gewisse Zeit eingeschaltet, bis sich der Gurt in seine Ausgangsposition zurückbewegt hatte. Anschließend erfolgte die Nullmessung und die weiteren Messungen mit den unterschiedlichen Belastungen. Zur Kontrolle wurden nicht nur die unterschiedlichen Belastungsniveaus sondern auch die Nullmessungen wiederholt. Die Wiederholung der Nullmessung wurde jeweils vor dem Start der einzelnen Belastungsreihen durch das Laufrad auf der linken und rechten Gurtseite durchgeführt. Die Messergebnisse der Versuchsreihen sind in Abbildung 13 ersichtlich.

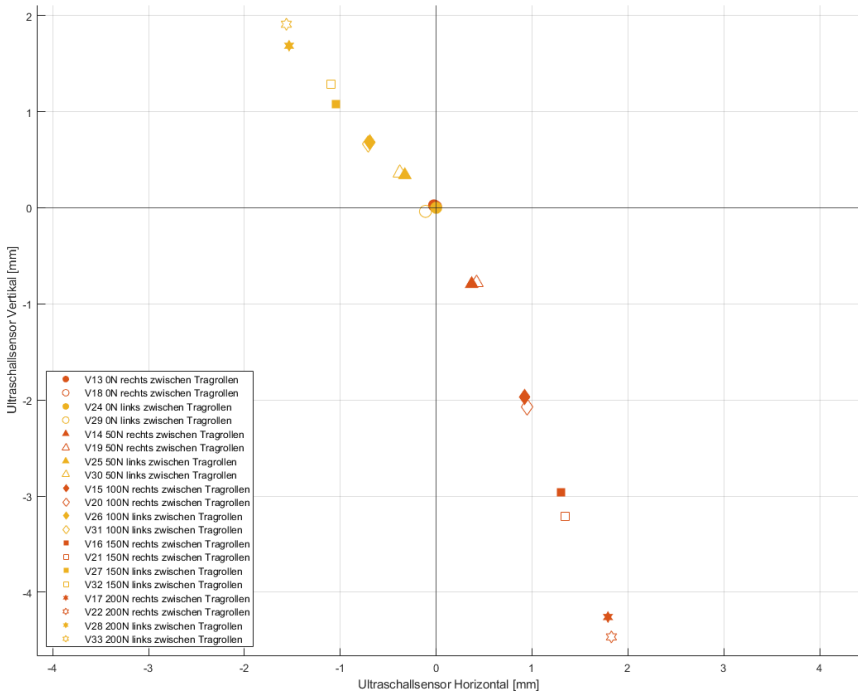


Abbildung 13: Reproduzierbarkeit der Rollenstellung bei wiederkehrend auftretenden Fehlern

Die Messungen zeigen, dass eine wiederkehrender „Fehler“ jeweils das gleiche Bewegungsmuster des „PrimeTracker“ aufweist. Auch die Abweichungen der wiederholten Nullmessungen liegen im Bereich der Messtoleranz der Sensoren (Messtoleranz = 0,1 mm der verwendeten Ultraschallsensoren). Eine Fehleridentifikation ist daher bei erneutem Auftreten realistisch. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass das entsprechende Fehlermuster beim erstmaligen Auftreten in der Auswertesoftware zugeordnet und hinterlegt wurde.

5 Zusammenfassung und Ausblick

„Der „PrimeTracker“ ist als Gurtlenksystem am Markt bereits etabliert. Durch eine kostengünstiges zusätzlich verbautes Messsystem kann der „PrimeTracker“ zu einem Monitoringsystem für Gurtbandförderer erweitert werden. Erste Untersuchungen haben bestätigt, dass durch ein einfaches Auswerteverfahren die Möglichkeit besteht, auftretende Anlagenfehler zu registrieren und auch zu identifizieren. Das Registrieren einer Fehlfunktion der Förderanlage, die zu einem Gurtschieflauf führt, ist unmittelbar nach der Installation und einer anschließenden Kalibrierung des Messsystems möglich. Die Fehleridentifizierung erfordert aber einen Lernvorgang des Systems. Nach einem erstmaligen Auftreten

eines spezifischen Fehlers muss dieser durch den Anlagenbetreiber der Auswerteeinheit zugeordnet werden (entspricht einem Punkt im Quadranten-diagramm mit einem definierten konzentrischen Schwankungsbereich). Tritt der zugeordnete Fehler erneut auf, kann dieser identifiziert und zugeordnet werden. Entsprechende Wartungs- beziehungsweise Fehlerbeseitigungsmaßnahmen können so durch den Anlagenbetreiber fehlerspezifisch eingeleitet werden.

Derzeit laufen Untersuchungen mit alternativen Sensoren. Zusätzlich werden weitere Fehler in den Versuchsgurtbandförderer am Lehrstuhl eingebracht und mit dem neuen System identifiziert und zugeordnet. Nach Abschluss der Laboruntersuchungen wird das neue Monitoringsystem einem Praxistest an einer Industrieanlage unterzogen. Die Messergebnisse können zukünftig je nach Anwenderwunsch unterschiedlich bereitgestellt werden. Eine direkte Einbindung in bestehende Systeme ist möglich. „Stand-alone“-Lösungen sind ebenfalls geplant.“ [5]

6 Literaturverzeichnis

- [1] ASGCO "Complete Conveyor Solutions". (2021). Tru-Trainer. Abgerufen am 01.12.2021 von https://www.asgco.com/search-results/?_sf_s=Tru-Trainer
- [2] Flexco Europe GmbH. (2021). PT SMART™ BELT TRAINER. Abgerufen am 01.12.2021 von <https://flexco.de/DE/Product-Series/Belt-Positioners-Trackers-and-Trainers/PT-Smart.htm>
- [3] Martin Engineering. (2021). Martin®-Tracker™. Abgerufen am 01.12.2021 von <https://www.martin-eng.com/content/product/171/tracker>
- [4] ScrapeTec Trading GmbH. (2021). "PrimeTracker". Abgerufen am 01.12.2021 von <https://scrapetec-trading.com/produkte/primetracker/>
- [5] Prenner, M., & Müller, J. (26.01.2022). Monitoringsystem für Gurtbandförderer. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 167, S. 52 - 60.

Dr. mont. Michael Prenner
michael.prenner@unileoben.ac.at

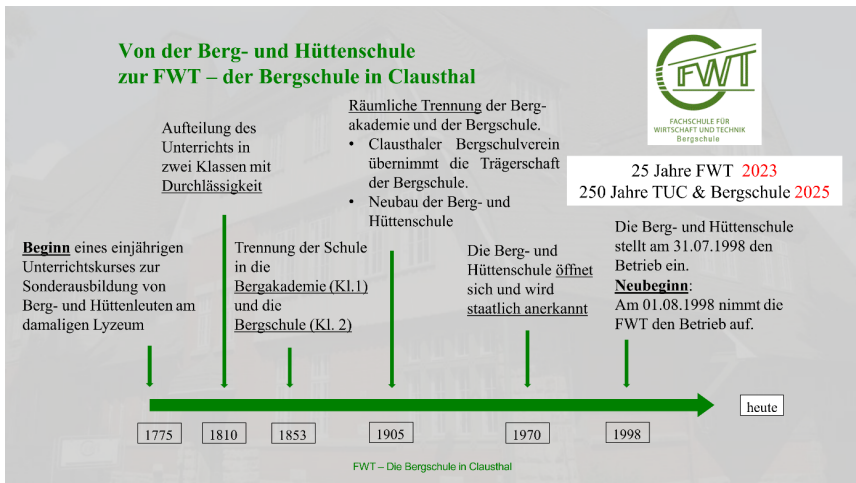
Jakob Müller

Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
Arbeitsgruppe Fördertechnik und Konstruktionslehre
Franz-Josef-Straße 18
8700 Leoben
Österreich

Weiterbildung an der FWT

Dr. M. Richter

Fachschule für Wirtschaft und Technik Clausthal-Zellerfeld



Staatl. gepr. Techniker

Geschäftsbereich 1 – Techniker



FACHSCHULE FÜR
WIRTSCHAFT UND TECHNIK
Bergschule

Bildungsgänge an der Fachschule für Wirtschaft und Technik


Bergbautechnik	Maschinentechnik
<p style="text-align: center;"><i>Schwerpunkte</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Bergtechnik ➤ Elektrotechnik ➤ Maschinentechnik ➤ Verfahrenstechnik 	<p style="text-align: center;"><i>Schwerpunkte</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Automatisierungstechnik ➤ Kunststofftechnik
	Elektrotechnik
	<p style="text-align: center;"><i>Schwerpunkt</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Industrie 4.0

Dauer: 4 Semester Vollzeit
Abschluss: Staatlich geprüfte/r Techniker/in & Bachelor Professional in Technik

FWT – Die Bergschule in Clausthal

Ingenieur

Geschäftsbereich 2 – Ingenieur



FACHSCHULE FÜR
WIRTSCHAFT UND TECHNIK
Bergschule

Berufsbezeichnung „Ingenieur“
(gem. §6 Abs. 1.c) des Niedersächsischen Ingenieurgesetzes NIngG vom 25.09.2017)

Oberklasse 2 Semester

Berufserfahrung
 mind. 2 Jahre mit Führungsverantwortung

Staatl. gepr. Techniker
(alternativ anderer Abschluss nach DQR 6)

mind.
4 Jahre

Einschlägige Berufstätigkeit

Einschlägige Berufsausbildung
 (Berufsschulabschluss)

Studium (Uni oder FH)
 mind. 6 Semester

Abitur oder Fachhochschulreife
 3 bzw. 2 Jahre

Sekundarabschluss 1

Geschäftsbereich 3 – Seminare



- Ausbildung zum Fördermaschinisten
- Management - Sich selbst und andere Führen
 - Kommunikation
 - BWL
- Metalle - Aluminium
 - Kupfer
 - Legierungen
- Sonderlehrgang für betriebliche Aufsichtskräfte
- Sprachen
- Sprengtechnik
- SPS-Automatisierung
- Wettertechnik

Auf Wunsch:

- ✓ Maßgeschneiderte Seminare
- ✓ Inhouse-Schulungen

FWT – Die Bergschule in Clausthal

Seminare: ausgewähltes Beispiel

Ausbildung zum Fördermaschinisten (1/2)



Inhalte:

- Einführung in Aufbau und Wirkungsweise von Fördermaschinen und -häspeln
- Einführung in verwaltungsmäßige Regelungen für Schachtförderanlagen: BVOS, TAS u. a.
- Energien für Antriebsmaschinen
- Besondere Einrichtungen - Bremsen, Fahrtregler
- Seile: Aufbau, Macharten, im Betrieb auftretende Seilschäden, magnetische Seilprüfung, Erkennen von Seilschäden, Befahrungs- und Hilfsfahranlagen, Winden und Bühnen, Notfahranlagen und Greifer
- Fördermittel und Zwischengeschirre einschl. zerstörungsfreier Prüfverfahren, Fragen des Seilauflagens

FWT – Die Bergschule in Clausthal

Seminare: ausgewähltes Beispiel

Ausbildung zum Fördermaschinisten (2/2)



(weiter Inhalte)

- Hydraulische Antriebe und Steuerungen
- Automatikbetrieb, Sicherheitseinrichtungen im Schachtförderbetrieb, Steuerungen von Bremsenrichtungen
- Signal- und Fernsprechanlagen, FTS-Anlagen, elektronischer Schachthammer
- Praktische Unterweisung als Fördermaschinist
- Aufgaben des Fördermaschinisten zur Überwachung von Schachtanlagen
- Verhalten von Fördermaschinisten bei besonderen Betriebszuständen
- Störungen, besondere Vorkommnisse und Unfallgefahren beim Betrieb von Schachtförderanlagen

FWT – Die Bergschule in Clausthal

Warum zur FWT nach Clausthal?



Fachliche Kompetenz

- Bergbauspezifische Kenntnisse in enger Abstimmung mit den entsendenden Unternehmen
- Seminare zur berufsqualifizierenden Aus- und Weiterbildung z.B. als Aufsicht, Fördermaschinist
- Anerkannte Abschlüsse „Staatl. gepr. Techniker (m/w/d)“ bzw. „Ingenieur (m/w/d)“
- Kooperation mit Hochschulen wie der TU Clausthal

Soziale Kompetenz

- Selbständigkeit
- Verantwortungsbewusstsein
- Teamfähigkeit
- Leistungsbereitschaft
- Führungsqualifikation

✓ **Erwerb von Handlungskompetenz**

✓ **Förderung der MA-Entwicklung**

✓ **Steigerung der Attraktivität des Berufsbildes**

✓ **Instrument zur MA-Bindung**

Methodenkompetenz

- Arbeitstechniken
- Lernstrategien

Persönliche Kompetenz

- Durchsetzungsfähigkeit
- Veränderungsbereitschaft

FWT – Die Bergschule in Clausthal

Kooperationen mit Hochschulen

Beispiel TU Clausthal

Kooperation zur Zusammenarbeit / Strukturierung der Durchlässigkeit



T2B Angebote für *Staatlich geprüfte Techniker* der FWT

mit den Fachbereichen [Bergtechnik](#) und [Maschinentechnik](#)
-> [pauschale Anerkennung von zwei Semestern](#)

B2T Angebote für *Studenten* der TU Clausthal

mit den Weiterbildungsangeboten der FWT
Voraussetzungen: abgeschlossene Berufsausbildung, Berufserfahrung
oder
langjährige Berufserfahrung
-> [individuelle Anerkennung erbrachter Leistungen](#)

FWT – Die Bergschule in Clausthal

Aufstiegs-BAföG am Beispiel „Staatl. gepr. Techniker/-in“

Lehrgangsgebühr inkl. Prüfung (2-jähriger Fachschullehrgang)	2.920,00 €	
Zuschussanteil 50% zum Maßnahmebeitrag	1.460,00 €	
Kosten für den Teilnehmer = Summe zinsloses Darlehen	1.460,00 €	
Darlehensersatz bei Bestehen 50%	730,00 €	
Tatsächliche Kosten für den Teilnehmer zzgl. Lehrmittel	730,00 €	(30,42 €/Monat)
Gesamtförderung Lehrgangsgebühren	2.190,00 €	= 75%

Zuzüglich der Förderung des Unterhaltsbedarfs bei Vollzeitmaßnahmen (einkommens- und vermögensabhängig)		
Der Unterhaltsbedarf wird als Vollzuschuss, orientiert an der Familiengröße, gefördert. Die maximalen Bedarfssätze sind:		
...für Ledige ohne Kind	785,00 €	
...für Verheiratete ohne Kind	1.018,00 €	
...für jedes Kind	235,00 €	
Bei Zahlung von Kranken- bzw. Pflegeversicherungsbeiträgen erhöht sich der Unterhaltsbeitrag in der Regel um	109,00 €	
Gesamtzuschuss zum Unterhaltsbedarf für einen ledigen Teilnehmer ohne Kind	21.408,00 €	(24 x 892,00 €)

Gesamtförderung bei o.g. Beispiele 23.598,00 €

Da die Lebensumstände individuell verschieden sind, empfiehlt es sich, die entsprechenden Zuschüsse per Förderrechner [abrechnen zu lassen. Nähere Informationen finden Sie unter: \[www.nbank.de\]\(http://www.nbank.de\)](#)

FWT – Die Bergschule in Clausthal

Stand April 2022

Dr. Michael Richter

m.richter@fwt.clz.de

Fachschule für Wirtschaft und Technik Clausthal-Zellerfeld gGmbH
Paul-Ernst-Str. 2
38678 Clausthal-Zellerfeld

TU Clausthal

Primary and Sustainable Extraction of Resources



Online-Kurs – 01. & 02.09.2022 – www.ces.tu-clausthal.de

Informieren Sie sich auch über die weiteren Angebote der

Clausthal Executive School,

der wissenschaftlichen Weiterbildungsakademie

der TU Clausthal!

Intercultural Leadership
and Technology (M.Sc.)

Systems Engineering (M.Sc.)

Zertifikatskurse

Unsere **interdisziplinären**
Weiterbildungsangebote
sind auf Ihre spezifischen
Bedürfnisse zugeschnitten
und lassen sich optimal mit
Ihrer **Berufstätigkeit**
kombinieren!



Kontakt

TU Clausthal
Clausthal Executive School

Albrecht-von-Groddeck-Str. 7
DE-38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel.: 05323/72-7900

Email: info@ces.tu-clausthal.de

Besuchen Sie auch unsere Webseite:
www.ces.tu-clausthal.de

Schäden und fehlerhafte Ausführungen an Förder- und Führungsgerüsten

A. Hachmann

AHA Prüfung und Abnahme

1 Historie

- Im Jahr 1956 wurde das Fördergerüst mit dem Führungsgerüst gebaut und danach mehrfach umgebaut. Beim letzten Umbau 2010 wurden Verstärkungen vorgenommen, die das Gerüst in den heutigen Zustand bringen.
- Die Umbaumaßnahmen 2020 /2021 zur Brunnenwasserhaltung an diesem Standort betreffen das Fördergerüst und das vorhandene Führungsgerüst. Dabei sind unter Anderem auch die Belange aus dem Denkmalschutz zu berücksichtigen.
- Aufgrund der neueren Erkenntnisse wurde die Statik des Fördergerüst-Istzustandes im Jahre 2021 erneut nachgewiesen. Dabei wurde die von mir festgestellte Querschnittstrennung beider Schrägstützen unterhalb der unteren Seilscheibenbühne, berücksichtigt.

Darüber hinaus wurden Änderungen am statischen System, aufgrund von vor Ort festgestellten Abweichungen, vorgenommen.

Auch die neueren Erkenntnisse (gelenkiger Anschluss der Schrägstreben an den Fundamenten) aus der Bestandsstatik von 1956 floss in die Berechnung mit ein, da diese 2010 noch nicht vorlag.

Hieraus ergibt sich unter Anderem eine akute Teilverstärkung der Portalstützen in der Nordwand im Bereich des Langteiltransportes, die kurzfristig umgesetzt werden musste.

Diese Teilverstärkung ist Bestandteil der Gesamtverstärkung für die Umbaumaßnahmen 2021/2022 zur Brunnenwasserhaltung, das heißt sie wird nicht wieder entfernt, sondern 2022 erweitert.



Abbildung 1: Fördergerüst

2 Abseilbegehungen

2.1 Abseilbegehung beider Schrägstreben

Der Abseilvorgang an den Schrägstreben beginnt auf der oberen Seilscheibenbühne. Ein, extra entlang der Schrägstütze gespanntes, Fix-Seil sorgte für den seitlichen Halt. Der Abseilvorgang wurde mit zwei Seilen von oben fremdgesichert.

Die Schrägstützen sind Schweißkonstruktionen, die genietet sind in den Anschlüssen.

Die Querschnittstrennung beider Schrägstützen unterhalb der unteren Seilscheibenbühne muss bei der Planung des Umbaus statisch berücksichtigt werden.

Die verbogenen und reduzierten Tropfbleche an beiden Stützen oberhalb der Außenkranbahn sind statisch nicht relevant.

Durch den Betreiber wurden die oben genannten Punkte an die Planer weitergeleitet. Das heißt sowohl für den Nachweis des Istzustandes als auch für die geplante Umnutzung wird diese Querschnittsreduzierung mitberücksichtigt.



Abbildung 2: Abseilbegehung beider Schrägstreben

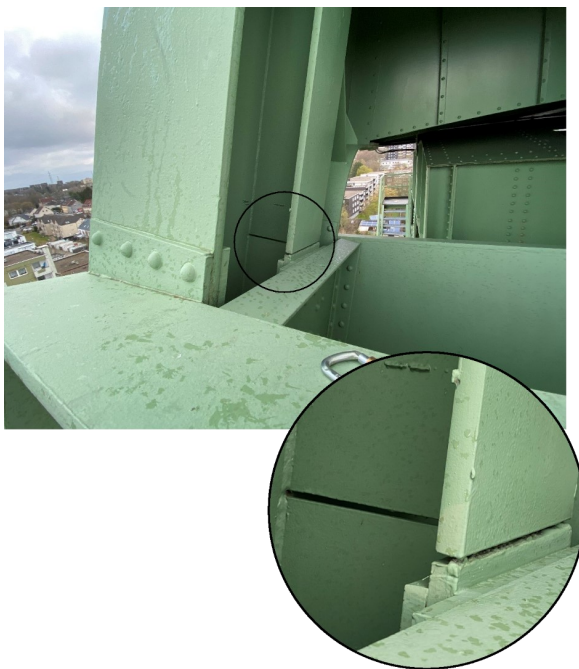


Abbildung 3: Querschnittstrennung beider Schrägstützen unterhalb der unteren Seilscheibenbühne



Abbildung 4: Abseilbegehung an der Führungsgerüst Mittelwand

2.2 Begehung der Rasenhängebankbühne

Die Bühne auf Rasenhängebank ist stark korrodiert.

Die Gitterroste sind teilweise nicht abgestützt und höhenversetzt.

Die Rasenhängebankbühne ist als Ganzes zu sanieren oder zu erneuern und nachzuweisen. Ein Nachweis im jetzigen Zustand ist nicht möglich!

2.3 Allgemeiner Zustand des Förder- und Führungsgerüst

Förder- und Führungsgerüst sind augenscheinlich in einem guten Zustand. Es wurden keine plastischen Verformungen festgestellt, die auf eine Überlastung hindeuten.

3 Schweißen

3.1 Schweißbeignung des Altstahles und der alten Verstärkungsbleche

Um die Schweißbeignung des Altstahles (Nietkonstruktion) und der alten Verstärkungsbleche (auf- oder eingeschweißt) festzustellen müssen Materialproben entnommen werden. Die Auswahl der Stellen an der Konstruktion für die Probenentnahmen wurde unter Berücksichtigung der Querschnittsbeanspruchung und der Gegebenheiten vor Ort, ausgewählt und markiert. Nicht alle vorher festgelegten Stellen waren auch zugänglich, sodass hier geeignete und besser zugängliche Stellen gewählt wurden.

Sowohl die Härtemessung als auch die Materialanalyse bestätigen, die vorher getroffene Annahme in der statischen Berechnung für die Güte und Festigkeit für den Alt-Stahl von RSt37. Es wurde unberuhigt vergossener Stahl verwendet.

Bescheinigt wird dem Alt-Stahl nur eine bedingte Eignung zum Schweißen, aufgrund der teilweise sehr ausgeprägten Seigerungszone. Das heißt die Schweißbarkeit ist somit an spezielle Bedingungen geknüpft, die im Bericht des TÜV nachzulesen sind, und vor Ort umgesetzt werden müssen

3.2 Schweißverfahrensprüfung Neustahl mit Altstahles

Das Verstärken des Gerüsts für die Umnutzung des Fördergerüsts erfordert eine Schweißverfahrensprüfung für Neustahl mit Altstahles in Stumpf- und Kehlnaht in Zwangspositionen. Diese wurde begleitet durch den TÜV.

4 Sofortmaßnahmen bis zur Umsetzung der Akutverstärkungen

- Windmesser am Kopf des Gerüsts, um Stärke und Richtung der Windlasten zu erfassen
- Sofortige Reduzierung der Fördergeschwindigkeit von 4,0 auf 2,0 m / sec
- Die Verstärkungsmaßnahmen an den beiden Eckstielen auf der Langteilstelle werden vorgezogen.
- Monitoring des Gerüsts, um Schiefstellungen festzustellen.
- Regelmäßige Abseilbegehungen im Intervall von einem Monat und nach Starkwindereignissen, um so lokale Verformungen festzustellen.

Andreas Hachmann
ahachmann@aha-hachmann.de

AHA Prüfung und Abnahme
Klausenerstraße 6
45665 Recklinghausen



SCHACHTBAU NORDHAUSEN

Innovativ · Vielseitig · Zuverlässig

Die SCHACHTBAU Gruppe bietet ihren Kunden ein umfassendes Leistungs- und Produktangebot in den Geschäftsfeldern:

- Bergbau
- Anlagentechnik
- Maschinenbau
- Stahlbau

SCHACHTBAU NORDHAUSEN GmbH
Industrieweg 2a · 99734 Nordhausen

Telefon: 03631 632-0
www.schachtbau.de

Der denkmalgerechte Ersatzneubau des Fördergerüsts des Forschungs- und Lehrbergwerks „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg

D. Bodenstab

SCHACHTBAU NORDHAUSEN GmbH

Das Fördergerüst Schacht Reiche Zeche des Forschungs- und Lehrbergwerkes der TU Bergakademie Freiberg prägt die Silhouette der Stadt. Dieses Wahrzeichen Freibergs galt es zu sanieren, natürlich gemäß den strengen Vorgaben des Denkmalschutzes.

Bei dem Projekt mit einem Auftragsvolumen von 2,3 Mio. Euro sollten möglichst viele Bestandteile saniert und wieder eingebaut, alle übrigen baugleich ersetzt werden. So war beispielsweise die 26 m lange Schrägstrebenstütze des Gerüsts konstruktiv noch in gutem Zustand und wurde, ebenso wie einige weitere Einbauteile, zunächst gesichert, in einem Korrosionsschutzzelt vor Ort saniert und anschließend wieder eingebaut. Für das Führungsgerüst einschließlich der Begehanlage hingegen kam nur ein Neubau infrage.

Im April 2021 begann dieses prestigeträchtige Bauprojekt vorerst mit Sicherungsarbeiten und der Demontage des vorhandenen Fördergerüsts. Dabei mussten Dächer und Wände zurück gebaut werden, um die Schrägstrebe vorsichtig herausmanövrieren zu können. In einer spektakulären zweitägigen Aktion wurden Mitte Mai 2021 das Führungsgerüst und die Schrägstrebe vom Fundament gelöst und aus dem Schachthaus herausgehoben.

Im nächsten Schritt erfolgt der Rückbau des gesamten Schachtkopfs und der alten Schachträger. Deren Ersatzneubau entstand, ebenso wie das zunächst zweiteilige Fördergerüst, über Sommer in den Fertigungshallen der SCHACHTBAU NORDHAUSEN GmbH. Im Anschluss an den Rückbau erfolgte die Erstellung der neuen Fundamente für das Führungsgerüst unter den besonderen Randbedingungen des Bauens im Bestand.

Ab September 2021 wurden die Übertageanlagen des Schachts Reiche Zeche dann mit Hilfe aufwendiger Krantechnologie wieder eingebaut. Zunächst erfolgte der Einhub der beiden neuen Schachträger als ein komplexer Stahlrahmen. Schwere Krantechnik manövierte das 6,5 t schwere Stahlbau-Element über das geöffnete Dach in die Schachthalle. Vom 3. – 6. November 2021 wurden das neue Führungsgerüst sowie die sanierte Schrägstrebenstütze, die Seilscheibenbühne samt Seilscheiben und die zugehörigen Begehanlagen des Hauptschachtes des Forschungs- und Lehrbergwerks eingehoben. Nach sechs Monaten kehrte das Wahrzeichen der Region Freiberg nun an seinen Heimatort zurück. In Summe wurden 75 t Stahlbau in Neubau und Sanierung realisiert.

Mit Abschluss der Stahlbauarbeiten erfolgte der Innenausbau der Schachthalle sowie der Verschluss des Schachthallendaches.

Als weiterer Schritt für die Modernisierung der gesamten Anlage erfolgt nunmehr im Jahre 2022 der Aufbau eines neuen Doppeltrommelförderhaspels. Die Entwicklung hierzu basiert auf dem Förderhaspel FH 100 der SCHACHTBAU NORDHAUSEN GmbH.

Danny Bodenstab
danny.bodenstab@schachtbau.de

SCHACHTBAU NORDHAUSEN GmbH
Industrieweg 2a
99734 Nordhausen

Praxisbeispiele aus der Betonlogistik im Schachtbau – eine fördertechnische Herausforderung

T. Ahlbrecht

Redpath Deilmann GmbH

1 Allgemeines

Beton wird im Schachtbau als eines der wichtigsten Materialien verwendet und kommt nahezu in jedem Auftrag zum Einsatz.

Die Arbeitsumstände im Schachtbau sind völlig anders als in anderen Baubereichen wie im Hoch- oder Tiefbau. Dort sind die Baustellen bis dicht an die Baugrube mit Fahrmischern zugänglich und die weiteren Transportwege sind kurz und Platz steht rundum meistens reichlich zur Verfügung. Der Betoniervorgang wird zeitlich genau geplant und darauf hin wird die Logistik mit Kränen oder Betonpumpen ausgerichtet. Die Baustellen laufen überwiegend in der Woche tagsüber ab und man passt sich den Öffnungszeiten der Transportbetonwerke an.

Im Schachtbau arbeiten wir fast immer rund um die Uhr und sieben Tage die Woche und der Beton muss dann verarbeitet werden, wenn die anderen Arbeitsvorgänge es erfordern.

Und bei uns ist es immer eng und weit weg von der Oberfläche. Der Fahrmischer kommt also nicht zum Einbauort, sondern nur bis zur Rasenhängebank. Ab da geht es dann „Irgendwie“ anders weiter und dieses „Irgendwie“ muss jedes Mal neu geplant und am Ende auch gemacht werden.

Die Anforderungen aus den Beton-Normen sind insgesamt ein dickes Kapitel für sich, die immer mit dabei sind und das Ganze nicht eben vereinfachen.

2 Anwendung von Beton

Entweder wird der Beton als „Ortbeton“ verarbeitet, das heißt der frisch angemischte Beton wird hinter eine Schalung gebracht, um dann auszuhärten. Alternativ verarbeiten wir den Beton als Spritzbeton, den wir auf eine Fläche auftragen. Diese beiden Arten von Beton benötigen völlig unterschiedliche Konzepte und Einrichtungen, was keine große Überraschung ist.

Schachtbau umfasst drei wesentliche Anwendungen, wo ebenfalls jeder seine Eigenheiten hat:

- Neubau von Schächten
- Sanieren von Schächten
- Verwahren von Schächten

Die geforderten Eigenschaften des Betons als Material und die logistischen Methoden unterscheiden sich in den drei Anwendungen vollkommen.

Wie wird der Beton denn nun angeliefert und bis zur Einbaustelle gebracht?

Die Anlieferung an den Schacht über Tage kann als Sackware, in Big-Bags, mit Silos oder mit Fahrmischern erfolgen.

Der Ortbeton kann dann mit Transportkübeln oder einer Fall-Leitung nach unten in den Schacht gebracht werden. Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile, die im Vortrag detailliert beschrieben werden.

Bei der Verfahrensauswahl steht am Anfang immer die Frage nach der erforderlichen Einbauleistung an erster Stelle, denn danach bemessen sich alle Einzelkomponenten die zur Aufgabenerfüllung benötigt werden.

Die geforderten Betonqualitäten und die daraus resultierenden Rezepturen kommen dann im weiteren Lauf der Planung ins Spiel.

Beim Spritzbeton gibt es einmal das Dünnstrom-Verfahren, bei dem die Förderleitung nicht komplett mit Beton gefüllt ist. Das Verfahren ist beim Trockenspritzen erste Wahl, beim Nass-Spritzen eher selten.

Das andere Verfahren ist das Dichtstrom-Verfahren, wo die Förderleitung vollständig gefüllt ist. Das Verfahren ist typisch für das Nass-Spritzen und wird insbesondere in Verbindung mit Manipulatoren eingesetzt.

3 Praxis-Beispiele

3.1 Tiefer Teufen Prosper Schacht 10

Das erste Beispiel ist das Tieferteufen des Schachtes Prosper 10 in Bottrop, was schon etliche Jahre zurück liegt.

Dabei musste der Ortbeton mit einer Fall-Leitung bis fast 1300 m Teufe nach unten zur Schalung gelangen, ohne den laufenden Schachtbetrieb zu stören.

Dazu wurde eine Rohrleitung von über Tage bis circa 1000 m Teufe eingebaut, die dann mit dem Fortschritt beim Abteufen verlängert wurde.

Im Vortrag wird der Einbau und der Betrieb der Leitung beschrieben, sowie das Drum-Herum beim Einbau des Betons geschildert.

3.2 Abteufen Kali-Schächte in Belarus

Für den Neubau von zwei Schächten auf der grünen Wiese in Weißrussland waren ganz andere Randbedingungen maßgeblich:

- Baustelle auf der grünen Wiese ohne Transportbetonlogistik
- Gefrierschächte
- mechanisiertes Teufen mit hoher Tagesleistung

Es wurde ein Betonwerk nur für die beiden Schächte errichtet und man hat sich für die Förderung mit Kübeln entschieden.

Die Einzelheiten von der Befüllung der Kübel über Tage bis zum Verarbeiten des Betons im Schacht werden im Vortrag beschrieben.

3.3 Sanierung Schacht Zielitz 1

Die Arbeitsstelle für die Sanierung des Schachtausbaus im Schacht Zielitz 1 befindet sich mitten im Schacht circa 550 m unter der Oberfläche und circa 150 m über dem Füllort.

Im Schacht Zielitz 1 läuft praktisch nur die Förderung von Rohsalz im Durchlaufbetrieb an 24 Stunden pro Tag und sieben Tagen die Woche.

Die Schachtsanierung kann daher nur in recht kurzen Sommerpausen von circa drei Wochen Dauer erfolgen. Der Beton wird als Spritzbeton eingebracht.

Im Sommer 2021 wurde das Nass-Spritzverfahren mit aufwärts gerichteter Förderung zur Baustelle eingesetzt. Diese Technologie wies zahlreiche Unzulänglichkeiten auf und konnte nicht erfolgreich angewendet werden.

Daher musste für die Fortsetzung der Sanierung in den Jahren 2022 und 2023 das Verfahren umgestellt werden und es wird das Trockenspritzverfahren mit Versorgung in Big-Bags von über Tage zur Anwendung kommen.

4 Schachtverwahrung

Die Betonlogistik bei der Schachtverwahrung hat wieder andere Randbedingungen und zahlreiche Feinheiten, die hier zu schildern den Rahmen sprengen würde.

Daher wird zu diesem Bereich hier nichts vorgetragen, was aber andere Kollegen nicht davon abhalten sollte, dazu zu berichten.

Thomas Ahlbrecht

thomas.ahlbrecht@deilmann-haniel.com

Deilmann Haniel GmbH
Haustenbecke 1
44319 Dortmund

DAMIT ES SICHER LÄUFT



Not-Halt-Geräte



Positionsschalter



Geschwindigkeits- überwachung



Die Marke KIEPE ist in der Schüttgutindustrie bekannt für hochwertige und ausgereifte Produkte „Made in Germany“ zur Überwachung und Steuerung von Förderbandanlagen. Weltweit wurden über 80.000 km Förderbandanlagen mit KIEPE-Produkten ausgestattet, die den rauen Umgebungsbedingungen der Schüttgutförderung trotzen.

 **KIEPE ELECTRIC**

Kiepe Electric GmbH

Kiepe-Platz 1 · 40599 Düsseldorf
Telefon +49 (0) 211 7497-280
info@kiepe-elektrik.com
www.kiepe-elektrik.com



Mechanische Gewinnungsbohrgeräte für den Reef- und Gangerzbergbau

M. Trenke

Perforator GmbH

Einleitung

Der Abbau von Reef- und Gangerzlagerstätten stellt eine nicht unwesentliche Herausforderung an die zur Gewinnung nötige Technologien. Aus diesem Grund treibt die Perforator GmbH die Entwicklung von mechanischen Gewinnungsbohrgeräten für diese Lagerstättentypen stetig voran. Die Herausforderung ist, speziell beim untertägigen Einsatz, die Baugröße, die Mobilität als auch die Logistik. Der Mensch soll dabei die Gefahrenbereiche nicht mehr betreten und wenn möglich nur noch minimal in den Abbauprozess eingreifen. Für eine mögliche Etablierung des Gewinnungsbohrens sind die Kosten ein wesentlicher Faktor auf dem Weg zur späteren Realisierung. Folgende Anwendungsfälle der Technologie werden im Moment untersucht:

- Reef mining – Ausbohren des Flözes
- Pillar optimization – Ausbohren vorhandener Pfeiler
- Großlochentgasungsbohrungen in der Kohle
- Versorgungs- sowie Wetterbohrungen
- Rettungsbohrungen
- Verrohrte Bohrungen um Störungen zu durchörtern

1 Aufgabenstellung

Im Abbau der untertägigen südafrikanischen Chrom und Platin Reef-Lagerstätten ist der Grad der Mechanisierung immer noch sehr niedrig. Es sind meist noch handgeführte Bohrhämmer zur Herstellung der Sprenglöcher und zum Ankern der Firste im Einsatz. Der Materialtransport wird zum Teil noch über Schrapper realisiert, die das Material in Rolllöcher transportieren, von wo aus es mit radgestützten Fahrladern und anderen Transportmitteln abtransportiert wird. Die Transport- und Förderstrecken befinden sich unterhalb der Flöze. Der Abbau selbst benötigt einen sehr hohen Einsatz von menschlicher Arbeitskraft.

In anderen Bergwerken werden die Querschnitte so groß aufgefahren, dass alles mit radgestützten Fahrzeugen bis zur Übergabe auf das Förderband realisiert werden kann. Der Nachteil hierbei ist die große Menge an anfallenden Bergen, wodurch die Kosten der Aufbereitung deutlich erhöht werden.

Zur Produktivitätssteigerung der vielen Tagebaue ist die Idee entstanden, das Erz, welches sich durch die zu große Überdeckung nicht mehr wirtschaftlich gewinnen lässt, aus zu bohren. Ähnlich wie es bei der Steinkohleförderung in den USA praktiziert wird.

2 Erprobungen im Tagebau

Die ersten Versuche wurden Anfang 2019 in einem Tagebau in Südafrika durchgeführt. Hierzu wurde eine leicht modifizierte Pressbohranlage vom Typ Perforator PBA 155 eingesetzt, siehe Abbildung 1. Ziel dieser ersten Feldversuche war die Validierung der angenommenen Bohrleistung und die damit verbundenen Verschleißwerte des Bohrwerkzeuges. Es wurde Chromerz des MG4 Reefs mit einer Festigkeit von 80 MPa und einem Chertchar von 4 gebohrt. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Bereich des Ausbisses die Festigkeit durch Witterungseinflüsse etwas niedriger lag.



Abbildung 1: Probebohrungen mit einer Pressbohranlage des Typs PBA155 in Südafrika

Die Bohrtiefe lag bei maximal 36 m bei einem Bohrdurchmesser von 520 mm. Die Bohrungen wurden als unverrohrte und ungesteuerte Sacklochbohrung ausgeführt. Die Richtungsgenauigkeit lag bei circa 30 cm Abweichung auf 30 m Bohrtiefe. Dies wurde durch eine Kaliberschnecke mit Rückzugsschneiden, für etwaige auftretenden Konvergenzen, gewährleistet. Der Feldversuch hat allerdings gezeigt, dass es zu einer deutlichen Aufweitung des Bohrloches durch die Schneckenflügel kommt, wodurch die Förderleistung über dem zu erwartenden Volumen lag. Dieser Effekt wurde aber nicht weiter untersucht, da das Bohrloch nicht auf kompletter Länge vermessen wurde. Die Netto Bohrgeschwindigkeit, also ohne Schneckenwechsel und andere Aufgaben, lag bei 20 m / h. Durch den verwendeten Schneckentyp und die fehlende Infrastruktur, zum Wechseln der Schnecken, sind die Brutto Bohrgeschwindigkeiten nicht sehr aussagekräftig. Diese lag trotz der nicht idealen Vorraussetzungen bei 11 m / h.

Die an den Schnecken verbauten Verbinder sind für zielgerichtete verrohrte Bohrungen ideal, allerdings brachte das Abtauchen der Schnecken beziehungsweise die Aufweitung der Bohrungen eine Achsverlagerung mit sich, wodurch der Koppelvorgang sehr kompliziert und zeitraubend wurde. Die Ergebnisse dieser Erprobung sind äußerst vielversprechend und wurden zum Anlass genommen, weitere Tests im untertägigen Bereich durchzuführen. Gebohrt wurde mit einem mit Rundschafftsmeißeln besetzten Schneidrad.

3 Erste Tests Untertage

Bei den untertägigen Tests war die Situation eine völlig andere. Das UG2 Chromerz Reef wies eine sehr viel höhere axiale Druckfestigkeit auf als das zuvor im Tagebau gebohrte MG4 Erz. Die Material Analyse ergab eine axiale Druckfestigkeit von 105 MPa und einen Charpy von 4,1. Der Materialverschleiß nach 20 cm Bohrtiefe widerspricht dieser Annahme. Die Auswirkungen sind in Abbildung 2 dargestellt und zeigen einen extrem beschädigten Bohrkopf. Es ist davon auszugehen, dass die Materialprobe aus einem anderen Bereich des Reefs entnommen wurde und somit nicht die an unserem Bohrplatz vorherrschenden Bedingungen abbildete. Anhand des Verschleißes und der Verformung, an den von uns eingesetzten Bohrköpfen, schätzen wir die Druckfestigkeit auf 200 MPa.



Abbildung 2 Stark beschädigte Rundschafftsmeißel nach 20cm Bohrtiefe



Abbildung 3: Bohrloch mit Tricone im Vorderrund

Die auf der Abbildung 3 zu sehende Bänderung unterstreichen diese These. Außerdem sind im unteren Bereich der Ortsbrust deutlich die Laufbahnen der Schneidringe zu sehen, was darauf schließen lässt, dass die Chips nicht wie im oberen Bereich abplatzen. Die erreichte Bohrgeschwindigkeit lag bei 1 m/h mit einem nicht unerheblichen Verschleiß an den Bohrwerkzeugen. Ein mögliches Konzept zur wirtschaftlichen Nutzung des Gewinnungsbohrens wäre die Hinterschneidtechnik. Ein Bohrkopfkonzept ist in Abbildung 4 zu sehen.

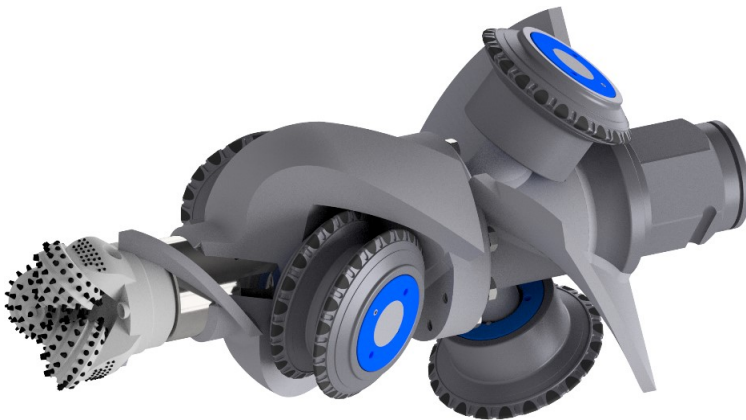


Abbildung 4: Bohrkopfkonzept mit integrierter Schnecke

Bei diesem Konzept wird über den Tricone das Pilotloch gebohrt und die Schneidrollen brechen das Material in das Pilotbohrloch hinein. Es handelt sich also um eine Hybridlösung. Die für den Material nötigen Flügel wurden in den Bohrkopf integriert.

Eine weitere Möglichkeit wäre das Rotary Percussion Drilling. Bei diesem Verfahren wird ein Tricone durch ständige Hammerschläge wie bei einem DTH Hammer beaufschlagt. Allerdings sind die aus dem Hammer abgegebenen Impulse schwächer und gleichzeitig höher frequent. Diese Technologie bieten sich eher bei vergleichsweise kleinen Bohrdurchmessern an.

Für das Jahr 2022 sind weitere untertägige Versuche geplant, um die Bohrkopfkonzepte zu erproben.

4 Konzeptmaschinen

Neben der Erprobung der Schneidwerkzeuge ist die Entwicklung und Konzeption des Maschinen- / Abbaukonzeptes eine wesentliche Aufgabe zur Integration dieser Technologie in die bestehenden Bergwerke. Ausgehend von den oben genannten Anwendungsszenarien wurden mehrere Maschinentypen entwickelt. Die Abbildung 5 zeigt den Mechanical Reef Miner MRM 100/71M. Diese Maschine verfügt über 1.000 kN Presskraft und 71.000 Nm Drehmoment. Die maximale Drehzahl beträgt 40 Umdrehungen pro Minute und es kann ein maximaler Durchmesser von 1.000 mm gebohrt werden. Der Bohrprozess ist nahezu vollautomatisch. Lediglich die Übergabe zwischen Manipulator und Schneckenmagazin erfordert ein Eingreifen des Menschen. Die Bohrtiefe für das Bergwerkslayout wurde auf 30 m festgelegt, da die Abweichung der Bohrungen überschaubar ist. Im hinteren Bereich der Maschine befinden sich die elektro-hydraulische Einheit zur Versorgung der Bohreinheit.

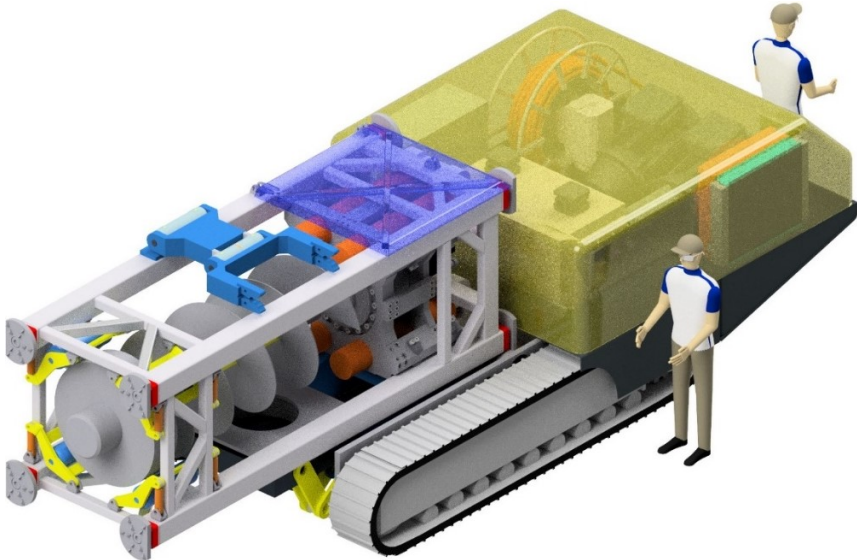


Abbildung 5: Mechanical Reef Miner MRM 100/71M in der Transportstellung

Die Maschine verfügt über eine Transportstellung, siehe Abbildung 5 und eine Arbeitsstellung. Das Gesamtkonzept, welches in Abbildung 6 dargestellt ist, zeigt die Integration der Maschinenkomponenten in das Bergwerkslayout. Die Streckenquerschnitte sind den jetzigen Gegebenheiten größtenteils angepasst, damit es nur zu einem minimalen Eingriff in die jetzigen Abläufe kommt. Das aus dem Bohrloch austretende Material wird über Förderbänder abtransportiert.

Das Abbaukonzept sieht vor, im ersten Schritt jedes zweite Loch zu bohren, im Nachgang zu verfüllen und um anschließend die Zwischenlöcher zu bohren. So soll die Stabilität des Deckgebirges sichergestellt und ein Durchbrechen in die Nachbarbohrung verhindert werden. Die geschätzte Bohrleistung liegt bei 60 – 120 m/Tag (2 - 4 Bohrungen). Der Vorteil bei diesem Konzept ist, dass sich nur der Bohrkopf und die Schnecken in dem nicht gesicherten Bereich befinden. Somit können alle für die Funktion relevanten Komponenten jederzeit erreicht werden.

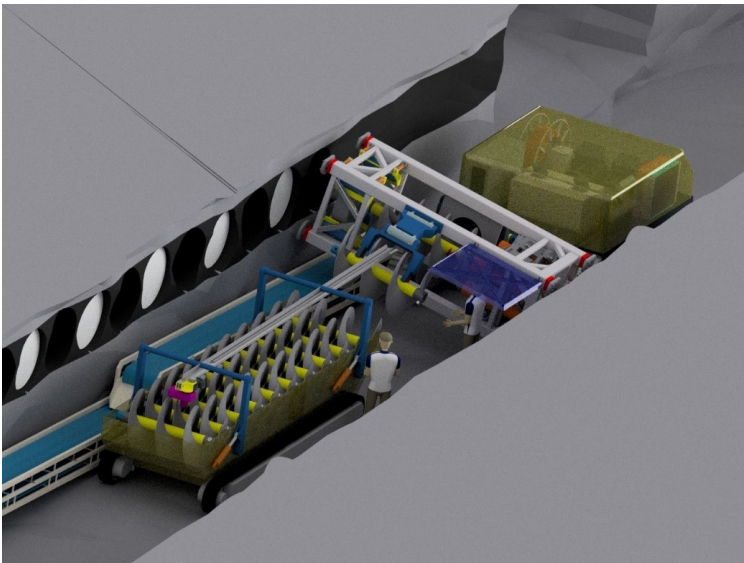


Abbildung 6: Abbaukonzept und Layout für den MRM 100/71M

Ein weiterer Maschinentyp der in den Grundsätzen der oben vorgestellten Maschine ähnelt, ist die MRM 100/71M LF. Hier liegt der Schwerpunkt in der Optimierung bestehender Abbaufelder. Ein Großteil der bisherigen Abbaukonzepte basierte auf dem Kammerpfeilerbau, wodurch eine unzählige Anzahl von Pfeilern mit einem sehr hohen Gehalt an Chrom und Platin vorhanden sind. In den früheren Jahren wurden diese Pfeiler teilweise deutlich überdimensioniert, wodurch eine große Menge Erz in diesen Pfeilern verblieben ist. Da eine nachträgliche Verkleinerung der Pfeiler nicht zulässig ist, wurde die Idee entwickelt diese Pfeiler zu optimieren. Im ersten Schritt werden eine oder mehrere Bohrungen in den Pfeiler eingebracht und anschließend wieder verfüllt.

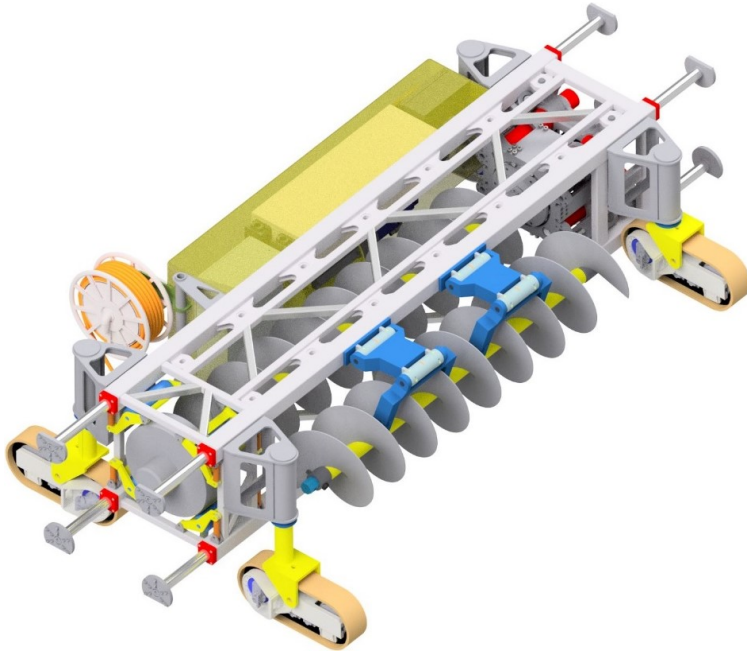


Abbildung 7: Mechanical Reef Miner MRM 100/71M LF in der Arbeitsstellung

So soll ein Teil der in den Pfeilern verbliebenden Erze nachträglich gewonnen werden. Zu diesem Zweck wurde die in Abbildung 7 zu sehende Maschine entwickelt. Die MRM 100/71M LF benötigt kein Schneckenmagazin, da die komplette Bohrlänge von 8 m durch die in und an der Maschine befindlichen Schnecken abgebohrt werden kann. Durch die vier Raupenketten ist die Maschine sehr manövrierfähig und kann auch in anspruchsvollen Strecken sicher gesteuert und positioniert werden.

5 Zukunftsaussichten

Die kontinuierliche Verbesserung der Arbeitsbedingungen und die in allen Bereichen Einzug haltende Automatisierung wird dazu führen, dass die mechanische Gewinnung zukünftig auch in Niedriglohnländern einen immer größeren Stellenwert erreicht. Es ist davon auszugehen, dass die immer noch im Einsatz befindlichen Wurfschaufellader und Schrapper irgendwann ganz aus dem weltweiten Bergbau verschwunden sind. In Deutschland stehen sie schon lange im Museum und in vielen Ländern dieser Erde verrichten sie ihren täglichen Dienst.

Aus diesen Gründen ist es wichtig neue Technologien zu erproben und so lange weiter zu entwickeln, bis es möglich ist einen sicheren und störungsunempfindlichen Betrieb auch in den heute noch nicht vorstellbaren Anwendungen beziehungsweise Lagerstätten sicherzustellen. Die Herausforderung treibt uns an Produkte zu entwickeln die genau dieses Ziel erreichen, um dem Markt von morgen, die Maschinen zu bieten die er zukünftig verlangt.

Die Nachnutzung von abgeworfenen Grubenbauen, wie es beim Pillar optimization zur Anwendung kommt, schont indirekt die Ressourcen, da die Ausnutzung der Lagerstätte verbessert wird. Neben den für den Erzbergbau in der Konzeption befindlichen Maschinen gibt es auch erste Ideen für weitere Anwendungsgebiete. Auf der Abbildung 8 ist eine Auger Boring Machine ABM 80/71MX zu sehen. Diese Maschine wurde entworfen, um die Anzahl kleinerer Entgasungsbohrungen zu reduzieren und gleichzeitig eine bessere Entgasung der Steinkohle zu ermöglichen. Die angestrebte Bohrlochtiefe beträgt 150 m bei einem Durchmesser von maximal 500 mm.

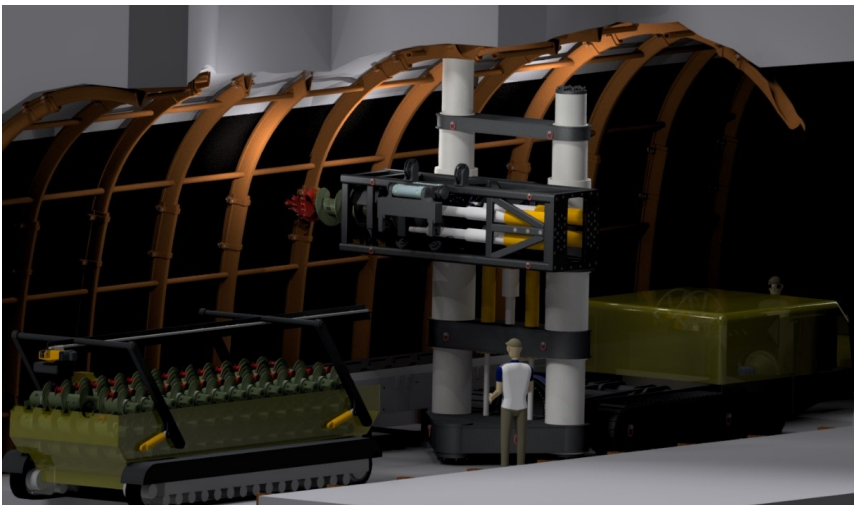


Abbildung 8: Auger Boring machine ABM 80/71MX in einer Abbaubegleitstrecke

Neben den unverrohrten Anwendungen sind auch verrohrte Anwendungen, wie sie in der Pressbohrtechnik eingesetzt werden, denkbar, zum Beispiel beim Durchfahren von Störungen oder sehr wechselnden oder wasserführenden geologischen Formationen.

6 Zusammenfassung

Die Perforator GmbH ist mit ihrer langjährigen Erfahrung im Bergbau seit mehreren Jahren aktiv an der Entwicklung von Gewinnungsbohrgeräten für den weltweiten Einsatz tätig. In den vergangenen Jahren wurden mehrere in situ Tests dieser Technologie in Südafrika, sowohl Über- als auch Untertage durchgeführt. Neben dem Gewinnungsbohren ist auch die Pfeileroptimierung ein sehr interessanter Einsatzbereich der immer mehr an Bedeutung gewinnt. Durch die in den Erprobungen gewonnenen Erkenntnissen wurden die verschiedenen Maschinenkonzepte weiterentwickelt und optimiert. Es sind für das Jahr 2022 weitere Versuche zur Verbesserung der Schneidgeometrie und Standzeiterhöhung geplant. In diesem Zusammenhang ist geplant die Integration des Gewinnungsbohrgerätes in den Abbau-/ Optimierungsprozess zu validieren

Marcus Trenke
mtrenke@perforator.de

PERFORATOR GmbH
Bei dem Gerichte
37445 Walkenried



**COMPETENCE
BY EXPERIENCE.
YOUR PARTNER.**

folloverein

TÄTIGKEITSFELDER

- Schachtbau
- Bohren
- Streckenvortrieb
- Grubenwasserhaltung
- Engineering und Planung
- Fördermaschinentechnik
- Windentechnik
- Sondermaschinen
- Baustofftechnik
- Sonderstahlbau

Schachtsanierung Atomforschungslabor Mol mit wiederverwendbarem Fördersystem

J. Kölmel, D. Zelenka

THYSSEN SCHACHTBAU GmbH

Kurzzusammenfassung

Im Jahr 2019 erhielt die THYSSEN SCHACHTBAU GmbH den Auftrag, einen Schacht (\varnothing 2,65 m, Teufe 225 m) eines untertägigen Endlagerlabors in Mol, Belgien, zu sanieren. Dies umfasste die Demontage sämtlicher Installationen und den Einbau einer modernen Anlage. Zur Umsetzung wurde ein wiederverwendbares Fördersystem aufgebaut. Das wiederverwendbare Fördersystem und die permanente Schachtanlage wurden aufgrund fehlender belgischer Bestimmungen nach TAS zertifiziert. Das Projekt beinhaltet die Übergabe eines schlüsselfertigen Gesamtsystems mit hohen sicherheitstechnischen Ansprüchen.

1 Beschreibung der Schachtanlage

Das Untertagelabor „Hades“, besteht aus zwei Schächten, verbunden durch eine 150 m lange Strecke, die sogenannte Galerie. Ausgehend von dieser Galerie gibt es noch zwei kurze Blindstrecken sowie einen Blindschacht. Die beiden Tagesschächte haben jeweils eine Teufe von circa 225 m, der Blindschacht ist circa 22 m tief (Abbildung 1). Da die belgische Forschung zur untertägigen Endlagerung sich auf verschiedene Tonschichten konzentriert, wurde das Untertagelabor „Hades“ im „Boom-Ton“ aufgefahren, um diese Tonschicht auf verschiedenste Einflüsse zu untersuchen EURIDICE [1].

„Hades“ liegt im Norden des Ortes Mol in Belgien, circa 130 km westlich von Mülheim an der Ruhr. Der Betreiber ESV Euridice GIE nutzt das Labor hauptsächlich zur Forschung, aber auch zur Öffentlichkeitsarbeit für nationale und internationale Interessenten, Schüler und Studierende.

Die ehemalige Fördertechnik von Schacht 1 basierte auf einer elektrischen Bobinenanlage aus den 50er Jahren, die vor Mol in einem belgischen Steinkohlebergwerk im Einsatz war EURIDICE [2]. Desweiteren war ein Fahrtentrum zum Zwecke der Notfahung im Schacht verbaut. Das Fördermittel wurde mittels Briartscher Führung an zwei leichten Vignolschienen Profil S20 geführt. Die Signaltechnik bestand aus einem mechanischen Schachthammer sowie Handfunkgeräten, die mittels Schlitzkabel über das gesamte Bergwerk eine Kommunikation ermöglichen. Diese Technik und der erste optische Eindruck der Anlage erzeugten bei Besuchern den Anschein von wenig Komfort und geringer Sicherheit.

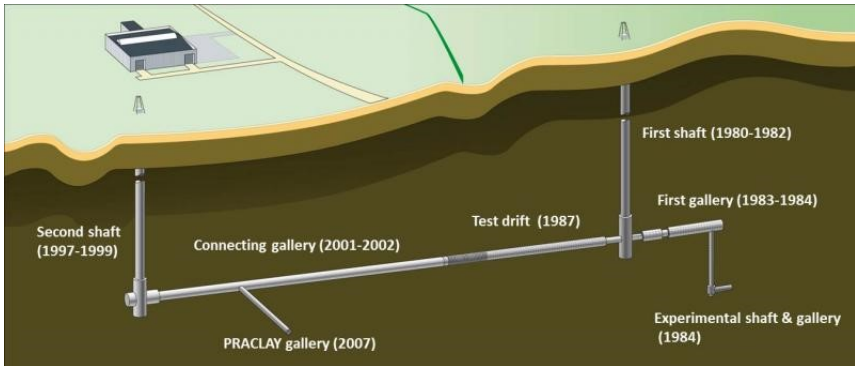


Abbildung 1: Aufbau Forschungslabor Hades EURIDICE [3]

2 Projektplanung, Ziele und Umsetzung

Die THYSSEN SCHACHTBAU GmbH wurde damit beauftragt, die in die Jahre gekommene Technik des Schacht 1 komplett zu erneuern. Diese Arbeiten umfassten die vorhandene Förderanlage einschließlich Führungseinrichtungen im Schacht zu demontieren und eine kleine Seilfahranlage sowie eine Hilfsfahranlage inklusive aller dazu notwendigen Einbauten zu planen, zu konstruieren und einzubauen. Dabei wurden sowohl die Seilfahrts- als auch die Hilfsfahranlage bei unserem Tochterunternehmen OLKO Maschinentechnik GmbH in Auftrag gegeben. Die wichtigste Rahmenbedingung des Auftrages war, dass die neue Förderanlage TAS konform zertifiziert werden musste, da keine vergleichbaren belgischen Richtlinien mehr existieren, sowie eine selbstverständliche Sicherheit auch für bergwerkfremdes Personal zu schaffen. Des Weiteren sollten eine ausführliche Dokumentation und eine benutzerfreundliche Bedienungsanleitung für die neue Förderanlage übergeben werden. Die HSEQ Anforderungen des Auftraggebers waren unter anderem aufgrund der direkten Nähe zu einer nuklearen Anlage immens.

Nachdem die alte Förderanlage abgerissen war, wurde ein temporäres Fördergerüst aufgebaut. Dieses wurde modular geplant, damit es auch bei anderen Schächten mit ähnlichen Durchmessern wieder zum Einsatz kommen kann. Es hat eine Grundfläche von 5,8 x 24 m mit einem 13 m hohen Teufgerüst. Auf dem Trägerrahmen ist Platz für drei Winden beziehungsweise Haspel, davon eine Bühnenwinde, ein Förderhaspel zur Befahrung (jeweils 70 kN, 47 kW) und eine Fördereinrichtung beziehungsweise Notfahranlage (30 kN, 25 kW) (Abbildung 2). Als das temporäre System vollständig aufgebaut war, erfolgte eine externe Teilabnahme der Anlage nach TAS.



Abbildung 2: temporäres Fördergerüst

Da viele Sicherheitselemente erst getestet beziehungsweise eingebaut werden konnten, nachdem die ersten circa 30 m im Schacht geraubt worden waren, folgte die Hauptabnahme einige Zeit später. Für die Arbeiten im Schacht wurde eine Arbeitsbühne gefertigt, die aufgrund der Beengtheit des Schachtes, insbesondere mit dem alten Ausbau so konstruiert wurde, dass sie bei Bedarf durch zweigeteilte Klappen, welche in Richtung Fahrtentrum gerichtet waren, vergrößert werden konnte (Abbildung 3).

Die Arbeitsbühne wurde mit dreierlei Führungselementen ausgerüstet, welche je nach Bedarf angebaut und genutzt werden konnten. So wurde während des Raubens die Bühne mit Führungsschuhen an den vorhandenen Vignolschienen geführt, bis diese geraubt wurden. Danach wurden die Führungsschuhe gegen Führungsrollen getauscht, um eine Führung am Betonausbau zu ermöglichen. Sobald die neuen Spurlattenstränge des Hauptkorbs montiert waren, konnten weitere Führungsschuhe montiert werden, um die Arbeitsbühne wiederum an den permanenten Spurlatten führen zu können.

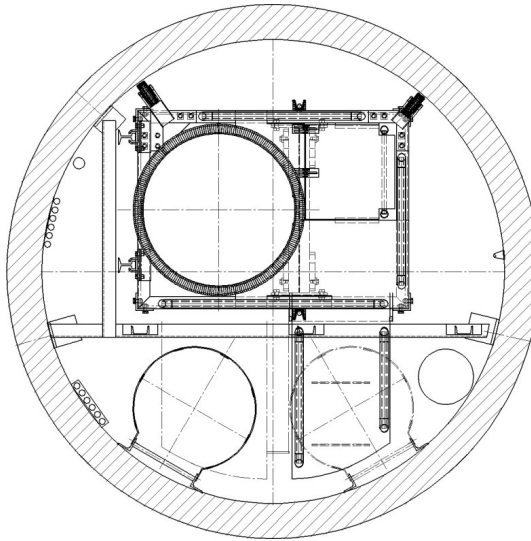


Abbildung 3: Schachtscheibe während der Raubarbeiten

Besonderes Augenmerk während aller Arbeiten lag selbstverständlich auf der Arbeitssicherheit. Dafür wurde jeder Arbeitsschritt im Vorhinein ausführlich analysiert, beschrieben und anschließend mit den Ausführenden besprochen. Da das Schachtpersonal somit frühzeitig eingebunden war, wurde eine hohe Akzeptanz erreicht. Die Tätigkeiten im Bereich der Rasenhängebank erforderten ein hohes Maß an Koordination mit den Auftragnehmern der Partnerlose und dem Kunden, um ein sicheres Geschehen über Tage zu gewährleisten. Bis zum Abschluss des Projektes gab es aufgrund der professionellen Herangehensweise aller Beteiligten keine sicherheitsrelevanten Vorkommnisse.

3 Beschreibung der permanenten Förderanlage

Die zwei neuen Fördermaschinen wurden von der OLKO Maschinentechnik GmbH, einem Tochterunternehmen der THYSSEN SCHACHTBAU GmbH, nach Kundenanforderungen geplant, gefertigt und gemeinsam auf der Baustelle in Betrieb genommen. Die kleine Seilfahrtsanlage hat eine Leistung von 132 kW, 1.450 mm Trommeldurchmesser und ist für 2 m / s ausgelegt. Die Hilfsfahrgang ist für 1 m / s ausgelegt, hat eine Leistung von 22 kW und 810 mm Trommeldurchmesser. Die jeweilige Software ist vollständig von Olko programmiert. Die Stromversorgung der Hilfsfahrgang lässt sich mit einem Handgriff auf ein stationäres Dieselaggregat umlegen.

4 Besondere Herausforderungen

Im Verlauf der Montagearbeiten gab es eine Reihe von Herausforderungen, für die jeweils angemessene Lösungen gefunden werden mussten. Es war bereits zu Projektbeginn bekannt, dass der Schacht nicht seiger geteuft wurde. Über den gesamten Verlauf ist eine Verschiebung in alle Richtungen gegeben (Abbildung 4). Um diese Verschiebung kompensieren beziehungsweise dieser folgen zu können, sollten die Spurlatten maximal 3,5 m lang sein. Dies allein hätte jedoch nicht gereicht, um die äußerst herausfordernde Aufgabe des Einbaus der vier Spurlattenstränge zu meistern. Gemeinsam mit dem geringen Durchmesser erforderte dies eine zentimetergenaue Positionierung aller Einbauten, damit die Abstände nach TAS eingehalten werden können. Die Schiefstellung des Schachtes setzt sich bis in die Schachtglocke ($\varnothing 4,00$ m) fort. Diese hat auf einer Höhe von circa 12 m eine Verschiebung von circa 14 cm, bei maximalen Abweichungen von bis zu 26 mm / m.

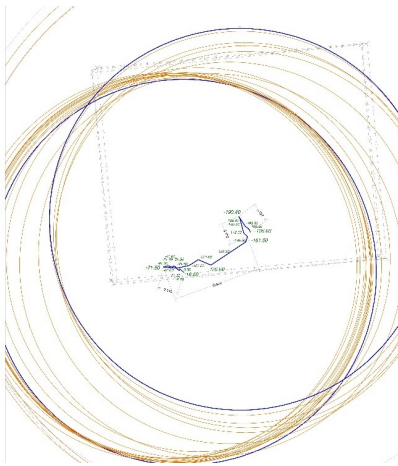


Abbildung 4: Schachtverlauf

Aufgrund der Schiefstellung und der Enge des Schachtes durften für die permanenten Förderkörbe keine Schleppkabel verwendet werden. Die Signalübertragung zu den beiden Fördermitteln erfolgte erstmals bei der THYSEN SCHACHTBAU GmbH über die gesamte Teufe des Schachts via WLAN. Zu Beginn des Projektes wurden dafür Versuche durchgeführt, indem eine WLAN Verbindung von über Tage durch den gesamten Schacht bis weit in die Galerie aufgebaut wurde. Dies bestätigte die THYSEN SCHACHTBAU GmbH bei der Entscheidung, eine Datenübertragung mittels WLAN zu installieren (Abbildung 5). Dazu wurden die beiden Fördermittel mit Übertrageeinheiten ausgestattet, sowie im Fördergerüst jeweils eines pro Fahrweg. Auch auf der Galerieebene wurde eine weitere Übertrageeinheit für die Hauptfahrweg eingebaut.

Nach anfänglichen Schwierigkeiten konnten die Einheiten so ausgerichtet und programmiert werden, dass die Verbindung beider Fahrungen über die gesamte Tiefe zuverlässig steht. Die Stromversorgung der Körbe erfolgt über je einen Akku pro Korb. Die THYSSEN SCHACHTBAU GmbH entschloss sich, erstmals Lithium-Ionen-Batterien mit induktivem Ladegerät zu verbauen, zum einen um möglichst wenig Raum zu benötigen, zum anderen um dem Kunden eine möglichst einfach handhabbare Alternative zum Schleppkabel, wie es an Schacht 2 bereits eingesetzt wird, zu bieten. Das induktive Laden der Batterien am Anschlag Rasenhängebank hat zudem den Vorteil, dass ein Tausch der Batterien nur in äußerst langen Intervallen notwendig wird.

Zur Ladung wurde je Korb ein kontaktloses induktives Ladegerät installiert, welches die jeweilige Batterie stets auflädt, wenn der Korb bündig am Anschlag Rasenhängebank steht. Der Energieverbrauch der Körbe wurde auf ein Minimum reduziert, sodass diese über circa 15 Stunden ohne Ladung oder einen Batteriewechsel betrieben werden können.



Abbildung 5: Die beiden Fördermittel im Führungsgerät. Mit WLAN Funkmodulen und induktiven Ladestationen

5 Quellen

- [1] EURIDICE: www.euridice.be/en/content/geological-disposal-clay (abgerufen am 04.08.2021)
- [2] EURIDICE: www.euridice.be/en/node/794 (abgerufen am 04.08.2021)
- [3] EURIDICE: www.euridice.be/sites/default/files/editor/constructie%20HADES%20GB.jpg (abgerufen am 04.08.2021)

Johannes Kölmel, M.Sc.
koelmel.johannes@ts-gruppe.com

David Zelenka, M.Sc.
zelenka.david@ts-gruppe.com

THYSSEN SCHACHTBAU GmbH
Sandstraße 107-135
45473 Mülheim an der Ruhr

GLOBALROCK

Securing Raw Materials
to Value Chains



Vorankündigung

23. Kolloquium

Bohr- und Sprengtechnik

01. & 02. Februar 2023

Clausthal-Zellerfeld



www.bus2023.de

Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern

N. Bertrams

BGE Technology GmbH

Abstract

Für die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in einem Endlagerbergwerk werden in Deutschland verschiedene Varianten diskutiert: Einlagerung in horizontalen Strecken, in vertikalen Bohrlöchern, in horizontalen Bohrlöchern oder in horizontalen Kurzbohrlöchern. Im F&E Vorhaben TREND wurde die notwendige Technik zur Realisierung dieser Varianten auf konzeptionellem Niveau konstruktiv entwickelt beziehungsweise weiterentwickelt. Neben der Berücksichtigung der Erfahrungen aus Demonstrationsversuchen umfasst dies auch die Einbindung aktueller Anforderungen an die Technik. Die Einlagerungsvorgänge wurden mit Hilfe der entwickelten CAD Modelle animiert. Für die Einlagerungskonzepte liegt damit eine einheitliche Planungsgrundlage vor, die eine Übertragung auf alle Wirtsgesteine ermöglicht.

1 Einleitung

Der Stand von Wissenschaft und Technik in Deutschland zur Einlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen und ausgedienten Brennelementen (hochradioaktiven Abfällen) im tiefen Untergrund umfasst vier verschiedene Einlagerungsvarianten für drei in Frage kommende Wirtsgesteine. Diese Einlagerungsvarianten sind die Einlagerung in horizontalen Strecken, in vertikalen Bohrlöchern, in horizontalen Bohrlöchern und in horizontalen Kurzbohrlöchern. Als Wirtsgesteine werden Salzgestein in flacher und steiler Lagerung, Tongesteinsformationen von geringer und großer Mächtigkeit, Kristallingesteinsformationen mit überlagernden sedimentären Schichten sowie weitere Kristallingesteinsformationen unterschieden.

Im Rahmen der anwendungsorientierten Grundlagenforschung wurden in der Vergangenheit verschiedene Endlagerkonzepte erarbeitet, in denen jeweils eine Einlagerungsvariante für eine Wirtsgesteinsformation ausgewählt wurde. Eine Einlagerungsvariante beruht wesentlich auf der jeweils zugehörigen Technik zum Transport und zur Einlagerung der Abfallgebände. Damit ist die Transport- und Einlagerungstechnik ein zentraler Aspekt der Gestaltung und Umsetzbarkeit von Endlagerkonzepten.

Zu Beginn des Projekts unterschieden sich die einzelnen Varianten der Transport- und Einlagerungstechnik stark voneinander im Detailgrad ihrer Entwicklung (von einfachen Handskizzen bis zur Erprobung im 1:1 Maßstab) sowie in deren Zeitpunkt (1995 bis 2017). Darüber hinaus wurde die Transport- und Einlagerungstechnik für Streckenlagerung (Engelmann et al., 1995), für vertikale Bohrlochlagerung (Filbert et al., 2010) und für die Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Kurzbohrlöchern (Filbert et al., 2014) für einen Einsatz im Wirtsgestein Steinsalz entwickelt. Nach dem „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle“ (Standortauswahlgesetz/StandAG) sind jedoch die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallingestein gleichermaßen zu betrachten. Ziel des Vorhabens TREND war es deswegen, die Transport- und Einlagerungstechnik für die genannten Einlagerungsvarianten und die drei Wirtsgesteine auf einen vergleichbaren und aktuellen Entwicklungsstand zu heben. Dafür wurde das Projekt in drei Teilziele untergliedert. Im Folgenden wird dargelegt, wie diese Teilziele erreicht wurden.

2 Anforderungsanalyse

Das erste Teilziel bestand darin, die wesentlichen Anforderungen an die Transport- und Einlagerungstechnik systematisch zu erfassen und zu dokumentieren. Dafür wurde zunächst eine Funktionsanalyse der jeweiligen Transport- und Einlagerungstechnik erarbeitet. Weitere Anforderungen ergaben sich aus den technischen Daten der angenommenen Abfallgebinde, der bergbaulichen Umgebung und vor allem der Betriebs-, aber auch der Langzeitsicherheit. Grundlegend neue Erkenntnisse wurden bei der Bearbeitung dieses Teilziels nicht gewonnen, aber es wurden erstmalig Anforderungskataloge erstellt, die die Anforderungen für alle bisher betrachteten Varianten der Transport- und Einlagerungstechnik übersichtlich dokumentieren. Diese konnten dann als Referenz für die Weiterentwicklung genutzt werden.

3 Ermittlung des Weiterentwicklungsbedarfs

Das zweite Teilziel war die Überprüfung der vorliegenden Dokumentationen der Transport- und Einlagerungstechnik zur Ableitung von Bedarf zur Weiterentwicklung. Diese Überprüfung basierte im Wesentlichen auf drei Säulen:

1. Weiterentwicklungsbedarf aus der Forschung, z. B. aus Sicht der Langzeitsicherheit oder der Betriebssicherheit
2. Weiterentwicklungsbedarf zur Einhaltung von Anforderungen, z. B. Regeln des kerntechnischen Ausschusses (KTA), EndSiAnfV o. ä.
3. Verbesserungspotential aufgrund des aktuellen Standes der Technik

Im Folgenden wird für jede der drei Säulen ein Beispiel aus der Bearbeitung des Vorhabens TREND erläutert.

3.1 Weiterentwicklungsbedarf aus der Forschung

Im Vorhaben KOSINA (Bollingerfehr et al., 2018) wurde ein Konzept zur Einlagerung von Abfallgebinden in horizontale Bohrlöcher erarbeitet. Parallel wurde eine Betriebssicherheitsanalyse durchgeführt. Diese stellte wesentliche sicherheitstechnische Schwachstellen beim Einlagerungsvorgang fest. Schadensfälle an der gewählten technischen Lösung für den mechanischen Einschub von Brennstabkockillen mussten soweit möglich ausgeschlossen werden. Im Schadensfall wäre eine Intervention durch Personal im Sperrbereich im Inneren der Bohrlochverrohrung notwendig gewesen. Das wiederum ist unbedingt zu vermeiden. Diese Schwachstelle wurde aufgegriffen. Es gelang, durch Umstellung des Einschubsystems auf eine pneumatische Kraftübertragung die genannten potentiellen Schadensfälle vollständig auszuschließen und damit die Betriebssicherheit des Konzepts deutlich zu erhöhen.

3.2 Weiterentwicklungsbedarf zur Einhaltung von Anforderungen

Zum Greifen der Brennstabkockille zur Einlagerung in vertikale Bohrlöcher kommt ein Greifer mit Greifarmen zum Einsatz. In der bisherigen Ausführung waren drei Greifarme vorgesehen. Bei Bruch eines Greifarms besteht in dieser Variante die Gefahr eines Absturzes der Brennstabkockille im Bohrloch. Gerade mit Blick auf die Anforderung der Rückholbarkeit ist dieser Fall unbedingt zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde die Konstruktion des Greifers grundsätzlich überarbeitet und ein Greifer mit zusätzlichen seitlichen Führungen konstruiert.

3.3 Verbesserungspotential aufgrund des Stands der Technik

Die Technik zur Streckenlagerung von abgeschirmten Abfallgebinden vom Typ POLLUX® wurde in den 1990er Jahren entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt war industrielle Erfahrung mit mobilen Portalkränen kaum verbreitet und stand als Grundlage der Entwicklung deshalb nicht zur Verfügung. Heute sind mobile Portalkräne verschiedener Größen Stand der Technik und es gibt vielfältige Erfahrungen mit Konstruktion, Bau und Betrieb dieser Kräne. Diese Erfahrungen wurden in TREND genutzt, um zum Beispiel den Greifmechanismus für die Abfallgebinde zu vereinfachen und damit robuster zu gestalten. Darüber hinaus lassen sich zukünftige Anpassungen an Maße von Behältern und Tragzapfenabständen leicht umsetzen.

4 Konstruktion

Das dritte Teilziel bestand in der konstruktiven Umsetzung des Weiterentwicklungsbedarfs. Zunächst wurden dafür verschiedene orientierende Auslegungsrechnungen durchgeführt und anhand dieser konstruktive Detailfragen geklärt. Ausreichende Sicherheitsfaktoren und gezielte Finite Elemente Analysen zeigen die grundsätzliche Stabilität der tragenden Bauteile. Parallel zur Konstruktion wurde eine Risikobeurteilung durchgeführt, in der die Betriebssicherheit der Technik bewertet wurde. Dadurch entstanden Verbesserungsvorschläge,

die zur Optimierung der Sicherheit in die Konstruktion einfließen. Als Beispiel für eine solche sicherheitsgerichtete Anpassung lässt sich für die Einlagerungstechnik für Transport- und Lagerbehälter in kurze horizontale Bohrlöcher die Verringerung der Spaltbreite in der Fahrbahn zwischen Einlagerungsvorrichtung und Bohrloch nennen. Diese reduziert das Risiko des Verkantens während des Einschubvorgangs. Zum Abschluss des Vorhabens TREND wurde der Einlagerungsvorgang der verschiedenen Varianten zur Einlagerung mit den neuen konstruierten Vorrichtungen animiert. Damit werden die Prozessschritte bei der Einlagerung von Abfallgebinden sichtbar und auch für interessierte Laien gut verständlich.

Ein wesentlicher Aspekt angewandter Grundlagenforschung ist die Erarbeitung und der Vergleich verschiedener denkbarer Lösungsansätze. Zu Beginn des Vorhabens TREND existierten verschiedene Ideen, Konzepte und einzelne Prototypen zur Einlagerung von Abfallgebinden mit hochradioaktiven Abfällen in Deutschland, deren Entwicklung sich auf einen Zeitraum von 1985 bis 2018 erstreckte. Sämtliche dabei betrachteten Varianten wurden im Vorhaben TREND aufgegriffen, geprüft und weiterentwickelt beziehungsweise verworfen und neu entwickelt. Damit stehen nun technische Entwürfe für Transport und Einlagerung von Abfallgebinden mit hochradioaktiven Abfällen in Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein auf einem zueinander vergleichbaren und aktuellen Entwicklungsstand zur Verfügung. Die technische Machbarkeit und der sichere Betrieb sind für alle Varianten zu erwarten.

Dem Vorhabenträger zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Deutschland, der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, werden damit Wahlmöglichkeiten für Einlagerungsvarianten und -techniken an die Hand gegeben. Auf dieser Grundlage können die nächsten Schritte wie Ausführungsplanung, der Bau von Prototypen sowie die Erarbeitung und Durchführung von Versuchsprogrammen zum Nachweis der technischen Machbarkeit, der Sicherheit und der Genehmigungsfähigkeit begonnen werden.

5 Animation

Die Einlagerungsvorgänge wurden mit Hilfe der in diesem Vorhaben entwickelten CAD Modelle animiert. Die entsprechenden Videos werden in der Zusammenfassung des Forschungsberichts verlinkt. Dieser steht der Website der BGE TECHNOLOGY GmbH in der Mediathek zur Verfügung.

6 Danksagung

Die BGE TECHNOLOGY GmbH bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und beim Projektträger Karlsruhe für die Förderung des Vorhabens.

7 Verweise

- Bollingerfehr, W.; Bertrams, N.; Minkley, W.; Buhmann, D.; Mönig, J.; Eickemeier, R.; Popp, T.; Fahland, S.; Prignitz, S.; Filbert, W.; Reinhold, K.; Hammer, J.; Simo, E.; Kindlein, J.; Thiemeyer, T.; Knauth, M.; Völkner, E.; Liu, W.; Wolf, J. (2018): Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany, Abschlussbericht, BGE TEC 2018-13, Peine, 2018
- Engelmann, H. J.; Filbert, W.; Heda, M.; Hedemann, W.; Hubert, R.; Neydak, J. (1995): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Abschlussbericht, Hauptband, DEAB T 60, Peine, 1995
- Filbert, W.; Bollingerfehr, W.; Heda, M.; Lerch, C.; Niehues, J.; Pöhler, M.; Schulz, J.; Schwarz, T.; Toussaint, M.; Wehrmann, J. (2010): Optimization of the Direct Disposal concept by Emplacing SF Canisters in Bore-holes, Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2010
- Filbert, W.; Breustedt, M.; Dörr, S.; Herold, P.; Lerch, C.; Wolf, J.; Ullmann, D.; Kristek, F.; Sindern, W. (2014): Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg - DIREGT III, Abschlussbericht, Peine, 2014 – nicht veröffentlicht (Industrierauftrag)



Direktverweis auf die Mediathek der BGE TECHNOLOGY

Niklas Bertrams
niklas.bertrams@bge.de

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine

Partikelbruch in der Fördertechnik – Prüfmethodik und Simulation mittels Diskrete Elemente Methode

M. Denzel

Montanuniversität Leoben

Abstract

Due to mechanical stress during transport and storage, bulk material partly degrades and fines are produced. This can be problematic in various applications. In this work a test method to analyse the breakage behavior of brittle bulk material is presented, which is based on an especially developed automated single particle impact tester. Established particle breakage models for the discrete element method (DEM) are evaluated regarding simulation of high mass flows. A new particle breakage model for DEM is presented, which is based on a probabilistic particle replacement by pre-defined particles tessellated with the voronoi-algorithm. This ensures mass and volume constancy, which makes it suitable for high mass flows and complex conveying operations. The breakage model was verified by shatter tests with blast furnace sinter.

1 Einleitung

Je nach Material und Belastung können Transport- und Lagerprozesse zur Schüttgutdegradation führen. Vor allem 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. Des Weiteren können auch Aufbereitungsprozesse wie Sieben zu unerwünschtem Partikelbruch führen. Bei der Kohleförderung ist beispielsweise Schüttgutdegradation aufgrund von Staubexplosionsgefahr und Luftverschmutzung zu vermeiden. Besonders kritisch ist der Kornzerfall auch bei Hochofensinter, weil für eine ausreichende Durchgasung im Hochofen eine bestimmte Mindestkorngröße benötigt wird. Feinmaterial muss erneut der Sinteranlage zugeführt werden und ist somit aufgrund des energieintensiven Sinterprozesses mit hohen Kosten und Emissionen verbunden. Im Zuge eines von der EU geförderten RFCS-Projektes MinSiDeg wird derzeit nach Lösungen gesucht, den Sinterzerfall signifikant zu reduzieren und somit Emissionen und Energieaufwand zu senken [1]. Dabei wurde in der Arbeitsgruppe Fördertechnik und Konstruktionslehre am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft der Montanuniversität Leoben eine Prüfmethodik zur Analyse der Bruchcharakteristik von Hochofensinter und ein geeignetes Bruchmodell für die Diskrete Elemente Methode (DEM) entwickelt, welches es ermöglichen soll bestehende Anlagen simulieren und hinsichtlich Partikelbruch optimieren zu können. Die in diesem Beitrag beschriebene Vorgehensweise wurde am Beispiel von Hochofensinter durchgeführt, eignet sich aber genauso für andere bruchfähige Schüttgüter.

2 Prüfmethodik zur Analyse der Bruchcharakteristik

Zur Analyse des Bruchverhaltens werden mit einem eigens dafür entwickelten Prüfstand Einzelpartikelprallversuche durchgeführt, siehe Abbildung 1. Das Konzept ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Prüfstand besteht aus einer Vereinzelung mittels Schwingtopf, Wiegestation, Belademechanismus, Druckluftkanone und einer inkludierten Fragmentanalyse. Alle Module sind vollautomatisiert, womit eine zeiteffiziente Versuchsdurchführung (Versuchsdauer 50 – 70 s) ermöglicht wird. Die Steuerung und Automation des Prüfstandes erfolgte aufgrund des niedrigen Budgets ausschließlich mit Arduinos. Der Schwingtopf wird mit einer vorsortierten Schüttgutprobe beaufschlagt. Die Partikel werden hierbei vereinzelt und anschließend verworfen. Die Partikel werden hierbei vereinzelt und anschließend verworfen. Mit einem eigens konzipierten Belademechanismus [2] werden die Partikel möglichst schonend in die Druckluftkanone geladen und anschließend mit einer definierten Geschwindigkeit gegen eine Prallplatte beschleunigt. Standardmäßig ist als Prallplatte eine 20 mm dicke Stahlplatte verbaut. Die Prallplatte ist jedoch einfach zu tauschen um auch Interaktionen mit anderen Materialien untersuchen zu können. Die tatsächliche Aufprallgeschwindigkeit wird mittels Lichtschranken gemessen. Die Fragmente werden nach dem Aufprall schonend in die eigens dafür entwickelte Sortierrinne geleitet. Die Sortierrinne ist eine mit zwei Unwuchtmotoren angetriebene V-förmige Schwingrinne mit stufenweise größer werdenden Spalt. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um eine eindimensionale Sortiermethode handelt und ist somit nicht direkt mit konventionellen Sieben vergleichbar. Deshalb sollte auch die Schüttgutprobe mit derselben Sortierrinne vorsortiert werden. Unterhalb der Sortierrinne sind Auffangboxen auf Wägeinheiten platziert. Somit kann die massenmäßige Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch festgestellt werden. Die Anfangsmasse des Partikels, die Aufprallgeschwindigkeit und die Fragmentmassen werden erfasst und als CSV-Datei auf einer SD-Karte gespeichert. Der Prüfstand ist in [3] näher beschrieben.

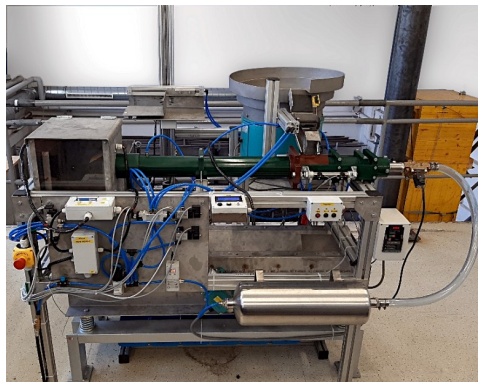


Abbildung 1: Automatischer Prüfstand für Einzelpartikelprallversuche

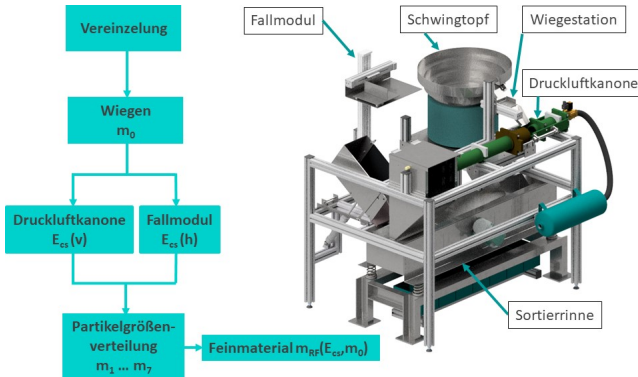


Abbildung 2: Konzept des automatischen Prüfstandes für Einzelpartikelprallversuche

Mit dem hier beschriebenen Prüfstand können Partikelgrößen bis 50 mm Korn-durchmesser und spezifische Energien im Bereich von 8 - 338 J / kg (Aufprall-geschwindigkeiten 4 - 26 m / s) mittels der Druckluftkanone geprüft werden. Versuche mit größeren Partikeln (> 50 mm) und kleineren Energieniveaus (< 8 J / kg) können mit dem Fallmodul (300 - 1000 mm Fallhöhe beziehungsweise 3 - 10J / kg) durchgeführt werden.

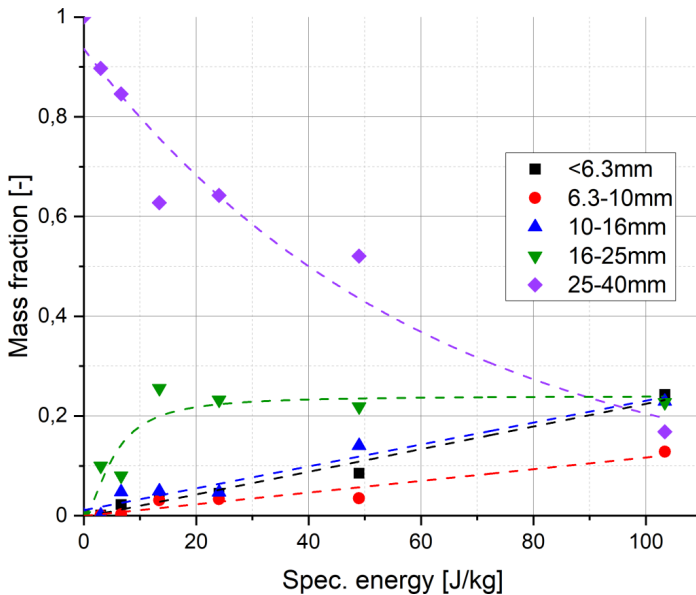


Abbildung 3: Partikelgrößenverteilung von Hochofensinter der Größenfraktion 25 - 40 mm nach dem Bruch in Abhängigkeit der massenspezifischen Aufprallenergie

Im vorliegenden Beitrag wurde Hochofensinter der Größenfraktion 25 – 40 mm untersucht. Dabei wurden insgesamt 180 Partikel auf sechs verschiedenen spezifischen Energieniveaus geprüft. Da Hochofensinter sehr heterogene Eigenschaften aufweist, wurden jeweils 30 Versuche pro spezifischen Energieniveau durchgeführt. Bei homogeneren Materialien kann die Versuchsanzahl dementsprechend reduziert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Dabei repräsentiert jeder Datenpunkt das arithmetische Mittel von 30 Versuchen. Mit zunehmender spezifischer Aufprallenergie nimmt der Massenanteil der Initialfraktion 25 – 40 mm exponentiell ab. Die kleineren Fraktionen 0 – 16 mm folgen annähernd einem linearen Trend. Weitere Ergebnisse und Erkenntnisse zum Bruchverhalten von Hochofensinter sind in [3], [4] und [5] angeführt, wobei mehrere Größenfraktionen unterschiedlicher Hersteller untersucht wurden.

3 Bruchmodelle in der Diskreten Elemente Simulation

3.1 Evaluierung der maximalen Kontaktkräfte

Ein relativ einfaches Methode zur Prognose des Partikelbruchs ist die Evaluierung der maximalen Kontaktkräfte im post-processing. Dabei wird die Kontaktkraft jedes einzelnen Partikels über die gesamte Förderdauer evaluiert und das Maximum für jeden Partikel ermittelt. Mittels Simulation des Prallversuchs wird der Zusammenhang zwischen maximaler Kontaktkraft und Aufprallgeschwindigkeit festgestellt. Anhand dieses Zusammenhanges und den Ergebnissen der Bruchversuche kann somit eine Vorhersage der zu erwartenden Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch getroffen werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methodik und ein Vergleich mit Versuchsergebnissen ist in [4] und [5] ersichtlich, wobei teilweise zufriedenstellende Simulationsergebnisse erzielt wurden. Nachteilig bei dieser Methode ist allerdings, dass ein Partikel nach dem Bruch nicht als gebrochen berücksichtigt wird. Dies ist zwar bei einfachen Fördervorgängen vernachlässigbar, ist aber weniger geeignet für komplexere Fördervorgängen. Weiters ist es nur bedingt geeignet für größere Massenströme, weil ein aufwendiges post-processing erforderlich ist und aufgrund der kleinen Speicherintervalle (um die Kontaktkraft ausreichend genau abzubilden) ein großer Speicherbedarf entsteht. Deshalb wird vor allem auch für den Transport von Hochofensinter nach einem Bruchmodell verlangt, das in der Lage ist den Partikelbruch selbst zu simulieren und eventuell bruchfähige Fragmente generieren kann.

3.2 Bonded particle model

Beim „bonded particle model“ [6] wird ein Partikel aus vielen kleinen Partikeln aufgebaut, welche mit einem virtuellen Zylinder miteinander verbunden sind. Bei mechanischen Versagen dieses virtuellen Zylinders, welcher sowohl auf Zug/Druck als auch auf Biegung beansprucht werden kann, kommt es zum Bruch. Entscheidend dafür ist die Definition einer kritischen Normalspannung.

Das „bonded particle model“ ist breits relativ etabliert und wurde beispielsweise in [7] zur Simulation von Gestein in einem Kegelbrecher verwendet. Um den Bruch von Hochofensinter zu simulieren wurde folgender Ansatz gewählt. Ein Sinterpartikel wird aus Subpartikeln der kleinsten vorkommenden Fragmentgröße aufgebaut und die kritische Normalspannung mit dem Schussversuch kalibriert, siehe Abbildung 4. Dabei wird die kritische Normalspannung solange variiert, bis die Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt. Hierbei ist das Bruchverhalten in der Simulation nicht nur vom Wert der kritischen Spannung abhängig sondern auch vom E-Modul des virtuellen Zylinders. Weil im Gegensatz zu [6] und [7] Subpartikel gleicher Größe verwendet wurden, wurde die kritische Normalspannung einzelner bonds zusätzlich einer Normalverteilung folgend definiert. Die Auswertung der Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch erfolgte mit einer MATLAB-routine im post-processing, welche die zusammenhängenden Cluster anhand annähernd gleicher Translationsgeschwindigkeit erkennt und mittels der Positionen der Subpartikel den maximalen Korndurchmesser berechnet. Mit recht hohem Kalibrationsaufwand konnten nur mäßig zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Weiters wird aufgrund der hohen Partikelanzahl und der vielen bonds eine hohe Rechenleistung benötigt, weshalb sich dieses Bruchmodell für die Simulation großer Massenströme und somit für die den Transport von Hochofensinter weniger eignet.

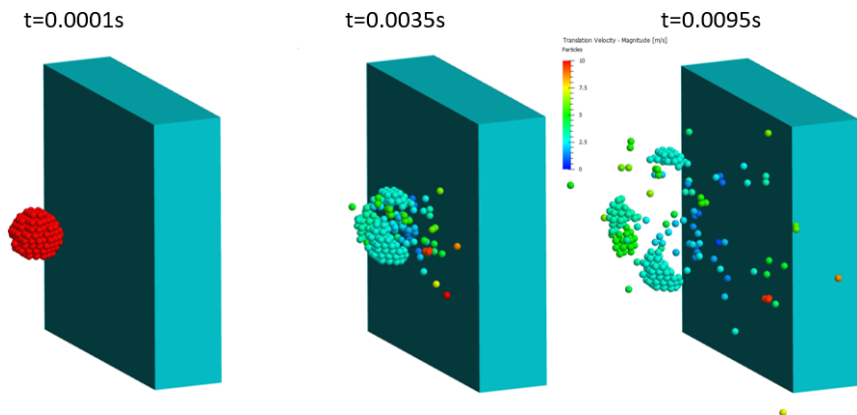


Abbildung 4: Simulation des Sinterbruchs mittels „bonded particle model“

3.3 Particle replacement model

Erstmals vorgestellt in [8], werden beim „particle replacement model“ Partikel beim Überschreiten einer kritischen Kontaktkraft durch mehrere kleinere Partikel ersetzt. Die Folgepartikel erhalten die gleiche Geschwindigkeit wie der Initialpartikel, was eine grobe Näherung darstellt. Vorteilhaft bei diesem Modell ist, dass viel weniger Rechenleistung im Vergleich zum „bonded particle model“ benötigt wird, weil erst ab dem Bruchereignis kleinere Fragmente simuliert werden und keine rechenintensiven bonds existieren. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass durch die Vorgabe der Folgepartikel die Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch definiert werden kann, womit eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann und der Kalibrationsaufwand der Bindungen (bonds) entfällt. Ein Vergleich zwischen „bonded particle“ und „particle replacement model“ wurde in [9] angestellt. Nachteilig bei diesem Modell ist allerdings der Volumenverlust wenn eine große Kugel durch viele kleinere ersetzt wird. Um Massenkonzanz zu gewährleisten wurde in [10] die Dichte der Folgepartikel dementsprechend erhöht. Dies ist zwar irrelevant bei Mühlen und Brechern, ist aber weniger geeignet für Schüttgut-simulationen mit großen Massenströmen, weil Fließverhalten und Belastungen an Förderanlagen verfälscht würden. In [11] wird dies umgangen, indem sich die Folgepartikel anfangs überschneiden und für die folgenden Zeitschritte kleinere Reaktionskräfte definiert werden um Explosionen zu vermeiden. Allerdings kommt es dadurch zu einem Volumenzuwachs und einem unnatürlichen Auseinanderdriften der Fragmente, welches für die Simulation des Transports von Hochofensinter weniger geeignet ist.

4 Neues Bruchmodell: Probabilistisches Particle-Replacement mit Voronoi-Fragmentierung

Um den Partikelbruch mit hoher Genauigkeit und auch bei größeren Massenströmen simulieren zu können, wurde eine neues Partikelbruchmodell entwickelt. Das Bruchmodell basiert auf der „particle replacement method“ [8], wobei ähnlich wie in [11], je nach Belastung die Initialpartikel probabilistisch durch unterschiedliche Folgepartikel ersetzt werden. Im Gegensatz zu [11] werden als Folgepartikel aber keine Kugeln verwendet, wobei keine Massen- und Volumenkonzanz gegeben wäre. Im hier entwickelten Bruchmodell wird der Initialpartikel durch das Bruchbild ersetzt. Hierbei ist der Folgepartikel ein Partikel gleicher Form und Masse, der mithilfe des Voronoi-Algorithmus [12-14] tesseliert wird, siehe Abbildung 5. Bei der Voronoi-Fragmentierung werden im Volumen zufällig verteilte Punkte definiert, sogenannte Seeds. Anschließend wird jeweils auf halber Distanz zwischen zwei benachbarten Seeds, das Volumen geteilt. Somit ergeben sich je nach Anzahl der Seeds mehr oder weniger feine Fragmente, dessen Form kantig und zufällig bestimmt ist. Dies bietet den großen Vorteil, dass Volumen- und Massenkonzanz gewährleistet werden.

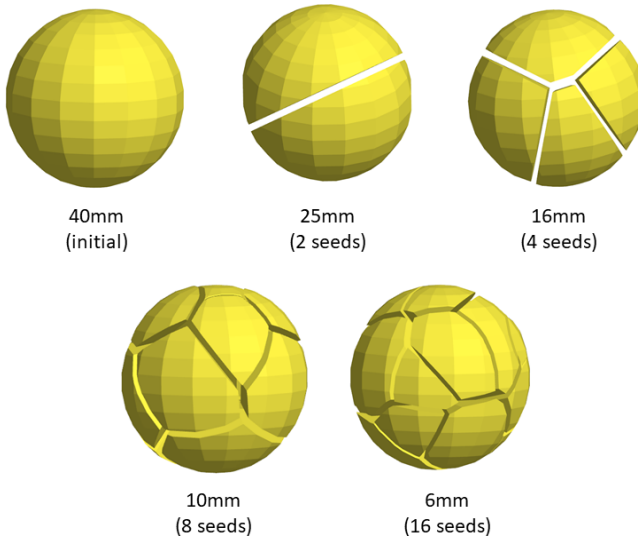


Abbildung 5: Voronoi-Fragmentierung an einem vernetzten kugelförmigen Partikel (Explosionsansicht zur besseren Darstellung)

Im hier angewandten Fall für Hochofensinter werden vier verschiedene Folgepartikel definiert (6 mm, 10 mm, 16 mm und 25 mm). Die Folgepartikel sind jeweils so fein tesseliert, dass die durchschnittliche Fragmentmasse annähernd der durchschnittlichen Masse eines Partikels der erwünschten Größenfraktion entspricht. Das Feinmaterial ($< 6,3$ mm) wird allerdings aus rechentechnischen Gründen in der Simulation größer dargestellt. Je nach Belastung wird der Initialpartikel beim Bruch vollständig durch Fragmente einer kleineren Größenfraktion ersetzt. Die Wahrscheinlichkeit durch welchen tesselierten Folgepartikel der Initialpartikel beim Bruch ersetzt wird, wird anhand der Bruchversuche bestimmt. Dazu wird basierend auf den Versuchsergebnisse (Abbildung 3) eine stückweise lineare Regression durchgeführt, siehe Abbildung 6. Das Bruchmodell wird in der DE-Software ThreeParticle mithilfe der Particle-Replacement-API (Application Programming Interface) implementiert. Hierbei werden die Geradengleichungen für die Bruchwahrscheinlichkeiten im API hinterlegt. Der Zusammenhang zwischen Kontaktkraftmaximum und Aufprallgeschwindigkeit wurde, wie in 3.1, mittels Simulation des Schussversuchs ermittelt. Bei jedem Kontaktkraftmaximum wird mithilfe des API eine korrespondierende spezifische Energie berechnet und mittels Zufallsvariable, im Falle eines Bruchs, der bereits vordefinierte tesselierte Folgepartikel bestimmt. Die Wahrscheinlichkeiten für jeden Folgepartikel entsprechen der durchschnittlichen Partikelgrößenverteilung für den jeweiligen Belastungsfall. Sollte der Partikel laut Zufallsgenerator nicht brechen wird der Partikel nicht ersetzt. Somit stellt sich bei ausreichend großer Partikelanzahl im Durchschnitt die richtige Partikelgrößenverteilung ein.

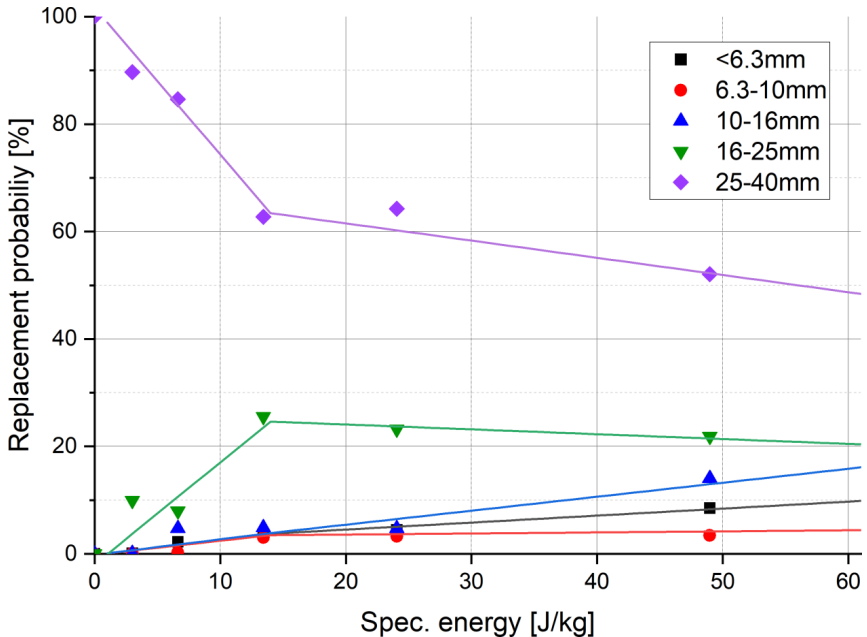


Abbildung 6: Wahrscheinlichkeiten für Folgepartikel beim Bruch aus stückweiser linearen Regression der Bruchversuchsergebnisse

5 Verifizierung

Das Bruchmodell wurde mittels Shatter-test verifiziert. Hierbei wurde ein Fallschacht mit schnell auslösender Klappe aus [15] verwendet, siehe Abbildung 7. Der Fallschacht hat eine Fallhöhe von 3,8 m und das Schüttgut prallt am Boden auf eine Stahlplatte. Die Klappe wird von einem Elektromagneten verschlossen und kann per Knopfdruck geöffnet werden. Es wurden drei Versuche mit 7,5 kg und einer mit 5,7 kg Hochofensinter der Größenfraktion 25 – 40 mm durchgeführt. Aufgrund von Materialmangel konnten nicht mehr Versuche durchgeführt werden. Die Schüttgutprobe wurde jeweils vor und nach dem Versuch mit der in Kapitel 2 beschriebenen Sortierrinne analysiert. Der Versuch wurde mittels der DE-Software ThreeParticle mit dem in Kapitel 4 beschriebenen neuen Bruchmodell simuliert. Dabei wurde ein Zeitschritt von $5 \cdot 10^{-6}$ s verwendet. Diverse Material- und Interaktionsparameter für die Simulation wurden in [16] und [17] festgestellt. In Abbildung 8 ist der Aufprall der Schüttgutprobe auf der Stahlplatte zu verschiedenen Zeitpunkten ersichtlich. Die Farbskala beschreibt dabei die Partikelmasse (hell = 0 g, dunkel = 48 g). Hierbei ist der Partikelbruch in der Simulation deutlich zu erkennen.

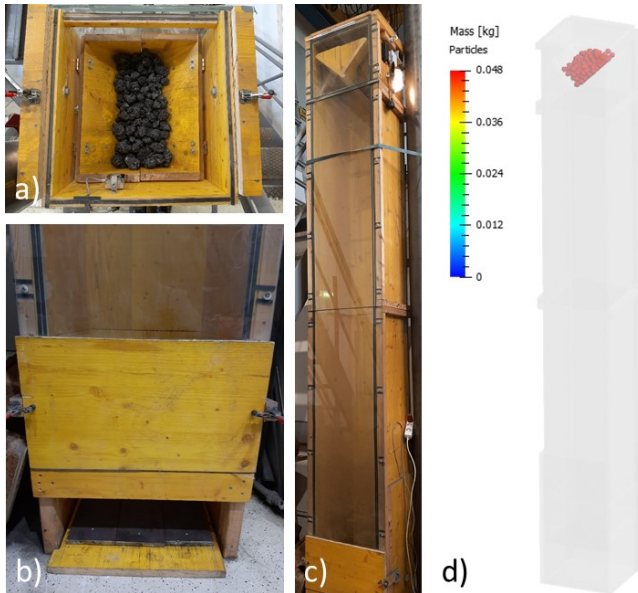


Abbildung 7: Fallschacht a) Gutaufgabe in Klappe b) Prallplatte aus Stahl am Boden c) Frontansicht d) DE-Simulation mit „ThreeParticle“

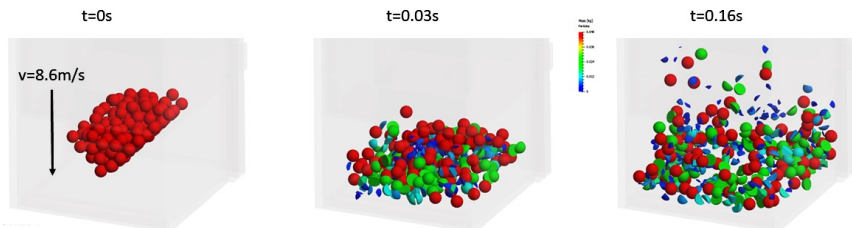


Abbildung 8: Aufprall der Schüttgutprobe in der DE-Simulation mit „ThreeParticle“

Da das Bruchmodell auf Wahrscheinlichkeiten basiert, ist eine ausreichend genaue Simulation des Partikelbruchs nur mit entsprechend hoher Partikelanzahl möglich. Die in der Simulation verwendete Schüttgutprobe von 7,52 kg entspricht bei einer Partikelmasse von 47 g 160 Partikeln. Aufgrund der geringen Partikelanzahl wurde die Simulation 25 mal durchgeführt und das arithmetische Mittel aller Simulationsergebnisse berechnet. Hierbei wurde zusätzlich evaluiert wieviele Partikel benötigt werden um mit der hier beschriebenen Methode ein ausreichend genaues Simulationsergebnis zu erzielen. Dabei wurde für jede Größenfraktion der kumulative Mittelwert des Massenanteils gebildet und jeweils das Fehlerquadrat (R^2) zum Mittelwert der Versuche nach Formel (1) berechnet. Die Summe der Fehlerquadrate aller Größenfraktionen in Abhängigkeit der Partikelanzahl und der durchgeführten Simulationen ist in Abbildung 9 ersichtlich.

Die Genauigkeit der Simulation nähert sich hierbei asymptotisch einer konstanten Abweichung von den Versuchen an. In diesem Fall wird ab 3000 - 4000 Partikel keine signifikante Änderung der Simulationsergebnisse mehr festgestellt. Daher wird der Schluss gezogen, dass mindestens 3000 Partikel benötigt werden, um mit dieser Methode ausreichend genaue Simulationsergebnisse zu erzielen.

$$\sum_{i=1}^5 R_i^2 = \sum_{i=1}^5 (T_i - S_i)^2 \tag{1}$$

- R_i Residuum
- T_i Mittelwert der Massenanteile nach den Shatter-tests
- S_i Kumulativer Mittelwert der Massenanteile in der Simulation
- i Größenfraktionen <6,3 mm (1) bis 25 - 40 mm (5)

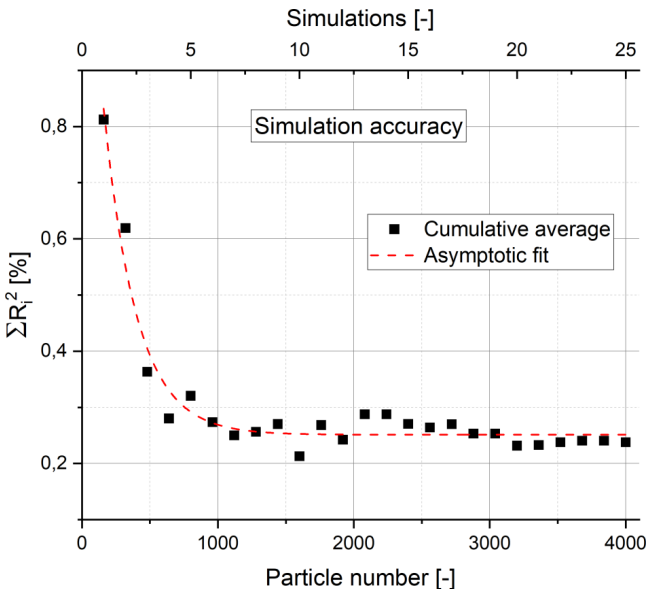


Abbildung 9: Evaluierung der Simulationsgenauigkeit in Abhängigkeit der Partikelanzahl und der durchgeführten Simulationen

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Simulation ist in Abbildung 10 ersichtlich. Hierbei werden jeweils die Massenanteile nach dem Aufprall für jede Größenfraktion dargestellt (vor dem Versuch 100 % 25 – 40 mm). Ein eventueller Massenverlust wurde als Feinmaterial (< 6,3 mm) gewertet. Dabei wird jeweils das arithmetische Mittel aus den vier Versuchen und 25 Simulationsergebnissen mit Standardabweichungen gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Simulation mit den Versuchsergebnissen. Somit kann das neu entwickelte Bruchmodell bei Kenntnis der Material- und Interaktionsparameter und bei ausreichend hoher Partikelanzahl zur Vorhersage des Partikelbruchs von Hochofensinter und anderen bruchfähigen Schüttgütern verwendet werden.

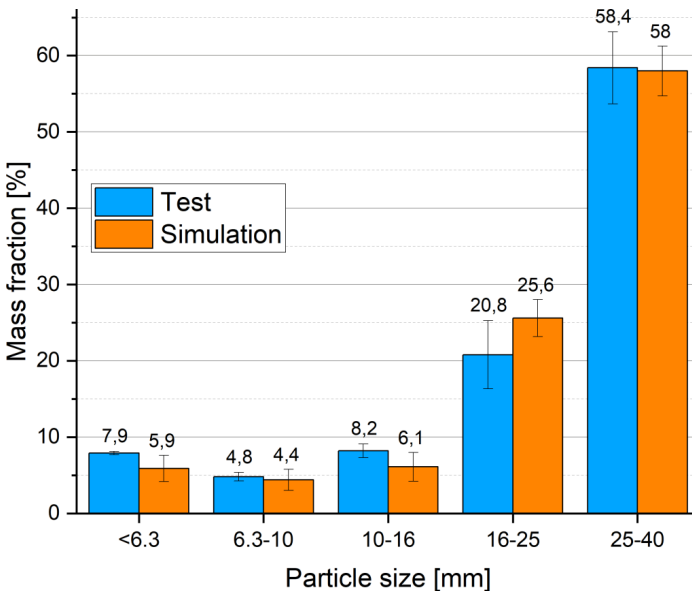


Abbildung 10: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Simulation des Shatter-tests

6 Zusammenfassung

Es wurde eine Methodik erarbeitet um die Bruchcharakteristik von bruchfähigen Schüttgut mithilfe eines speziell dafür entwickelten Prüfstandes zu analysieren. Hierbei werden Einzelpartikel-Prallversuche mithilfe einer Druckluftkanone auf mehreren Energieniveaus durchgeführt und die Fragmente der Größe nach sortiert und gewogen. Zusätzlich wird die Anfangsmasse des Partikels und die Aufprallgeschwindigkeit gemessen. Der Prüfstand kann mit einer Schüttgutprobe beschickt werden und ist vollautomatisiert. Die Prüfmethodik und Ergebnisse werden am Beispiel von Hochofensinter gezeigt.

Um den Partikelbruch mittels Diskrete Elemente Methode (DEM) simulieren zu können, wurden zwei bereits etablierte Bruchmodelle („bonded particle method“ und „particle replacement method“) evaluiert. Beide Bruchmodelle wurden für die Simulation großer Massenströme, wie zum Beispiel beim Transport von Hochofensinter, für weniger geeignet befunden. Teilweise akzeptable Ergebnisse zur Prognose des Partikelbruchs wurde mit einer post-processing-Methode mittels Evaluierung der Kontaktkräfte jedes einzelnen Partikels erzielt, wobei auch diese Methode aufgrund des hohen Speicherbedarfs und der Beschränkung auf einfache Fördervorgänge als weniger geeignet befunden wurde.

Um den Partikelbruch selbst bei größeren Massenströmen mit hoher Genauigkeit effizient simulieren zu können, wurde ein neues Bruchmodell für die DEM mithilfe einer API (Application Programming Interface) der Simulations-Software „ThreeParticle“ entwickelt. Dieses basiert auf einem probabilistischen Particle-Replacement, wobei die Partikel beim Bruch durch Folgepartikel gleicher Form ersetzt werden, die mit dem Voronoi-Algorithmus tesseliert werden. Somit ist Massen- und Volumenkonstanz gewährleistet. Ein weiterer Vorteil dieses Bruchmodells ist, dass auch Fragmente, die erneut brechen können generierbar sind. Somit sind auch längere und komplexere Fördervorgänge simulierbar. Weil dieses Bruchmodell auf Wahrscheinlichkeiten basiert, ist eine Mindestanzahl von Partikeln für ausreichend genaue Simulationsergebnisse nötig. In dem hier beschriebenen Fall werden mindestens 3000 Partikel benötigt. Die Bruchwahrscheinlichkeiten werden anhand der Ergebnisse der Einzelpartikel-Prallversuche definiert. Das Bruchmodell wurde anhand einer Versuchsreihe von Shatter-tests mit Hochofensinter verifiziert. Die Simulationsergebnisse weichen nur geringfügig von den Versuchsergebnissen ab. Somit bietet das hier entwickelte Bruchmodell, vor allem in Kombination mit der hier beschriebenen Prüfmethodik, eine effiziente Methode den Partikelbruch von bruchfähigen Schüttgütern auch in größeren Massenströmen zu prognostizieren.

7 Literatur

- [1] 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
- [2] Waidbacher B (2022) Automatische Beschickung eines Prüfstandes für Hochofensinter. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben
- [3] Denzel M, Prenner M, Sifferlinger NA (2022) Development of an automated single particle impact tester for iron ore sinter. Minerals Engineering 175:107291. doi:10.1016/j.mineng.2021.107291
- [4] Denzel M, Prenner M (2021) Dynamisches Übergabesystem zur Reduktion des Partikelbruchs. 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021:233–242. doi:10.25673/36794
- [5] Denzel M, Prenner M (2022) Partikelbruchvorhersage an einem dynamischen Übergabesystem und Vergleich mit einer herkömmlichen Schurre mittels DEM. Berg Huettenmaenn Monatsh 167(2):66–75. doi:10.1007/s00501-022-01197-4
- [6] Potyondy DO, Cundall PA (2004) A bonded-particle model for rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41(8):1329–1364. doi:10.1016/j.ijrmmms.2004.09.011

-
- [7] Quist J, Evertsson CM (2016) Cone crusher modelling and simulation using DEM. *Minerals Engineering* 85:92–105. doi:10.1016/j.mineng.2015.11.004
- [8] Cleary P (2001) Modelling comminution devices using DEM. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 25(1):83–105. doi:10.1002/1096-9853(200101)25:1<83::AID-NAG120>3.0.CO;2-K
- [9] Jiménez-Herrera N, Barrios GK, Tavares LM (2017) Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds. *Advanced Powder Technology* 29(3):692–706. doi:10.1016/j.apt.2017.12.006
- [10] Sousani M, Chagas A, Saxena A, Yang Y (2019) Simulation of Surface Damage and Body Breakage by using DEM
- [11] Tavares LM, das Chagas AS (2021) A stochastic particle replacement strategy for simulating breakage in DEM. *Powder Technology* 377:222–232. doi:10.1016/j.powtec.2020.08.091
- [12] Kumar S, Kurtz SK (1994) Simulation of material microstructure using a 3D voronoi tessellation: Calculation of effective thermal expansion coefficient of polycrystalline materials. *Acta Metallurgica et Materialia* 42(12):3917–3927. doi:10.1016/0956-7151(94)90170-8
- [13] Kumar S, Kurtz SK (1993) Properties of a two-dimensional Poisson-Voronoi tessellation: A Monte-Carlo study. *Materials Characterization* 31(1):55–68. doi:10.1016/1044-5803(93)90045-W
- [14] Riedinger R, Habar M, Oelhafen P, Güntherodt H (1988) About the Delaunay-Voronoi tessellation. *Journal of Computational Physics* 74(1):61–72. doi:10.1016/0021-9991(88)90068-X
- [15] Grübler C (2020) Evaluierung ausgewählter passiver staubreduktionsmaßnahmen beim Schüttgutumschlag an fördertechnischen Anlagen. Dissertation, Montanuniversität Leoben
- [16] Brugger M (2021) Rücksprungverhalten von Hochofensinter. Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben
- [17] Prenner M (2018) Simulationsparameterstudie - Sinterbunker. Projektbericht, Montanuniversität Leoben

Michael Denzel

michael.denzel@unileoben.ac.at

Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
Franz-Josef-Straße 18
8700 Leoben
Österreich



Sicher, kosteneffizient und nachhaltig

United. Inspired.

Weltweit führende Elektrifizierungs- und Automatisierungslösungen

Unter Einsatz bahnbrechender Technologien entwickelt, fertigt und vermarktet Epiroc eine breite Palette von Bergbau-, Gesteinsbohr- und Tunnelbauausrüstungen, darunter Bohrergeräte, Lader, Grubenwagen und Belüftungssysteme, für den Einsatz unter und über Tage.

Die Ausrüstungen von Epiroc nutzen zunehmend Automatisierung, Digitalisierung und Elektrifizierung, um die Produktivität und Sicherheit zu verbessern und gleichzeitig die Umweltbelastung zu verringern.

All dies wird durch einen erstklassigen Service, Verbrauchsmaterialien, Ersatzteillieferungen, Supportlösungen und Schulungen unterstützt.

Kontaktieren Sie uns:

E-Mail: kontakt@epiroc.com

Telefon: **+49 201 24678 268**

www.epiroc.com

 **Epiroc**

PROmining – Erhöhung der Auslastung von Fördergeräten durch Partizipation an der internetbasierten Plattform-Ökonomie

J. Lassen, M. Braun, A. Henning
RWTH Aachen University

J. Müller, G. Hoeborn
FIR e.V. an der RWTH Aachen

Herausforderungen

Das Branchenbild der deutschen Steine- und Erdenindustrie (S&E-Industrie) wird von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) dominiert. Als Rückgrat der deutschen Industrie sehen sich die KMU der S&E-Industrie mit komplexen Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der Digitalisierung, konfrontiert [1; 2]. Daraus folgt, dass eine Vielzahl an Risikobarrieren und Hemmschwellen zu einer Einschränkung in der Anpassung an neue Technologien führen und die damit verbundene Ausweitung der Digitalisierung innerhalb der Branche ausbleibt [1]. Die Implementierung aktueller Soft- und Hardwarelösungen erzeugt bislang ein erhöhtes Maß an Mehraufwand, welches aufgrund begrenzter Ressourcen, insbesondere für kleine Betriebe, parallel zum Tagesgeschäft kaum zu bewältigen ist [3].

Darüber hinaus herrscht oftmals ein unzureichendes Datenmanagement vor, welches neben den bisher nicht ausreichend differenziert betrachteten Nachfrageschwankungen zu einer Minderung der Prognostizierbarkeit in S&E-Betrieben führt [4; 5]. Skrypzak (2016) konnte ebenfalls einen Mangel in der Erfassung, Auswertung und zielführenden Zuordnung von grundlegenden Leistungs- und Verbrauchsdaten feststellen [6]. Resultierend aus diesen Defiziten, ist die betriebsinterne Optimierung der Auslastung nur bedingt möglich. Zudem können andere Betriebe des Unternehmensverbundes zur Verfügung stehende ungenutzte Kapazitäten nicht erkennen. [7]

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte über qualitative Expertengespräche ebenfalls identifiziert werden, dass eine differenzierte, also unternehmensspezifische Art der Erfassung, Speicherung und Nutzung von Daten vorliegt. Es ist folglich keine einheitliche Struktur in der Handhabung von Daten in der Branche festzumachen. Dadurch findet die Analyse von vorhanden Zustandsdaten häufig nicht statt und die Potenziale der Digitalisierung finden keinen Eingang in die Unternehmensprozesse. Die betriebsinterne Optimierung von Prozessschritten und der Auslastung ist infolge unzureichenden Datenmanagements aktuell nur bedingt möglich. Daher bedarf es an Filterung und konkretisierter Bündelung der Daten, um eine zielführende Auswertung und darauffolgende Umsetzung zu initiieren.

1 Das Forschungsprojekt PROMining

Im Forschungsprojekt PROMining werden die zuvor genannten Herausforderungen hinsichtlich Datenmanagement und Auslastung adressiert. Durch die Realisierung einer internetbasierten Plattformlösung, werden die teilnehmenden Unternehmen dazu befähigt, ihre Betriebsmittel, insbesondere Fördergeräte optimal auszulasten. Auf schwankende Nachfragen kann durch eine verbesserte Prognosefähigkeit reagiert werden. Steigende Produktionskosten drängen insbesondere KMU zu effizienteren Gewinnungs-, Förder- und Produktionsprozessen. Die avisierte Plattformlösung soll daher konkrete Anreize setzen, um einzelne Prozesse wie die Auftragsplanung oder die Kapazitätsplanung von Fördergeräten zu digitalisieren. Dadurch wird die Auslastung der Fördergeräte gesteigert und das Unternehmen profitiert direkt von der Partizipation an der Plattformlösung. Aus der aufgezeigten Forschungslücke ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Wie kann die Auslastung von (mobilen) Betriebsmitteln, insbesondere Fördergeräten von KMU der S&E-Industrie durch Partizipation an der Plattform „PROMining“ erhöht werden?

Im Forschungsprojekt wurde der Nutzen und das Potential einer Plattformlösung für KMU der S&E-Industrie basierend auf einer morphologischen Betrachtung der Branche, der Analyse von Einflussfaktoren auf die Bedarfs- und Kapazitätsplanung und der Identifikation von Hemmnissen der Branche gegenüber Plattformen, untersucht. Darauf aufbauend wurden anhand einer Prozessanalyse die internen und externen Datenquellen und das Datenmanagement innerhalb eines S&E-Betriebes und Unternehmensverbundes detailliert. Basierend auf den verfügbaren Informationen wird im Projekt ein szenariobasiertes Prognosemodell zur Bestimmung der Kapazitätsauslastung und -planung entwickelt.

2 Nutzung digitaler Plattformen

Digitale Plattformen agieren als Intermediäre und stellen dabei die erforderliche Infrastruktur für wertschaffende Interaktionen zwischen mindestens zwei Beteiligten. In der Regel findet ein Austausch von Informationen, Gütern oder Dienstleistungen und einem Zahlungsmittel zwischen den beteiligten Akteuren statt. Eine wertschaffende Nutzung der Plattform kann zwischen Anbieter und Kunde (B2C) als auch zwischen zwei oder mehreren Unternehmen untereinander stattfinden (B2B). [8]

Digitale Plattformen zeichnen sich somit durch die Erfassung und systematische Verwertung von Daten ihrer Nutzer aus [9]. Plattformen befähigen Unternehmen zu einem strukturierten und automatisierten Informationsaustausch und generieren Wissen aus Produktionsdaten. Durch Plattformen entstehen somit neue Möglichkeiten der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen. [10]

Projiziert auf die S&E-Industrie ermöglicht eine digitale Plattform Unternehmen, die mehrere Standorte unterhalten, ein Potenzial zur Synchronisation von Betriebsstandorten. Die Nutzer der Plattform werden zu einer effizienteren Gestaltung von internen und externen Geschäftsprozessen befähigt, indem analoge Prozesse digitalisiert und automatisiert werden.

3 Wie verbessert PROmining die Auslastung?

Durch die Partizipation an einer Plattformlösung wird die Datenhaltung der Unternehmen soweit verbessert, dass interne und externe Datenquellen zur Prognose der Kapazitätsplanung und -auslastung eines Betriebes genutzt werden können. Innerhalb der Plattform werden unterschiedliche Planungsebenen betrachtet. Anhand der Analyse verfügbarer Daten werden einerseits die Kapazitätsplanung szenariobasiert abgebildet und andererseits die Kapazitätsauslastung berechnet und modelliert. Das Prognosemodell zur Kapazitätsplanung unterstützt bei der Frage, welche Ressourcen beziehungsweise Materialien in welchen Mengen nachgefragt werden. Anhand eines Kalkulationsmodells wird berechnet, welche Ressourcen das Unternehmen bereitstellen kann. Abgeleitet aus den gewonnenen Informationen werden Planungsprozesse datenbasiert ermöglicht. Mobile Fördergeräte werden besser ausgelastet und Betriebe können steigenden Preisen und volatilen Nachfragen mit erhöhter Effizienz begegnen. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht des Grobkonzepts zum Plattformdemonstrator.



Abbildung 1: Übersicht des Grobkonzepts zur Optimierung der Kapazitätsplanung und -auslastung

4 Prognosemodell – Kapazitätsplanung

Das Prognosemodell „Kapazitätsplanung“ zur Bestimmung des Rohstoffbedarfs entwickelt verschiedene Szenarien, welche die Unternehmen kurz- und mittelfristig bei der zu erwartenden Nachfrage unterstützt. Basierend auf historischen Daten kann zum Beispiel eine Prognose des Umsatzes der Baubranche erstellt werden, um potentielle Bedarfe nachgelagerter Branchen zu berücksichtigen. Eine beispielhafte Umsetzung des Prognosemodells zur Kapazitätsplanung kann wie folgt beschrieben werden. Der prognostizierte Umsatz der gesamten Baubranche wird auf die relevanten Zweige der Branche aufgedgliedert.

Anschließend wird für jeden Wirtschaftszweig, auf Basis des prognostizierten Umsatzes, die zu erwartenden Ausgaben für Baustoffe errechnet. Die Ausgaben werden schließlich verrechnet, sodass das Ergebnis des letzten Schritts die benötigten Baustoffmengen sind. Schlussendlich lassen sich anhand der Ergebnisse die benötigten intern Kapazitäten eines Betriebes ableiten. Ziel des Prognosemodells ist es, anhand verschiedener Szenarien die Nachfrageentwicklung zu prognostizieren, wie sich der Bedarf einer Rohstoffklasse verändern wird, sodass den Unternehmen eine datenbasierte Entscheidungshilfe an die Hand gegeben werden kann.

5 Kalkulationsmodell – Kapazitätsauslastung

Das Kalkulationsmodell „Kapazitätsauslastung“ gibt den Unternehmen Aufschluss über verfügbare Kapazitäten des Betriebes. Berechnungen anhand interner Kennzahlen und primärer Produktionsfaktoren ermöglichen die Prognose über verfügbare Kapazitäten des Betriebes. Es wird folglich die interne Ressourcenverfügbarkeit der Betriebe anhand von betriebsmittelbezogenen Kennzahlen und Telemetriedaten ermittelt. Durch die einheitliche Erfassung von Telemetriedaten an Betriebsmitteln und Anlagen können allgemeine Leistungskennzahlen bestimmt werden und Aussagen über Produktionsauslastung, Gerätenutzungsgrad und Anlageneffektivität getroffen werden. Defizite in der Kapazitätsauslastung können erkannt werden und Prozessabläufe gezielt mit den vorhandenen Daten optimiert werden. Durch die standardisierte Erfassung der Kennzahlen innerhalb eines Unternehmensverbundes und die Integration dieser Daten in die Plattformlösung können betriebsübergreifende Ziele abgeleitet und definiert werden. Anhand von zielgerichteter Prozessplanung kann folglich die Auslastung von beispielsweise Fördergeräten maximiert werden.

6 Dashboard – PROmining

Die Plattform PROmining soll dem Nutzer ermöglichen, betriebsinterne Daten wie Telemetriedaten von Betriebsmitteln, Personaldaten und Produktionsdaten einheitlich und ohne große technische Hürden zu erfassen. Auf dem Dashboard werden dem Teilnehmer standardisierte, relevante Leistungskennzahlen wie zum Beispiel Gesamtanlageneffektivität (OEE), Gesamteffizienz der Maschine (OE), Produktionseffizienz (PE), Maschinennutzungsgrad (UF) und Maschinenverfügbarkeit (AE) visualisiert abgebildet. Anhand dieser können ungenutzte Kapazitäten, wie nicht optimal genutzte Fördergeräte identifiziert werden. Auslastungsziele können für den internen und unternehmensübergreifenden Betrieb definiert werden, um eine Maximierung der Auslastung zu erreichen. Zudem soll der Export der über die Plattform bereitgestellten Daten in andere Systeme ermöglicht werden. Manuelle Mehrfacheingaben von Daten in verschiedene Systeme werden somit verhindert und Personalkapazitäten werden effizienter genutzt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit diesem Beitrag wurden aktuelle Ergebnisse des AiF-Forschungsprojekts PROmining, mit Bezug zur Fördertechnik in der S&E-Industrie vorgestellt. Neben großen Defiziten in der Digitalisierung konnten Herausforderungen in der Kapazitätsplanung und -auslastung von Betriebsmitteln identifiziert werden. Digitale Plattformlösungen haben das Potenzial beide Aspekte zu bewältigen. Im Forschungsprojekt PROmining wird untersucht, wie durch die Digitalisierung von bisher unzureichend digitalisierten Unternehmensprozessen und dem Einsatz einer Plattformlösung, die Auslastung von mobilen Betriebsmitteln erhöht werden kann.

In diesem Beitrag wurde das entwickelte Grobkonzept für den Plattformdemonstrator vorgestellt. Den Unternehmen der S&E-Industrie werden mit einem Prognosemodell mögliche Szenarien für die Auslastung ihres Betriebes bereitgestellt. Durch die Eingabe und Integration von Betriebsmitteldaten werden relevante Leistungskennzahlen berechnet und visualisiert, wodurch Auslastungsgrade von Betriebsmitteln und des Betriebs datenbasiert bestimmt werden können. Basierend auf beiden Ergebnissen werden beispielsweise datenbasierte Handlungsempfehlungen zur Erhöhung der Kapazitätsauslastung von Fördergeräten zur Verfügung gestellt.

In den noch folgenden Arbeitsschritten des Forschungsvorhabens PROmining erfolgen die Präzision des Plattformkonzepts und die Identifizierung von relevanten Funktionen und Anwendungsgebieten im engen Austausch mit den Unternehmen der S&E-Industrie. Es erfolgt der Aufbau eines internetbasierten Demonstrators der Plattform. Durch die unternehmensspezifische Implementierung und Validierung des Plattformdemonstrators wird das volle Potenzial von Plattformlösungen für S&E-Betriebe untersucht.

Das IGF-Vorhaben 21480 N der Forschungsvereinigung FIR e. V. an der RWTH Aachen wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

8 Literatur

- [1] Deloitte (2018): Tracking the trends 2018. The top 10 issues shaping mining in the year ahead.
- [2] O' Neill O (2017): Digitalisierung im Bergbau – Industrie 4.0. In: Mining Report 153 (1), S. 39 - 46.
- [3] Baums A, Schössler M, Scott B (2015): Kompendium Industrie 4.0. Wie digitale Plattformen die Wirtschaft verändern – und wie die Politik gestalten kann. In: Kompendium Digitale Standortpolitik, 2.
- [4] Agrawal AK, Krishnamoorthy G (2017) Tomorrow's mine. How digital can shape the future? Ernst & Young LLP.
- [5] Bratsch F (2018): Digitalisierung und Anlagenmanagement im Steinbruch. GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH, Berlin.
- [6] Skrypzak T (2016): Untersuchungen zur Optimierung der Prozessabläufe und der Energieeffizienz bei der Gewinnung von Natursteinen in Festgesteinstagebauten, Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen.
- [7] Kowitz SF (2016): Discover Patterns in Exceptions - Entdecke das Muster im Sonderfall. Bergbau 4.0 und Big Data: Erfahrungen eines Start-ups. In: GeoResources 2016, 3, S. 46 - 48.
- [8] Obermaier R (2019): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Springer Gabler, Wiesbaden.
- [9] BMWK (2022): Digitale Plattformen. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Digitale-Welt/digitale-plattformen.html> (zuletzt eingesehen am 18.03.2022).
- [10] Lundborg M, Gull I (2019): Digitale Plattformen als Chance für den Mittelstand. Relevanz, Anwendungen, Transfer. Begleitforschung Mittelstand-Digital WIK GmbH, Bad Honnef.

Julian Lassen, M. Sc.

lassen@mre.rwth-aachen.de

Marius Braun, M. Sc.

marius.braun@mre.rwth-aachen.de

Dr. Ing. Alexander Hennig

hennig@mre.rwth-aachen.de

MRE – Institute of Mineral Resources Engineering

RWTH Aachen University

Wüllnerstraße 2

52062 Aachen

Jonas Müller, M. Sc.

jonas.mueller@fir.rwth-aachen.de

Gerrit Hoeborn, M. Sc.

gerrit.hoeborn@fir.rwth-aachen.de

FIR e.V. an der RWTH Aachen

Campus-Boulevard 55

52074 Aachen

Rail-Running Conveyors: A disruptive new beltconveying technology

S. Ebert, M. Lurie

thyssenkrupp Industrial Solutions

Prof. C. Wheeler

The University of Newcastle

Abstrakt

Der Energieverbrauch moderner Gurtfördersysteme ist in den letzten Jahrzehnten erheblich gesunken. Obwohl umfangreiche Forschungsarbeiten zur Herstellung energieeffizienter Gurtförderer durchgeführt wurden, besteht noch erheblicher Spielraum für eine weitere Senkung des Energieverbrauchs, insbesondere bei stark beladenen oder langen Überlandförderern. Von dieser Ausgangslage wurde ein neues schienengestütztes Fördersystem entwickelt, um den Energieverbrauch von stark beladenen und langen Überlandförderern zu senken. Die neue Technologie trägt den treffenden Namen Rail Running Conveyor, indem sie zwei bewährte Transporttechnologien miteinander verbindet. Der Rail Running Conveyor vereint die Vorteile der Bandfördertechnik und des Schienentransports zu einem energie- und kosteneffizienten Schüttguttransportsystem.

In diesem Beitrag wird ein Vergleich zwischen dem Energieverbrauch und den Bewegungswiderständen des Rail Conveyor-Systems und herkömmlichen Gurtförderern vorgestellt. Der Rail Conveyor ist ein kontinuierliches Schüttgut-Transportsystem, das aufgrund der auf Stahlschienen laufenden Laufräder einen Rollwiderstand in ähnlicher Größenordnung wie Eisenbahnsysteme aufweist. Durch die effektive Eliminierung des Rollwiderstandes, des Biege- und des Schüttgutwiderstandes innerhalb des Rail Conveyor Systems kann im Vergleich zu konventionellen Gurtförderern eine Reduzierung des Energieverbrauchs um circa 50 % erreicht werden.

Der Blick auf die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Effekte stellt ergänzend einen deutlichen Mehrwert für die Bandanlagenbetreiber sowohl hinsichtlich Investitionskosten als auch im Betrieb heraus. Durch die wesentliche Verringerung der Laufwiderstände können in Summe die Komponenten der Bandanlage für geringere Beanspruchungen ausgelegt werden. Diese positiven Effekte werden dann im Betrieb durch eine Minderung der Ersatzteil- und Verschleißteilkosten sowie der Energiekosten weitergeführt.

1 Einleitung

Die bedeutende Rolle, die Gurtfördersysteme in modernen Schüttgutumschlagsbetrieben auf der ganzen Welt spielen und auch in Zukunft spielen werden, ist von entscheidender Bedeutung. Gurtförderer sind das bei weitem am weitesten verbreitete Schüttguttransportsystem, das im Bergbau, in der Mineralienverarbeitung und in der Energieerzeugung eingesetzt wird. Aufgrund ihrer kontinuierlichen Arbeitsweise sind sie für den automatisierten Bergbau äußerst wünschenswert. Dies erfordert höhere Kapazitäten und längere Transportstrecken für diese Technologie. Obwohl Förderbänder im Vergleich zu alternativen Technologien, wie z. B. Lkw, erhebliche Vorteile für automatisierte Prozesse bieten, erfordert ihr Betrieb nach wie vor erhebliche Energiemengen. Der Bedarf an Energieeinsparungen bei der Förderung im Bergbausektor ist entscheidend, wenn man den globalen Energiebedarf betrachtet. Am Beispiel einer typischen südafrikanischen Goldmine wird geschätzt, dass bis 2020 etwa 23 % der gesamten Betriebskosten auf Stromkosten entfallen werden [1].

In einer Arbeit von Jonkers [2] wurde die relative Effizienz typischer Transportmethoden anhand des Verlustfaktors für den Transport von Schüttgut aufgezeigt (siehe Abbildung 1). In Abbildung 1 sind die einzelnen Transportarten in zwei Abschnitte unterteilt: kontinuierlich und diskontinuierlich, wobei die Vorteile der Bahn gegenüber dem Lkw und des Lkw gegenüber dem Förderband deutlich werden. Der Vergleich in dieser Studie wurde weitgehend durch den Rollwiderstandsfaktor der jeweiligen Systeme beeinflusst, während die Effizienz der Antriebssysteme nicht berücksichtigt wurde. Der Wirkungsgrad des Antriebssystems wurde aufgrund der Komplexität, die beim Vergleich von Systemen entsteht, nicht berücksichtigt. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass aufgrund der beträchtlichen Größe dieser Systeme der Gesamtreibungsfaktor für das gesamte System ein viel geeigneterer Wert für den Vergleich ist. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Antriebssystem diese Reibungswiderstände überwinden muss, um das System anzutreiben. In dieser Studie wurden sowohl diskontinuierliche als auch kontinuierliche Systeme betrachtet, wobei kontinuierliche Systeme die bevorzugte Transportmethode darstellen. Betrachtet man den Rollwiderstand und damit den Energiebedarf von Förderbändern im Vergleich zu Transportzügen, sind erhebliche Verbesserungen möglich. Durch die Einbeziehung der Vorteile von Schienensystemen und der Vorteile der kontinuierlichen Förderung von Förderbändern kann ein System geschaffen werden, das in Bezug auf ein energieeffizientes System eine ideale Lösung für die Überlandbeförderung zu sein scheint.

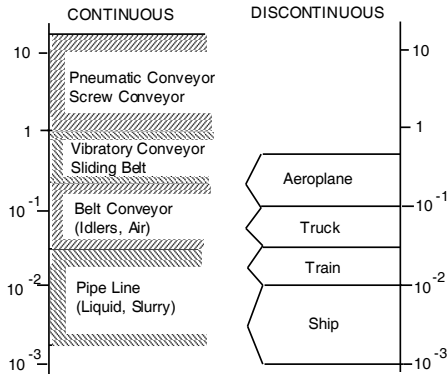


Abbildung 1: Verlustfaktoren für Schüttguttransport (Jonkers, [2])

Seit den Anfängen ihrer Entwicklung in den 1890er Jahren ist das grundlegende Funktionsprinzip moderner konventioneller Gurtförderer unverändert geblieben. Ein herkömmlicher Gurtförderer besteht aus einem gummibeschichteten Gurt, der von gemuldeten Umlenkrollen getragen und von einer oder mehreren Riemen-scheiben angetrieben wird, auf denen die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie erfolgt [3]. Bedeutende Entwicklungen und Innovationen bei Überland-Gurtförderern haben jedoch zu erheblichen betrieblichen und energetischen Verbesserungen geführt. Gurtfördersysteme müssen heute über viel längere Strecken transportieren, mit höheren Bandgeschwindigkeiten arbeiten und viel größere Leistungen erbringen, wobei das Streben nach einem geringeren Energiebedarf diese Anforderungen ermöglicht.

Die Weiterentwicklung der konventionellen Muldengurtförderer wurde durch die Nachfrage nach längeren Überlandgurtförderanlagen vorangetrieben. Die Notwendigkeit längerer Systeme ist mit einer Erhöhung der Bandspannung verbunden, was wiederum zu einem Anstieg des Energiebedarfs und der Leistungsaufnahme des Systems führt. Die Energieeffizienz von Gurtförderern kann typischerweise in Bezug auf Leistung, Betrieb, Technologie und auf Ausstattungsebene verbessert werden [4]. Zhang und Xia [3] stellten fest, dass sich der Großteil der veröffentlichten Literatur zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gurtförderern auf das Potenzial zur Verbesserung entweder des Betriebs oder der Ausstattung des Systems konzentriert. Wird die Verbesserung der Ausstattungseffizienz in Betracht gezogen, so entfallen etwa 60 % des Energieverbrauchs des Systems auf das Zusammenspiel von Fördergurt und Umlenkrolle [5], wobei kontinuierlich spezielle rollwiderstandsarme Gurtmischungen entwickelt werden [6].

Betrachtet man die Energieeffizienz von Förderbändern auf der Betriebsebene, so hat sich in der Industrie eine Verlagerung hin zum Einsatz von drehzahlvariablen Antrieben (VSD) vollzogen. Einer der Hauptgründe für den Einsatz von VSDs ist die Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Durchsatzes über die gesamte Länge des Systems sowie die Steuerung des instationären Verhaltens des Systems beim Anfahren und Anhalten [7]. Dies erhöht nachweislich die Betriebseffizienz des Systems erheblich, wie aus der zitierten Literatur hervorgeht [8 - 11]. Zhang und Xia [3, 12] befassten sich ebenfalls mit der Betriebseffizienz von Gurtförderern. Sie konzentrierten sich jedoch auf die Optimierung des Systems unter Verwendung eines Energiemodells für Gurtförderer. Bestehende Methoden [13 - 17] zur Energieberechnung von Antriebssystemen werden in der Regel verwendet, jedoch sind diese Modelle eher für die Auslegung des Gurtförderers als für die Optimierung geeignet.

Das von Zhang und Xia [3, 12] vorgeschlagene analytische Modell analysierte die optimale Betriebseffizienz von Gurtförderern auf der Betriebsebene. Dabei wurden zwei Leistungsindikatoren verwendet, nämlich die Energiekosten und der Energieverbrauch. Das vorgeschlagene Modell verwendet eine Offline-Parameterschätzung mit der Least-Square-Technik (LSQ) [18, 19] und eine Online-Parameterschätzung mit der rekursiven Least-Square-Technik (RLSQ) [20]. Durch den Einsatz dieser Methoden in dem vorgeschlagenen Modell konnten sie ein Bandfördersystem simulieren, bei dem eine Optimierung der Vorschubgeschwindigkeit und der Bandgeschwindigkeit erzielt wurde. Obwohl diese Methoden der Betriebseffizienz effektiv und relativ einfach zu implementieren sind, kann der Energiebedarf von Gurtförderern noch erheblich verbessert werden, wenn die technologische Effizienz berücksichtigt wird.

Wie oben dargelegt, zeigen die umfangreichen Forschungsarbeiten zur Betriebseffizienz von Förderbändern, dass eine erhebliche Energieeinsparung möglich ist. Um die Energieeffizienz weiter voranzutreiben, wird in diesem Beitrag eine neue Methode für lange Überlandtransporte vorgeschlagen, die die technologische Effizienz von Gurtfördersystemen berücksichtigt. Obwohl es eine beträchtliche Menge an Literatur über die Betriebseffizienz von Gurtförderern gibt, gibt es nur sehr wenig veröffentlichte Literatur, wenn die Energieeffizienz von Gurtförderern aus technologischer Sicht betrachtet wird. Wenn man dies berücksichtigt, besteht immer noch ein erheblicher Spielraum für die weitere Senkung des Energieverbrauchs, insbesondere bei stark belasteten und langen Überlandgurtförderern.

Betrachtet man den Reibungsfaktor für die folgenden Systeme: lange Überlandförderbänder liegen zwischen 0,009 und 0,017, Lastkraftwagen bei etwa 0,006 [21] und Schienenfahrzeuge bei etwa 0,001 bis 0,002 [22], erhält man einen Einblick in die Energieeffizienz. Es ist wichtig zu beachten, dass eine Verringerung des Rollwiderstands in einem System zu einer entsprechenden Steigerung der Energieeffizienz führt. Dies lässt sich am besten durch einen Vergleich der Rollwiderstände für jedes System erklären, wobei die Wirkungsgrade der

Antriebssysteme nicht berücksichtigt werden. Die Hauptwiderstände von Gurtförderern bestehen aus dem Biege- und Drehwiderstand des Gurtes und des Schüttgutes, dem Drehwiderstand der Umlenkrollen und dem Eindrückrollwiderstand des Fördergurtes (der in der Regel bis zu 60 % des Energieverbrauchs des Systems ausmacht [5]). Im Vergleich dazu ist der Rollwiderstand von Lastkraftwagen auf der Wechselwirkung zwischen den Gummireifen und der Straße zurückzuführen (wo zusätzliche Haftung durch das Gummi vorhanden sein kann), während die Eisenbahn den geringsten Rollwiderstand aufweist, da die Stahlräder auf Stahlschienen laufen.

Betrachtet man die Rollwiderstände zusammen mit dem Energieverbrauch der oben vorgestellten Systeme, so zeigt sich, dass die Schiene sowohl Gurtförderer als auch Lastkraftwagen unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz übertrifft. Trotz der Ineffizienzen von Gurtförderern haben Untersuchungen von Saxby und Elkins [23] gezeigt, dass Gurtförderer bei Durchsätzen von bis zu 5 Millionen Tonnen pro Jahr und horizontalen Förderstrecken von bis zu 40 km auf der Basis der Lebenszykluskosten kosteneffizienter sind als Lkw- und Bahntransport. Diese Forschungsergebnisse werden auch von Galligan [24] bestätigt, wo festgestellt wurde, dass die Kapitalkosten für die Schiene pro Kilometer höher sind als für Förderbänder und Lkw. Darüber hinaus sind die Betriebskosten für die Schiene geringer, was bedeutet, dass mit zunehmender Transportentfernung die höheren anfänglichen Kapitalinvestitionen durch niedrigere Betriebskosten ausgeglichen werden. Der Vergleich der relativen Betriebskosten hängt natürlich stark vom Verlustfaktor des Transports ab [2], wobei die Infrastrukturkosten allmählich durch die geringeren Energiekosten infolge der geringeren Rollreibung aufgewogen werden.

Die Beschränkung für konventionelle Gurtförderer liegt in der Wechselwirkung zwischen dem gummibeschichteten Gurt und den Umlenkrollen, was bedeutet, dass die Effizienz des Eisenbahntransports niemals von Systemen erreicht werden kann, die von konventionellen Umlenkrollen unterstützt werden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen wurde von Forschern der Universität Newcastle [25] ein neues schienengestütztes System für den kontinuierlichen Schüttguttransport entwickelt, um den Energiebedarf von schwer beladenen und langen Überland-Gurtförderern zu senken. Die neue Technologie trägt den treffenden Namen Rail Conveyor, da sie zwei bewährte Transporttechnologien kombiniert. Die Rail-Conveyor-Technologie stellt eine innovative und neuartige Abkehr von konventionellen kontinuierlichen Schüttguttransportsystemen dar und bietet erhebliche energetische und wirtschaftliche Vorteile. In diesem Beitrag wird ein Vergleich zwischen dem Energieverbrauch und den Bewegungswiderständen des Rail Conveyor-Systems und konventionellen Gurtförderern angestellt.

2 Rail Running Conveyor System

Das Rail-Conveyor-System ist ein neues energieeffizientes hybrides Schienen- und Gurtfördersystem, das von Forschern der Universität von Newcastle entwickelt wurde [25]. Das Rail-Conveyor-System vereint, wie der Name schon sagt, die Vorteile der Gurtfördertechnik und der Schiene zu einem kontinuierlichen Schüttguttransportsystem mit geringem Rollwiderstand. Das System funktioniert und wird wie ein herkömmlicher Gurtförderer angetrieben. Das Schüttgut wird von einem Förderband getragen, das von einer oder mehreren lokalisierten Antriebs-scheiben angetrieben wird. Das Antriebssystem ist das gleiche wie bei einem konventionellen Gurtförderer, entweder mit einer oder mehreren Antriebsrollen, zusätzlich zu einem Aufnahmesystem. Das Band wird jedoch nicht von Umlenkrollen getragen, sondern von einer Reihe miteinander verbundener Schlitten, was der neue Aspekt der Erfindung ist. Die Schlitten sind mit Stahl- oder Nylonrädern ausgestattet, die auf Stahlschienen mit geringer Spurweite laufen. Der Riemen ist nicht fest mit den Tragwagen verbunden, sondern treibt jeden Wagen durch die Reibung zwischen dem Riemen und dem Wagenjoch an. Die Tragwagen sind an einem endlosen Drahtseil befestigt, in der Regel über eine Feder, und in gleichmäßigen Abständen über die Länge des Systems verteilt. Die Tragschlitten folgen einem kontinuierlichen Weg um das Fördersystem herum und stützen das Schüttgut und den Gurt auf der Transportseite und den Gurt auf der Rücklaufseite [25]. Die Schienen sind in der Regel nebeneinander oder übereinander angeordnet, wie bei einem herkömmlichen Bandförderer, wie in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt.

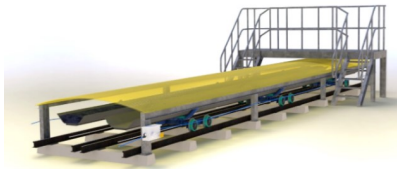


Abbildung 2: Rail Conveyor System nebeneinander in Side-by-Side Konfiguration

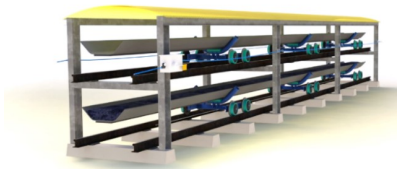


Abbildung 3: Rail Conveyor System mit Anordnung übereinander (Tragseite unten)

Im Juli 2015 wurde in China ein Prototyp eines Schienenförderersystems erfolgreich gebaut und in Betrieb genommen. Das in Abbildung 4 dargestellte Prototypsystem ist 150 m lang, hat eine Gurtbreite von 1,2 m und arbeitet mit Bandgeschwindigkeiten von bis zu 4 m/s. Abbildung 5 zeigt einen typischen Förderabschnitt des Schienenförderers, bei dem das Prototypsystem die Tragseite über der Rücklaufseite hat. Bei einem langen Überlandtransportsystem, wie oben beschrieben, wäre dies genau umgekehrt. Die erfolgreiche Inbetriebnahme und der Betrieb des Prototypsystems haben das Konzept des Schienenförderers bestätigt und ein unschätzbare Mittel zur Bewertung und Prüfung einer Vielzahl von Systemvariablen, einschließlich des Energieverbrauchs und der Bewegungswiderstände, bereitgestellt.



Abbildung 4: Rail Conveyor Prototyp in Betrieb in China



Abbildung 5: Detailansicht des Prototyps mit Tragseite oben

Dadurch, dass das Förderband über den größten Teil der Länge auf Schlitten und nicht auf Umlenkrollen gelagert ist, werden die wichtigsten Bewegungswiderstände eines herkömmlichen Bandförderers minimiert. Da der Gurt während des Transports auf den Tragschlitten ruht, gibt es keine Relativbewegung zwischen den Schlitten und dem Gurt und somit auch keinen Rollwiderstand durch Eindringen oder Biege- und Widerstand von Gurt und Schüttgut. Die einzigen Bewegungswiderstände der Rail Conveyor Technologie sind der Drehwiderstand der Lager und Dichtungen der Laufräder (ähnlich den Umlenkrollen eines herkömmlichen Gurtförderers) und die Rollreibung der Laufräder. Dies führt zu einem hocheffizienten Transportsystem analog zur Schiene.

In den folgenden Abschnitten wird ein Vergleich zwischen dem Energieverbrauch und den Bewegungswiderständen des Rail Conveyor Systems und konventionellen Gurtförderern dargestellt.

3 Vergleichsbetrachtung der Gurtzüge

Der Energieverbrauch eines herkömmlichen Förderbandsystems hängt von der Gurtspannung des Förderbands und dem damit verbundenen Energiebedarf für den Antrieb des Systems ab. Da die Schienenfördertechnik wie ein herkömmliches Gurtfördersystem angetrieben wird, gelten die gleichen Grundsätze für den Gesamtenergieverbrauch. Im folgenden Abschnitt werden die Bewegungswiderstände und die damit verbundene Spannungsverteilung über die Länge des Systems sowohl für herkömmliche Gurtförderer als auch für die Rail Conveyor-Technologie beschrieben.

3.1 Widerstände bei konventionellen Bandanlagen

Während des Betriebs eines langen Überlandförderbandsystems wird der größte Teil der Energie durch die Hauptwiderstände verbraucht, die entlang der Länge des Förderers auftreten, einschließlich des Biegewiderstands des Gurtes und des Schüttguts, des Drehwiderstands der Umlenkrollen und des Rollwiderstands des Förderbands über die Umlenkrollen.

Bei der Auslegung eines Überlandförderbandes werden die Antriebsleistung, die Aufwickelbewegung, die instationäre Wellenausbreitung und die daraus resultierende Verteilung der Bandspannung im stationären Zustand berechnet. Dies erfolgt für eine Reihe von Belastungsbedingungen, die typischerweise für einen leeren Gurt, ein voll beladenes System und den ungünstigsten Fall, der nur aus der Belastung der horizontalen und geneigten Abschnitte ermittelt wird, in Betracht gezogen werden. Diese Abschnitte werden anhand der Topographie des zu überwindenden Geländes bestimmt. Die Ableitung der verschiedenen Widerstandskomponenten variiert je nach Norm oder Bemessungsmethode, während die Böschungswiderstände im Allgemeinen nach demselben Verfahren ermittelt werden. Für diese Untersuchung wird ein gerades, horizontales Förderband angenommen, wie in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6 zeigt die Komponenten des Reibungswiderstandes für einen horizontalen Gurtförderer, ähnlich denen, die in CEMA [13] genannt werden. Es ist jedoch anzumerken, dass sich die Widerstandskomponenten deutlich von denen unterscheiden, die in DIN22101 [14] und ISO5048 [15] beschrieben sind. Die Widerstandskomponenten berücksichtigen die einzelnen Beiträge, anstatt mehrere Widerstände in einen Topf zu werfen. Bei der Auslegung eines Gurtfördersystems werden als Reibungswiderstandskomponenten der Eindruckrollwiderstand, der Gurtbiegewiderstand, der Umlenkrollen-Drehwiderstand, außerordentliche Widerstände und der Schüttgutbiegewiderstand berücksichtigt. Wie in den Normen DIN22101 [14] und ISO5048 [15] beschrieben, wird der Gesamtwiderstand über die Länge des Gurtfördersystems durch Überlagerung der Beiträge der einzelnen Reibungswiderstände berechnet, wie in Abbildung 6 dargestellt. Sekundäre Widerstände können auch als Längenkoeffizient auf der Grundlage des in DIN22101 [14] oder ISO5048 [15] beschriebenen Ansatzes einbezogen werden.

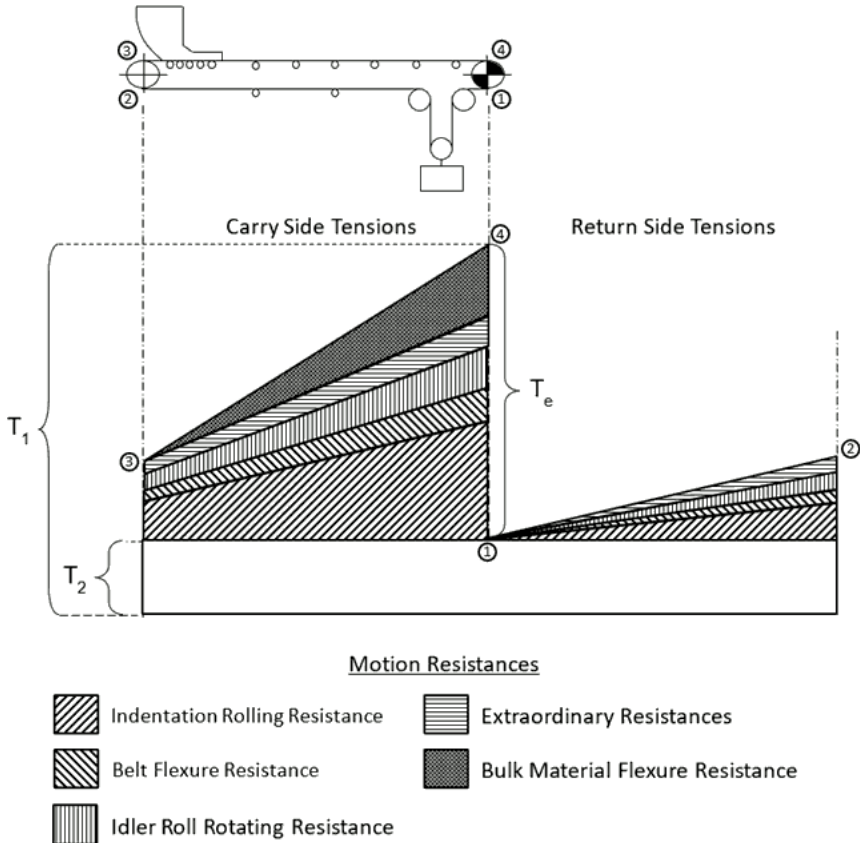


Abbildung 6: Betriebslastverteilung für horizontale Bandanlagen (Wheeler et al. [26])

Im Allgemeinen wird eine Zunahme der Spannung auf die kumulativen Widerstände zurückgeführt, die über die Länge des Systems auftreten. In Abbildung 6 sind die Komponenten des Band- und Schüttgutbiegewiderstands (aufgrund der Skalierung) so dargestellt, dass sie linear mit der Länge zunehmen und daher unabhängig von der Spannung sind. In der Praxis nehmen diese Komponenten in der Regel ab, da die Bandspannung mit zunehmender Bandlänge steigt. Die numerische Berechnung dieser Bewegungswiderstände erfolgt nach den in Wheeler et al. [26] dargestellten Verfahren. Es ist wichtig zu beachten, dass T_1 die maximale Spannung im System ist (typischerweise an der Antriebscheibe), T_2 ist die schlaife Seitenspannung und T_e ist die effektive (oder Antriebs-) Spannung, die numerisch wie folgt definiert ist: $T_e = T_1 - T_2$.

3.2 Widerstände bei „Rail Running Conveyor“ Bandanlagen

Da das Schienenfördersystem wie ein herkömmlicher Gurtförderer arbeitet und angetrieben wird, gilt die gleiche Methodik für die Bestimmung der Bedarfsleistung, der Aufnahmespannung und der sich daraus ergebenden Verteilung der Gurtspannung im stationären Zustand. Zuvor wurde festgelegt, dass das Schüttgut von einem Förderband getragen wird, das durch eine oder mehrere örtlich begrenzte Antriebsrollen angetrieben wird, wobei das Band jedoch nicht durch Umlenksrollen, sondern überwiegend durch eine Reihe miteinander verbundener Schlitten getragen wird. Eine schematische Darstellung des Schienenfördersystems ist in Abbildung 7 zu sehen, wobei die Punkte 5 - 8 die Transportseite und die Punkte 1 - 4 die Rücklaufseite darstellen. Die Wagen sind mit Stahl- oder Nylonrädern ausgestattet, die auf Stahlschienen mit geringer Spurweite laufen. Die Punkte 6 - 7 für die Transportseite und die Punkte 2 - 3 für die Rücklaufseite des in Abbildung 7 gezeigten Systems stellen die Hauptförderstrecke dar, die viele Kilometer lang ist.

Da das Band nicht fest mit den Tragschlitten verbunden ist, sind die Tragschlitten an einem endlosen Drahtseil befestigt, in der Regel über eine Feder, und in gleichmäßigen Abständen über die Länge des Systems verteilt. Die Tragschlitten folgen einem kontinuierlichen Weg und kehren an den Punkten 7 - 2 am Kopfende und an den Punkten 3 - 6 am Ende des Systems um. Die Punkte 5 - 6 stellen den Beladungsabschnitt des Systems dar und die Punkte 7 - 8 den Entladungsabschnitt des Systems am Kopfende, wobei in beiden Fällen herkömmliche Tragrollen zum Einsatz kommen. Die Punkte 1 - 2 schließlich stellen die Spannvorrichtung des Systems dar, welche ebenfalls einem herkömmlichen Gurtfördersystem entspricht und entsprechend mit Winden oder als Gewichtsspanntürme ausgeführt werden.

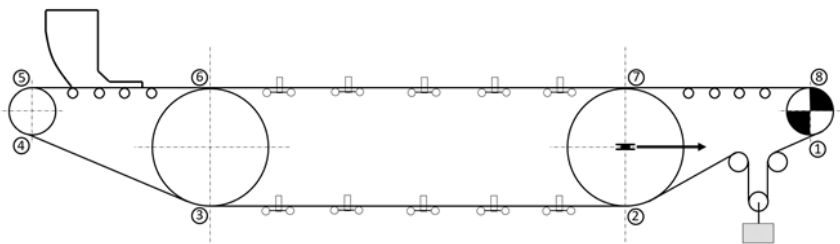


Abbildung 7: Schema des Rail Conveyor Systems

Die Hauptwiderstände des Schienenförderersystems sind der Rollwiderstand der Laufräder, der Widerstand der Laufradlager und -dichtungen sowie der Umlenkwiderstand des Wagens. Die Be- und Entladeabschnitte des Schienenförderers verwenden die Komponenten eines konventionellen Gurtförderers (dargestellt als Punkte 5 - 6 und Punkte 7 - 8 in Abbildung 7). Diese Abschnitte weisen alle Widerstände eines konventionellen Gurtförderers auf (siehe Abbildung 6), werden jedoch als sekundäre Widerstände für das Rail Conveyor-System eingestuft, da sie nur an den End- und Kopfabschnitten auftreten.

Ähnlich wie bei der Bestimmung der stationären Gurtspannungen in konventionellen Systemen wird die Spannungsverteilung des Rail Conveyor Systems in Abbildung 8 dargestellt. Betrachtet man die Hin- und Rücklaufseite des Systems, so zeigt sich, dass die Gurtspannung linear mit der Länge zunimmt (ähnlich wie bei einem konventionellen Gurtförderer). Wird der Lastwiderstand des Schüttguts auf der Tragseite des Systems berücksichtigt, kommt es zu einem Anstieg der Gurtspannung an den Belade- und Entladepunkten des Systems (das heißt an den Punkten 5 - 6 und 7 - 8). In der Hauptförderstrecke des Schienenförderersystems (das heißt an den Punkten 6 - 7) erhöht sich die Gurtspannung aufgrund des Schüttgutwiderstands nicht.

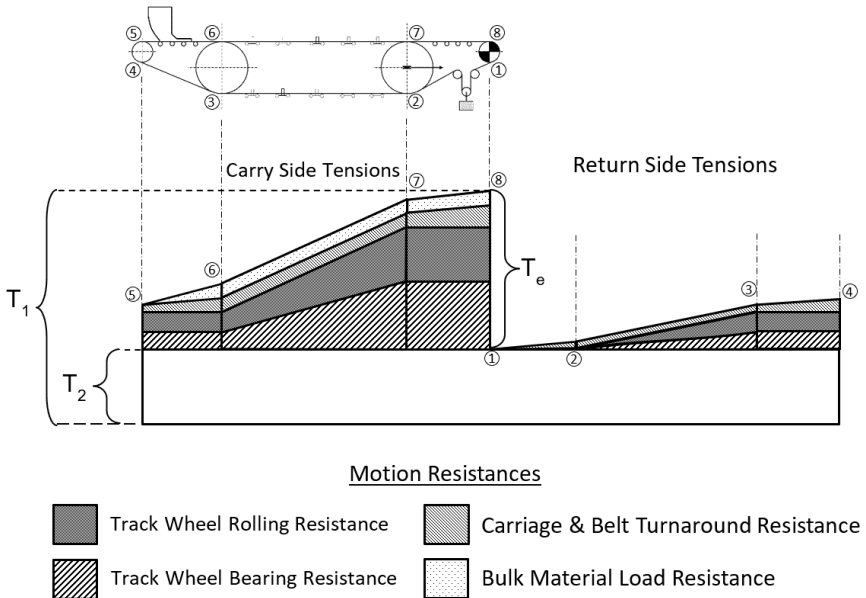


Abbildung 8: Gurtzugverteilung im Betrieb für das Rail Conveyor System.

Anhand von Abbildung 8 lässt sich erkennen, dass der örtliche Wagen- und Gurtumlenkwiderstand ähnlich verteilt ist wie der Schüttgutwiderstand, wobei dies sowohl auf der Hin- als auch auf der Rücklaufseite des Schienenfördersystems der Fall ist. Dies lässt sich am besten in Bezug auf die Spannung des Verbindungskabels zwischen den Wagen erklären. In der Arbeit von Wheeler [27] wurde gezeigt, dass es zu einer allmählichen Verringerung der Seilspannung kommt, wenn das Förderband von den Wagen getragen wird, was sich wiederum auf das Band auswirkt. Es ist auch wichtig zu beachten, dass die Widerstandsberechnungen des Schienenförderers das zusätzliche Gewicht der Stützwagen in die Komponente des Schienenradwiderstands einbeziehen, wie in Abbildung 8 dargestellt. Diese Widerstände werden in Abschnitt 5 näher erläutert.

Das Anfahren und Anhalten des Systems führt zu einem Einschwingverhalten, das sich von dem herkömmlicher Förderer unterscheidet. Die geringere Reibung und die höhere Trägheitsmasse des Systems beeinflussen die dynamische Wellenausbreitung und verlängern möglicherweise die Abklingzeit der Transienten. Diese Änderung würde die Anfahr- und Bremsvorgänge des Antriebs verlängern und die Dynamik der Massenerhöhung minimieren. Ein dynamisches Finite-Elemente-Methode (FEM)-Modell des Schienenförderers wird in [28] vorgestellt. Dieses Modell teilt das System in zwei Stränge auf, um das Verhalten der Wagen und des Gurtes getrennt zu berücksichtigen, wobei an jedem Knoten lokalisierte Widerstände, die spezifisch für die Lage des Gurtes sind, platziert werden. Angesichts der verringerten Spannungen im System konnten Parameter wie Riemenstärke und -breite, Geschwindigkeit und Auswahl der Tragrollen weiter optimiert werden, was zu einer weiteren Verringerung der Antriebsleistung führte.

4 Bestimmung der Widerstände bei konventionellen sowie Rail Running Conveyor Systemen

Die Bestimmung der Widerstände sowohl für herkömmliche Gurtförderer als auch für Schienenfördersysteme ist für die genaue und erfolgreiche Auslegung beider Systeme erforderlich. Einer der kritischsten Parameter bei der Auslegung beider Systeme ist der Leistungsbedarf für den Antrieb des Systems, der sich wiederum aus dem Energieverbrauch durch die zuvor beschriebenen Reibungswiderstände ergibt. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Widerstände in beiden Systemen und ihr Beitrag zum Energieverbrauch des jeweiligen Systems beschrieben.

4.1 Widerstände bei konventionellen Bandanlagen

Die wichtigsten Reibungswiderstände in konventionellen Gurtförderern sind der Biege- und der Umlenkrollenwiderstand von Gurt und Schüttgut, der von Wheeler [29] beschriebene Drehwiderstand der Umlenkrollen und der Eindrückrollwiderstand des Fördergurtes über die Umlenkrollen. Nach Hager und Hintz [5] und Wheeler [30 - 33] machen der Eindrückrollwiderstand und der Gurt- und Schüttgutbiege- und Umlenkrollenwiderstand in der Regel mehr als 80 % des gesamten Energieverbrauchs langer horizontaler Gurtförderer aus.

Der Eindrückrollwiderstand entsteht durch die Verformung der Seitenabdeckung des Fördergurtes, wenn dieser zwischen der Karkasse und den aufeinanderfolgenden Umlenkrollen eingeklemmt wird. Der Biege­widerstand des Gurtes entsteht durch die vertikale und transversale Verschiebung des Gurtes zwischen den Umlenkrollengruppen. Beide Widerstände gegen die Bewegung des Gurtes sind das Ergebnis interner Energieverluste innerhalb des Fördergurtes, die vom Gurt als Wärme absorbiert werden. Wenn der Gummigurt über eine Umlenkrolle des Förderers läuft, wird der Trommel­mantel durch das Gewicht des Gurtes und des Schüttguts eingedrückt. Der Eindrückungszyklus beinhaltet eine Kompression des Trommel­deckels, wenn der Riemen in die Rolle fährt, gefolgt von einer Erholung, wenn der Riemen über die Rolle läuft. Da sich der Riemen aufgrund der zeitabhängigen (viskoelastischen) Eigenschaften des Gummis nicht in gleichem Maße erholen kann, wie er komprimiert wird, bildet sich eine asymmetrische Druckverteilung, die zu einem Eindrückrollwiderstand führt. Abbildung 9 zeigt eine spezielle Prüfeinrichtung zur Messung des Eindrückrollwiderstands von Fördergurten. Die analytische und experimentelle Bestimmung des Biege­widerstandes von Gurt und Schüttgut sowie des Eindrückrollwiderstandes erfolgte nach Wheeler et al. [26], wobei die Werte in der zitierten Literatur eingesehen werden können.



Abbildung 9: Testanlage für Eindrückrollwiderstand



Abbildung 10: Testanlage für Rotationswiderstand der Tragrollen

Die Hauptfunktion der Tragrollen in einem Gurtförderersystem besteht darin, den Fördergurt über seine Länge zu stützen. Die Vorhersage des kumulativen Widerstands der Tragrollen ist von entscheidender Bedeutung für die Berechnung der Gurtspannung und damit des Energiebedarfs eines Systems, insbesondere bei langen Überlandförderern, bei denen es in der Regel mehr als tausend Tragrollen pro Kilometer Gurt gibt. Der Drehwiderstand von Tragrollen in Gurtförderanlagen entsteht durch die Reibung der Wälzkörper in den Lagern, den viskosen Widerstand des Schmiermittels und die Reibung der Kontaktlippendichtungen [29]. Die Widerstandskraft trägt typischerweise zwischen 5 – 15 % [5, 30] zum Bewegungswiderstand von langen horizontalen Gurtförderern bei. Obwohl dies im Vergleich zum Biege- und Schüttgutwiderstand des Gurtes sowie zum Rollwiderstand der Vertiefungen als relativ geringer Beitrag angesehen werden kann, muss der Drehwiderstand der Tragrollen insbesondere bei langen Überlandgurtförderern berücksichtigt werden. Die genaue Bestimmung dieses Widerstands ist entscheidend für die Bedarfsleistung, die wiederum zu einer geeigneten Auswahl der Antriebe und Gurte führt. Abbildung 10 zeigt eine spezielle Prüfeinrichtung, mit der der Drehwiderstand von Tragrollen gemessen wird.

Der Drehwiderstand der Tragrollen (Felgenwiderstand) hängt in erster Linie von der Art und Konfiguration der Dichtung, der Art der Lager, der Temperatur des Schmierstoffs und der Drehzahl der Tragrolle ab [29]. Berührende Lippendichtungen und fettgefüllte Labyrinthdichtungen bilden in der Regel die Begrenzung, die das Eindringen von Staub und Wasser in die Wälzkörper der Lager verhindert. Die Labyrinthdichtungen können vollständig mit Fett gefüllt sein, um die Dichtwirkung des Labyrinths zu optimieren, was zu einem viskosen Widerstand führt, der durch die Scherung des Fetts zwischen den Schichten der rotierenden und stationären Oberflächen entsteht. Eine äußere berührende Lippendichtung bildet in der Regel die primäre Grenze zwischen externen Verunreinigungen, die in die Labyrinthdichtung eindringen, während eine innere Lippendichtung das Schmierfett innerhalb des Lagers enthält. Die äußeren und inneren Lippendichtungen tragen aufgrund der Art des Dichtungsmechanismus zum Drehwiderstand der Tragrolle bei. Zusätzlich zu den mit der Dichtung verbundenen Widerständen verwenden herkömmliche Tragrollen Wälzlager, bei denen die Reibung in erster Linie von der Art und Größe des Lagers, der Betriebsgeschwindigkeit, den Eigenschaften und der Menge des Schmierstoffs und – im Falle von Tragrollen in geringerem Maße – von der Belastung abhängt [26].

4.2 Widerstände bei „Rail Running Conveyor“ Bandanlagen

Die wichtigsten Reibungswiderstände im Schienenfördersystem sind der Rollwiderstand der Laufräder, der Lagerwiderstand der Laufräder und der Umdrehungswiderstand des Wagens. Untersuchungen von Wheeler et al. [34] haben gezeigt, wie der Rollwiderstand der Laufräder und der Lagerwiderstand der Laufräder für eine Reihe von Materialien bestimmt werden können. Diese Werte werden zur Bestimmung des Leistungsbedarfs und des voraussichtlichen Energieverbrauchs des Schienenfördersystems verwendet, wie in Abschnitt 6 beschrieben.



Abbildung 11: Testaufbau für Laufradwiderstandsmessungen

Um die durch die Rail Conveyor-Technologie zu erwartende Energieeinsparung zu quantifizieren, wurden Laborexperimente durchgeführt [34]. Diese Untersuchung umfasste einfache Widerstandstests sowie komplexere kombinierte Radial- und Axiallasttests mit verschiedenen potenziellen Schienenradmaterialien. Es gibt zwar viel Literatur über den Rollwiderstand konventioneller Eisenbahnsysteme, aber der Einfluss von Laufrädern mit kleinerem Durchmesser und deutlich geringeren Radiallasten ist in der veröffentlichten Literatur nicht ohne weiteres zu finden. Abbildung 11 zeigt eine Prüfvorrichtung, in der erste Widerstandsmessungen mit Stahlrädern durchgeführt wurden, die an Achsnaben von Anhängern mit Kegelrollenlagern befestigt waren. Die Versuchsergebnisse ergaben Reibungsfaktoren von 0,004 bis 0,005 trotz der Verwendung von Kegelrollenlagern, die in der Regel einen wesentlich höheren Rotationswiderstand aufweisen als Rillenkugellager. In jüngster Zeit wird auch der Verschleiß von Kettenrädern mit Hilfe von FEM-Simulationen untersucht, die auf Labordaten basieren, um das effektivste Material für die Herstellung der Kettenräder auszuwählen. Abbildung 12 zeigt eine Laborprüfanlage zur Messung des Verschleißes und des Rotationswiderstands von Laufrädern unter kombinierter radialer und axialer Belastung.



Abbildung 12: Testaufbau für Felgenwiderstand in Kombination zur Kontaktreibung

Um ein besseres Verständnis des Reibungsfaktors des Schienenfördersystems zu erlangen, wurde eine Reihe von Tests mit verschiedenen Schienenradmaterialien durchgeführt. Zu den getesteten Materialien gehörten Kunststoff, verschiedene Nylonsorten und Gusseisen. Um den Unterschied zwischen der Kontaktreibung zwischen den Laufrädern und der Leichtspurschiene und dem Drehwiderstand der Räder zu ermitteln, wurden zwei Testreihen durchgeführt. Der erste Test, der durchgeführt wurde, war ein Felgenwiderstandstest (siehe Abbildung 13), der ein quantifizierbares Maß für den Drehwiderstand der Lager, der Dichtungsanordnung und des Fetts liefert (ähnlich wie bei herkömmlichen Tragrollen). Beim zweiten Test wurde die in Abbildung 12 gezeigte Labortestausrüstung verwendet, mit der der Felgenwiderstand zusätzlich zur Kontaktreibung zwischen den Laufrädern und der Leichtspurschiene gemessen wird. Dazu wurde der Gesamtwiderstand des Laufrads unter Last aufgezeichnet und der Wert des Felgenwiderstands abgezogen, um einen Gesamtkontaktreibungsfaktor für jedes der geprüften Laufradmateriale zu erhalten. Die Bestimmung der Hauptwiderstände mit den oben genannten Methoden ist entscheidend für die Berechnungen des Leistungsbedarfs und des Energieverbrauchs. Die Ergebnisse dieser Tests sind in Abbildung 14 dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten verwendet, in denen anhand einer Fallstudie die Verringerung des Energieverbrauchs des Schienenfördersystems im Vergleich zu herkömmlichen Überlandgurtförderern aufgezeigt wird.



Abbildung 13: Testaufbau für Felgenwiderstandstest

5 Vergleich der Widerstände

Die Widerstände des Rail Conveyor Systems und der konventionellen Gurtförderer können verglichen werden, wenn man die Reibungsfaktoren der beiden Systeme berücksichtigt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein 11 km langes System zum Vergleich herangezogen. Die Widerstände für einen konventionellen Gurtförderer wurden in Übereinstimmung mit der Norm ISO5048 [15] ermittelt. Darüber hinaus wurden zur Bestimmung der Widerstandskomponenten des Rail Conveyor Systems die Reibungsfaktoren für den Rollwiderstand der Laufräder und den Lagerwiderstand der Laufräder in der Arbeit von Wheeler et al. [34] experimentell ermittelt. Dabei wurden Werte von 0,002 und 0,004 für die jeweiligen Komponenten unter Last (das heißt unter Berücksichtigung einer Normallast von 200 kg pro Rad) ermittelt. Diese Werte sind in Abbildung 14 für eine Reihe von Gleisradwerkstoffen dargestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass der Reibungsfaktor die gesamte Länge des Systems als Gesamtreibungswert berücksichtigt.

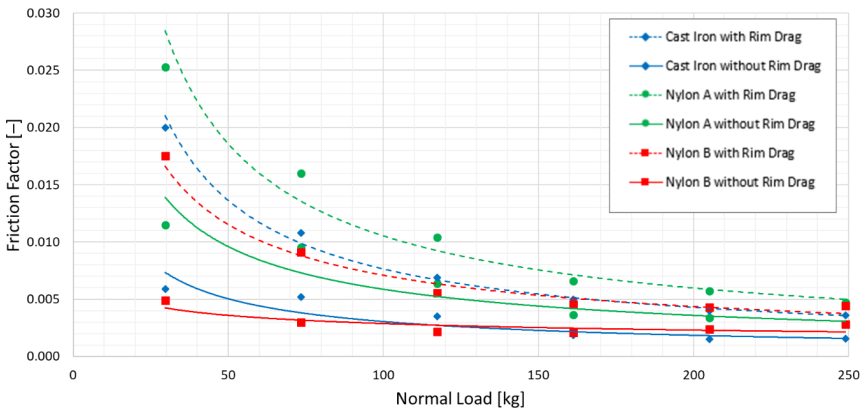


Abbildung 14: Vergleich der Reibungsfaktoren (Wheeler et al. [34]).

Der Vergleich der Reibungsfaktoren für das Rail Conveyor-System und herkömmliche Gurtförderer ist in Abbildung 15 dargestellt. Zum Vergleich sind Reibungsfaktorwerte für ein konventionelles Gurtfördersystem von 0,01 (optimierter Überlandgurtförderer) und 0,02 (herkömmlicher Gurtförderer) dargestellt. Die drastische Verringerung des Reibungsfaktors des Schienenförderersystems im Vergleich zu herkömmlichen Gurtförderern ist in erster Linie auf die Beseitigung des Rollwiderstands der Vertiefung und des Biege- und Lagerwiderstands von Gurt und Schüttgut zurückzuführen. Diese Verringerung des Reibungsfaktors des Schienenförderersystems führt auch zu einer Verringerung des Energieverbrauchs und der Bedarfsleistung des Systems. Dies führt zu geringeren Gurtspannungen und damit zu einer geringeren Festigkeit der Fördergurte. Um die Verringerung des Energieverbrauchs und des Leistungsbedarfs des Rail Conveyor Systems zu demonstrieren, wird im folgenden Abschnitt eine Fallstudie vorgestellt.

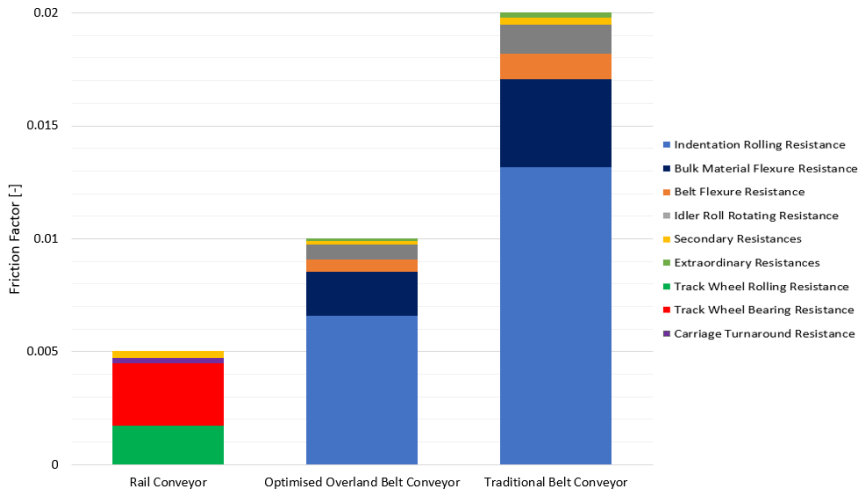


Abbildung 15: Widerstandsvergleich Rail Conveyor vs. konventionelle Bandanlage

6 Fallstudie

Die potenziellen Energie- und Leistungsvorteile der Rail Conveyor-Technologie gegenüber konventionellen Überlandgurtförderern für den langen Überlandtransport von Schüttgütern werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Zu diesem Zweck wird ein 11 km langer Überlandgurtförderer für den Transport von Eisenerz untersucht, dessen Konstruktionsmerkmale in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Tabelle 1: Spezifikation der Förderbandanlage

	Bulk Material	Iron Ore
Bulk Material Density	2200	kg / m ³
Design Capacity	5000	t / hr
Belt Speed	4,0	m / s
Belt Width	1500	mm
Horizontal Length	11000	m
Lift	50	m

Der Reibungsfaktor f nach DIN22101 [14] ist ein bewährtes Maß für die Energieeffizienz eines Gurtfördersystems, wobei ein niedrigerer Reibungsfaktor für ein energieeffizienteres System steht. Nach DIN22101 [14] und ISO5048 [15] beträgt der Nennwert von f für die Systemauslegung 0,020, aber dieser Wert kann bei gut ausgelegten Systemen mit guter Gesamtausrichtung und guten Wartungspraktiken reduziert werden. Für den in diesem Beispiel betrachteten Überlandgurtförderer wurde aufgrund der Erfahrungen der Autoren bei früheren Konstruktionsprüfungen [35] ein Wert von $f = 0,015$ verwendet. Dieser Wert wurde auf der Grundlage einer speziellen, von Wheeler [30] entwickelten Software für die

Auslegung von Förderern vorausberechnet. Die sich daraus ergebenden Gurtspannungen und Leistungsanforderungen für dieses System sind in Tabelle 2 aufgeführt, wobei T_1 die maximale Gurtspannung, T_2 die schlaaffe Seitenspannung und T_e die effektive (oder Antriebs-) Spannung darstellt, die numerisch wie folgt definiert ist: $T_e = T_1 - T_2$. Die berechnete Gurtfestigkeit (ST) in kN / m Gurtbreite ist ebenfalls angegeben und wird unter der Annahme eines statischen Sicherheitsfaktors des Gurtes von 5:1 berechnet.

Tabelle 2: Systemparameter vs. DIN Widerstandsfaktoren

System Parameters	Equivalent DIN Friction Factor, f	
	Overland Belt Conveyor	Rail Conveyor System
	0,015	0,005
Demand Power (MW)	4,3	1,9
Belt Strength (kN / m)	ST4000	ST2000
T_1 (kN)	1343	608
T_2 (kN)	280	130
T_e (kN)	1063	478

Zusätzlich sind in Tabelle 2 die berechneten Gurtspannungen, der Leistungsbedarf und die Anforderungen an die Gurtfestigkeit für ein Schienenfördersystem aufgeführt, das mit einem äquivalenten Reibungsfaktor von $f = 0,005$ nach DIN22101 [14] betrieben wird. Die Methode, die für die Berechnung von T_1 , T_2 und T_e in dieser Fallstudie verwendet wurde, basiert auf den Normen DIN22101 [14] und ISO5048 [15]. Die Analyse der in Tabelle 2 dargestellten Werte zeigt, dass bei einem 11 km langen System eine signifikante Reduzierung der Bedarfsleistung von circa 50 % für ein Schienenfördersystem im Vergleich zu einem konventionellen Überlandgurtförderer zu verzeichnen ist. Darüber hinaus ist festzustellen, dass diese Verringerung des Leistungsbedarfs und des Energieverbrauchs weiter zunimmt, wenn die Länge des Schienenfördersystems erhöht wird.

7 Schlussbemerkung

In diesem Beitrag wurde ein Vergleich zwischen der Bedarfsleistung, dem damit verbundenen Energieverbrauch und den Bewegungswiderständen des Rail Conveyor-Systems und herkömmlicher Gurtförderer vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass der Energieverbrauch des Rail Conveyor Systems im Vergleich zu konventionellen Gurtförderern deutlich geringer ist, wenn ein 11 km langes System betrachtet wird. Die Reibungswiderstände des Rail Conveyor Systems und der konventionellen Gurtförderer können direkt miteinander verglichen werden, wenn der Reibungsfaktor jedes Systems berücksichtigt wird. Aufgrund der effektiven Beseitigung des Rollwiderstandes der Vertiefungen und des Biege- widerstandes des Gurtes und des Schüttgutes innerhalb des Rail Conveyor Systems kann eine ungefähre Reduzierung des Energieverbrauchs um 50 % erreicht werden. Zusätzlich können entsprechend deutliche Einsparungseffekte bei der

Komponentenauswahl realisiert werden, so dass die Wirtschaftlichkeit des Rail Conveyors im Vergleich zu konventionellen Bandanlagen sowohl hinsichtlich der Investitionskosten als auch bei den Betriebskosten deutlich Einsparungspotentiale für die Industrie mit sich bringt.

8 Quellenverweise

- [1] Van der Zee, L. F., Pelzer, R. and Marais, J. H., The Combined Cost Effect of Carbon Tax, ECS and MYPD3 Tariffs on the Gold Mining Industry of South Africa. Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE), 2013 Proceedings of the 10th, Aug. 2013.
- [2] Jonkers, C., Loss Factor in Transport. *Fordern und Heben*, 1981. Vol.31. No.2.
- [3] Zhang, S. and Xia, X., Modeling and Energy Efficiency Optimization of Belt Conveyors. *Applied Energy*, 2011. Vol.88. No.9. pp.3061-3071. doi:10.1016/j.apenergy.2011.03.015.
- [4] Xia, X. and Zhang, J., Control Systems and Energy Efficiency from the POET Perspective. In: IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency; Vilamoura, Portugal; 29-31 March, 2010.
- [5] Hager, M. and Hintz, A., The Energy Saving-Design of Belts for Long Conveyor Systems. *Bulk Solids Handling* 1993. Vol.13. No.4. pp.749-758.
- [6] Jansen, M., The Development of Energy-Optimized Conveyor Belts – A Joint Project of the Conveyor Belt Group of ContiTech AG and RWE Power AG. *World Min* 2008;60(2):83–7.
- [7] Robinson, P. W., Dynamics of Open and Closed Belt Conveyor Systems Incorporating Multiple Drives. PhD Thesis, The University of Newcastle, 2015.
- [8] Middelberg, A., Zhang, J. and Xia, X., An Optimal Control Model for Load Shifting – with Application in the Energy Management of a Colliery. *Applied Energy*, 2009. Vol.86. No.7-8. pp.1266-1273. doi:10.1016/j.apenergy.2008.09.011.
- [9] Marx, D. J. L. and Calmeyer, J. E., An Integrated Conveyor Energy Model Methodology. *Trans South African Institute of Electrical Engineers*, 2004. Vol.95. pp.256–264.
- [10] Halepoto, I. A. and Khaskheli, S., Modeling of an Integrated Energy Efficient Conveyor System Model Using Belt Loading Dynamics. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016. Vol.9. No.47. doi:10.17485/ijst/2016/v9i47/108658.
- [11] De Almeida, A. T., Fonseca, P. and Bertoldi, P., Energy-Efficient Motor Systems in the Industrial and in the Services Sectors in the European Union: Characterisation, Potentials, Barriers and Policies. *Energy*, 2003. Vol.28. Vol.7. pp.673–690. doi:10.1016/S0360-5442(02)00160-3.
- [12] Zhang, S. and Xia, X., Optimal Control of Operation Efficiency of Belt Conveyor Systems. *Applied Energy*, 2010. Vol.87. No.6. pp.1929-1937. doi:10.1016/j.apenergy.2010.01.006.
- [13] CEMA, (2014). *Belt Conveyors for Bulk Materials*, 7th Ed. Naples, Florida, USA.
- [14] DIN22101, (2000). *Continuous Conveyors – Belt Conveyors for Loose Bulk Materials – Basis for Calculation and Dimensioning*.
- [15] ISO5048:1989. *Continuous Mechanical Handling Equipment – Belt Conveyors with Carry Idlers – Calculation of Operating Power and Tensile Forces*, International Standard, Switzerland.
- [16] Hager, M. and Simonsen, H., Calculation and Design of Belt Conveyors for Bulk Material. *Braunkohle Surf Min*, 2000. Vol.52. No.3. pp.245–260.
- [17] Goodyear. *Handbook of Conveyor and Elevator Belting*. Akron, Ohio: The Goodyear Tire & Rubber Company; 1975.
- [18] Hsia, T. C., On Least Squares Algorithms for System Parameter Identification. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1976. Vol.104. No.8.

-
- [19] Chen, H. Y. K. and Postel, C. E., On-Line Parameter Identification of Input Output Curve for Thermal Units. *IEEE Trans. Power Syst.* 1986;PWRS-1(2):221-4.
- [20] Koubaa, Y., Recursive Identification of Induction Motor Parameters. *Simul. Modell. Pract. Theory*, 2004. Vol.12. pp.363-381.
- [21] Lodewijks, G. and Welink, J., The Environmental Impact of Transport Systems, Proc. 10th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation + CHoPS-06, Brisbane, Australia. 2009.
- [22] Avallone, E., Baumeister, T. and Sadegh, A., Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, 11th Ed. McGraw-Hill. 2006.
- [23] [Saxby, P. and Elkink, J., Material Transportation in Mining - Trends in Equipment Development and Selection, *Australian Bulk Handling Review*, 2010. Vol. 15. No.2. pp.10-14.
- [24] Galligan, S.: Pit to Port Solutions - Determining the Best Transportation Option, Proc. OzMine, Indonesia. 2011.
- [25] Wheeler, C. A., Rail Conveyor System - International Patent Number; WO2012/009765 A1, Filed 26 Jan 2012.
- [26] Wheeler, C., Munzenberger, P., Ausling, D. and Beh, B., Energy Efficient Belt Conveyor Design. In Proc. Beltcon 18. IMHC: South Africa. 2015.
- [27] Wheeler, C. A., Development of the Rail Conveyor Technology. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2017. DOI: 10.1080/17480930.2017.1352058.
- [28] Rahman, A., Robinson, P. W., Carr, M. J. and Wheeler, C. A., A Dynamic Analysis of the Rail Conveyor System. Proc. 13th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Gold Coast, Australia. 2019.
- [29] Wheeler, C. A., Rotating Resistance of Belt Conveyor Idler Rolls. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.*, 2015. Vol.138(4):041009-041009-8. doi:10.1115/1.4031552.
- [30] Wheeler, C., Analysis of the Main Resistances of Belt Conveyors, PhD Thesis, 2003. The University of Newcastle, Australia.
- [31] Wheeler, C., Indentation Rolling Resistance of Belt Conveyors - A Finite Element Solution, *Bulk Solids Handling*, 2006. Vol.26. No.1. pp.40 - 44.
- [32] Munzenberger, P. and Wheeler, C., Laboratory Measurement of the Indentation Rolling Resistance of Conveyor Belts. *Measurement*, 2016. Vol. 94. pp. 909-918. ISSN 0263-2241.
- [33] Wheeler, C. and Ausling, D., Numerical Optimisation Procedures Applied to Belt Conveyor Design, *Bulk Solids and Powder: Science and Technology*, 2008. Vol.3. pp.15 - 22.
- [34] Wheeler, C. A., Carr, M. J. and Chen, B., The Rail Conveyor - A New Energy Efficient Conveying Technology. In Proc. Beltcon 19. IMHC: South Africa. 2017
- [35] TUNRA Bulk Solids Report No.7816, (2012). Conveyor Design Audit.

Stefan Ebert

stefan.ebert@thyssenkrupp.com

thyssenkrupp Industrial Solutions AG
thyssenkrupp Allee 1
45143 Essen

Martin Lurie

martin.lurie@thyssenkrupp.com

thyssenkrupp Industrial Solutions (USA), Inc.
6400 South Fiddler's Green Circle, Suite 700
Greenwood Village, Colorado 80111
USA

Michael J. Carr

michael.j.carr@newcastle.edu.au

Newcastle Institute for Energy and Resources, The
University of Newcastle
Centre for Bulk Solids and Particulate Technologies
(CBSPT)
Callaghan NSW 2308
Australia

Prof. Craig A. Wheeler

craig.wheeler@newcastle.edu.au

Newcastle Institute for Energy and
Resources, The University of Newcastle
Centre for Bulk Solids and Particulate
Technologies (CBSPT)
Callaghan NSW 2308
Australia

Peter W. Robinson

Peter.w.robinson@newcastle.edu.au

Newcastle Institute for Energy and
Resources, The University of Newcastle
Centre for Bulk Solids and Particulate
Technologies (CBSPT)
Callaghan NSW 2308
Australia

Bin Chen

bin.chen@newcastle.edu.au

Newcastle Institute for Energy and
Resources, The University of Newcastle
TUNRA Bulk Solids
Callaghan NSW 2308
Australia

Theorie und Praxis eines digitalen Zwillinges für optimalen Betrieb und Instandhaltung von Bandanlagen

Dr. M. Ziegler

J.M. Voith SE & Co. KG, Crailsheim

Einleitung

Ein Großteil des Schüttguttransports im Bergbau erfolgt durch Bandanlagen. Dies wird in Zukunft noch zunehmen. Für ihren wirtschaftlichen Betrieb sind die richtige Auslegung, Betrieb und Wartung von entscheidender Bedeutung. Hierbei können jüngere Entwicklungen wie zum Beispiel der Einsatz eines Digitalen Zwillinges der Bandanlage einen deutlichen Beitrag liefern. Da der Begriff „Digitaler Zwilling“ fast schon zu einem inflationär gebrauchten Modewort geworden ist, unter dem jeder etwas anderes versteht, soll dieser Beitrag den von Voith entwickelten Digitalen Zwilling „BeltGenius“ für Bandanlagen in Theorie und betrieblicher Praxis vorstellen.

1 Grundlagen des Rechenmodells

1.1 Rundrechnung mit analytischer Berechnung des Hauptwiderstands

Der Kern des Digitalen Zwillinges ist eine rechnerische Nachbildung der Bandanlage, vergleichbar mit den einschlägigen Berechnungsprogrammen, mit denen Bandanlagen üblicherweise ausgelegt werden. Diese Berechnungsprogramme basieren auf Formeln, die in Abhängigkeit von den jeweiligen Betriebsparametern die örtlichen Bewegungswiderstände entlang des Gurtverlaufs liefern. Siehe hierzu [1] und [2].

Der Digitale Zwilling unterscheidet sich gegenüber herkömmlichen Berechnungsprogrammen wie folgt:

- Während die Bandberechnungsprogramme bedarfsweise „offline“ für verschiedene Betriebszustände und Beladungen eingesetzt werden, wird der Digitale Zwilling mit realen Betriebsdaten über längere Zeiträume betrieben – entweder offline mit historischen Betriebsdaten oder online parallel zum laufenden Betrieb
- Während die Bandberechnungsprogramme mit Erfahrungswerten für vorab unbekannte Werte der Parameter in den Berechnungsformeln arbeiten, werden beim Digitalen Zwilling die Parameter aus dem Vergleich zwischen errechneten und gemessenen Antriebsleistungen mittels Optimierungsverfahren automatisch ermittelt
- Aufgrund der hohen Nachbildungsgüte erlaubt der Digitale Zwilling quantitative Aussagen zur Belastung aller Komponenten und die Bewertung der Komponenten bezüglich der erzielten Lastkollektive und ihres Anteils am Energieverbrauch
- Der Digitale Zwilling liefert Hinweise zum optimalen Betrieb der Anlage, Auswertungen zur erzielten energetischen Effizienz der betrieblichen Praxis und erkennt Abweichungen, die aus physikalischen Änderungen der Anlage resultieren

Die Digitalen Zwillinge verschiedener Anbieter unterscheiden sich in der Komplexität und Genauigkeit der mathematischen Nachbildung. Wir sehen den Vorteil unseres Modells in der analytischen Nachbildung des Hauptwiderstands im Unterschied zu dem ansonsten allgemein verwendeten fiktiven Reibbeiwert [1]. Unser analytisches Modell basiert auf vielen Betriebsmessungen und umfasst den Einfluss der örtlichen Gurtzugkraft auf die Materialwalkung, der spezifischen Eigenschaften der Gurte auf die Gummiwalkung sowie der Umgebungstemperatur auf die Erwärmung der Gurte und die damit einhergehende Änderung des Bewegungswiderstands.

1.2 Zuordnung der Beladung

Da die Hubarbeit einen wesentlichen Einfluss auf den Leistungsbedarf hat (1 m Hub entspricht energetisch etwa 50 m horizontalem Transport) und eine Bandanlage nie ganz söglich verläuft (Abbildung 1), sind die Bewegungswiderstände in den einzelnen Abschnitten der Bandanlage sehr unterschiedlich.

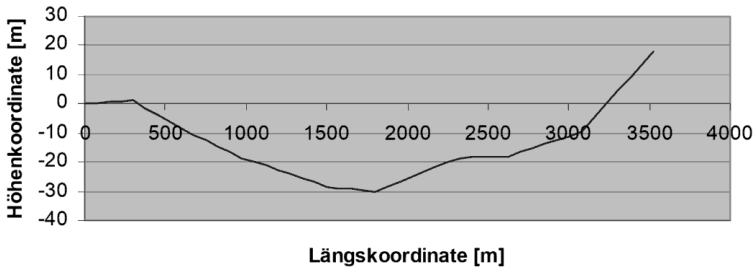


Abbildung 1: Höhenverlauf einer relativ söglich verlaufenden Bandanlage im Tagebau Hambach

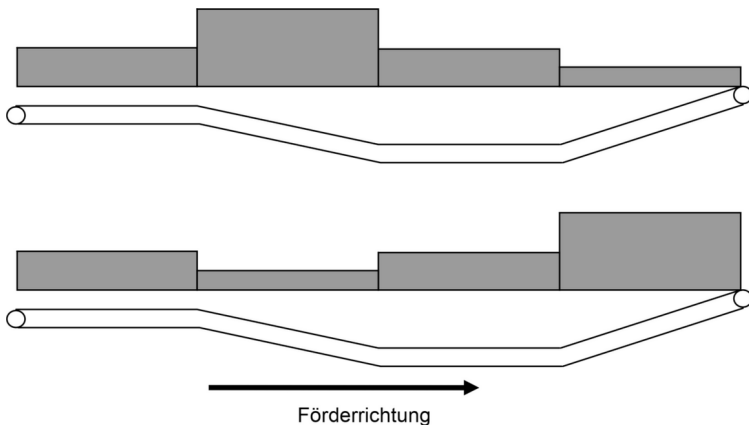


Abbildung 2: ungleichförmige Beladung als Ursache schwankenden Leistungsbedarfs

In Abbildung 2 sind beispielhaft zwei unterschiedliche Beladungsverteilungen bei gleicher durchschnittlicher Beladung einer Bandanlage mit vier Abschnitten dargestellt. Es ist einsichtig, daß im unteren Fall – trotz gleicher Durchschnittsbeladung – der Leistungsbedarf erheblich höher ist als im oberen.

Entsprechend muss für den Digitalen Zwilling die Position der Bandwaage bekannt sein und die Beladung des Obertrums mit den zugehörigen Motorleistungen für jeden Zeitpunkt korrekt synchronisiert werden.

1.3 Berücksichtigung unterschiedlicher Gurte

Den größten Einfluss auf den Bewegungswiderstand einer Bandanlage haben die Gurte aufgrund der inneren Dämpfung gegen die Verformung des Gummis (Eindrückroll- und Schwingbiegewiderstand, Abbildung 3).

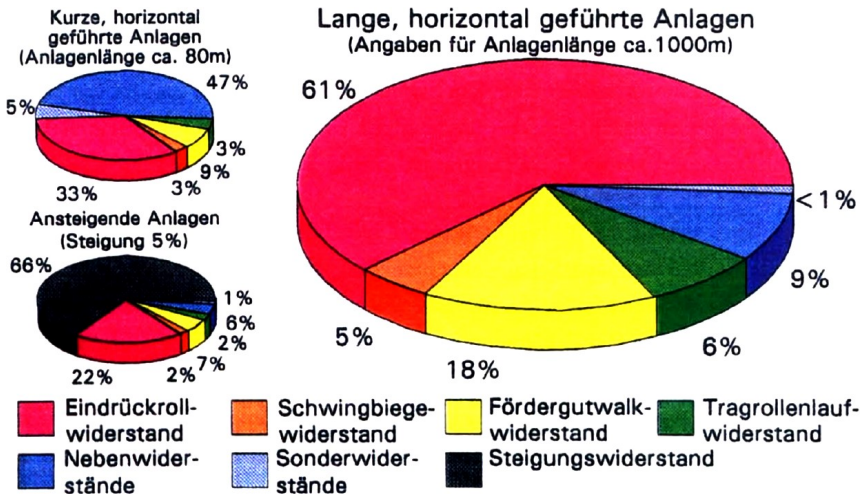


Abbildung 3: Aufteilung des Bewegungswiderstands für lange, horizontal geführte Anlagen nach Hintz [3]

Werden in einer Bandanlage Gurte verschiedener Hersteller und Produktionschargen verwendet, so können diese sich hinsichtlich ihres beladungsabhängigen Bewegungswiderstands deutlich voneinander unterscheiden (Abbildung 4 aus [4]). In diesen Fällen ist – ähnlich wie bei der Beladung – die Genauigkeit der Nachbildung abhängig davon, dass die Position der einzelnen Gurte mit ihrer jeweiligen Beladung jederzeit bekannt ist. Hierzu wurde für BeltGenius ein RFID-basiertes Erkennungssystem entwickelt, das den Beginn jedes Gurtes beim Passieren einer Antenne erfasst und mit der Beladung synchronisiert.

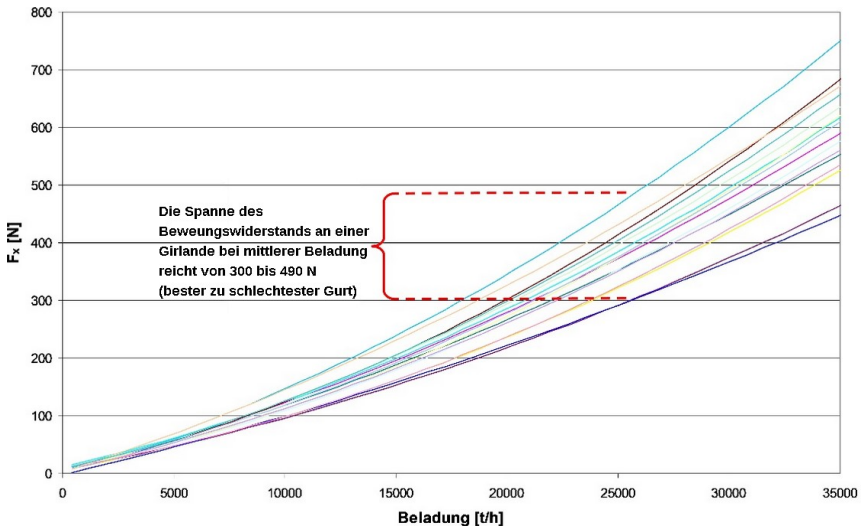


Abbildung 4: Vergleich des Bewegungswiderstands verschiedener Gurte (B2800 St 4500 16:8, $v = 7,5$ m / s) aus [4], 2009

1.4 Aufstellung und Initialisierung des Digitalen Zwillings

Zu Beginn wird ein Strukturdatensatz der Bandanlage angelegt, der den Höhenverlauf des Gurtes, die Position der Trommeln, Antriebe, Auf- und Abwurfstelle, Bandwaage, Spanneinrichtung sowie der Sensoren zur Geschwindigkeits-, Gurtzugmessung und Gurterfassung enthält sowie technische Daten der Hauptkomponenten (im Prinzip alle Angaben, die auch für eine Bandberechnung benötigt werden).

Die Initialisierung, das heißt die Bestimmung der Parameter zur exakten Beschreibung des Betriebsverhaltens, erfolgt anhand mehrerer Zeitabschnitte, die möglichst alle im Betrieb vorkommenden Beladungszustände und Umgebungstemperaturen umfassen. Durch ein mehrstufiges Optimierungsverfahren werden dann der Startparametersatz variiert, bis eine vorgegebene Iterationsschranke unterschritten wird. Die Zielfunktion für diesen Optimierungslauf ist die Fehlerquadratsumme Q_S aus der Differenz zwischen berechneter und gemessener Motorleistung über alle Messpunkte gemäß folgender Formel:

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

2 Beispiele für Auswertungen

2.1 Erzielte Genauigkeit

Abbildung 5 zeigt die Nachbildungsgüte für eine Bandanlage im Tagebau Garzweiler (Nennförderleistung 37.500 t/h, $v = 7,5 \text{ m/s}$, B 2700 St 4500 16:8, Motorleistung 2 x 2,000 kW, 850 m Achsabstand).

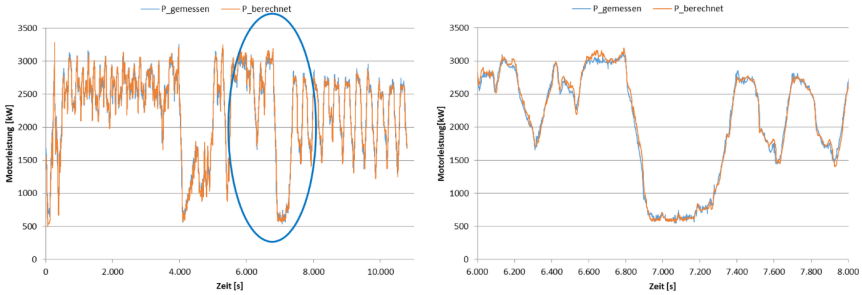


Abbildung 5: Vergleich der Motorleistung zwischen Messung und Rechnung

2.2 Beurteilung der Energieeffizienz der eingesetzten Gurte

Die meisten Bandanlagen werden mit den Gurten eines einzigen Herstellers ausgestattet, weshalb sich die einzelnen Gurtabschnitte bezüglich Energieeffizienz deutlich weniger unterscheiden als in Abbildung 4 dargestellt. Die hohe Nachbildungsgenauigkeit in Abbildung 5 erforderte die Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der einzelnen Gurte. Dies ist mit BeltGenius möglich, sofern ein Erkennungssystem für die Gurte eingesetzt wird. In diesen Fällen werden für jeden Gurt die jeweiligen Parameter ebenfalls durch ein automatisches Optimierungsverfahren bestimmt. Abbildung 6 zeigt die damit ermittelte Energieeffizienz der zehn Gurtabschnitte aus obigem Beispiel. Man beachte, dass gegenüber den in Abbildung 4 dargestellten Ergebnissen aus 2009 schon deutliche Verbesserungen bezüglich Energieverbrauch der Gurte erkennbar sind.

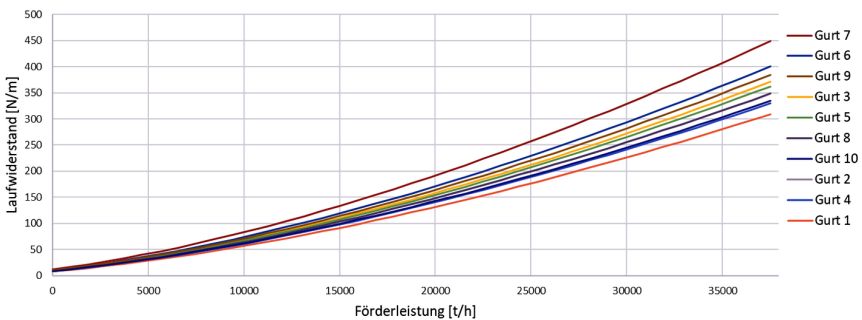


Abbildung 6: Bewegungswiderstände der Gurte in der Bandanlage aus Kap. 3.1

Mit dem Digitalen Zwilling lassen sich sehr genaue Prognosen anstellen, wie sich die Bandanlage bei anderen Betriebsbedingungen verhalten würde. So lässt sich zum Beispiel berechnen, wie sich der Energieverbrauch bei Verwendung anderer Gurte darstellen würde. Für die hier betrachtete Anlage wurde der in Abbildung 5 gezeigte Zeitbereich bezüglich Energieverbrauch für folgende drei Varianten ermittelt:

- Ist-Zustand: Vorhandener Mix aus zehn unterschiedlichen Gurten
- Best-case-scenario: Ausschließliche Verwendung des Besten
- Worst-case-scenario: Ausschließliche Verwendung des Schlechtesten

Ergebnis (Abbildung 7):

- Bei der tatsächlich verbauten Kombination aus zehn Gurten beträgt der Energieverbrauch 6733 kWh → 115 Wh pro Tonne und km
- Würde nur der beste dieser Gurte verbaut, läge der Energieverbrauch bei 6195 kWh beziehungsweise 105 Wh / (t·km)

Der schlechteste Gurt hingegen würde den Stromverbrauch auf 8328 kWh oder 142105 Wh / (t·km) treiben – und die installierte Leistung an ihre Grenzen bringen!

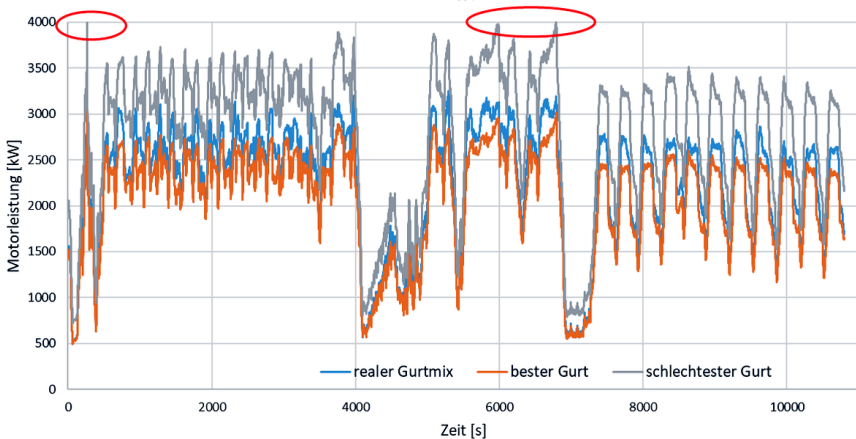


Abbildung 7: Variantenbetrachtung des Energieverbrauchs beim Einsatz unterschiedlicher Gurte

Hierbei ist zu beachten, dass diese Ergebnisse 1683 kWh Energieverbrauch beinhalten, der NICHT durch die Gurte beeinflusst werden kann!

2.3 Auswertungen bezüglich Anlagenausnutzung und Energieverbrauch

BeltGenius bietet eine Reihe sehr nützlicher Übersichtsdarstellungen, aus denen Ausnutzung und spezifische Energieverbrauch verschiedener Zeitbereiche zu erkennen sind. Ein Zeitbereich ist die Betriebszeit der Bandanlage vom Anfahren bis zum Stillsetzen. Für eine chilenische Kupfermine zeigen dies beispielhaft nachfolgend Abbildung 8 bis Abbildung 11 über den Zeitraum eines Jahres.

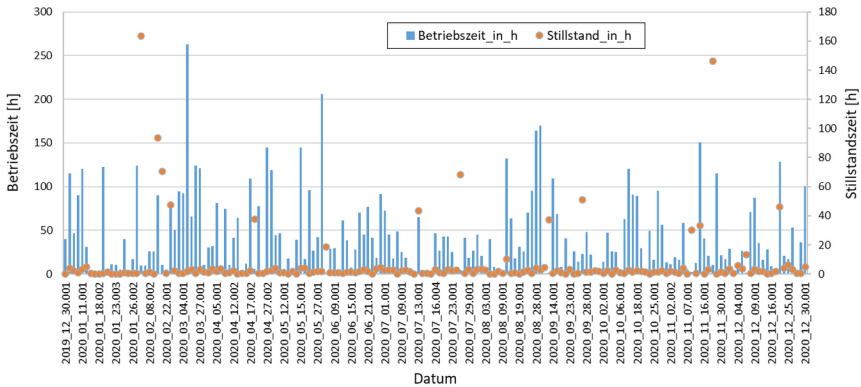


Abbildung 8: Betriebszeit und Stillstandszeit zwischen den einzelnen Zeitbereichen

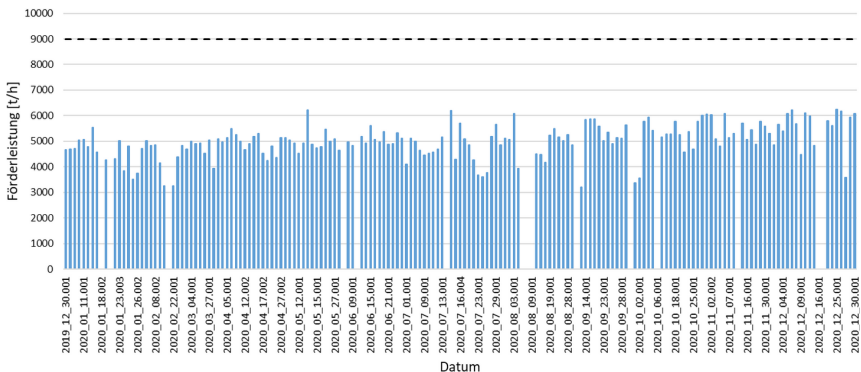


Abbildung 9: Durchschnittlich erzielte Förderleistung in den einzelnen Zeitbereichen

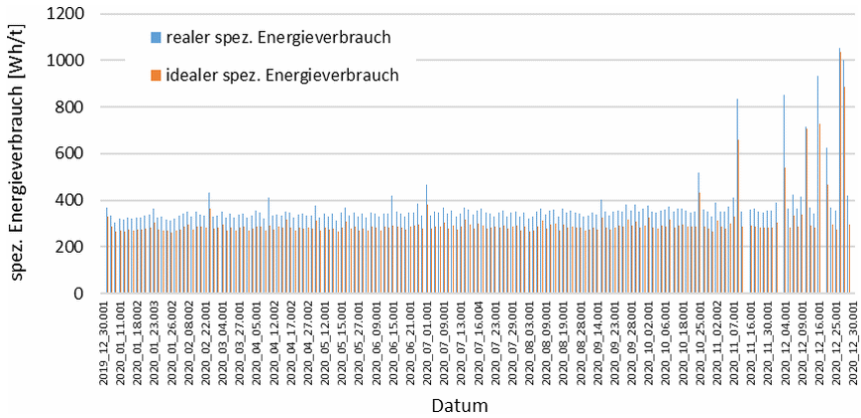


Abbildung 10: Realer spezifischer Energieverbrauch je Tonne gefördert Material im Vergleich zu einer gleich hohen, aber gleichmäßigen Förderleistung

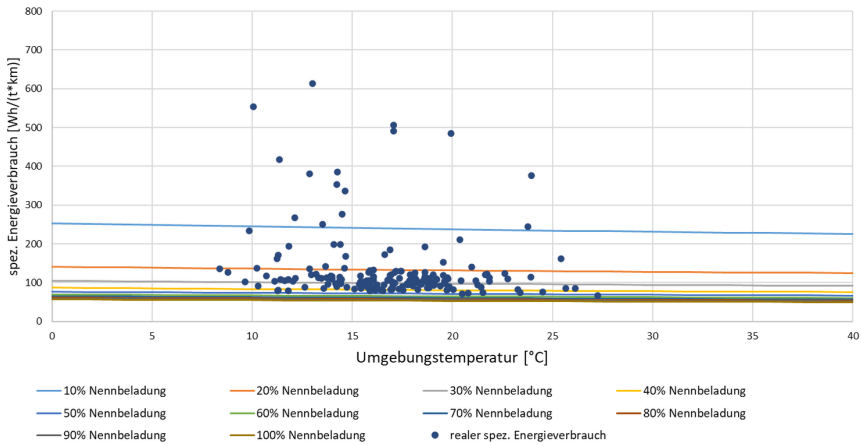


Abbildung 11: Kennfeld „Theoretischer spezifischer Energieverbrauch für verschiedene Förderleistungen“ und real erzielte spezifische Energieverbräuche pro Tonne und km Transportleistung

2.4 Spezifische Berechnungsergebnisse für einzelne Zeitbereiche

Mit dem jeweils gültigen Struktur- und Statusparametersatz werden für jeden Zeitbereich eine Reihe von Kenngrößen berechnet und in themenspezifischen Dateien gespeichert, aus denen die gewünschten Visualisierungen generiert werden. Abbildung 12 zeigt einige Beispiele dafür.

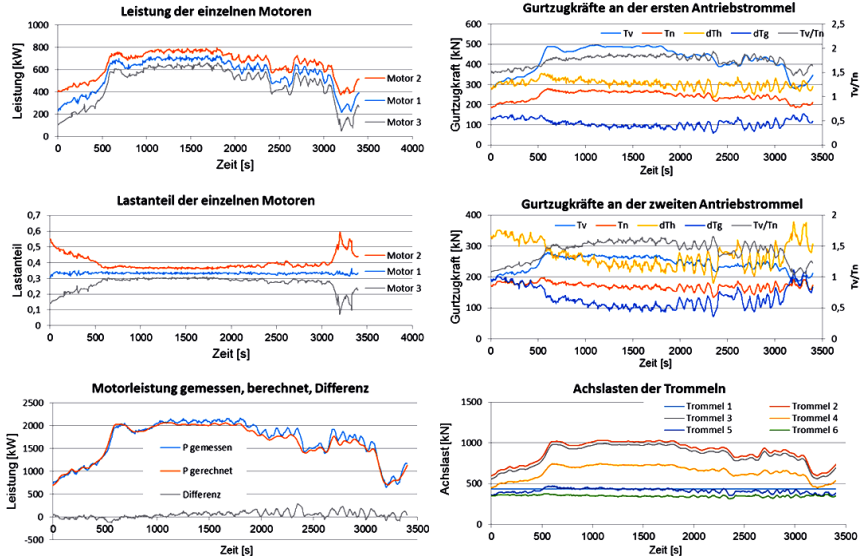


Abbildung 12: Beispiele individueller Auswertungen eines Zeitbereichs

2.5 Lebensdauerabschätzung der Komponenten

Für die meisten Komponenten ist derzeit keine Betriebslast erfassung verfügbar oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht eingesetzt. Einziges Beurteilungskriterium ist oft die Einbauzeit. BeltGenius kann jedoch für alle beweglichen Teile die relevanten Kräfte oder Momente sowie Wege und Drehwinkel lückenlos erfassen. Ist der Zusammenhang zwischen Beanspruchung und Lebensdauerverbrauch bekannt, können daraus automatisch Lebensdauerprognosen generiert werden. In den meisten Fällen ist dieser Zusammenhang jedoch nicht im Voraus bekannt oder nur unter Betriebsbedingungen, die sich deutlich von den Aktuellen unterscheiden. Da solche Vorhersagen von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind, ist es sinnvoll, für die verschiedenen Komponenten nach den jeweiligen Zusammenhängen zu suchen. Neben dem Datum des Ein- und Ausbaus der Komponenten benötigt man eine Aufzeichnung aller möglichen Einflussfaktoren, um eine Korrelation zwischen verschiedenen Berechnungsansätze und den erreichten realen Betriebszeiten zu finden.

Als einfaches Beispiel für eine theoretische Lebensdauerabschätzung mit BeltGenius sei hier die Bewertung der Wälzlager der sechs Trommeln nach [5] vorgestellt. Abbildung 13 zeigt den Verlauf der Achslasten dieser sechs Trommeln für einen Echtzeitbereich von 10.000 s. Für jede einzelne Sekunde kann die rechnerische Lebensdauer nach [5] für die jeweilige Lagerlast (= halbe Achslast) berechnet werden. Die Summierung der Kehrwerte ergibt dann den Lebensdauerverbrauch für diesen Zeitbereich.

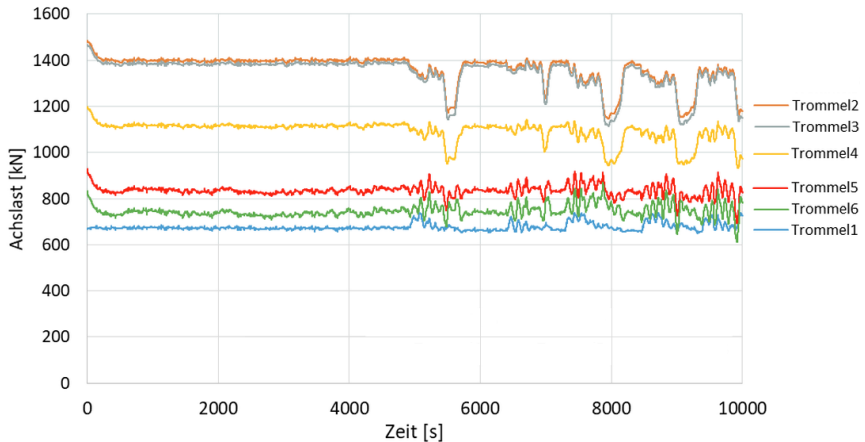


Abbildung 13: Achslasten der sechs Trommeln für einen Zeitbereich von 10000 Sekunden

Die Trommeln 2 und 3 haben die höchsten Achslasten, sind aber auch mit anderen Rollenlagern ausgestattet als die anderen Trommeln. Abbildung 14 zeigt den prozentualen Anteil des Lebensdauerverbrauchs für diese 10.000 Sekunden. Die Lager der Trommeln 4 und 5 sind praktisch dauerfest (Kurven für Trommel 4 und 5 liegen auf der x-Achse übereinander).

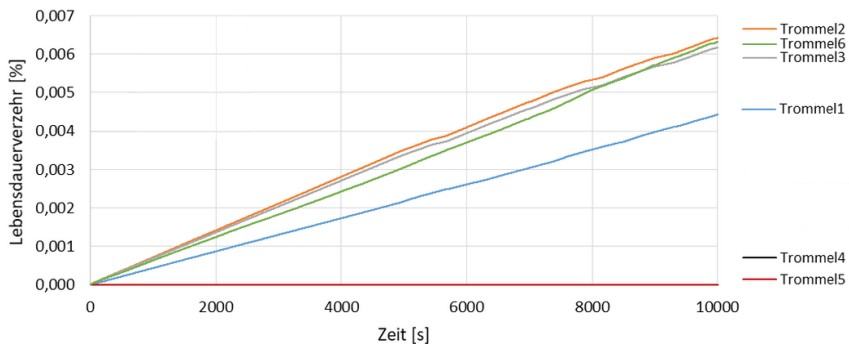


Abbildung 14: Theoretischer Lebensdauerverzehr der sechs Trommeln im betrachteten Zeitbereich von 10000 Sekunden

Weitere mögliche Einflussgrößen, die hier nicht berücksichtigt wurden, aber als Daten vorliegen: Umgebungstemperatur, Anzahl der Anfahrvorgänge und Stillstandsauer (und damit die Abkühlzeiten). Diese theoretische Berechnung könnte dann mit den real erreichten Betriebszeiten verbessert werden. Andere Komponenten können auf ähnliche Weise betrachtet werden. Neben der Gurtgeschwindigkeit stehen für die Tragrollen die Radiallasten aus Gurt- und Beladegewicht sowie die Orthogonalkomponente der örtlichen Gurtzugkraft zur Verfügung, für die Gurtverbindungen die wechselnde Beanspruchung durch die Gurtzugkraft und so weiter.

3 Praxisbeispiele erkannter Abweichungen und Fehler

3.1 Kohlemine in Australien (unter Tage)

Für eine Kohlemine in Australien wurde ein Zeitraum von zehn Wochen mittels BeltGenius analysiert. Anlass waren anhaltende Probleme mit zeitweiser Überlast, die zu Abschaltungen des vollbeladenen Förderers führten. Jede dieser Überlastabschaltungen führte zu einem längeren Stillstand, in dem die Anlage teilweise leergeschaufelt werden musste, damit sie wieder anfahren konnte.

Die Analyse mittels BeltGenius offenbarte Fehler in der Steuerung der Antriebe und der Gurtspaneinrichtung. Die Ursache war, dass die Gurtzugmessenrichtungen hinter den beiden Tripper-Antrieben bei Überschreiten von 200 kN keine Messwerte lieferten, was die Steuerung als zu niedrige Gurtspannung interpretierte, die Leistung an diesen Antrieben reduzierte und die Gurtspannung weiter erhöhte. Neben den dadurch verursachten unnötigen Überlastabschaltungen kam es auch zum Bruch einer Trommelwelle.

Abbildung 15 zeigt den Vergleich der von einem Consultant errechneten Gurtzugkraft für eine gleichmäßige Beladung von 3700 t/h im Vergleich mit der Berechnung von BeltGenius für eine reale Beladung von durchschnittlich 2640 t/h. Man sieht, dass bei der realen (niedrigeren) Beladung die maximale Gurtzugkraft mit circa 360 kN rund das 2,6-fache der vom Consultant berechneten 137 kN betrug!

Da BeltGenius – ausgehend von der an der Spannwinde gemessenen Gurtkraft – den Gurtkraftverlauf sehr genau bestimmen kann, ist ein Verzicht auf die unzuverlässigen Gurtzugmessenrichtungen hinter den beiden Tripper-Antrieben möglich.

Abbildung 16 zeigt die zeitweise sehr schlechte Leistungsaufteilung zwischen den fünf Motoren (je 440 kW Nennleistung). Insbesondere bei höherem Leistungsbedarf reduziert die Steuerung unnötigerweise die Leistung der Motoren 4 und 5, was die Überlastabschaltungen verursacht.

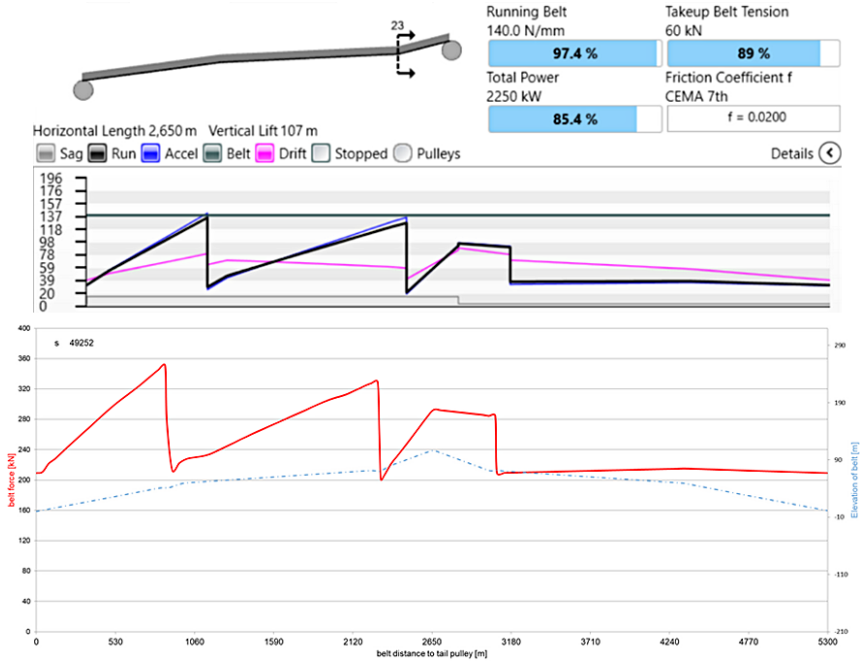


Abbildung 15: Vergleich des laut Gutachten erwarteten mit dem von BG errechneten Gurtkraftverlaufs

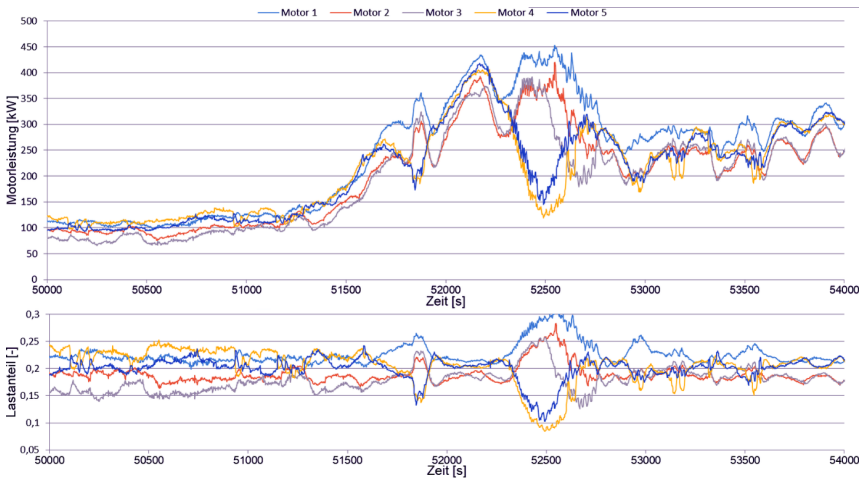


Abbildung 16: Leistungen und Lastaufteilung der Motoren

3.2 Kupfermine in Chile (Tagebau)

Für diese Kupfermine wurde ein ganzes Jahr ausgewertet. Von den drei wichtigsten Abweichungen (temperaturabhängiger Offset-Fehler der Bandwaage im Bereich 5 – 8 % der Nennleistung, schlechte Leistungsaufteilung, fehlerhafte Anfahrvorgänge) sei hier nur die schlechte Leistungsaufteilung der drei Schleifringläufer-Motoren (3 x 1.250 kW) erläutert (Abbildung 17).

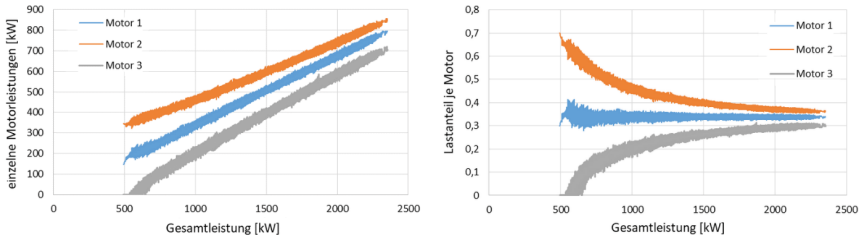


Abbildung 17: Einzelleistung und Leistungsaufteilung der drei Motoren als Funktion der Gesamtleistung

Insbesondere bei niedriger Gesamtleistung < 600 kW ist der Beitrag von Motor 3 besonders gering und wird von Motor 2 übernommen. Dies ist für das Getriebe von Antrieb 3 nachteilig, da eine zu geringe Last zu Schäden der Wälzlager führt. Mit BeltGenius können die Steigung der Motorkennlinien sowie die wirksamen Durchmesser der Antriebstrummeln bestimmt und Maßnahmen zur Verbesserung der Leistungsaufteilung simuliert werden (zum Beispiel konkrete Angaben zur Änderung der Dauerschlupfwiderstände).

Übrigens ergab die Analyse der Anlage bezüglich Gurtsicherheit, Motorleistung und Füllquerschnitt, dass eine Leistungssteigerung von derzeit 7.000 auf 9.000 t / h problemlos möglich ist (Abbildung 9).

3.3 Kupfermine in Chile (unter Tage)

Hier wurden vier Wochen Betriebszeit analysiert und folgende Abweichungen festgestellt:

- Signal der Bandwaage hat einen Zeitversatz, der zwischen 0 und 120 Sekunden springt
- Bandwaagensignale sind zeitweise um bis zu 800 t / h zu niedrig
- die Antriebssteuerung der Direktantriebe produziert Schwingungen, die den vorzeitigen Ausfall einer Antriebstrummel nach nur einem Jahr Betriebsdauer erklären

Insbesondere der Ausfall einer Antriebstrummel nach nur einem Jahr Betriebszeit stellt für den Kunden ein großes Problem dar, da die Ursache bislang nicht ermittelt wurde und Unsicherheit über die künftige Leistungsfähigkeit der Anlage bestand.

BeltGenius gab Hinweise auf eine sehr volatile Leistungsaufteilung und Schwingungen der Antriebsleistung. Daraufhin veranlasste Messungen fanden die Ursache in der ungünstigen Ausführung der Antriebssteuerung. Abbildung 18 zeigt einen Ausschnitt aus diesen Messungen für einen der vier Antriebsmotoren (Anfahrvorgang, leere Bandanlage).

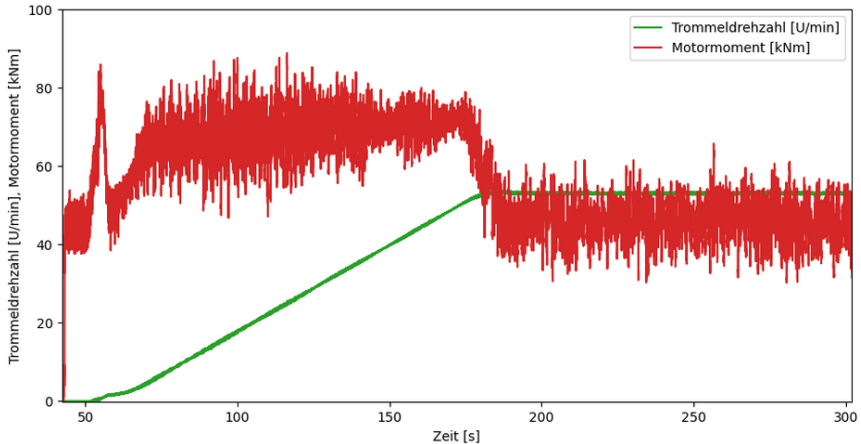


Abbildung 18: Schwingungsanregung durch die Motorsteuerung der Direktantriebe

4 Zusammenfassung

Der Einsatz eines Digitalen Zwillings für Bandanlagen, der mit geringem Aufwand an jede Bandanlage angepasst werden kann und diese unter Verwendung realer Messwerte exakt nachbildet – ermöglicht einen schnellen Überblick über den Zustand, die Effizienz und die Ausnutzung der Anlage. Damit können Ansatzpunkte zur Verbesserung aufgedeckt und quantifiziert werden. Dies ist eine deutliche Weiterentwicklung gegenüber den üblichen Berechnungs- und Simulationstools.

Im Kampf gegen den Klimawandel müssen die Anstrengungen zur Verringerung des Energieverbrauchs auch im Bergbau verstärkt werden. Bandanlagen sind gegenüber dem Einsatz von SLKW energetisch deutlich günstiger und ab einer Transportentfernung von circa 3 km insgesamt wirtschaftlicher. In der Auslegung der Bandanlagen und der Auswahl der Komponenten liegt noch ein erhebliches Verbesserungspotential. Dies kann durch BeltGenius aufgezeigt und realisiert werden.

Ein noch deutlich größeres Einsparpotential bietet BeltGenius als Instrument für den optimalen Betrieb der Anlagen. So liegt im hier behandelten Beispiel des chilenischen Kupfererztagebaus das durchschnittliche Einsparpotential durch Vermeidung von Förderlücken und entsprechend geringerer – aber gleichmäßiger – Förderleistung bei rund 20 %. Erheblich größere Einsparungen würden sich ergeben,

wenn eine konstant hohe Förderleistung erreicht werden könnte und die Betriebszeit durch die vermiedenen Produktionslücken reduziert würde. Das klingt trivial, denn jeder Bergmann strebt ohnehin immer nach einer hohen Förderleistung. Es ist jedoch viel wirtschaftlicher, eine konstant hohe Auslastung anzustreben, anstatt durch temporäre Spitzenleistungen Förderlücken und Stillstandszeiten wettmachen zu wollen. Hier kann BeltGenius dem Management bei der Entscheidung bezüglich der Verbesserung der betrieblichen Organisation die wirtschaftlichen Auswirkungen aufzeigen.

Eine weitere Perspektive für den Einsatz eines Digitalen Zwillings ergibt sich daraus, dass die Expertise für optimalen Betrieb und Instandhaltung von Bandanlagen bei immer weniger Betreibern vorausgesetzt werden kann. 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.

5 Quellenverzeichnis

- [1] Continental Handbuch: Fördergurte Berechnungen, herausgegeben von der Continental Aktiengesellschaft, Überarbeitete Auflage, April 2014 Hannover
- [2] DIN 22101: Stetigförderer - Gurtförderer für Schüttgüter - Grundlagen für die Berechnung und Auslegung, Ausgabe 2011-12
- [3] Hintz, A. (1993): Einfluss des Gurtaufbaus auf den Energieverbrauch von Gurtförderanlagen. Dissertation Universität Hannover 1993
- [4] Ziegler, M.: Energetische Optimierung von Fördergurten bei der RWE Power AG, World of Mining (2009) No. 6
- [5] DIN ISO 281: 2007: Rolling bearings - dynamic load ratings and nominal service life

Dr. Manfred Ziegler
manfred.ziegler@voith.com

J.M. Voith SE & Co. KG | VTA
Voithstraße 1
74564 Crailsheim



TORO™ LH515i

SAFER. STRONGER. SMARTER.

Der neue Toro™ LH515i vereint Stärke und Intelligenz in einem Paket. Mit der höchsten Nutzlastkapazität in seiner Größenklasse und einem 265-kW-Dieselmotor der Stufe V bietet der Toro™ LH515i eine hohe Produktivität bei gleichzeitig niedrigen Gesamtbetriebskosten.

Produktentwicklung Mid-Size LHD

Vom LH514 zum LH515i

L. Kröger

Sandvik Mining & Construction Central Europe GmbH

Zusammenfassung

Die Anforderungen im Bergbau weltweit und an die dabei angewendete Maschinenteknik steigen stetig an. Ansteigende Teufen, hohe und niedrige Temperaturen, korrosive Wässer, Längere Wegzeiten zu den Arbeitsplätzen und andere Einflüsse stellen immer größere Herausforderungen dar.

Seit 1971 werden Sandvik Fahrlader stetig weiterentwickelt und an die aktuellen und zukünftigen Bedingungen angepasst. Verwendung neuer Motorstufen um immer strenger werdende Abgasgrenzwerte einzuhalten, Verbesserungen der Bedienerergonomie, Überarbeitung des Elektrik- und Hydrauliksystems, Erhöhung der Produktivität, sowie Digitalisierung und Automatisierung der Maschinen unterliegen kontinuierlicher Entwicklung. Somit wurde vergangenes Jahr der Fahrlader LH514 vom Nachfolgemodell LH515i abgelöst und ist ein Fahrzeug auf dem neusten Stand der Technik.

Im Jahr 2021 konnte Sandvik das 50-jährige Jubiläum im Bereich Load and Haul feiern.

1 Einleitung

Der Bau von robusten Fahrladern für den untertägigen Bergbau begann 1971 bei Sandvik, beziehungsweise zu dem Zeitpunkt bei der Vorgängerfirma Tamrock. Die Erfahrungen die weltweit mit den Maschinen gesammelt werden, fließen in eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Produkte ein, sodass Sicherheit, Leistung, Widerstandsfähigkeit und Zuverlässigkeit immer weiter verbessert werden können. Im Jahr 2000 wurde von Sandvik mit dem Toro™ 1400 ein 14 t Fahrlader auf den Markt gebracht. Dieser wurde 2008 schließlich vom Sandvik LH514 abgelöst und nun zum LH515i weiterentwickelt, der jetzt eine Nutzlast von 15 t aufweist. Passend zum 50-jährigen Jubiläum im Bereich Load and Haul, trägt der neue LH515i jetzt auch wieder den Namen Toro™ und ist durch den Stier im Kühlergrill sofort zu erkennen.

2 Verbreitung des LH514 und LH515i

Seit der Einführung des Sandvik LH514 im Jahr 2008 wurden bis heute circa 400 Fahrzeuge dieses Typs weltweit ausgeliefert. Die meisten Fahrzeuge sind in Afrika, Asien und Südamerika im Einsatz. In Deutschland sind drei LH514 bei der Endlagererstellung im Erz im Versatzbetrieb und weitere fünf LH514 in der Gewinnung im Kali und Salz Bergbau im Betrieb.

Im Jahr 2020 konnte Sandvik den Prototypen des LH515i auf dem Bergwerk Zielitz der K+S in Betrieb nehmen und unter maximalen Anforderungen auf Herz und Nieren testen (siehe Abbildung 1). Die K+S hatte damit den weltweit ersten Lader dieser neuen Generation im Einsatz.

Im Probetrieb wurde der Fahrlader in verschiedenen Gewinnungsrevieren von verschiedenen Mitarbeitern getestet, um eine möglichst große Bandbreite an Feedback zu erhalten. Dabei aufgetretene „Kinderkrankheiten“ konnten ausgemerzt werden und das Feedback der Mitarbeiter konnte für Produktverbesserungen aufgenommen werden.



Abbildung 1: Sandvik LH515i im Einsatz im K+S Werk Zielitz

Inzwischen wurde ein weiterer LH515i im Salz in Betrieb genommen und im Frühjahr werden drei LH515i ins Erz zur Endlagererstellung geliefert. Damit gibt es insgesamt bisher fünf LH515i in Deutschland. Weltweit wurden bereits über 30 Exemplare ausgeliefert beziehungsweise sind in Bestellung.

3 Produktentwicklung

3.1 Produktivität

Jeder Bergbaubetreibende ist bestrebt immer das größtmögliche Equipment in dem zur Verfügung stehenden, begrenzten Streckenquerschnitten einzusetzen, um die maximale Produktivität zu erhalten. Die Abmessungen der Maschine sind daher von zentraler Bedeutung. Die Maschinenhersteller haben die Herausforderung, eine möglichst große Nutzlast der Maschine bei gleichzeitig möglichst kompakter Bauweise zu entwickeln.

Bei dem Modell Upgrade des LH514 zum LH515i wurde die gesamte Maschine überarbeitet. Der Hubarm, der Rahmen und die Kabine wurden neu konstruiert, sodass der neue Lader sogar einen etwas geringeren Querschnitt aufweist als sein Vorgänger (siehe Abbildung 2). Außerdem konnte die Nutzlast um 1 t auf jetzt 15 t erhöht werden und es sind Schaufelgrößen bis 10 m³ möglich (Sandvik Mining and Construction, 2021).

Der LH515i ist passend für das Zusammenspiel mit dem TH545i Truck und ermöglicht eine Beladung in drei Ladespielen.

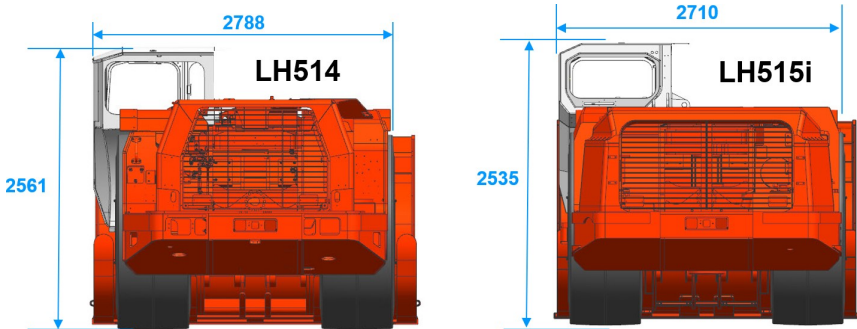


Abbildung 2: Dimensionen Vergleich LH514 und LH515i

3.2 Betriebskosten

Der Sandvik LH515i kann für den europäischen Markt mit einem modernen Stufe 5 Motor ausgestattet werden. Durch selektive katalytische Reduktion (SCR) und einen Dieselpartikelfilter (DPF) werden die strengen Abgasgrenzwerte der EU erfüllt. Der Stufe 5 Motor weist einen bis zu 3 % niedrigeren Kraftstoffverbrauch auf im Vergleich zu niedrigeren Motorstufen. Eine vom Bediener stufenweise einstellbare Motorbremse ermöglicht eine bessere Kontrolle der Geschwindigkeit beim bergab fahren. Das Auslassventil öffnet sich kurz vor dem Arbeitstakt und gibt das komprimierte Gas frei (siehe Abbildung 3). Durch die fehlende Kompression wird die Kolbenbewegung verlangsamt, was zu einem Energieverlust während des Arbeitstaktes führt. Die Bremswirkung des Motors verringert das Überhitzen der Bremsen beziehungsweise verringert den Bremsverschleiß (Sandvik Mining and Construction, 2021).

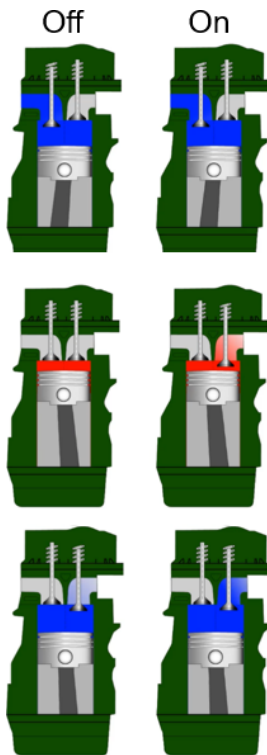


Abbildung 3: Funktionsweise der Motorbremse im Stufe 5 Motor

Optional ist für den Lader eine Traktionskontrolle erhältlich. Sensoren an den Achsen überwachen die Reifendrehzahlen und beim Feststellen von Schlupf wird die Motordrehzahl begrenzt. Dies verringert das Durchdrehen der Reifen beim Eindringen in das Haufwerk. Die Reifen haben folglich eine längere Lebenszeit und es sind weniger Reifenwechsel notwendig (Sandvik Mining and Construction, 2021).

Ausgestattet mit der neuesten Generation des Sandvik Intelligent Control System und einem 12“ Touchscreen Display ist der Lader auf dem neusten Stand der Technik (siehe Abbildung 4). Bediener können sich ihre Anzeige personalisieren, sodass die für sie wichtigsten Betriebsdaten auf dem Homescreen dargestellt werden und auf einen Blick eingesehen werden können. Alle betriebsrelevanten Informationen lassen sich in verschiedenen Anzeigefenstern anzeigen, sodass eine einfache Diagnose und Fehlersuche möglich sind (Sandvik Mining and Construction, 2021).



Abbildung 4: 12“ Touchscreen zur Anzeige der Betriebsdaten

Routinemäßige Wartungen wie das Wechseln von Filtern oder Kontrollieren von Füllständen, sind einfach und von der Sohle aus möglich. Auf Wartungspunkte kann auf der „kalten“ Maschinenseite einfach zugegriffen werden. Das Hydrauliksystem wurde in der neuen Fahrzeuggeneration überarbeitet, sodass es jetzt weniger Hydraulikschläuche, kürzere Leitungen und eine optimierte Verlegung gibt. Ebenfalls wurde das Elektriksystem überarbeitet und optimiert. Neben einem neuen Motorkabelbaum wurde die Anzahl der Dosen, Anschlüsse und Relais reduziert (Sandvik Mining and Construction, 2021).

4 Health & Safety

Bei der Überarbeitung des Maschinenrahmens und der Kabine wurde sehr viel Wert auf eine verbesserte Bedienerergonomie gelegt. Die neu konstruierte Kabine verfügt nun über einen Fußraum, der sich in einer Öffnung des Maschinenrahmens befindet (siehe Abbildung 5). Dadurch entstehen mehr Beinfreiheit, eine angenehmere Sitz- und Pedalposition. Verstellbare Armlehnen und mehr Platz zwischen den Armlehnen erhöhen weiter den Komfort. Ein flaches Maschinenheck sorgt für verbesserte Sicht und ein zusätzliches Fenster auf der Kabinenrückseite vergrößert den Sichtbereich. Ein Magnetschalter am Türschloss sorgt für das automatische Auflegen der Bremse und Deaktivierung der Arbeitshydraulik bei geöffneter Tür und verbessert so weiter die Sicherheit (Sandvik Mining and Construction, 2021).



Abbildung 5: Kabine mit neu designtem Fußraum

5 Digitalisierung & Automatisierung

Durch das Upgrade zur i-Version ist der LH515i vorgerüstet für Digitalisierung und Automatisierung.

Über die „MySandvik Digital Services Knowledge Box“ können Daten gesammelt, verarbeitet und an das MySandvik Webportal übertragen werden. Die Datenübertragung kann über WiFi, 3G oder 4G Netzwerke erfolgen. MySandvik Productivity liefert zuverlässige, verarbeitete und genaue Daten, die den Zustand der Flotte widerspiegeln. Dies hilft bei der Planung von vorbeugenden Wartungsarbeiten und dabei die Produktivität zu steigern.

OptiMine® „Readiness“ ist standardmäßig im LH515i gegeben. OptiMine® ist ein leistungsstarkes Programm für die Echtzeit-Visualisierung, Analyse und Optimierung der Produktion und Prozesse. OptiMine® untergliedert sich in die Teilprogramme Task Manager, Task Scheduler, Mine Visualizer, Location Tracking und Drill Plan Visualizer, sowie Analytics.

Ebenfalls AutoMine® „Readiness“ ist im LH515i standardmäßig vorhanden. AutoMine® ist der Marktführer bei der Automatisierung von Ladern und Trucks unter Tage. AutoMine® „Readiness“ bedeutet, dass der Lader mit den entsprechenden Ventilen und Sensoren vorgerüstet ist, die für die Automatisierung notwendig sind. Innerhalb von 2 – 3 Tagen kann der Lader auf Automatisierung umgerüstet werden, sodass autonomer Fahrbetrieb in angelernten Fahrstrecken und je nach Anwendung ferngesteuertes oder autonomes Laden und Abkippen möglich sind. Mit AutoMine® wird der Fuhrpark in ein leistungsstarkes, autonomes Produktionssystem umgewandelt, das die Sicherheit und Produktivität erheblich verbessert.



Abbildung 6: OptiMine® Schaltzentrale



Abbildung 7: AutoMine® Bedienerstand

6 Vergleichsrechnung

Im Folgenden wird eine exemplarische Vergleichsrechnung zwischen dem LH514 und dem LH515i durchgeführt. Die verwendeten Zahlen stammen aus verschiedenen Projekten und Kalkulationen weltweit und sind keine konkreten Kundenzahlen. Je nach Einsatzland, Einsatzbedingungen und anderen Rahmenbedingungen können die Ergebnisse variieren.

Beide Fahrzeuge sind in dem Vergleich mit der größtmöglichen Schaufel ausgestattet (beispielsweise für den Einsatz im Salz) – sprich 9 m³ Schaufel beim LH514 und 10 m³ Schaufel beim LH515i. Die Investitionskosten (CAPEX) für den LH515i sind mit 15 / 14 auf die Investitionskosten des LH514 hochskaliert, was der Mehrleistung durch die höhere Nutzlast entspricht. Für beide Fahrzeuge wird eine Lebensdauer von 30.000 Betriebsstunden angenommen.

Für die Betriebskosten (OPEX) wurde für beide Lader der gleiche Betrag angenommen, dabei sind Diesel, Reifen- und Bedienerkosten ausgeschlossen, da sie stark nach Einsatzland und Einsatzbedingungen variieren. Für beide Lader wurde ein gleicher Einsatz angenommen mit einer Zyklusdauer für ein Ladespiel von vier Minuten. Bei einer angenommen effektiven Arbeitszeit von 5,5 Stunden pro Schicht werden 83 Zyklen pro Schicht angenommen. Eingesetzt in einem Dreischichtsystem und abzüglich aller planmäßigen und unplanmäßigen Stillstände ergibt sich eine Summe von 495 Produktionsschichten pro Jahr. Die Schüttdichte des zu ladenden Materials ist gleich mit 1,5 t / m³ angenommen.

Aus den getroffenen Annahmen ergibt sich eine jährliches Fördervolumen von circa 349.000 m³ für den LH514 und circa 388.000 m³ für den LH515i. Unter Berücksichtigung der Schüttdichte ergibt das eine jährliche Fördermasse von circa 524.000 t für den LH514 und circa 582.000 t für den LH515i. Mit dem LH515i lassen sich folglich circa 58.000 t mehr im Jahr laden und fördern (siehe Diagramm 1).

Bei der Verrechnung der Förderleistungen mit den CAPEX und OPEX ergeben sich spezifische Kosten von 1,07 €/ m³ beziehungsweise 0,72 €/ t für den LH514 beziehungsweise 0,99 €/ m³ und 0,66 €/ t für den LH515i (siehe Diagramm 2).

Mit dem LH515i lassen sich dem zur Folge höhere Tonnagen bewegen bei gleichzeitiger Reduzierung der spezifischen Kosten.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Annahmen für Vergleichsrechnung

	LH514	LH515i
Schaufelvolumen	9 m ³	10 m ³
CAPEX	14/14	15/14
OPEX	=	=
Zykluszeit	4 min	4 min
Produktionsschichten pro Jahr	495	495
Schüttdichte	1,5 t / m ³	1,5 t / m ³

Die Ergebnisse aus den Berechnungen wurden anschließend einer Sensitivitätsanalyse unterzogen (siehe Diagramm 3). Hierbei wurde der Einfluss der Veränderung von CAPEX, OPEX sowie der Verfügbarkeit und Auslastung auf das Endergebnis der spezifischen Kosten betrachtet.

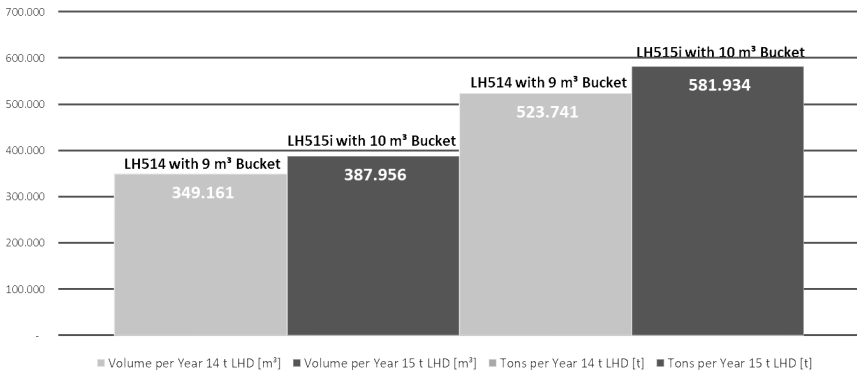


Diagramm 1: Produktivität 14 t LHD mit 9 m³ Schaufel vs. 15 t LHD mit 10 m³ Schaufel

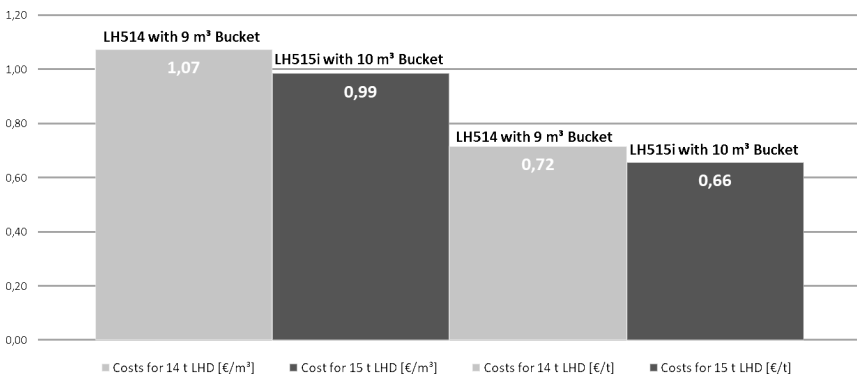


Diagramm 2: Spezifische Kosten für 14 t LHD mit 9 m³ Schaufel vs. 15 t LHD mit 10 m³ Schaufel

Auffällig dabei ist, dass eine Änderung der Investitionskosten (CAPEX) nur eine vergleichsweise geringe Veränderung der spezifischen Kosten herbeiführt. Wesentlich höher ist die Abhängigkeit des Endergebnisses von den Betriebskosten (OPEX), sowie von der Verfügbarkeit und Auslastung.

Die Mehrkosten des größeren Equipments zahlen sich daher in jedem Fall aus, da die Produktionsleistung steigt und gleichzeitig die Kosten in €/t sinken. Eine weitere Senkung der spezifischen Kosten lässt sich durch die Verringerung der Betriebskosten erreichen. Digitale Anwendungen und vorbeugende Instandhaltung können hier einen Betrag zu leisten, in dem Instandhaltungskosten gesenkt und gleichzeitig die Auslastung und Verfügbarkeit des Equipments erhöht werden kann. Die Möglichkeit zur Automatisierung bietet weiter ein Potential zur Reduzierung von Personalkosten und zur Erhöhung der Auslastung.

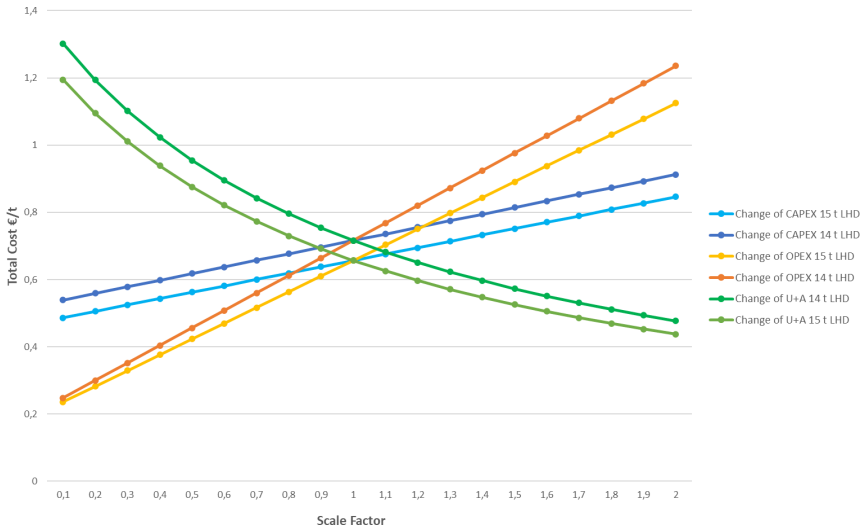


Diagramm 3: Sensitivitätsanalyse für 14 t LHD mit 9 m³ Schaufel vs. 15 t LHD mit 10 m³ Schaufel

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Jahrelange Erfahrung mit dem Vorgängermodell LH514 sind in die Weiterentwicklung des neuen LH515i geflossen. Die Maschine ist damit an die steigenden Anforderungen der Kunden weltweit angepasst und entspricht dem neusten Stand der Technik. Der Lader bietet eine höhere Produktionsleistung bei gleichzeitiger Möglichkeit zur Reduzierung der spezifischen Kosten. Außerdem gibt es zahlreiche Verbesserungen im Bereich Health & Safety, die dem Bediener- und Wartungspersonal zugutekommen. Mit der standardmäßigen Vorrüstung für OptiMine® und AutoMine® ist der Lader vorbereitet für Digitalisierung und Automatisierung, und somit bereit für die Zukunft.

Weltweit wird immer stärker der Fokus auf die spezifischen Kosten in € / t gelegt und Investitionskosten selbst stellen eine vergleichsweise untergeordnete Rolle dar. Der Einsatz von größtmöglichem Equipment zahlt sich (fast) immer aus.

8 Literaturverzeichnis

- Sandvik Mining and Construction. (2008). Product Specifications Sandvik LH514.
- Sandvik Mining and Construction. (2021). Product Specifications Sandvik LH515i.
- Sandvik Mining and Construction. (2021). Product Presentation LH515i.

Lars Kröger

lars.kroeger@sandvik.com

Sandvik Mining and Construction Central Europe GmbH
 Gladbecker Strasse 427
 45329 Essen

Ein Beitrag zur Reduzierung von Arbeitsunfällen mit mobilen Fahrzeugen in der Rohstoffindustrie

F. Uth, A. E. Kianfar, M. Sherikar, P. Paehge
SPHEROID Technologies

Abstract

Die Digitalisierung verändert zunehmend alle Prozessebenen der Rohstoffindustrie, angefangen bei operativen Prozessen bei welchen die Interaktion zwischen Mensch und Maschine immer mehr an Bedeutung gewinnt, bis hin zur Unternehmensführung. Trotz der technologischen Fortschritte hat die Unfallrate in Zusammenhang mit mobilen Maschinen und Fahrzeugen weltweit in den vergangenen Jahren in der Rohstoffindustrie zugenommen, was auf verschiedene Ursachen wie etwa größer und komplexer werdende automatisierte Maschinenteknik zurückzuführen ist. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf einem entwickelten modernen System zur Kollisionsvermeidung in über- und untertägigen Betrieben, welches durch seinen modularen Aufbau über den derzeitigen Stand der Technik hinausgeht und dadurch zur Reduzierung von Unfällen und zu einer Erhöhung der Produktivität beiträgt. Das System basiert auf einer Internet-of-Things (IoT) Struktur, welches durch ein innovatives System zur Kollisionsvermeidung bei Überholvorgängen von Schwermaschinen und -fahrzeugen ergänzt wird.

1 Einleitung

Die Rohstoffindustrie gehört zu den Industriebranchen mit den meisten Arbeitsunfällen [1]. In Deutschland stagnieren die Arbeitsunfälle in der Rohstoffindustrie seit rund 15 Jahren auf einem konstanten Niveau [2]. Neben den gesundheitlichen Folgen der geschädigten Arbeitnehmer entstehen auch finanzielle Folgen für den Arbeitgeber. Diese reichen von ausgefallenen Arbeitsstunden und Produktionsmengen, über die Kosten von geschädigtem Equipment, Strafzahlungen, Gerichtskosten zu erhöhten Versicherungszahlungen oder Langzeitzahlungen für die medizinische Versorgung bis hin zu Umsatzrückgängen und Imageschäden [3]. Die Ursache für die Entstehung von Unfällen ist sowohl in übertägigen als auch in untertägigen Betrieben divers und auf verschiedene Unfallklassen wie herabfallendes Gestein, Maschinenequipment, motorisierten Rohstofftransport oder Stürze zurückzuführen.

Statistiken des US-amerikanischen Arbeitsschutzinstitut (NIOSH) zeigen, dass Unfälle in Verbindung mit Bergbaumaschinen und motorisierten Rohstofftransport zwischen den Jahren 2015 und 2020 einen mehrheitlichen Anteil an den tödlichen Unfällen mit 57,51 % der Gesamtfällen einnehmen (Abbildung 1 a). Bei den nicht tödlichen Einfällen tragen diese Unfallarten mit 18,56 % bei (Abbildung 1 b).

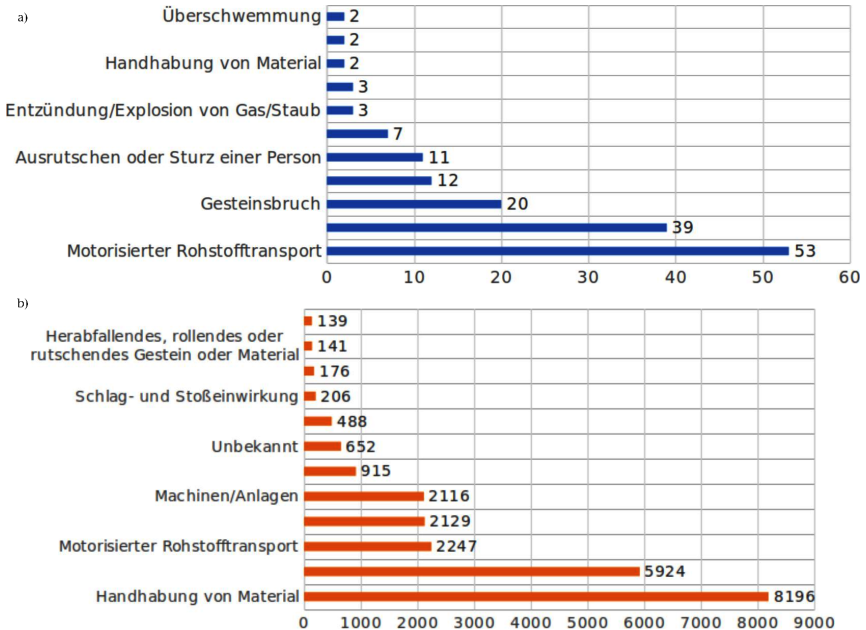


Abbildung 1: Anzahl der a) berufsbedingten Todesfälle nach Unfallklassen [4] und b) der nicht tödlichen Unfälle mit Ausfalltagen nach Unfallklassen [5], Betreiber von Kohlebergwerken, Betreiber von Metallbergwerken, Betreiber von Nichtmetallbergwerken, Betreiber von Steinbrüchen, Betreiber von Sand- und Kieswerken, Auftragnehmer von Kohlebergwerken, Auftragnehmer von Nichtkohlebergwerken, 2015 - 2020 (gekürzt)

Zahlreiche Faktoren können auf unterschiedliche Weise zur Unfallrate beitragen. Dazu gehören unsichere Verhaltensweisen der Arbeitnehmer selbst und die immer größeren Maschinen und Fahrzeugen, die mehr und bessere Qualifikationen von ihrem Bediener erfordert.

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf der Entwicklung eines Collision Avoidance Systems (CAS) für die Rohstoffgewinnung, welches aufgrund der hohen Präzision besonders dazu geeignet ist gefährliche Situationen in der über- und untertägigen Gewinnung von Rohstoffen zu vermeiden.

Das System basiert auf der Ultra-Wideband (UWB) Technologie und dem Industriellen Internet of Things (IIoT). Das CAS beziehungsweise jeder Node des Systems ist über Wi-Fi mit einer IoT-Infrastruktur verbunden, welche die Überwachung von Geräten gewährleistet, gefährliche Situationen analysiert, Kollisionen vermeidet sowie die Datenübertragung der tatsächlichen Produktionszykluszeiten ermöglicht, die in Zukunft für strategische Entscheidungen unter Verwendung fortschrittlicher Konzepte für maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz entscheidend sein werden.

Das CAS basiert auf einer Abstandsmessung zwischen den Bergbaumaschinen zueinander beziehungsweise zu Personen, welche mit einem Personen-Tag ausgestattet sind. Verschiedene Technologien sind geeignet diese Distanz zu bestimmen. Aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen und den hohen Anforderungen in der Rohstoffgewinnung wird die UWB-Technologie für die Implementierung eines CAS gewählt, welche im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

2 Technologien

2.1 Ultra-Wideband Technologie

Es gibt verschiedene Technologien zur Ortung von Personen und Objekten in Bereichen, in denen es keine Satellitensignale gibt, zum Beispiel Ultrabreitband-Funktechnologie, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee und so weiter. Zu den wesentlichen Eigenschaften des Ultrabreitbandfunks (engl. Ultra-Wideband) zählen die zeitlich sehr kurzen Impulse ($< 1 \text{ ns}$), über ein breites Frequenzspektrum (3,1 - 10,6 GHz) mit Bandbreiten von mindestens 500 MHz [1], welche eine primäre Voraussetzung der hochpräzisen Entfernungsmessungen darstellen [2, 3]. Die UWB-Technologie bietet im Vergleich zu anderen funkbasierten Technologien viele Vorteile, wie zum Beispiel keine Interferenzen mit anderen Funksystemen und eine höhere Genauigkeit bei der Entfernungbestimmung. Darüber hinaus ist die UWB-Technologie aufgrund ihrer beschriebenen Frequenzeigenschaften unempfindlich gegenüber Mehrwegausbreitungen der Signale, die insbesondere im Bergbau unter Tage aufgrund von engen Strecken und unterbrochenen Sichtverbindungen durch Objekte, einschließlich größerer Bergbaumaschinen, auftreten können. [3, 4, 5] Die Genauigkeit von UWB-Ortungssystemen unter Tage liegt im Zentimeterbereich und ist weitgehend auf die direkte Sichtverbindung zwischen den Tags zurückzuführen. Die maximale Reichweite von UWB kann bis zu 250 m betragen [6].

2.2 Collision Avoidance System (CAS)

Das CAS besteht aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Personentag,
- Fahrzeug-Tag,
- Überholensormodule,
- IIoT-Infrastruktur.

Die Personen- und Fahrzeug-Tags sind sowohl mit dem UWB- als auch mit Wi-Fi Modulen ausgestattet, und hierdurch als Gateway zur Internet-Infrastruktur fungieren, um Informationen über Wi-Fi direkt mit dem Netz auszutauschen. Die Entfernungbestimmung durch die Tags basiert auf der Two Way Ranging (TWR)-Technologie, die ein genaueres Ergebnis der Flugzeit (Time of Flight, ToF) von UWB-Signalen zwischen den Tags liefert [6].

Die CAS sind speziell für den Einsatz im über- und untertägigen Bergbau unter rauen Umgebungsbedingungen (zum Beispiel laute Geräusche, staubig, neblig, dunkel, Vibrationen et cetera) konzipiert, bei denen die Maschinenbediener Personen in unmittelbarer Umgebung der Maschine nicht sehen oder hören können. Zu den wesentlichen Vorteilen des CAS zählt, dass es für alle Arten von mobilen Maschinen und Arbeitern im Bergbau in Echtzeit und mit einer Genauigkeit im wenigen Zentimeterbereich und einer 360°-Wahrnehmung eingesetzt werden kann. Jeder Arbeiter, der sich in einem Gefahrenbereich aufhält, ist mit einem tragbaren Gerät (Tag) ausgestattet, analog dazu ist jede mobile Maschine mit einem Fahrzeug-Tag ausgestattet.

Das Personentag befindet sich innerhalb des Helms und beinhaltet einen kleinen Lautsprecher zum Auslösen eines Warnsignals im Gefahrenfall. Das Fahrzeug-Tag ist in der Kabine oder im Fahrzeugraum montiert, so dass dem Fahrer beziehungsweise Maschinenbetreiber Warnsignale mit einer roten, gelben oder grünen LED angezeigt werden, welche durch die jeweiligen Gefahrenzonen (sicherer Bereich, Warn- und Gefahrenbereich) definiert sind.

Ein wichtiger Teil dieses Kollisionsvermeidungssystems ist die Funktion für die sichere Überholung von Fahrzeugen im Tagebau oder untertägigen Bergwerk. Die Funktionseinheit besteht aus zwei Modulen, dem Überholungsmodul und der Überholungsanzeige. Das System stellt für den Fahrer sicher, dass der Überholvorgang durchgeführt werden kann. Die vorausfahrende Maschine (Planierdraupe, Fahrschauellader, Hydraulikbagger) ist mit einem Überholungsmodul ausgestattet, welches aus einem Laserscanner und einer Kamera besteht und mittels Datenübertragung, dem hinteren Fahrzeug auf der Überholungsanzeige signalisiert, ob sicher überholt werden kann. Der Laserscanner prüft hierbei, ob sich ein weiteres Fahrzeug vor der Maschine befindet oder der Weg für den Überholvorgang frei ist. Die Kamera nimmt die Fotos / Videos von der Strecke vor der Maschine auf. Die Überholungsanzeige zeigt die Kamerasicht der vorausfahrenden Maschine auf dem Display. Befindet sich vor der zu überholenden Maschine ein weiteres Fahrzeug, zeigt das Display ein rotes Signal an, ist die Strecke frei wird ein grünes Signal angezeigt. Zur präzisen Distanzbestimmung sind die Fahrzeuge mit UWB-Fahrzeugtags sowohl vorne als auch hinten ausgestattet. Das Display der Überholungsanzeige schaltet sich bei einem definierten Abstand der Fahrzeuge automatisch ein und startet Datenübertragung der Fotos und Signale. Abbildung 2 zeigt die Personen- beziehungsweise Fahrzeugtags sowie das Überholungsmodul.

Wie oben beschrieben, sind alle Module mit dem Mesh-Netzwerk verbunden, um Daten auszutauschen. Dies gibt die Möglichkeit, mit jedem Node zu kommunizieren und die Daten detaillierter zu analysieren. Auf diese Weise lässt sich eine IoT-Infrastruktur realisieren.

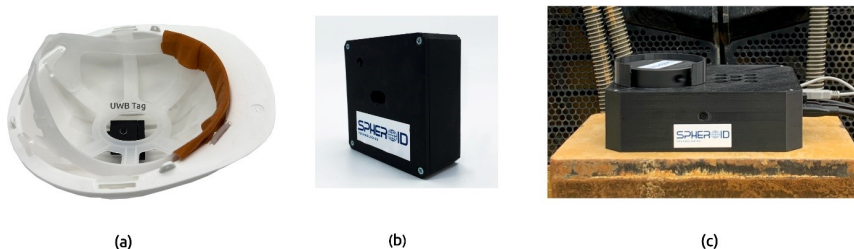


Abbildung 2: a) ein Personen Tag, das im Helm aufgebaut wird, b) ein Fahrzeug-Tag und c) das Überholungsmodul

2.3 Zoneneinteilung zur Kollisionsvermeidung von Maschinen und Personen

Aufgrund der hohen Genauigkeit der Abstandsmessungen erfolgt eine präzise Zoneneinteilung in die folgenden drei Zonen zu einer in der Nähe befindlichen Maschine: kritische Zone (< 10 m), Warnzone (10 – 20 m) und sichere Zone (> 20 m). Je nach Umgebung und Anwendung können diese Abstände angepasst werden.

3 Feldmessungen und Evaluation der Ergebnisse

Zur Validierung des Systems sind in Zusammenarbeit mit dem Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University Feldmessungen im Tagebau Nivelstein durchgeführt worden. In den nachfolgenden Abschnitten wird das System sowie die Versuchsdurchführung der Kollisionsvermeidung zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeug und Personen beschrieben. Im Rahmen der Feldmessungen im Tagebau Nivelstein sind die Gefahrenbereiche und die Zoneneinteilungen wie in Abschnitt 2.3 definiert worden.

3.1 Aufbau und Durchführung der Feldmessungen zur Kollisionsvermeidung Fahrzeug – Person

Das System besteht aus einem Personentag, welches im Helm implementiert ist, sowie einem Fahrzeugtag, das im Fahrzeug auf dem Armaturenbrett montiert ist. Im Rahmen der Feldmessung fährt das Fahrzeug in Richtung der Kreuzung, das Tag leuchtet grün, um zu zeigen, dass sich eine Person oder ein anderes Fahrzeug nähert, sich aber in einem sicheren Bereich aufhält beziehungsweise befindet. Die Anzeige leuchtet gelb, sobald sich das nähernde Fahrzeug oder die Person im Warnbereich zwischen 10 - 20 m befindet. In diesem Fall fährt der Fahrer weiterhin vorsichtig. Sobald sich die Person oder das andere Fahrzeug im Gefahrenbereich befindet, leuchtet das Tag rot. Abbildung 3 zeigt das Fahrzeug, in dem ein Fahrzeug-Tag montiert ist, und eine Person in einem schwer einsehbaren Gefahrenbereich einer Kreuzung.

Zur Validierung des Systems und der Messergebnisse in untertägigen Betrieben wurden zahlreiche Feldmessungen im Trainingsbergwerk Recklinghausen durchgeführt. Zur Durchführung der Messung wurden ein Fahrzeug-Tag auf einer Einschienenhängebahn (EHB) angebracht und ein Mitarbeiter mit einem Personentag im Helm ausgestattet. Die Entfernungsmessungen zwischen dem Maschinen-Tag und dem Personen-Tag wurden mit einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) aufgezeichnet, welche auf jedem tragbaren Gerät wie einem Smartphone, Tablet oder Laptop angezeigt werden kann (Abbildung 4).



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 3: a) Eine mögliche Kollision zwischen dem Fahrzeug und der Person mit dem (b) grünen LED im gefahrlosen Bereich und (c) gelben LED im Warnbereich und (d) roten LED im gefährlichen Bereich

Das Personen-Tag ist mit einem UWB- und einem WiFi-Modul ausgestattet. Das UWB-Modul stellt die Verbindung mit dem Fahrzeug-Tag her, während das WiFi-Modul die Verbindung mit dem Mesh-Netzwerk ermöglicht. Das WiFi-Modul sendet Datenpakete mit seiner eigenen ID und der entsprechenden Reichweite, gefolgt von anderen wichtigen Informationen wie einem SOS-Status, die von jedem Smartphone, Tablet oder Laptop abgerufen werden können, welche mit demselben Netzwerk verbunden ist.

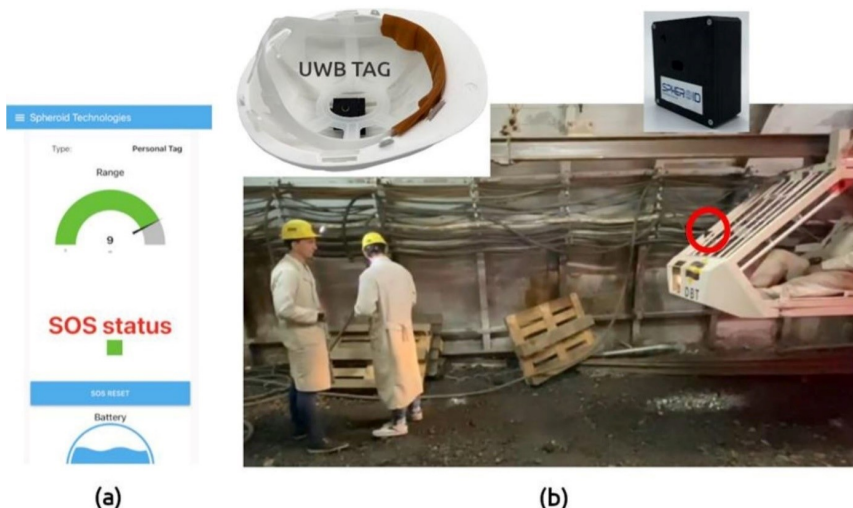


Abbildung 4: a) GUI zur Kollisionsvermeidung, b) EHB nähert sich Personen

In der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) wird der Status der EHB dargestellt. Zur Visualisierung der Ergebnisse, wurde ein sicherer Bereich mit Grün, ein Warnbereich mit Gelb und einen Gefahrenbereich mit Rot dargestellt. Die Warnungen für die entsprechenden Zonen können auch durch die Auslösung anderer geeigneter Signale, wie zum Beispiel eines Signaltons, realisiert werden.

Zur Validierung der Messergebnisse sind statische Messungen in definierten Abständen durchgeführt worden und mit den tatsächlichen Abständen verglichen worden. Abbildung 5 zeigt die Messergebnisse, welche maximale Abweichungen von 0,15 m aufweisen.

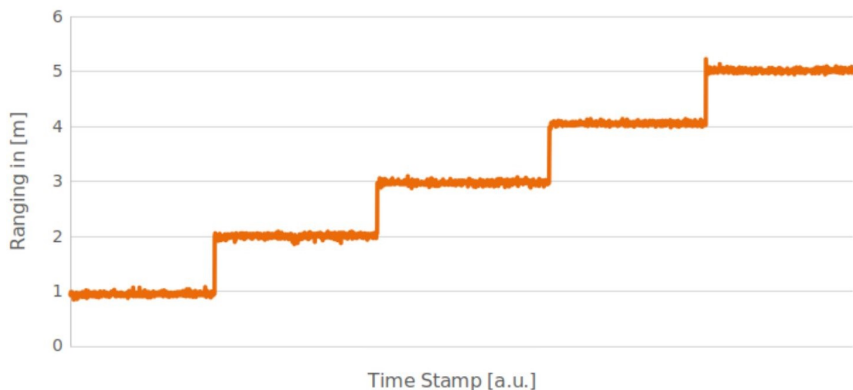


Abbildung 5: Ranging in definierten Abstände zwischen der Person und der EHB

3.2 Aufbau und Durchführung der Feldmessungen zur Kollisionsvermeidung zwischen Fahrzeugen

Zur Durchführung dieser Feldmessung sind ein Fahrzeugtag auf dem Armaturenbrett des Befahrungsfahrzeugs und ein Tag in der Kabine eines LKW implementiert worden. Es sind die gleichen definierten Abstände wie im vorigen Abschnitt angewendet worden. Die Abstände des Systems lassen sich an die jeweiligen Bedingungen und Gefahrenbereiche anpassen.

Befindet sich ein Fahrzeug oder eine mobile Maschine im Gefahrenbereich, wie das Fahrzeug in Abbildung 6 leuchten die Anzeigen der jeweiligen Fahrzeugtags rot auf. Im Falle der Warnzone in gelber Farbe sowie in grüner Farbe im sicheren Bereich. Die Abbildung 5 zeigt das Tag in einem LKW in drei Abständen zu einem Fahrzeug.

3.3 Kollisionsvermeidung bei Überholvorgängen

Eine weitere Ursache für Unfälle zwischen Fahrzeugen ist der Überholvorgang. Hierbei kann es durch einen schlecht einsehbaren Bereich, insbesondere bei großen Fahrzeugen zu Kollisionen mit entgegenkommendem Verkehr kommen. Das System zur Kollisionsvermeidung während des Überholvorgangs besteht aus Fahrzeugtag, Radar/Kamera Modul und einer Überholungsanzeige. Im Rahmen der Feldmessung sind die Module auf den Fahrzeugen implementiert worden. Zum Durchführen dieser Messung wurde ein Überholungsmodul auf der Vorderseite einer Planierraupe und ein UWB Tag auf der Hinterseite der Planierraupe aufgebaut (Abbildung 7). Ein Fahrzeug wurde ebenfalls beim Überholen mit einem UWB Tag und einer Überholungsanzeige ausgestattet. Während der Feldmessung nähert sich das Fahrzeug der Planierraupe von hinten und der Fahrer überholt die Planierraupe. Im ersten Fall fährt vor der Planierraupe ein weiteres Fahrzeug, so dass eine sichere Überholung der Planierraupe für das hintere Fahrzeug nicht möglich ist. Die UWB-Module ermitteln den Abstand zwischen der Planierraupe und dem Fahrzeug. Sobald sich das Fahrzeug in einem vordefinierten Abstand zur Planierraupe befindet, beginnt das Überholungssystem mit der Analyse der Überholmöglichkeit. Der Laserscanner tastet das Feld vor der Planierraupe ab und meldet entweder ein freies Feld oder einen blockierten Weg. Die Kamera nimmt die Fotos auf, die Daten werden verarbeitet und das Ergebnis wird vom Überholungsmodul der Planierraupe an das Anzeigemodul des Fahrzeugs übertragen. Wie in Abbildung 6 dargestellt, zeigt das Display des Fahrzeugs ein rotes Warnsignal an, welches signalisiert, dass eine Überholung nicht möglich ist.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 6: Die LKW a) mit dem grün beleuchteten Tag im sicheren Bereich, b) mit dem gelb beleuchteten Tag am Ende des Warnbereiches und c) mit rot beleuchteten Tag im Gefahrenbereich von einem Fahrzeug



(a)



(b)

Abbildung 7: a) Eine Planiererraupe blockiert mit einem vorausfahrenden Fahrzeug und einem überholenden Fahrzeug hinten, b) ein rotes Warnsignal auf der Anzeige des Fahrers

Sobald das vorausfahrende Fahrzeug wegfährt und eine sichere Gelegenheit zum Überholen möglich ist, zeigt das Display ein grünes visuelles Signal an (Abbildung 7).



(a)



(b)

Abb. 8: a) Eine Planiererraupe ohne Hindernis und einem überholenden Fahrzeug hinten, b) ein rotes Warnsignal auf der Anzeige des Fahrers

4 Zusammenfassung

Im Hinblick auf eine zukünftig weiter voranschreitende Automatisierung hin zu autonomen mobilen Fahrzeugen in über- und untertägigen Rohstoffgewinnungsbetrieben, wird der Einsatz von zuverlässigen Kollisionsvermeidungssystemen immer wichtiger. Das vorgestellte System zur Kollisionsvermeidung besitzt einen modularen Aufbau von Ultra-Breitbandfunktechnologie sowie einer IoT-Struktur, wodurch das System über den derzeitigen Stand der Technik hinausgeht und dadurch zur Reduzierung von Unfällen und Erhöhung der Produktivität beiträgt. Das System kann optional mit einem innovativen System zur Kollisionsvermeidung bei Überholvorgängen von Schwermaschinen und -fahrzeugen ergänzt werden.

5 Danksagungen

An dieser Stelle würden wir gerne unseren Partnern vom Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen University, dem Reallabor im Tagebau Nivelstein sowie die umfangreiche Unterstützung im Trainingsbergwerk Recklinghausen bedanken.

6 Referenzen

- [1] International Council on Mining & Metals (Hg.) (2021), "Safety Performance: Benchmarking progress of ICMM company members in 2020". Online verfügbar unter <https://www.icmm.com/en-gb/research/health-safety/benchmarking-2020-safety-data>, zuletzt geprüft am 10.03.2022.
- [2] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (Hg.) (2020), „DGUV-Statistiken für die Praxis 2019“, Online verfügbar unter <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/3903>, zuletzt geprüft am 10.03.2022.
- [3] Blumenstein, D., Ferriter, R., Powers, J., & Reiher, M. (2011), Cost of Accidents Guide". Hg. v. Western Mining Safety and Health Training and Translation Center. Colorado School of Mines. Golden. Online verfügbar unter <https://www.mines.edu/emcis/wp-content/uploads/sites/185/2018/07/total-cost-of-accidents.pdf>, zuletzt geprüft am 10.03.2022.
- [4] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (Hg.), „Anzahl der berufsbedingten Todesfälle nach Unfallklassen, Betreiber von Kohlebergwerken, Betreiber von Metallbergwerken, Betreiber von Nichtmetallbergwerken, Betreiber von Steinbrüchen, Betreiber von Sand- und Kieswerken, Auftragnehmer von Kohlebergwerken, Auftragnehmer von Nichtkohlebergwerken“, 2015 – 2020 (N=160). NIOSH Mine and Mine Worker Charts. Online verfügbar unter: <https://wwwn.cdc.gov/NIOSH-Mining/MMWC/Fatality/Count?StartYear=2015&EndYear=2020&SelectedMineType=#>, zuletzt geprüft am 10.03.2022.
- [5] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (Hg.), „Anzahl der nicht tödlichen Unfälle mit Ausfalltagen nach Unfallklassen, Betreiber von Kohlebergwerken, Betreiber von Metallbergwerken, Betreiber von Nichtmetallbergwerken, Betreiber von Steinbrüchen, Betreiber von Sand- und Kieswerken, Auftragnehmer von Kohlebergwerken, Auftragnehmer von Nichtkohlebergwerken“, 2015 - 2020. NIOSH Mine and Mine Worker Charts. Online verfügbar unter <https://wwwn.cdc.gov/NIOSH-Mining/MMWC/Injuries/Count?StartYear=2015&EndYear=2020&SelectedMineType=#>, zuletzt geprüft am 10.03.2022.
- [6] Cung Lian Sang, Michael Adams, Timm Hörmann, Marc Hesse, Mario Pormann and Ulrich Rückert "Numerical and Experimental Evaluation of Error Estimation for Two-Way Ranging Methods"

Fabian Uth
info@spheroid-tech.com
Mrityunjaya Sherikar

Amir E. Kianfar
Pascal Paehge

SPHEROID Technologies UG
Sternbergstr. 24
93053 Regensburg

Potential erneuerbarer Energieerzeugung für die Steine- und Erden-Industrie

Dr. C. Weigel, T. Hardebusch
Technische Universität Clausthal

1 Einleitung

Im Jahr 1980 wurde mit dem Buch „Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran“ der Begriff „Energiewende“ eingeführt. Nachdem diese Wende zunächst eher behäbig begangen wurde, hat sie in den letzten Jahren zunehmend Fahrt aufgenommen und der Ausbau von Erneuerbaren Energien ist heutzutage relevanter als je zu vor. Diese Relevanz gestaltet sich sowohl auf politischer als auch auf wirtschaftlicher Ebene. Nachdem im letzten Jahr die bisherigen Klimaziele und Maßnahmen nach einer Klage beim Bundesverfassungsgericht als nicht ausreichend beurteilt wurden und sich eine Regierung mit einem grünen Wirtschafts- und Klimaminister gebildet hat, sind diese Klimaziele stark verschärft worden. Allein im Bereich Photovoltaik muss die Ausbaurate versechsfacht werden, um das Ausbaziel der Bundesregierung von 200 GW bis 2030 zu erreichen. Neben den verschärften Ausbauzielen, welche durch neue Gesetespakete und darin verankerten Fördermodalitäten getragen werden sollen, haben sowohl die Strompreise auch als die Kraftstoffpreise in Folge geopolitischer Ereignisse, wie der Invasion der Ukraine durch Russland, als auch der neuen CO₂-Besteuerung erhebliche Steigerungen erfahren. Die Gesteungskosten von Erneuerbaren Energien sind in den letzten 10 Jahren hingegen stark gesunken.

Weltweit spielt der Bergbau eine tragende Rolle bei der Emission von Treibhausgasen ein. Die Bergbauindustrie ist für circa 2,7 % des weltweiten Energieverbrauchs verantwortlich. Dies entspricht rund 16,15 Exajoule beziehungsweise rund 4,485 Mrd. GWh, und einem jährlichen CO₂-Ausstoß von rund 972 Mio. Tonnen. Neben der Aufbereitung ist die Fördertechnik hierbei maßgeblich für diesen Energieverbrauch verantwortlich. Sowohl um den notwendigen Beitrag im Kampf gegen den Klimawandel zu leisten als auch nachhaltig wirtschaftlich am Markt konkurrieren zu können, ist ein Umdenken der Steine- und Erden-Industrie sowohl hinsichtlich der Erzeugung Erneuerbarer Energien als der Nutzung von Eigenstrom und der Emissionsreduktion in der Fördertechnik erforderlich.

Dieses Paper setzt es sich zum Ziel, der Steine- und Erden-Industrie einen Überblick über die rechtlichen, wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen zur Erzeugung Erneuerbarer Energien zu geben und die Möglichkeiten einer emissionslosen Fördertechnik, zum Beispiel durch fahrzeuglosen Transport oder durch Trolley-Assist Systeme, aufzuzeigen. Es ist zu erwarten, dass die Reduzierung des Energieverbrauchs aus fossilen und nuklearen Quellen mit der Beteiligung der Bündnis90 / Grünen an der Bundesregierung und vor dem Hintergrund der

Ukrainekrise nochmals beschleunigt wird. Es ist also Zeit, sich intensiv mit Alternativen zur gewohnten Energieversorgung und zu üblichen, auf fossilen Energieträgern basierenden Antriebssystemen zu beschäftigen.

2 Potential Erneuerbarer Energien für die Steine- und Erden-Industrie

2.1 Politische Rahmenbedingungen

Der systematische Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland hat im Jahr 2000 mit der Einführung des Erneuerbaren Energien Gesetz, kurz EEG, begonnen. Dieses ist seit seiner Einführung der wesentliche Treiber der Energiewende gewesen¹. Im Jahr 2021 übertraf der Anteil der Erneuerbaren Energien Deutschen Bruttostromverbrauch mit 41,1 % (und 19,2 % des Bruttoenergieverbrauchs) den Anteil des Kohlestroms mit einer Höhe von rund 30,2 % deutlich.² Den größten Anteil der Erneuerbaren wird durch Windkraftanlagen erzeugt (48,8 %) gefolgt von Photovoltaik (21,4 %) und Energie aus Biomasse (21,4 %). Von diesen Erneuerbaren Energien sind die Wind-, Wasser- und Bioenergie für die Energieerzeugung während eines aktiven Bergbaubetriebs aus technischen und genehmigungsrechtlichen Gründen eher ungeeignet. Die Energieerzeugung mittels Photovoltaik ist hingegen auf ungenutzten Flächen, wie Dach- und Haldenflächen sowie auf Wasserflächen auch während des Bergbaubetriebs möglich.

Die Photovoltaik (kurz PV) ist der Stromerzeuger mit den stärksten Ausbauraten und Investitionen in den letzten Jahren. In den Jahren 2020 und 2021 wurden in Deutschland insgesamt 13,3 GW (6,6 GW & 6,7 GW) an Erneuerbaren Energieerzeugern errichtet. Davon sind rund 9,8 GW (4,8 GW & 5 GW) Photovoltaikanlagen gewesen². Hinsichtlich der Investitionen sind in diesen Jahren rund 24,28 Mrd. € (11,13 Mrd. € und 13,35 Mrd. €) in Erneuerbare Energien und davon 8,79 Mrd. € (4,22 Mrd. € und 4,57 Mrd. €) in Photovoltaik investiert worden. Der Anteil der Photovoltaik an der installierten Leistung beträgt folglich rund 74 %, wohingegen der Anteil an den Investitionen lediglich 36 % beträgt. Dies lässt darauf schließen, dass die Photovoltaik einer der günstigsten Erneuerbaren Energien ist. Derzeit sind in Deutschland knapp 60 GW an Photovoltaik installiert. Damit ist Deutschland mit einem Anteil von über 35 % das Land mit der größten installierten Solarstromleistung in Europa².

Die im RefE EEG 2023 deutlich angehobenen Ausbauziele sehen eine installierte PV-Leistung von 88 GW im Jahr 2024, 200 GW im Jahr 2030 und 400 GW ab dem Jahr 2045 vor. Allein um die Ausbauziele im Jahr 2030 zu erreichen, muss in den nächsten acht Jahren 2,3-mal so viel Photovoltaik installiert werden wie in den letzten 22 Jahren³. Die zu installierenden 340 GWp entsprechen knapp achtzig Mal der Leistung des größten Braunkohlekraftwerks, dem Kraftwerk Neurath der RWE mit einer Leistung von 4,4 GW.

¹ Informationsportal Erneuerbare Energien - EEG: Daten und Fakten

² BMWi Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien

³ RefE EEG 2023

Der Erhöhung dieser Ausbauziele geht zeitlich ein Wandel im PV-Markt voraus, welcher im Wesentlichen von der kontinuierlich sinkenden, gesetzlichen Einspeisevergütung beeinflusst wird, deren Effekt durch die derzeit stark steigenden Kraftstoff- und Strompreise verstärkt und durch die zumindest langfristig stark gesunkenen Kosten für PV-Module und Wechselrichter nicht kompensiert werden kann. Die durch das EEG für 20 Jahre gesicherten Einspeisevergütungen bilden die Grundlage für die Finanzierung der jeweiligen Projekte. Dabei werden kleinere Projekte mit einer Leistung bis zu 10 kWp beziehungsweise 30 kWp aufgrund der höheren spezifischen Investitionskosten stärker gefördert als größere Solarparks mit einer Größe bis zu 750 kWp im klassischen EEG und bis zu einer Größe von 20 MWp über die Ausschreibungsverfahren der Bundesnetzagentur. Die Forderungen sind bis 2021 stets höher als der Strompreis am Strommarkt gewesen. Die Differenz zum Marktpreis wurde über die EEG-Umlage finanziert. Während die Förderungen bis 2010 noch bei über 20 ct pro kWh lagen, betrug die Förderung für ein klassisches 750 kWp Projekts zu Beginn dieses Jahres nur noch rund 5 ct / kWh und lag damit unter dem Marktpreis an der Strombörse. Das Unterschreiten des Marktwerts stellt einen wesentlichen Grund für den Wegfall der EEG-Umlage ab dem 01.07.2022 dar. Da größere Solarparks (ab 100 kWp) verpflichtend an der Direktvermarktung teilnehmen müssen, erhalten diese die EEG-Vergütung nur wenn der Marktwert des PV-Stroms unter der EEG-Vergütung liegt, ansonsten erhalten diese den Marktwert ausgezahlt. Insofern handelt es sich bei der EEG-Förderung um eine Absicherung der Mindestvergütung. Eine Übersicht über den Rückgang der Vergütungshöhe ist in Abbildung 1 gegeben:

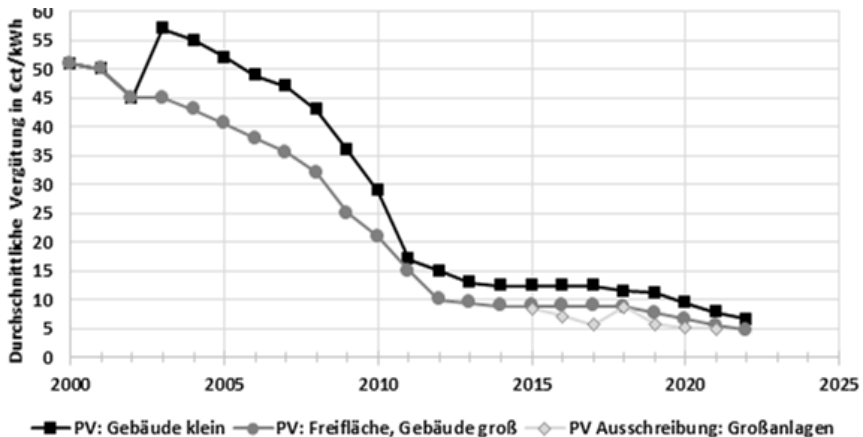


Abbildung 1 Entwicklung der EEG-Vergütung seit 2000

Je installiertem kWp produziert eine PV-Anlage je nach Lage und Ausrichtung zwischen 850 und 1150 kWh an Strom. Die Erhöhung der Einspeisevergütung um 1 ct bedeutet folglich über 20 Jahre Mehreinnahmen von circa 200 €/kWp. Bei einer Einspeisevergütung von 5 ct bedeutet dies, dass eine PV-Anlage innerhalb von 20 Jahren lediglich 1000€/kWp erwirtschaftet. Unter der Berücksichtigung von Kapitaldienst und Betriebskosten, darf eine PV-Anlage inklusive der Projektentwicklung, Montage und Netzverknüpfung bei der heutigen EEG-Vergütung nicht mehr als rund 650 €/kWp kosten. Dies ist allerdings bei kleineren PV-Anlagen mit hohen Fixkosten allein auf Basis der EEG-Vergütung kaum mehr möglich.

Zwar sind die Kosten für PV-Module sind in den letzten 15 Jahren im Schnitt um rund 85 % zurückgegangen, haben im letzten Jahr allerdings aufgrund von Lieferengpässen und einer erhöhten Nachfrage einen erneuten Anstieg um rund. 30 % erfahren. Dieser Anstieg trägt dazu bei, dass die Wirtschaftlichkeit von regulären EEG-Projekten abnimmt. Hieraus resultieren im Wesentlichen zwei Alternativen: Entweder müssen die Fixkosten gesenkt werden, was bei der Entwicklung größerer Projekte der Fall ist, oder es müssen höher alternative Vergütungswege, zum Beispiel durch die Stromkostensparnis beim Stromeigenverbrauch, gefunden werden. Eine Übersicht über die möglichen PV-Vergütungen ist in Abbildung 2 gegeben:

	Klassische EEG-Vergütung	EEG-Ausschreibung	Power Purchase Agreement	Stromeigennutzung
Anlagengröße	Bis zu 750 kWp	751 kWp bis 20 MWp	Unbegrenzt	Abhängig vom Strombedarf
Voraussetzung	EEG-Fläche*	EEG-Fläche*	Keine	Keine
Vergütung	< 5 €ct/kWh	Ca. 5 €ct/kWh	4,5 – 7,5 €ct/kWh**	Ca. 30 €ct/kWh***
Gesichert durch	Staat (EEG)	Staat (EEG)	Vertragspartner (meist EVU)	Eigenen Strombedarf
Dauer	20 Jahre + IBN-Jahr****	20 Jahre	Variabel	Abhängig vom Strombedarf

*Bauliche Anlagen, Konversionsflächen oder Flächen in bis zu 200 m Nähe von Bahnlinien oder Autobahnen. ** Abhängig von der Laufzeit, derzeit werden höhere Vergütungen für kurze Laufzeiten gezahlt. *** Der Wert des eigen genutzten PV-Stroms entspricht den Strombezugskosten inkl. aller Umlagen außer der EEG-Umlage. **** IBN-Jahr = Jahr der Inbetriebnahme der Anlage (Fertigstellung der PV-Anlage und Sicherung der EEG-Vergütung, Netzanschluss kann später erfolgen.)

Abbildung 2 Vergütungskategorien für PV-Strom

Insbesondere durch die derzeit stark gestiegenen Strompreise ist der Stromeigenverbrauch besonders interessant. Bei diesem werden zusätzlich zum Arbeitspreis sämtliche Netzgebühren und Abgaben eingespart (und die EEG-Umlage wird nur anteilig fällig). Dies funktioniert solange der Strom nicht ins Stromnetz eingespeist wird. So lassen sich pro kWh eigengenutztem PV-Strom bis über 30 ct einsparen, wohingegen der ins Netz eingespeiste Strom nur mit 5 ct pro kWh vergütet wird. Durch die Nutzung von Batteriespeichern lässt sich der Autarkiegrad sowie auch der Eigenverbrauchsanteil erhöhen und Lastspitzen können geglättet werden, was sich reduzierend auf den Leistungspreis und damit die Kosten für den Reststrombezug auswirkt. Eigenstrommodelle sind insbesondere für Industriebetriebe mit hohen Stromverbräuchen und großen Frei- oder Dachflächen interessant, worunter auch die Betriebe der Steine- und Erden-Industrie fallen, und stellen in Relation zur Leistung die wirtschaftlichsten Projekte dar.

Eine wesentliche Kostenreduktion bei PV-Projekten ist nur durch eine Reduktion der Fixkosten für die Netzverknüpfung (Kabelweg, gegebenenfalls Transformatoren, Umspannwerke), die Montage und die Projektentwicklung möglich. Diese Kosten reduzieren sich mit der Größe der Projekte, während die Wirtschaftlichkeit der Projekte zunimmt. Im EEG sind allerdings lediglich Förderungen für Projekte auf baulichen Anlagen, Konversionsflächen und sonstigen Flächen in einem Abstand von bis zu 200 m von Autobahnen oder Bahnlinien mit einer Größe bis zu 20 MW möglich. Zur Sicherung der Einspeisevergütung dieser größeren Projekte ist die Teilnahme an einer Ausschreibung der Bundesnetzagentur nötig und es werden Sicherheitsleistungen in Höhe von 25 - 50 T€ pro MW fällig. Da die Finanzierungszusage oftmals erst gegen Ende einer Projektentwicklung eintrifft, sind diese Gebühren meist aus der freien Liquidität der Projektierer zu zahlen.

Eine Alternative zur EEG-Vergütung bilden sogenannte Power Purchase Agreements (kurz PPA). Dabei handelt es sich um langfristige Stromlieferverträge, die meist mit Energieversorgungsunternehmen abgeschlossen werden. Aufgrund der aktuellen politischen Zielsetzung und geopolitischen Ereignisse sind derzeit bereits PPAs mit einer Vergütung von über 7 ct pro kWh bei einer Laufzeit von 10 Jahren möglich. Für Laufzeiten bis zu 20 Jahre ist eine vergleichbare Vergütung wie durch die EEG-Vergütung realistisch. Ein weiterer Vorteil der PPAs ist, dass die Vergütung nicht an eine Kategorisierung und Größe der Flächen geknüpft ist. So eignen sich auch große landwirtschaftliche Flächen für die Errichtung von PV-Anlagen. Erste Solarparks mit einer Größe über 100 MW sind in Deutschland bereits auf landwirtschaftlichen Flächen realisiert worden. Ein Erreichen der Ausbauziele der Bundesregierung von 400 GW bis 2045 wird ohne die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen und ohne die Projektierung von Solarparks in einer Größenordnung von mehreren hundert MW nicht möglich sein. Schließlich werden für das Ausbauziel noch circa 3000 km² an PV benötigt – dies entspricht circa 1,2-mal der Fläche des Saarlandes.

Bereits 2015 wurde in einem Forschungsbericht für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI hervorgehoben: „Die Frage nach der Verfügbarkeit möglichst raum- und umweltverträglicher Flächen- und Erzeugungspotenziale [für erneuerbare Energien] zunehmend an Bedeutung.“ Hierbei geht es insbesondere um konkurrierende Interessen und Rechtsgüter, wie den Natur-, Umwelt- und Artenschutz, wie optische und Schallbelastungen für Anwohnende sowie um die landwirtschaftliche Versorgung der Bevölkerung mit Nahrung, welche immer häufiger für Konflikte beim weiteren Ausbau sorgen. Aktuelles Beispiel ist der stockende Ausbau der Windenergie aufgrund der Diskussionen um Abstandsregelungen oder der Naturverträglichkeit der Windräder sowohl on- als auch offshore. Insofern ist es essenziell für den Ausbau der Erneuerbaren Energien, dass möglichst viele, verschiedene PV-Potentiale ausgenutzt werden. Nur durch eine Kombination von Dachflächen, sowohl im

Wohnbereich als auch im Gewerbe, und Konversions-, Wasser- und landwirtschaftlichen Freiflächen, die idealerweise durch Doppelnutzungskonzepte weiteren Zwecken zugeführt werden können, lassen sich Konflikte aus konkurrierenden Interessen vermeiden und die Versiegelungen großer landwirtschaftlicher Flächen reduzieren.

Bergbaulich genutzte Flächen können dabei einen wichtigen Stützpfeiler der Energiewende bilden. Allein die über 3.500 Betriebe der Steine- und Erden-Industrie würden bei einer Belegung von je knapp einem ha zur Eigenstromversorgung rund 3.500 GWh pro Jahr bei einer PV-Leistung von rund 3,5 GW produzieren. Dies entspräche über 1 % des Ausbauziels der Bundesregierung bis 2045. Berücksichtigt man die Möglichkeit der Energieversorgung zur Nachnutzung der Flächen so kann der Beitrag der Steine- und Erden-Industrie an der Energiewende noch gesteigert werden.

2.2 Wirtschaftliches Potential für die Betriebe der Steine- und Erden-Industrie

Allen Gewinnungsbetrieben der Steine- und Erden-Industrie ist gemein, dass sie – bedingt durch den stetigen räumlichen Fortschritt der Rohstoffgewinnung – relativ große Betriebsflächen von häufig mehr als 25 ha besitzen, die in Teilbereichen nicht, nicht mehr oder auch noch nicht in Anspruch genommen werden. Beispiele sind Flächen von Innen- und Außenkippen oder Endbermen der Gewinnung im sogenannten rückwärtigen, bereits abgebauten Bereich und erst zukünftig im Soganspruch zu nehmende Flächen, das sogenannte Vorfeld. Eine Sonderstellung nehmen die Nassgewinnungsbetriebe für Kies und Sand ein, da deren Betriebsfläche überwiegend aus einem sogenannten Baggersee besteht. Hinzu kommen umlaufende Sicherheitstreifen oder für die Gesteinsgewinnung nicht nutzbare Betriebsflächen. Diese dauerhaft oder auch temporär ungenutzten Flächen bieten sich für die Installation von Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energie an. Ergänzend sind auch die Dachflächen der Betriebsgebäude potenzielle Standorte für PV-Anlagen. Aufgrund der meist größeren Abstände von mehreren hundert Metern zu benachbarten Siedlungsbereichen kann ein deutlich reduziertes Konfliktpotential erwartet werden. Insgesamt kann daher angenommen werden, dass die Betriebsflächen der Gewinnungsbetriebe der Forderung des BMVI bezüglich der Verfügbarkeit möglichst raum- und umweltverträglicher Flächen- und Erzeugungspotenziale für erneuerbare Energien entsprechen und daher eine besondere Eignung aufweisen.

Die Freiheitsgrade in der Auswahl geeigneter Flächen in den Gewinnungsbetrieben wird jedoch durch eine Reihe von Einflussparametern eingeschränkt. In erster Linie dürfen die Betriebsabläufe nicht oder nicht erheblich gestört werden. Wesentlich bei der Beurteilung der Flächenverfügbarkeit ist insbesondere die räumliche und zeitliche Dynamik der Rohstoffgewinnung, so dass eine Bestandsaufnahme auch die zukünftige Betriebsentwicklung berücksichtigen muss. Eine reine Übernahme des aktuellen Betriebszustands, zum Beispiel in Form einer Vermessung, reicht daher nicht aus und muss durch weitere Informationen ergänzt werden.

Insgesamt ist anzunehmen, dass grundsätzlich ein Potential zur Erzeugung von regenerativer Energie an den Standorten der Gewinnungsbetriebe der Steine- und Erden-Industrie gegeben ist. Demgegenüber steht die Fragestellung, ob die räumlichen und betrieblichen Rahmenbedingungen in Verbindung mit den Standortbedingungen eine tatsächliche Installation ermöglichen. Ebenso muss für eine belastbare Aussage zur Umsetzbarkeit eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden. Zur Klärung dieser Fragestellungen wurde ein AiF-Forschungsprojekt beantragt, das eine Methodik zur Potenzialermittlung für die Erzeugung von regenerativer Energie in aktiven Gewinnungsbetrieben der Steine- und Erden-Industrie zum Ziel hat.

Die wesentlichen Einflussgrößen sind die Art und Größenordnung der Energiegewinnung, die auch im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts näher untersucht werden, sind die Anlagengröße, der spezifische Stromertrag, die Eigenverbrauchsquote, aber auch die Parameter der betriebswirtschaftlichen Kostenrechnung wie Höhe des Eigenkapitals, Kreditzinsen und -laufzeiten sowie Fördermöglichkeiten.

Der Standort ist einer der wesentlichen Faktoren für die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage. Hierbei spielen der spezifische Energiebetrag, der Stromverbrauch am Standort, die Nähe zu einem Netzverknüpfungspunkt sowie die Genehmigungs- und Vergütungsfähigkeit für die Erträge und Fixkosten eine wichtige Rolle.

3 Erlösfaktoren einer PV-Anlage

Der spezifische Energieertrag gibt an wie viele kWh von einem kWp Modulleistung in einem Jahr produziert werden. Dieser Wert ist von der Modulneigung, Ausrichtung, Verschattung und den standortspezifischen Wetterdaten abhängig. Generell schwanken die spezifischen Energieerträge bei PV-Anlagen in Deutschland von 850 - 1150 kWh / kWp, wobei bei Freiflächenanlagen aufgrund der auf eine optimierte Stromerzeugung angepassten Ausrichtung und minimierten Verschattung, die Erträge meistens über 1000 kWh / kWp liegen. Die höchsten Erträge werden dabei von PV-Anlagen mit Südausrichtung erzielt, wohingegen nach Ost-West ausgerichtete Anlagen ein gleichmäßigeres Stromerzeugungsprofil aufweisen und sich so besser für die Eigennutzung des Solarstroms eignen. Bei Dachanlagen ist der spezifische Ertrag sehr stark von der Dachausrichtung und Verschattung abhängig und fällt in der Regel geringer als bei Freiflächenanlagen aus. Allerdings erlaubt die Eigennutzung des Solarstroms eine höhere Wertigkeit des erzeugten Stroms, sodass die im Schnitt geringeren Erträge kompensiert werden.

Die Stromeigenverbrauchsquote ist der Anteil des erzeugten Solarstroms, der vorort zur Deckung des eigenen Strombedarfs genutzt werden kann und nicht ins Stromnetz eingespeist wird. Neben der Ausrichtung der Module hängt die Eigenverbrauchsquote vom Lastgang der Stromnutzer sowie dem Stromerzeugungsprofil ab. Durch die Verwendung von Batteriespeichern können Lastspitzen geglättet werden und die Eigenverbrauchsquote und damit auch zum Teil die Unabhängigkeit

gegenüber Energieversorgungsunternehmen gesteigert werden. Für eine hohe Eigenverbrauchsquote ist ein hoher Strombedarf, welcher hauptsächlich tagsüber auftritt, von Bedeutung. Dies in bei den Betrieben der Steine- und Erden-Industrie der Fall. Zudem sind oftmals größere Flächen zur Stromversorgung vorhanden. Analysen bei einem Kieswerk haben ergeben, dass der von einer PV-Anlage mit einer Leistung von einem MWp erzeugte Strom zu über 70 % zur Deckung des eigenen Strombedarfs genutzt werden kann. Bei einer Stromerzeugung von rund 1 Mio. kWh pro Jahr entspricht dies einer Solarstromnutzung von rund 700 MWh, die folglich nicht mehr vom Energieversorger bezogen werden müssen. Dies ist angesichts der derzeit stark steigenden Strompreise besonders relevant. Allein der Börsenstrompreis am EPEX-Spotmarkt ist von 52,81 € pro MWh im Januar 2021 auf 167,73 € pro MWh im Januar dieses Jahres gestiegen⁴. Die Strompreise für Haushalte und Industriebetriebe, welche zu über 50 % aus Steuern und Abgaben bestehen, sind hiervon ebenfalls betroffen. Während im Jahr 2021 noch Stromverträge für Privathaushalte für im Schnitt 31,4 ct pro kWh abgeschlossen werden konnten, liegt der Strompreis für neue Verträge derzeit bei über 42 ct pro kWh. Bei Industriebetrieben sind die Stromkosten von circa 16 ct pro kWh auf knapp über 25 ct für Neuverträge angestiegen⁵. Diese Strompreise werden ab Juli dieses Jahres durch das Wegfallen der EEG-Umlage zumindest leicht (um 3,74 ct pro kWh) zurückgehen.

Die Wertigkeit des eigengenutzten PV-Stroms, zum Beispiel in einem Betrieb der Steine- und Erden-Industrie läge somit nach dem Wegfallen der EEG-Umlage bei circa 21 ct pro kWh, wohingegen der ins Netz eingespeiste Strom lediglich mit 5 ct pro kWh vergütet werden würde. Bei einer Anlagengröße von 1 MW, dies entspricht einer Fläche von knapp einem ha, und einer Eigenverbrauchsquote von 70 % ließen sich so knapp 150 T€ pro Jahr an Stromkosten einsparen. Diese Ersparnis würde bei einem weiteren Anstieg der Strompreise noch höher ausfallen würde. Zusätzlich zu dieser Ersparnis ließen sich rund 15 T€ aus der Einspeisung des Reststroms ins Stromnetz einnehmen. Bei der Eigennutzung des erzeugten Solarstroms ließe sich hingegen ein wirtschaftlicher Vorteil von rund 165 T€ pro Jahr erzielen. Nach Einstellung des Betriebes würden sich rund 50 T€ pro Jahr bei einer 100-prozentigen Netzeinspeisung erzielen lassen.

3.1 Investitionskosten für PV-Komponenten

Den Erlösen durch die PV-Anlage stehen die Investitions-, Betriebs- und Kapitalkosten gegenüber. Neben den variablen Investitionskosten, den Kosten für die Komponenten der PV-Anlage, treten Investitionsfixkosten für die Netzverknüpfung sowie für die Projektentwicklung und -genehmigung auf, welche bei zunehmender Projektgröße verhältnismäßig geringer ausfallen. Die variablen Investitionskosten umfassen die Kosten für die PV-Module, Wechselrichter, Unter-

⁴ Strombörse - Preisentwicklung am EPEX-Spotmarkt bis Januar 2022 | Statista

⁵ Strompreise 2022 - News & Charts zur Strompreisentwicklung (strom-report.de)

konstruktion, Montage und Zubehör. Auch wenn diese Kosten gewissen Skaleneffekten unterliegen, besteht gerade für größere Projekte eine lineare Korrelation zwischen der Projektgröße und diesen Kosten. Aufgrund COVID-bedingter Lieferengpässe, erhöhter Nachfrage bedingt durch steigende Strompreise und geopolitische Entwicklungen sind die Preise von PV-Modulen in den letzten zwölf Monaten im Schnitt 21,7 % gestiegen. Die Spotmarktpreise für monokristalline Module sind im Schnitt von 290 € pro kWp auf 350 € pro kWp gestiegen. Je nach Hersteller liegen die Modulpreise heutzutage zwischen 260 € und 380 € pro kWp (Stand Januar 2022) mit Ausnahme einiger höherpreisiger Hersteller mit Preisen bis zu über 700 € pro kWp. Dabei sind chinesische Module die günstigsten auf dem Markt und liegen im Schnitt preislich circa 100 € pro kWp unter nicht chinesischen PV-Modulen. Die Preise für Wechselrichter sind in den letzten zwölf Monaten konstant geblieben und liegen in der Leistungsklasse von 10 - 100 kW für größere PV-Anlagen zwischen 25 - 150 € pro kW und im Mittel bei 72 € pro kW, wobei die spezifischen Kosten mit der Wechselrichterleistung abnehmen⁶. Die Kosten für die Unterkonstruktion und für Elektrozubehör können mit zwischen 50 - 100 € pro kWp angenommen werden. Die Kosten für die Montage der Module können mit circa 75 € pro kWp angenommen werden. Somit ergeben sich im Schnitt Kosten von 572 €/kWp für die Komponenten und Montage einer PV-Anlage:

Komponente	Durchschn. Kosten	Kostenspanne
PV-Module	350 €/kWp	260 – 390 €/kWp
Wechselrichter	72 €/kWp	25 – 150 €/kWp
Unterkonstruktion und Zubehör	75 €/kWp	50 – 100 €/kWp
Montage	75 €/kWp	50 – 100 €/kWp
Gesamtkosten	572 €/kWp	385 - 640 €/kWp

Abbildung 3 Kosten der Komponenten einer PV-Anlage

Zu diesen Kosten kommen weitere Investitionskosten für die Netzverknüpfung, für welche eine Übergabestation mitsamt Trafo sowie das Verlegen von Kabeln zu dieser benötigt wird. Die Lage des Netzverknüpfungspunkt ist beim Netzbetreiber zu erfragen und der Netzverknüpfungspunkt ist zu reservieren. Das Verlegen der Kabel kostet im Schnitt 100 € pro Meter Kabelweg. Die Trafotechnik kann mit circa 70 T€ und die Kosten für die Übergabestation mit 52 T€ veranschlagt werden. Hierbei sind die langen Lieferzeiten von Trafos zu erwähnen, welche bei rund 52 Wochen liegen. Sollte bereits ein Trafo mit ausreichend freier Kapazität vorhanden sein, entfallen diese Kosten.

⁶ Photon, Solarstrommagazin 1/2022 Seiten 38-41 Preisindizes Irene Naujoks, Jochen Siemer

3.2 Projektentwicklung und Genehmigung

Um eine Photovoltaikanlage zu errichten Bedarf es einer Baugenehmigung. Diese kann nur erteilt werden, wenn der im Bauleitplan vorgesehene Verwendungszweck die Energieerzeugung ermöglicht. Die Änderung des Bauleitplans erfolgt durch die Gemeinde nach Abschluss eines Bauleitplanverfahrens (kurz B-Planverfahren). Oftmals werden von PV-Projektentwicklern externe auf die Bauleitplanung spezialisierte Planungsbüros zur Hilfe gezogen. Die Kosten für ein B-Planverfahren mit sämtlichen Gutachten liegen im fünf- bis sechsstelligem Bereich und die Dauer beträgt je nach Klärungsbedarf und Zusammenarbeit der Gemeinde zwischen einem halben Jahr und zwei Jahren. Bevor mit einem B-Planverfahren begonnen wird, sollte eine kurze Machbarkeitsanalyse des PV-Projekts erfolgen, welche neben einer kurzen Wirtschaftlichkeitsberechnung auch eine Abfrage naturschutzfachlicher Gegebenheiten beinhaltet. Flächen in Natur- und Landschaftsschutzgebieten sind generell deutlich schwerer zu genehmigen, auch wenn die Bundesregierung inzwischen die Errichtung von PV-Anlagen auf Moorflächen ermöglichen möchte und dem Rechtsgut der Erneuerbaren Energieerzeugung einen höheren Stellenwert beimisst.

Die wesentlichen Schritte des Bauleitplanverfahrens, der Aufstellungs-, Entwurfs- und Satzungsbeschluss, werden auf den Gemeinderatsitzungen gefasst. Um eine zeitlich optimale Projektentwicklung durchzuführen, sollte die Sitzungsfolge der Gemeinde mit in die Planung einbezogen werden. Mit dem Aufstellungsbeschluss beschließt die Gemeinde das B-Planverfahren zu starten und die eigentliche Projektentwicklung beginnt.

In der ersten Phase des B-Planverfahrens erfolgt eine frühzeitige Beteiligung der Träger öffentlicher Belange (kurz TÖB), zu welchem zum Beispiel die untere Naturschutzbehörde und die Feuerwehr gehören. In dieser Phase sind die für die Genehmigung erforderlichen Gutachten einzuholen. Während diese Gutachten erarbeitet werden, sollte der Netzverknüpfungspunkt gesichert werden. Dies bedeutet, dass eine verbindliche Zusage vom Netzbetreiber einzuholen ist, welche in einer bestimmten Frist zur Reservierung des Netzverknüpfungspunkts bestätigt werden muss. Ebenso sind der geplante Kabelweg sowie die Flächen für die Übergabestation zu sichern. Des Weiteren sind in dieser Phase Angebote für die Komponenten des Solarparks sowie, insofern die Grundvergütung nicht durch das EEG abgesichert werden soll, PPA-Angebote einzuholen.

Auf Basis der vorgelegten Gutachten und der Stellungnahmen der Träger öffentlicher Belange beschließt die Gemeinde den Entwurfsbeschluss und legt diesen öffentlich aus. Zu diesem Beschluss können sowohl die TÖB als auch die Bürger Stellung nehmen. Auf diese Stellungnahmen ist entsprechend einzugehen und zusätzliche Maßnahmen zum Arten- oder Sichtschutz beziehungsweise eine Anpassung der Flächenkulisse können erforderlich sein. Diese Maßnahmen werden in einem Durchführungsvertrag beziehungsweise städtebaulichen Vertrag zu

Festlegung der Pflichten des Investors (Ausgleichsflächen, Artenschutz, Zuwegungen) festgehalten. Insofern mit einem positiven Ausgang des B-Planverfahrens, also mit dem Satzungsbeschluss zu rechnen ist, können die Komponenten bestellt, der Netzverknüpfungspunkt verbindlich reserviert, eine Finanzierungsfrage gestartet und der Bauantrag gestellt werden. Bis zur Erteilung der Baugenehmigung vergehen in der Regel drei Monate.

Eine Alternative zum B-Planverfahren stellt die Genehmigung der PV-Anlage als betriebliche Anlage zur Energieversorgung des Bergbaubetriebs dar. Hierbei ist es allerdings für die Finanzierung essenziell, dass eine Betriebsgenehmigung über die gesamte Finanzierungslaufzeit vorliegt. Ist dies nicht der Fall, so könnte eine Finanzierung nur über die Restlaufzeit der aktuellen Betriebsgenehmigung erfolgen. Die Folge wäre ein hoher Eigenkapitalanteil sowie ein Rückbaurisiko in dem Fall, dass die Betriebsgenehmigung nicht verlängert wird.

Nach Erhalt der Baugenehmigung kann mit dem Bau begonnen werden. Sobald die Komponenten der Anlage fertiggestellt sind, kann diese in Betrieb genommen werden, auch wenn der Netzanschluss noch nicht erfolgt ist. Zum Beispiel weil noch auf die Lieferung eines Trafos gewartet wird. Das Inbetriebnahme-Datum ist nur für klassische EEG-Anlagen relevant und dient als Bezugsdatum für die EEG-Vergütung, welche derzeit jeden Monat um 1,4 % zurückgeht. Für PV-Anlagen, die durch ein PPA oder infolge einer Ausschreibung der Bundesnetzagentur vergütet werden, ist lediglich das Inbetriebsetzungsdatum, an welchem die fertiggestellte Anlage ans Stromnetz angeschlossen wird, von Bedeutung.

3.3 Betriebs- und Kapitalkosten

Neben den Investitionskosten treten sowohl Betriebs- als auch Kapitalkosten auf. Die Betriebskosten lassen sich in technische, kaufmännische und sonstige Betriebskosten sowie möglicherweise Pachtkosten unterteilen. Die technischen Betriebskosten umfassen die Instandhaltung und das Monitoring der PV-Anlage. Dies beinhaltet unter anderem, die Rückstellungsbildung für einen möglichen Austausch beziehungsweise Reparaturen von Wechselrichtern und Trafos nach Garantieablauf, das Mähen von Rasen, das Monitoring der Anlage, Diebstahlschutz, Pflege der Umzäunung und Zuwegungen sowie die Reinigung der Module. Gerade bei der Aufbereitung und Gewinnung von Steinen- und Erden treten größere Mengen an Staub auf. Bei schwimmenden PV-Anlagen in der Nassgewinnung hingegen sorgt Vogelkot oftmals zu einer Verschmutzung der Solarmodule und damit zu einem Ertragsrückgang. In beiden Fällen ist mit erhöhten Betriebskosten zur Reinigung der Module zu rechnen. Ebenfalls könnten aufgrund von bei der Aufbereitung oder bei der Sprengung entstehenden Vibrationen höhere Wartungskosten anfallen. Je nach Anlagengröße und Wartungsaufwand liegen die technischen Betriebskosten bei 0,3 - 0,7 ct pro kWh.

Die kaufmännischen Betriebskosten fallen mit 0,15 - 0,3 ct pro kWh verhältnismäßig gering aus. Diese Kosten umfassen unter Anderem die Buchhaltung und das Controlling, die Zahlungsabwicklung, die Kommunikation mit dem Energieversorger und Netzbetreiber sowie mit den Finanzierungsgläubigern. Sonstige Betriebskosten umfassen die Kosten für Versicherung, welche bei circa 0,15 ct pro kWh liegen sowie bei EEG-Anlagen ab 100 kWp, welche zur Direktvermarktung verpflichtet sind, circa 0,2 ct Direktvermarktungskosten auf den ins Netz eingespeisten Strom. Falls Flächen für die PV-Anlage angepachtet werden müssen, so sind heutzutage Pachtkosten in der Höhe von 0,2 - 0,3 ct pro kWh realistisch. In Summe ergeben sich so operative Kosten zwischen 0,6 ct pro kWh und 1,45 ct pro kWh zuzüglich Direktvermarktungskosten.

Für die Finanzierung einer PV-Anlage stellen Finanzierer meist auf die gesetzlich oder vertraglich gesicherte Einspeisevergütung ab. Das bedeutet, dass die Ersparnis aus dem Stromeigenverbrauch meist nicht in den für die Finanzierung verwendeten Business-Case mit einfließt. Somit werden dem Projekt nur verhältnismäßig geringe Erlöse zugeschrieben. Folglich kann ein hoher Eigenkapitalanteil von über 30 % notwendig sein. Bei sehr großen PV-Anlagen oder bei PV-Anlagen mit einem hohen PPA, reichen oftmals hingegen Eigenkapitalanteile von weniger als 15 % aus. Zu Beginn des Jahres 2022 sind die Zinskosten für PV-Anlagen gestiegen und können nun mit circa 2 % effektivem Jahreszins angenommen werden. Zwischenfinanzierungen, zum Beispiel während der Bauphase, werden in der Regel mit über 6 % p.a. verzinst. Die Laufzeit der Darlehen beträgt üblicherweise 20 Jahre, wobei das erste halbe oftmals Jahr tilgungsfrei ist.

3.4 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeit einer 1 ha großen PV-Anlage, mit welcher circa 1 Mio. kWh pro Jahr erzeugt werden, wovon 70 % zur Eigenstromversorgung genutzt werden, könnte beispielsweise wie folgt aussehen:

- **Erlöse:** 30 % des Stroms werden über das EEG zu 5 ct (über die Ausschreibung) vergütet. 70 % des Stroms dienen zur Eigenstromversorgung und reduzieren somit die sonstigen Strombeschaffungskosten um 21 ct pro kWh.
- **Investitionskosten:** Die Investitionskosten für die Komponenten und Montage der PV-Anlage liegen bei circa 570 €/kWp beziehungsweise 570 T€. Hinzu kommen Kosten für die Netzverknüpfung, Übergabestation und Trafo in Höhe von 80 €/kWp sowie Kosten für die Projektentwicklung inklusive B-Planverfahren mit sämtlichen Gutachten und Risikoumlage in Höhe von 100 €/kWp. Diese Gesamtkosten liegen in diesem Berechnungsbeispiel damit bei 750 €/kWp beziehungsweise 750 T€ und befinden sich somit preislich im oberen Segment.
- **Betriebskosten:** Die technischen Betriebskosten werden mit 0,6 ct pro kWh, die kaufmännischen mit 0,2 ct pro kWh und die Kosten für die Versicherung mit 0,15 ct pro kWh angesetzt. Zusätzlich werden sonstige Betriebskosten,

zum Beispiel für eine Beteiligung der Gemeinde oder Pachtkosten, in Höhe von 0,2 ct pro kWh angenommen. Die operativen Kosten liegen damit bei 1,15 ct pro kWh.

- **Kapitalkosten:** Es wird von einer Eigenkapitalquote von 30 % ausgegangen. Das Eigenkapital wird nicht als Darlehen gewährt und nicht verzinst. Das Fremdkapital wird über 20 Jahre mit einem Zinssatz von 2 % und linearer Tilgung gewährt. Die Abschreibung erfolgt linear über 20 Jahre.

Das Cashflow Profil des Musterprojekts ist in Abbildung 4 dargestellt:

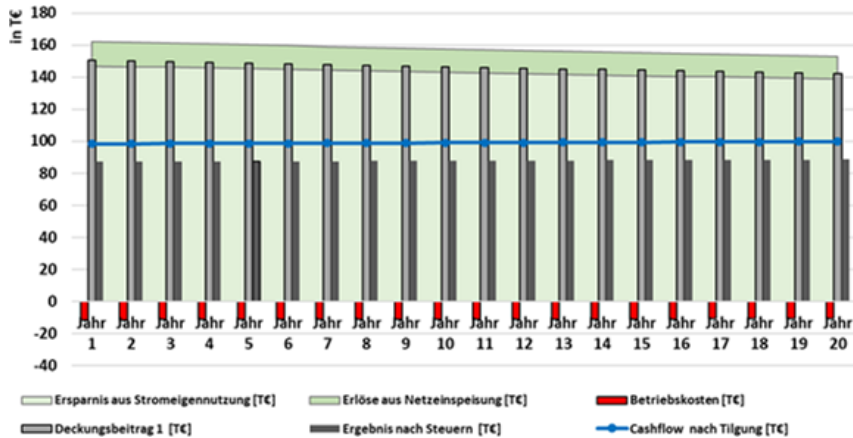


Abbildung 4: Cashflow Profil des Musterprojekts

Durch die hohe Eigenverbrauchsquote und Wertigkeit des eigenverbrauchten Stroms verzeichnet das Projekt durchgehend ein positives Jahresergebnis, trotz hoher Abschreibung. Der Cashflow nach Tilgung beläuft sich bei rund 100 T€ im Jahr und kumuliert über 20 Jahre bei rund 1,98 Millionen € bei einem Kapitaleinsatz von 750 T€, wovon rund 225 T€ Eigenkapital sind. Die durchschnittliche jährliche Eigenkapitalrendite liegt bei rund 44 % und die IRR sogar bei über 48 %. Die Gesamtkapitalrendite liegt bei 13 %.

Würde lediglich die Netzeinspeisung betrachtet werden, so ginge der Jahresumsatz um mehr als 70 % von 162 T€ auf 50 T€ zurück. Dementsprechend würden auch der Cashflow zurückgehen und die IRR läge lediglich bei 1,4 %. In Anbetracht der eher hohen Investitions- und Betriebskosten wäre das Projekt allein auf Basis der EEG-Vergütung nicht wirtschaftlich. Hieraus ist klar anzuleiten, dass die Strom-eigenversorgung wesentlich für die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen ist. Eine Neukonzeptionierung der Fördertechnik hin zu strombasierten Systemen kann nicht nur die Treibhausgasemissionen reduzieren, sondern steigert auch das wirtschaftliche Potential der PV-Anlagen sowie die Unabhängigkeit gegenüber Energie- und Kraftstoffpreisen.

4 Nutzungspotentiale für Erneuerbare Energien in der Fördertechnik

In den stationären Aufbereitungsanlagen der Gewinnungsindustrie kommen im Massentransport nahezu ausschließlich elektrisch betriebene Transportanlagen wie Bandanlagen, Becherwerke, Schneckenförderer, hydraulische oder pneumatische Rohrförderung, et cetera zum Einsatz. Wie vorstehend erläutert kann insbesondere ein hoher anteiliger Eigenverbrauch des durch eine PV-Anlage produzierten Stroms die Wirtschaftlichkeit stark erhöhen. Der Großteil der Steine- und Erden-Betriebe besitzt Jahresproduktionen von 250.000 - 750.000 t und damit je nach Gesteinsart und Produktportfolio einen Strombedarf in Höhe von 1000 - 4000 MWh. Auf einem Hektar Betriebsfläche können rund 1000 MWh Strom produziert werden, so dass ein erhebliches Potential für die Eigenversorgung gegeben ist. Die Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des individuellen Potentials eines aktiven Gewinnungsbetriebes ist Gegenstand eines aktuell beantragten Forschungsvorhabens am Institut für Bergbau. Im Fokus steht insbesondere die zeitabhängige Verfügbarkeit der Flächenbereitstellung ohne eine Beeinträchtigung des Regelbetriebes.

Der Massentransport des Rohstoffs im Gewinnungsbetrieb hingegen wird durch mobile Fahrzeuge mit Dieselantrieb, das heißt Schwerlastkraftwagen (SKW), knickgelenkte Dumper oder schwere LKW dominiert. Eine einfache Umstellung auf einen elektrischen Förderbetrieb ist aktuell nicht möglich, so dass die Nutzung selbst produzierten Stroms ebenso nicht möglich ist.

Bestehende Lösungen für die Umstellung auf einen vollständigen oder auch anteiligen elektrischen Förderbetrieb, zum Beispiel das Trolley Assist System oder In-Pit Crushing and Conveying (IPCC), erfordern über die Investitionen hinaus umfassende Planungen und Änderungen in den Betriebsabläufen.

Darüber hinaus werden Entwicklungen bei alternativen Antriebskonzepten vorangetrieben, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden und nachstehend vorgestellt werden.

4.1 Fahrzeugloser Transport

Die Vermeidung eines Fahrzeugeinsatzes im Massentransport ist nur bei entsprechenden Rahmenbedingungen möglich. Ideale Voraussetzungen für einen fahrzeuglosen Transport bietet der Einsohlenbetrieb. Dies gilt insbesondere für Kies- und Sandbetriebe, da dort die direkte Beschickung von Bandanlagen möglich ist. Im Festgestein ist eine ausreichende Zerkleinerung des gesprengten Rohaufwerks erforderlich, bevor ein Bandtransport erfolgen kann. Die vollständige Vermeidung eines fahrzeuggebundenen Transports erfordert den Einsatz eines mobilen Vorbrechers in Verbindung mit einer Direktbeschickung durch das Ladegerät.



Abbildung 5: Grauwackesteinbruch Koschenberg⁷

Unabhängig von der Festigkeit des Gesteins ist ein Einsohlenbetrieb aus Gründen der Qualitätsverteilung in der Lagerstätte selten möglich. Im Mehrsohlenbetrieb nimmt der Aufwand bei der Bandförderung stark zu, so dass dieser an den meisten Standorten technisch und / oder wirtschaftlich nicht angewendet werden kann. In internationalen Großtagebauen ist jedoch seit einigen Jahren ein Trend zum IPCC erkennbar. Wesentlicher Unterschied zu den eher kleinen Gewinnungsbetrieben in Deutschland ist die Betriebsgröße, die trotz Mehrsohlenbetriebs zum einen den Raum für die gradlinige Installation von Bandanlagen und zugehörigen Rampen bietet und zum anderen eine ausreichende Produktionshöhe für den Einsatz mehrerer Mobilbrecher besitzt. Prominentestes Beispiel ist der Eisenerztagbau S11D des Unternehmens Vale in Brasilien. Für eine zukünftige Jahresförderung von rund 90 Mio. t Eisenerz werden sieben Mobilbrecher von Sandvik und ThyssenKrupp mit Kapazitäten bis zu 2.500 t / h und fast 70 km Bandanlagen eingesetzt. Durch die Vermeidung von rund 100 SKW mit 240 t Nutzlast wird der jährliche Dieselverbrauch um rund 77 % und der Ausstoß von Treibhausgasen um 50 % reduziert. Gleichzeitig besitzt S11D gemäß Angaben von Vale rund 50 % geringere C1-Kosten⁸ als die weiteren Eisenerzprojekte im Konzern.

⁷ Google Earth, Basalt AG

⁸ C1 Kosten: Kosten für Gewinnung, Aufbereitung, Transport zum Hafen ohne Kapitalkosten und Förderzins



Abbildung 6: Eisenerzkomplex S11D der Fa. Vale in Brasilien (in 2017)⁹

4.2 Trolley Assist System

Das Trolley Assist System beinhaltet die Unterstützung eines diesel-elektrischen SKW durch eine externe Stromzufuhr über eine Oberleitung. Grundsätzlich war die Popularität von Trolley Assist Systemen immer direkt an den Öl- und damit Dieselpreis gekoppelt und erlebte eine Hochzeit nach der zweiten Ölkrise. Vor dem Hintergrund der Klimakrise und den damit einhergehenden Bemühungen zur Reduzierung der Emission von Treibhausgasen erlebt das System seit einigen Jahren eine Renaissance. Einfluss hat sicherlich auch weiterhin der volatile Erdölmarkt mit kaum vorhersehbaren Preisentwicklungen. Während die Systeme früher nur durch Drittanbieter wie ABB oder Siemens hergestellt und installiert wurden bieten neuerdings die Fahrzeughersteller selbst diese Systeme im Paket mit Ihren Fahrzeugen an, zum Beispiel seit 2020 Caterpillar und seit 2021 Komatsu.

Vorteilhaft ist die externe Stromversorgung insbesondere für voll beladene SKW auf langen Steigungen. Die Radnabenmotoren werden dann vollständig über die Oberleitung mit Antriebsenergie versorgt, so dass der an Steigungen sehr hohe Dieserverbrauch vermieden wird. Gleichzeitig können bis zu doppelt so hohe Fahrgeschwindigkeiten gegenüber dem diesel-elektrischen Betrieb erreicht werden, so dass eine Erhöhung der stündlichen Transportkapazität eine Reduzierung der Anzahl der SKW möglich ist. Aus diesen Gründen ist das System insbesondere bei sehr großen und tiefen Tagebauen mit einer großen SKW-Flotte interessant.

⁹ Google Earth



Abbildung 7: Trolley Assist System

Grundsätzlich deckte das Angebot der diesel-elektrischen SKW nur die hohen Nutzlastklassen von 200 t und mehr ab, da dort die Vorteile gegenüber einem diesel-mechanischen Antrieb deutlicher sind. Ende 2017 hat Liebherr jedoch mit dem den T 236 den ersten diesel-elektrischen SKW der 100 t Nutzlastklasse vorgestellt, der darüber hinaus auch mit der Option zur Nutzung des Trolley Assist Systems ausgestattet ist. In einem ersten Testeinsatz über eine nur rund 500 m lange Trolley Assist Strecke am Steirischen Erzberg wurde nachgewiesen, dass jährlich rund 82.000 Liter Diesel und damit über 200 t CO₂ gespart werden können. Die mit Oberleitungen ausgestattete Transportstrecke soll in der letzten Ausbaustufe eine Länge von 6,3 km besitzen, so dass der Dieselverbrauch um rund 3 Mio. Liter und die CO₂-Emissionen um über 4.000 t pro Jahr reduziert werden.



Abbildung 8: Liebherr T 284 (360 t Nutzlast)¹⁰, Liebherr T 236 (100 t Nutzlast)¹¹

Mit 100 t Zuladung übersteigt der Liebherr T 236 die in den Betrieben der Steine- und Erden-Industrie übliche Nutzlast im Bereich von 40 - 65 t und ist damit zunächst nur für eine kleine Anzahl von Betrieben mit einer hohen Jahresproduktion und langen Steigungen interessant. Es bleibt abzuwarten, ob diesel-elektrische Antriebe mit Trolley Assist Option zukünftig auch in kleineren Fahrzeugklassen Eingang finden werden. Letztlich hängt die Machbarkeit einer Umstellung auf ein Trolley Assist System von den betrieblichen und technisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab, die individuell geprüft werden müssen.

Unabhängig von der Höhe der Zuladung sind für einen breiteren Einsatz weitere Probleme zu lösen. Aktuelle Systeme besitzen hohe Investitionskosten und sind aufgrund der Art der Installation sehr unflexibel beziehungsweise nur mit sehr hohem Aufwand versetzbar. Ebenso sind die Anforderungen an den Wegebau hoch, um die Trasse jederzeit nutzbar zu halten. Einschränkungen ergeben sich auch durch große Kurvenradien und eine größere Fahrbahnbreite sowie gegebenenfalls erforderliche Zusatzfahrspuren. Diesen und weiteren Problemen wird in der internationalen Forschung nachgegangen, zum Beispiel in der Charge On Innovation Challenge, die durch eine Reihe von großen Bergbaukonzernen und -zulieferern gegründet wurde.

¹⁰ Liebherr-International Deutschland GmbH

¹¹ VA Erzberg GmbH

4.3 Elektro-SKW

Bei den reinen Elektro-SKW handelt es sich meist um Prototypen, die auf Basis von diesel-elektrischen SKW auf einen reinen Batteriebetrieb umgerüstet wurden.



Abbildung 9: eDumper65

Ausnahme bildet der eDumper65, der von der Schweizer Firma eMining AG angeboten wird und seit 2018 in einem Schweizer Kalksteinbruch benutzt wird. Der eDumper65 basiert auf dem Umbau eines (diesel-mechanischen) Komatsu HD605-7 und ist aufgrund der namensgebenden Nutzlast von 65 t interessant für die Steine- und Erden-Industrie. Das neue Antriebssystem kombiniert einen 634 PS starken Synchron-Elektromotor mit einem 4,5 t schweren NMC-Akku¹² mit 710 kWh Kapazität. Durch die Umrüstung ist das Eigengewicht des SKW um 12 t gestiegen, so dass bei beibehaltener Nutzlast das Gesamtgewicht des Fahrzeugs rund 122 t beträgt. Das Drehmoment von bis zu 9.500 Nm wirkt über ein Planetengetriebe auf die Hinterachse und erlaubt analog zu Trolley Assist Systemen hohe Geschwindigkeiten auch auf großen Steigungen.

Die Betriebsdaten des aktuellen Einsatzes mit einer Einsparung von rund 50.000 Liter Diesel und circa 130 t CO₂ sind jedoch nicht einfach übertragbar, da der eDumper65 dort für reine Abwärtsförderung eingesetzt wird. Durch diese idealen Bedingungen ist es möglich, dass das Fahrzeug ein annähernd autarkes System bildet, das bei Lastfahrt bergab durch Rekuperation fast die Energiemenge

¹² Lithium-Ionen-Akkumulator mit Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxiden

erzeugt, die für die anschließende Leerfahrt bergauf benötigt wird. Für eine breite Anwendung, die meist den umgekehrten Fall darstellt, ist das Laden der Akkus in jedem Fall notwendig. Zur Verringerung der durch das Laden entstehenden Ausfallzeiten sollen zukünftig LTO-Akkus¹³ zum Einsatz kommen, da diese schnellladefähig sind. Preise sind nicht veröffentlicht – lediglich in einem Artikel¹⁴ wird qualitativ vom doppelten Kaufpreis gesprochen.

4.4 Hybridsystem mit Wasserstoffbrennstoffzellen und Akkus

Es handelt sich bei Wasserstoff-SKW immer um Hybridsysteme, da die verfügbaren Brennstoffzellen nicht leistungsstark genug sind, um ein schweres Nutzfahrzeug alleinig anzutreiben. Die Elektromotoren des Antriebs werden daher immer parallel auch aus Akkus mit Strom versorgt. Im Englischen werden diese Fahrzeuge als Fuel Cell Electric Vehicle oder kurz FCEV hybrid bezeichnet.

Die aktuell am weitesten vorangeschrittene Entwicklung eines Wasserstoff-SKW wurde durch den Bergbaukonzern Anglo American Ende 2019 gestartet. Der Prototyp basiert auf der Umrüstung eines diesel-elektrischen Komatsu 930E mit einer Nutzlast von 290 t und einer Leistung der Dieselmotor-Generator Einheit von 2 MW. Die bereits für 2021 angekündigten ersten Praxistests im Platintagebau Mogalakwena in Südafrika haben sich durch die COVID19-Pandemie etwas verzögert und sollen nun im Frühjahr 2022 stattfinden. Ziel ist eine kommerzielle Nutzung von 40 umgerüsteten Fahrzeugen ab dem Jahr 2024. Interesse an einer Zusammenarbeit hat auch das Tochterunternehmen Kumba Iron Ore geäußert, das rund 140 Komatsu SKW mit unterschiedlicher Nutzlast von 190 - 290 t in ihren südafrikanischen Eisenerztagebauen Sishen und Komela im Einsatz hat. Komatsu selbst hat erst in 2021 eine eigene Entwicklung angekündigt und zielt auf eine Markteinführung in 2030 ab.

Das Hybridsystem soll mit 2.000 kW Maximalleistung identisch zur ursprünglichen Leistung des Fahrzeugs sein. 800 kW leistet die Brennstoffzelleneinheit, die aus acht Modulen mit je 100 kW¹⁵ besteht. Jedes Modul besitzt Abmessungen von rund 1.200 mm x 900 mm x 500 mm, so dass ein erheblicher Platzbedarf für die Installation besteht. Ebenfalls aus Platzgründen müssen mehrere Wasserstofftanks auf dem Fahrzeug verteilt angebracht und durch Rohrleitungen verbunden werden, die bei 350 bar betrieben werden¹⁶. Maximal 1.200 kW werden durch einen 1,1 MWh Lithium-Ionen Akku¹⁷ bereit gestellt.

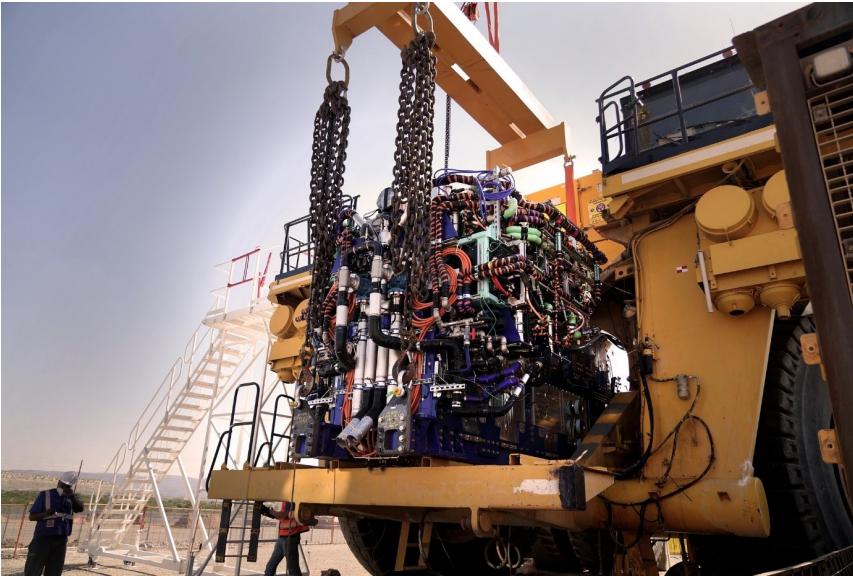
¹³ Lithium-Ionen-Akkumulator mit Lithium-Titanat-Oxid

¹⁴ <https://www.smaveo.de/edumper-das-weltweit-erste-rein-elektrische-grossfahrzeug/>

¹⁵ Ballard FCveloCity®-HD100

¹⁶ NPROXX

¹⁷ Williams Advanced Engineering Limited

Abbildung 10: Wasserstoff-SKW¹⁸

In Ergänzung zu der Umrüstung des SKW selbst sind auch umfangreiche weitere Maßnahmen notwendig und geplant. Zusätzlich zu der Wasserstofftankstelle ist die Errichtung eines 3,5 MW Elektrolyseurs geplant, der rund 1 t Wasserstoff pro Tag herstellen soll. Die hierfür benötigte Energie soll größtenteils durch eine Solaranlage erzeugt werden.

Auch wenn der Entwicklungsstand des Wasserstoff-SKW erkennen lässt, dass bereits in Kürze eine Praxistauglichkeit erreicht werden kann, ist ein Einsatz eines solchen Fahrzeugs in einem Steinbruch nach derzeitigen Stand sehr unwahrscheinlich. Hintergrund ist der enorme Platzbedarf für die Brennstoffzellen und Wasserstofftanks sowie die zusätzlich erforderlichen Akkus, der selbst in großen SKW mit über 200 t Nutzlast nur schwer bereit zu stellen ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Bereits mit der Amtseinführung der neuen Bundesregierung und dem zugrunde liegenden Koalitionsvertrag wurde festgelegt, dass die sogenannte Energiewende hin zu den Erneuerbaren Energien schneller als bisher geplant vollzogen werden soll. Durch die aktuellen Entwicklungen auf den weltweiten Energiemärkten mit Verkappungen und Preisexplosionen, insbesondere ausgelöst durch den Ukrainekrieg, wurde nochmals deutlich, dass eine Reduzierung der Abhängigkeit von Energie und Energierohstoffimporten kurzfristig erfolgen muss. Dies ist mit

¹⁸ Anglo American

einem enormen Aufwand verbunden, denn allein um das Ausbauziel von 200 GW installierter PV-Leistung im Jahr 2030 zu erreichen, muss in den nächsten acht Jahren 2,3-mal so viel Photovoltaik installiert werden wie in den letzten 22 Jahren. Die erforderliche Ausbauquote kann nur erreicht werden, wenn sämtliche Potentiale in allen privaten und industriellen Sektoren in Deutschland genutzt werden. Hierzu zählt auch die Bergbauindustrie, die neben einem hohen elektrischen Energiebedarf meist auch über große Betriebsflächen und damit einem Potential zur Installation von PV-Anlagen verfügt.

Der Großteil der Gewinnungsbetriebe der Steine- und Erden-Industrie besitzt einen Stromverbrauch zwischen 1000 - 4000 MWh, der nahezu vollständig in den Aufbereitungsprozessen mit seinen elektrischen Antrieben entsteht. Gleichzeitig wird die Betriebsfläche oftmals nicht vollflächig permanent genutzt, so dass die Installation von Freiflächen PV-Anlagen möglich erscheint. Bei Nutzung von einem Hektar Betriebsfläche können rund 1000 MWh PV-Strom erzeugt werden. Die Ermittlung einer Methodik zur Bestimmung des Potentials zur Eigennutzung von selbst erzeugtem Strom auf der Betriebsfläche aktiver Gewinnungsbetriebe ist Gegenstand eines aktuellen Forschungsvorhabens am Institut für Bergbau.

Die rund 3.500 Betriebe der Steine- und Erden-Industrie können dazu dienen, nachhaltig über 1 % des gesamten Ausbauziels bis 2045 abzudecken, ohne dass wesentliche Konflikte hinsichtlich konkurrierender Interessen bei der Flächen-nutzung auftreten. Die Flächen der Betriebe der Steine- und Erden-Industrie weisen einige Vorteile für die Errichtung von PV-Anlagen auf. Zum einen weisen die Betriebe einen hohen Strombedarf auf, welcher meist tagsüber und vermehrt in der Sommerzeit anfällt, also genau dann, wenn durch die PV-Anlage Energie erzeugt. Mit einer Anlagengröße von 1 MW lassen sich Eigenverbrauchsquoten von über 70 % erzielen. Angesichts der hohen Strompreise ist die Wertigkeit des erzeugten Stroms in diesem Fall mehr als dreimal so hoch, als es bei einer hundertprozentigen Netzeinspeisung der Fall wäre. Zudem bedingt der hohe Strombedarf, dass ein Netz-Verknüpfungspunkt oft in unmittelbarer Nähe vorliegt und dass oftmals sogar bestehende Trafotechnik mit ausreichender Kapazität zur Verfügung steht. Insofern die Betriebsgenehmigung noch ausreichend lang gültig ist, kann die PV-Anlage direkt als betriebliche Anlage genehmigt werden und ein teures, zeitaufwendiges B-Planverfahren kann umgangen werden. Sollte die Betriebs-genehmigung innerhalb weniger Jahre auslaufen beziehungsweise verlängert werden müssen, wird das B-Planverfahren als genehmigungstechnische Grundlage notwendig sein, um dem Betrieb der PV-Anlage für eine ausreichend lange Zeit, in der Regel 20 Jahre, einem Finanzierer nachzuweisen. Selbst bei verhältnismäßig hohen Investitions- und Betriebskosten können dank der hohen Eigenverbrauchs-quoten Eigenkapitalrenditen von über 40 % und Gesamtkapitalrenditen von über 13 % erzielt werden. Eine derartige Wirtschaftlichkeit ist allerdings nur durch die Eigennutzung des PV-Stroms möglich.

Eine Neukonzeptionierung der Fördertechnik hin zu strombasierten Systemen kann nicht nur die Treibhausgasemissionen reduzieren, sondern steigert auch das wirtschaftliche Potential der PV-Anlagen sowie die Unabhängigkeit gegenüber Energie- und Kraftstoffpreisen.

Eine Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, das heißt insbesondere Dieselkraftstoff, kann zukünftig erreicht werden, indem die Möglichkeiten der elektrisch angetriebenen Fördertechnik in den Gewinnungsbetrieben genutzt werden. IPCC Systeme mit Bandförderung können bereits heute auch in kleineren Gewinnungsbetrieben eingesetzt werden, sofern insbesondere die Charakteristik der Lagerstätte dies erlaubt. Interessant für größere Gewinnungsbetriebe kann aktuell auch das Trolley Assist System sein, da nun auch diesel-elektrisch angetriebene SKW der 100 t Nutzlast Klasse verfügbar sind. Gleiches gilt für serienreife, rein elektrisch angetriebene SKW mit 65 t Nutzlast. In beiden Fällen müssen allerdings die vorherrschenden Betriebsbedingungen kritisch betrachtet werden, da die vorhandenen Praxisbeispiele nicht die Regel darstellen. Die Entwicklung von Hybrid-SKW mit Wasserstoffbrennstoffzellen und Akku steht noch am Anfang. Erste Prototypen wurden entwickelt und sollen in Kürze Praxistests durchlaufen. Aufgrund der Baugröße von Brennstoffzellen scheint die Entwicklung aktuell auf sehr hohe Nutzlastklassen beschränkt zu sein und ein Einsatz in der Steine- und Erden-Industrie damit wenig wahrscheinlich.

Ergänzend Potentialschätzung der Erzeugung von Solarstrom in aktiven Gewinnungsbetrieben der Steine- und Erden-Industrie soll nachgeschaltet das Potential zur dezentralen Erzeugung von grünem Wasserstoff in einem zweiten Forschungsprojekt ermittelt werden. Aufgrund der dafür benötigten Energiemengen in Höhe von 33,3 MWh pro Tonne Wasserstoff ist hier die Kombination mit Windenergie erforderlich, um an einem Standort in Deutschland eine ausreichende Produktionskapazität zu erreichen. Damit einhergehend ergeben sich andere Konfliktpotentiale sowie raumordnerische und genehmigungsrechtliche Fragestellungen.

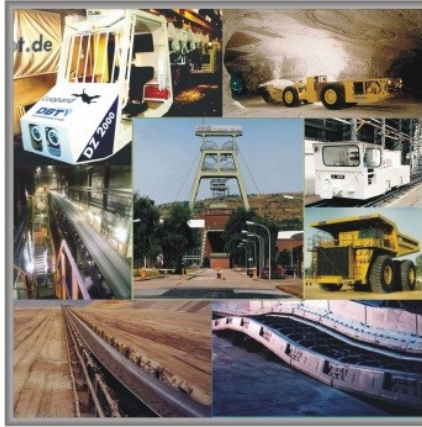
Dr. Constantin Weigel
cweigel@glc-group.com

GLC Glücksburg Consulting AG
ARELIA-Haus
Albert-Einstein-Ring 5
22761 Hamburg

Thomas Hardebusch
thomas.hardebusch@tu-clausthal.de

TU Clausthal
Institut für Bergbau
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld

Chronik der Fachtagung



- | | |
|---------------------|---|
| 28. - 29.01.2004 | 1. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 25. - 26.01.2006 | 2. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 23. - 24.01.2008 | 3. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 27. - 28.01.2010 | 4. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 18. - 19.01.2012 | 5. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 22. - 23.01.2014 | 6. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 20. - 21.01.2016 | 7. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 31.01. - 01.02.2018 | 8. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 05. - 06.02.2020 | 9. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |
| 26. - 27.04.2022 | 10. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau“ |