



OTTO-VON-GUERICKE-
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

**INNOVATIONEN
NACHHALTIGKEIT
TRENDS
EFFIZIENZ
LEBENSDAUER**

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik Magdeburg

20. und 21. September 2023



Institut für
Logistik und Materialflusstechnik

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

am 20. und 21. September 2023 in Magdeburg

Eine Veranstaltung von:



Technische Universität München
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)



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



IBAF Engineering GmbH

in fachlicher Trägerschaft
des VDI-Fachausschusses 307 Schüttgut-Fördertechnik



Gesellschaft Produktion und Logistik
Fachausschuss 307

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Herausgegeben als Begleitband zur gleichnamigen Fachtagung
am 20. und 21. September 2023 in Magdeburg

Herausgeber:

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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

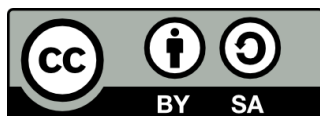
ISBN: 978-3-948749-29-3

DOI: <http://dx.doi.org/10.25673/97279>

Alle Rechte vorbehalten.

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Lizenz:



© 09/2023 Institut für Logistik und Materialflusstechnik
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Umschlaggestaltung: Arnhild Gerecke

Druck: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

Inhaltsverzeichnis	Seite
<i>S. Kessler, M. Ajmal, T. Frenz, Y. Tan, J. Fottner</i>	
Agrarstoff Hopfen als Schüttgut – DEM- und CFD-gestützte Konstruktion eines energieeffizienten Hopfen-Durchlaufrockners.....	5
<i>C. Coetzee</i>	
DEM calibration and modelling of a newly designed centrifugal fertiliser spreader.....	23
<i>C. Richter, F. Will</i>	
Ersatzmodell-gestützte globale Kalibrierung – Ein neuer Ansatz zur Parameterwertbestimmung für die Diskrete-Elemente-Methode.....	37
<i>R. Kamps, R. Baumann, A. Blaas, M. Grossmann, P. Traxel</i>	
Intelligentes Fördersystem für gezielte und schonende Förderung von empfindlichen Schüttgutteilen in Montagelinien (DLBS Dynamic Learning Bulk System)	53
<i>W. Buchhorn</i>	
AUTOSTABLE conveyor belts with unique self-centering mechanism – reliable solution against off-tracking.....	67
<i>D. Brown</i>	
High Energy Polyester als Alternative für Textil-Fördergurte.....	75
<i>D. Kalinski, C. Jongkind</i>	
Flammwidrige und selbstverlöschende Fördergurte.....	85
<i>M. Mehlhorn, R. Lenz</i>	
Funkenlöschanlagen – nachhaltige Instandsetzung durch intelligente Sensorik.....	95
<i>R. Schneider, T. Fritsch, S. HERNSCHIER, J. Magister, D. Täschner, S. Simon</i>	
Methode zur zustandsbezogenen Instandhaltung auf Grundlage von Schallmessungen am Beispiel ausgewählter Gurtförderanlagen.....	107
<i>Y. Redka</i>	
xForce – Weiterentwicklung einer konventionellen Tragrolle.....	123

<i>J. Hagenau</i> RULMECA® - Monitoring System (RMS): Zustandsüberwachung – Datenerhebung – Auswertung beim Betrieb von Trommelmotoren.....	133
<i>H. Otto, S. Wellnhofer, S. Holz, A. Katterfeld</i> Materialflussanalyse zur simulativen Abbildung der Gewinnungsstrecke eines Bergwerks.....	145
<i>A. Hanke</i> Abstreifer mit integrierter Gurtschadendetektion und digitaler Schnittstelle.....	155
<i>T. Frech</i> Effizienzsteigerungen im Betrieb von Förderanlagen – von Fördergurtabstreifern zu digitalem Servicemanagement und frühzeitiger Schadenserkennung.....	171
<i>J. Zahn</i> Digitale Fernüberwachung von Bandreinigungssystemen – Produktivität steigern und Schäden vermeiden dank geplanter Instandhaltung.....	185
<i>W. Dünnwald</i> Wertschätzung am laufenden Band.....	191
<i>N. Stamm</i> Automatisierungsprojekte und Assistenzsysteme zur Effizienzsteigerung des Bunker- und Großgerätebetriebs in den Tagebauen der RWE Power AG.....	199
<i>O. Jakobs, J. Pierre</i> 3D-Bestandserfassung, Visualisierung und Erkennung von Materialanbackungen in Silos.....	207
VDI-Richtlinien zur Schüttgutfördertechnik.....	219

Ankündigung:

28. Fachtagung Schüttgutfördertechnik

18. und 19. September 2024

Technische Universität München

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Agrarstoff Hopfen als Schüttgut DEM- und CFD-gestützte Konstruktion eines energieeffizienten Hopfen-Durchlauftrockners

Stephan Kessler
Mohsin Ajmal
Thorsten Frenz
Yuan Tan
Johannes Fottner



fml - Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München



Lehrstuhl für
Förder- und Materialflusstechnik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg

Veröffentlichungsgenehmigung nicht erteilt.

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

DEM calibration and modelling of a newly designed centrifugal fertiliser spreader

Corné Coetzee



Prof. Corné Coetzee
Department of Mechanical & Mechatronic
Engineering
Stellenbosch University
Stellenbosch
7600
South Africa

DEM calibration and modelling of a newly designed centrifugal fertiliser spreader

Granular fertiliser is often spread over agricultural fields using a centrifugal spreader. The spreader consists of a bin, feeding conveyor and two counter-rotating disks. In this study, a local manufacturer designed a new spreader and needed to determine the influence of a number of settings on the spread pattern and density. Field tests are time consuming and expensive, and therefore a Discrete Element Model (DEM) was developed. Laboratory experiments were used to measure the particle properties, and a single field test was used to further calibrate the model. Settings included the following: feed rate, disk speed, fertiliser drop position on the disk, disk vane angle, height above ground, tractor speed, and wind speed. Based on these results, the correct settings can be chosen for specific applications.

1 Introduction

Centrifugal fertiliser spreaders are used by farmers worldwide, and in Europe, they are used for over 90% of all fertilisers applied [1]. These spreaders have the advantage of low cost and maintenance, and large working widths [2]. A disadvantage is the sensitivity of the spread pattern to variations in equipment setup, fertiliser characteristics and wind. Since 1950, the worldwide fertiliser consumption increased from 14 to 143 million tonnes per annum, and it is estimated that it will reach 199 million tonnes by 2030 [3].

Spread patterns can be measured by placing a row of collecting trays in the field. This is the most realistic method to measure the spread patterns, but it has several drawbacks [2]. Conditions such as wind and humidity and other field conditions cannot be controlled which make it difficult to carry out comparative studies, and large amounts of fertiliser are needed.

The discrete element method (DEM) has been used to model centrifugal fertiliser spreaders [1-3]. Close agreement between experimental and DEM results can be achieved, and it is concluded that DEM provides a powerful instrument for the analysis and development of new spreader designs [1,4].

2 Materials and methods

The measured fertiliser properties, the spreader design and settings, and the implementation of the DEM model are discussed.

2.1 Fertiliser

Urea, which consists of 46% nitrogen, was used. Due to its low density, it is more difficult to spread and more affected by wind. Thus, as a worst-case scenario, it is often used for testing and calibration of fertiliser spreaders [5]. The particle size distribution was measured using a screening device (Figure 1a) and 60% of the particles had a size of 2.00 mm to 3.30 mm and 40% had a size of 3.00 mm to 4.75 mm. The particles were not perfect spheres but mostly round in shape without any sharp edges. As such, the particles could be approximated as spheres in the DEM model.

The bulk density of 740 kg/m³ was measured by filling a container, Figure 1(b). A sample of 100 particles was weighed, and using the average size of 3.2 mm, the particle density was

calculated as 1327.3 kg/m^3 . Literature reports similar values for the solid density for urea ranging from 1297 kg/m^3 to 1337 kg/m^3 [6-8].

The coefficient of sliding friction between the particles and wall materials was measured on an inclined plane, Figure 2. This was done by gluing particles to a rigid plate, placing it face down onto the wall material and inclining the plane until the plate started to slide. The experiment was repeated 16 times and the friction with stainless steel was 0.32 ± 0.03 and with Acrylic 0.41 ± 0.02 . Literature reports a value for the coefficient of friction between urea and galvanised steel as 0.52 [9], and between urea and painted steel as 0.50 to 0.57 [8]. The coefficient of friction of various other fertiliser products on stainless steel varies between 0.27 and 0.52 [10-11].



Figure 1: Measurement of (a) the particle size distribution and (b) the bulk density

The coefficient of restitution was measured by dropping particles onto a sample of the wall material and measuring the rebound height using high speed images. The test was repeated 16 times and the coefficient with stainless steel was 0.33 ± 0.06 and with Acrylic 0.61 ± 0.06 . Literature reports a value for the coefficient of restitution between urea and stainless steel as ranging from 0.18 to 0.30 and between urea and Nylon as ranging from 0.3 to 0.6 [10].

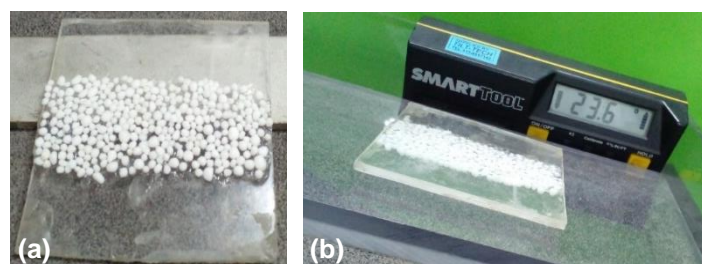


Figure 2: Measurement of the particle-wall coefficient of sliding friction by (a) gluing particles to a plate and (b) inclining the plane until the plate starts to slide

2.2 Spreader configuration

Figure 3 shows the spreader tested, and the CAD model of the rear end is shown in Figure 4. The double chain conveyor feeds the material through a gate of which the height can be set (not shown) into a split hopper (blue component in Figure 4) where the stream of material is split into two and onto the rotating disks.



Figure 3: The fertiliser spreader

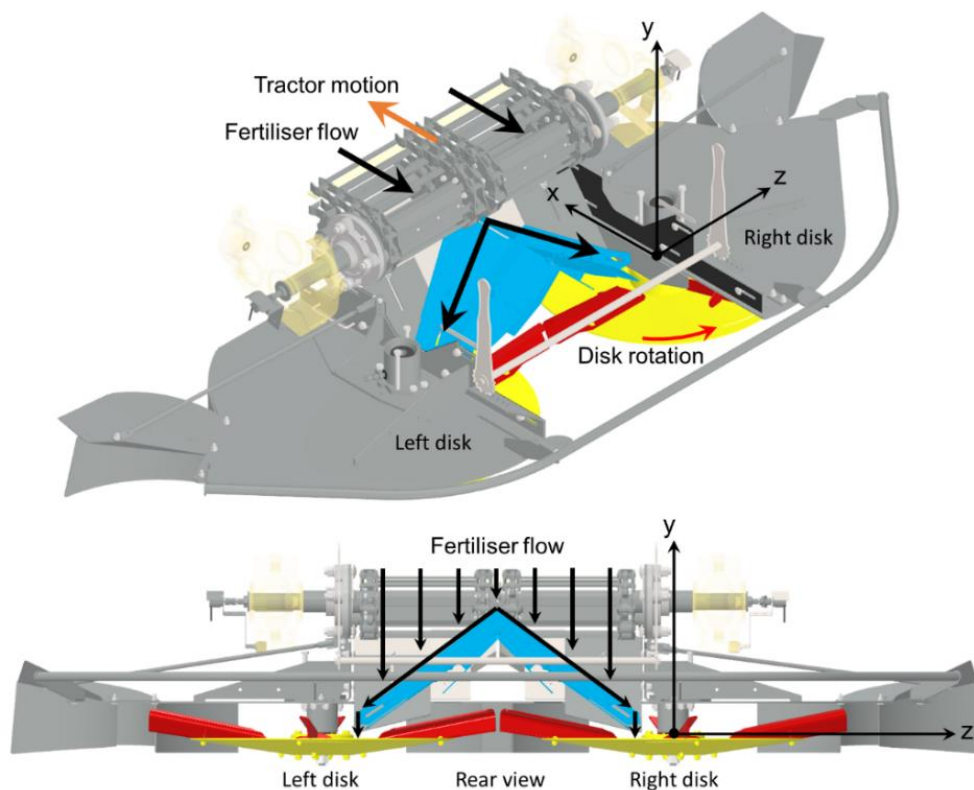


Figure 4: CAD model of an isometric view (top) and rear end view (bottom) of the spreader

2.3 Spreader settings and the DEM model

The fertiliser feed rate is set on the actual spreader by selecting the conveyor speed and the opening height of the gate. In DEM, a particle inlet was created above the disk in the position where the conveyor drops the fertiliser. From the inlet, the material dropped down onto the hopper and flowed towards the drop point and onto the disk, Figure 5.

In order to closely model the flow of fertiliser onto the disk, both the inlet flow rate \dot{m}_i (kg/s) and the vertical speed V_{drop} (m/s) with which it dropped onto the disk, were matched with that of the actual spreader. The flow rate \dot{m}_i was specified based on the fertiliser application rate (kg/ha), and the drop velocity was measured using high speed images and particle image velocimetry (PIV) as shown in Figure 6. The drop velocity was measured across the

conveyor width which feeds one of the disks, and ranged from approximately $V_{\text{drop}} = 0.85$ m/s to 1.15 m/s. An average value of $V_{\text{drop}} = 1$ m/s was used in the model.

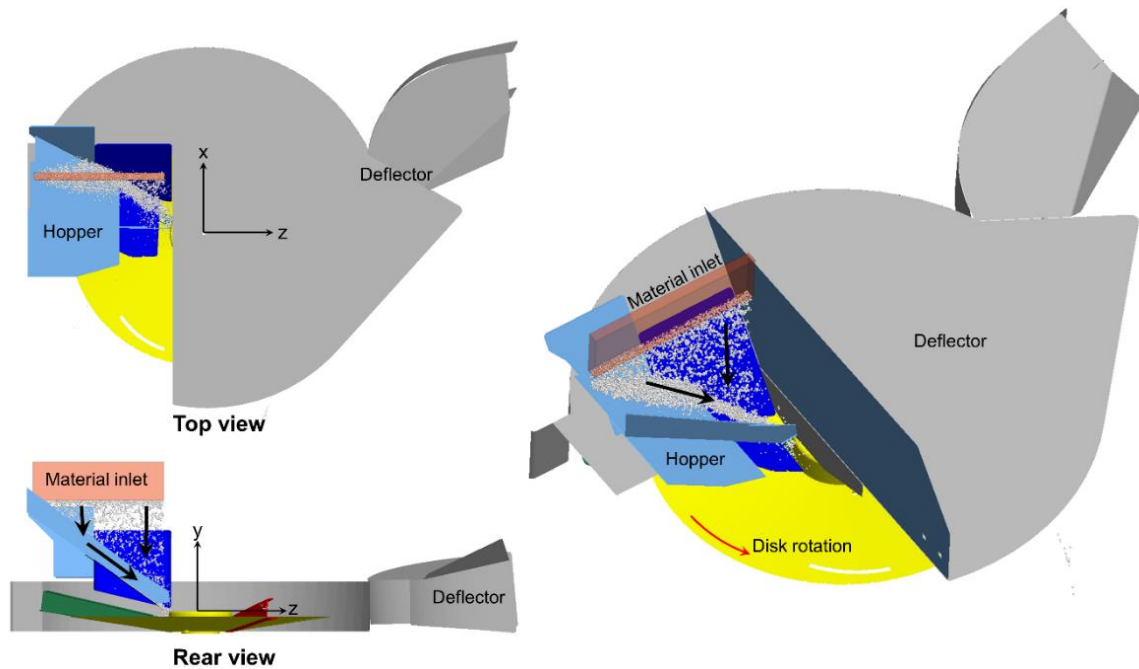


Figure 5: DEM model of the righthand disk

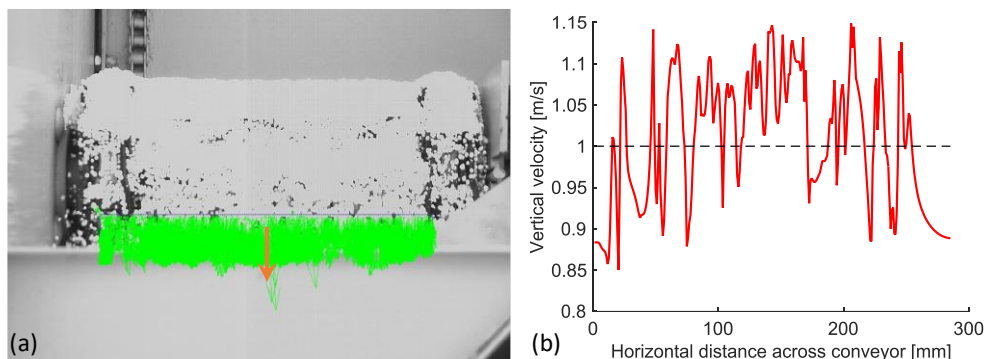


Figure 6: (a) Measuring the speed at which particles dropped onto the disk using PIV, and (b) the vertical (drop) velocity plotted across the conveyor width

The position where the fertiliser is dropped onto the disk, was adjusted in the forward direction (x-direction or the direction of tractor motion) and the lateral direction (z-direction or sideways direction) as shown in Figure 7. Two settings were used in the sideways direction with the dimension shown in Figure 7, and six settings in the forward direction, ranging from 60 mm to 85 mm with increments of 5 mm. Figure 8 shows the arrangement of the two vanes on the disk. One radial longer vane and a shorter vane of which the angle could be adjusted, ranging from 0° to 30° with increments of 10° as defined in Figure 8.

2.4 Postprocessing of DEM results

Due to symmetry, only a single disk was modelled in DEM and the results mirrored around the centre plane. A domain was specified around the disk, as shown in Figure 9. When particles reached the domain boundary, their position vector, velocity vector, mass and radius were stored, and the particle subsequently deleted to keep the total number of particles in the model at any given stage to a minimum.

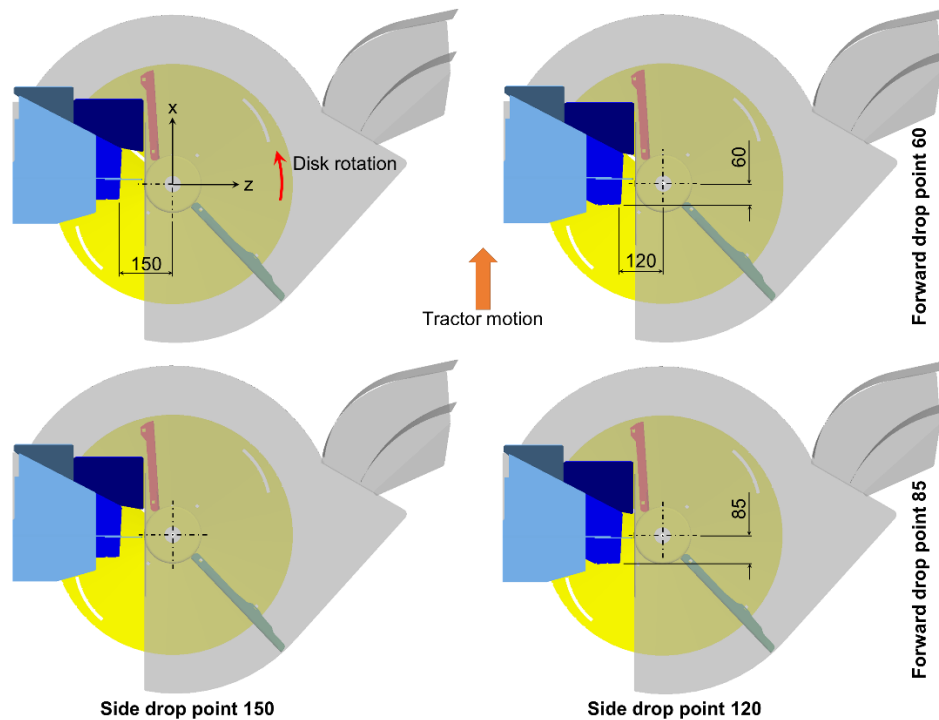


Figure 7: Adjustments to the position of the fertiliser drop point

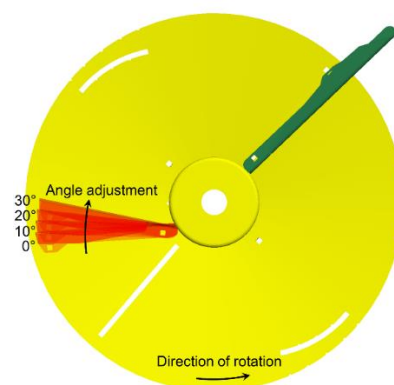


Figure 8: The change in angle of the short vane showing the superimposed positions

In a postprocessing step, the stored particle data was imported into Matlab. The first step was to include the second disk by mirroring the data around the centre plane of the spreader. The forward velocity of the tractor was added to the particle (start) velocity, the effect of wind was included, and the particle trajectory solved until it hit the ground [12].

As an example, Figure 10 shows the completed trajectory for a specific case where the tractor and the wind velocity vectors are indicated. The particle distribution is different for a head and tail wind, and the trajectories were calculated for each case.

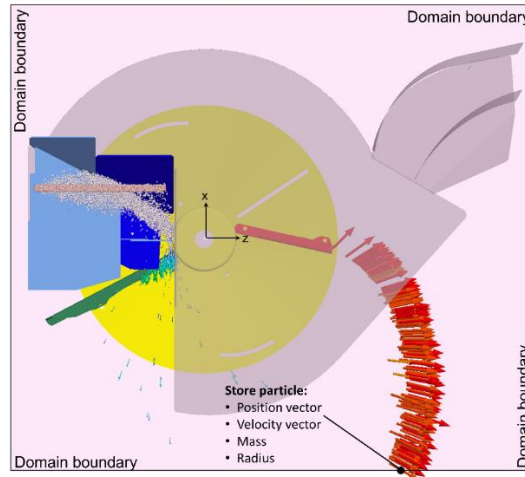


Figure 9: Model domain with particles deleted on the boundary and the data stored

The landing position of the particles was then allocated to bins (0.5 m by 0.5 m) which covered the whole landing area. This was used to produce the stationary distribution pattern (left of Figure 11) for the tractor moving downwind and upwind respectively. To simulate the tractor motion, the density plot was shifted in the direction of tractor motion while accumulating the mass in each bin, resulting in the moving distribution patterns (centre of Figure 11). Then, taking a transverse line in the centre of the moving pattern, resulted in the transverse distribution density as shown on the right of Figure 11.

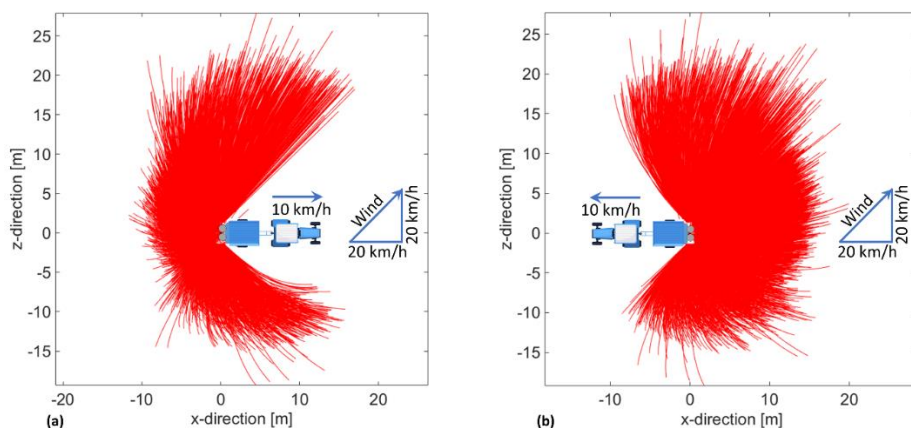


Figure 10: Completing the particle trajectory for (a) the tractor moving downwind and (b) upwind

To cover a large area of land, the tractor makes a number of passes with the distance between subsequent passes called the bout width. Ideally the bout width should be as large as possible to reduce the number of passes while evenly distributing the fertiliser. This is illustrated in Figure 12 (a) where a total of five passes (three downwind and two upwind) with a bout width of 22 m was used. Accumulating the overlaid distributions, results in the distribution shown in Figure 12 (b), and ignoring the outer edges, the mean density ρ_m

(kg/ha) and the standard deviation σ_ρ can be calculated. The coefficient of variation $COV = \sigma_\rho / \rho_m$ should be kept below 15% for an even and acceptable distribution [5].

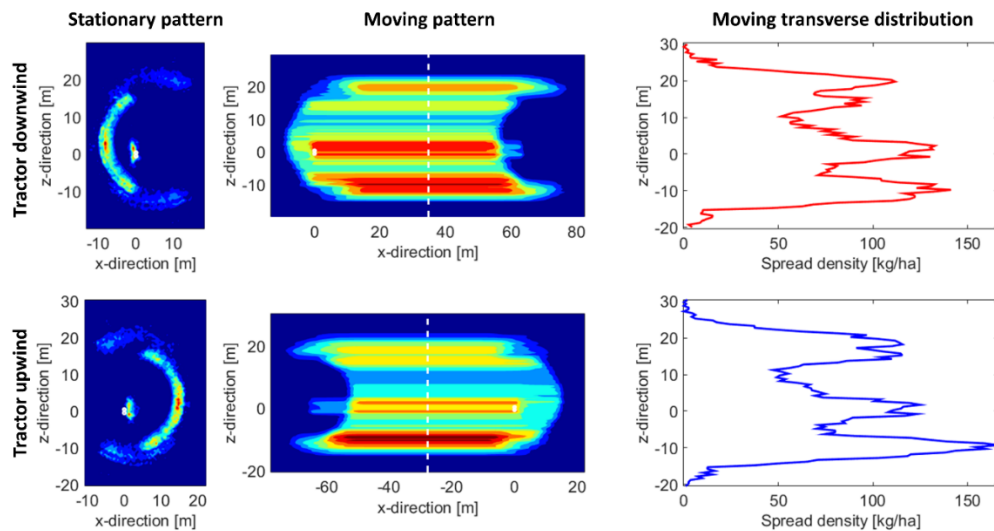


Figure 11: From left to right: the stationary spread pattern, moving pattern and transverse distribution; top row: the tractor moving downwind and bottom row upwind

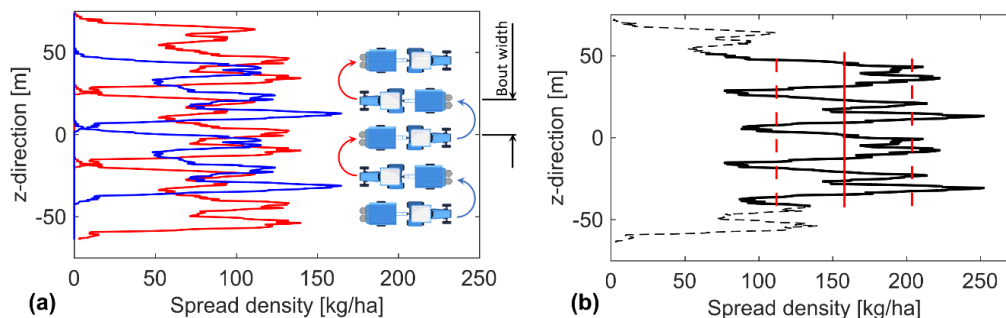


Figure 12: (a) Multiple tractor passes at a bout width of 22 m and (b) the resultant distribution

By varying the bout width, the optimal value can be determined as shown in Figure 13 (a). Here, the lowest $COV = 14.6\%$ is obtained with a bout width of 19 m. For this optimal bout width, the spread density is 189 kg/ha (Figure 13 (b)). Based on these two graphs, the bout width which produces an even distribution with an acceptable application rate can be chosen. However, when a head or tail wind is present, the distribution can be different as shown in this example. It is possible that the true optimal bout width should be different for when the tractor is moving upwind or downwind. This is illustrated in Figure 14 where the bout width for each direction was varied independently, resulting in a contour plot for the COV and density, respectively. In this example, the optimum bout width is 18 m in the downwind direction and 19 m in the upward direction with $COV = 14.1\%$ (red dots in Figure 14). The grey highlighted regions in Figure 14 indicate the range of bout widths for which $COV \leq 15\%$. Again, using both graphs in combination, the best bout widths can be selected for a uniform distribution and the required application density.

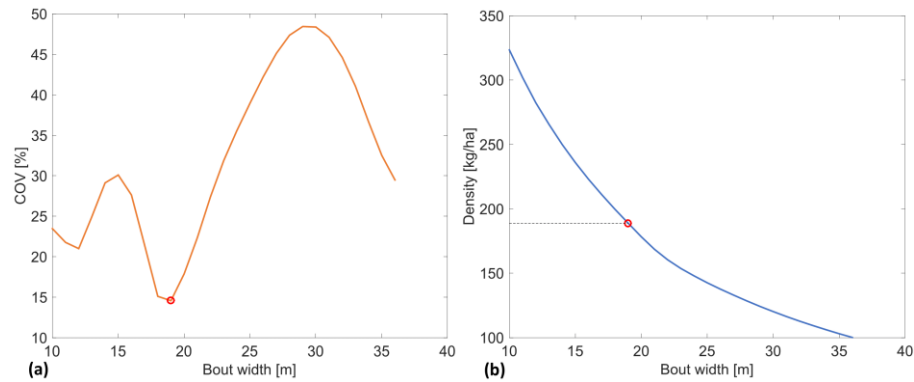


Figure 13: The COV (a) and spread density (b) as a function of the bout width

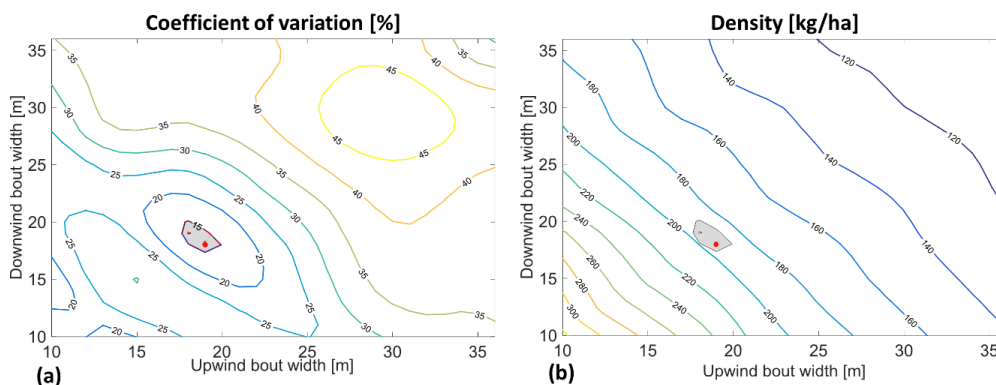


Figure 14: The COV (a) and spread density (b) as function of upwind and downwind bout widths

3 Model calibration

A draw down test and high-speed images from a field test were used to calibrate the model.

3.1 Draw Down Test

The draw down test has been established as a suitable calibration experiment for the sliding and rolling coefficients of friction between particles [13-14]. The upper compartment was filled with material, the trapdoor opened, and the material allowed to flow into the lower compartment, Figure 15 (a). The same procedure was used in the model (Figure 15(b)) while varying the coefficient of sliding friction μ_s^{pp} from 0.1 to 0.9 and the coefficient of rolling friction μ_r^{pp} from 0 to 0.25. Contour plots of the resultant lower angle of repose (Figure 15(c)) and upper shear angle (Figure 15(d)) were generated, and by superimposing this, the calibration point could be identified as $\mu_s^{pp} = 0.65$ and $\mu_r^{pp} = 0.15$ (Figure 15 (e)).

3.2 Field test

The coefficient of sliding friction is velocity dependent, especially at high speeds. With a disk rotation speed up to 900 rpm, the tangential velocity at the vane tip can be up to 42 m/s. In theory, with zero friction the radial velocity of a particle travelling along a straight radial vane on a flat disk is equal to the tangential velocity [15]. Thus, the particle can theoretically have a velocity magnitude of up to 59 m/s (213 km/h).

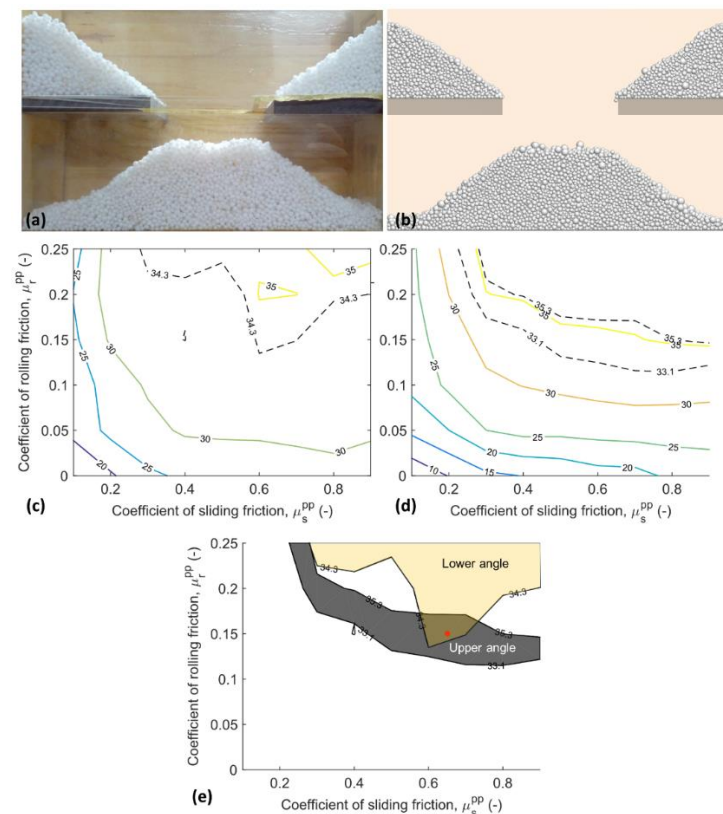


Figure 15: The draw down experiment (a), calibrated model (b), lower (c) and upper (d) angle contours and (e) and the superimposed contours with the calibration point

The particle-wall coefficient of sliding friction was measured on an inclined plane, but here the sliding velocity is relatively low (< 1 m/s). Thus, a field test was conducted and high-speed images were used to measure the velocity of the particles at the tip of the short vane as shown in Figure 16. The disk speed was set to 850 rpm and the short vane at an angle of 20° (Figure 8). The particle velocity magnitude and angle relative to the vane were measured, and the particle-wall coefficient of sliding friction adjusted until satisfactory results were obtained. The velocity ranged from approximately 33 m/s to 38 m/s while the angle ranged from 32° to 37° . The final value of the sliding friction was set to $\mu_s^{pw} = 0.18$, which is significantly lower than the value of 0.32 measured on the inclined plane.

Lastly, a field spread test was conducted to measure the distribution using a single set of variables: the tractor speed was set to 10 km/h, the wind was zero, the fertiliser feed rate 0.5 kg/s (on a single disk), the disk speed 800 rpm, the short vane angle 30° , the height above the ground 1000 mm, the forward drop position 85 mm and the side drop position 120 mm (Figure 7).

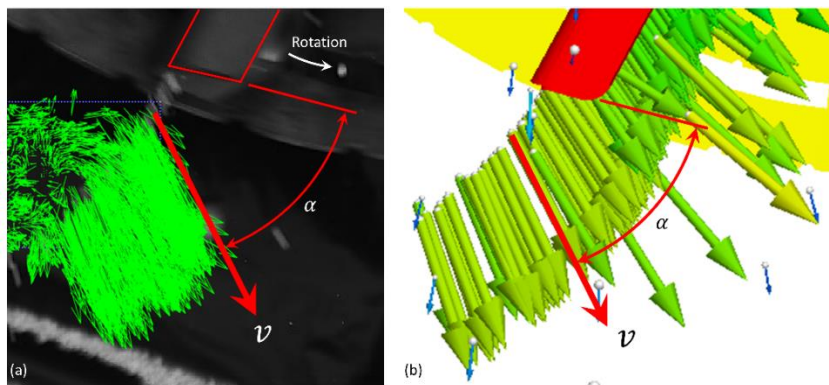


Figure 16: Particle velocity at vane tip in the field test (a), and the corresponding DEM model (b)

Collection trays (0.5 m by 0.5 m) were positioned along a single transverse line to measure the distribution at a resolution of 1 m as the tractor moved passed. The same settings were used in the model and only the drag coefficient C_d varied. Comparing the predicted moving transverse distribution (defined in Figure 11) to the measured data, the correlation coefficient R^2 was calculated for each change in the drag coefficient, ranging from $C_d = 0.34$ to 0.64 with increments of 0.1 (that of a perfect sphere is 0.44). Using $C_d = 0.54$ resulted in the closest fit with $R^2 = 0.90$, of which the result is plotted in Figure 17. Cool et al. [16] measured the drag coefficient of fertiliser particles and found the value to range from 0.46 to 0.67 with an average of 0.59.

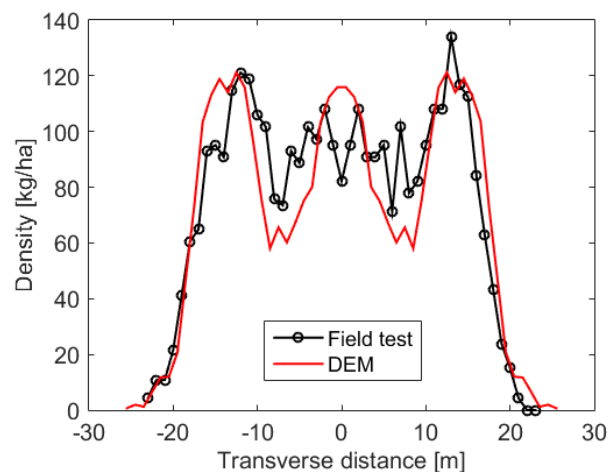


Figure 17: Comparison of transverse distributions from field measurements and the DEM model

The final calibrated parameter set and material properties are summarised in Table 1.

Table 1: Calibrated parameter set and material properties

Parameter	Value
Particle size	2.00 mm – 4.75 mm
Particle density	1327.3 kg/m ³
Bulk density	740 kg/m ³
Particle-wall coefficient of sliding friction	0.18 (stainless steel disk)
Particle-wall coefficient of rolling friction	0
Particle-wall coefficient of restitution	0.33 (stainless steel disk)
Particle-wall stiffness (linear model)	10 kN/m (stainless steel disk)
Particle-particle coefficient of sliding friction	0.65
Particle-particle coefficient of rolling friction	0.15
Particle-particle coefficient of restitution	0.60
Particle-particle stiffness (linear model)	1 kN/m

Summary

A DEM model of a centrifugal fertiliser spreader was successfully developed. The model includes one of the two symmetric spinning disks and accurately introduces the particles into the model considering the mass flow rate and the inlet velocity. In the DEM model the particles are deleted at the domain boundary and their data stored for postprocessing in Matlab. During postprocessing, the tractor speed, wind velocity vector, and the height above the ground are considered and the trajectory of each particle completed. Symmetry conditions are applied, and the transverse distribution is calculated, from which the optimum bout width and application rates can be calculated. The DEM parameters were calibrated using a draw down test for particle-particle coefficients of friction, and a field test was used to calibrate the particle-wall (disk) sliding friction and the particle drag coefficient.

In the next phase of this project, 576 different setting combinations will be modelled to identify the most suitable settings for specific applications:

1. Disk rotation speed: 750 rpm, 800 rpm, 850 rpm and 900 rpm (4 models).
2. Feed rate: 100 kg/ha, 200 kg/ha and 300 kg/ha (3 models).
3. Forward drop point: 60 mm, 65 mm, 70 mm, 75 mm, 80 mm, and 85 mm (6 models).
4. The side drop point: 120 mm and 150 mm (2 models).
5. The short vane angle: 0°, 10°, 20° and 30° (4 models).

Thereafter, for a selection of the above combinations, postprocessing in Matlab will account for the tractor speed ranging from 0 km/h to 20 km/h, a cross and head wind ranging from 0 km/h to 20 km/h, and a height above the ground of 800 mm to 1200 mm.

References:

- [1] Van Liedekerke, P., Tijssens, E., Dintwa, E., Rioual, F., Vangeyte, H.: DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader, *Powder Technology*, 2009, 190, 348-360
- [2] Van Liedekerke, P., Piron, E., Vangeyte, J., Villette, S., Ramon, H., Tijssens, E.: Recent results of experimentation and DEM modelling of centrifugal fertilizer spreading, *Granular Matter*, 2008, 10(4), 247-255
- [3] Van Liedekerke, P.: Study of the granular fertilizers and the centrifugal spreader

- using Discrete Element Method (DEM) simulations. Phd Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, 2007
- [4] Coetzee, C.J., Lombard, S.G.: Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader, *Biosystems Engineering*, 2011, 109, 308-325
- [5] Precise application of fertiliser, The Fertilizer Association of Ireland in association with Teagasc, Technical Bulletin Series, 3, May 2017
- [6] Antille, D.L., Gallar, L., Miller, P.C.H., Godwin, R.J.: An investigation into the fertilizer particle dynamics off-the-disc, *Applied Engineering in Agriculture*, 2015, 31, 49-60
- [7] Morsy, H.A., Paliwal, J., Abouelmagd, A., Hedia, H., Ismail, Z.: Some properties of fertilizers in relation to particle motion in the hopper and on the distributor disc, The 19th Annual Conference of the Misr Soc. of Ag. Eng., 14-15 November, 2012
- [8] Cheng, B., He, R., Xu, Y., Zhang, X.: Simulation analysis and test of pneumatic distribution fertilizer discharge system, *Agronomy*, 2022, 12, 2282
- [9] Mosey, E.B., Hilts, S.: Friction properties of fertilizers, *Cabadian Agricultural Engineering*, 1985, 27, 2, 79-84
- [10] Hofstee, J.W.: Handling and spreading of fertilizers: Part 2, Physical properties of fertilizer, measuring methods and data, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1992, 53, 141-162
- [11] Fahui, Y., Hanwen, Y., Lin, W., Yinyan, S., Xiaochan, W., Hui, L.: Calibration and test of discrete element method (DEM) for compound fertilizer particles in mechanized variable-rate application, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2549359/v1>
- [12] Cool, S.R., Pieters, J.G., Van Acker, J., Van Den Bulcke, J., Mertens, K.C., Nuyttens, D.R.E., Van De Gucht, T.C., Vangeyte, J.: Determining the effect of wind on the ballistic flight of fertiliser particles, *Biosystems Engineering*, 2016, 151, 425-434
- [13] Roessler, T., Richter, C., Katterfeld, A., Will, F.: Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations, *Powder Technology*, 2019, 343, 803–812
- [14] Coetzee, C.: Calibration of the discrete element method: Strategies for spherical and non-spherical particles, *Powder Technology*, 2020, 364, 851–878
- [15] Grift, T.E., Kweon, G., Hofstee, J.W., Piron, E., Vilette, S.: Dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles, *Biosystems Engineering*, 2006, 95, 507-515
- [16] Cool, S., Mertens, K.C., Van De Gucht, T., Vangeyte, J.: Determining the drag coefficient of fertilizer grains using stereovision, *International Conference of Agricultural Engineering*, 6-10 July 2014, Zurich

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Ersatzmodell-gestützte globale Kalibrierung – Ein neuer Ansatz zur Parameterwertbestimmung für die Diskrete-Elemente-Methode

Christian Richter

Frank Will



Dr.-Ing. Christian Richter (Referent)
Technische Universität Dresden
Professur für Baumaschinen
01062 Dresden

Ersatzmodell-gestützte globale Kalibrierung – Ein neuer Ansatz zur Parameterwertbestimmung für die Diskrete-Elemente-Methode

Eine besondere Herausforderung bei der Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode stellt die Parameterwertbestimmung für die Kontaktmodelle dar, welche das Interaktionsverhalten der Partikel definieren. Das Bestimmen und Einstellen der Parameterwerte wird auch als Kalibrierung bezeichnet. Der Beitrag präsentiert eine neue effiziente Kalibriermethodik, welche als „Ersatzmodell-gestützte globale Kalibrierung“ bezeichnet wird. Diese nutzt Ersatzmodelle um das Schüttgutverhalten respektive die Reaktionsgrößen zu einem vorgegebenen Parametersatz zu prognostizieren. Die Notwendigkeit zum Einsatz von Simulationen im Rahmen der Parameterwertbestimmung entfällt hiermit vollständig.

1 Einleitung

Eine der größten Herausforderungen bei der Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode ist die Parameterwertbestimmung für die Kontaktmodellparameter. Diese haben einen maßgeblichen Einfluss auf das simulierte Materialverhalten und müssen daher exakt eingestellt werden. Nur bei richtiger Wahl der entsprechenden Werte ist es möglich, Schüttgüter realitätsnah abzubilden und valide Simulationsergebnisse zu produzieren. Da nahezu jedes reale Schüttgut andere Eigenschaften besitzt, ist es notwendig, die Parameterwerte immer wieder neu zu bestimmen.

Eine gängige Methode zur Parameterwertbestimmung ist die sogenannte Kalibrierung. Hierbei werden die Parameterwerte iterativ so lange angepasst, bis das simulierte Materialverhalten hinreichend genau dem Verhalten des betrachteten Schüttguts im Experiment entspricht. Zur Identifikation eines geeigneten Parametersatzes bedarf es in der Regel einer Vielzahl an Iterationen bzw. Simulationen. In Anbetracht der Tatsache, dass eine einzige DEM-Simulation einige Stunden bis Tage dauern kann, handelt es sich um ein sehr langwieriges, rechenintensives und teures Verfahren.

Nachfolgend wird eine neue Methodik zur effizienten Bestimmung der Kontaktmodellparameter für die Diskrete-Elemente-Methode vorgestellt. Diese nutzt ein globales Ersatzmodell, welches die rechenaufwändigen DEM-Simulationen im Rahmen einer Kalibriertsequenz vollständig substituiert. Die Aufgabe des Ersatzmodells besteht darin, das Verhalten unterschiedlicher Schüttgüter in einem zuvor definierten Kalibrierversuch hinreichend genau zu prognostizieren. Das Schüttgutverhalten wird hierbei durch versuchsspezifische Reaktionsgrößen auf der Makroebene charakterisiert. Die folgenden Ausführungen erläutern die grundlegende Methodik und Vorgehensweise. Weiterführende Informationen finden sich in der zugehörigen Dissertation [1].

2 Methodik der ersatzmodell-gestützten globalen Kalibrierung

2.1 Allgemeines Ablaufschema

Die hier entwickelte Methodik wird als ersatzmodell-gestützte globale Kalibrierung (englisch: *metamodel based global calibration*, MBGC) bezeichnet. Das grundlegende Ablaufschema ist in Bild 1 dargestellt.

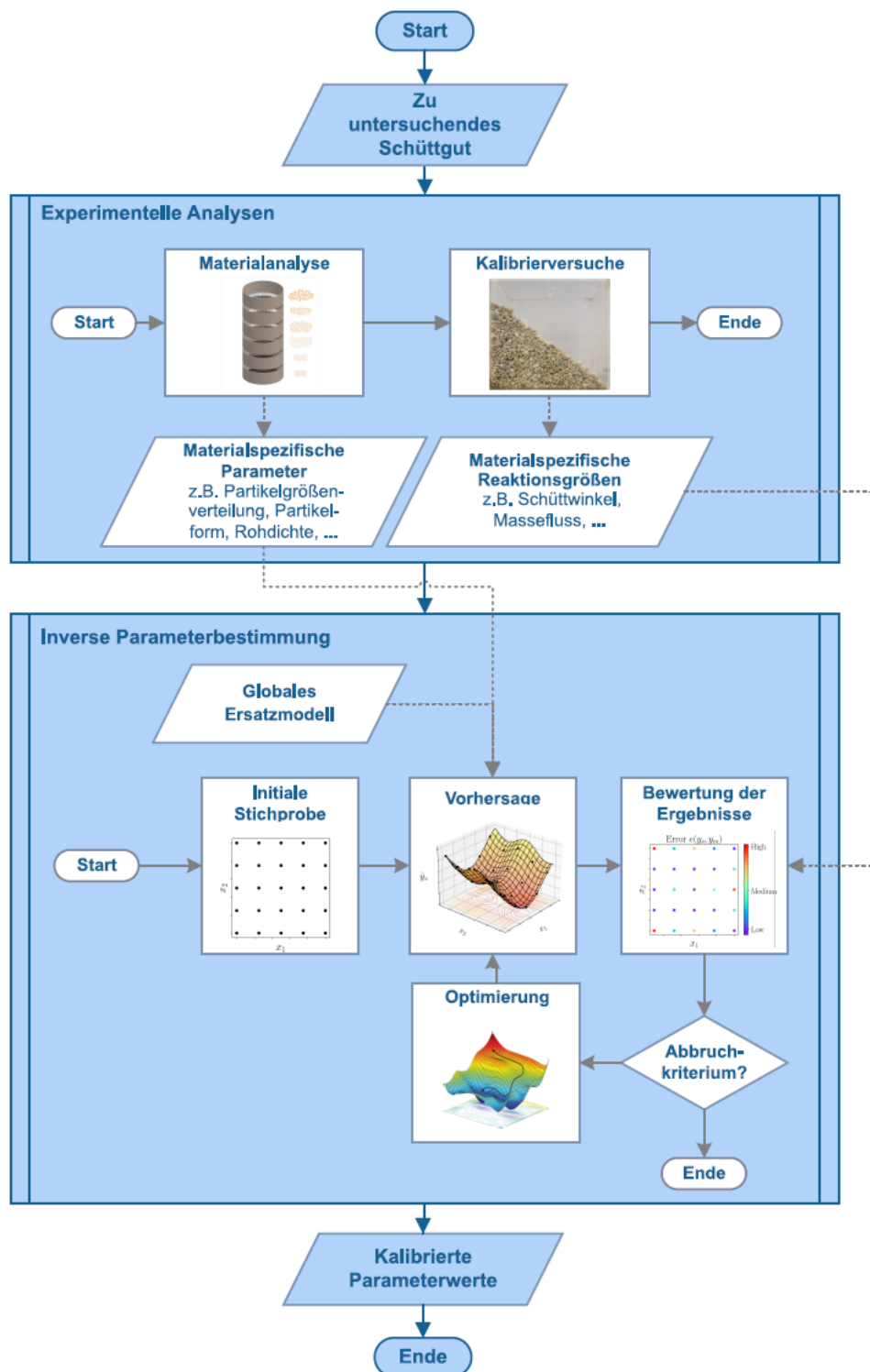


Bild 1: Ablaufschema der Ersatzmodell-gestützten globalen Kalibrierung

Der zentrale Unterschied zur klassischen Kalibrierung besteht darin, dass die rechenaufwändigen DEM-Simulationen durch ein globales Ersatzmodell substituiert werden. Dieses ist in der Lage, die materialspezifischen Reaktionsgrößen des Schüttgutes in einem bestimmten Kalibrierversuch zu prognostizieren. Ein Beispiel hierfür ist die Vorhersage des Schüttwinkels im Zylinderversuch. Der Terminus „global“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Ersatzmodell die Reaktionsgrößen für unterschiedliche Schüttgüter vorhersagen kann. Als wichtigste Voraussetzung für die Anwendung der MBGC

gilt die Existenz eines entsprechenden globalen Ersatzmodells. Der Aufbau der Ersatzmodelle erfolgt im Vorfeld zur eigentlichen Kalibrierung und muss nur einmal durchgeführt werden. Anschließend können die Modelle unbegrenzt oft für unterschiedliche Kalibriersequenzen genutzt werden. Die allgemeine Vorgehensweise zum Aufbau eines globalen Ersatzmodells ist in Bild 2 dargestellt.

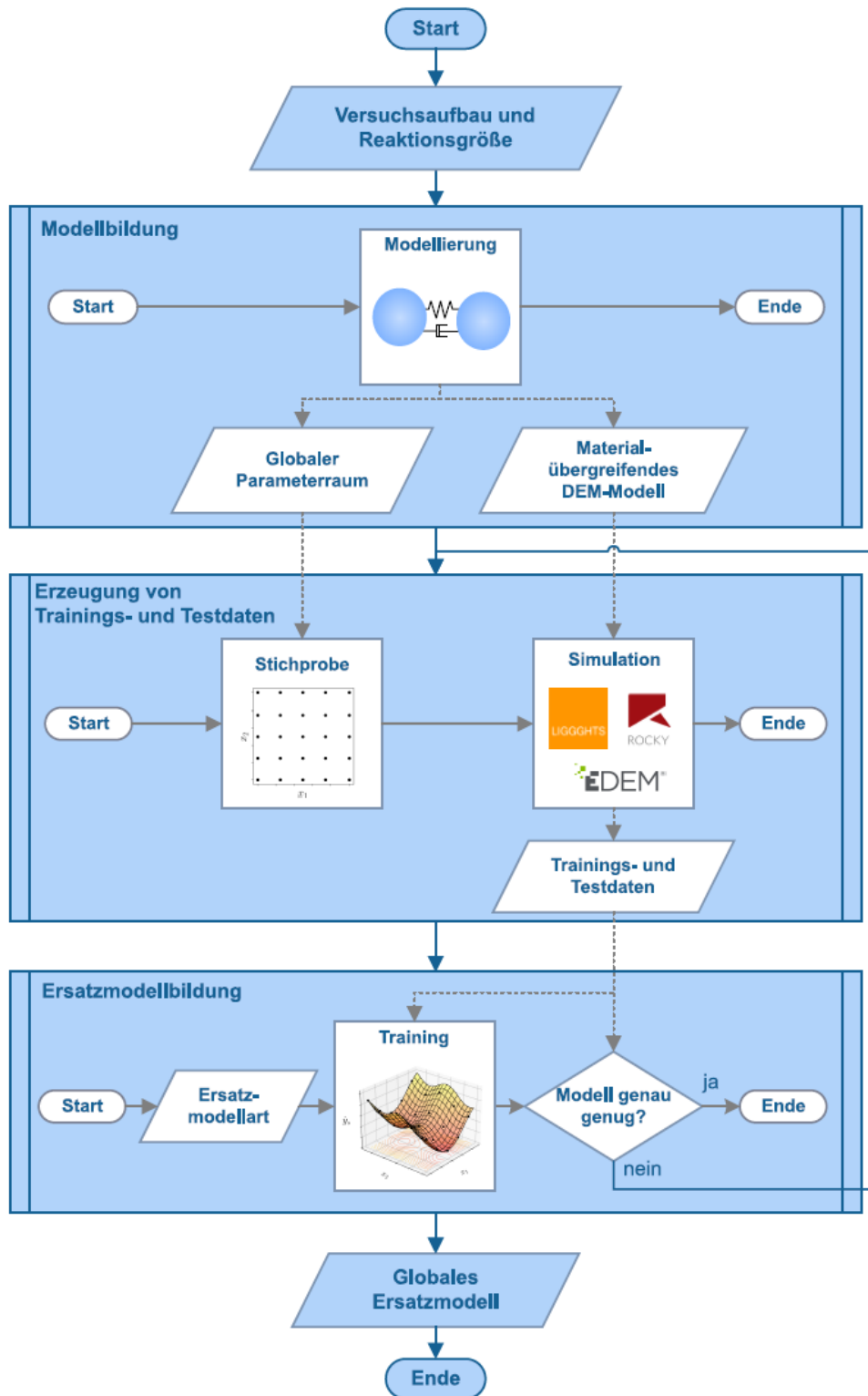


Bild 2: Ablaufschema zum Aufbau eines globalen Ersatzmodells

2.2 Modellierung materialübergreifender DEM-Modelle

Eine zentrale Voraussetzung für den Aufbau globaler Ersatzmodelle sind materialübergreifende DEM-Modelle, mit denen ein breites Spektrum unterschiedlicher Schüttgüter abgebildet werden kann. Dies umfasst die Wahl eines geeigneten Kontaktmodells, die Verwendung von Verteilungsfunktionen zur Darstellung der Korn- bzw. Partikelgrößenverteilung sowie die parametrische Beschreibung der Partikelform.

2.2.1 Wahl des Kontaktmodells

Das Kontaktmodell definiert das Spektrum der abbildbaren Schüttguteigenschaften und somit den späteren Anwendungsbereich des Ersatzmodells. Wird beispielsweise ein lineares Federmodell verwendet, so kann das resultierende globale Ersatzmodell nicht für die Kalibrierung kohäsiver Schüttgüter verwendet werden. Weiterhin besitzen die Prognosen des Ersatzmodells nur Gültigkeit für Simulationen, in denen das gleiche Kontaktmodell verwendet wird. Das bedeutet, der spätere Anwender ist an die Nutzung des jeweiligen Kontaktmodells gebunden. Bei Wahl eines komplexen (sehr rechenaufwändigen) Kontaktmodells führt dies dazu, dass später immer dieses komplexe Kontaktmodell verwendet werden muss, auch wenn das für die Abbildung des untersuchten Materials nicht notwendig wäre.

Das von Morrissey [2] vorgestellte Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion (EEPA) Modell gehört zu den jüngsten Entwicklungen im Bereich der DEM-Kontaktmodelle. Neben der realitätsnahen Abbildung des Fließ- und Verfestigungsverhaltens kohäsiver sowie frei fließender Materialien berücksichtigt das Modell auch das elastische und plastische Verformungsverhalten realer Schüttgüter. In Bild 3 ist eine Kraft-Durchdringung-Kurve mit den das Modell kennzeichnenden Parametern dargestellt.

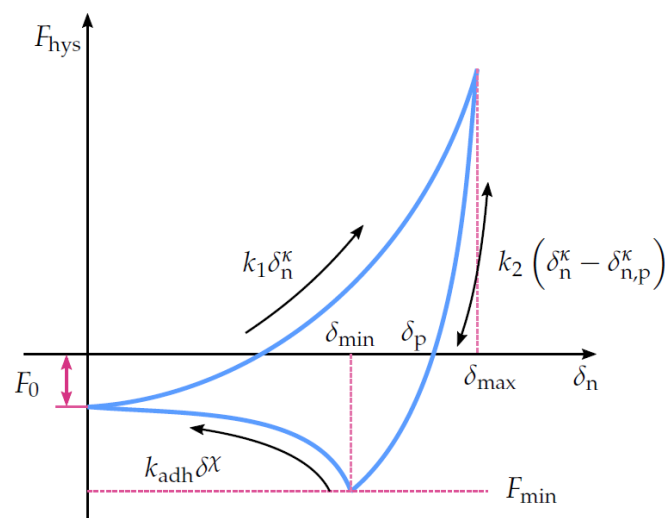


Bild 3: Kraft-Durchdringung-Kurve beim Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Modell

Die Besonderheit des EEPA-Modells besteht darin, dass dieses eine Generalisierung anderer weit verbreiteter Kontaktmodelle darstellt. Das bedeutet, es ist möglich, durch geschickte Parameterkombinationen weniger komplexe Kontaktmodelle abzubilden. Dies ermöglicht es, die Modellkomplexität variabel zu steuern. Tabelle 1 zeigt das sich ergebende Modellverhalten bei der Wahl unterschiedlicher Parameterkombinationen.

Tabelle 1: Verhalten des Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion Modells in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameterkombinationen

Modellverhalten	$k_2: k_1$	κ	$\Delta\gamma$	χ	F_0
Linear-elastisch	=1.0	=1.0	-	-	-
Nichtlinear-elastisch	=1.0	>1.0	-	-	-
Hertz-Mindlin	=1.0	=1.5	-	-	-
Linear elasto-plastisch	>1.0	=1.0	-	-	-
Nichtlinear elasto-plastisch	>1.0	>1.0	-	-	-
Konstante Kohäsion	-	-	-	-	>0.0
Adhäsion	>1.0	-	>0.0	≥ 1.0	>0.0
Luding	=1.0	=1.0	>0.0	=1.0	>0.0

2.2.2 Partikelgrößenverteilungsfunktion

Für den Aufbau und die Validierung eines globalen Ersatzmodells ist es notwendig, Trainings- und Testdaten mit unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen zu erzeugen. Eine Lösungsmöglichkeit hierfür stellt die Nutzung von Verteilungsfunktionen dar. Diese werden manchmal auch als Verteilungsgesetze bezeichnet und bilden mithilfe von Gleichungen die relative Häufigkeit in Abhängigkeit von der Partikelgröße ab.

Analysen zur Approximationsfähigkeit unterschiedlicher Verteilungsfunktionen führten zu dem Ergebnis, dass speziell für unimodale Verteilungen die Beta-Verteilung – im Vergleich zur Gates-Gaudin-Schumann-Verteilung, zur Rosin-Rammler-Sperling-Bennet-Verteilung sowie zur Logarithmischen Normalverteilung - sehr gute Ergebnisse liefert. Die Summenkurve der Beta-Verteilung ist nachfolgend dargestellt. Die Parameter α , β und d_{max} beeinflussen die Form der Summenkurve und können durch ein Fitting mit den Werten der realen Korngrößenverteilung bestimmt werden.

$$Q_r = \frac{\int_0^d u^{\alpha-1} (d_{max} - u)^{\beta-1} du}{\int_0^{d_{max}} u^{\alpha-1} (d_{max} - u)^{\beta-1} du} \quad (1)$$

2.2.3 Variation der Partikelform

Zur parametrischen Beschreibung der Partikelform können Superquadriken verwendet werden. Diese bieten die Möglichkeit, einen Großteil der real vorkommenden Kornformen zu approximieren. In den nachfolgenden Ausführungen werden diese nicht weiter betrachtet. Für eine genauere Erklärung wird an dieser Stelle auf [1] verwiesen.

2.3 Erzeugung von Trainings- und Testdaten

Der Aufbau globaler Ersatzmodelle untergliedert sich in zwei wesentliche Themenbereiche: die Generierung von Trainingsdaten und die eigentliche Ersatzmodellbildung [3]. Es ist bekannt, dass die erreichbare Vorhersagegenauigkeit eines Ersatzmodells maßgeblich durch die verwendeten Trainingsdaten beeinflusst wird [4]. Diese werden durch sogenannte Stichprobenverfahren festgelegt, welche somit in besonderem Maße zum Erfolg oder Misserfolg der Ersatzmodellbildung beitragen. In der Literatur findet sich eine Vielzahl von

Stichprobenverfahren, welche in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden können. Besonders erfolgversprechend hierbei ist die Kategorie der sequentiellen raumfüllenden Stichprobenverfahren (englisch: *space-filling sequential sampling methods*). Diese arbeiten Ersatzmodell-unabhängig, so dass die generierten Daten für die Erzeugung unterschiedlicher Ersatzmodelle verwendet werden können. Des Weiteren lassen sich iterativ neue Punkte zur Stichprobe hinzufügen, was beispielsweise bei einem Latin-Hypercube-Sampling nicht möglich ist.

Viele sequentielle Stichprobenverfahren besitzen Probleme bei der Erzeugung geeigneter Stichproben in hochdimensionalen Parameterräumen ($n_{\text{dim}} \geq 10$). Bild 4 verdeutlicht dies. Beispielhaft dargestellt sind die Ergebnisse in einem Parameterraum mit 28 Dimensionen. Bei den ersten beiden Verfahren (Halton und Sobol) treten Muster- und Clusterbildungen auf. Beim dritten Verfahren (FSSF-f) entsteht der Effekt der sogenannten „hohlen Mitte“ (englisch: *hollow center*), bei dem sich besonders wenige Punkte im Zentrum des Parameterraums befinden.

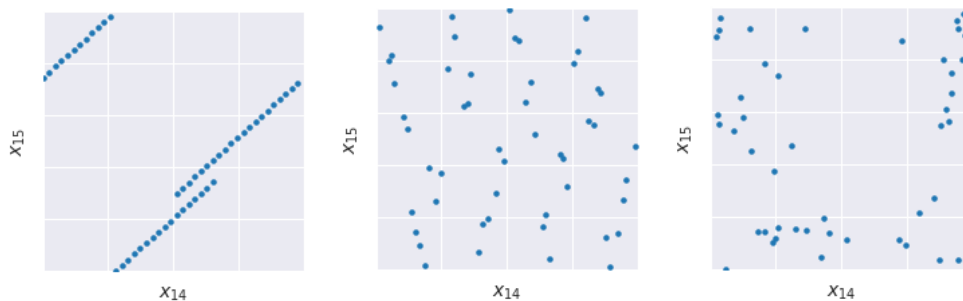


Bild 4: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse unterschiedlicher Stichprobenverfahren (Halton, Sobol, FSSF-f) für einen Parameterraum mit 28 Dimensionen

Zur Vermeidung dieser hohlen Mitte wurde nachfolgend eine Modifikation des FSSF-f-Verfahrens verwendet, welche einen künstlichen Sog in Richtung des Zentrums erzeugt und so zu einer besseren Verteilung der Punkte führt. Die genaue Funktionsweise des Verfahrens ist in [1] beschrieben.

2.4 Ersatzmodellbildung

Die Ersatzmodellbildung unterteilt sich nach Forrester et al. [5] in drei Phasen – die Auswahl eines Modellansatzes, die Bestimmung der optimalen Modellparameter (Training) und die Validierung des Modells. Besonders die erste Phase ist hierbei von entscheidender Bedeutung, da die Wahl des Ersatzmodells zum größten Teil darüber entscheidet, ob das betrachtete Simulationsmodell adäquat approximiert werden kann.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Modellansätzen, welche verwendet werden können. Zu den populärsten Vertretern gehören lineare bzw. polynomielle Regressionsmodelle. Der Einsatz solcher Modelle wird oftmals als Antwortoberflächenmethode (englisch: *response surface methodology*, RSM) bezeichnet. Weitere bekannte Ersatzmodellarten sind Radiale Basisfunktionen (englisch: *radial basis functions*, RBF) [6], Künstliche Neuronale Netze (englisch: *artificial neural networks*, ANN), Stützvektormaschinen (englisch: *support vector machines*, SVM) [7], Multivariate adaptive Regressionssplines (englisch: *multivariate adaptive regression splines*, MARS) [8] und

Gaußprozess-Regressionen (GPR). Eine Verallgemeinerung, welche Ersatzmodellart am „besten“ funktioniert, ist hierbei nicht möglich. Durch eine Analyse der Problemstellung können vielversprechende Ersatzmodellarten identifiziert werden. Hierzu zählen im betrachteten Anwendungsfall künstliche neuronale Netze, das Kriging-Verfahren, die genetische Programmierung (GP) sowie die Bildung von Ensemble-Modellen [1].

3 Anwendung und Validierung

Nachfolgend wird die Anwendung der oben beschriebenen Methodik an einem Beispiel näher erläutert. Es wird gezeigt, wie ausgehend von einem gewählten Materialbereich ein Ersatzmodell gebildet und anschließend für die Parameterwertbestimmung genutzt werden kann.

3.1 Betrachteter Material- und Anwendungsbereich

Zunächst wird der betrachtete Materialbereich für die Ersatzmodellbildung definiert. Alle Schüttgüter, welche den folgenden Eigenschaften genügen, können mit dem resultierenden Ersatzmodell kalibriert werden.

- Frei fließende Materialeigenschaften (nicht kohäsiv)
- Unimodale Korngrößenverteilung
- Größtkorn im Bereich 0,2 mm bis 63 mm und minimale Korngröße bis 0,06 mm
- Reindichte im Bereich von 500 kg/m³ bis maximal 3000 kg/m³
- Kornform, die sich der Klasse I bis V nach DIN ISO 3435 [56] zuordnen lässt

Um den Anwendungsbereich zu verdeutlichen, zeigt Bild 5 einige Schüttgüter aus verschiedenen Industriebereichen, welche dem genannten Materialbereich zugeordnet werden können.



Bild 5: Ausgewählte Schüttgüter, welche dem definierten Materialbereich zugeordnet werden können

3.2 Betrachteter Parameterraum

Nach Abgrenzung des Materialbereichs und Auswahl der Kalibrierversuche kann der untersuchte Parameterraum spezifiziert werden. Dieser ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Betrachteter Parameterraum

Parameter	Symbol	Einheit	Intervall
E-Modul Partikel	E_p	MPa	[5,100]
E-Modul Wände	E_w	MPa	[5,100]
Poissonzahl Partikel	ν_p	-	[0.1,0.5]
Restitutionskoeffizient Partikel-Partikel	e_{pp}	-	[0.05,0.7]
Restitutionskoeffizient Partikel-Wand	e_{pw}	-	[0.05,0.7]
Reibungskoeffizient Partikel-Partikel	μ_{pp}	-	[0.05,1.0]
Reibungskoeffizient Partikel-Wand	μ_{pw}	-	[0.05,1.0]
Rollreibungskoeffizient Partikel-Partikel	$\mu_{r,pp}$	-	[0.05,1.0]
Rollreibungskoeffizient Partikel-Wand	$\mu_{r,pw}$	-	[0.05,1.0]
Dichte der Partikel	ρ_p	kg/m ³	[500,3000]
Beta-Formparameter 1	α	-	[0.45,65.0]
Beta-Formparameter 2	β	-	[0.2,65.0]
Beta-Formparameter 3	d_{max}	-	[2.0,63.0]

3.3 Kalibrierversuch

Als nächster Schritt wird ein Kalibrierversuch ausgewählt und die Reaktionsgrößen, welche später durch das Ersatzmodell prognostiziert werden sollen, definiert. Bei der Auswahl des Kalibrierversuchs wurde darauf geachtet, dass dieser einen kleinskaligen Aufbau sowie

eine einfache und kurze Messprozedur aufweist. Dies soll dazu führen, dass der Rechenaufwand für eine einzelne Simulation möglichst gering ist. Ein weiteres Auswahlkriterium war ein möglichst „robustes Design“. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise die Geometrie keine Spalte oder Querschnittverengungen aufweist, da diese Brückenbildungen begünstigen, welche den Materialfluss be- bzw. sogar verhindern können.

Nachfolgend wurde der Scherboxversuch ausgewählt. Dieser oder Modifikationen davon wurden bereits in verschiedenen Veröffentlichungen verwendet [9], [10]. Der unskalierte Grundaufbau des Versuchs besteht aus einem rechteckigen Behälter mit der Länge $l_{\text{box}} = 75 \text{ mm}$, der Höhe $h_{\text{box}} = 100 \text{ mm}$ und der Breite $w_{\text{box}} = 100 \text{ mm}$. Eine der Seitenwände des Behälters ist dabei als Klappe ausgeführt, welche schlagartig geöffnet werden kann. Zu Beginn des Versuchs wird der Behälter bis zur Füllhöhe h_{fill} mit Material befüllt. Im vorliegenden Fall entspricht h_{fill} der Höhe des Behälters. Anschließend wird die Klappe geöffnet, so dass das Material herausfließt. Der Behälter befindet sich auf einer erhöhten Position, so dass das ausgeflossene Material nach unten wegfällt und nachfließendes Material nicht behindert wird. Bild 6 veranschaulicht den Aufbau und Ablauf des Versuchs. Mithilfe des Skalierungsfaktors S wird der simulierte Versuchsaufbau bei einer Veränderung der Partikelgrößenverteilung so angepasst, dass jeweils rund 10.000 Partikel im System sind. Als Reaktionsgröße wird der Schüttwinkel φ_{box} bestimmt.

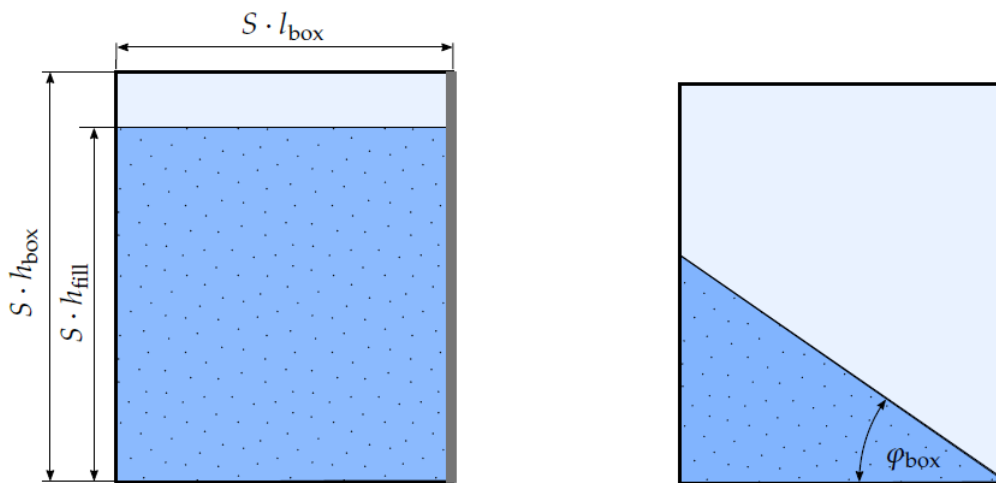


Bild 6: Schematische Darstellung des Scherboxversuchs; Start (links) und Ende (rechts)

3.4 Ersatzmodell

Für die Ersatzmodellbildung wurden 1.000 Simulationen mit unterschiedlichen Parameterkombinationen durchgeführt. Weiterhin wurden 150 zusätzliche Simulationen durchgeführt, um Daten für die Validierung der Ersatzmodellgenauigkeit zu generieren. Nachfolgend werden die Ersatzmodellart, welche in diesem Beispiel verwendet wurde, sowie das Ergebnis der Ersatzmodellbildung erläutert.

3.4.1 Genetische Programmierung

Die Genetische Programmierung (GP) gehört zur Gruppe der Evolutionären Algorithmen, d. h. die Funktionsweise ist inspiriert von der Evolution natürlicher Lebewesen. Ziel ist es,

automatisch Programme oder Funktionen zu entwickeln, die in der Lage sind, eine spezifische Problemstellung zu lösen bzw. einen Satz von Trainingsdaten möglichst genau abzubilden. Die Basis der Genetischen Programmierung bildet die Betrachtungsweise boolescher oder algebraischer Ausdrücke als Baumstrukturen, nachfolgend als Ausdrucksbaum (englisch: *expression tree*, ET) bezeichnet. Ein Beispiel für eine entsprechende Darstellung zeigt Bild 7.

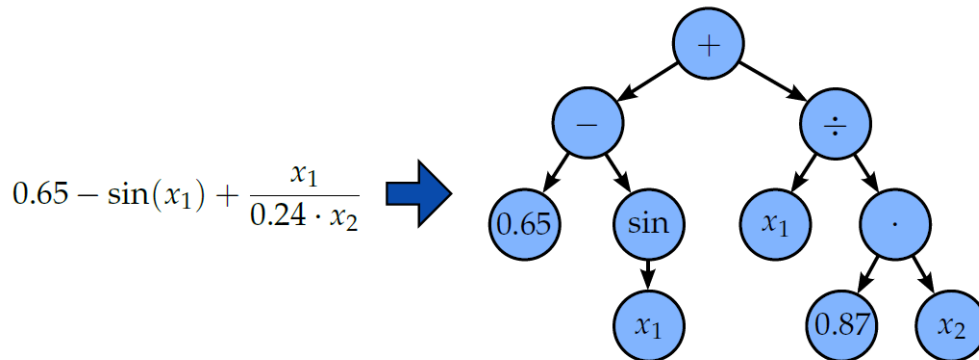


Bild 7: Darstellung eines algebraischen Ausdrucks als Baumstruktur (Ausdrucksbaum)

Zu Beginn einer genetischen Programmierung werden mehrere solcher Ausdrucksbäume erzeugt, welche die Individuen einer Population bilden. Zur Bildung der Baumstrukturen werden zufällig Operatoren und Variablen aus einer vorgegebenen Funktionsmenge (Menge möglicher Operatoren) und Terminalmenge (Menge möglicher Variablen und Konstanten) ausgewählt. Mithilfe evolutionärer Wirkprinzipien wie beispielsweise Selektion, Rekombination und Mutation werden die Baumstrukturen iterativ verändert und so angepasst, dass diese möglichst gut einen vorgegeben Datensatz abbilden. Bild 8 zeigt exemplarisch eine sogenannte Punktmutation.

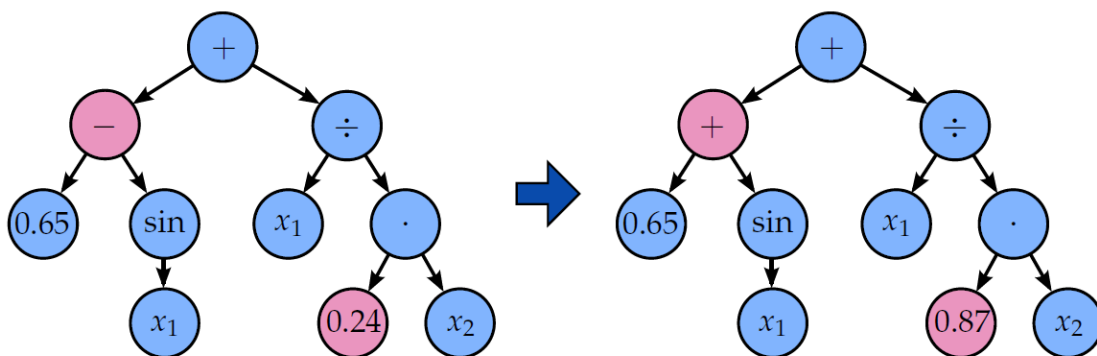


Bild 8: Punktmutation

3.4.2 Ergebnis der Ersatzmodellbildung

Gleichung 2 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Ersatzmodellbestimmung mit Hilfe der genetischen Programmierung. Dargestellt ist die Funktion zur Berechnung des Schüttwinkels φ_{box} .

$$\varphi_{box} = c_0 \cdot \mu_{r,pp} + \exp(c_1 \cdot \mu_{pw}) \cdot c_2 + \tanh(\sqrt[3]{c_3 \cdot \alpha}) \cdot c_4 + \frac{\exp(c_5 \cdot \mu_{r,pp}) \cdot c_6}{c_7 \cdot \mu_{r,pw}} + (\exp(c_8 \cdot \mu_{pw}) + \sqrt[3]{c_9 \cdot \mu_{r,pp}}) \cdot \tanh(c_{10} \cdot \mu_{pp}) \cdot c_{11} + c_{12} \quad (2)$$

$$c_0 = -7.047 \quad c_1 = -7.986 \quad c_2 = -20.368 \quad c_3 = -1.726 \quad c_4 = 39.881$$

$$c_5 = -1.241 \quad c_6 = 27.125 \quad c_7 = -64.994 \quad c_8 = -18.543 \quad c_9 = -0.950$$

$$c_{10} = -3.749 \quad c_{11} = 39.586 \quad c_{12} = 57.358$$

Es ist zu erkennen, dass nicht alle untersuchten Parameter in der Gleichung auftauchen. Dies bedeutet, dass die fehlenden Parameter keinen nennenswerten Einfluss auf die betrachtete Reaktionsgröße besitzen und sich daher während der Evolution nicht durchsetzen konnten. Durch die Anwendung der genetischen Programmierung wird somit indirekt eine Sensitivitätsanalyse mit nachgelagerter Parameterreduktion durchgeführt.

Für eine qualitative Bewertung des Approximationsverhaltens werden Streudiagramme verwendet. Jeder Punkt in einem solchen Diagramm bildet die Ergebnisse eines Parametervektors ab. Der Abszissenwert stellt dabei das Simulationsergebnis und die Ordinate den Schätzwert des jeweiligen Ersatzmodells für die betrachtete Reaktionsgröße dar. Bei idealer Übereinstimmung der Werte befindet sich der Punkt auf einer um 45° geneigten Gerade. Ebenfalls in den Diagrammen dargestellt sind die Konfidenzintervalle $\pm\sigma$ und $\pm 3\sigma$, welche die stochastische Schwankungsbreite der Simulationsergebnisse darstellen (Bild 9).

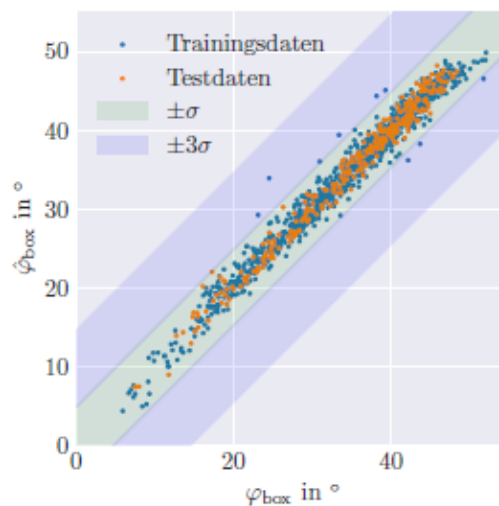


Bild 9: Ergebnisse des Ersatzmodells (Genetische Programmierung) für φ_{box}

Es ist zu erkennen, dass alle Punkte im Bereich des $\pm 3\sigma$ -Bandes liegen. Der überwiegende Anteil befindet sich hierbei sogar innerhalb des $\pm\sigma$ -Bereichs. Dies beweist, dass die Schätzfehler sich im Bereich der stochastischen Unsicherheit der Simulationsergebnisse befinden.

3.5 Parameterwertbestimmung

An dieser Stelle soll die Parameterwertbestimmung mithilfe des Ersatzmodells erläutert werden. Ziel ist es, einen Parametersatz für trockenen Kies 8-16 mm zu identifizieren

(Bild 10 links). Hierzu wird zunächst die reale Korngrößenverteilung für das Material ermittelt und anschließend mithilfe eines Fitting-Verfahrens die Parameter für die Beta-Verteilung ermittelt. Im vorliegenden Beispiel wurde $\alpha = 10.40$, $\beta = 19.76$ und $d_{max} = 33.00$ ermittelt. Die sich ergebende Summenkurve sowie die Werte der realen Korngrößenverteilung sind in Bild 10 rechts gegenübergestellt.

Um die Anzahl der freien Parameter weiter einzuschränken, wurde hier der Wandreibungskoeffizient in weiteren experimentellen Untersuchungen zu $\mu_{pw} = 0.36$ bestimmt. Dieser Schritt ist optional und dient lediglich der Reduktion möglicher Parameterkombinationen.

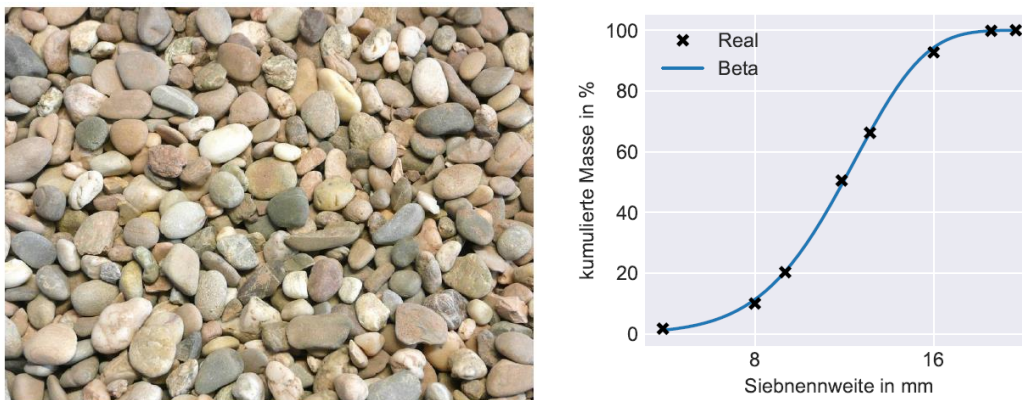


Bild 10: Kies 8-16 mm (links); Korngrößenverteilung und Approximation durch Beta-Verteilung (rechts)

Im nächsten Schritt werden die Reaktionsgrößen im betrachteten Kalibrierversuch experimentell ermittelt. Im betrachteten Beispiel ist dies nur der resultierende Schüttwinkel, welcher sich nach dem Ausfließen des Materials einstellt. Dieser wurde zu $\varphi_{box} = 35.53^\circ$ gemessen. Als Zielfunktion, welche den Fehler zwischen dem simulierten Wert der Reaktionsgröße und dem tatsächlich gemessenen Wert berechnet, wird die quadratische Abweichung verwendet.

Gleichung 2 zeigt, dass einige Parameter keinen Einfluss auf die betrachtete Reaktionsgröße besitzen. Im vorliegenden Fall sind dies der Restitutionskoeffizient e_{pw} zwischen Wänden und Partikeln sowie die Poissonzahl der Partikel ν_p . Die Wahl der entsprechenden Parameterwerte kann demzufolge beliebig erfolgen. Um einen möglichst großen Simulationszeitschritt realisieren zu können, sollten die Poissonzahl möglichst groß und der Rücksprungkoeffizient sehr klein gewählt werden.

Als letzter Schritt wird eine Optimierung durchgeführt, welche versucht, die Zielfunktion zu minimieren. Statt der Simulationen zur Berechnung des Schüttwinkels wird Gleichung 2 verwendet. In diese werden während jeder Iteration sowohl die experimentell ermittelten Werte wie auch die Parameterwerte, welche der Optimierungsalgorithmus vorschlägt, eingesetzt. Nachfolgend wurde das SLSQP-Verfahren (*Sequential Least Squares Programming*) für die Optimierung verwendet. Die Gesamtzeit für die Optimierung betrug rund zwei Minuten. Die ermittelten Parameterwerte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Durch die Optimierung ermittelte Parameterwerte

Parameter	Symbol	Einheit	Wert
E-Modul Partikel	E_p	MPa	7.5
E-Modul Wände	E_w	MPa	7.5
Restitutionskoeffizient Partikel-Partikel	e_{pp}	-	0.699
Reibungskoeffizient Partikel-Partikel	μ_{pp}	-	0.570
Rollreibungskoeffizient Partikel-Partikel	$\mu_{r,pp}$	-	0.192
Rollreibungskoeffizient Partikel-Wand	$\mu_{r,pw}$	-	0.222
Dichte der Partikel	ρ_p	kg/m ³	2420.81

Mit den ermittelten Parameterwerten wurde zur Validierung noch eine DEM-Simulation durchgeführt. Hierbei wurde ein Schüttwinkel von 35.12° erreicht, welcher eine hohe Übereinstimmung mit dem zuvor gemessenen Schüttwinkel von 35.53° hat.

Zusammenfassung

Es wurde eine neue Kalibriermethodik entwickelt, welche globale Ersatzmodelle für die Prognose des Schüttgutverhaltens nutzt. Der entwickelte Lösungsansatz wird als Ersatzmodell-gestützte globale Kalibrierung bezeichnet. Da die Notwendigkeit von DEM-Simulationen entfällt, kann die Ausführungszeit für die inverse Parameterwertbestimmung von mehreren Stunden oder Tagen bis auf wenige Minuten verkürzt werden. Es wurden die prinzipielle Methodik sowie die Anwendung dieser an einem einfachen Beispiel kurz erläutert. Ausführlichere Informationen finden sich in der zugehörigen Dissertation [1].

Quellenverzeichnis:

- [1] Richter, C.: Ersatzmodell-gestützte globale Kalibrierung von Kontaktmodellparametern für die Diskrete-Elemente-Methode, Dissertation, Dresden, 2023
- [2] Morrissey, J. P.: Discrete Element Modelling of Iron Ore Pellets to Include the Effects of Moisture and Fines, Edinburgh, 2013
- [3] Shan, S.; Wang, G.: Survey of Modeling and optimization strategies to solve high-dimensional design problems with computationally-expensive black-box-functions, Structural and Multidisciplinary Optimization, Jg. 41, Nr. 2, S. 219-241, 2010
- [4] Crombecq, K., Laermans, E.; Dhaene, T.: Efficient space-filling and non-collapsing sequential design strategies for simulation-based modeling, European Journal of Operational Research, Jg. 214, Nr.2, S.583-696, 2011
- [5] Forrester, A.I.J., Sobester, A.; Keane, A.J.: Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide, Wiley, 2008
- [6] Orr, M. J. L.: Introduction to Radial Basis Functions Networks, 1996
- [7] Cortes, C.; Vapnik, V.: Support-vector networks, Machine Learning, Jg. 20, Nr. 3, S. 273-297, 1995
- [8] Friedman, J. H.: Multivariate Adaptive Regression Splines, 1991
- [9] Ghodki, B. M., Patel, M., Namedo, R.; Carpenter G.: Calibration of discrete element model parameters: Soybeans, Computations Particle Mechanics, Jg. 6, Nr. 1, S. 3-10, 2019
- [10] Roessler, T., Richter, C., Katterfeld, A.; Will, F.: Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations, Powder Technology, Jg. 343, S. 803–812, 2019

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Intelligentes Fördersystem für gezielte und schonende Förderung von empfindlichen Schüttgutteilen in Montagelinien (DLBS Dynamic Learning Bulk System)

Rolf Kamps

Ralf Baumann

Annina Blaas

Marco Grossmann

Patrick Traxel

HSLU Hochschule
Luzern

Prof. Dr. Rolf Kamps (Referent)
Annina Blaas, MSc (Referentin)
Hochschule Luzern Technik & Architektur
Technikumstraße 21
CH-6048 Horw

Gefördert durch



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Innosuisse - Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung

Intelligentes Fördersystem für gezielte und schonende Förderung von empfindlichen Schüttgutteilen in Montagelinien (DLBS Dynamic Learning Bulk System)

In der Werkstückbereitstellung mit Feedersystemen werden Bauteile für die Verarbeitung durch Roboter vereinzelt. Mittels Bilderkennungsverfahren wird nach zufällig freiliegenden Bauteilen auf der Feederfläche geschaut. Freiliegende Bauteile werden entnommen. Ist kein weiteres Bauteil in Greifposition, werden mittels Exzenter, Aktuatoren oder vergleichbaren Antriebskinematiken die Bauteile auf der Feederfläche bewegt (Bild 1). Danach wird wieder mittels Bilderkennung beurteilt, ob ein freiliegendes Bauteil in Greifposition liegt. Der Bewegungsvorgang erfolgt zufällig, mitunter müssen die Vorgänge mehrmals wiederholt werden. In der hier beschriebenen Untersuchung erfolgt dieser Vorgang gezielt: die Bauteile werden gezielt in eine Greifposition bewegt. Hierzu wird zuerst das Haufwerk betrachtet, und ein Algorithmus entscheidet, welche Bauteile in welche Richtung zu bewegen sind, um greifbare Bauteile zu erhalten. So werden die Bauteile in Summe weniger und damit schonender bewegt.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchung ist es, die Umrüstung von Anlagen auf andere Komponenten zu vereinfachen. Während heute Einstellungen an Fördersystemen oft manuell und explorativ gemacht werden und entsprechend zeitaufwändig sind, wird untersucht, wie der Einrichtbetrieb selbstlernend unterstützt werden kann.

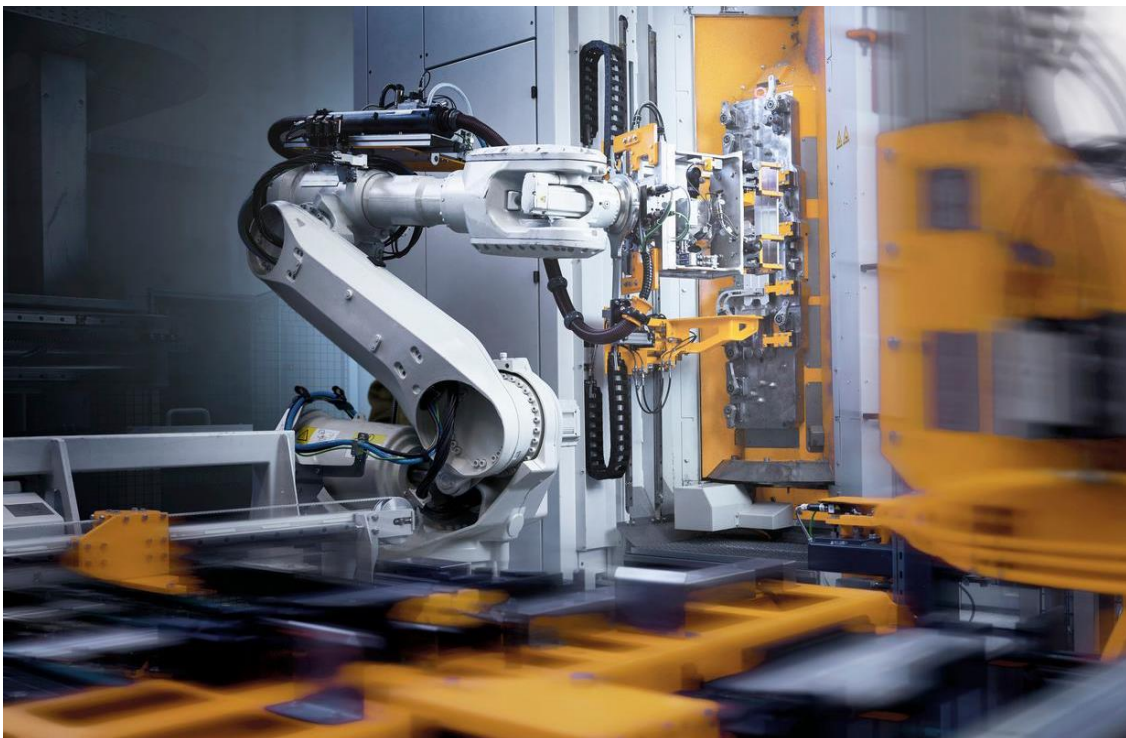


Bild 1: Typische Anwendung eines Feederfördersystems für Schüttgüter [GettyImages (Bilddatenbank HSLU)]

1 Motivation

Die Forschungsfragen dieser Untersuchung beschäftigen sich mit dem gezielten Wurf von Bauteilen in Haufwerken, um greifbare Bauteile nicht wie bisher zufällig zu bekommen.

Insbesondere der Einrichtbetrieb – also das Suchen von passenden Feedereinstellungen für ein effektives Förderverhalten – gestaltet sich in der Praxis oft zeitaufwändig, da diese Einstellungen von Spezialisten manuell und explorativ bestimmt werden. Die Parameter sind bei vielen Feedersystemen teileabhängig und müssen daher bei einem Wechsel des Fördergutes von Neuem ermittelt werden.

Eine weitere Forschungsfrage betrifft gezielte und schonende Förderbewegungen. Heutige Systeme regen das Fördergut oft zufällig an. Gezielte Anregung hingegen bedeutet eine schonendere Förderung. In Experimenten wurden verschiedene Bewegungsmuster im Förderprozess mit Hilfe von Vision Systemen und Bildverarbeitung ausgemessen und analysiert. Damit konnten Verhaltensmuster und Trends bei Bewegungsmustern erkannt und - darauf basierend - schonende Bewegungsmuster bestimmt werden.

2 Grundlagen

Feedersysteme sind eine der Schlüsselkomponenten von vielen Produktionsanlagen ([1] und [2]).

Die Förderbewegungen dieser Feedersysteme sind ein aktives Forschungsgebiet und werden auch in anderen Forschungsprojekten behandelt. Zum Beispiel werden in [3] Würfe von Komponenten im zweidimensionalen Raum untersucht, und in [4] werden Förderprinzipien verallgemeinert untersucht und beschrieben.

Als weitere Grundlage für die Untersuchung wurden unterschiedliche bestehende Feedersysteme analysiert. Es wurden die typischen Bewegungsmuster der untersuchten Systeme ermittelt und zu den gemachten Beobachtungen Simulationsmodelle erstellt, um die Resultate der Experimente zu reproduzieren ([5], [6] und [7]).

3 Vorgehen und Lösungen

Eine große Bandbreite von Anregungsprinzipien (elektromechanische und akustische, wie in [8]) und bestehenden Feedersystemen (Exzentrersysteme und Systeme mit Schwingungsanregung über elektromechanische Linearsysteme) wurden in einer Kombinationsmatrix [9] dargestellt und bewertet. Daraus wurden ein neues Antriebskonzept entwickelt und ein Prototyp konstruiert und gebaut.

Mit dem entwickelten Prototyp wurden Experimente durchgeführt, bei denen Bewegungsmuster und Bewegungsparameter untersucht wurden.

Es wurden Algorithmen entwickelt, um mit Hilfe von Bildverarbeitung, Logik und maschinellem Lernen Haufwerke zu bewerten und passende Bewegungen zu bestimmen, um die Haufwerke gezielt und schonend zu vereinzeln.

Mit dem Prototyp konnten die entwickelten Algorithmen wiederum getestet und Messdaten gesammelt und analysiert werden. Dabei wurde auch untersucht, wie Haufwerke auf einer

Förderplatte gezielt aufgelöst werden können und wie dadurch mit minimaler Bewegung ein Maximum an greifbaren Teilen auf der Förderplatte erreicht werden kann.

4 Ergebnisse

Im Weiteren wird dargestellt, welche Vorgehensschritte gewählt wurden und zu welchen Ergebnissen die Untersuchung geführt hat.

4.1 Prototyp

Das für die experimentellen Versuche gewählte Prinzip besitzt – anders als die untersuchten bestehenden Systeme – drei Antriebe (Bild 2). In dieser Konfiguration ist das System mechanisch bestimmt. Daraus ergibt sich, dass die Schwenkachse in der Förderebene beliebig orientiert und verschoben werden kann (Bilder 3 und 4). Die Konstruktion der Bewegungskinematik erlaubt es zudem, die Drehschwenkachse über oder unter die Anregungsebene zu legen (Bild 5). Dadurch wird gezieltes Auseinander- und Zusammenfördern möglich.

Die Antriebe sind in Amplitude, Frequenz und Anregungsdauer modulierbar. Dadurch lassen sich translatorische Anregungen in Richtung der z-Achse bei horizontaler („Flip“) und schräggestellter („Forward“) Förderplatte generieren sowie Schwenkbewegungen um eine Drehschwenkachse zum Spreizen („Spread“) und zum Zusammenführen („Gather“) des Schüttgutes.

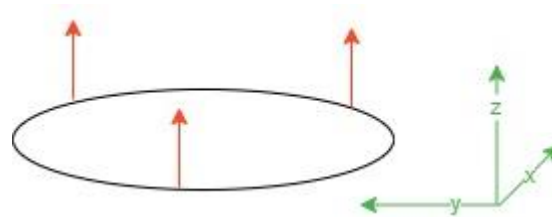


Bild 2: Schematische Darstellung Feederebene mit Anregungen (rot) und Koordinatensystem (grün)

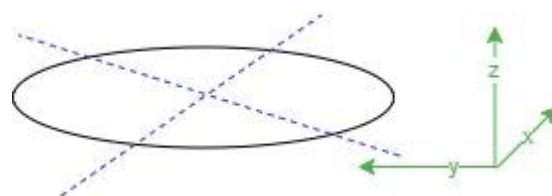


Bild 3: Beispiele für um die z-Achse drehbare mögliche Schwenkachsen (blau)

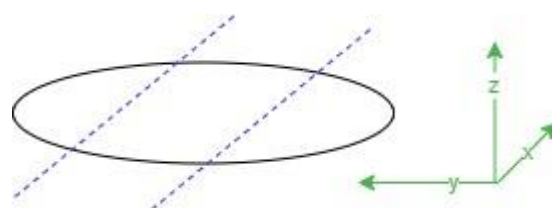


Bild 4: Beispiele für in der x-y-Ebene verschiebbare mögliche Schwenkachsen (blau)

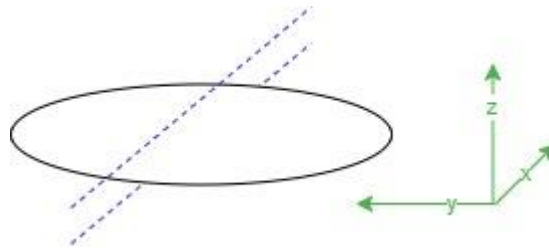


Bild 5: Beispiele für entlang der z-Achse verschiebbare Schwenkachsen (blau)

4.2 Bewegungsanalyse

Mit dem Prototyp lassen sich verschiedene Bewegungsmuster erzeugen. Für das Fördern von Schüttgutkomponenten eignen sich unterschiedliche Bewegungsmuster. Während der Untersuchung wurden die Bewegungen „Flip“, „Forward“, „Spread“ und „Gather“ untersucht: Bei einer „Flip“ Anregung werden die Teile horizontal geworfen, bei einer „Forward“ Bewegung wird die Platte schräggestellt, um die Schüttgutkomponenten zu fördern. Bei den Bewegungen „Spread“ und „Gather“ werden Frequenz und Amplitude so eingestellt, dass Vibrationen mit kleiner Amplitude ($<0.5^\circ$ Auslenkung der Förderebene) und relativ tiefer Frequenz (<70 Hz) entstehen, die – je nach Lage der Drehschwenkachse – ein gezieltes Auseinander- oder Zusammenfördern zur Folge haben. Diese Anregungen sind schonender für die Komponenten als die Standardbewegung „Flip“, bei der die Schüttgutteile geworfen werden.

Die Bilder 6 und 7 zeigen das gezielte Auseinander- und Zusammenfördern in der Simulation.

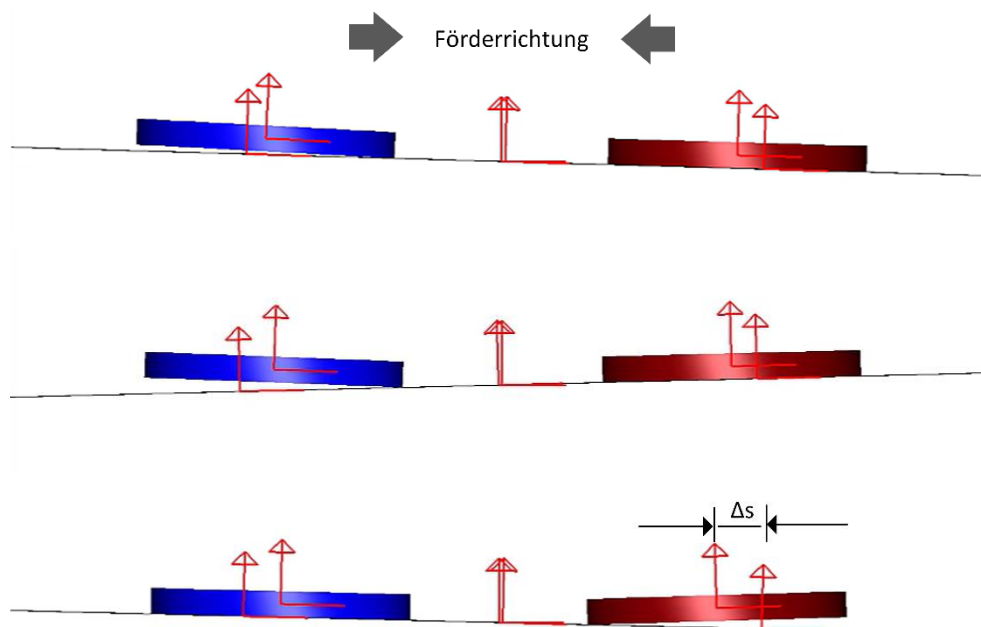


Bild 6: Simulation Bewegungsmuster Zusammenfördern („Gather“)

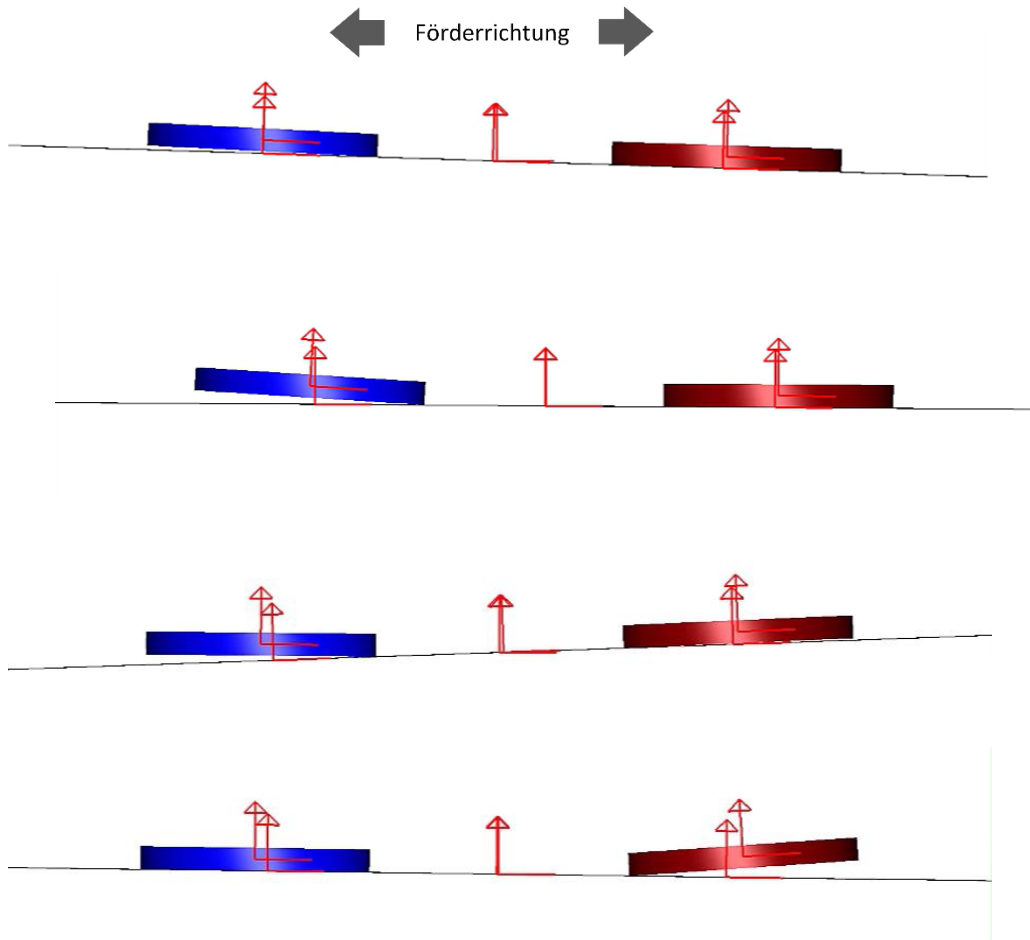


Bild 7: Simulation Bewegungsmuster Auseinanderfördern („Spread“)

Die Bewegungsmuster „Spread“ und „Gather“ sind besonders geeignet, um Haufwerke gezielt und schonend auseinander beziehungsweise zusammen zu fördern.

4.3 Haufwerkanalyse

In einem nächsten Schritt wurden unterschiedliche Algorithmen untersucht, um die Haufwerke zu analysieren und eine möglichst schonende Vereinzelung bei den geforderten Leistungsdaten zu erreichen.

4.3.1 Ansätze

Wenn auf der Förderplatte keine Einzelteile mehr für den Roboter greifbar sind, werden die Eigenschaften der verbleibenden Haufwerke analysiert. In einem ersten Schritt werden die Haufwerke, ihre Eignung betreffend, zur Vereinzelung bewertet. Kleinere Haufwerke werden bevorzugt, weil sie, wenn sie erfolgreich vereinzelt und die Teile abgegriffen worden sind, Fläche freigeben, die für das Vereinzeln von größeren Haufwerken genutzt werden kann.

4.3.2 Methoden zur Haufwerkbewertung

Es wurden verschiedene Ansätze untersucht und getestet, um Haufwerke hinsichtlich ihrer Eignung zur Vereinzelung zu bewerten.

Nutzwertanalyse

Mit der klassischen Nutzwertanalyse werden die Haufwerke relativ bewertet. Das Vision System macht eine Bildaufnahme der Förderplatte. Danach werden für alle Haufwerke mit Bildverarbeitung charakteristische Größen (Anzahl Teile, Form, Lage, ...) ermittelt. Die charakteristischen Größen werden gewichtet aufsummiert. So kann die relative Bewertung aller Haufwerke auf der Förderplatte ermittelt werden.

Neuronales Netz

Alternativ zur Nutzwertanalyse wurde ein einfaches neuronales Netz (Bild 8) mit den charakteristischen Größen der Haufwerke und manuell bewerteten Trainingsbildern trainiert. Das neuronale Netz verarbeitet als Eingabewerte wieder die durch Bildverarbeitung ermittelten charakteristischen Größen (Kriterien) der Haufwerke auf der Förderplatte. Ausgabewert des neuronalen Netzes ist eine absolute Bewertung jedes Haufwerks auf der Förderplatte.

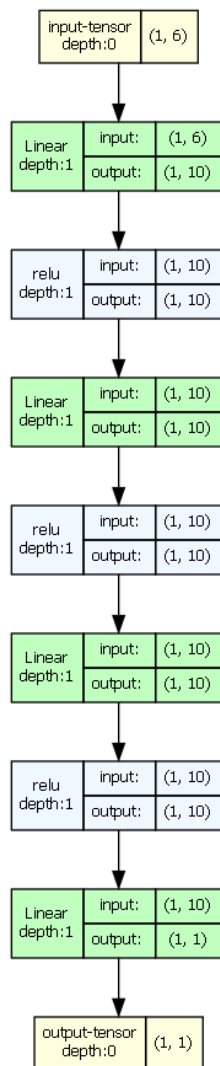


Bild 8: Visualisierung der Architektur des neuronalen Netzes: Inputvektor, Layeranzahl und Aktivierungsfunktionen

Vergleich der Bewertungsmethoden

Bild 9 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Bewertungsmethoden. Beide Methoden berechnen die Bewertung eines Haufwerkes aus den gleichen Kriterien.

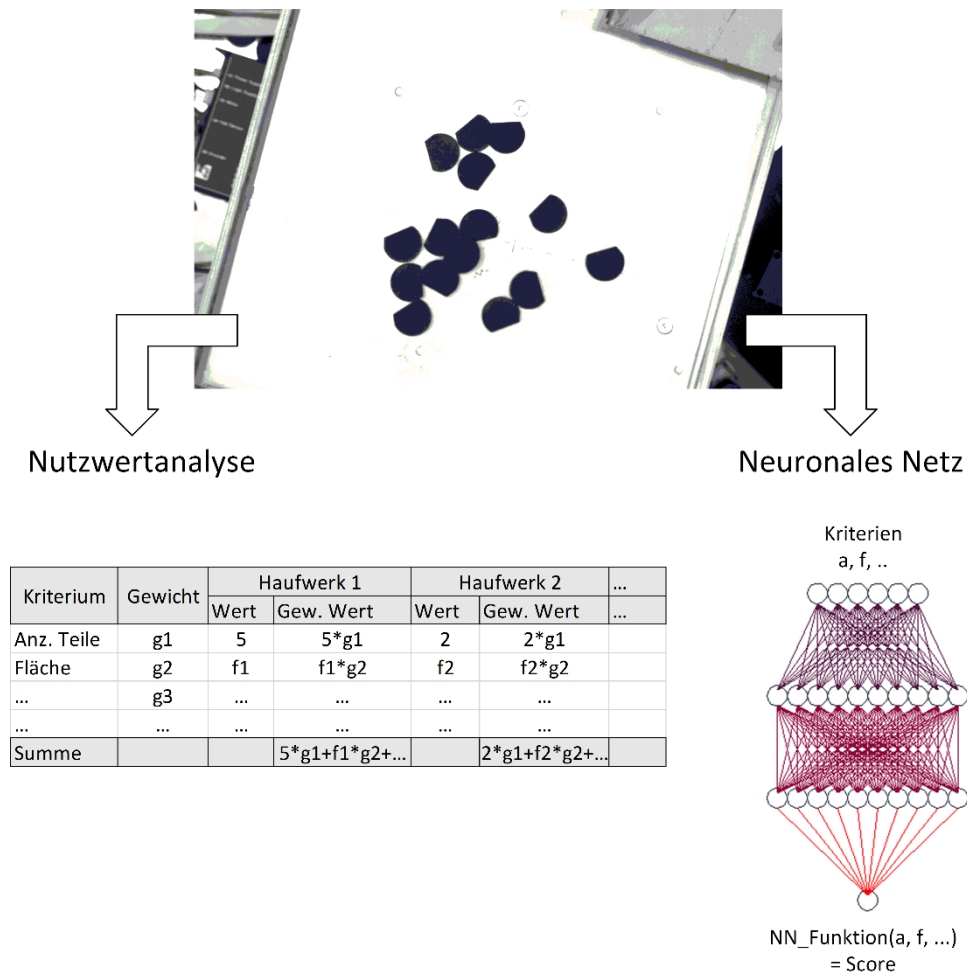


Bild 9: Gegenüberstellung von Nutzwertanalyse (links) und neuronalem Netz (rechts). Beide Methoden verwenden zur Berechnung der Bewertung die gleichen Kriterien.

Beide Methoden ermitteln zuverlässig zur Vereinzlung geeignete Haufen. Das neuronale Netz kann die Zielwerte sehr genau abbilden und berechnet eine absolute Bewertung, wodurch die Weiterverarbeitung unabhängig von den anderen Haufwerken und dadurch vereinfacht wird.

4.3.3 Gezielte Vereinzlung

In einem letzten Schritt wird für das bestbewertete Haufwerk ein Bewegungsmuster berechnet, um dieses hinsichtlich des Schüttguts schonend zu fördern. Je nach Lage der Haufwerke auf der Förderplatte kann es angebracht sein, ein Haufwerk linear zu fördern, zum Beispiel, wenn es sich am Rand der Förderplatte befindet und dort zum Vereinzeln wenig freie Fläche vorhanden ist (Bild 10). Bevorzugt werden Haufwerke an einer passenden Stelle – wenn nötig iterativ – aufgetrennt. Hierfür wird eine entsprechende Drehschwenkachse berechnet und damit das Haufwerk durch Anregung der Förderplatte an dieser Stelle aufgetrennt. Schüttgutteile werden dadurch frei und für einen Roboterarm greifbar gemacht.

Kleinere Haufwerke werden bevorzugt vereinzelt, weil dadurch Fläche für das Vereinzeln von größeren Haufwerken frei wird (Bilder 11 und 12).

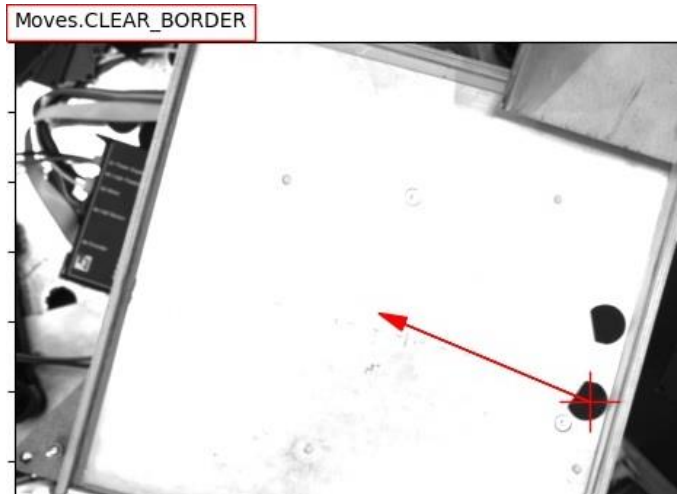


Bild 10: Beispiel für Förderbewegung „Forward“ (weg vom Rand)

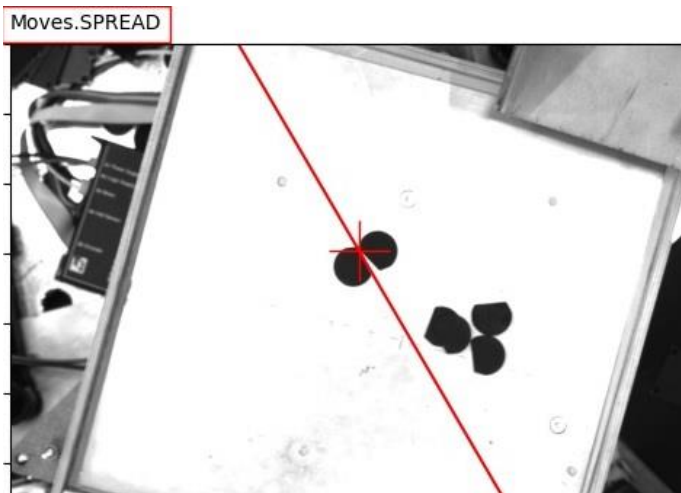


Bild 11: Beispiel für Bewegung „Spread“

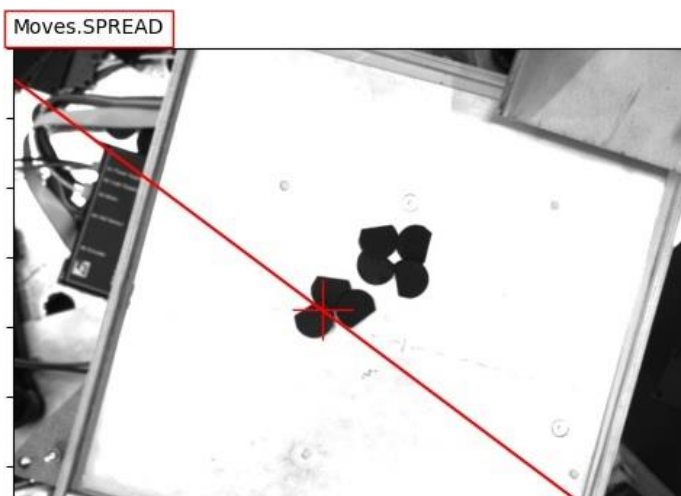


Bild 12: Beispiele für Bewegung „Spread“

Wenn keine andere passende Bewegung ermittelt werden kann, wird das Bewegungsmuster „Flip“ eingesetzt, bei dem die Förderplatte in vertikaler Richtung angeregt und die Teile zufällig geworfen werden. Dieses Bewegungsmuster ist nicht

teileschonend und wird nur angewendet, wenn alle anderen Möglichkeiten ausgeschöpft sind.

Um die Algorithmen hinsichtlich ihrer Anwendung in Montagelinien zu verifizieren, im Hinblick auf eine möglichst kurze Bereitstellungszeit, wurde die mittlere Zeitdauer ermittelt, die benötigt wird, bis ein weiteres Teil in einer Greifposition ist. Die ermittelten Zeiten werden mit den bestehenden Systemzeiten verglichen.

4.4 Automatisierung Einrichtbetrieb

Um den Einrichtbetrieb oder die Umstellung einer Montagelinie auf andere Komponenten zu vereinfachen, wurde ein selbstlernender Algorithmus entwickelt, welcher Einstellungen für effizientes und schonendes Fördern autonom ermittelt. Der Algorithmus verwendet zusätzlich zum Feedersystem ein Vision System und kann für das kombinierte System selbstständig die Parametrierung ermitteln. Der Algorithmus wurde mit Experimenten mit dem Prototyp und mit bestehenden Systemen getestet.

Mit dem Prototyp und dem primär angewendeten Bewegungsmuster „Spread“ konnte zudem beobachtet werden, dass die ermittelten Parameter weitgehend teileunabhängig sind. Um diese Beobachtung zu verifizieren, wurde eine Simulationsmodell erstellt. Mit diesem Modell konnte gezeigt werden, dass das Fördern mit dem Bewegungsmuster „Spread“ weitgehend unabhängig ist von Reibungskoeffizienten. Damit konnte die vorher gemachte Beobachtung verifiziert werden.

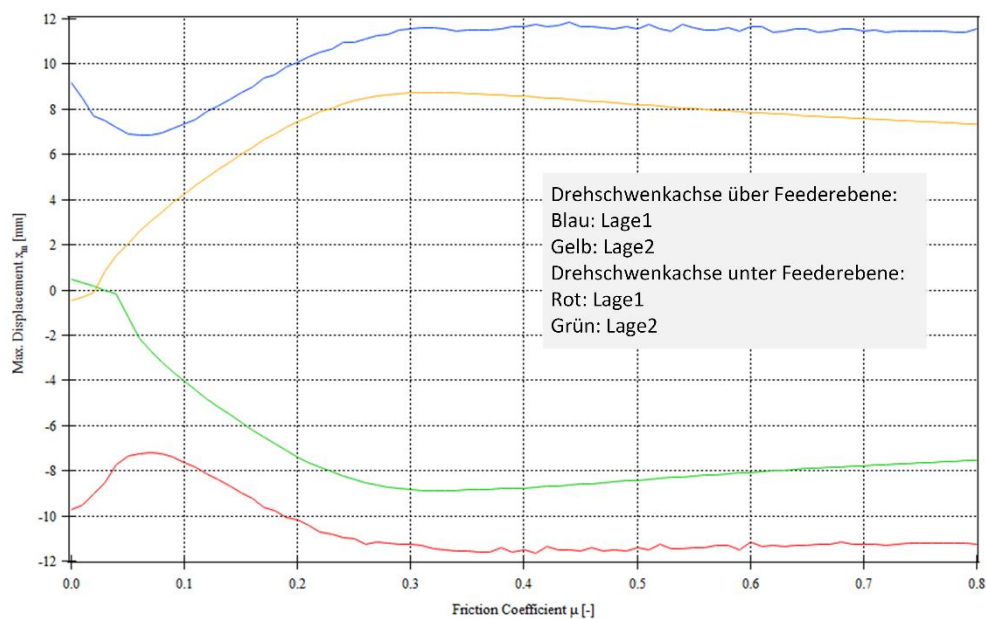


Bild 13: Gegenüberstellung von Förderdistanz und Reibungskoeffizient für unterschiedliche Systemparameter (Simulation)

Bild 13 stellt Förderdistanz und Reibungskoeffizient für unterschiedliche Konfigurationen gegenüber: Die Lage der Drehschwenkachse wurde variiert und die Distanz zwischen der Achse und dem geförderten Teil. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass der Reibungskoeffizient nur einen geringen Einfluss auf die Förderdistanz hat. Ab einem Reibungskoeffizienten von 0,3 verhält sich der Förderweg nahezu konstant.

5 Diskussion und Ausblick

Die Untersuchung hat die gezielte und schonende Förderung von Schüttgutförderteilen erforscht und dabei auf einen höheren Automatisierungsgrad bei der Konfigurierung von Feedersystemen und die Verwendung von maschinellem Lernen (gemein auch als künstliche Intelligenz bezeichnet) fokussiert.

Nach der Evaluation von bestehenden Systemen wurde ein Prototyp eines Feedersystems gebaut, der durch seine Konstruktion neue Bewegungsmuster ermöglicht. Mit Experimenten mit dem Prototyp wurden verschiedene Bewegungsmuster analysiert und die Beobachtungen mit Simulationsresultaten verglichen und verifiziert.

Die Ergebnisse der Untersuchung können auch in anderen Industriezweigen (z. B. in der Logistik) und in größer dimensionierten Anlagen angewendet werden, da die untersuchten physikalischen Prinzipien als allgemein gültig betrachtet werden können.

Basierend auf den Ergebnissen baut der Forschungspartner des Projektes – die LIP Automation AG [10] – weitere Prototypen dieses Feedersystems in Hard- und Software auf.

Weiter zu untersuchen ist z. B. ein System, welches nicht nur die Parameter der einzelnen Bewegungsmuster, sondern selbstlernend Bewegungsmuster findet. Während der Untersuchung wurden ein Ansatz mit Reinforcement Learning testweise implementiert und erste Experimente durchgeführt. Auch in der Modellierung und Integration von Simulationen – gerade im Zusammenhang mit Automation und künstlicher Intelligenz wie Reinforcement Learning – liegt noch Potential. Wenn das Förderverhalten unterschiedlicher Komponenten quantitativ simuliert werden kann, kann die Inbetriebnahme weiter vereinfacht und die Feederparameter können – dank besserer Ausgangswerte – noch schneller gefunden werden. Mit Simulationsmodellen lassen sich außerdem neuronale Netzwerke einfacher trainieren und verifizieren als mit physischen Systemen.

Zusammenfassung

Ausgehend von Experimenten und Simulationsmodellen mit verschiedenen Antriebskinematiken und nach der Analyse bestehender Feedersysteme wurde ein Feedersystem-Prototyp gebaut, um mit neuen Bewegungsmustern schonendes und effizientes Fördern von Schüttgutkomponenten zu untersuchen.

Besonders effektiv hat sich das Bewegungsmuster „Spread“ erwiesen, das durch die Konstruktion des Prototyps ermöglicht wird. Dabei werden die Komponenten schonender als durch Werfen („Flip“) vereinzelt, indem die Förderplatte durch Schwingungen mit aufeinander abgestimmten Parametern Frequenz, Amplitude und Dauer angeregt wird. Bildverarbeitung und Algorithmen wurden verwendet, um dieses und andere Bewegungsmuster auf unterschiedliche Situationen auf der Förderplatte anzuwenden. Die Resultate der Experimente wurden durch Simulationen verifiziert.

Beim Einrichtbetrieb konnte durch die Entwicklung eines selbstlernenden Algorithmus, der in Experimenten und mit Simulationen verifiziert wurde, ein größerer Automatisierungsgrad erreicht werden.

Quellenverzeichnis:

- [1] Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik, 5. Auflage. Wien: Hanser Verlag, 2020
- [2] Lotter, B.; Wiendahl, H. P.: Montage in der Produktion, 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2012
- [3] Lynch, K. M.; Northrop, M.; Pan Peng: Stable limit set behavior in a dynamic parts feeder, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oktober 2001
- [4] Vose, T. H.; Umbanhowar, P.; Lynch, K. M.: Sliding manipulation of rigid bodies on a controlled 6-DoF plate; International Journal of Robotics Research, Juni 2012
- [5] Beutler, R.: Entwicklung und Validierung eines Simulationsmodells für die vibrationsbasierte Teilevereinzelnung, MSE Vertiefungsprojekt 1, Hochschule Luzern, Januar 2022
- [6] Beutler, R.: Weiterentwicklung und Validierung eines Simulationsmodells für die vibrationsbasierte Teilevereinzelnung, MSE Vertiefungsprojekt 2, Hochschule Luzern, Juni 2022
- [7] Baumann, R. et al.: Dynamic Learning Bulk System, Abschlussbericht, Hochschule Luzern, Juni 2023
- [8] Zhou, Q.; Sariola, V.; Latifi, K. et al.: Controlling the motion of multiple objects on a Chladni plate. Nat Commun 7, 12764, September 2016
- [9] VDI 2221, Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung, November 2019
- [10] LIP Automation AG [online]. Verfügbar unter: <https://lipautomation.com>

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

AUTOSTABLE conveyor belts with unique self-centering mechanism - reliable solution against off-tracking

Waldemar Buchhorn



Dipl.-Ing. Waldemar Buchhorn
Sempertrans Office Germany
Averdunkshof 3
47445 Moers

AUTOSTABLE conveyor belts with unique self-centering mechanism - reliable solution against off-tracking

A straight running conveyor belt is one of the most important requirements for a well-functioning conveying system. The mistracking of the conveyor belt is in most cases caused by misalignment of the conveying system or single parts thereof so that adjustment of the conveyor can solve the problem in most cases. In some special cases when adjustments don't bring satisfactory result, special solutions are needed. For such cases Sempertrans developed the Autostable. A conveyor belt which centers itself without additional equipment on the conveyor. It assures stable conveyor belt tracking along the whole conveyor length. Over the years more and more customers have been convinced by the outstanding benefits of this troubleshooting product.

1 Conveyor belt tracking

1.1 Reason for conveyor belt mistracking and traditional solutions for that

One of the main problems encountered in the use of conveyor belts is off-centering and therefore mistracking. Besides tension and gravity forces acting on a running conveyor belt forces across the conveyor belt travel direction. These forces may be caused by various factors like:

- Misalignment of conveyor system components
- Off-centered loading
- Excessive material build-up on idlers or/and drums
- Structural alignment issue
- Uncleanliness of conveyor system
- Misaligned splice
- Damaged idler and/or pulley
- External influences like side wind or rain

When the balance of forces is disturbed, the conveyor belt moves out to the side. The mistracking may lead to clogging, reduction of output, deterioration and/or damaging of the conveyor belt edges, covers and a noticeable shortening of the service life of the conveyor belt itself.

If proper alignment of the frame, pulleys, idler stations, alignment of central material loading and protection against external influence do not bring satisfactory result, special solutions must be achieved to ensure straight tracking of the conveyor belt. Typical traditional troubleshooting solutions against off-tracking are:

- tilting the side idlers in the carrying strand
- negative trougher idler stations in the return strand
- self-aligning idler stations
- crowned pulley

1.2 Autostable – innovative troubleshooting solution against off-tracking

Over 30 years ago Sempertrans developed Autostable with innovative design and unique self-centering function and improved it over the years. Autostable does not allow transversal movement of the conveyor belt, avoiding all mistracking-related damages to the conveyor belt or the conveyor structure. Autostable does not require any additional equipment for centering or modifications of the conveyor system. It can be installed on:

- Reversible installations where standard conveyor belts are hard to track
- Installations where a centered loading is hard to ensure (e.g. bucket wheel excavators)
- Conveyor with high speed and short center distances
- Existing overland conveyors with mistracking problems

The self-centering effect of Autostable results from the constructive difference in rigidity between the center area (area of middle roll of troughed station), where Autostable is cross rigid and sides areas (areas of troughing angle), where it is flexible to provide the required troughability (Figure 1 and Figure 2).



Figure 1: Autostable troughability test

This mechanism also provides a form locking shape which prevents transversal movement of the belt.

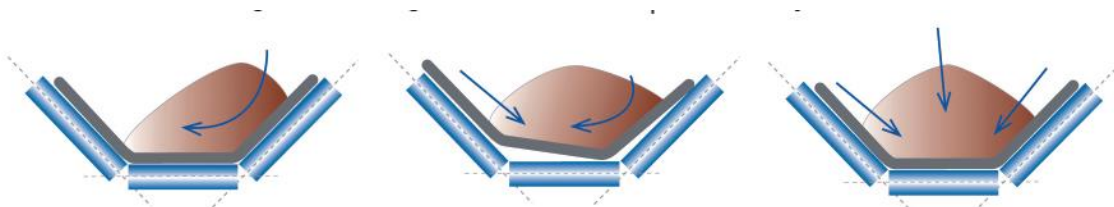


Figure 2: Self-centring mechanism of Autostable [1] & [2]

The construction of Autostable and especially the width of center part is individually adapted to the dimensions of the conveyor's troughed idlers.

2 Requirements for conveyor design

Not every conveyor can be equipped with Autostable. The limitation for that is in most cases shape of idler stations. The best self-centering effect results on the conveyors with 3-roll stations in the carrying strand. The troughing angle has a big influence on a centering force, the higher the troughing angle, the higher the centering force. That's why recommend troughing angle is min. 35° and the best self-centering effect results with a troughing angle of $> 45^\circ$.

The self-centering function of Autostable provide additional stability in horizontal curves (Figure 3). This provides the possibility to realize conveyor routing with smaller curve radii.

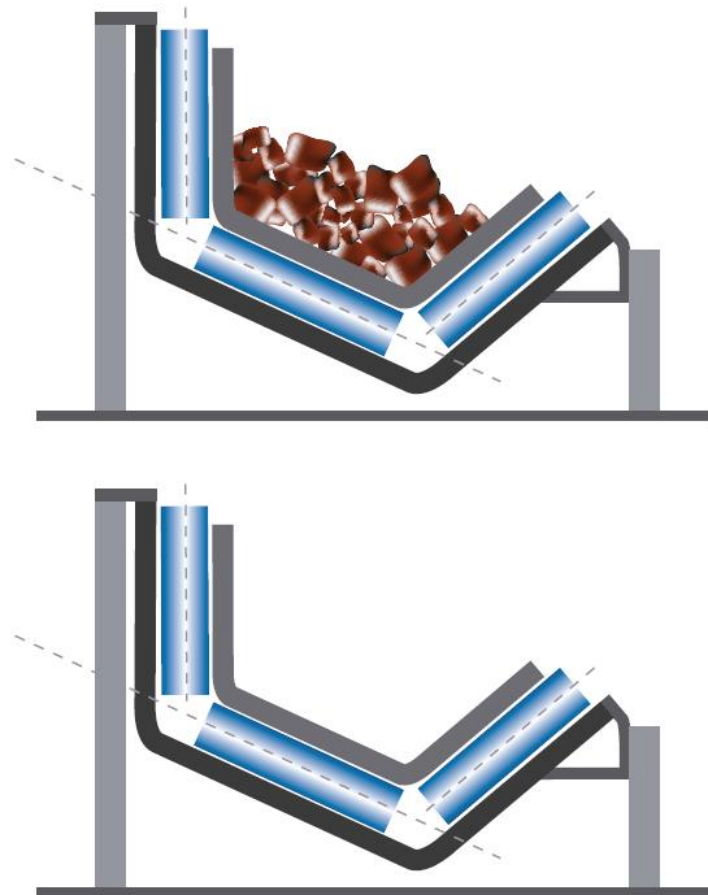


Figure 3: Autostable in the horizontal curve (loaded and empty) [1] & [2]

Elimination of lateral movement allows to install a wider Autostable on the same structure without any modifications providing possibility to increase output of conveyor (Figure 4).



Figure 4: Autostable with increased conveyor belt width

3 Autostable belt with wide range of carcass types

Sempertrans produces a wide range of Autostable conveyor belts with different type of the carcass (Figure 5):

- Autostable M with elastic steel cables

This product combines the Autostable functionality with all advantages of a carcass made of high elastic steel cables. Depending on the application, either special 4x7 or 7x7 steel cords from our Metalcord range are used in the longitudinal direction.

- Autostable ST with classic steel cables

This product can be used for high nominal conveyor belt strengths or extreme widths, either 7x7 or 7x19 steel cords from our Sempercord range.

- Autostable T with Polyester or Polyamid carcass

It uses the Multitrans carcass as well as cross rigid reinforcements.

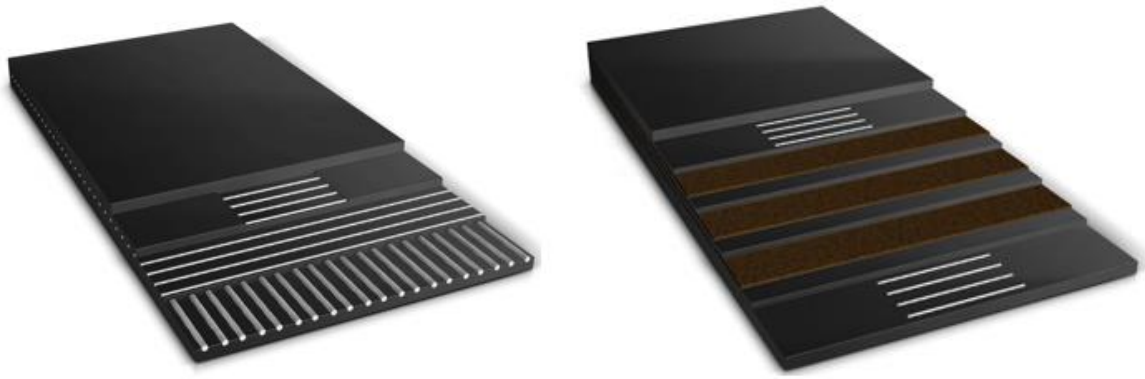


Figure 5: Autostable M, Autostable ST and Autostable T constructions [1] & [2]

Summary

Autostable is designed for a large spectrum of applications – from hard rock mining to the cement, port, steel industries and much more. This unique self-centering conveyor belt was originally developed by Sempertrans over 30 years ago with an innovative design which allows no transversal movement, avoiding all mistracking-related damages to the conveyor belt or the conveyor structure. Depending on installation Autostable can last up to 3 time longer compared to traditional flat conveyor belts and significantly reduce maintenance cost. Autostable makes it possible to increase the volume flow and works in curved conveyors as well as reversible installations.

Quellenverzeichnis:

- [1] Sempertrans Productsheet Autostable, 2017
- [2] Sempertrans Product catalogue, 2019

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

High Energy Polyester als Alternative für Textil-Fördergurte

Donald Brown



Donald Brown
Continental ContiTech
13601 Industrial Parkway
Marysville, Ohio, USA 43040

High Energy Polyester als Alternative für Textil-Fördergurte

Vorgestellt wird ein alternativer Gewebezugträger zum allseits bekannten EP oder PP (Polyester/Polyamid oder Polyamid/Polyamid) Hybridgewebe für Ein- und Mehrlagen-Textil-Fördergurte.

1 Einleitung

Das Energie- und Ressourcenmanagement ist zu einem immer wichtigeren Thema geworden, da die Welt den Klimawandel angeht und sich um CO₂-Neutralität bemüht. Der Bergbau und die Industrieanwendungen sind nach wie vor von grundlegender Bedeutung für unsere sich wandelnde Wirtschaft und setzen zur Erreichung von ambitionierten Nachhaltigkeitszielen verstärkt auf besonders umweltfreundliche Technologien bei der Gewinnung und Förderung. Im Vergleich zu anderen Technologien sind Gurtförderer bei der Förderung großer Massen systemisch bedingt ohnehin sehr energieeffizient und ressourcenschonend, dennoch lässt sich das System Gurtförderer weiter optimieren.

2 Bekenntnis zur Nachhaltigkeit

Continental hat sich dem Pariser Abkommen von 2015 verpflichtet. Das heißt, die globale Erwärmung wird auf unter 2 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter begrenzt. Um dies zu erreichen, muss die Weltwirtschaft kohlenstoffneutral werden.

Umweltschutz ist ein integraler Bestandteil der Unternehmenspolitik von Continental. Ökonomie und Ökologie sind dabei kein Widerspruch, sondern Basis für nachhaltige Wertschöpfung. Im Zentrum der Continental Umweltstrategie stehen Klimaschutz und Energieeffizienz. Alle unsere Produkte sollen aktiv zur Schonung unserer Umwelt und unserer Ressourcen beitragen. In der Fertigung wollen wir den Energie- und Wasserverbrauch, die CO₂-Emissionen und das Abfallaufkommen kontinuierlich senken, die Verwertungsquote betrieblicher Abfälle wollen wir weiter steigern.

Deshalb umfasst das Continental-Umweltmanagement den gesamten Lebenszyklus unserer Produkte, von der Forschung und Entwicklung über Einkauf, Logistik und Fertigung bis hin zur Nutzung und Verwertung. Ziel ist es, angesichts knapper werdender Rohstoffe Produkte und Lösungen zu entwickeln, die weniger Energie verbrauchen und unsere natürlichen Ressourcen schonen – sowohl bei der Fertigung als auch bei der Nutzung unserer Produkte.

Neben weiteren Maßnahmen, das System Fördergurt nachhaltig zu machen, sind die wesentlichen Elemente auf dem Weg dorthin die Optimierung oder der Austausch der verwendeten Materialien. Hierbei liegt der Fokus auf dem Austausch des bekannten EP/PP-Gewebes durch ein reines Polyestergewebe, welches aber dieselben Eigenschaften wie herkömmliches Polyester-/Polyamidgewebe aufweist.

3 Polyamid in Fördergurten mit Gewebezugträgern

Ein Textilfördergurt ist ein Verbundbauteil, das typischerweise aus einem Zugträger und dem ihn umgebenden Gummi besteht. Dem Zugträger kommt dabei besonderes Augenmerk zu, muss er doch allen im Betrieb auftretenden Kräften standhalten, sich verarbeiten lassen und eine Anbindung an das Gummi gewährleisten. International kommen Normen wie die ISO14890 oder die DIN 22102 zur Anwendung, die den Aufbau des Gurtes beschreiben. Ein Hybridgewebe aus Polyestermaterial in Zugrichtung (Kettrichtung) und Polyamidgarn in Querrichtung (Schussrichtung) stellt hierbei den am meisten gewählten Typen dar. Polyester bietet dabei die Eigenschaft hoher Zugkräfte bei vergleichsweise geringen Dehnungen, wohingegen Polyamid (im engl. Sprachraum als Nylon bezeichnet) flexibler ist, da es bei geringen Kräften eine höhere Dehnung ermöglicht. Dies ist besonders vorteilhaft für die Muldungsfähigkeit eines (unbeladenen) Fördergurtes. Darüber hinaus wird ein Fördergurt mit EP-Gewebe als widerstandsfähiger bei mechanischer Beaufschlagung gesehen.

4 Der Nachteil von Polyamid

Der Nachteil von Polyamid lässt sich grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilen.

Im Vergleich mit Polyamid wird für die Herstellung von einem Kilogramm Polyester etwa 17 % weniger Energie verbraucht. Dies führt zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes während der Garnherstellung und ergibt ein geringeres global warming potential (GWP) – eine Kennzahl, die einen Vergleich der Auswirkungen verschiedener Gase auf die globale Erwärmung ermöglicht. Für Polyamid liegt das GWP bei 9,91; für Polyester ist es 8,25.

Der zweite Aspekt betrifft die globale Beschaffungssituation für Polyamid und die damit einhergehenden Preissteigerungen. Die Preise für Polyamidgarn steigen weiter im zweistelligen Prozentbereich. Es gibt weltweit zehnmal mehr Kapazitäten für Polyester, was bedeutet, dass sowohl der Preis als auch das Angebot stabiler sind als bei herkömmlichem Polyamid. Eine erhöhte Lieferkapazität führt zu Verbesserungen bei der Beschaffung. Die Kunden profitieren von einer stabileren Preisgestaltung und letztendlich von einer stabileren Produktversorgung, während die Leistung des Materials der von Nylon entspricht.

Allein in den Jahren von 2017 bis heute gab es in der Beschaffungskette für Polyamid nicht weniger als neun bekannte Force-Majeure-Fälle. Einer der wohl bekanntesten ereignete sich im September 2021, als ein Feuer die Produktion eines Garnherstellers in Oberburg lahmlegte und damit einmal mehr aufgezeigt wurde, wie anfällig und sensibel die globale Versorgung ist.

5 Abhilfe durch HEP – High Energy Polyester

HEP ist ein von Continental geschaffenes Akronym, das für High Energy Polyester steht. Obwohl HEP zu 100 % ein Polyestergarn ist, so hat es dennoch gänzlich andere Eigenschaften als herkömmliches Polyester. Mit HEP ist es gelungen, einen Werkstoff zu erschaffen, der die genannten Nachteile des Polyamids nicht hat, aber die physikalischen Eigenschaften von Polyamid erreicht. HEP ist „nylon-like“ und ermöglicht im Fördergurt den

Einsatz eines reinen Polyesterzugträgers, mit gleichwertigen Eigenschaften wie ein Fördergurt mit Polyamid Material in Schussrichtung.

Bereits in 2019 wurde mit der Entwicklung dieses speziellen Materials in Zusammenarbeit mit einigen unserer Lieferanten gestartet. Nach umfangreichen Versuchen entstand das heutige HEP Material, was in einem Feinheit-Bereich von 1000 bis 3000 dtex verfügbar ist. Bei der Entwicklung wurde darüber hinaus großes Augenmerk auf die Eigenschaften nach thermischer Belastung gelegt, wie Bild 1 zeigt.

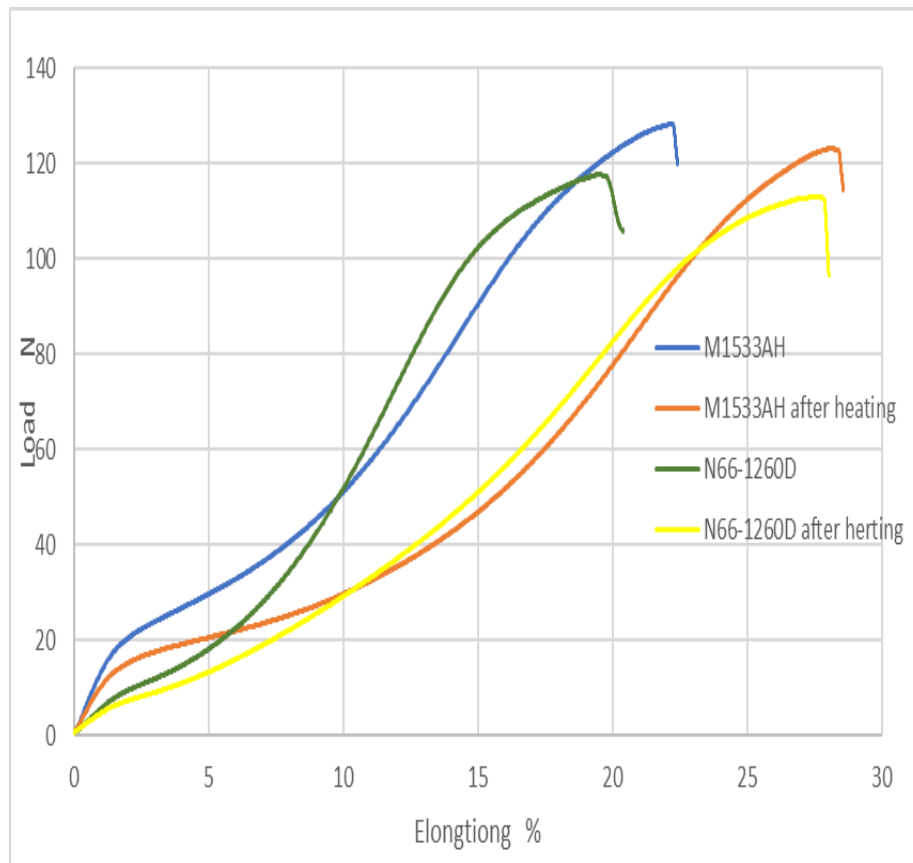


Bild 1: M1533AH (HEP) im Vergleich zu N66-1260D (Polyamid)

Nach erfolgter Freigabe von HEP in zahlreichen Labor- und Produktionsversuchen wurden die ersten Fördergurte mit diesem neuen Zugträgermaterial in 2021 ausgeliefert. Die Gurte und Kunden wurden intensiv durch das Technical Consulting der ContiTech Conveying Solutions betreut, dabei sind die Anwendungen sehr unterschiedlich: von schmalen Gurten für die Holzindustrie über Bergbau-Anwendungen bis hin zu Asphaltbändern.

Nach Auswertung aller Daten und Kundenaussagen konnte den Gurten mit HEP auch im Feldeinsatz die Tauglichkeit mit gleichen Eigenschaften wie bei Gurten mit EP Karkasse attestiert werden.

6 Gurtbezeichnung und Produkteigenschaften

Continental Fördergurte beinhalten in der Gurtbezeichnung immer einen Hinweis darauf, welcher Zugträgertyp eingesetzt wurde (Beispiel: ContiFlex 1200 EP 400/3 6/2 Defender).

In der Testphase der mit einem HEP Zugträger produzierten Fördergurte werden diese als ContiFlex 1200 EEx 400/3 6/2 Defender bezeichnet. Das spezielle High Energy Polyester wird folglich mit Ex umschrieben. Hierdurch wird sichergestellt, dass durch das große E die Zuordnung Polyester möglich ist, mit dem kleinen x wird aber kenntlich gemacht, dass es sich nicht um das normale Standard-Polyester handelt.

Derzeit wird an einem generellen Konzept für die Bezeichnung der Gurte für die Serienproduktion gearbeitet. Dieses ist aber noch nicht abgeschlossen und wird daher zu einem späteren Zeitpunkt publiziert.

Die nachfolgenden Bilder 2 bis 4 geben einen Überblick über die Prüfwerte an einem Gewebegurt der Festigkeit 400/3 mit den unterschiedlichen Zugträgern.

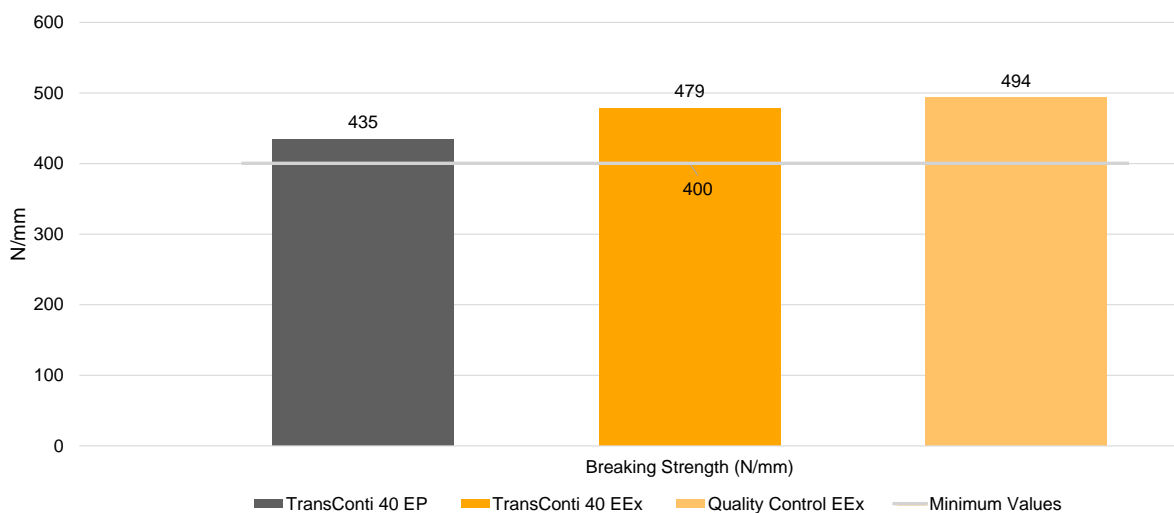


Bild 2: Vergleich der Gurtbruchkräfte nach DIN EN ISO 283

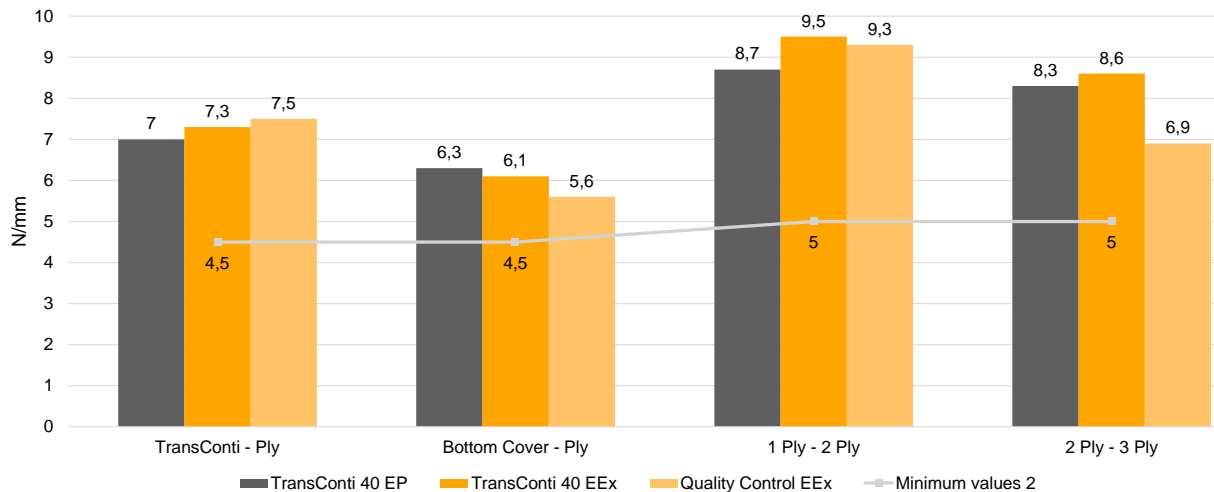


Bild 3: Vergleich der Haftung nach DIN 53530

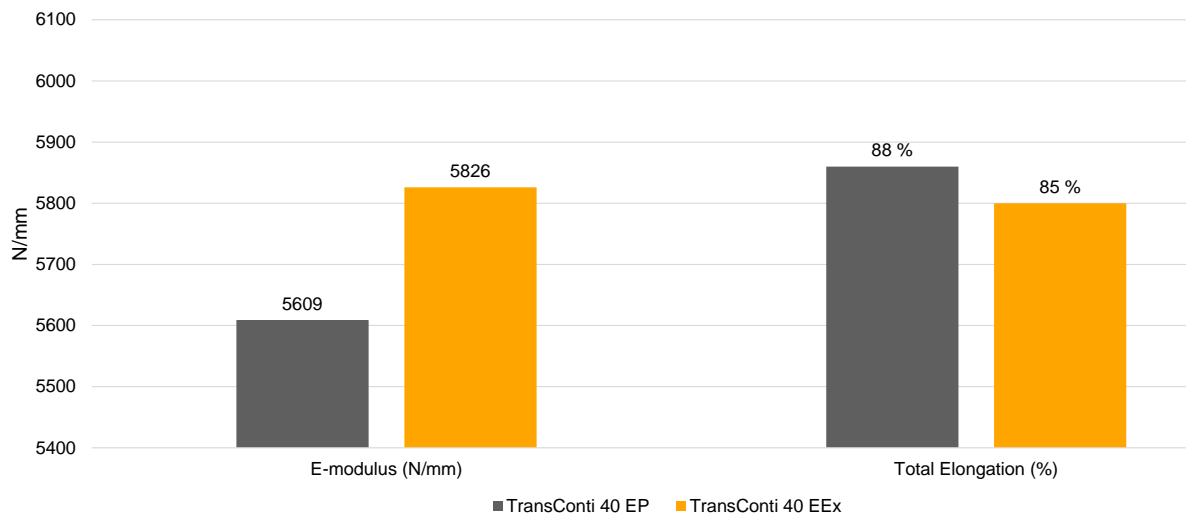


Bild 4: Vergleich von E-Modul und Dehnung

Aus obenstehenden Diagrammen wird ersichtlich, dass die gemessenen physikalischen Eigenschaften auf demselben Niveau liegen und somit kein Unterschied zwischen Polyamid und HEP vorhanden ist.

Ein weiterer, messbarer und für den Anwendungsfall wichtiger Aspekt eines Fördergurtes ist die Muldbarkeit im unbeladenen Zustand, insbesondere bei schmalen Fördergurten mit dickeren Deckplatten.

Auch auf dieses Designkriterium wurde bei der Materialauslegung geachtet. Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Muldungsmessung für einen 400/3 Gurt in verschiedenen Gurtbreiten. Es ist ersichtlich, dass die Muldbarkeit mit HEP in Schussrichtung nicht nur die Mindestanforderungen erfüllt, sondern dem Industriestandard-Gewebe EP ebenbürtig ist. Diese Laborergebnisse spiegeln ebenfalls das Gurtlaufverhalten im Anwendungsfall wider.

To ensure sufficient flexibility at 20-, 35-, and 45-degree idlers

Inclination of side idler rollers	Minimum values of ratio deflection F/L
20°	0.08
25°	0.1
30°	0.12
35°	0.14
40°	0.16
45°	0.18
50°	0.2
55°	0.23
60°	0.26

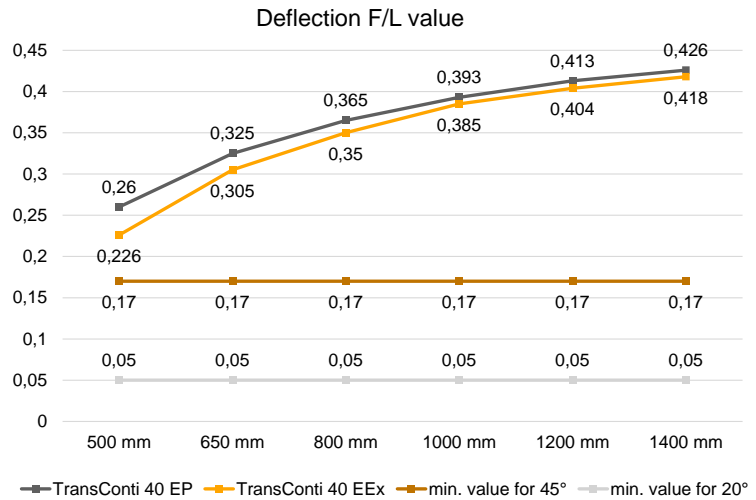


Bild 5: Vergleich der Muldungsmessung nach ISO 703

Neben dem hier angesprochenen EP Gewebe, welches durch HEP substituiert werden kann, ist es natürlich auch möglich, andere Gewebetypen auf HEP umzustellen. Es wurden bereits PP Gewebe durch ExEx ersetzt, gleichwohl sind bereits auch Gewebe-Breaker aus HEP verfügbar.

Darüber hinaus gibt es auch keine Einschränkungen hinsichtlich der Webart (Bild 6), es können alle gebräuchlichen Webarten umgestellt werden, von der einfachen Leinwandbindung bis hin zur komplexen dual layer twill Webung als straight warp Ausführung.

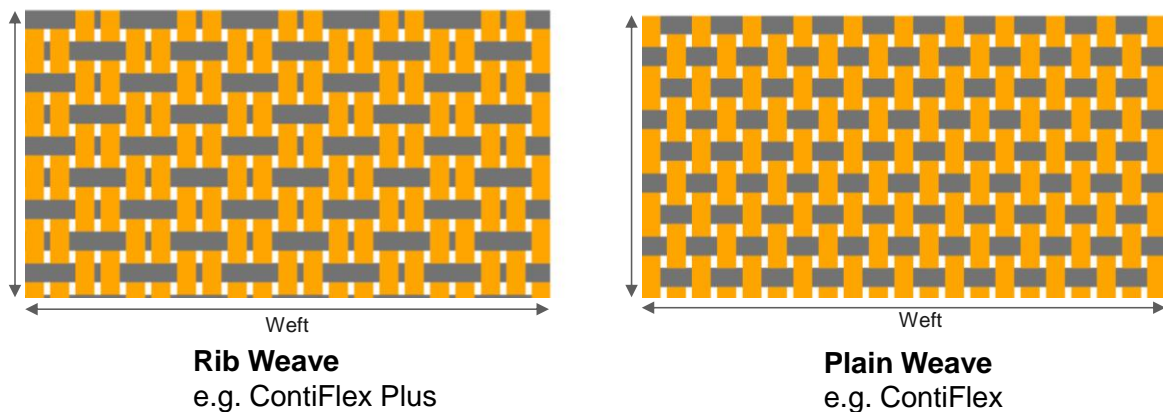


Bild 6: Unterschiedliche Webarten

7 Weitere Entwicklungen mit HEP

Das Gewebe mit High Energy Polyester, wie es hier beschrieben wurde, ist nur ein erster Schritt bei den Gewebezugträgern in Richtung Nachhaltigkeit. Continental arbeitet bereits daran, eine Variante von HEP zu entwickeln, die vollständig aus recycelten Plastikflaschen besteht, um den gesetzten Klimaschutzziele näher zu kommen. Zugleich kann HEP-Gewebe bereits heute mit dem resorcinol-formaldehydfreien Haftvermittlungs-Dip COKOON ausgerüstet werden. Auch dies ist ein Beitrag auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit.

Zusammenfassung

High Energy Polyester ist mehr als nur eine Alternative für den Ersatz als Zugträgermaterial in Textilfördergurten. Die globale Versorgung mit Polyester ist deutlich sicherer, da es weltweit verteilt um den Faktor 10 mehr Lieferanten gibt. Durch den reduzierten Energieeinsatz bei der Herstellung von Polyestergeräten lässt sich je produziertem Kilogramm der CO₂ Ausstoß um 17 % senken, dabei werden alle Anforderungen und Produkteigenschaften sicher erreicht.

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Flammwidrige und selbstverlöschende Fördergurte

Detlev Kalinski

Chris Jongkind



Detlev Kalinski

Chris Jongkind

DUNLOP CONVEYOR BELTING

Oliemolenstraat 2

9203 ZN Drachten

Flammwidrige und selbstverlöschende Fördergurte

Jede Sekunde zählt - Sind Ihre hitzebeständigen Fördergurte so sicher, wie sie sein sollten?

Wenn ein Förderband nicht entsprechend den Angaben des Herstellers funktioniert, weil es vorzeitig verschleißt oder durch einen eingeklemmten Fremdkörper zu leicht reißt, ist das Risiko für eine ausreichende Standzeit relativ gering. Wenn jedoch ein schwerentflammbarer Fördergurt Feuer fängt und nicht gemäß den Herstellerangaben funktioniert, können die Folgen buchstäblich über Leben und Tod entscheiden.



1 Kosten vor Sicherheit?

Es wäre schön zu glauben, dass niemand so unverantwortlich wäre, die Kosten über die Sicherheit zu stellen und schwerentflammbare Fördergurte zu kaufen, von denen er vermutet, dass sie nicht ausreichend hitzebeständig sind. Leider passiert das aber gar nicht so selten. Meine Kollegen bei Dunlop und ich haben diese Art von Verhalten im Laufe der Jahre viele Male erlebt. Vielleicht liegt es daran, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gurt Feuer fängt, relativ gering ist, so dass das Risiko als sehr gering eingeschätzt wird. Ich übertreibe, wenn ich sage, dass wir von Situationen wissen, in denen Menschen dadurch auf tragische Weise ums Leben gekommen sind.

Zugegebenermaßen ist die Auswahl von schwerentflammbaren Gurten nicht immer einfach. Die Sicherheitsklassifizierungen und Normen für Fördergurte können sehr verwirrend sein, und gleichzeitig sind viele Fördergurthersteller und Händler eher daran interessiert, einen Auftrag zu gewinnen als das sicherste Band zu liefern. In den nächsten Minuten werde ich versuchen, mehr über die verschiedenen Brandschutzklassifizierungen von Fördergurten zu erklären.

Zudem werde ich darlegen und erklären, warum es sehr große Unterschiede im Brandschutzniveau von Gurten verschiedener Hersteller geben kann, obwohl sie technisch gesehen die gleichen Sicherheitspezifikationen erfüllen müssten.

2 Kein Fördergurt ist feuerfest

Die überwiegende Mehrheit der im Schüttgutumschlag verwendeten Fördergurte bestehen aus einer mehrlagigen Gummi-Gewebekonstruktion. Zunächst ist zu bedenken, dass Fördergurte aus Gummi niemals völlig feuerfest sein können, Gummi ist brennbar (Bild 1). Zweitens sind die für die Karkasse von mehrlagigen Fördergurten verwendeten Gewebe meist bestehend aus Polyester und Nylon, welche praktisch keinen Feuerwiderstand aufweisen. Folglich wird jeder Gurt brennen, wenn er einer offenen Flamme ausgesetzt wird, die ausreichend stark genug ist, um diesen zu entzünden.



Bild 1: Gummifördergurte können nie völlig feuerfest sein.

Die beiden am meisten verwendeten Bezeichnungen für Fördergurte im Zusammenhang mit der Brandsicherheit sind "feuerhemmend" und - am häufigsten - "feuerbeständig". In Wahrheit wäre eine bessere und genauere Beschreibung "selbstlöschend". Denn die Fähigkeit eines Gummifördergurtes, Feuer zu "widerstehen", wird durch die Zugabe spezieller Chemikalien und Zusatzstoffe zur Gummimischung während des Mischvorgangs erreicht. Sobald das Gummi vulkanisiert ist und sich entzündet, setzt es Gase frei, welche das Feuer effektiv ersticken (löschen), indem sie den Flammen den notwendigen Sauerstoff entziehen. Ich werde gleich erklären, warum die Geschwindigkeit und Wirksamkeit dieser chemischen Reaktion so wichtig sind.

Je nach geforderter Feuerbeständigkeit sind unterschiedliche Rezepturen oder "Cocktails" aus Gummimischungen erforderlich. Die chemischen Zusätze sind jedoch sehr kostenintensiv. Wenn also minderwertige oder unzureichende Mengen dieser Zusätze verwendet werden, um den Verkaufspreis so günstig wie möglich zu halten, ist die Fähigkeit des Gurtes, selbst zu verlöschen, langsamer und weniger effektiv als notwendig sein sollte. Dies ist ein wesentlicher Grund für die gravierenden Unterschiede in der Schwerentflammbarkeit von Fördergurten zwischen den einzelnen Gurtherstellern.

Wie ich bereits erwähnt habe, ist die Zeit, die ein Fördergurt benötigt, um sich selbst zu löschen, aus zwei Gründen von enormer Bedeutung. Erstens sind Fördergurte äußerst effektiv, wenn es darum geht, Feuer zu transportieren (Bild 2). Zweitens setzen brennendes Gummi und die synthetischen Materialien wie Polyester und Nylon einen gefährlichen, äußerst dichten Rauch frei, welcher Zyanid, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Butadien- und Styrolprodukte enthält. Das bedeutet, je schneller das Feuer gelöscht wird, desto weniger Rauch wird erzeugt, so dass buchstäblich jede Sekunde zählt.



Bild 2: Fördergurte transportieren Feuer extrem schnell - jede Sekunde zählt.

3 Normen und Prüfverfahren für übertägige Anwendungen

Die Grundlage der meisten Prüfungen für Gurtbänder, die in normalen industriellen Anwendungen eingesetzt werden, ist die Norm EN ISO 340, welche mit den Klassifizierungen der Norm EN 12882 über die Sicherheitsanforderungen an die elektrische Leitfähigkeit und Schwerentflammbarkeit von übertägigen installierten Förderbandanlagen für allgemeine Zwecke aufgenommen wurde. Diese Normen unterscheiden zwischen einer Schwerentflammbarkeit mit den äußeren Gummideckplatten, die der Klasse 2A (Klasse K) entspricht, und der Schwerentflammbarkeit mit und ohne Deckplatten, die der Klasse 2B (Klasse S) entspricht.

Die Bedeutung von "mit und ohne Gummideckplatten" liegt darin, dass der Oberflächenverschleiß allmählich die Menge an schwerentflammbarem Gummi verringert, welche die innere brennbare Gewebekarkasse schützt. Obwohl in der aktuellen EN ISO 340 nicht mehr darauf Bezug genommen wird, werden landläufig im Markt immer noch die Klassen "K" für die Prüfung mit Abdeckungen und "S" für die Prüfung mit und ohne Abdeckungen verwendet, welches jedoch veraltet ist und nicht mehr verwendet werden sollte.

3.1 EN/ISO 340-Prüfung

Bei der Prüfung nach EN/ISO 340 werden sechs einzelne Gurtproben einer offenen Flamme ausgesetzt, die sie zum Brennen bringt (Bild 3). Die Flammenquelle wird dann entfernt und die Brenndauer (Dauer der Flamme) des Prüfstücks aufgezeichnet. Nach dem Entfernen der Flamme wird das Prüfstück für eine bestimmte Zeit mit einem Luftstrom beaufschlagt. Die Flamme darf sich nicht wieder entzünden.



Bild 3: Prüfung nach ISO 340

Anschließend wird die Zeit gemessen, welche das Gurtmuster benötigt, um nach dem Entfernen der Flamme von selbst zu verlöschen. Die Dauer der fortgesetzten Verbrennung (sichtbare Flamme) sollte bei jeder Probe weniger als 15 Sekunden betragen, wobei die Gesamtdauer für jede Gruppe von sechs Tests maximal 45 Sekunden betragen darf. Dies bedeutet, dass die durchschnittlich zulässige Zeit pro Probe 7,5 Sekunden beträgt. Dieser Faktor ist von entscheidender Bedeutung, da er die Entfernung bestimmt, über die das Feuer von einem laufenden Band getragen werden kann.

Selbst wenn ein Hersteller angibt, dass sein schwerentflammbarer Gurt die ISO 340-Prüfung bestanden hat, sollte der Käufer dennoch Vorsicht walten lassen. Ein typisches Förderband kann innerhalb der 15 Sekunden, die für ein Bandmuster zum Bestehen der Prüfung zulässig sind, leicht mehr als 40 Meter zurücklegen, was eine potenziell sehr gefährliche Entfernung darstellt. Aus diesem Grund fordern wir bei Dunlop einen selbst vorgegebenen Standard für die maximale Zeitspanne von nur einer Sekunde an, in der die Bandprobe erlöschen muss. Das ist mehr als sechsmal so schnell, wie die vorgeschriebene Norm fordert, aber nur so kann ein Sicherheitsniveau erreicht werden, welches wir für notwendig halten.

3.2 Die Wahl des richtigen Sicherheitsniveaus

Die Festlegung des richtigen Niveaus oder Standards für die Schwerentflammbarkeit von Förderbändern, die unter freiem Himmel betrieben werden, ist relativ einfach. EN 12882 ist die Norm für Sicherheitsanforderungen an Fördergurte für den allgemeinen Gebrauch. Die

wichtigste Sicherheitsanforderung ist die EN 12882 Kategorie 1, welche lediglich verlangt, dass der Gurt antistatisch ist und der internationalen Norm EN ISO 284 entspricht. Ich werde später noch einmal separat auf das Thema antistatische Gurte zurückkommen.

Für die überwiegende Mehrheit der Anwendungen sind die Anforderungen der EN 12882 2A (Klasse K) oder 2B (Klasse S) vollkommen ausreichend. Wie ich bereits beschrieben habe, verlangt die Klasse 2A, dass der Gurt die ISO 340-Prüfung mit intakten Deckplatten beim Probestück bestehen muss, während hingegen die Klasse 2B verlangt, dass das Probestück mit entferntem oberem und unterem Deckgummi bestehen muss. Sowohl die Klasse 2A als auch die Klasse 2B erfüllen alle die antistatischen Anforderungen der ISO 284.

Der beste Weg, um zwischen Klasse 2A und Klasse 2B zu entscheiden, ist die Betrachtung des beförderten Materials. Für mäßig abrasive Materialien, wie z. B. Getreide, ist die Klasse 2A in der Regel völlig ausreichend (Bild 4). Ist das Material jedoch sehr abrasiv und neigt dazu, die obere Gummideckplatte schnell zu verschleifen, ist es am sichersten, die Klasse 2B zu wählen.



Bild 4: Die Klasse 2A ist in der Regel für mäßig abrasive Materialien wie z. B. Getreide vollkommen ausreichend.

Für ölhaltige Materialien wie Holzspäne und Biomasse gibt es Gummimischungen, die eine kombinierte Schwerentflammbarkeit im Zusammenspiel von Abrieb- und Ölbeständigkeit aufweisen. Dies ist ein weiteres wichtiges Merkmal bei der Entscheidung für die richtige Bestimmung eines schwerentflammbaren Fördergurtes, so dass es sehr wichtig ist, bei Anfragen bei Herstellern und Gurtlieferanten eine genaue Angabe zu machen, was benötigt wird.

4 Umgebungen mit brennbarem Staub und Gas

In Umgebungen, in denen Kohlenstaub, Dünger, Getreide oder andere potenziell brennbare Materialien wie Biomasse vorhanden sind, ist es wichtig, dass der Fördergurt keine statische Elektrizität erzeugen kann, welche die Atmosphäre entzünden könnte. Die Förderbänder müssen in der Lage sein, statische Elektrizität durch den Metallrahmen der Bandanlage zur Erde abzuleiten, damit sich keine statische Aufladung bilden kann. Am sichersten ist es, wenn alle Gurte antistatisch sind und somit der internationalen Norm EN/ISO 284 entsprechen. Das bedeutet, dass sie alle in den nach ATEX 95 (Richtlinie 94/9/EG) klassifizierten Zonen eingesetzt werden können. Ich freue mich, sagen zu können, dass dies für alle Fördergurte gilt, die wir bei Dunlop herstellen, mit Ausnahme von Gleitgurten, welche z. B. in Sägewerken oder in der Recyclingindustrie verwendet werden, weil sie über keine unteren Gummidecken verfügen.

4.1 Umgang mit Biomasse

Eine der größten Gefahren bei Förderbändern, die Biomasse transportieren, ist die Staubemission und die Vermeidung von Explosionen. Bei der Herstellung von Biomasse-Holzpellets, Holzspänen und ähnlichen nachwachsenden Rohstoffen werden die Materialien kontinuierlich abgebaut. Dabei entsteht ein hoher Anteil an trockenem, brennbarem Staub, der durch statische Elektrizität, welche durch Abrieb innerhalb des Fördersystems entsteht, entzündet werden kann (Bild 5). Nur eine kleine Zündquelle kann ausreichen, um hier einen Brand oder eine Explosion freizusetzen, da nur eine Zündenergie von 17 Megajoules benötigt wird.



Bild 5: Staub aus Biomasse kann zur Selbstentzündung neigen.

Biomassestaub kann auch zur Selbstentzündung neigen, insbesondere wenn das Material feucht geworden ist. Dabei kann es zu einer chemischen Reaktion kommen, die zur Selbsterhitzung und zur sogenannten "Entgasung" (Kohlendioxid-, Kohlenmonoxid- und Methanemissionen) führt.

Wegen der erhöhten Gefahr der Selbstentzündung wird der Einsatz von eingehausten, mit Abdeckungen versehenen Bandanlagen immer üblicher. In geschlossenen Umgebungen besteht aufgrund des bereits erwähnten gefährlichen Rauchs ein erhöhtes Risiko für Menschenleben. Aus diesem Grund ist die EN 12882 Klasse 4A in der Regel die beste Wahl für Fördergurte, welche in geschlossenen oder überdachten Umgebungen betrieben werden, da sie zusätzlich zur EN/ISO 340-Prüfung eine strengere Brandprüfung nach EN 12881-1 Methode A, C oder D beinhaltet (Bild 6).



Bild 6: Die Klasse 4A erfordert zusätzlich zur Prüfung nach EN/ISO 340 die Prüfung nach EN12881-1 Methode A, C oder D.

4.2 Prüfen Sie die Herkunft

Der Großteil der in Europa verwendeten Fördergurte wird aus Südostasien, meist aus China, importiert. Wie bei praktisch allen anderen Märkten basiert die Strategie auf der Herstellung von Massenware mit einem kaum akzeptablen (und oft minderwertigen) Qualitätsstandard zu stark subventionierten Preisen. Fairerweise muss man hier sagen, dass das Hauptaugenmerk meist auf "normalen" Gurtqualitäten liegt, welche den Großteil der benötigten Fördergurte im Markt ausmachen.

Dies mag ein Grund dafür sein, dass die stichprobenartigen Labortests von importierten Fördergurten, welche wir regelmäßig in unserem Labor in den Niederlanden durchführen, immer wieder gravierende Mängel in Bezug auf die Brandsicherheit aufzeigen. Bei einem solchen Test wurde vor kurzem ein besonders gefährlich niedriges Niveau der Schwerentflammbarkeit eines Importfabrikates festgestellt. Obwohl die Dauer des fortgesetzten Brennens (sichtbare Flamme) maximal 15 Sekunden pro Probe mit einer

maximalen Gesamtdauer von 45 Sekunden für sechs Proben betragen sollte, benötigte eine Reihe von Proben eines in China hergestellten schwerentflammbaren Fördergurtes ganze 102 Sekunden.

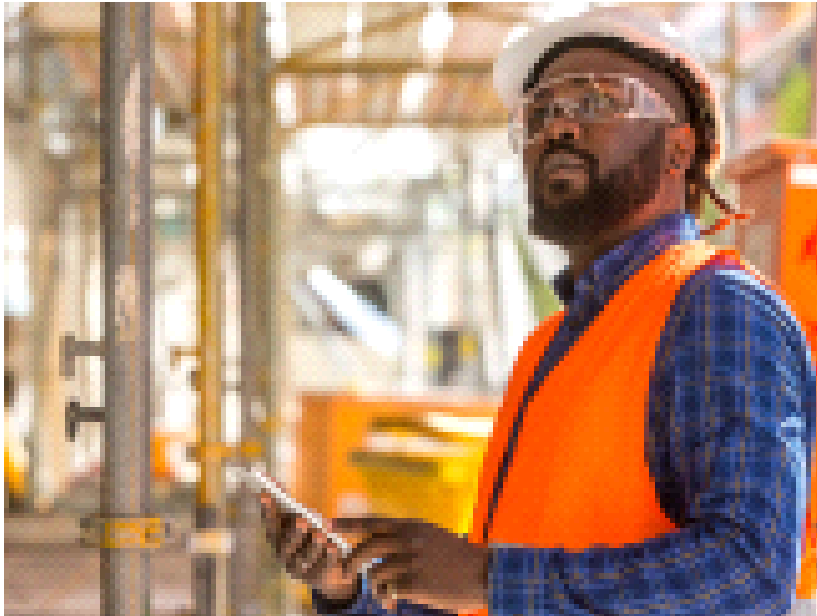


Bild 7: Zögern Sie nicht, sich von einem Experten beraten zu lassen.

Bei feuerfesten Fördergurten kann es wirklich um Leben und Tod gehen. Meiner Meinung nach ist es absolut notwendig zu wissen, woher der Fördergurt stammt. Kann ich diesem Hersteller oder Fabrikat wirklich vertrauen, dass es die Anforderungen voll erfüllt und keine Zweifel hinsichtlich der Sicherheitsstandards offenlässt? Wir können Ihnen garantieren, dass wir als Hersteller von Fördergurten keinerlei Abstriche hinsichtlich der Sicherheitsforderungen hinnehmen und mit einer erstklassigen Qualität Ihren Anforderungen gerecht werden. Wir verstehen uns als einen äußerst verantwortungsbewussten Hersteller von Gummifördergurten, welcher für die Qualität, aber auch z. B. für Anforderungen der Schwerentflammbarkeit keinerlei Kompromisse eingeht. Sollten Fragen oder Unklarheiten bei einem Anwendungsfall bestehen oder auftreten, nehmen Sie unbedingt unsere technische Unterstützung und Beratung in Anspruch. Gern unterstützen wir Sie in der Auswahl und Bestimmung des richtigen Gurttyps (Bild 7).

Höherer Preis? Mit ziemlicher Sicherheit ja, aber schwerentflammbare Fördergurte, die zu einem deutlich niedrigeren Preis angeboten werden, sollten die Alarmglocken läuten lassen, so wie es auch bei einem echten Brand der Fall wäre. Wie bei fast allem im Leben bekommt man das, wofür man bezahlt. Die Kosten für einen schwerentflammbaren Fördergurt, welcher nicht schnell genug oder vielleicht gar nicht verlöscht, sind kaum zu kalkulieren. Es kommt wirklich auf jede Sekunde an.

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Funkenlöschanlagen Nachhaltige Instandsetzung durch intelligente Sensorik

Michael Mehlhorn

Robin Lenz

Fagus  GreCon

Dr. Michael Mehlhorn
Robin Lenz, M. Eng.
Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG
Hannoversche Straße 58
31061 Alfeld

Funkenlöschanlagen – nachhaltige Instandsetzung durch intelligente Sensorik

Die Kombination aus Funkenmeldern und Löschautomatiken wird seit mehr als vier Jahrzehnten erfolgreich zur sicheren Detektion und effizienten Eliminierung von hochmobilen Zündquellen zum Beispiel in der pneumatischen Förderung eingesetzt und hat seitdem unzählige Industrieanlagen und Menschenleben vor Brand- und Explosionsereignissen geschützt. Anhand der Physik der Infrarotstrahlung, gezielter Feldmessungen und Simulationen können Zündquellen im pneumatischen Transport in vier Typen eingeteilt und deren Detektionssicherheit mit etablierten Sensormaterialien auch bei hohen Beladungen beschrieben werden. Zusätzlich werden intelligente Sensoren eingesetzt, um Veränderungen der Soll-Performance von Funkenlöschanlagen bereits bei geringen Abweichungen zu bemerken und vorbeugende Gegenmaßnahmen ergreifen zu können.

1 Herausforderungen im vorbeugenden industriellen Brandschutz

In vielen Industriezweigen wie der Holzverarbeitung, der Lebens- und Futtermittelproduktion, der Kunststoff- oder Metallverarbeitung fallen brennbare Stäube oder Schüttgüter an. Bei der Verarbeitung können zum Beispiel durch Reibungswärme potenziell gefährliche Zündquellen entstehen. Beim pneumatischen Transport werden diese Zündquellen in andere Produktionsbereiche transportiert und können dort Brände oder sogar Explosionen verursachen. Vorbeugender Brandschutz beginnt bei der Prozessgestaltung und der regelmäßigen Wartung, die viele dieser Zündquellen reduzieren können (vgl. Bild 1).

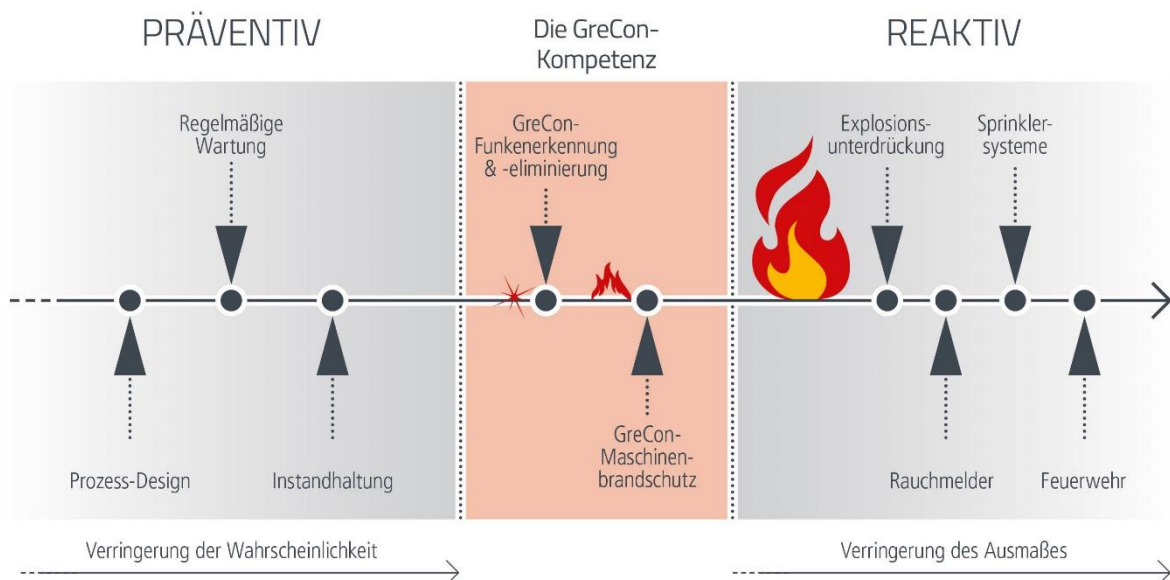


Bild 1: Sensorbasierter Schutz von Industrieanlagen an der Grenze von vorbeugendem zum abwehrenden Brandschutz

Um zu verhindern, dass Brände und Explosionen durch noch vorhandene Zündquellen entstehen und der abwehrende Brandschutz nicht greift, müssen diese Zündquellen zuverlässig erkannt und beseitigt werden. An dieser Stelle kommen Funkenlöschanlagen ins Spiel.

2 Funkenlöschanlagen

Funkenlöschanlagen arbeiten minimalinvasiv und schützen nahezu unsichtbar und unbemerkt Zehntausende von Industrieanlagen weltweit und die Menschen, die dort arbeiten. Sie bestehen aus IR-Meldern zur Erkennung von Zündquellen. Über eine Steuerung sind diese mit Löschautomatiken verbunden, die die Zündquellen mit Hilfe von Wassernebel nach wenigen hundert Millisekunden und damit wenigen Metern nach der Detektion effizient beseitigen (vgl. Bild 2).

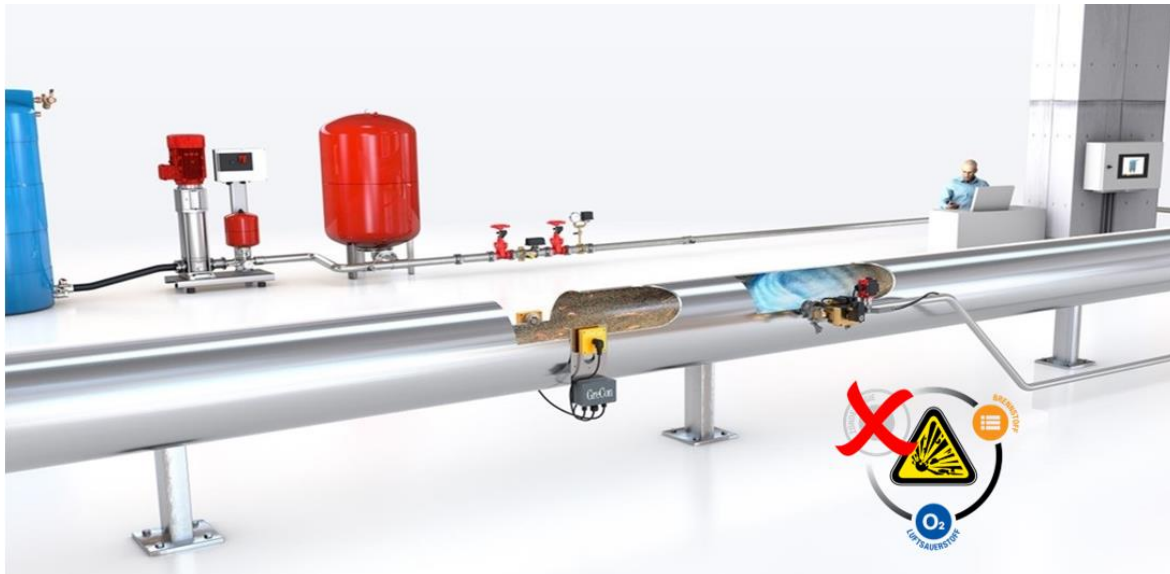


Bild 2: Sichere Erkennung und Eliminierung von hochmobilen Zündquellen im pneumatischen Transport durch Funkenlöschanlagen

3 Klassifizierung von Zündquellen

Dank der Forschungsarbeiten der Bergischen Universität Wuppertal haben wir wichtige Erkenntnisse über Zündenergie und zündwirksame Partikel im pneumatischen Transport gewonnen. In den Jahren 2015 bis 2018 gab es ein intensives Forschungsprojekt mit dem Ziel, die Kontrolle von Zündquellen im pneumatischen Transport zu untersuchen. Am Ende dieses Projekts standen eine Vielzahl von Ergebnissen [1], [3].

Die wichtigste Erkenntnis ist, dass sich diese sogenannten hochmobilen Zündquellen in vier verschiedene Typen mit unterschiedlichem Risikopotenzial einteilen lassen. Das Risikopotenzial bestimmt sich dabei durch Eigenschaften wie Größe, Lebensdauer (LT), Temperatur (T) (die zur Entzündung führen kann) und aktive Verbrennung:

- mechanisch erzeugte Funken: E klein, $T > 1200^{\circ}\text{C}$, inert, $LT < 1 \text{ sec}$, RP 3
- brennende Partikel: E klein bis mittel, $T < 900^{\circ}\text{C}$, aktiv, $LT < 1 \text{ min}$, RP 5
- heiße Partikel/Oberflächen: E groß, $T > 400^{\circ}\text{C}$, inert, $LT > 1 \text{ min}$, RP 7
- Glimmester: E hoch, $T < 350^{\circ}\text{C}$, $LT > 5 \text{ min}$, RP 10

Der erste Typ sind mechanisch erzeugte Funken. Sie entstehen bei der Metallverarbeitung oder werden durch Ventilatoren erzeugt. Zum Beispiel, wenn das Lager beschädigt ist.

Der zweite Typ sind brennende Partikel, die bei Trocknungsprozessen auftreten, zum Beispiel bei direkter Befuerung oder bei der mechanischen Bearbeitung.

Der dritte Typ sind heiße Partikel/Oberflächen. Das sind Verunreinigungen, die bei Zerkleinerungsprozessen entstehen. Es kann sich auch um Schweißkugeln handeln, d. h. um sehr heiße Partikel, die zwar nicht selbst brennen, aber so heiß sind, dass sie Staubablagerungen entzünden können.

Der letzte Typ sind Glimmnester. Sie entstehen überall dort, wo getrocknet wird oder wo es durch Umwelteinflüsse zu einer Selbstentzündung kommen kann.

4 Von der Zündquelle zum am besten passenden Sensormaterial

Seit der Erfindung der Funkenlöschanlage Mitte der 1970er Jahre haben sich zwei Sensormaterialien durchgesetzt. Sie verfügen einerseits über die notwendige Robustheit und Detektivität und arbeiten andererseits kontinuierlich und zuverlässig unter rauen industriellen Bedingungen zwischen -40°C und 70°C (Umgebung) bzw. 300°C (Prozess): Silizium (Si) und Bleisulfid (PbS). Die aus diesen Materialien entwickelten Melder befinden sich sehr oft in explosionsgefährdeten Bereichen, was besondere Anforderungen an die Energieversorgung stellt. Je geringer der Energiebedarf ist, desto praktikabler und kostengünstiger und damit praxistauglicher sind die Melder.

In erster Näherung emittiert jedes Teilchen mit einer bestimmten Temperatur ein kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Strahlung, vergleichbar mit der Schwarzkörperstrahlung. Wenn genügend emittierte Strahlung in das spektrale Empfindlichkeitsfenster des Sensormaterials fällt, können diese Teilchen zuverlässig nachgewiesen werden. Bild 3 zeigt die typischen Schwarzkörperspektren der Sonne, des sichtbaren Glühens und des Umgebungslichts. Die Positionen der vier Arten von Zündquellen, bei denen noch ausreichend detektierbare Strahlung vorhanden ist, sind markiert. Zusätzlich ist die spektrale Empfindlichkeit der beiden Sensormaterialien dargestellt.

Je weniger heiß die Zündquelle ist, desto wichtiger ist die zuverlässige Detektion durch PbS-basierte Melder. Insbesondere Glimmnester, die außen "kalt" erscheinen und innen sehr heiß sind und deren Lebensdauer oft einige Minuten beträgt, stellen ein sehr hohes Gefahrenpotenzial dar.

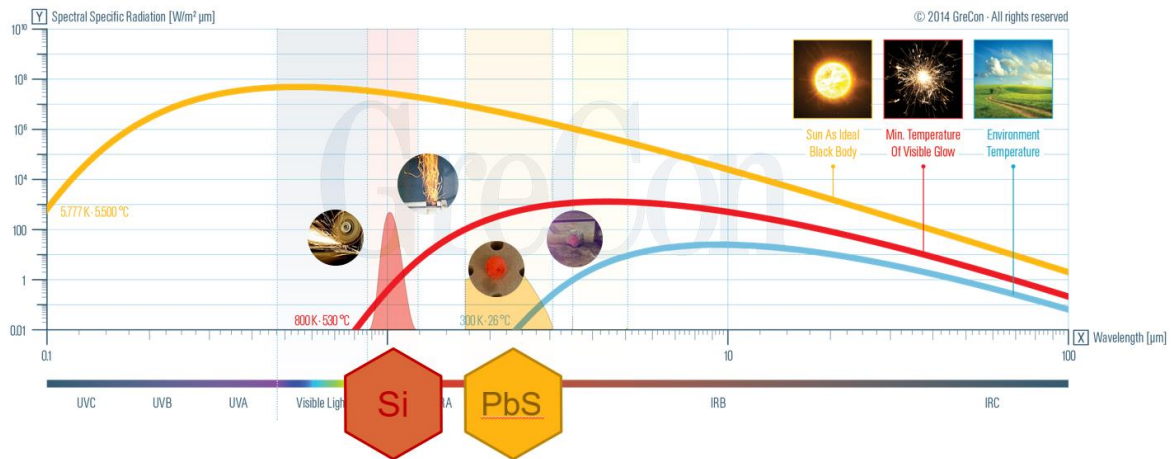


Bild 3: Spektrale spezifische Ausstrahlung und spektrale Empfindlichkeit der Funkenmelder in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung für die vier verschiedenen Typen von Zündquellen

5 Modellgestützte Vorhersagbarkeit der sicheren Detektion und Überwachung der Performance der Funkenmelder

Die Kenntnis über die Typen von Zündquellen im (pneumatischen) Transport ermöglicht Modellrechnungen, die spezifische Anwendungsparameter und Materialeigenschaften berücksichtigen. Unterstützt durch Experimente, die im Labor und im Testfeld validiert wurden, können die Detektionssicherheit und ihre Grenzen für jede Zündquelle und beide Sensormaterialien bestimmt werden. Dies ermöglicht die optimale Auswahl und Parametrierung des eingesetzten Funkenmelders. Bild 4 zeigt ein Beispiel für solche Signalverläufe an Si- und PbS-basierten Meldern. Die Signalhöhen dienen zur Auswahl der Empfindlichkeit und des bevorzugt zu verwendenden Melders. Je weniger heiß die Zündquelle ist, desto mehr verschiebt sich die Signalhöhe zu PbS-basierten Meldern.

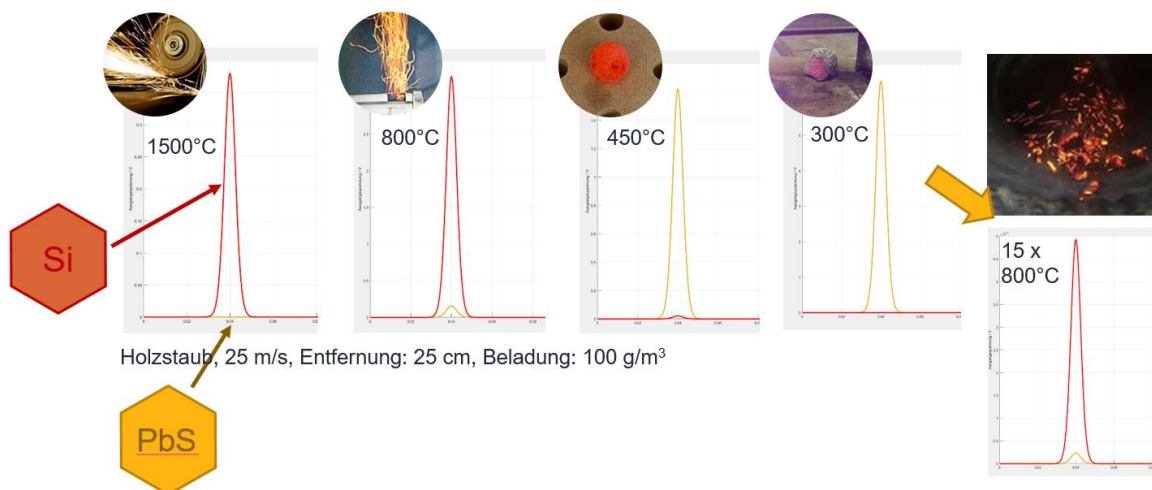


Bild 4: Beispiel für modellierte Signale an Si- und PbS-basierten Meldern für die verschiedenen Typen von Zündquellen

In den allermeisten Produktionsanlagen, in denen es zur Entstehung von Zündquellen kommen kann, sind alle vier Typen von Zündquellen anzutreffen, die am sichersten mit einer Kombination aus beiden Sensormaterialien in eingesetzten Funkenmeldern detektiert werden können. Mithilfe weiterer Sensoren und Überwachungsalgorithmen können darüber

hinaus Detektionsperformance, Kritikalität der Zündquelle, Verschmutzung der Melder überwacht und die Täuschungsalarmanfälligkeit intelligent auf ein Minimum reduziert werden (IDT®).

6 Löschautomatiken mit Wasser als Löschmedium

Mindestens ebenso essenziell wie die sichere Erkennung ist die effiziente Eliminierung der Zündquellen. Dafür hat sich die Löschung mit fein versprühtem Wasser als Löschmedium etabliert, welches mehrere Vorteile mit sich bringt:

- Verfügbarkeit
- betriebswirtschaftlich günstig
- keine Kontamination des Materialstroms und der Produktionsanlage
- hohe Löschwirksamkeit bei kleinsten Mengen

Besonders der letzte Punkt ist aus physikalisch chemischer Sicht sehr interessant und macht Wasser in vielen Fällen zum idealen Löschmedium. Für die Kühlung bzw. Löschung der Zündinitialen steht im Vergleich zur Menge eine sehr große Reaktionsoberfläche zur Verfügung, da es sich um nur ca. 70-80 Mikrometer große Tröpfchen handelt. Diese Tröpfchen können sich aufgrund ihres geringen Gewichtes sehr gut verteilen und werden im Förderstrom viele Meter mittransportiert und umhüllen die Zündquellen damit effizient. Aufgrund ihrer Größe verdampfen beim Löschen sehr viele Tröpfchen. Die dafür notwendige Verdampfungsenthalpie zieht zusätzlich Energie aus dem Verbrennungsprozess. Durch das Verdampfen entstehen aus 1 l Wasser 1,7 m³ Wasserdampf, der den Luftsauerstoff aus der „Gefahrenzone“ verdrängt und die Löschwirksamkeit zusätzlich erhöht.

Damit ist es möglich, mit sehr geringen Wassermengen (wenige 100 ml bis wenige l) effizient Zündquellen und Entstehungsbrände zu löschen.

Bisherige Löschautomatiken in Funkenlöschanlagen sind einfach gestrickt. Sie können eingeschaltet werden, nachdem eine Zündquelle erkannt wurde, und wieder ausgeschaltet werden, wenn das Löschen erfolgreich war. Auch die Überwachung der Löschung liefert kaum Informationen außer der Aussage, dass Wasser fließt oder eben nicht.

Klassische Funkenlöschanlagen, die mit etablierter Löschtechnik ausgestattet sind, erledigen ihren Auftrag zuverlässig. Dennoch ist es aufwendig, eine Aussage über die Qualität des Wasserflusses oder über die Rahmenbedingungen des Wasserflusses zu treffen. Ebenso ist es schwer, eine qualitative Aussage über das Sprühbild eines Löschstoßes zu treffen, wenn nur bekannt ist, dass Wasser geflossen ist. Erforderlich wäre hier eine zeitintensive Überwachung der Abläufe vor Ort. Beispielweise ist es entscheidend, dass nicht nur Wasser bei einer Löschung fließt, sondern auch, dass das Sprühbild im Rohr homogen ausgeprägt ist, um so sicherzustellen, dass der vorbeifliegende Funke vom Löschwasser eingeschlossen und gelöscht wird. Bild 5 zeigt die optimale Verteilung eines Löschstoßes im Materialtransportrohr. Ist das Sprühbild durch Verschleiß oder Verschmutzungen in der Düse gestört, kann sich der Sprühkegel nicht homogen ausbilden und ein Funke am Löschstoß vorbeifliegen.



Bild 5: Dynamisches Sprühmuster

7 Vom Wasserhahn zur intelligenten Löschautomatik

„Leben und Werte schützen“ bedeutet, gute Produkte zu verbessern und den Anwendern den Betrieb zu erleichtern. Dabei hat sich herausgestellt, dass es nicht nur wichtig ist, die Erkennung von auftretenden Zündquellen sicherzustellen, um Brände zu verhindern, bevor sie entstehen. Die Qualität der Löschung und die Überwachung der relevanten Leistungsparameter sind ebenfalls von großer Bedeutung, um zum Beispiel eine notwendige Systemwartung rechtzeitig durchführen zu können. Dazu gehört die Frage, ob Wasser überhaupt fließt. Fließt es schnell genug? Ist die Wassermenge während des Löschvorgangs ausreichend?

Ist die Löschung nicht aktiviert, muss gesichert sein, dass Wasser ansteht und dass kein Wasser aus der Löschung austritt. Letzteres ist gerade für Betreiber relevant, die Nahrungsmittel oder andere Produkte herstellen, die empfindlich gegenüber Feuchtigkeit sind. Die Löschautomatik muss insbesondere in solchen Anlagen dicht sein. Es darf kein Wasser austreten.

Die Herausforderung in der Entwicklung lag daher darin, konventionelle Löscharmaturen zu digitalisieren, die bislang nur ein- und ausgeschaltet werden konnten. Am Ende des Entwicklungsprozesses steht die neue intelligente Löschautomatik GreCon Intelligent Extinguishing Module IEM, die in unsere Funkenlöschanlagen eingesetzt wird.

Die neue intelligente Löschautomatik ermöglicht die notwendige hochgenaue Überwachung des Löschvorgangs, erkennt Verstopfungen, misst den Fließdruck und erkennt vorzeitigen Verschleiß von Düsen und Ventilen. Auch Leckagen werden erkannt und automatisch gemeldet. Dies wird durch Überwachungsalgorithmen für verschiedenste eingebaute Sensoren erreicht (mehrere Druck-, Temperatur-, Strom- und Spannungssensoren), die aus der KI-gestützten Analyse von Hunderttausenden von Löschungen entwickelt wurden und stetig verfeinert werden.

8 Nachhaltige Instandsetzung

Kritische Einrichtungen wie Funkenlöschanlagen müssen in festgelegten Intervallen geprüft und gewartet werden, um den zuverlässigen Betrieb sicherzustellen. Mit der neuen intelligenten Löschung können Verstopfungen und Verschleiß frühzeitig erkannt werden, um die bestmögliche Verfügbarkeit der Funkenlöschanlage zu erhalten.

Zusätzlich können auf der Grundlage von ermittelten Daten der intelligenten Löschung zukünftig Wartungsintervalle individuell auf Basis von Verschleißdaten definiert werden. Durch diese aus den tatsächlichen Verschleißdaten resultierenden dynamischen

Wartungsintervalle verlängern sich nicht nur die Wartungsintervalle selbst, sondern auch die sichere Nutzungsdauer der auf diese Weise überwachten Komponenten.

In der Fachliteratur finden sich in diesem Zusammenhang regelmäßig die Begriffe „Reactive Maintenance“, „Preventive Maintenance“ und „Predictive Maintenance“ wieder, die in Bild 6 dargestellt sind. Die Begriffe werden im Folgenden zum einheitlichen Verständnis kurz definiert.

Spricht man von „Reactive Maintenance“, so ist ein Ereignis bereits eingetreten und eine Instandhaltungsmaßnahme bereits notwendig geworden. Ein System wird so lange genutzt, bis es zum Ausfall eines Bauteils kommt und der Prozess dadurch gestoppt wird.

Bei „Preventive Maintenance“ werden proaktiv Maßnahmen getroffen, um ein Ereignis zu verhindern oder möglichst lange abzuwenden. Die Maßnahmen beziehen sich daher auf die Verlängerung der Nutzungsdauer von Bauteilen.

Die dritte Kategorie „Predictive Maintenance“ betrifft die nachhaltige Instandhaltung durch intelligente Sensorik. Sensoren registrieren Veränderungen und äußere Einwirkungen auf Bauteile. Durch die gesammelten Daten über die Lebenszeit von Bauteilen können Vorhersagen abgeleitet werden, die es beispielsweise ermöglichen, positive Veränderungen an der Nutzung vorzunehmen oder Wartungsintervalle entsprechend anzupassen. Die Lebensdauer von Bauteilen kann dadurch deutlich erhöht und Maßnahmen zur Instandhaltung können vorbeugend getroffen werden.

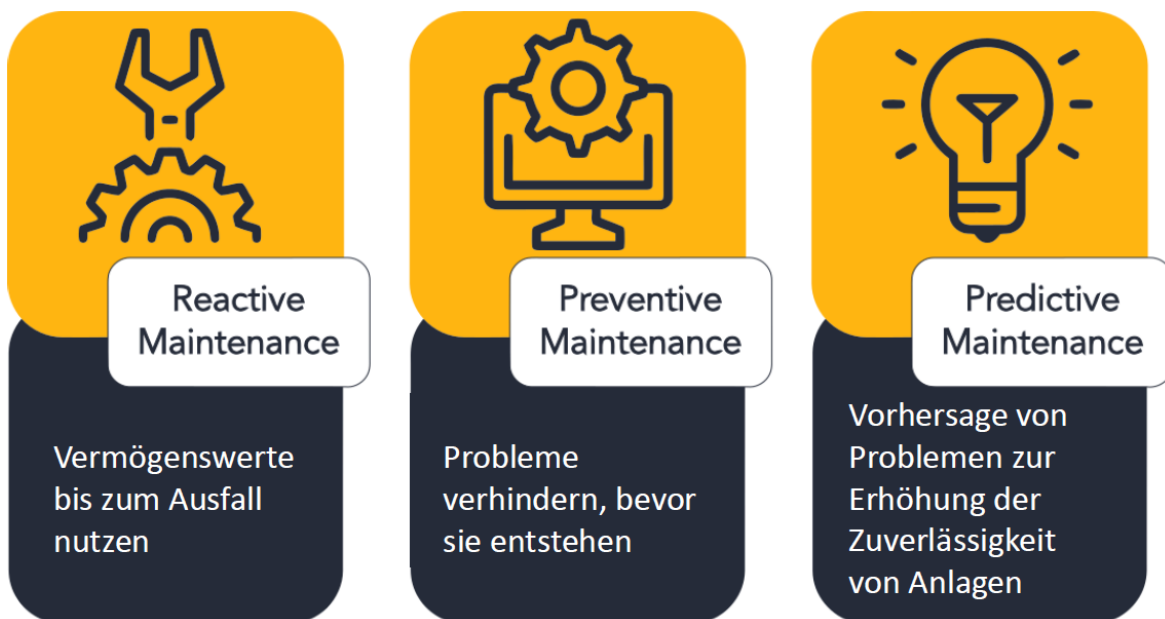


Bild 6: Nachhaltige Instandsetzung

Bild 7 zeigt den Einsatz von intelligenter Sensorik unter dem Begriff „Predictive Maintenance“. Die verbauten Sensoren in der Löschantomatik IEM sammeln während der gesamten Lebenszeit Daten wie beispielsweise Druckwerte zum Differenzialverhalten sowie die Stromaufnahme der Spule. Die gesammelten Daten geben einen Aufschluss über Veränderungen an den Bauteilen. So kann über Sensoren an der Spule des Ventils festgestellt werden, dass mehr Strom zur Öffnung des Ventils benötigt wird. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise durch Korrosion am Steuerkolben mehr Strom zur Öffnung des

Ventils benötigt wird. Dadurch kann der Rückschluss auf eine schlechte Wasserqualität gezogen werden. Diese Erkenntnis kann durch einen langsamen Anstieg des Stroms an der Spule als Vorwarnung an den Betreiber gegeben werden, der dann vor Ausfall einer Komponente Gegenmaßnahmen ergreifen kann. Ebenso können über die gesammelten Daten Vorhersagen über die verbleibende Lebensdauer von Komponenten getroffen werden, was wiederum zu einer exakten Planung von Instandhaltungen genutzt werden kann. Der Betreiber ist in der Lage zu beurteilen, ob Wartungsarbeiten in einem geplanten anstehenden Stillstand durchgeführt werden müssen oder auf den nächsten Stillstand gelegt werden können.

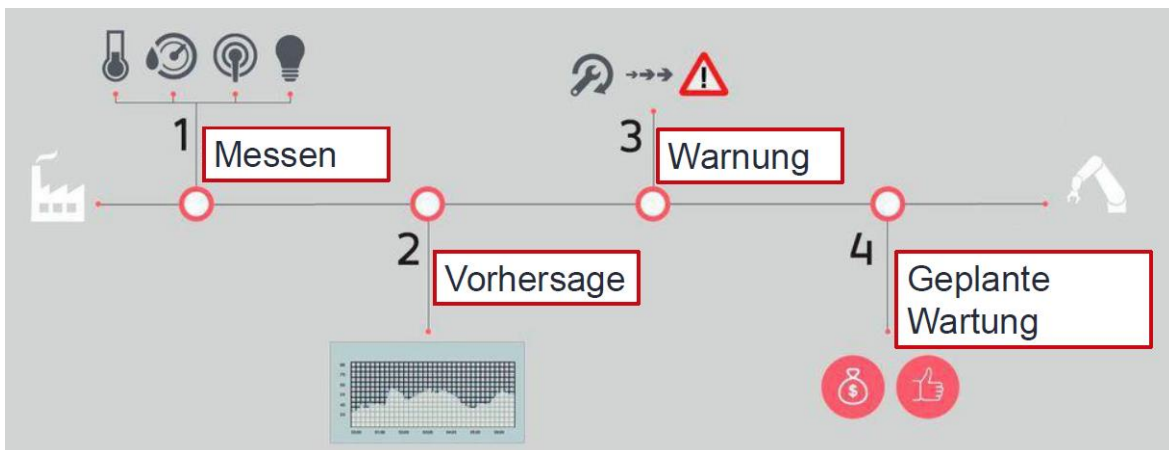


Bild 7: Vorausschauende Wartung

Sich ständig ändernde Anforderungen an Funkenlöschanlagen beruhen auch auf Veränderungen im Kundenprozess und dem Einsatz neuer Fertigungsmaterialien. Auch der immer größer werdende Wunsch, Daten nicht nur zu sammeln, sondern auch Big-Data-Strategien zu verwirklichen, hat Auswirkungen. Die Folge sind notwendige Optimierungen von Funkenlöschzentralen als Datensammel- und Auswertungsknoten innerhalb der Funkenlöschanlage. Mit den Informationen aus der Funkenlöschanlage, die über Funkenmelder und -löschung gewonnen werden, müssen Risiken weiter minimiert und Produktionsprozesse optimiert werden. Dies geschieht schon jetzt bei einigen Kunden, die aufgrund der Daten aus der Funkenlöschanlage neue Entscheidungen treffen können. Ereignisse wie zum Beispiel die Anzahl der erkannten Funken sind eine wichtige Information, die es bei richtiger Interpretation ermöglicht, neue Risiken frühzeitig zu erkennen und den Zustand des bestehenden Prozesses besser einschätzen zu können. Das ist ein Exempel dafür, wie aktiv aus einem Trend Handlungen abgeleitet werden können, die direkt zu nachhaltigen Verbesserungen führen.

Zusammenfassung

Die GreCon-Funkenlöschanlage (vgl. Bild 2) detektiert und eliminiert gefährliche Zündinitiale, bevor ein Brand entsteht. Überall dort, wo organische oder anorganische Schüttgüter pneumatisch oder mechanisch abgesaugt oder transportiert werden, erkennt die Funkenlöschanlage alle gefährliche Zündinitiale wie beispielsweise heiße Partikel, Funken oder Glutnester und macht sie unschädlich, bevor sie beispielsweise in Filteranlagen, Silos oder anderen nachgelagerten Anlagenbereichen einen Brand auslösen können. Hochsensible Infrarotmelder überwachen Förderwege und lösen, wenn nötig, innerhalb weniger Millisekunden eine Löschantomatik (vgl. Bild 8) aus. Dabei stellen die intelligenten Sensoren der Löschantomatik eine 100-prozentige Verfügbarkeit sicher. Eine Verschleppung von Zündenergie kann so sehr wirkungsvoll unterbunden werden. Die Löschvorgänge laufen meist ohne Produktionsunterbrechung im Hintergrund ab.

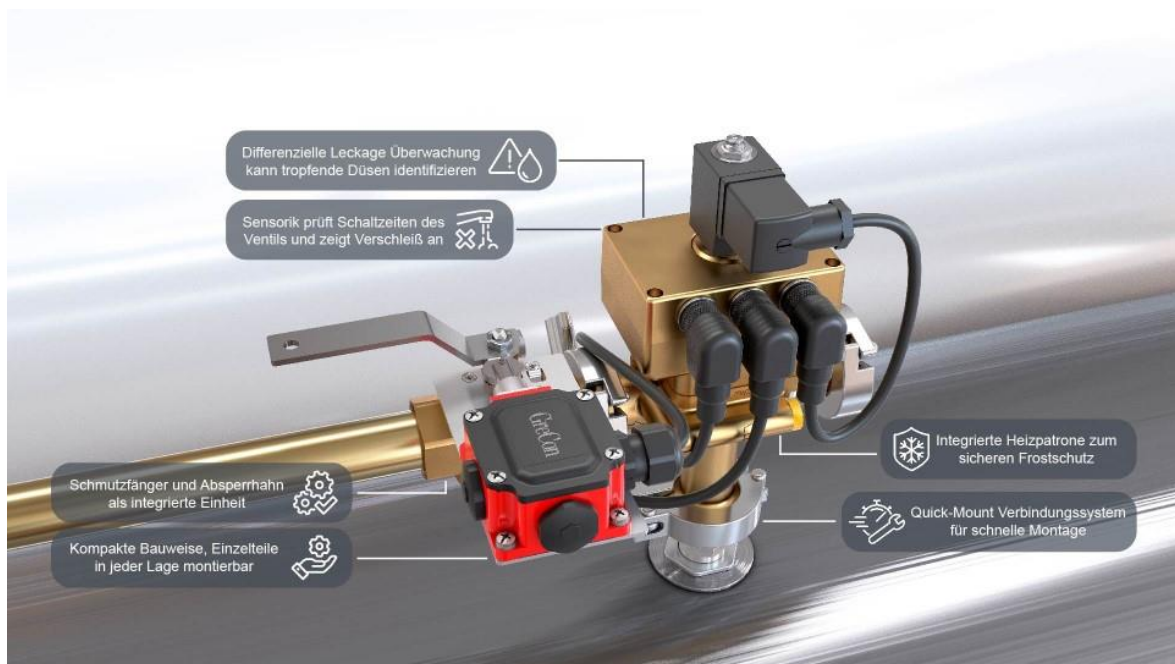


Bild 8: Löschantomatik IEM mit den Vorteilen der intelligenten Sensorik

Durch den Einsatz von intelligenten Sensoren können Abweichungen der Soll-/Ist-Zustände von Anlagenkomponenten genau ermittelt werden. Diese Erkenntnis lässt frühzeitige Rückschlüsse auf Veränderungen oder äußere Einwirkungen zu. Dadurch können Vorhersagen getroffen werden und Wartungs- sowie Instandhaltungseinsätze bedarfsorientiert und vorbeugend gesteuert werden. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten können somit nachhaltig reduziert werden.

Durch intelligente Sensorik lassen sich auch Vorhersagen über die Lebenserwartung von Bauteilen ableiten, wodurch eine optimierte Ersatzteilbevorratung und eine vorausschauende Instandhaltung just in time erreicht werden.

Ebenfalls kann die „First Time Fix Rate“, die bei Instandhaltungseinsätzen als KPI geführt wird, durch die gesammelten Daten optimiert werden. Die Sensoren geben im Vorfeld Aufschluss über den Zustand der Anlage sowie Rückschlüsse auf äußere Einwirkungen.

Dadurch ist es möglich, direkt passende Ersatzteile zum Ersteinsatz mitzunehmen, ohne die Anlage inspiziert zu haben. Produktionsstillstände durch Störungen werden reduziert.

Das Sammeln von Daten während der Lebenszeit von Produkten durch intelligente Sensorik in Funkenlöschanlagen ermöglicht das Ableiten zahlreicher Vorhersagen, wodurch die Instandhaltung nachhaltig positiv beeinflusst wird und sich neue Geschäftsmodelle ableiten lassen.

Je mehr und je bessere Daten die Funkenlöschanlage einer automatisierten Auswertungsstelle liefert, desto weiter integriert sie sich in den Produktionsprozess. So wird die Funkenlöschanlage mehr und mehr Teil der Produktionsanlage. Sie wird Teil von Big-Data-Strategien und hilft, Kundenprozesse besser abzustimmen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Liske, B.; Barth, U.: Zündquelle Glimmnest, VDI Wissensforum GmbH (Hg.): Sichere Handhabung Brennbarer Stäube 2017. Bd. 2314
- [2] Haas, M: Wie digitalisiere ich einen Wasserhahn? 04/2022, s+s report, S.30f.
- [3] Bechem, J.; Liske, B.; Vespermann, N.; Barth, U.: Ignition Source: Hot Particle, 5th Magdeburg Fire and Explosion Days, 23/24.03.2017
- [4] DIN EN 12779 Sicherheit von Holzbearbeitungsmaschinen – Ortsfeste Absauganlagen für Holzstaub und Späne – Sicherheitstechnische Anforderungen
- [5] VDI 2263 Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen; alle Blätter
- [6] DIN EN 1127-1/2 Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz
- [7] DIN EN 13821 Explosionsschutz Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub-/Luft-Gemischen

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Methode zur zustandsbezogenen Instandhaltung auf Grundlage von Schallmessungen am Beispiel ausgewählter Gurtförderanlagen

Robert Schneider

Tim Fritsch

Stephan Henschler

Jan Magister

Dirk Täschner

Sylvio Simon



IURS e.V.

Institut für Umwelttechnik und
Recycling Senftenberg e.V.

Robert Schneider, M. Eng.
Institut für Umwelttechnik und Recycling
Senftenberg e.V.
Universitätsplatz 1
01968 Senftenberg

Methode zur zustandsbezogenen Instandhaltung auf Grundlage von Schallmessungen am Beispiel ausgewählter Gurtförderanlagen

Die Erfassung der Eigenschaften von Tragrollen und Fördersystemen ist nicht nur im Rahmen der Fertigung und Qualitätssicherung erforderlich, sondern insbesondere auch nach Inbetriebnahme und während der gesamten Laufzeit der Förderanlage. Im Regelfall erfolgt kurz nach der Erstinbetriebnahme die Abnahmekontrolle durch den Hersteller oder Anlagenbetreiber, indem die im Pflichtenheft aufgeführten Parameter überprüft werden.

Bei Inbetriebnahme:

- *grundsätzliche Funktionskontrolle mit und ohne Fördergut*
- *Anlaufverhalten*
- *Kontrolle auf Gurtschieflauf*
- *Ausrichtung der Gerüstfelder und Tragrollengirlanden*
- *akustische Abnahme für immissionsrelevante Anlagen*
- *zusätzlich Gurtspannung, Kontrolle der Getriebe, Antriebe und Gurttrommeln hinsichtlich elektrischer Parameter, Schlupf usw.*

Im Zuge des Betriebs tritt kontinuierlicher Verschleiß, insbesondere im Bereich der Tragrollen auf. Um ungeplante Stillstände und Störungen zu vermeiden, werden verschiedene Kontrollen und Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt (Lars Sternitzke, LEAG, 2021):

- *regelmäßige Kontrollfahrten durch z. B. mobilen Löschrupp, Überprüfung auf grobe optische und akustische Auffälligkeiten*
- *automatische Wärmebildkameras zur Detektion von Heißläufern, insbesondere bei brandgefährdeten Anlagen (Kohle)*
- *jährliche Schallmessungen bei immissionsrelevanten Anlagen*

1 Zustandsbezogene Instandhaltung

Laut Definition ist Instandhaltung die

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann“ [1]

Die zustandsbezogene Instandhaltung stellt dabei eine Methode der vorbeugenden bzw. präventiven Instandhaltungsstrategien dar. Sie orientiert sich beim Austausch von Verschleißkomponenten oder Anlagenteilen nicht an festen Zeiten, Nutzungsintervallen oder eingetretenen Defekten, sondern an dem tatsächlich vorherrschenden Anlagenzustand unter der Verwendung der technischen Diagnostik.

Prinzipiell werden dabei die allgemeinen Ziele verfolgt:

- Steigerung der Betriebssicherheit und Verfügbarkeit einer Anlage
- Senkung der Instandhaltungskosten durch gezieltes Betreiben von Komponenten bis zur Verschleißgrenze und Vermeidung von ungeplanten Ausfällen mit Folgeschäden
- Sicherstellung der optimalen Betriebsweise und Ausnutzung von Leistungsreserven

- Reduzierung der Umweltbelastung durch Herabsetzen des Schadstoffausstoßes und Minimierung von Lärm- und Schwingungsemissionen

Sie umfasst dabei folgende prinzipielle Vorgehensweise, welche auf die jeweiligen Anlagen und Einsatzbedingungen zugeschnitten werden muss:

- Auswahl geeigneter Parameter zur Beurteilung des Anlagenzustands.
- Durchführung regelmäßiger und dauerhafter Messungen der Kenngrößen zur Diagnose von sich entwickelnden Schäden.
- Festlegung von angepassten Wartungsintervallen oder Maßnahmen zur Sicherstellung des Anlagenbetriebs.

Nach Möglichkeit soll die Erfassung des Anlagenzustands ohne Demontage von Maschinenteilen und während des laufenden Betriebs durchgeführt werden, um zusätzliche Produktionsunterbrechungen zu vermeiden. [2]

Insofern ausreichende Kenntnisse über die Betriebsbedingungen, das Ausfallverhalten und der vorherrschenden Parametereigenschaften vorliegen, besteht die Möglichkeit, Prognosen zu einer wahrscheinlichen Restnutzungsdauer der jeweiligen Anlagenteile zu erstellen. Die Zielstellung der Ausnutzung einer höchstmöglichen Einsatzdauer von Einzelkomponenten ohne vorzeitigen Austausch oder Ausfall wird bei dieser Vorgehensweise optimal erfüllt.

Die oben aufgeführte Vorgehensweise bei der Instandhaltung von Gurtförderanlagen im Bereich der reinen Förderstrecke (Antriebe, Umlenkstationen usw. ausgenommen) weicht in gewissen Punkten von denen einer zustandsbezogenen Instandhaltung ab.

Im Wesentlichen geschieht die Beurteilung des Anlagenzustands ohne Einsatz diagnostischer Verfahren mittels einer, zumeist subjektiven Einschätzung durch erfahrene Anlagenfahrer bei regelmäßigen Kontrollen. Der Abgleich von Grenzwerten beispielsweise bezüglich der Lärmimmissionen durch Schalldruckpegelmessungen erfolgt nur in Ausnahmefällen, insbesondere dann, wenn die Anlagen immissionsrelevant sind. In der Regel werden defekte oder heißgelaufene Tragrollen bei regelmäßigen Kontrollfahrten festgestellt und je nach akuter Situation sofort vor Ort durch Schnellabsenkösen aus dem Eingriff genommen oder bis zum nächsten planmäßigen Wartungstermin weiter betrieben und dann getauscht.

Die Nachteile dieser Vorgehensweise liegen dabei hauptsächlich in der subjektiven Beurteilung des Anlagenzustands durch das Personal. Es ist möglich, dass nicht alle Defekte zeitnah und zuverlässig detektiert werden, was zu unplanmäßigen Stillständen führen kann. Des Weiteren ist eine optimale Anlagennutzung in Bezug auf die Restlaufzeit der Tragrollen und der Lärmemission der Anlage nicht gegeben. Die Überschreitungen von Lärmvorgaben können insbesondere in Hinblick auf den Umweltschutz weitreichende Maßnahmen nach sich ziehen, welche zu einem vorzeitigen Komponentenwechsel oder im schlimmsten Fall zu Einschränkungen in der Betriebsgenehmigung zumeist in der Nacht führen können.

1.1 Entwicklungstendenzen in der Zustandsüberwachung von Bauelementen und deren Anwendung auf Tragrollen und Gurtförderer

Zur Überwachung von Produktionsanlagen und Gurtförderanlagen im Speziellen wurden in der Vergangenheit zahlreiche Ansätze und Methoden entwickelt, welche geeignet sind, um mit ihnen eine zustandsbezogene Instandhaltung durchzuführen. Anhand der Herangehensweise soll dabei zwischen Systemen unterschieden werden, bei denen entsprechende technische Diagnosesensoren in den Bauteilen integriert sind und solchen, bei denen die Erfassung der Daten von außen und meist berührungslos erfolgt. Auf die Vor- und Nachteile beider Systeme wird im Folgenden ebenfalls eingegangen, woraus sich ein entsprechender Handlungsbedarf ableiten lässt.

1.1.1 Integrierte Überwachungssysteme

In einer Veröffentlichung von 2019 wird ein Verfahren beschrieben, wie mit Hilfe von Temperatursensoren in den Achszapfen von Tragrollen im Bereich der Wälzlager und einer entsprechenden Datenübertragung heißgelaufene Tragrollen und Wälzlagerschäden diagnostiziert werden. Grundvoraussetzung für eine vollständige Überwachung aller Tragrollen ist dabei das Vorhandensein von Temperatursensoren für jedes Wälzlager und eine zuverlässige und weitreichende Datenübertragung. Die Temperaturdaten eines Tragrollenstuhls werden über eine Datenleitung zu einem Funkmodul geleitet und von dort per Funk zu einer zentralen Auswertestelle weitergeleitet. [3]

Die Nachteile dieses Verfahrens liegen dabei in der Vielzahl der benötigten Sensoren, wobei die Verwendung von Temperatursensoren noch die kostengünstigere Variante im Vergleich zu Schwingungssensoren darstellt. Gurtförderanlagen erstrecken sich meist über mehrere Kilometer Förderstrecke, wobei mehrere Tausend Tragrollen verbaut werden, was eine entsprechend hohe Anzahl von Sensoren erfordern würde (vgl. Tabelle 1). Weiterhin problematisch ist die Verbindung der einzelnen Sensoren mit dem Funkmodul über eine Datenleitung, welche für die rauen Einsatzbedingungen entsprechend robust ausgelegt sein muss. Die Montage der vergleichsweise filigranen Steckverbindungen bei der Montage und eventuellem Tragrollenwechsel muss dabei ebenfalls berücksichtigt werden. Darüber hinaus stellt die Detektion eines Wälzlagerschadens über einen Temperaturanstieg nur eine sehr späte Methode dar, um einen Defekt zuverlässig zu detektieren, wie der Autor korrekt feststellt. Die verbleibende Reaktionszeit zum Wechsel der betroffenen Tragrolle ist entsprechend kurz.

Tabelle 1: Ausrüstung der Kohlebandanlage K66 im Tagebau Nochten [L. Sternitzke (LEAG)]

Gurtbreite:	2.000 mm
Fördergeschwindigkeit:	6,7 m/s
Förderkapazität:	7.500 t/h
Antriebsleistung:	4 x 900 kW
Achsabstand:	2.525 m
Anzahl der Gerüstfelder:	406
Girlandenanzahl Obertrum:	5 oder 6 pro Gerüstfeld
Girlandenanzahl Untertrum:	1 pro Gerüstfeld
Girlandenabstand Obertrum:	1,2 m (5) bzw. 1,0 m (6)
Ausrüstung Obertrum:	3-teilige Girlande – A159x750/600/750-6310-5-18

Neben diesem speziell auf Tragrollen zugeschnittenen Anwendungsfall gibt es jedoch zahlreiche weitere Systeme, die in der Praxis zur stationären Wälzlagerdiagnose und Zustandsüberwachung eingesetzt werden. Diese basieren zumeist alle auf der Installation eines Temperatur- oder Beschleunigungssensors in Lagernähe und einer kabelgebundenen oder funkgestützten Datenübertragung zu einem zentralen Auswertesystem. Die Systeme folgen dabei dem Entwicklungstrend unter dem Stichwort Industrie 4.0 oder dem Internet der Dinge. [4] [5]

Analog zu der oben beschriebenen Integration von Temperaturfühlern in Tragrollen wirken sich auch hier der zahlenmäßig hohe Einsatz von Sensoren sowie die für Tagebauverhältnisse störanfällige Datenübertragung nachteilig aus.

1.1.2 Externe Systeme

Unter Verwendung von technischer Diagnostik, welche auf Sensoren zurückgreift, die nicht fest an oder in dem Maschinenelement Tragrolle installiert sind, gibt es derzeit eine Vielzahl von Systemen, die zur Überwachung und Instandhaltung von Förderanlagen eingesetzt werden.

Dabei gibt es Verfahren, bei denen Messfühler in den Fördergurt selbst eingebracht werden. Mit Hilfe von Schubspannungssensoren innerhalb des Fördergurtes können defekte Tragrollen beim Überfahren detektiert werden, insofern bei diesen eine Veränderung des Bewegungswiderstandes einsetzt. Zwei Patentschriften basieren auf dieser Herangehensweise:

- Verfahren zur fortlaufenden Messung des Verschleißes aller Tragrollen in Gurtförderern [6]
- Verfahren zur Überwachung der Bandausrichtung und/oder des Bandlaufs einer Gurtbandfördereinrichtung sowie Gurtbandförderer [7]

Da eine Änderung des Bewegungswiderstandes jedoch auch von anderen Faktoren wie Temperatur, Beladungszustand und Gurtgeschwindigkeit abhängen, ist ein zweifelsfreier Rückschluss auf einen Tragrollenschaden schwierig. Darüber hinaus setzt eine signifikante Erhöhung des Drehwiderstandes von Wälzlagern erst in einem weit fortgeschrittenen Schädigungsgrad ein, was auch hier die Reaktionszeit für eventuelle Instandhaltungsmaßnahmen stark reduziert.

Durch in den Fördergurt eingebrachte Temperatursensoren lassen sich heißgelaufene Tragrollen und Wälzlagerschäden detektieren, welche mit einer Temperatursteigerung einhergehen. [8] Nachteilig wirkt sich auch hier die geringe Reaktionszeit für die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen aus.

Bei der Instandhaltung von Gurtförderanlagen mit Tragrollen in Girlandenaufhängung hat sich die Praxis durchgesetzt, die komplette Tragrollengirlande – meist bestehend aus drei oder fünf Tragrollen – auszuwechseln und zu verschrotten, auch wenn nur eine Tragrolle defekt ist. RWE hat aus diesem Grund einen Tragrollenprüfstand entwickelt, bei dem die kompletten Tragrollengirlanden diagnostisch untersucht werden können. Defekte Tragrollen werden dabei gezielt ausgesondert, die intakten wieder zu neuen Girlanden zusammengesetzt und erneut in den Förderanlagen eingebaut. Durch diesen Prüfstand ist

es möglich, objektiv die Wiederverwendbarkeit von Tragrollen zu ermitteln und so die Instandhaltungskosten zu reduzieren. [9] Dieser Tragrollenprüfstand stellt nur eine nachgeschaltete Diagnoseeinrichtung für die Bewertung des Tragrollenzustands dar. Die Lokalisierung defekter Tragrollen in der Gurtförderanlage kann dadurch nicht ersetzt werden.

Für die Detektion und Lokalisierung von Tragrollenschäden in Gurtförderanlagen existieren Systeme, bei denen beispielsweise Kameras oder an bestimmten Punkten installierte Mikrofone den Zustand von Tragrollen und anderer Maschinenelemente überwachen. Über Sensor-Module an unterschiedlichen Stellen des Förderers können so defekte Tragrollen frühzeitig erkannt und Ausfälle vermieden werden. Weiterhin werden der dadurch bedingte gesteigerte Energieverbrauch minimiert und die Kosten für Strom und Wartung reduziert. [5]. Durch die feste Installation der Sensor-Module an ausgewählten Orten lassen sich jedoch nur bestimmte Punkte überwachen und eine zuverlässige Detektion von Defekten wird mit zunehmendem Abstand zur Sensorik schwieriger.

Um diesen Nachteil auszugleichen, wurde ein Verfahren entwickelt, welches neben fest installierten Mikrofonen eine automatisierte Drohne verwendet, die mit einer Infrarot- und RGB-Kamera ausgestattet ist. Die Datenauswertung bei diesem erfolgreich eingesetzten Prototypen erfolgt automatisch, wodurch sich Servicezeiträume bedarfsgerecht planen lassen und die Abschätzung der voraussichtlichen Lebensdauer der Komponenten besser möglich ist. [10]

Ein ebenfalls automatisiertes System hat die Firma ABB entwickelt, bei dem die Sensoren an einem schienengeführten Fahrzeug neben der Förderanlage entlangfahren. Aufgenommen werden dabei Wärmebild- und Ultraschalldaten, die in Abhängigkeit von der Position des Fahrzeugs den jeweiligen Tragrollen zugeordnet werden können. In Abhängigkeit von den Umgebungs- und Einsatzbedingungen können jedoch auch weitere oder angepasste Sensoren verwendet werden. Durch das System kann eine detaillierte Zustandskarte des Förderers erstellt, die Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Komponenten abgeschätzt sowie der Austausch defekter Tragrollen geplant werden. [11]

Für die Beurteilung des Zustandes von Gurtförderanlagen und insbesondere der verbauten Tragrollen ist die Erfassung von Schwingungsdaten durch Körperschall- oder Luftschallmessung geeignet, um zuverlässige Aussagen für eine zustandsbezogene Instandhaltung zu liefern. Automatisierte Verfahren, welche mit Hilfe von Fahrzeugen jeglicher Art (Drohnen, schienengebundene Fahrzeuge usw.) flexibel einsetzbar sind, erscheinen dabei am geeignetsten, um die gesammelten Daten den jeweiligen Maschinenelementen genau zuzuordnen zu können. Die Installation dieser Systeme und die Abstimmung auf den jeweiligen Anwendungsfall sind dabei jedoch mit einem hohen Initiierungsaufwand verbunden. Darüber hinaus stellen auch hier die rauen Einsatzbedingungen von Gurtförderanlagen hohe Anforderungen an die Robustheit der automatisierten Messtechnik. Die Grundvoraussetzung für das Funktionieren einer automatisierten Überwachung von Gurtförderanlagen und der Tragrollen im Zuge einer zustandsbezogenen Instandhaltung ist dabei immer, dass die Systeme zuverlässiger arbeiten, als die zu überwachenden Maschinenelemente selbst.

1.1.3 Instandhaltung von Gurtförderanlagen – offene Fragestellung

Anhand des bisherigen Stands der Technik und der existierenden Verfahren für die Instandhaltung von Gurtförderanlagen ergibt sich an einigen Punkten ein Handlungsbedarf, welchem im Folgenden nachgegangen werden soll. Dieser stützt sich im Wesentlichen auf folgende Punkte:

- Verwendung von Methoden der technischen Diagnostik zur objektiven Beurteilung des Anlagenzustands
- zentral gesteuerte Auswertung der gesammelten Daten
- Einsatz von wenigen Sensoren, um die Initiierungskosten zu reduzieren
- keine stationäre Installation von Sensoren, um den rauen Einsatzbedingungen gerecht zu werden und den Wartungs- und Instandhaltungsaufwand nicht durch weitere Komponenten zu erhöhen
- Auswertung von akustischen Daten zur Zustandsbeurteilung der Tragrollen und Wälzlager
- Entwicklung eines einfachen Systems, welches sich durch einen geringen Initiierungsaufwand und einen hochflexiblen Einsatz auf technischen Anlagen auszeichnet

Auf Grundlage dieser Punkte soll ein Verfahren entwickelt werden, welches sich durch Verwendung von einem oder mehreren Mikrofonen auszeichnet, die handgeführt oder automatisiert an Gurtförderanlagen entlang bewegt werden, um zustandsrelevante Daten zu erfassen.

2 Vorstellung der Versuchsreihe an den Teststrecken der Gurtförderanlage 66

Die Grundlagen für die akustische Vermessung von Gurtförderanlagen wird detailliert von Täschner [12] im Rahmen seiner Dissertation über die „*Untersuchungen der akustischen Wirkung von Tragrollen zur zielgerichteten Lärminderung an Gurtförderanlagen*“ beschrieben. Das Verfahren wird hier aufgegriffen und für die zustandsbezogene Instandhaltung einer Gurtförderanlage angewendet.

2.1 Technische Parameter der untersuchten Förderanlagen

Die betrachtete Anlage befindet sich im Tagebau Nochten und wird von der LEAG betrieben, um die geförderte Braunkohle aus der Grube in Nochten in das Kraftwerk Boxberg zu transportieren (siehe Tabelle 1). Innerhalb der Gurtförderanlage wurden seit 2008 zwei Testabschnitte untersucht, welche sich bezüglich der verbauten Tragrollen unterscheiden.

Tabelle 2: Auflistung der untersuchten Gurtförderabschnitte und Zuordnung der verbauten Tragrollentypen mit den technischen Spezifikationen nach Tabelle 1

Testabschnitt 1	<u>Gurtförderer 66, Segmente Nr. 340 bis 359:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Untersuchungszeitraum von Februar 2008 bis September 2017 - Abbruch der Untersuchungen durch Versagen aller ursprünglichen Tragrollen und Ersatz durch andere Bauform - Tragrollenhersteller A - Typ „Ü“¹, Mantelrohr mit geringer Rundlauf toleranz $\leq 0,5$ mm
Testabschnitt 2	<u>Gurtförderer 66, Segmente Nr. 320 bis 339:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Untersuchungszeitraum seit Februar 2008 - Tragrollenhersteller B - Typ „Ü“, Mantelrohr mit geringer Rundlauf toleranz $\leq 0,5$ mm

Seit 2018 wurden die Messungen an den Anlagen durch Mitarbeiter der BTU durchgeführt und betreut, zuvor durch Mitarbeiter der LEAG. Die Daten zur Auswertung liegen jedoch seit Beginn der jeweiligen Untersuchungszeiträume vor.

2.2 Zielstellungen der Untersuchungen

Die Zielstellungen der Untersuchungen leiten sich aus den allgemeinen Zielen der Instandhaltung technischer Anlagen ab und umfassen insbesondere folgende Punkte:

- Senkung der Betriebskosten, insbesondere durch Instandhaltung und Instandsetzung, durch gezieltes Betreiben der Tragrollen bis zur Verschleißgrenze, bevor ungeplante Ausfälle und Folgeschäden entstehen
- Reduzierung der Umweltbelastungen durch erhöhte Lärmemissionen
- Auswahl geeigneter Tragrollen zur Lebensdauersteigerung
- Erprobung des Messkonzeptes und Optimierung hinsichtlich Aufwand und Einsatzintervallen
- Ermittlung der Frühwarncharakteristik des Konzeptes durch Ermittlung der Resteinsatzzeit vom Zeitpunkt des ersten feststellbaren Verschleißes bis zum Totalausfall
- Bestimmung der möglichen Gesamteinsatzdauer der Anlage bis zur Generalsanierung

Durch den Einsatz zusätzlicher akustischer Messtechnik und die regelmäßigen Überwachungsmessungen erhöhen sich die laufenden Kosten für die Instandhaltung zuerst gegenüber der herkömmlichen Herangehensweise. Ziel ist es jedoch, die Gesamtkosten über die komplette Einsatzzeit der Anlage dahingehend zu reduzieren, indem die Anlage durch gezielten Austausch schadhafter Tragrollen deutlich länger betrieben werden kann, bevor eine komplette Erneuerung erfolgen muss.

¹ erfüllt die Anforderungen an Tragrollen der Kennzeichnung „Ü“ mit einer maximalen Rundlaufabweichung von 0,5 mm nach der Lieferanforderung für Girlanden der LEAG vom 15.12.2014

2.3 Messaufbau und Durchführung

Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen gewährleisten zu können, ist es erforderlich, dass die Betriebsbedingungen der Anlage zu den jeweiligen Messterminen annähernd konstant sind. Das bedeutet, die Fördergeschwindigkeit muss 6,7 bis 6,8 m/s betragen und die Beladung über 2/3 der maximalen Auslastung liegen. Weiterhin sind regelmäßige Überwachungsmessungen wichtig, um auffällige Tragrollen zeitnah ersetzen zu können. Der Abstand der Überprüfungsintervalle hängt davon ab, welche Restlebensdauer von der ersten Feststellbarkeit des Schadens an einer Tragrolle bis zum Ausfall zu erwarten ist. Das Intervall sollte entsprechend kürzer gewählt werden - an den untersuchten Teststrecken wurde der nominelle Untersuchungsabstand auf drei Monate festgelegt. Der tatsächliche Abstand zwischen den Messungen fällt in der Regel länger aus, was auf ungünstige Witterungs- sowie Betriebsbedingungen und die damit verbundenen Verzögerungen zurückzuführen ist. In Abhängigkeit von der Anlage und den verbauten Tragrollen beträgt die Restlebensdauer von der Feststellung der ersten Wälzlagerverschleißanzeichen bis zum Wechseln der Tragrollen über sechs Monate, wodurch auch längere Abstände zwischen den Messungen möglich sind. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass im dazwischenliegenden Zeitraum nicht zu viele Tragrollen verschleißbedingt akustisch auffällig werden, da sonst die Lokalisierung der zu wechselnden Girlanden auf Grundlage von Schallmessungen nicht mehr möglich ist. Eine Körperschallanalyse würde eine Ortung der defekten Tragrollen möglich machen, wäre jedoch entsprechend aufwändiger.

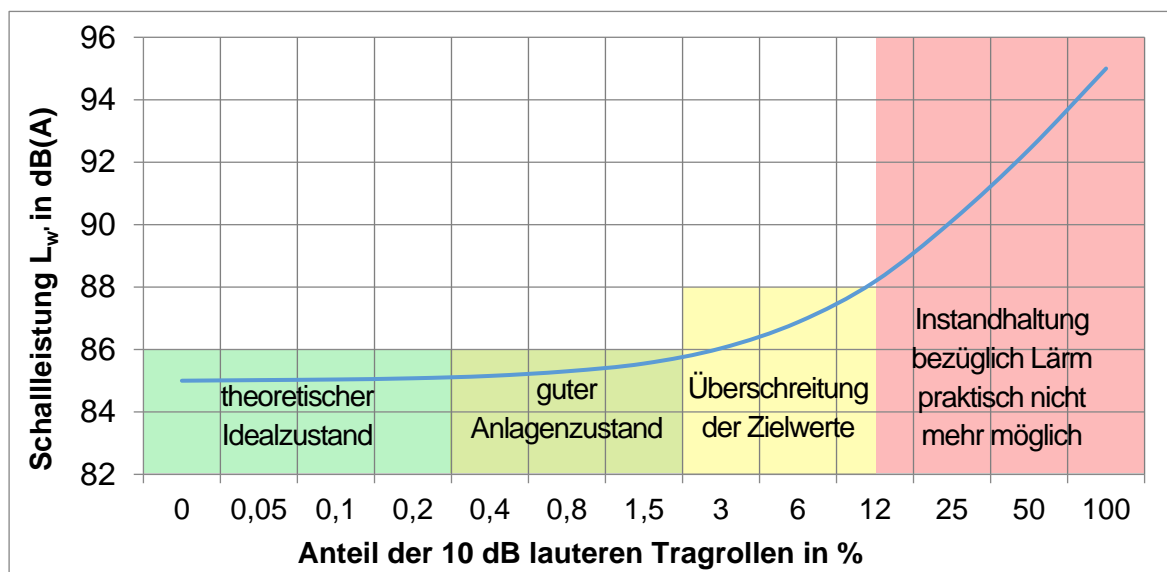


Bild 1: Modellrechnung für den Einfluss von geschädigten Tragrollen auf die mittlere längenbezogene Schalleistung einer Gurtförderanlage mit $L_w' = 85$ dB(A) bei ungeschädigten Rollen und $L_w' = 95$ dB(A) bei Rollen mit Schäden an den Wälzlagern (nach [12], S. 137)

Das Diagramm in Bild 1 stellt den Einfluss von geschädigten und lautereren Tragrollen auf die gemittelte Schalleistung einer Gurtförderanlage dar. Die farblich markierten Anlagenzustände sind anlagenspezifisch und abhängig von den verwendeten Tragrollen und den generellen Anlagenspezifikationen. Je nach Instandhaltungskonzept können sich die Grenzen somit während der Einsatzzeit der Gurtförderanlage verschieben.

Bei der zustandsbezogenen Instandhaltung bezüglich Lärm ist es beispielsweise vorteilhaft, den Instandhaltungspegel – also den Schalleistungspegel der Anlagenteile, ab dem Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden – dem generellen Anlagenzustand anzupassen. Bei den untersuchten Testabschnitten der Gurtförderanlage 66 wurde festgelegt, dass der Instandhaltungspegel 9 dB über dem Median der Schalleistungspegel aller Segmente liegt. Diese dynamische Anpassung hat den Vorteil, dass Fremdeinflüsse während der Messung oder systematische Fehler ausgeglichen werden, insofern sie die komplette Anlage betreffen. Unterschiedliche Förderleistungen sowie Temperatur- und Witterungseinflüsse werden dadurch ebenfalls kompensiert.

Zusätzlich kann bei dieser Vorgehensweise ein maximaler Grenzwert für die Gesamtanlage erforderlich sein, welcher auch von Immissionsvorgaben abhängen kann. Da der Instandhaltungspegel durch die konstante Differenz zum Median ebenfalls kontinuierlich zunimmt, kann es zu einer kontinuierlichen Verschlechterung des Anlagenzustands kommen, da keine oder unzureichende Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden. Das kann insbesondere dann eintreten, wenn alle Anlagenteile zeitgleich verschleißen oder es bei vorangeschrittener Lebensdauer der Anlage zu gehäuften Ausfällen kommt.

Die zur Anlagenbeurteilung notwendigen Daten werden regelmäßig durch Intensitätsmessungen nach Bild 2 erfasst und anschließend der längenbezogene Schalleistungspegel für die Bewertung gebildet.

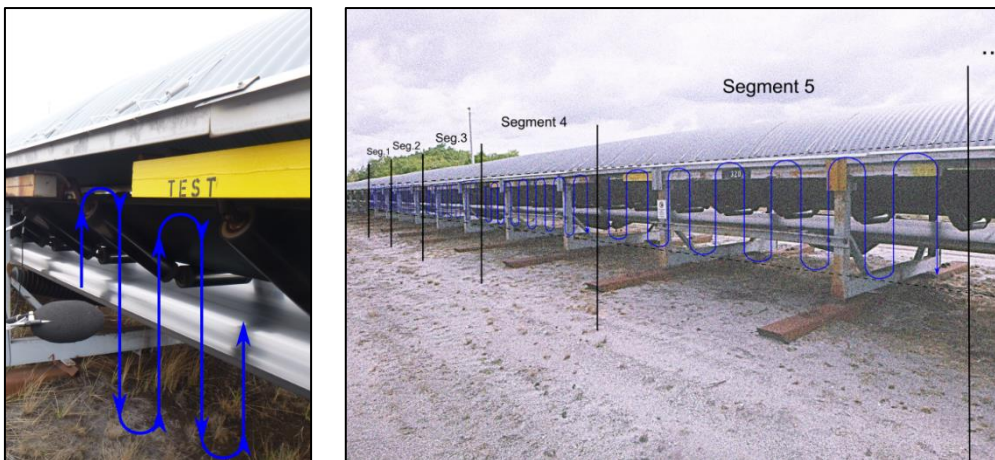


Bild 2: Schematischer Messpfad mit einer Intensitätssonde an den Segmenten der Teststrecken

Um sicherzustellen, dass die angewandte Methode aussagekräftige und für die Anlage repräsentative Daten liefert, muss diese im Vorfeld anhand des aufgestellten akustischen Modells abgestimmt werden. Große Bedeutung hat dabei die Messfläche, da gewährleistet wird, dass sie die anlagencharakteristischen Schallintensitäten widerspiegelt. Hierbei sind die Schallquellen selbst (Tragrollen) sowie eventuelle Reflexionen (Fördergurt, Abdeckungen etc.) zu berücksichtigen. Quantitative Aussagen zur Repräsentativität der Messfläche liefern dabei vergleichende Schalldruckpegelmessungen in verschiedenen Abständen zur Förderanlage. Der nach DIN ISO 9613-2 unter Verwendung der DIN 45635-1 (Schalldruckmessungen) ermittelte Schalleistungspegel muss sich analog des Schalleistungspegels nach DIN EN ISO 9614-2 (kontinuierlich abtastende Schallintensitätsmessung) innerhalb der zulässigen Fehlertoleranz bewegen (vgl. hierzu

auch [12], S. 26 bis 31).

Zur Verkürzung der Messungen und Reduzierung der Ergebnisse auf die relevanten Daten werden vorerst nur die Schalleistungen der Segmente (5 bis 6 Girlanden) ermittelt. Erst wenn ein Segment den gemittelten Schalleistungspegel des Testabschnittes um 9 dB überschreitet, werden die einzelnen Girlanden selektiv vermessen, um die bestimmenden Quellen bzw. geschädigten Tragrollen ausfindig zu machen. Eine so als defekt bestimmte Girlande wird anschließend angezeigt und innerhalb der nächsten regelmäßigen Instandhaltung durch eine neue Girlande gleichen Baumusters und Herstellers ersetzt.

2.4 Ergebnisse und Auswertung zu den untersuchten Testabschnitten an den Gurtförderanlagen im Tagebau Nochten

Für die zwei untersuchten Testabschnitte nach Tabelle 2 werden die Untersuchungsergebnisse in den folgenden Diagrammen dargestellt.

Testabschnitt 1

Der Testabschnitt 1 wurde Ende 2007 mit Tragrollen des Herstellers A neu ausgerüstet und im Februar 2008 das erste Mal vermessen. Die neuwertige Anlage weist mit einem längenbezogenen Schalleistungspegel L_w' von gemittelt etwa 87 dB(A)/m einen leicht unterdurchschnittlichen Wert für nicht lärmgeminderte Tragrollen (90 dB(A)/m) auf (Bild 3).

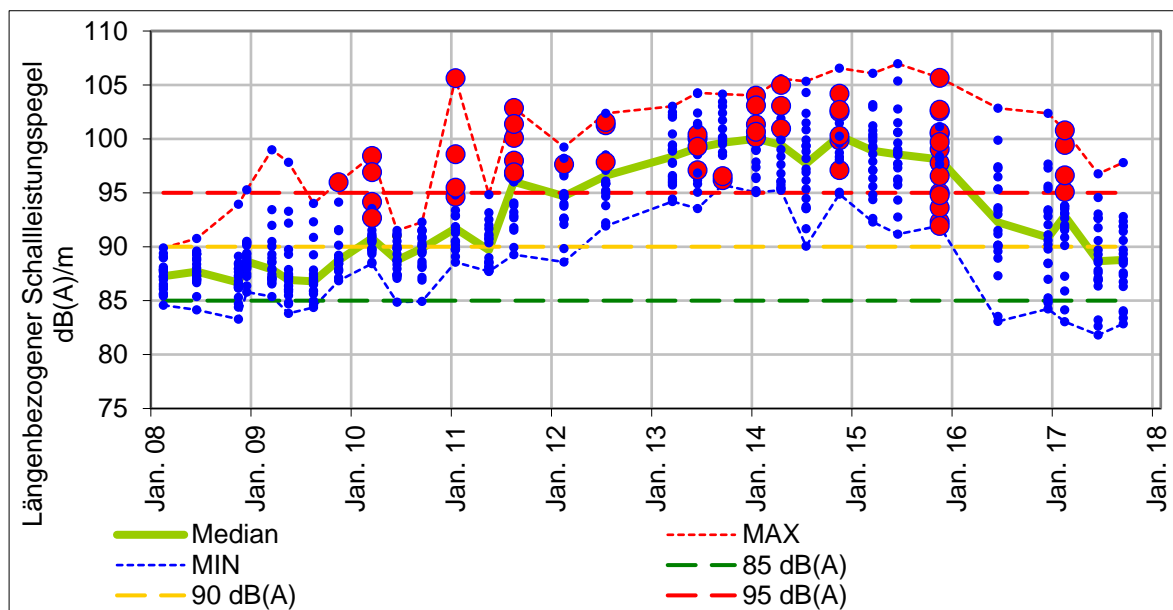


Bild 3: Untersuchungsergebnisse für Testabschnitt 1, Girlandentyp A3G-2000-A159x750/600/750-10-5-18-Ü, maximale Rundlaufabweichung 0,5 mm, Tragrollenhersteller A, Testabschnitt mit 20 Segmenten und etwa 100 Girlanden

Der Median des längenbezogenen Schalleistungspegels beginnt jedoch schon nach zwei Jahren Betriebszeit signifikant und stetig anzusteigen und überschreitet die 90 dB(A)/m. Im Folgenden greifen die zustandsbezogenen Instandhaltungsmaßnahmen und bis Mai 2011 werden neun Tragrollengirlanden ausgebaut und durch neue ersetzt. Die Maßnahmen wirken und der Median des längenbezogenen Schalleistungspegels schwankt bis dahin um 90 dB(A)/m. Bis zur folgenden Messung im August 2011 gibt es jedoch einen sprunghaften Anstieg auf 95 dB(A)/m, welcher einen weiteren umfangreichen Girlandenwechsel von

sechs Stück nach sich zieht. Dadurch gelingt es jedoch nicht, den Median des längenbezogenen Schalleistungspegels wieder zu senken, sondern er steigt weiter an, bis er zwischen Januar und Oktober 2014 sein Maximum von etwa 100 dB(A)/m erreicht. Zwischen Mai 2011 und Oktober 2014 wurden weitere 24 Tragrollengirlanden ausgetauscht.

Während in den ersten beiden Betriebsjahren nur eine Girlande ersetzt werden musste, steigt das Austauschverhältnis im dritten Jahr auf 4 % und in den folgenden Jahren auf etwa 10 % der Girlanden im Testabschnitt an. Bei einer derart hohen Austauschhäufigkeit stellt die zustandsbezogene Instandhaltung in diesem Fall auch keine ökonomische Verbesserung dar, ohne darauf im näheren eingehen zu wollen.

Bis August 2011 erfolgte der Ersatz ausschließlich durch Tragrollen desselben Herstellers A. Da diese Rollen jedoch konstruktive Mängel im Bereich der Wälzlagerabdichtung aufwiesen, welche auch der Grund für den beschleunigten und vorzeitigen Ausfall darstellten, wurden zu wechselnde Girlanden im Folgenden durch Tragrollen eines anderen Herstellers ersetzt (Bild 4 und Bild 5).



Bild 4: Defekte Lagerabdichtung an einer Tragrolle des Herstellers A, die im Folgenden zum Eindringen von Verunreinigungen in das Wälzlager führt [LEAG]



Bild 5: Folgeschaden an einer Tragrolle des Herstellers A in Form eines komplett zerstörten Wälzlagers, der Innenring hat sich schon mehrere Millimeter in die Tragrollenachse eingearbeitet [LEAG]

Aufgrund der konstruktiven Mängel im Bereich der Wälzlagerabdichtungen der Tragrollen des Herstellers A sind diese Rollen nach einer Einsatzzeit von etwa vier bis fünf Jahren schlagartig und in großer Anzahl ausgefallen. Zu diesem Zeitpunkt war es nicht mehr möglich, mit Hilfe der angewendeten zustandsbezogenen Instandhaltungsmethode die Gurtförderanlage in einem sicheren und betriebsfähigen Zustand zu erhalten. Aus diesem Grund wurden im November 2015 nahezu alle verbliebenen Girlanden des Herstellers A in diesem Abschnitt durch andere Girlanden ersetzt und der Testabschnitt aufgegeben. Die nachfolgenden Messungen ab Anfang 2016 zeigen jedoch deutlich, dass die Auswahl geeigneter Ersatztragrollen wieder zu einem Absenken des mittleren längenbezogenen Schalleistungspegels auf den ursprünglichen Wert führt.

Dieser Testabschnitt zeigt auch die Grenzen der betrachteten zustandsbezogenen Instandhaltungsmethode auf. Bei systematischen Fehlern der verbauten Komponenten – wie in diesem Fall der Wälzlagerabdichtungen – ist es nicht möglich, die Methode über

einen längeren Zeitraum erfolgreich umzusetzen. Weiterhin ist die Auswahl von qualitativ hochwertigen Tragrollen für den Einsatz in Hochleistungsgurttförderanlagen ein entscheidender Faktor in Bezug auf die Anlagensicherheit und Gesamtlebensdauer. Für die Geräuschemissionen der Förderstrecke sind dabei insbesondere die Oberflächen- und Laufeigenschaften des Tragrollenmantels wie Kreisformabweichung und Außermittigkeit sowie die Mantelstärke und -form von großer Bedeutung. Für die Lebensdauer der Wälzlager spielt neben einer auf die Betriebsbedingungen angepassten Konstruktion, einer korrekten Montage, der Art und Menge des Schmierstoffs, auch die Ausführung und Zuverlässigkeit des Abdichtsystems eine ausschlaggebende Rolle. Als Konsequenz aus diesen Untersuchungsergebnissen werden die hier betrachteten Tragrollen des Herstellers A in keinem Förderer der LEAG mehr eingesetzt.

Testabschnitt 2

Die Untersuchungen am Testabschnitt 2 wurden ebenfalls im Februar 2008 begonnen, nachdem die Anlage Ende 2007 neu ausgerüstet wurde. Die hier verbauten Tragrollen weisen dieselben Spezifikationen wie in Testabschnitt 1 auf (maximale Rundlaufabweichung 0,5 mm), sind jedoch vom Hersteller B.

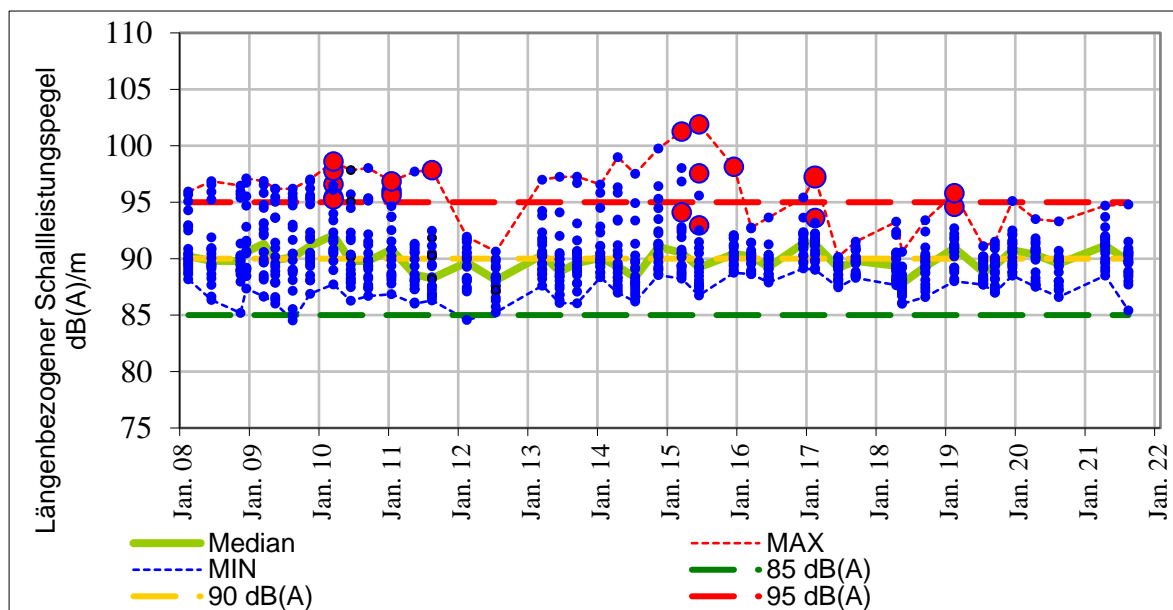


Bild 6: Untersuchungsergebnisse für Testabschnitt 2, Girlandentyp A3G-2000-A159x750/600/750-10-5-18-Ü, maximale Rundlaufabweichung 0,5 mm, Tragrollenhersteller B, Testabschnitt mit 20 Segmenten und 100 etwa Girlanden

Der Median des längenbezogenen Schalleistungspegels der neu ausgerüsteten Anlage liegt bei etwa 90 dB(A)/m und damit auf einem durchschnittlichen Niveau für diese Tragrollenausführung. Das Diagramm aus Bild 6 zeigt, dass sich der Median über den gesamten Untersuchungszeitraum bis zur letzten berücksichtigten Messung im August 2021 auch um die 90 dB(A)/m bewegt. Anstiege machen sich durch einzelne defekte Tragrollen bemerkbar, welche jedoch durch die ausgelösten Maßnahmen ersetzt wurden. Über den betrachteten Zeitraum von 14 Jahren kann somit gewährleistet werden, dass sich die Anlage akustisch gesehen auf dem Niveau des Neuzustandes bewegt. Der Austausch von Girlanden aufgrund von Defekten verteilt sich jedoch nicht gleichmäßig über diese Zeit. So gibt es im dritten, vierten und siebten Betriebsjahr einen gesteigerten Austausch von

etwa 4 bis 6 % der insgesamt untersuchten Tragrollengirlanden.

Innerhalb des betrachteten Zeitraums von 14 Jahren wurden insgesamt 19 Girlanden aufgrund von Verschleiß ersetzt. Das entspricht einem Austauschverhältnis von etwa 1,5 % pro Jahr in Bezug auf die Gesamtgirlandenanzahl und liegt damit deutlich unter dem Niveau von Testabschnitt 1, bei dem das Verhältnis gemittelt fast 8 % pro Jahr beträgt.

Die Ergebnisse von Testabschnitt 2 beweisen die Anwendbarkeit der beschriebenen Methode zur zustandsbezogenen Instandhaltung und der gestellten Ziele:

- Erhaltung des Anlagenzustands in einem sicheren und betriebsfähigen Zustand auf dem Niveau einer neu ausgerüsteten Anlage
- Steigerung der Gesamteinsatzdauer bis zur Totalrevision durch Ausnutzung der Lebensdauerreserven der einzelnen Komponenten

Bei dem betrachteten Anlagentyp und den Betriebsanforderungen weist dieser Gurtförderer eine Einsatzdauer von etwa sieben bis acht Jahren auf, bis die Anlage und speziell die verbauten Tragrollen komplett revidiert werden müssen. Der Untersuchungszeitraum von bisher 14 Jahren stellt somit eine deutliche Einsatzdauersteigerung dar. Die Messergebnisse lassen darüber hinaus nicht den Schluss zu, dass in der nächsten Zeit eine signifikante Verschlechterung des Anlagenzustands zu erwarten ist, aufgrund dessen eine Totalrevision erforderlich wäre.

Zusammenfassung zu den Freifelduntersuchungen an den Testabschnitten 1 und 2

Die Untersuchungen an den vier Testabschnitten der Gurtförderanlagen im Tagebau Nochten beweisen, dass die vorgestellte Methode der zustandsbezogenen Instandhaltung auf Grundlage von Lärmmessungen geeignet ist, um

- die Anlage in einem sicheren und betriebsfähigen Zustand zu halten und unplanmäßige Stillstände zu vermeiden,
- den akustischen und mechanischen Gesamtzustand auf dem Niveau einer neu ausgerüsteten Anlage zu halten,
- die Gesamtbetriebsdauer der Anlage bis zur Generalrevision um ein Vielfaches zu steigern und
- eine Prognose zum Schädigungsverhalten mit ausreichend zeitlichem Vorlauf für die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen zu geben.

Voraussetzung dafür ist die Aufnahme akustischer Messdaten der Anlage in einem regelmäßigen Untersuchungsintervall, um Schäden frühzeitig erkennen zu können. Weiterhin hat die Auswahl qualitativ hochwertiger Tragrollen einen großen Einfluss auf die Anwendbarkeit der Methode, die laufenden Instandhaltungskosten und die Gesamtlebensdauer der Anlage. Diese Qualität wird maßgeblich durch die Oberflächenbeschaffenheit des Tragrollenmantels, die Wirksamkeit des Abdichtsystems und der Fertigungs- und Montagegenauigkeit (z. B. Wälzlagerausrichtung und Axialspiel) bestimmt.

Eine überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung weist auf den deutlichen Kostenvorteil

der vorgestellten Methode der zustandsbezogenen Instandhaltung an Gurtförderanlagen gegenüber der herkömmlichen Herangehensweise hin.

Quellenverzeichnis:

- [1] DIN EN 13306:2018-2, Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung, 2018
- [2] Sturm, A.; Förster, R.: Maschinen und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung. Stuttgart: B. G. Teubner Stuttgart, 1990
- [3] Richter, C.; Fessel, K.; Katterfeld, A. ; Chumachenko, Y.: Anwendungsszenario des Internet der Dinge am Beispiel von Tragrollenheißläufern bei Gurtförderanlagen, Logistics Journal: Proceedings, 2019
- [4] Weinzierl, S.: Instandhaltung. Wie Smarte Sensoren bei der Zustandsüberwachung helfen. [Online] 15. Mai 2020. [Zitat vom: 12. Februar 2021.] <https://www.instandhaltung.de/praxisanwendung/wie-smarte-sensoren-bei-der-zustandsueberwachung-helfen-297.html>.2020]
- [5] Kebbe, J.: Start-Up aus Hannover entwickelt Sensoren für das „Internet der Dinge“. Bitmotec GmbH. Hannover: IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, 2019. Presseinformation. 2019
- [6] Lehman, L-B.; Daus, W.; Eckardt, G.; Petermann, L.: Verfahren zur fortlaufenden Messung des Verschleißes aller Tragrollen in Gurtförderern. Patent: DE 199 11 642 B4 2006.08.31 Deutschland, 1999
- [7] Ziegler, M.: Verfahren zur Überwachung der Bandausrichtung und/oder des Bandlaufs einer Gurtbandfördereinrichtung sowie Gurtbandförderer. Patent: DE 10 2005 021 627 A1 2006.11.16 Deutschland, 06. 05 2005
- [8] Trippler, S.: Verfahren zur Detektion und Lokalisierung heißer Komponenten innerhalb eines Gurtförderers. Patent: DE 10 2014 114 887 A1 2016.04.14 Deutschland, 14. 10 2014
- [9] König, J.; Oepen, B.: Girlandenprüfstand zur Zustandsdiagnose gebrauchter Tragrollen. [Hrsg.] RDB e.V. bergbau 10/2017. 10 2017, S. 451-455
- [10] Mühlkamp, S.: Überwachung von Fördergurten. Schüttgut. Würzburg : Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 2021. Artikel in einem online-Newsletter. Online-Artikel vom 14.01.2021, aufgerufen: 08.04.2021, URL: <https://www.process.vogel.de/einfachere-inspektion-von-foerdergurten-a-991799/>
- [11] ABB Ltd. review - Autonome Kollaboration. s.l. : ABB Group R&D and Technology, 2018. S. 44-49, Kurzartikel Unternehmensinnovationen. ISSN: 1013-3119.
- [12] Täschner, D.: Untersuchungen der akustischen Wirkung von Tragrollen zur zielgerichteten Lärminderung an Gurtförderanlagen. Freiberg: Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2014. Bd. C 546. ISBN 978-3-86012-476-5

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

xForce Weiterentwicklung einer konventionellen Tragrolle

Yevhen Redka



Yevhen Redka, M. Sc.
Artur Küpper GmbH & Co.KG
An der Knippenburg 27
46238 Bottrop

xForce

Weiterentwicklung einer konventionellen Tragrolle

Intelligente Werkstoffe sind die Basis für moderne Hightech-Produkte. Dabei stehen die Nachhaltigkeit und ein ressourcenschonender Materialkreislauf im Vordergrund. Im vergangenen Jahrhundert war Stahl der zentrale Werkstoff. Jetzt arbeiten Forscherinnen und Forscher bereits seit geraumer Zeit an neuen Werkstoffen mit völlig neuen Eigenschaften, die auch für die nächste Generation Tragrollen von großer Bedeutung sind. Unter Berücksichtigung dieser neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse hat die Artur Küpper GmbH & Co. KG gemeinsam mit ihren Partnern erfolgreich eine Tragrolle aus einem Faserverbundwerkstoff entwickelt, Küpper – xForce.

1 Einleitung

Stahlrollen sind aus gutem Grund weltweit in der Fördertechnik zu finden. Sie vereinen hohe Traglasten, moderaten Verschleiß und hohe Rundlaufgenauigkeiten miteinander.

Erweiterte Arbeits- und Umweltschutzregelungen sowie aggressivere Einsatzbedingungen erfordern den Einsatz von leichteren und resistenteren Werkstoffen.

Das trifft in erster Linie in Einsatzgebieten mit folgenden Anforderungen zu:

- Reduzierung der Tragrollenmasse (Personalentlastung bei Rollentransport und -wechsel)
- Einsatz unter aggressiven Bedingungen (Säuren, Alkalien, Salzwasser etc.)
- Reduzierung von Schallemissionen (staatliche Restriktionen für Bevölkerungs- und Umweltschutz)

Aufgrund dieses Anforderungsprofils wurde von Küpper die xForce Composite-Tragrolle als eigenständiges Entwicklungsprojekt ins Leben gerufen.

Bereits in der Entwicklungsphase wurde deutlich, dass das speziell entwickelte Zwei-Komponenten-Tragrollenrohr aus glasfaserverstärktem Innenrohr und verschleißoptimierter PU-Decklage eine außergewöhnliche Langlebigkeit und Zuverlässigkeit gewährleistet (Bild 1). Die notwendige Steifigkeit der Tragrolle und die gewünschte Gewichtsreduzierung wird durch das GFK Kernrohr erzielt. Die PU Decklage stellt die notwendige Elastizität und chemische Widerstandsfähigkeit sicher.

In Verbindung mit einer präzisen Fertigung garantiert diese Neuentwicklung eine hohe Tragfähigkeit, eine reduzierte Schallemission sowie ein erheblich reduziertes Rollengewicht.

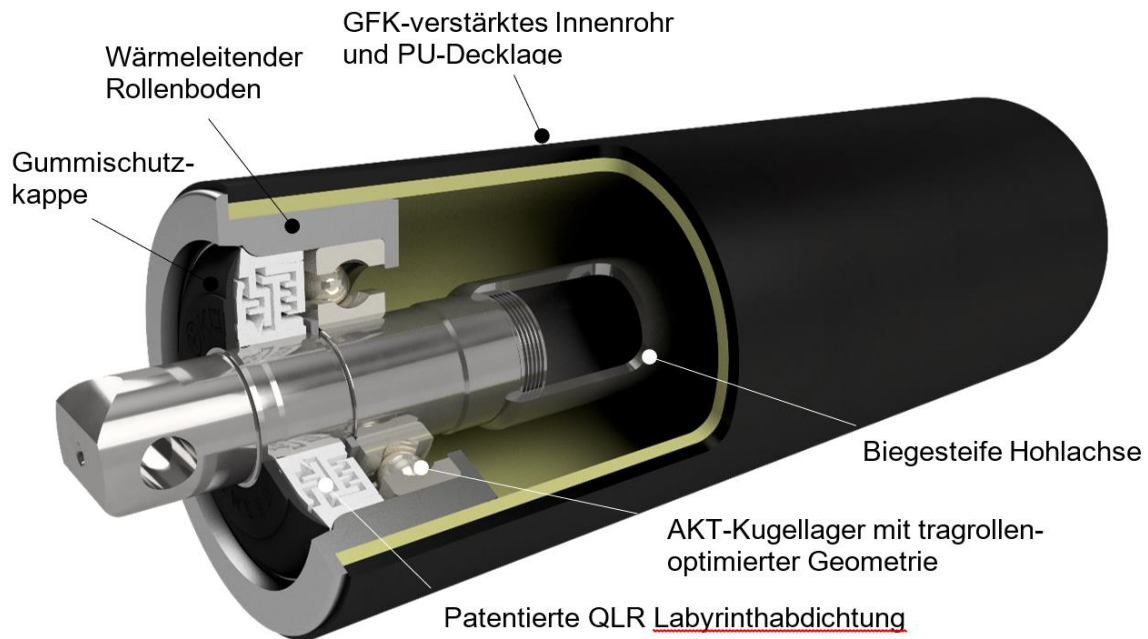


Bild 1: Küpper xForce-Composite-Tragrolle

2 Entwicklung und Untersuchungen im Küpper-Labor

Berechnungen, Simulationen und Untersuchungen sind heutzutage ein unentbehrlicher Bestandteil aller Entwicklungsprojekte. Das Projekt xForce war dabei keine Ausnahme. Schon im frühen Entwicklungsstadium fanden eine Vielzahl von Berechnungen und Versuchen statt. Die Versuche wurden in unserem Labor auf eigenen Tragrollenprüfständen durchgeführt.

Da es sich bei dem Mantelrohr um einen Verbundwerkstoff handelt, dessen Steifigkeitsberechnung mit einem hohen Aufwand und einer hohen Fehlerwahrscheinlichkeit verbunden ist [1], wurde zunächst die tatsächliche Steifigkeit des Rohrs experimentell in unserem Tragrollen-Belastungsprüfstand (Bild 2) ermittelt.

Durch diese Versuche wurde belegt, dass die Belastungsgrenze der xForce-Composite-Tragrolle um bis zu 100 % über dem Wert einer Standard-Kunststofftragrolle liegt (Bild 3) und sich somit auf dem vergleichbaren Niveau einer konventionellen Stahltragrolle befindet. Dadurch ist der Einsatz der xForce-Composite-Tragrolle in hochbelasteten Bereichen, z. B. als Mitteltragrolle im Obertrum, möglich.

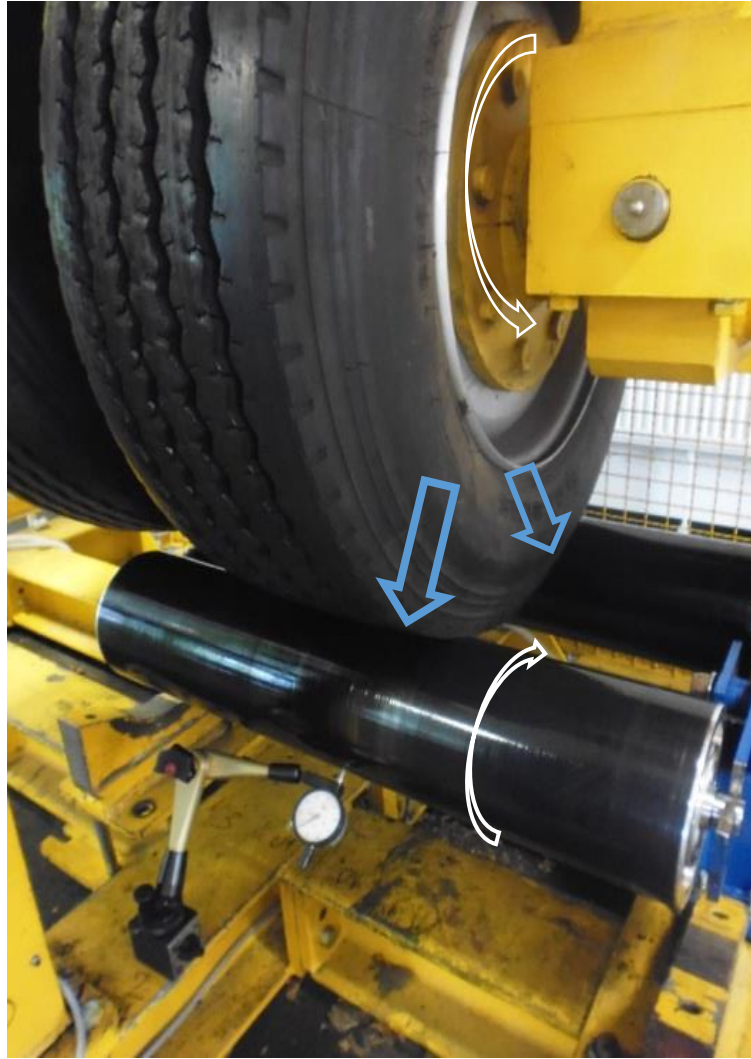


Bild 2: xForce-Tragrolle im Testlabor

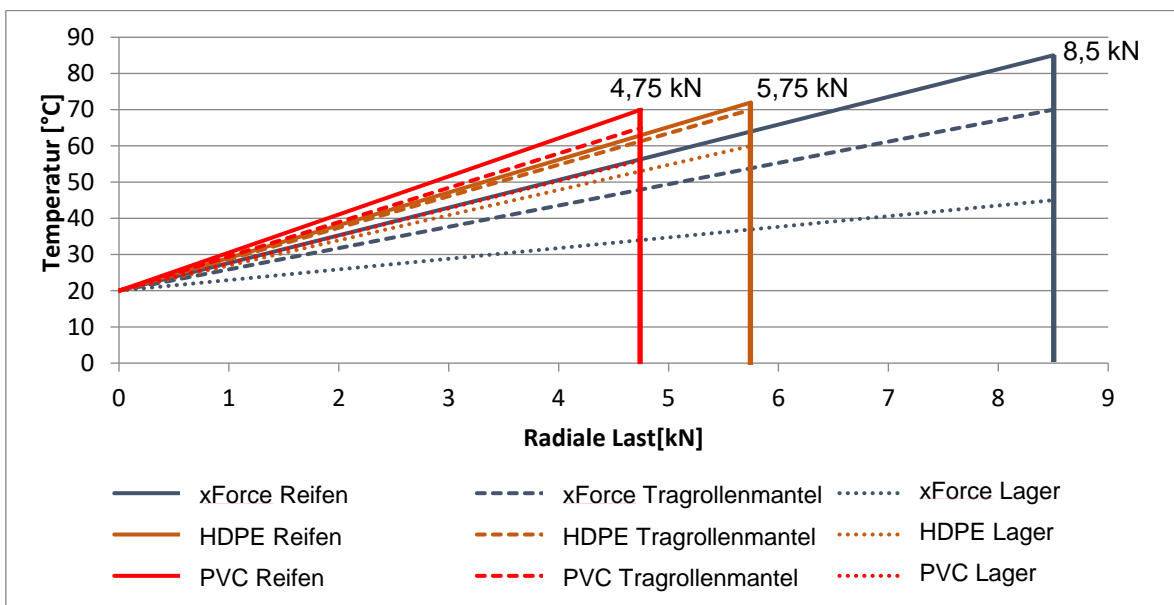


Bild 3: Steifigkeit und Temperaturentwicklung unterschiedlicher Tragrollenmantelausführungen

Im weiteren Entwicklungsverlauf wurden alle Komponenten der xForce-Composite-Tragrolle aufeinander abgestimmt und weitere Messungen und Prüfungen durchgeführt. Die Rollenbodengeometrie wurde in Verbindung mit der Kontaktfläche zum Composite Rohr optimiert.

Parallel hierzu wurden die Montagequalität kontrolliert und eine Reihe von Tragrollen-Parametern wie z. B. Laufwiderstand, Planlauf, Rundlauf, Axialspiel, Wuchtgüte gemessen und analysiert (Bild 4 und 5) ([2],[3]).



Bild 4: xForce-Composite-Tragrolle in den Prüfständen
Planlaufmessung (links), Laufwiderstands- und Temperaturmessung (rechts)

Durch den leichten Verbundwerkstoff und die exakte Geometrie des Rohres hat die Tragrolle eine exzellente Wuchtgüte, eine sehr geringe Rundlaufabweichung und einen niedrigen Laufwiderstand. Die Temperaturentwicklung ist auch unter Last unauffällig (Bild 5).

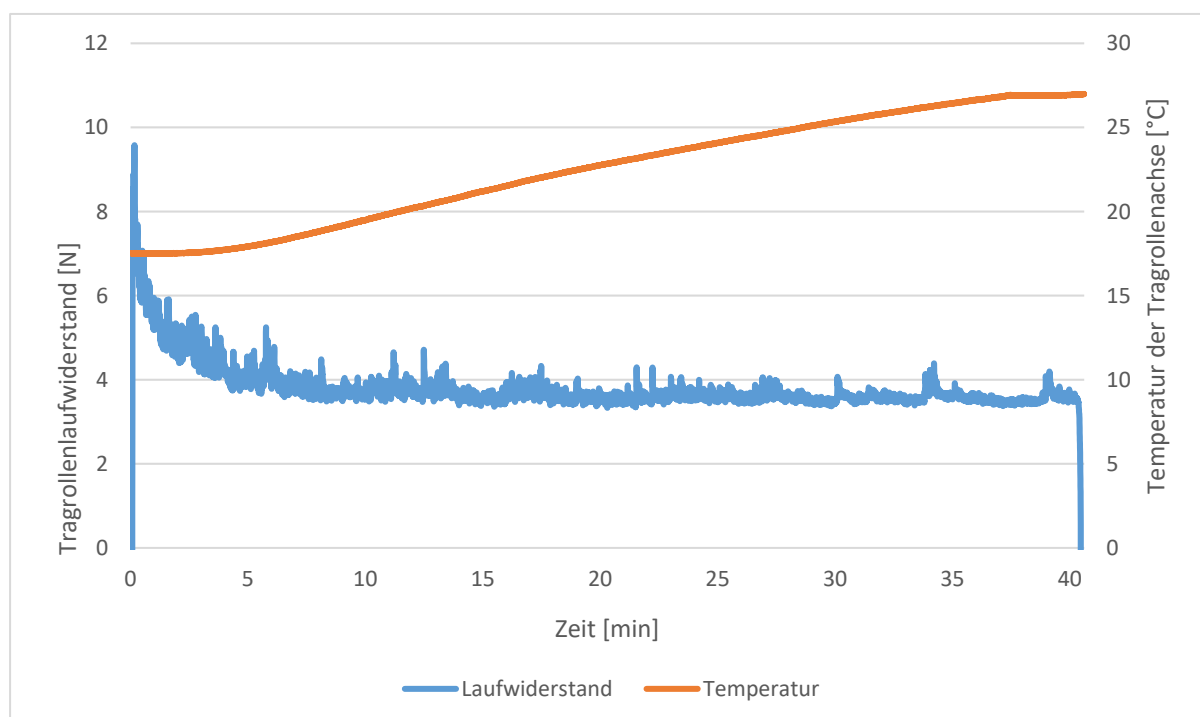


Bild 5: Laufwiderstand und Temperaturentwicklung (Ø160, RL 465 mm, Lager 6310)

3 Feldtest in einer hochbelasteten Bandanlage in Deutschland

Nach erfolgreicher Überprüfung und Analyse der xForce-Composite-Tragrolle auf den Prüfständen im Kupper-Labor wurde ein Feldtest in einer leistungsstarken und schnelllaufenden Anlage mit einem Massenstrom von 22.000 t/h und einer Bandgeschwindigkeit von ca. 10 m/s durchgeführt.

Die Tragrolle wurde als 5-teilige Girlande in einem hochbelasteten Bereich eingesetzt (Bild 6). Die Mittelrolle ($\varnothing 160$, RL465) wurde mit 7,4 kN belastet und rotierte mit bis zu 1100 U/min.

Nach fünf Jahren wurde der Test erfolgreich abgeschlossen. Die Tragfähigkeit und die Laufeigenschaften der xForce Tragrolle wurden im Vergleich zu den benachbarten konventionellen Stahltragrollen bestätigt. Der Schallpegel wurde durch den Einsatz der xForce-Tragrollen deutlich reduziert.

Neben der deutlichen Geräuschreduzierung kommt der Verringerung der Gesamtmasse eine besondere Bedeutung zu. Durch den Einsatz der xForce-Tragrolle wird das Gewicht einer Girlande um 55 kg reduziert, bei einer Förderlänge von 500 m ist somit eine Reduzierung der Masse um mehr als 17 Tonnen möglich. Dies beeinflusst die Statik des Stahlbaus positiv und führt somit zu mehr Sicherheit und einer verlängerten Lebensdauer der Gesamtanlage.

Aus ergonomischer Sicht wird das Personal durch die Gewichtsreduzierung beim Wechseln von Tragrollen spürbar entlastet.



Bild 6: Fünfteilige Girlandenausführung mit xForce-Composite-Tragrollen (Massenstrom 22.000 t/h, Bandgeschwindigkeit bis 10 m/s)

4 Feldtest in Südamerika mit extremen Umgebungsbedingungen

Ein weiteres Anwendungsbeispiel der xForce-Tragrolle ist der Einsatz in aggressiven Umgebungsbedingungen. Auf Bild 8 werden die Vorteile des Verbundwerkstoffes der xForce-Tragrolle im Vergleich zu einer Stahl-Tragrolle (Bild 7) dargestellt.

In der Test-Anlage wird feuchtklebriges Material transportiert, das beim Einsatz von Stahl-Tragrollen an der Manteloberfläche des Tragrollenrohres anbackt und aushärtet. Diese großflächigen Anbackungen erhöhen die Rundlaufabweichung der Tragrollen und führen folglich zu „Gurtflattern“ und zum Gurtschieflauf sowie zu einer deutlichen Verringerung der Tragrollenlebensdauer infolge steigender dynamischer Tragrollenbeanspruchung. Auf den Bildern 8 bis 10 ist klar erkennbar, dass an der xForce-Tragrolle keine Anbackungen auftreten.

Die auf den Bildern 8 bis 10 dargestellten xForce-Tragrollen wurden im Dezember 2018 eingebaut und sind bis heute fehlerfrei im Einsatz. Dieser Erfolg ist auf die flexible PU-Oberfläche der xForce-Tragrolle zurückzuführen. Durch die Mikrowalkbewegungen des PU-Mantels wird anbackendes Material direkt abgesprengt. Für die notwendige Biegesteifigkeit sorgt der glasfaserverstärkte Kern des Tragrollenmantels. Somit ist die xForce-Tragrolle auch für die hohen Förderleistungen dieser Bandanlage bestens geeignet. Darüber hinaus beeinflusst die antikorrosive Eigenschaft der xForce-Tragrolle die Lebensdauer positiv und kann somit überall dort eingesetzt werden, wo durch aggressive Medien Stahlrollen in kürzester Zeit korrodieren.

Stahl Tragrolle



Bild 7: Verstärkte Materialanbackungen an einer Stahlrolle

- Anbackungen
 - Extreme Rundlaufabweichung
 - Hohe Schallemission
 - Geringe Lebensdauer
 - Gurtflattern/-schieflauf

xForce Composite Tragrolle



Bild 8: Selbstreinigende Manteloberfläche der xForce-Tragrolle

- Keine Anbackungen
 - Guter Rundlauf
 - Geringe Schallemission
 - Lange Lebensdauer

Vergleich der Performance unter aggressiven Bedingungen
(feuchtes, säurehaltiges Material, Meerwasser)

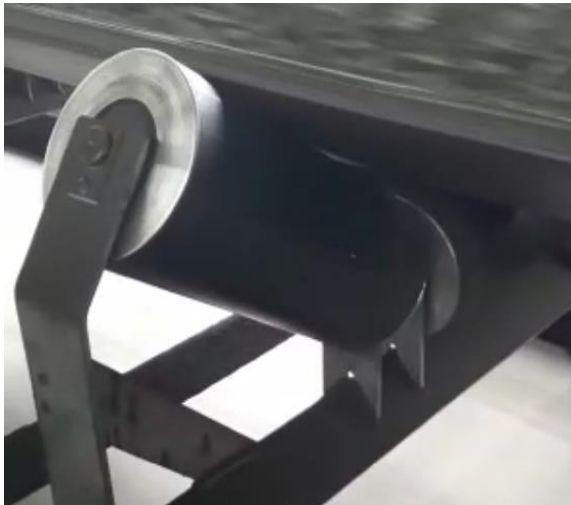


Bild 9: xForce-Composite-Tragrollen im Einsatz, Hafenanlage, Kupfererzförderung, Einbau im Dezember 2018



Bild 10: Tragrollenzustand im Mai 2023 nach 4,5 Jahren im Dauerbetrieb

5 xForce – Weiterentwicklung zur Tragrolle der Zukunft

Um die xForce-Tragrolle zukünftig in eine kundenbezogene digitale Infrastruktur einzubinden, hat die Artur Küpper GmbH & Co. KG (AKT) zusammen mit dem Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM) der Otto-von-Guericke-Universität (OVGU) im Jahr 2022 das Forschungsprojekt ENORM gestartet. Dieses Projekt wird im Rahmen des ZIM-Netzwerkes „NekoS“ bearbeitet und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) gefördert.

Ziel dieses Projekts ist es, die Tragrollenüberwachung auf ein qualitativ höherwertiges Niveau zu bringen.

Das Konzept der neuen Überwachung basiert auf folgenden Prinzipien:

- Kontinuierliche Messung der lebensdauerrelevanten Tragrollenparameter (Verschleiß, Temperatur, Belastung, Geschwindigkeit)
- Ermittlung der Restlebensdauer der Tragrolle unter Berücksichtigung der Messdaten und der Laufzeit.

Basierend auf den gemessenen und den aktuellen Berechnungsergebnissen wird die Restlebensdauer aller Tragrollen ermittelt und dem Betreiber als „bleibende Kapazität der Tragrolle“ auf die Systemkonsole übertragen. Somit entsteht ein Überwachungssystem, das dem Anlagenbetreiber die Wartungsplanung erleichtert und dem Einkauf punktgenau die zu bestellenden Materialien mitteilt.

Durch die ständige Auswertung der Messdaten und den Abgleich mit der tatsächlichen Lebensdauer ist das System selbstlernend und kann die Vorhersagen der

Tragrollenlebensdauer fortwährend optimieren.

Ein weiterer Vorteil des Systems ist die direkte Feststellung von Störungen oder Unregelmäßigkeiten im laufenden Betrieb der Bandanlage. Durch die Analyse der Messparameter können kritische Anlagenbereiche lokalisiert und entschärft werden.

Der konzeptionelle Aufbau der Sensor-xForce-Tragrolle ist im Bild 11 dargestellt.

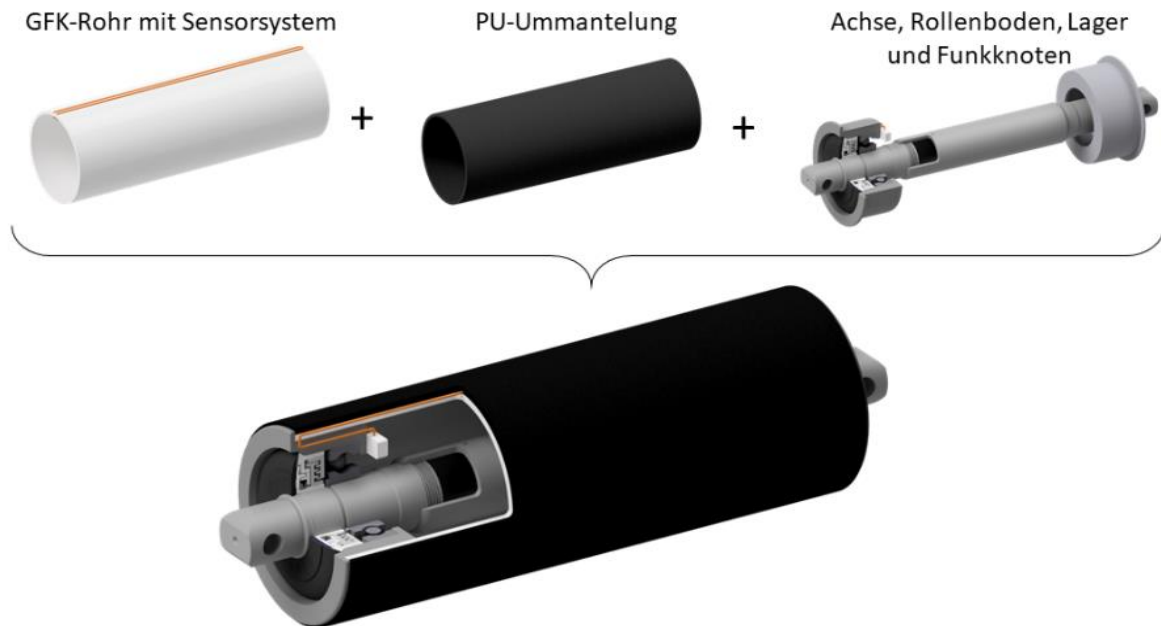


Bild 11: Konzeptioneller Aufbau der Sensor-xForce-Tragrolle

Quellenverzeichnis:

- [1] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden (2., bearbeitete und erweiterte Auflage): Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, 2007; ISBN 978-3-540-72189-5
- [2] DIN 22112-3:2022-1, Gurtförderer für den Kohlenbergbau unter Tage – Tragrollen – Teil 3: Prüfung
- [3] DIN ISO 21940-11:2023-04, Mechanische Schwingungen – Auswuchten von Rotoren – Teil 11: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit starrem Verhalten

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

RULMECA® - Monitoring System (RMS) Zustandsüberwachung - Datenerhebung - Auswertung beim Betrieb von Trommelmotoren

Jens Hagenau



Dipl.-Ing. Jens Hagenau
Rulmecca Germany GmbH
Wilslebener Chaussee 12-14
06449 Aschersleben

RULMECA® - Monitoring System (RMS)

Zustandsüberwachung - Datenerhebung - Auswertung beim Betrieb von Trommelmotoren

Vorstellung des in der Endphase der Entwicklung befindlichen Systems zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung von Trommelmotoren. Das Rulmeca Monitoring System (RMS) ist ein integriertes System mit weltweiter Verfügbarkeit, um die Sicherheit, Produktivität, Zuverlässigkeit sowie die Effizienz und Nachhaltigkeit eines Gurtförderers zu verbessern.

1 Einleitung

RULMECA Germany GmbH ist, als Teil der weltweit operierenden RULMECA Gruppe, der Fertigungsstandort für Trommelmotoren für den Bereich der Schüttgutfördertechnik. Weiterhin produziert und vertreibt RULMECA alle notwendigen Einzelkomponenten für den Bau von Förderbändern.

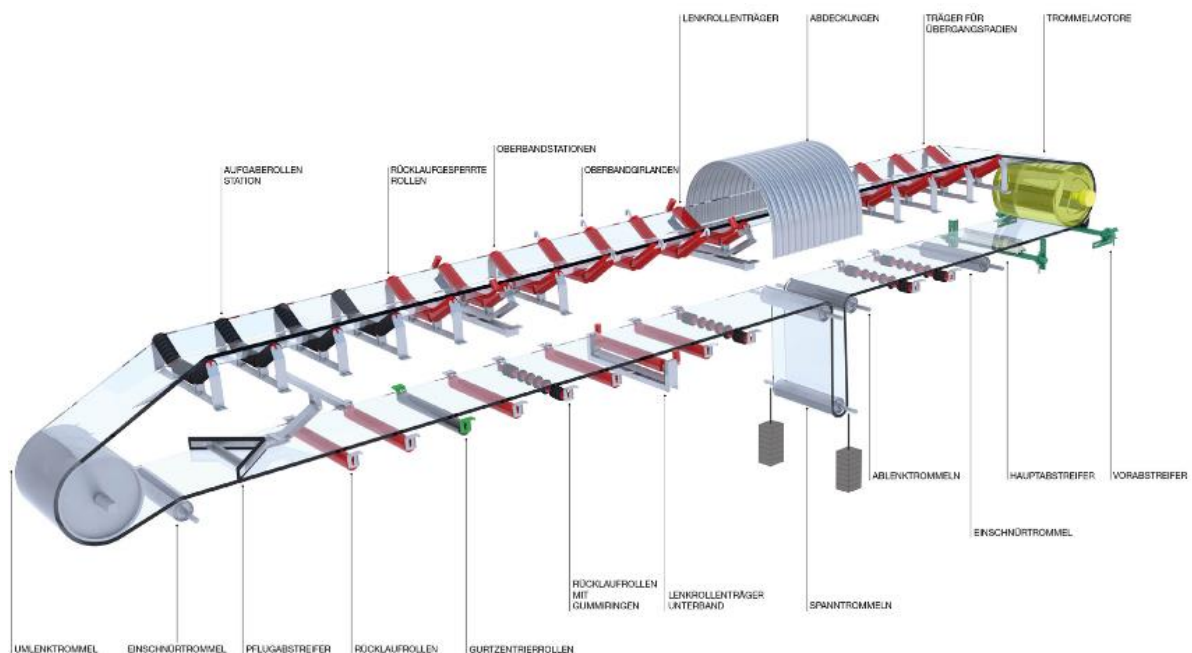


Bild 1: RULMECA-Komponenten für Schüttgutförderer

Neben dem Bereich Schüttgut ist RULMECA auch bekannt als Lieferant für Komponenten für die Bereiche Stückguttransport und Intralogistik. RULMECA verfügt über ein weltweites Netz von Produktions-, Service- und Vertriebsstandorten.



Bild 2: RULMECA-Gruppe - weltweit

Innerhalb der letzten Jahrzehnte erfreuen sich Trommelmotoren einer immer größer werdenden Beliebtheit bei Anwendern in der Schüttgutfördertechnik. Der Trommelmotor stößt dabei in Nischen vor, die seine spezifischen Vorteile als Förderbandantrieb für die Anwender wirtschaftlich interessant machen. So verzeichnet die RULMECA Germany GmbH in den letzten Jahren ein starkes Wachstum, das 2022 zum erfolgreichsten Jahr der Firmenhistorie als Trommelmotorenhersteller machte.

Die Hauptnachfrage kommt dabei aus Bereichen, in denen Maschinen mobil eingesetzt werden oder wo beim Materialumschlag explosionsfähige Stäube entstehen. Beispiele hierfür sind:

- Übergabeband Schaufelradbagger SRS702 (MIBRAG) – Bilder 3 und 4
- Verfahrbarer Absetzer für Abraum einer Kupfermine (Mexiko) – Bilder 5 und 6
- Getreideumschlag im Hafen von Liverpool (UK) – Bilder 7 und 8

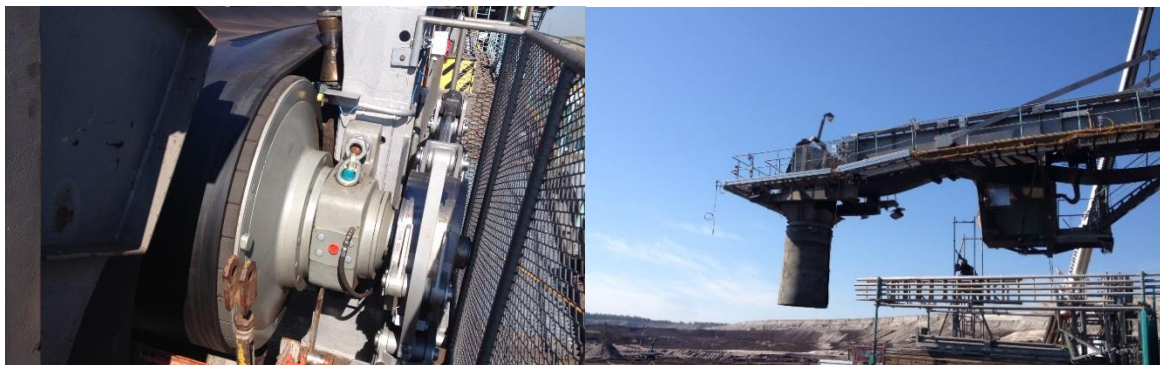


Bild 3 und Bild 4: Trommelmotor TM1000HD – 160 kW



Bild 5 und Bild 6: Trommelmotor 800H – 55-75 kW

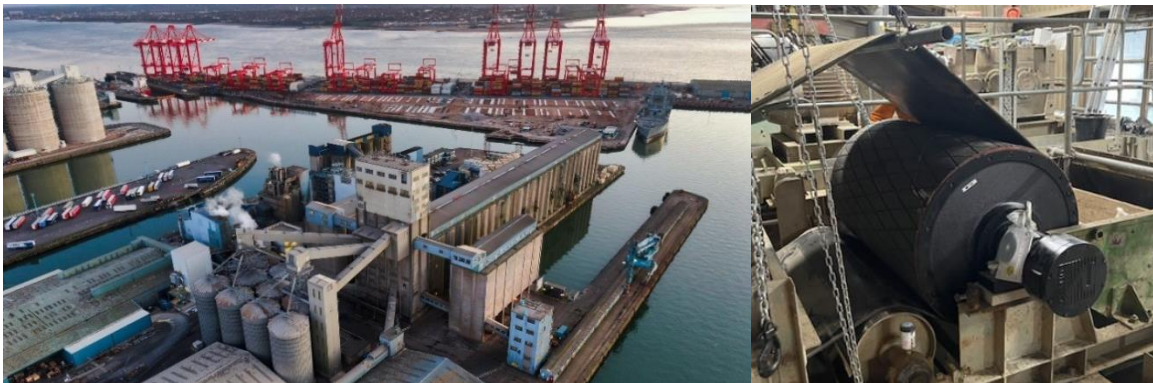


Bild 7 und Bild 8: Trommelmotor 630H ATEX 45 kW

Viele dieser Anlagen sind Teile einer kritischen Infrastruktur. Dafür ist es notwendig, Produkte in höchster Qualität zu liefern. Für ihre Zuverlässigkeit werden die RULMECA Trommelmotore weltweit geschätzt. Kein System kann eine hundertprozentige Ausfallsicherheit garantieren. Daher kommt der Zustandsüberwachung der Förderbandantriebe steigende Bedeutung zu. In herkömmlichen Getriebemotorsystemen wird eine Zustandsüberwachung schon angeboten. Für RULMECA war das der Anlass, ein speziell auf den Trommelmotor zugeschnittenes System zu entwickeln, welches dem Anwender zuverlässige Informationen über den Zustand seines Förderbandantriebs liefert.

2 Aufgabenstellung

Eine kontinuierliche Überwachung des Zustands der Trommelmotoren und daraus abgeleitete Wartungsmaßnahmen sind unerlässlich, um größere Ausfälle der Fördersysteme zu verhindern (Bilder 9 bis 12).

Und hier geht es nicht allein um mögliche Reparaturkosten des Antriebs, der Stillstand der Gesamtanlage ist hier der wirtschaftliche Hauptschaden.



Bild 9 bis 12: Klassische Schäden an Trommelmotoren durch Überlastung

Abweichungen vom Normbetriebszustand des Trommelmotors können verursacht werden durch:

1. Falsche Auslegung – Leistungsberechnung
2. Mangelnde Wartung des Förderers - z.B. Gurtschieflauf, erhöhte Laufwiderstände durch Abstreifer, Abdichtungen, Materialanhaftungen, schadhafte Tragrollen
3. Überladen der Förderbänder - das RULMECA Leistungsberechnungsprogramm (das auch Kunden zur Verfügung steht) gibt standardmäßig einen visuellen Hinweis auf die Ausnutzung des Förderquerschnitts (Bild 13)
4. Installationsfehler – Nichtbeachtung von Einbau- und Betriebsvorschriften

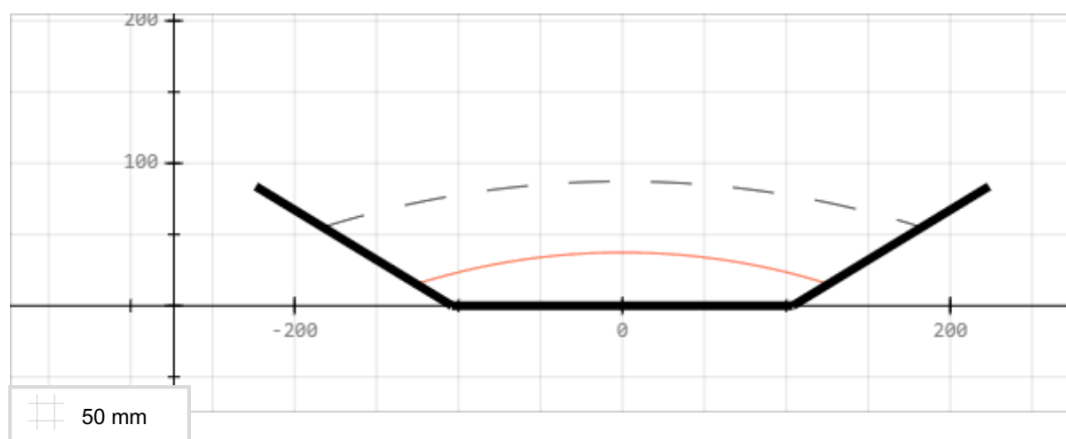


Bild 13: Unterdurchschnittliche Auslastung des Fördererquerschnitts

Diese und weitere, hier nicht genannte Fehler können zu einer Schädigung des Antriebssystems Trommelmotor führen. Um frühzeitig Informationen über solche beginnenden Schädigungen zu erhalten, ist es notwendig, eine permanente Überwachung zu installieren und somit Grundlagen für eine vorbeugende Instandhaltung zu schaffen.

3 Das Konzept

Kontinuierliche Zustandsüberwachung erhöht die effektiven Einsatzzeiten bzw. minimiert Ausfallzeiten und hilft so, Kosten zu reduzieren

Das Rulmeca Monitoring System (RMS) ist ein integriertes System mit weltweiter Verfügbarkeit, das sich in der Entwicklung befindet, um die Sicherheit, Produktivität, Zuverlässigkeit sowie die Effizienz und Nachhaltigkeit eines Gurtförderers zu verbessern.

4 Systemmerkmale

Das RMS nimmt folgende Daten auf (Bild 14):

- Schwingungsanalyse bis zu 25kHz (Messung alle 4 Stunden) *
- Drehzahl (Messung alle 4 Stunden) *
- Temperatur (Messung stündlich) *
- Stromstärke (permanente Messung)

* Kann entsprechend der Notwendigkeiten angepasst werden – Datenvolumen!

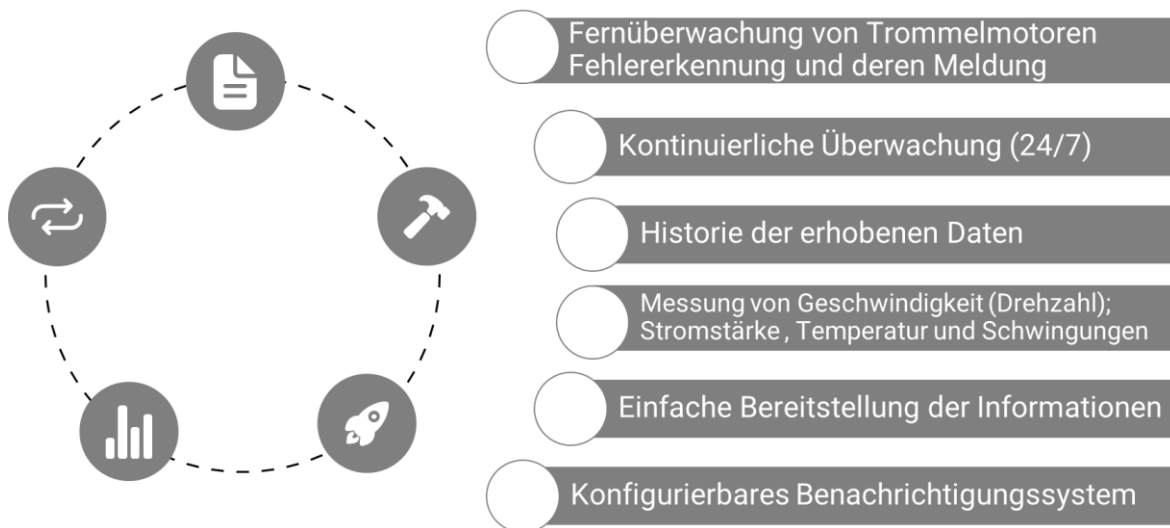


Bild 14: RMS Systemmerkmale

Hardwaremäßig wird der Trommelmotor mit Schwingungssensoren, Temperaturfühlern und Drehimpulsgebern versehen. Dazu kommt eine außerhalb des Motors befindliche Stromstärkemessung (Bild 15).

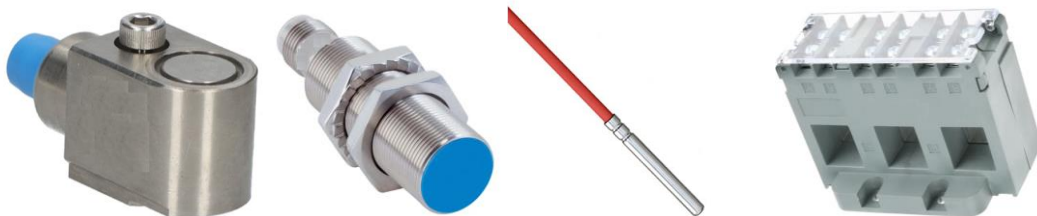


Bild 15: Eingesetzte Sensoren


Softwareseitig wertet ein von RULMECA erstellter Algorithmus die Daten aus. Der Datentransfer erfolgt wahlweise über eine Cloud-Lösung oder aber durch eine lokal installierte Software auf dem Server des Kunden.

Die Ergebnisse der Auswertung werden über ein Web-Interface (cloudbasierte Lösung) oder auf dem Kundenterminal ausgegeben. Neben einer detaillierten Ausgabe der Daten (Schwingungsanalyse, Temperatur- und Stromstärkeverlauf) soll die Signalisierung möglichst einfach erkennbar sein.

Die Datenübertragung vom Trommelmotor zur Datenverarbeitung übernimmt ein Gateway. Dieses kann die Daten per GSM (G4), WIFI oder Netzwerkkabel übertragen. Die GSM-Verbindung überträgt die Daten direkt in die Cloud zur Verarbeitung durch den Algorithmus.

Das Gateway übernimmt die drahtgebundenen Signale aller im Trommelmotor installierten Sensoren und wird im Umkreis von 5 m installiert.

Jedes Gateway benötigt eine Energieversorgung (100 V bis 240 V/ 50-60 Hz/Netz oder Akku) und eine Verbindung zum Internet (GSM/LTE/Wifi/LAN) und verfügt über:

- GPS-Sensor zur Ortsbestimmung
- Status LED: 
- Firmware: Auto update
- IP66 Schutzart
- Betrieb unter Umgebungstemperatur $-40^{\circ}\text{C}/+60^{\circ}\text{C}$

5 Datenbereitstellung

Die Datenbereitstellung erfolgt nach verschiedenen Aspekten.

- Allgemeiner Status des Trommelmotors (Bild 16)

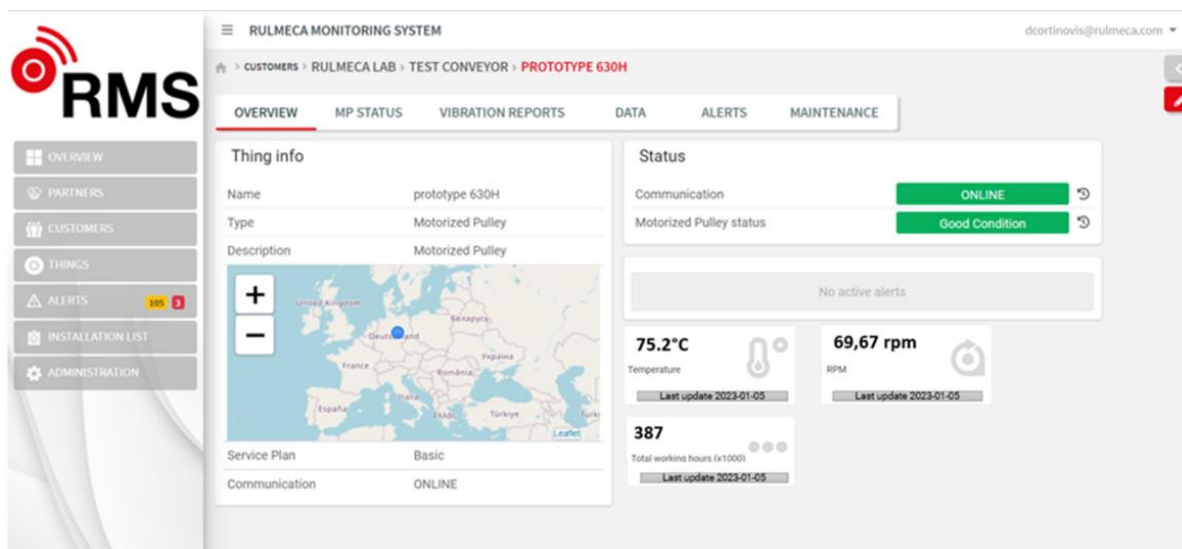


Bild 16: Weboberfläche RMS

- Schwingungsanalyse (Bild 17)

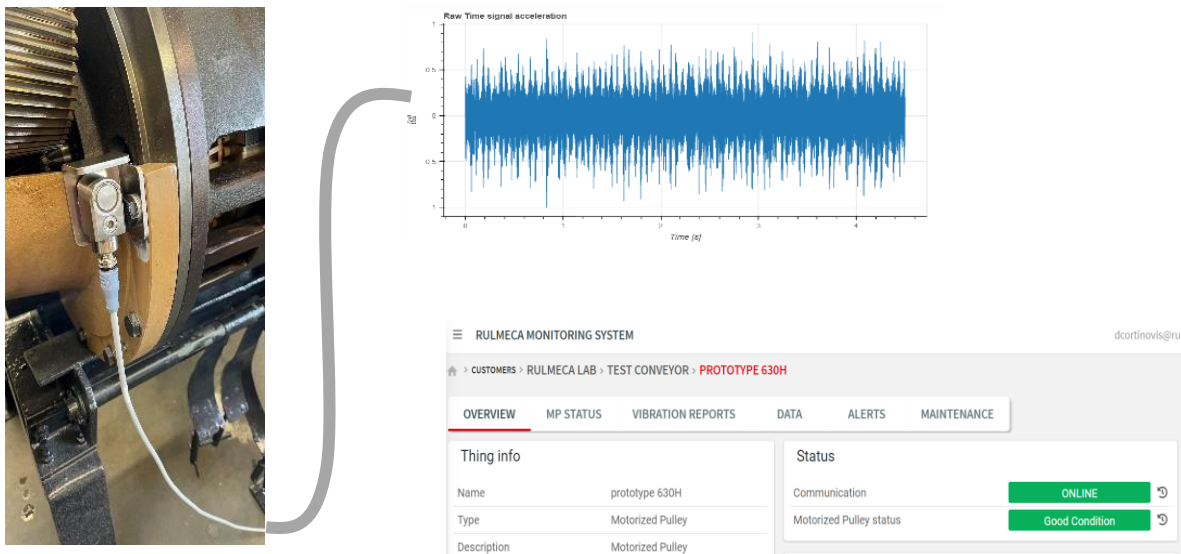


Bild 17: Schwingungsaufnahme und Analyse

- Provozierte Fehler in der Schwingungsanalyse (Bild 18 und Bild 19)

Bei den Prüfstandtests wurden gezielt Fehler erzeugt, die ein Bild über die Datenabweichung vom Normalzustand geben.

So liefert die Schwingungsanalyse aufschlussreiche Daten über mögliche Vorschädigungen von Lagern (inklusive Verweis auf Lagertyp und -Größe) sowie den Zustand der Zahnradpaarungen (Bild 18 und Bild 19).

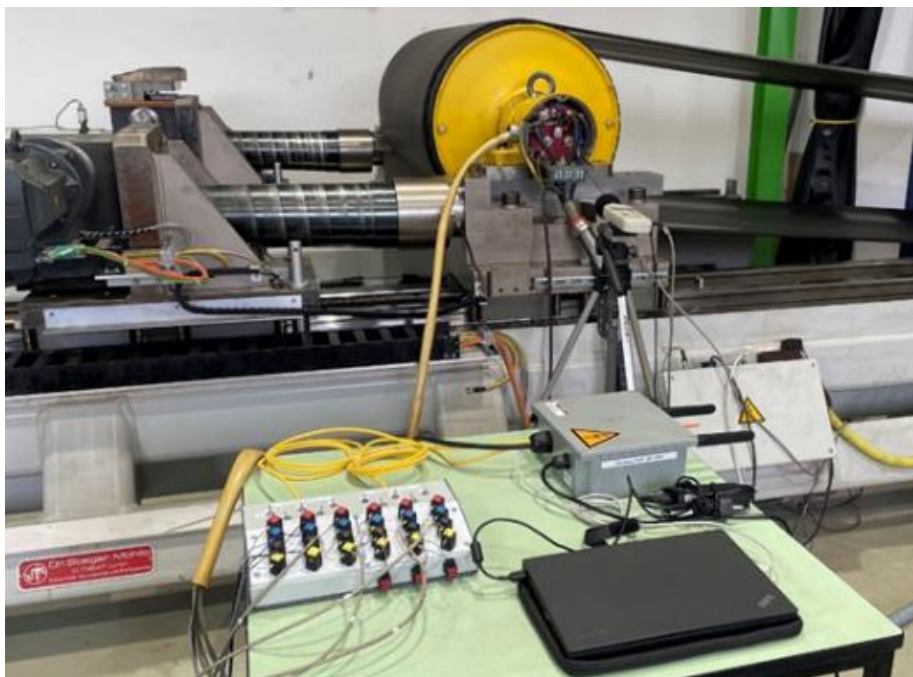


Bild 18: RULMECA-Prüfstand Aschersleben

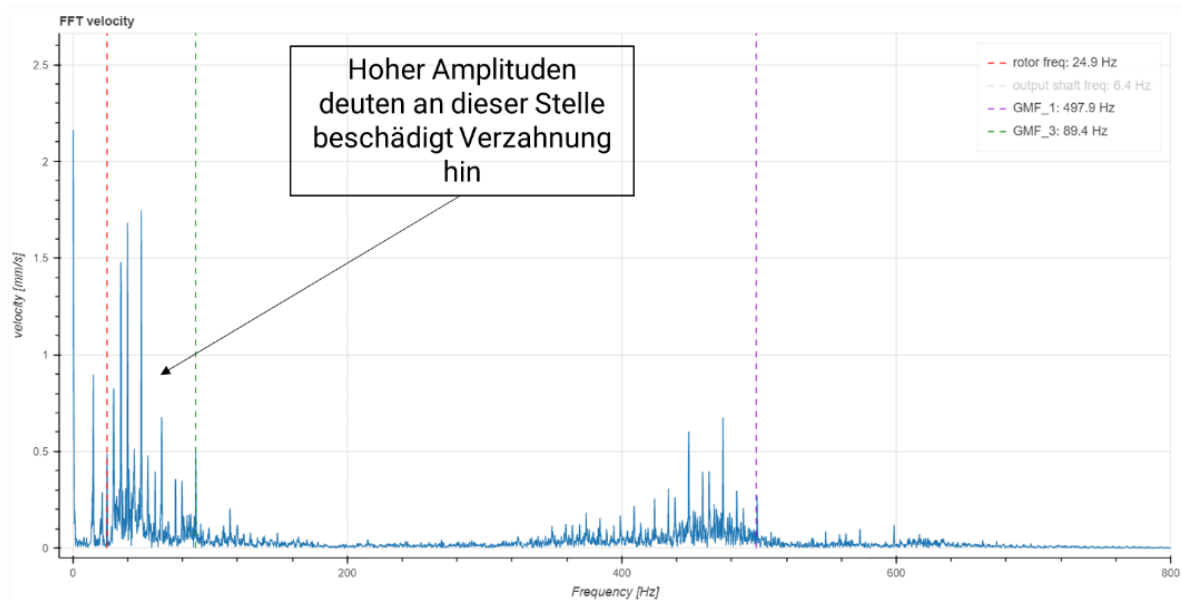


Bild 19: Schwingungsanalyse

- Stromstärke

Stromstärkeabweichungen geben Hinweise auf:

- Überlastung – zu hohes abgerufenes Drehmoment erhöht die Stromaufnahme des E-Motors
- Wicklungsschlüsse – Veränderung des Wicklungswiderstandes aufgrund von Alterung und Verschleiß durch Vibrationen

- Öltemperatur

Die Öltemperatur ist ein klarer Zustandsindikator der Trommelmotoren von RULMECA. Neben den „inneren“ Problemen, die schon mittels Schwingungsanalyse und Stromstärkemessung detektiert werden können, gibt die Öltemperatur Auskunft über weitere, auch äußere Faktoren. So können Art und Stärke des Reibbelags (Gummierung, Keramikbeschichtung) einen großen Einfluss auf die Kühlung des Trommelmotors haben (Bild 20). Dies äußert sich in einer erhöhten Öltemperatur. Auch über die zugelassenen Grenzen stattfindender Start-Stopp-Betrieb und hohe Umgebungstemperaturen ($> 50^{\circ}\text{C}$) führen zu erhöhter Öltemperatur).

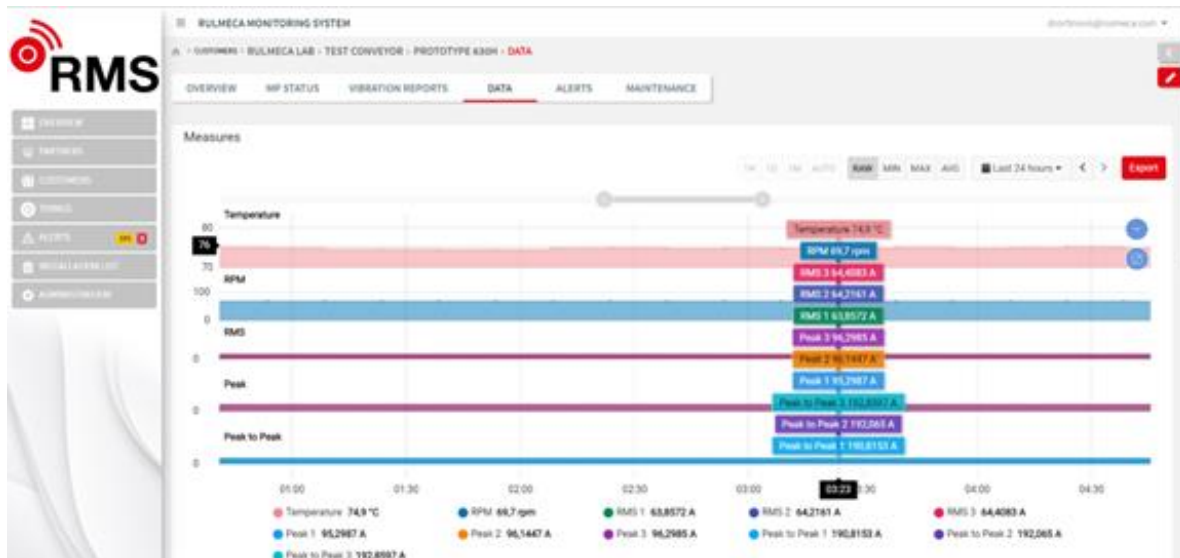


Bild 20: Datenbereitstellung über Weboberfläche

6 Verfügbarkeit des Systems

In 2023 werden insgesamt 4 Pilotinstallationen ihren Betrieb in Deutschland, UK, Schweden und den USA aufnehmen. Das RMS ist zunächst für Trommelmotoren mit einem Durchmesser von 500 mm bis 1000 mm vorgesehen. Nach Auswertung der Pilotinstallationen ist geplant, das System für kleinere Trommelmotoren (Durchmesser 220/320/400 mm) zu skalieren. So stellt sich für das Entwicklerteam die Frage, ob in jedem Fall alle Daten (Schwingung/Temperatur/Strom/Drehgeschwindigkeit) erhoben werden müssen, um eine hinreichende Zustandsbeschreibung vornehmen zu können.

RULMECA plant, das System ab 2024 für die Trommelmotoren ab Durchmesser 500 mm anzubieten.

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Materialflussanalyse zur simulativen Abbildung der Gewinnungsstrecke eines Bergwerks

Hendrik Otto
Sebastian Wellnhofer
Sven Holz
André Katterfeld



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



Sebastian Wellnhofer
IBAF GmbH
Zur Wetterwarte 50
01109 Dresden



Sven Holz
BGE mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine



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

Materialflussanalyse zur simulativen Abbildung der Gewinnungsstrecke eines Bergwerks

In dieser Studie werden Materialflusssimulationen eines Bergwerkes der BGE durchgeführt, mit dem Ziel, kritische Belastungsszenarien herauszuarbeiten und Engstellen im Materialfluss bereits während der Planung der Fördertechnik aufzuzeigen. Als Sondersituation der BGE im Vergleich zu anderen Montanbetrieben ist hierbei die ganztägige Gewinnung mit aber nur einschichtiger Verladung zu sehen. Dabei werden verschiedene Szenarien wie das Anfahren und Anhalten der Anlagen zu unterschiedlichen Befüllungszuständen der Förderanlagen und Bunkern erarbeitet.

1 Zielstellung

Das ehemalige Eisenerzbergwerk Schacht Konrad 1 in Salzgitter wird aktuell durch die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) zu einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle umgebaut. Für die Einlagerung müssen, neben den bereits aufgefahrenen Einlagerungskammern, weitere Strecken zur Einlagerung aufgefahren werden. Für die Auffahrung neuer Strecken muss die Gewinnungsstrecke von der Ortsbrust über Flurförderfahrzeuge, Gurtförderanlagen, Bunkeranlagen, der Schachtförderanlage bis zur Waggonbeladung neu installiert werden. Dabei kommt eine große Bandbreite verschiedener diskontinuierlicher und kontinuierlicher Fördertechnik zum Einsatz.

Im vorliegenden Projekt wird untersucht, wie der Einsatz von numerischen Simulationen zur Entwicklung einer effizienten Steuerungs- und Betriebsstrategie beitragen kann, um die Förderleistung im Kontext des Umbaus des ehemaligen Eisenerzbergwerks zu einem Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle zu maximieren. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Identifizierung kritischer Belastungsszenarien sowie der frühzeitigen Erkennung von Engpässen im Materialfluss während der Planungsphase.

Im Vergleich zu herkömmlichen Montanbetrieben stellt die kontinuierliche Gewinnung bei gleichzeitig einschichtiger Verladung eine besondere Situation dar. Daher werden verschiedene Szenarien betrachtet, die das Anfahren und Anhalten der Anlagen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Befüllungszustände der Förderanlagen und Bunker simulieren.

Durch den Einsatz numerischer Simulationen kann bereits in der Projektierungsphase ein detailliertes Bild der geplanten Gewinnungsstrecke entwickelt werden. Insbesondere in Kombination mit anderen Methoden wie der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) bietet sich die Möglichkeit, präzise Erkenntnisse zu gewinnen und so eine optimale Betriebsstrategie zu erarbeiten. Dieser multidisziplinäre Ansatz ermöglicht es, die vorhandenen Ressourcen effizient zu nutzen und eine maximale Förderleistung zu erzielen.

Die vorliegende Studie trägt somit dazu bei, das Verständnis des Materialflusses und die Planung zukünftiger Betriebsabläufe im Rahmen des Umbaus des Eisenerzbergwerks Schacht Konrad 1 zu verbessern. Durch die Anwendung moderner Simulationstechniken und die Integration verschiedener Analysemethoden werden wertvolle Erkenntnisse gewonnen, die eine effektive Steuerung des Betriebs ermöglichen und damit einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung des Endlagerprojekts leisten können.

2 Modellierung

Im Rahmen des Umbaus werden verschiedene Förderanlagen eingesetzt, um den Materialfluss zu gewährleisten. Das Fördergut besteht aus gelöstem Eisenerz und Konrad-typischen Nebengesteinen mit einer Korngröße von weniger als 500 mm. Das Fördergut ist trocken und gelegentlich scharfkantig. Der Streckenvortrieb wird durch eine Teilschnittmaschine realisiert.

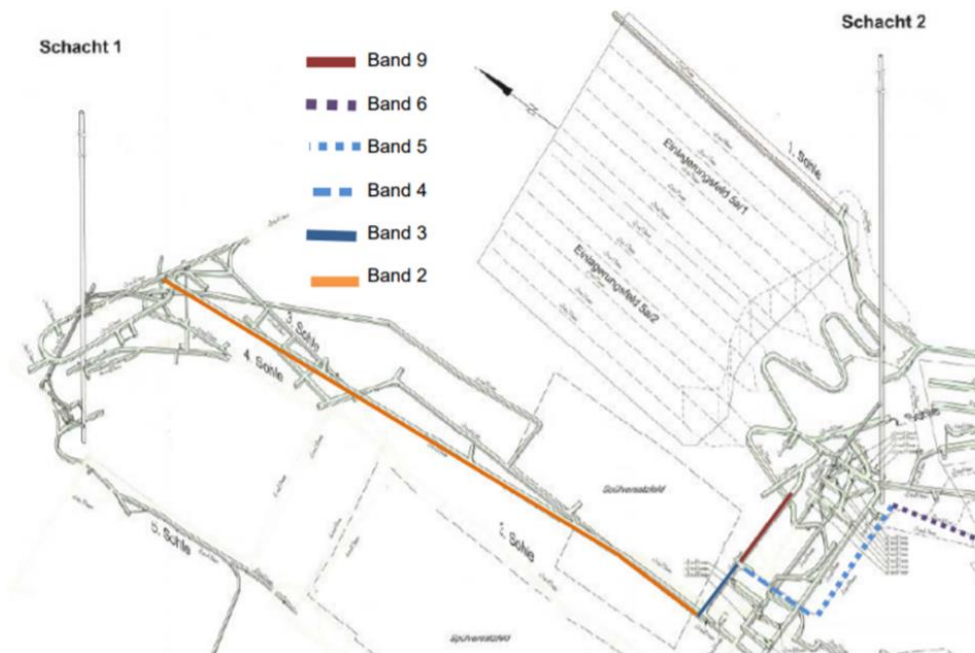


Bild 1: Auszug aus dem Grubenplan mit aufzufahrenden Strecken

Es gibt mehrere Gurtförderanlagen, die für den Transport des Materials verwendet werden, darunter Band 1, Band 2, Band 3, Band 4 und Band 9, die unterschiedliche Achsabstände und Förderzeiten aufweisen (Bild 1). Zusätzlich werden Übertagebänder eingesetzt, um das Material weiter zu transportieren. Ein Radlader mit einer Schaufelgröße von 25 Tonnen ist für die Beladung der Förderanlagen zuständig. Es werden verschiedene Benutzungsfälle für die Förderanlage definiert, bei denen das Material zu unterschiedlichen Zielpunkten transportiert wird, einschließlich Lagerplätzen und Bunkern.

Die Waggonverladung erfolgt zweimal täglich in einen 1000-Tonnen-Zug. Die Waggons können unterschiedliche Längen und Förderkapazitäten haben. Während der Nacht wird in einen Flachbunker per Radlader eingelagert, aus dem während der Tagschicht ausgespeichert wird. Dazu ist ein Gurtförderer reversierbar ausgeführt.

Ein Skipgefäß mit einer Kapazität von 15 Tonnen wird verwendet, um das Material von einem 60-Tonnen-Bunker auf der 1000 Meter Sohle kommend abzutransportieren. Direkt vor dem Skip befindet sich ein Vorhaltebunker mit einer Kapazität von 7 Tonnen, um die Befüllung des Skips zu beschleunigen. Bei der Schachtförderanlage handelt es sich um eine Einzelskipförderung.

Zusätzlich werden Muldenkipper und Fahrlader eingesetzt, um den Materialtransport zu unterstützen. Die Muldenkipper haben ein Volumen von 12 Kubikmetern und können mit

einer Geschwindigkeit von 12 Kilometer/Stunde beladen und 15 Kilometer/Stunde leer fahren. Der Fahrlader hat ein Schaufelvolumen von 6 Kubikmetern und kann mit einer Geschwindigkeit von 10 Kilometer/Stunde beladen und 12 Kilometer/Stunde leer fahren.

Diese grobe Übersicht über die verschiedenen Förderanlagen gibt einen Einblick in den Materialfluss und die Transportprozesse im ehemaligen Bergwerk Schacht Konrad 1 während des Umbaus zum Endlager.

Generell weist das System drei Zustände auf, die den Materialfluss beschreiben:

1. Förderung vom Ort zum Bunker R003 als Zwischenspeicher: In diesem Zustand wird das geförderte Material von den verschiedenen Förderanlagen, wie den Gurtförderanlagen, zum Bunker transportiert. Der Bunker dient als Zwischenspeicher, um eine kontinuierliche Materialzufuhr zu gewährleisten.
2. Direkte Förderung von der Teilschnittmaschine zur Schachtförderanlage: In diesem Zustand wird das Material direkt von der Teilschnittmaschine am Ort zur Schachtförderanlage transportiert. Dieser direkte Transportweg ermöglicht eine effiziente und schnelle Weiterleitung des Materials.
3. Förderung vom Bunker R003 zum Schacht: In diesem Zustand wird das Material vom Bunker R003 zum Schacht transportiert, um es schließlich aus dem Bergwerk herauszufördern. Der Bunker R003 fungiert hierbei nur als Zwischenlager, bevor das Material weiter zum Schacht gelangt.

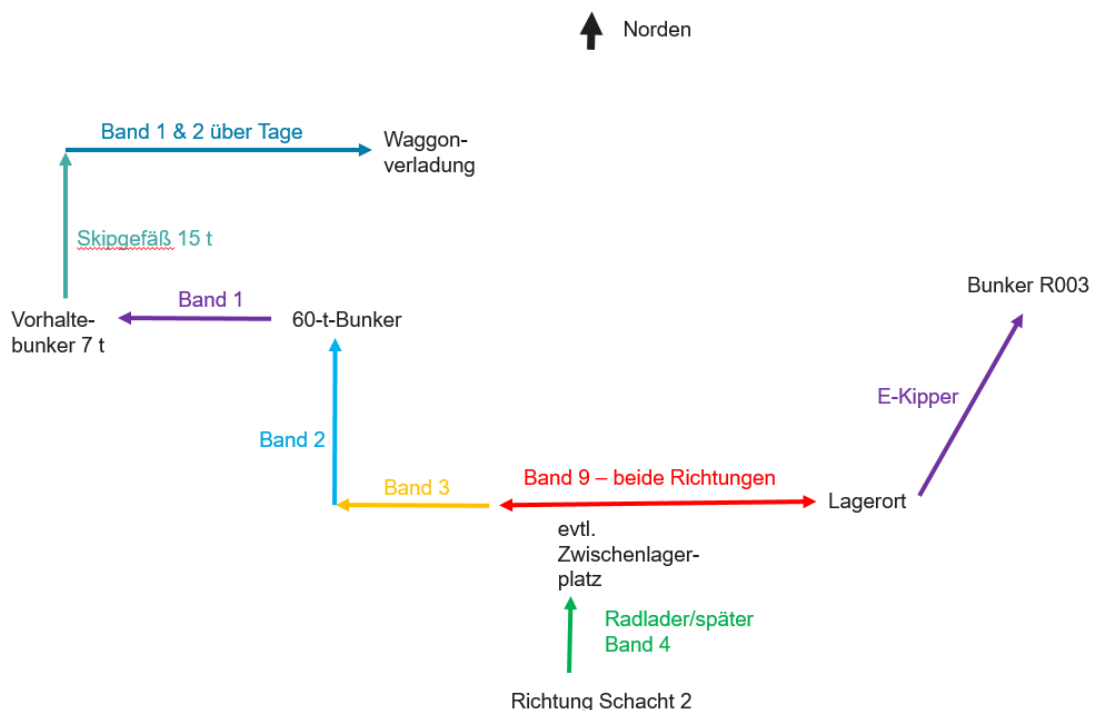


Bild 2: Schematische Abbildung der Förderstrecke.
Nicht abgebildet ist eine Teilschnittmaschine vor Band 4.

Im hier exemplarisch betrachteten Betriebsszenario werden verschiedene Förderanlagen und Fahrzeuge eingesetzt, um den Materialfluss zu gewährleisten. Ein Radlader mit einer Taktzeit von 600 Sekunden und einer Schaufelgröße von 10 Tonnen lädt das Material von

der Teilschnittmaschine. Das Material wird dann über die Gurtförderanlage Band 9 transportiert, die eine Länge von 178 Metern hat.

Ein E-Lader mit einer Taktzeit von 152 Sekunden und einer Schaufelgröße von 10 Tonnen wird ebenfalls eingesetzt. Das Material gelangt schließlich in den Bunker R003, der eine Kapazität von 1000 Tonnen aufweist.

Weitere Gurtförderanlagen wie Band 3 (110 Meter Länge), Band 2 (1240 Meter Länge) und Band 1 (175 Meter Länge) werden genutzt, um das Material weiterzutransportieren. Jede dieser Förderanlagen hat eine Kapazität von 200 Tonnen pro Stunde und eine Geschwindigkeit von 0,57 Metern pro Sekunde.

Ein wesentlicher Bestandteil des Systems ist der 60-Tonnen-Bunker, der als Zwischenlager für das geförderte Material fungiert. Das Material wird vorübergehend in diesem Bunker gelagert, bevor es weiter zum Skip transportiert wird. Die Aufgabe des Bunkers ist es, den Materialfluss zu verstetigen. Zusätzlich zum 60-Tonnen-Bunker und diesem in kurzem Abstand nachgelagert, wird auch ein Vorhaldebunker mit einer Kapazität von 7,5 Tonnen verwendet. Dieser dient dazu, eine gewisse Menge des Materials für die schnelle Beladung des Schachtfördergefäßes bereitzustellen. Der Vorhaldebunker ermöglicht es, das Material in ausreichender Menge bereitzustellen, damit keine Engpässe im Materialfluss auftreten und die Spielzeit der Schachtförderung geringgehalten werden kann.

Die beiden Bunker spielen eine wichtige Rolle bei der effizienten Förderung des Materials und tragen dazu bei, dass das Material in einem kontrollierten und gleichmäßigen Tempo weitertransportiert werden kann. Das Material wird schließlich über ein Übertageband zu einem Übertagebunker/Aufgabeschurre mit einer Kapazität von 30 Tonnen transportiert. Von dort wird es der Zugbeladung zugeführt. Der Abtransport erfolgt mithilfe von Waggons, wobei täglich zwei Halbzüge mit je sieben Waggons und einer Kapazität von ca. 65 Tonnen pro Waggon (insgesamt bis zu 1000 Tonnen pro Tag) beladen werden.

3 Simulationsmodell und Ergebnisse

Das Modell wird in Modelica aufgebaut und mit SimulationX simuliert. Die Submodelle für das Materialflusssystem sind in Bild 3 dargestellt. Dabei wird in drei verschiedene Submodelle unterschieden:

1. Diskontinuierliche Fördertechnik, hier als Radlader, die eine gewisse Materialmenge aufnehmen können und diese plötzlich zu einem Zeitpunkt, der durch die Spielzeit der Maschine oder des Prozesses definiert wird, freigeben. Neben dem Radlader ist auch die Schachtförderung der diskontinuierlichen Fördertechnik zuzuordnen.
2. Kontinuierliche Fördertechnik, die hier als Gurtförderer dargestellt ist. Die kontinuierliche Fördertechnik ist aufgrund ihrer Länge und Fördergeschwindigkeit als Verzögerungsglied aufgebaut. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die maximalen Volumen- und Massenströme begrenzt sind, sodass es hier zu einer Entzerrung der Diskontinuität kommt.
3. Bunker und Silos. Silos werden als Speicher mit Verzögerungseigenschaften

ausgelegt. Im Gegensatz zum realen Einsatz werden die Silos jedoch nicht mit einer Füllstandsrückkopplung an die Systemsteuerung versehen, sondern die Füllstände werden zur Kontrolle des Fördersystems verwendet. Dabei kann ein Füllstand größer als die Nennkapazität auf Probleme in der Anlagensteuerung hindeuten, je nach Anwendungsgebiet kann dies ebenso der Fall sein bei einem Leerlaufen eines Silos.

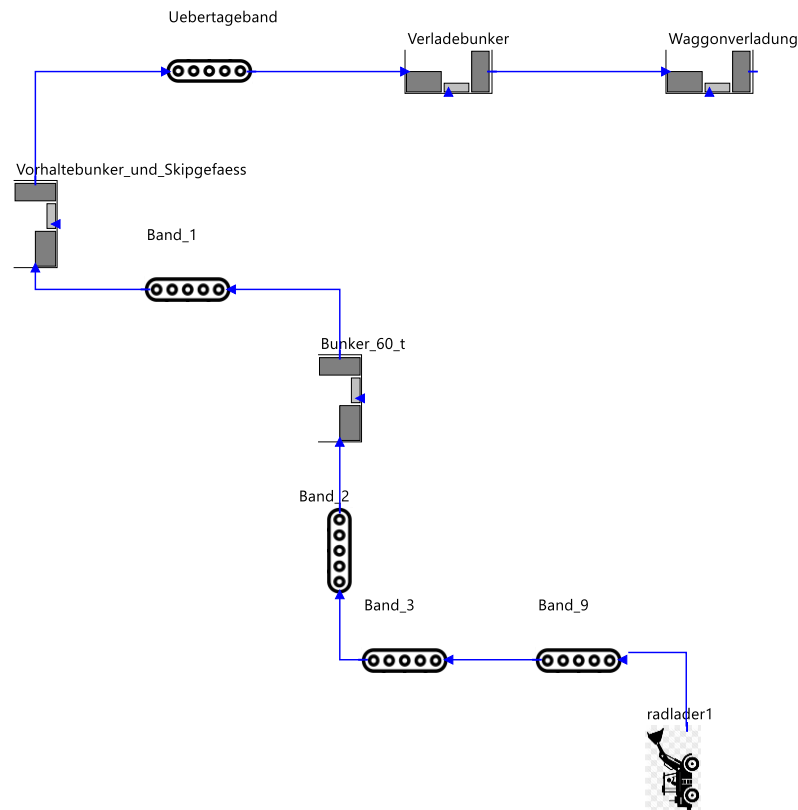


Bild 3: Schaltbild innerhalb der Simulationsumgebung

Die Zusammensetzung der einzelnen Module aus Bild 3 ist in Bild 4 dargestellt. Die internen Zustände werden dabei mit Integrations- und Verzögerungsgliedern abgebildet. Dies ist notwendig, da der Füllstand, also die Gesamtbelastung des Gurtes, dargestellt werden soll sowie die Verzögerung des Materialtransportes aufgrund der Eingangsparameter Wegstrecke und Fördergeschwindigkeit.

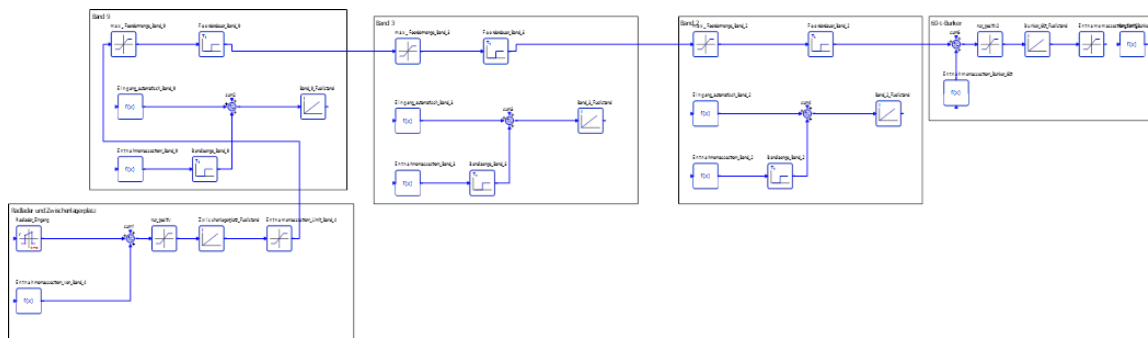


Bild 4: Aufgelöstes Schaltbild mit Einzelkomponenten als Verzögerungsglied, das den Materialfluss innerhalb eines Fördersystems abbildet.

Um den Aufbau eines beliebigen Simulationsmodells einer Förderstrecke zu vereinfachen, werden die Eingangsparameter für einen Gurtförderer beispielhaft durch die Eingabemaske in Bild 5 eingegeben. Hierbei werden Eigenschaften wie Fördergeschwindigkeit und Länge des Systems direkt in einer Dauer von Aufgabepunkt bis Aufgabepunkt zusammengefasst. Die maximale Fördermenge entspricht dem Nennmassenstrom. Dieser Wert ist insbesondere dann relevant, wenn von einem kleinen, nicht dargestellten Vorhaltesystem auf den Gurtförderer aufgegeben wird. Eine Radladerschaufelfüllung wird dann automatisch über einen Zeitbereich gestreckt, ohne den Aufgabetrichter, Brecher oder Ähnliches als separates System abbilden zu müssen.

Allgemeine Parameter			
Totzeit (Foerderdauer)	Foerderdauer:	<input type="text" value="240"/>	s <input type="text" value="10"/>
obere Bereichsgrenze (max_Foerdermenge)	maximale_Foerdermenge:	<input type="text" value="200.1"/>	t/h <input type="text"/>
untere Bereichsgrenze (min_Foerdermenge)	minimale_Foerdermenge:	<input type="text" value="0"/>	t/h <input type="text"/>

Bild 5: Eingabemaske für den Transport mit kontinuierlicher Fördertechnik

Nach Berechnung der Differentialgleichungen des Systems entstehen die in Bild 6 gezeigten Zustandsdiagramme. Hier ist exemplarisch ein Ergebnis verschiedener Förderkomponenten dargestellt. Oben links ist das Eingangssignal der Radladerbeladung zu sehen. In fest definierten Abständen wird hier die Masse einer Schaufelfüllung im Simulationsmodell erzeugt. Diese Masse wird dann durch Gurtförderer abtransportiert, was auf diesen zu schwankenden Füllständen führt.

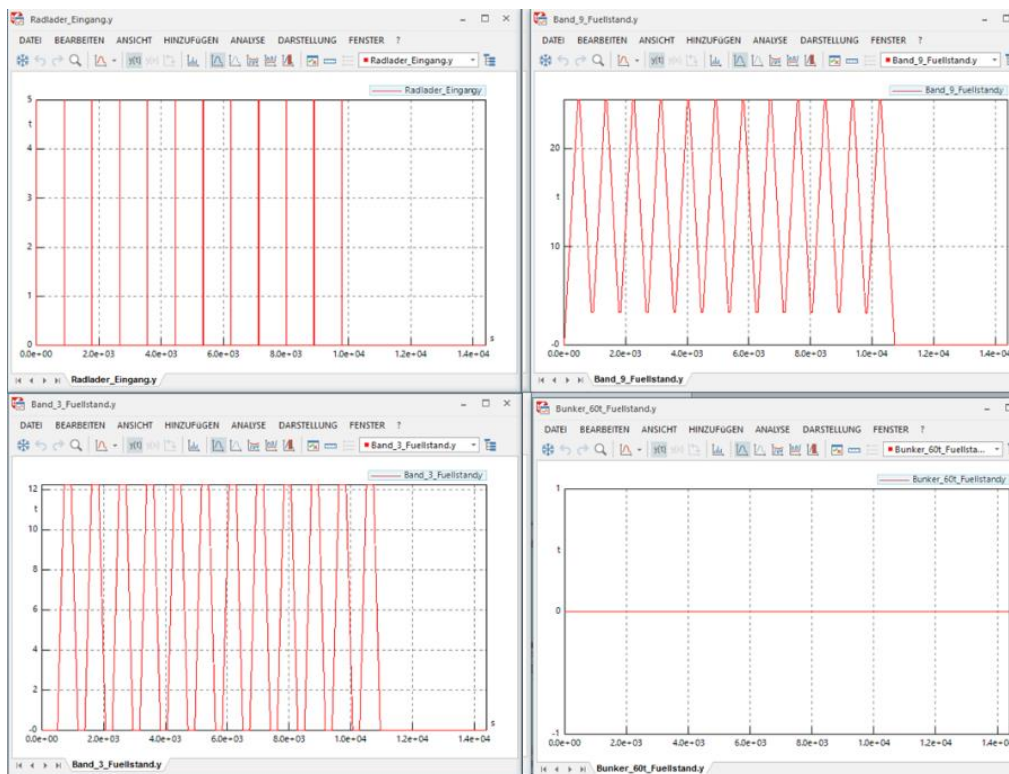


Bild 6: Zustandsdiagramme mit den Füllmassen der jeweiligen Förder- und Speicherorgane

Die Füllstände der Bunker werden im Anschluss kontrolliert und Abweichungen in Richtung Leer oder Überfüllung als kritische Betriebsszenarien identifiziert. Insbesondere eine

Befüllung mit mehr Material als der Nennkapazität entspricht, kann als problematisch angesehen werden. Veränderungen von Ladergrößen, Spielzeiten oder Förder- und Speicherkapazitäten sind denkbar und gehören zur Optimierung.

Zusammenfassung

Der Einsatz von numerischen Simulationen kann hervorragend zur Entwicklung einer effizienten Steuerungs- und Betriebsstrategie beitragen. Die verwendeten Modelle und entwickelten Module ermöglichen es, ein beliebiges Materialflusssystem mit kontinuierlicher Fördertechnik abzubilden und Produktmassenströme zu analysieren. Dabei können auch mehrere Produktqualitäten in der Förderung abgebildet werden, sodass Materialmischungen innerhalb der Förderung sowie Produktqualitätsschwankungen in anderen Anwendungen mit abgebildet werden können.

Dies gilt insbesondere in der Planungsphase, da hier noch Einfluss auf das System und die zu beschaffenden Einheiten genommen werden kann.

In den Simulationen konnten mehrere kritische Punkte identifiziert und eine Betriebsstrategie abgeleitet werden, um genau das Auftreten dieser kritischen Punkte zu vermeiden. Die Betriebsstrategie kann als Erfahrungswissen verstanden werden, dass bereits vor der ersten Waggonbeladung vorliegt und so einen reibungslosen Betrieb gewährleistet.

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Abstreifer mit integrierter Gurtschadendetektion und digitaler Schnittstelle

Andre Hanke



Andre Hanke
Schulte Strathaus GmbH & Co. KG
Runtestraße 42
59457 Werl

Abstreifer mit integrierter Gurtschadendetektion und digitaler Schnittstelle

Die Firma Schulte Strathaus ist unter anderem spezialisiert auf den Bereich Schüttgutförderertechnik und bietet mit ihrem Produktbereich STARCLEAN® Lösungen zum Thema Spillage Control an. Diese Produkte ermöglichen einen sicheren, sauberen und zuverlässigen Transport von Schüttgut und verlängern die Lebensdauer der Bandanlage. Eine effiziente Schüttgutförderung und eine optimierte Wirtschaftlichkeit des Gurtförderers erfordern eine einwandfreie Fördergurtreinigung und eine zuverlässige Materialflusslenkung. Schulte Strathaus bietet dafür effektive und präzise Lösungen. Dank unserer neuen Gurtschadendetektion ist es nun möglich, den Fördergurt zu überwachen und ungeplante Stillstände und somit einen möglichen Produktionsausfall vorherzusehen.



1 Historie - die Transformation unserer Firma

Schulte Strathaus ist bereits seit 1952 im Schüttgutbereich tätig. Die wichtigsten Meilensteine in Bezug auf STARCLEAN® sind (Bild 1):

- 1952** Firmengründung durch Franz Erich Schulte Strathaus und erstes Handelsbüro in Unna. Vertrieb von Förderwagen und Fördertechnikkomponenten.
- 1975** Ausbau des Fördergurtgeschäfts mit Vinylplast Gurten und Komponenten rund um das Förderband.
- 1977** 25. Firmenjubiläum, Entwicklung eigener innovativer Vulkanisieranlagen.
- 1990er** Weitere Entwicklung und Lieferung von Einzelkomponenten für Gurtförderer im Bergbau.
- 2000** Internationalisierung. Vielzahl von internationalen Kooperationen und Handelspartnern.
- 2017** Erfolgreiche Implementierung des Schlaufengurtförderers SAFEBELT® im Bereich STARCLEAN®.

2022 Vorstellung des digitalen Abstreifers S³ mit Gurtschadendetektion auf der BAUMA.

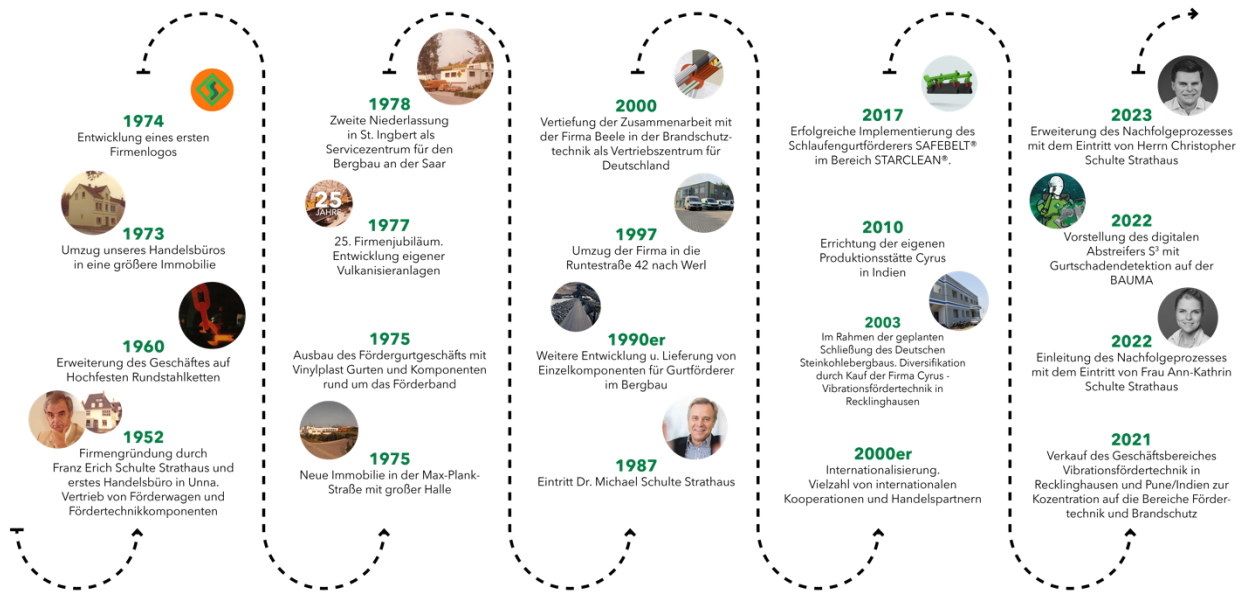


Bild 1: Historie der Firma Schulte Strathaus

2 STARCLEAN® Portfolio

Das Produktportfolio von STARCLEAN® umfasst die wichtigsten Komponenten einer effektiven Materialflusslenkung: Fördergurtabstreifer, Lenkrollensysteme, Übergabedichtungen, Aufprallstationen, Inspektionstüren und geschlossene Gurtförderer (Bild 2).

STARCLEAN® PORTFOLIO



Bild 2: STARCLEAN® Portfolio

3 Grundlagen engineerter Abstreifer

Engineerte Abstreifer sind wichtige Komponenten in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen, bei denen das effiziente Entfernen von Verunreinigungen oder Materialablagerungen von Oberflächen erforderlich ist. Bei der Entwicklung kommt es auf eine Vielzahl von Faktoren an. Das Material, die Konstruktion und die spezifischen Anwendungen spielen dabei eine große Rolle.

Die Abstreifsysteme von STARCLEAN® überzeugen durch einen modularen Aufbau und den kombinierten Einsatz von Primär- und Sekundärabstreifern sowie die Wahl zwischen Polyurethan- und Hartmetall-Abstreifern. Diese Materialien bieten jeweils spezifische Vorteile, je nach den Anforderungen der Anwendung. Polyurethanabstreifer sind bekannt für ihre Verschleißfestigkeit, Elastizität und Beständigkeit gegenüber verschiedenen Chemikalien. Hartmetallabstreifer hingegen zeichnen sich durch ihre hohe Härte, Abriebfestigkeit und Langlebigkeit aus. Die Wahl des richtigen Materials hängt von den spezifischen Anforderungen der Anwendung ab (Bild 3).

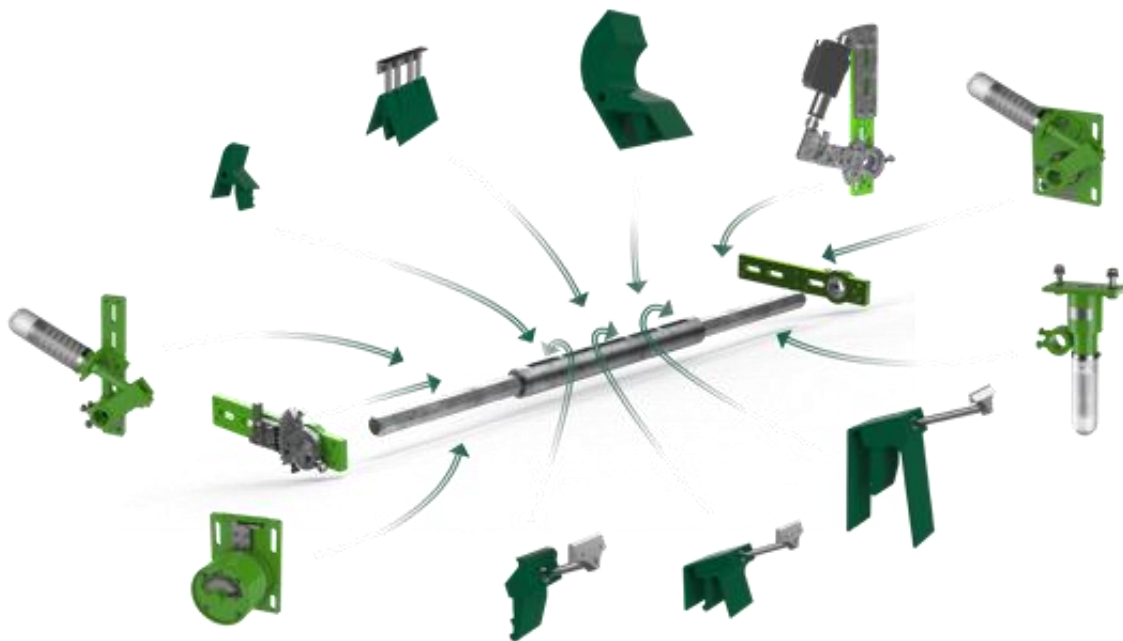


Bild 3: STARCLEAN® Modulares System

4 Gurtschäden – die „unplanbare“ Gefahr

Gurtschäden stellen eine Herausforderung dar, die in industriellen Anlagen auftreten können. Diese Schäden sind unberechenbar und können plötzlich und unerwartet an Fördergurten entstehen.

Die Hauptgefahr bei Gurtschäden besteht in dem plötzlichen Ausfall des Gurförderers. Wenn der Fördergurt beschädigt wird, kann dies dazu führen, dass die Bandanlage nicht

mehr ordnungsgemäß funktioniert. Ein solcher Ausfall kann zu einer Unterbrechung der Produktion führen, was mit erheblichen wirtschaftlichen Kosten verbunden ist.

Es gibt verschiedene Arten von Gurtschäden, die auftreten können (siehe Bild 4):

Deckplattenschäden: Diese Schäden beziehen sich auf Beschädigungen der Tragseite des Fördergurts. Sie können durch mechanische Einwirkungen, Abrieb oder chemische Einflüsse verursacht werden. Deckplattenschäden können die strukturelle Integrität des Gurts beeinträchtigen und zu weiteren Schäden führen.

Verbindungsschäden: Gurtsysteme beinhalten Verbindungsstellen, wie beispielsweise mechanische Verbindungen oder vulkanisierte Verbindungen. Schäden an diesen Verbindungen können zu einer Schwächung des Gurts führen und letztendlich zum Bruch der Verbindung.

Durchschläge: Durchschläge sind Löcher oder Risse im Fördergurt, die durch scharfkantige Objekte oder durch hohe Belastungen verursacht werden können. Durchschläge können die Funktionsfähigkeit des Gurts beeinträchtigen und bilden häufig die Vorstufe eines signifikanten Gurtschadens.

Reparaturschäden: Bei der Reparatur von Gurtschäden können weitere Schäden entstehen, wenn die Reparatur nicht fachgerecht durchgeführt wird. Unsachgemäße Reparaturen können zu strukturellen Schwächen oder Unregelmäßigkeiten im Gurt führen.

Gurtschlitz: Gurtschlitz sind Einschnitte oder Kerben im Fördergurt, die seine Integrität beeinträchtigen können. Sie können durch scharfkantige Objekte verursacht werden. Gurtschlitz können zu sofortigem Ausfall des Gurtförderers führen.

Kantenschäden: Kantenschäden treten an den seitlichen Rändern des Gurts auf und können durch Reibung, Schiefelauf oder Kollisionen verursacht werden.

Die Auswirkungen dieser Schäden auf die Produktion können zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten führen. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, regelmäßige Inspektionen und Wartungsmaßnahmen durchzuführen, um Gurtschäden frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Eine schnelle Reaktion auf Gurtschäden und deren professionelle Reparatur sind notwendig, um die Betriebskontinuität sicherzustellen und Produktionsausfälle zu minimieren. Eine Gurtschaden-Detektion übernimmt die Überwachung und macht die „Gefahr“ ein Stück weit planbarer.

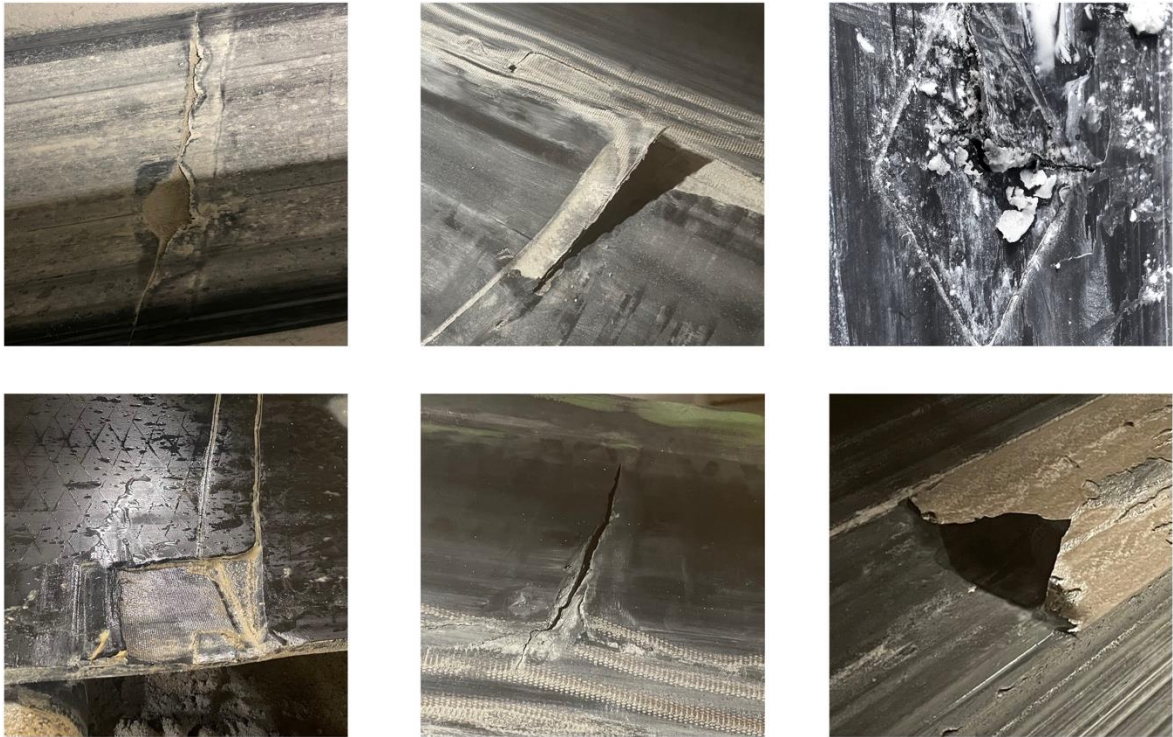


Bild 4: Beispiele für Gurtschäden

4.1 Einfluss auf Schäden von Abstreifern

Die Entstehung von zunächst irrelevanten Schäden durch verschiedene Einflüsse wie zum Beispiel Durchschläge, eingeklemmte Objekte oder sich öffnende Verbindungen ist jederzeit möglich. Ein zunächst harmloser Schaden wird mit jedem Bandumlauf größer bei Kontakt mit herkömmlichen Abstreifern. Ohne Detektion fehlt die rechtzeitige Kenntnis über Schäden. So ist ein ungeplanter Stillstand möglich, wenn nicht frühzeitig reagiert wird (Bild 5).

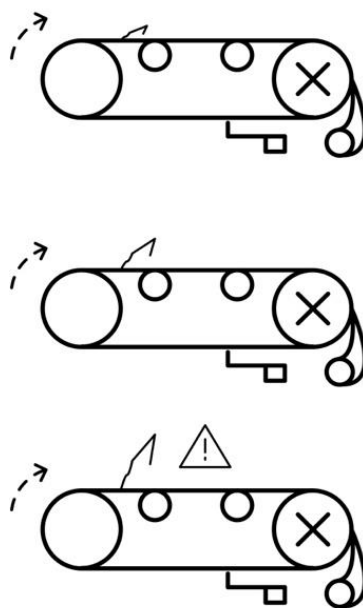


Bild 5: Entwicklung von Schäden

4.2 Unerkannte Schäden

Die Flexibilität der einzelnen Abstreifersegmente hat einen großen Vorteil. Denn durch die engeneerte Ausweichfunktion minimiert sie die Auswirkung von Schäden und somit die Vergrößerung der Gefahr (Bild 6). Jedes einzelne Segment des Fördergurtabstreifers passt sich durch die intelligente Twist-Swing-Funktion optimal an die Gurtoberfläche an und kann somit individuell auf Unebenheiten am Fördergurt reagieren. Die individuelle Anpassung der Fördergurtabstreifersegmente garantiert eine einwandfreie Bandreinigung.

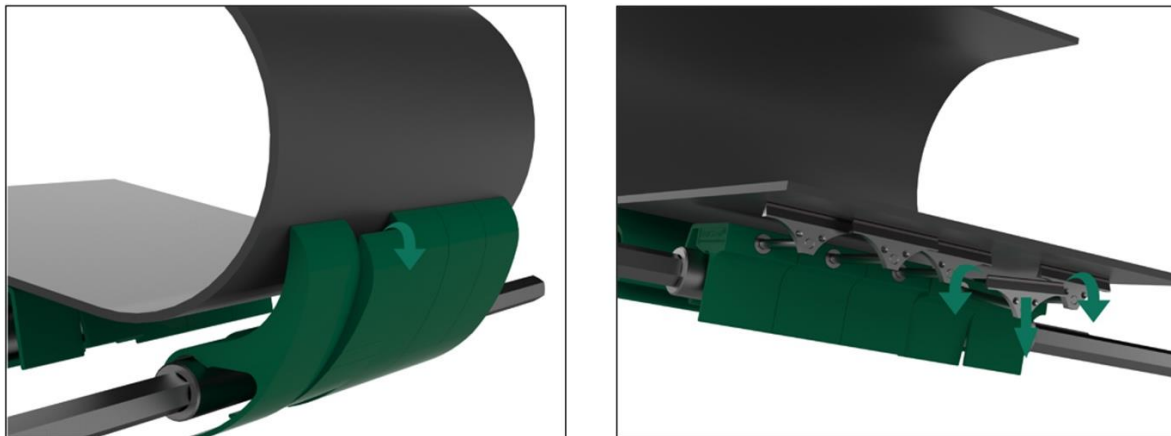


Bild 6: Ausweichfunktion der Primär- und Sekundärabstreifer

5 Unsere Idee – eine Innovation entsteht

Sekundär-Abstreifer sind effektive Reinigungskomponenten für Fördergurte. Sie bieten eine schonende Reinigung, lange Standzeiten, einfache Wartung und einen Mehrwert durch ihre permanente Abtastfunktion. Mit Hilfe von elektrischen Spannvorrichtungen sind sie an- und abklappbar, was weitere Funktionen ermöglicht (Bild 7).

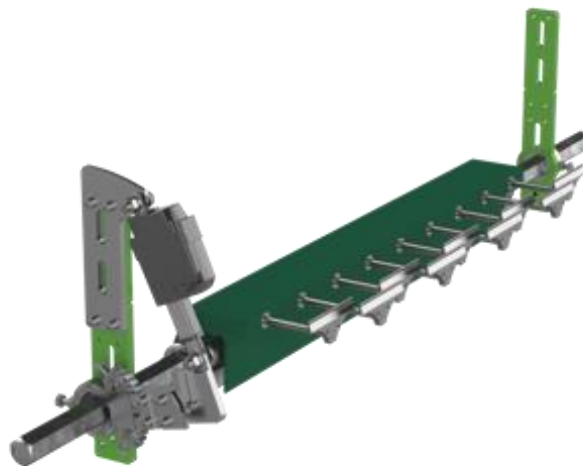


Bild 7: Sekundärabstreifer mit elektrischer Spannvorrichtung

5.1 Sekundärabstreifer als Abtasteinrichtung

Der Sekundärabstreifer (Bild 8) ist die einzige Komponente, die den Fördergurt auf der Tragseite permanent abtastet und von der Gurtoberfläche beeinflusst wird.

Diese Eigenschaft hat sich STARCLEAN® zunutze gemacht und den Abstreifer zur Abtasteinrichtung weiterentwickelt. Durch das Abtasten gibt es nun die Möglichkeit, Informationen über Fördergurte zu sammeln.

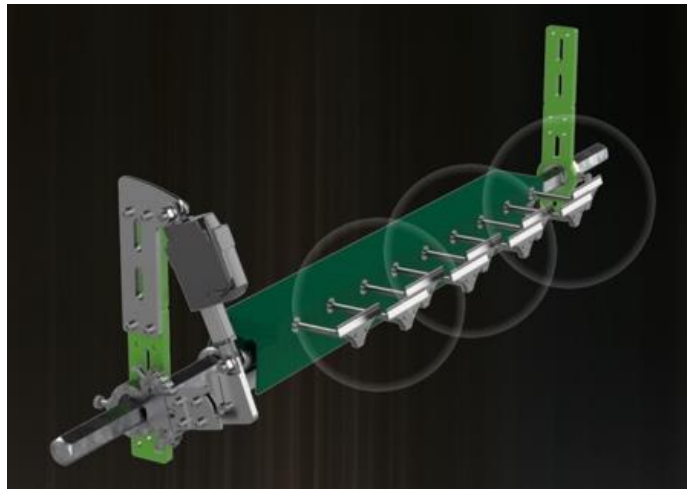


Bild 8: Sekundärabstreifer als Abtasteinrichtung

6 Gurtschaden-Detektion

Der STARCLEAN® Smart Scraper, mit elektrischem Antrieb in Kombination mit einem smarten Cloud-Dashboard, ermöglicht eine frühzeitige Schadenserkennung am Fördergurt und eine vorausschauende Instandsetzung der Segmente durch die automatische Verschleißerkennung. Des Weiteren besitzt der Abstreifer die Fähigkeit des selbstregulierenden Verschleißverhaltens und ermöglicht zugleich eine optimierte Vorspannkraft. In dem Video hinter dem QR-Code (Bild 9) wird eine visualisierte Darstellung der Funktion gezeigt.



Bild 9: STARCLEAN® Smart Scraper 3D Video (youtube)

6.1 Die Module

Der STARCLEAN® Smart Scraper ist eine Kombination aus bereits vorhandenen und neu entwickelten Komponenten, die durch das Zusammenspiel den digitalen Absteifer ergeben (Bild 10).

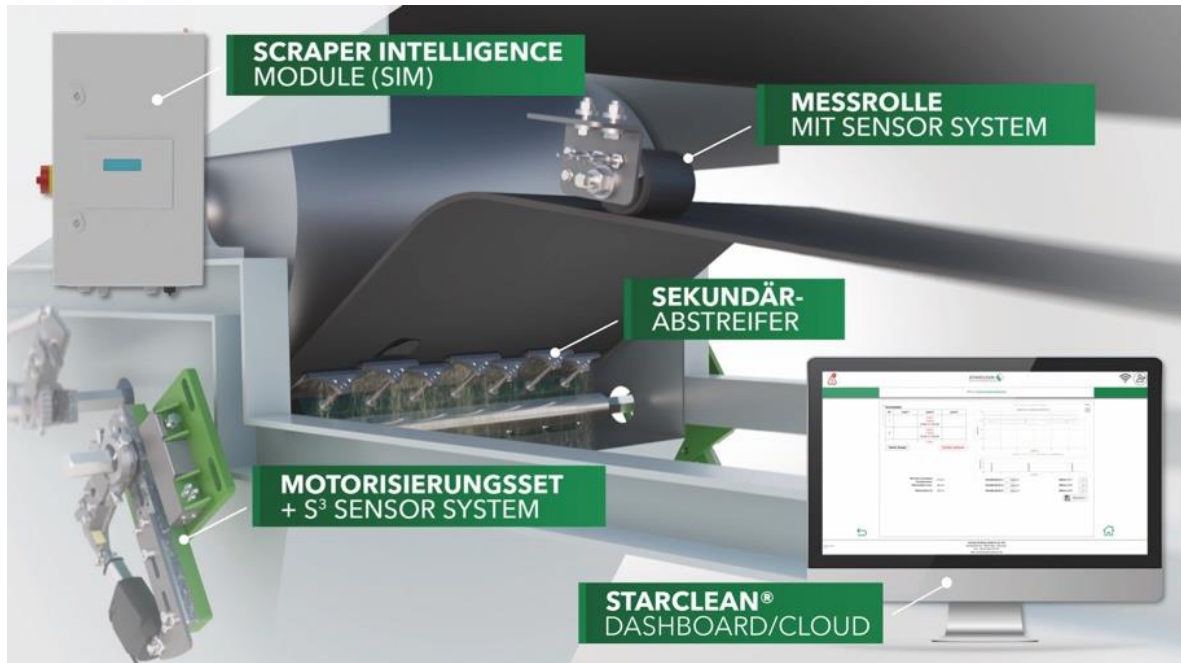


Bild 10: STARCLEAN® Smart Scraper Modul Übersicht)

6.2 Funktionen Scraper Intelligence Module (SIM)

Die Scraper Intelligence Module (Bild 11) zeichnen sich durch folgende Funktionseinheiten aus:

- HMI (Bedienterminal) mit RFID Zugang
- Steuerplatine zur elektrischen Abstreifersteuerung
- GSD Platine
- Kommunikationsmodul (Edge Controller)
LTE, WLAN, LAN
- User (Grün), Service User (Schwarz), Super User (Rot) RFID Schlüssel



Bild 11: Scraper Intelligence Modul (SIM)

6.3 Funktionen von Abstreifer und Motorisierungsset mit Gurtschadensensorik

Nachfolgend genannte Eigenschaften charakterisieren den Abstreifer (Bild 12) und das Motorisierungsset mit Gurtschadensensorik:

- Abstreifen des Förderguts
- Abstreifer an-/abklappen
- Abstreifer Vorspannung nachstellen
- Verschleißerkennung (Bild 13)
- Fördergurtüberwachung
- Erfassung der Messdaten
- Aufzeichnung Gurtcharakteristik

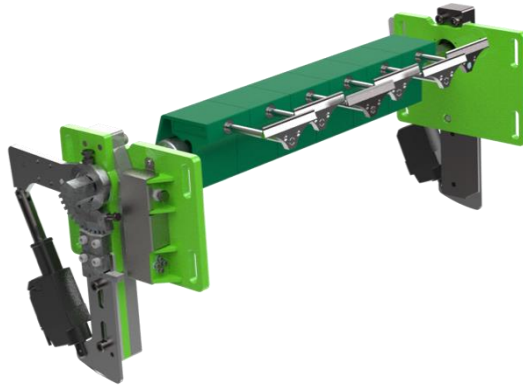


Bild 12: Sekundärabstreifer mit elektr. SPV und Gurtschadensensorik

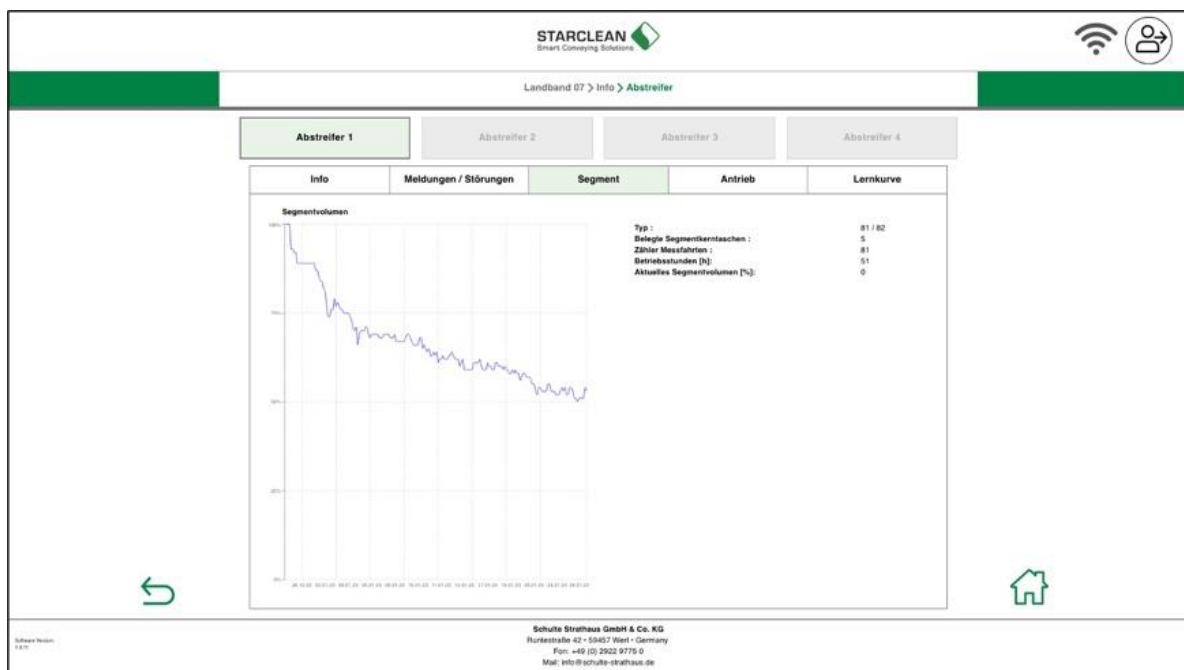


Bild 13: Verschleißerkennung im Dashboard

6.4 Funktionen der Messrolle

Mit Hilfe der Messrolle (Bild 14) ist es möglich, folgende Parameter zu ermitteln:

- Erfassung des Gurtlaufs und der Betriebsstunden
- Erfassung der Fördergeschwindigkeit
- Erfassung der Gurtlaufrichtung (Reversierbetrieb)
- Lokalisierung des Schadens



Bild 14: Messrolle

6.5 Funktionen – Dashboard/Cloud

Die Möglichkeiten des Dashboards (Bild 15) lassen sich wie folgt beschreiben:

- Kontinuierliche Fördergurtüberwachung
- Klassifizierung der Schäden
- Definition eigener Schadenslevel
- Aktion bei Gurtschäden frei konfigurierbar (Relais ansteuern, abklappen, Alarm ...)
- Positionserkennung des Gurtschadens (Bild 16)
- Aufzeichnung Gurtcharakteristik
- Verschleißübersicht der Segmente (predictive maintenance)
- Vorspannungsanzeige der Abstreifer
- Informationen versenden bei speziellen Events



Bild 15: Screenshot Dashboard

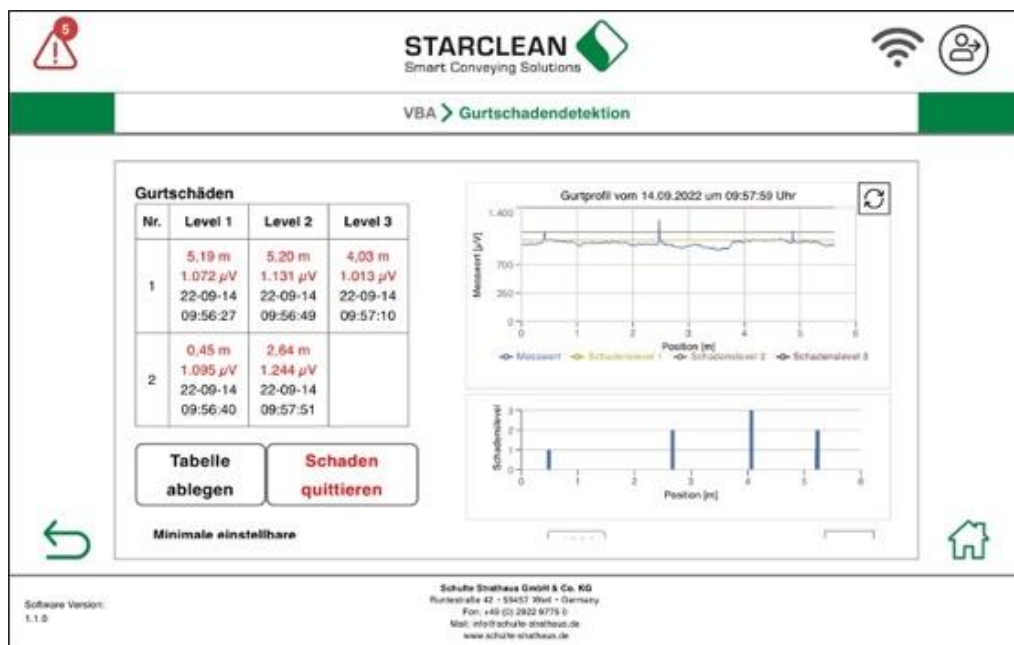


Bild 16: Screenshot Gurtschaden-Detektion

6.6 Detektierbare Schäden

Gurt Schäden stellen eine vielfältige Problematik dar und können aufgrund verschiedener Einflüsse auftreten. Der Markt bietet bereits mehrere Systeme an, die in der Lage sind, bestimmte Arten von Gurtschäden zu erkennen. Der STARCLEAN® Smart Scraper hat durch Einsätze bei Kunden gezeigt, mit welcher Zuverlässigkeit folgende Schäden erkannt werden. (Skala 1–5, wobei eine Bewertung von 1 für eine geringe Erkennungsfähigkeit und 5 für eine ausgezeichnete Erkennungsfähigkeit steht.)

- Deckplattenschäden (5 Punkte)
- Verbindungsschäden (5 Punkte)
- Durchschläge (5 Punkte)
- Reparaturschäden (5 Punkte)

- Gurtschlitze (2 Punkte)
- Kantenschäden (1 Punkte)

6.7 Was bietet der Markt

Die Beobachtung des Marktes hat gezeigt, dass die verschiedenen Gurtschaden-Detektionen auch verschiedene Leistungsmerkmale mit sich bringen. Der STARCLEAN® S³ überzeugt durch seine vielfältigen Funktionen, wie die Gurtschaden-Detektion, die Verschleißerkennung der Abstreifer, die Klassifizierung der Schäden, Definition eigener Schadenslevel, konfigurierbare Aktionen bei Gutschäden, Aufzeichnung der Gurtcharakteristik, Lokalisierung, Identifikation und Monitoring jedes einzelnen Gurtschadens sowie die Echtzeit Ereignismeldung per E-Mail (Bild 17).

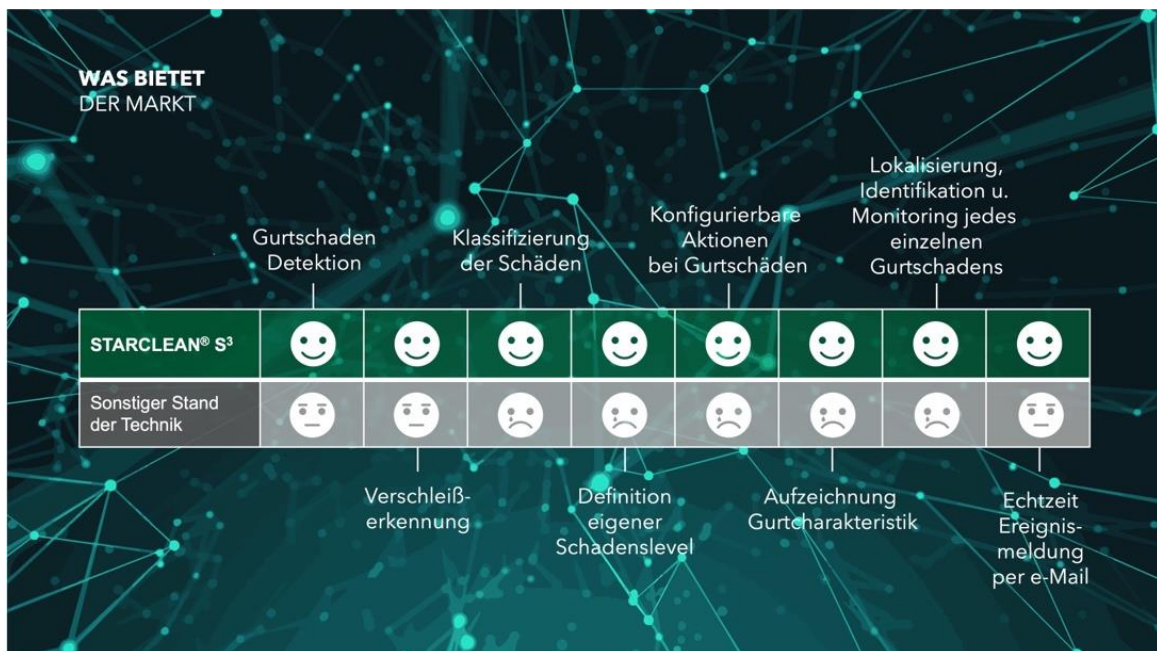


Bild 17: Grafik Markt Übersicht

6.8 Zusammenfassung der Eigenschaften des STARCLEAN® S³ – Fördergurtabstreifers mit integrierter Gurtschadendetektion

Zusammengefasst charakterisieren die nachfolgend genannten Eigenschaften den vorgestellten STARCLEAN® S³ – Fördergurtabstreifer:

- Kontinuierliche Kontrolle
- Schadensbegrenzung
- Ressourcenschonung (materiell/personell)
- Vermeidung von ungeplanten, kostenintensiven Standzeiten
- Verbesserte Betriebssicherheit
- Selbstregulierendes Verschleißverhalten bei konstanter Vorspannkraft
- Transparente Datenauswertung
- Smartes cloudbasiertes Dashboard

Quellenverzeichnis:

- [1] Hanke, A.: Firmenunterlagen. Schulte Strathaus GmbH & Co. KG, Werl, 2023
- [2] Lammert, F.: Firmenunterlagen. Schulte Strathaus GmbH & Co. KG, Werl, 2023

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Effizienzsteigerungen im Betrieb von Förderanlagen – von Fördergurtabstreifern zu digitalem Servicemanagement und frühzeitiger Schadenserkennung

Tobin Frech



Tobin Frech, M. Sc.
HOSCH Fördertechnik Recklinghausen
Am Stadion 36
45659 Recklinghausen

Effizienzsteigerungen im Betrieb von Förderanlagen – von Fördergurtabstreifern zu digitalem Servicemanagement und frühzeitiger Schadenserkennung

Dieser Beitrag beschäftigt sich zunächst mit den Herausforderungen im Betrieb von Förderanlagen. Wie können Anlagenbetreiber diesen Herausforderungen durch den Einsatz von effektiven Fördergurtreinigungssystemen entgegenwirken und somit die Effizienz der Anlage erhöhen? Weiterhin werden verschiedene digitale Systeme betrachtet, die ebenfalls ihren Teil zu einer höheren Anlagenverfügbarkeit beitragen. Die Lösungen, die hier dargestellt werden, beziehen sich auf eine digitale Service-Plattform und zwei verschiedene Systeme zur Fördergurtüberwachung und der damit verbundenen frühzeitigen Erkennung von Anomalien und Schäden in der Fördergurtoberfläche.

1 Herausforderungen im Betrieb von Förderanlagen

Gurtt Förderanlagen sind einer hohen Belastung ausgesetzt. In den meisten Fällen haben die Förderbandanlagen sehr hohe Betriebslaufzeiten, und ein Ausfall der Anlage hat häufig einen Produktionsstopp zur Folge. Nur eine laufende Anlage bringt dem Betreiber die gewollte Wertschöpfung. Somit ist die Aufrechterhaltung der Anlagenverfügbarkeit eine der größten Herausforderungen für die Anlagenbetreiber. Welche Faktoren sind vor diesem Hintergrund speziell zu betrachten? Was sind die häufigsten Gründe für Ausfälle von Förderanlagen? Diese Fragen werden im Folgenden kurz erörtert.

1.1 Verschleiß von Anlagenkomponenten durch Carryback

Das Fördergut, welches auf dem Stetigförderer aufliegt, wird am Ende des Förderbandes abgeworfen. Als Carryback wird Fördergut bezeichnet, welches nach dem Abwurf weiterhin am Fördergurt haften bleibt und somit zurück in die Anlage gezogen wird. Dieser Vorfall hat zahlreiche negative Folgen für den Betrieb der Anlage. Zunächst geht Material verloren, das Fördergut fällt zu Teilen innerhalb der Förderstrecke vom Band ab und sorgt für erhebliche Verschmutzungen innerhalb der Anlage. In schweren Fällen kann sich das Material unter dem Fördergurt so hoch auftürmen, dass es dort Rollen blockiert und zu Reibung und Verschleiß am Fördergurt führt (siehe Bild 1).



Bild 1: Carryback [1]

Weiterhin setzt sich Material an den Untergurtrollen fest. Dies führt zu höherem Verschleiß des Fördergurtes sowie der Rollen selbst (siehe Bild 2 und 3). Ebenso kann durch die Materialablagerung an den Rollen ein Gurtschieflauf entstehen. Gurtschieflauf kann im schlimmsten Fall die Konstruktion der Anlage beschädigen sowie Schäden im Kantenbereich des Fördergurtes zur Folge haben (siehe Bild 3).



Bild 2: Verschleiß an der Untergurtrolle durch Carryback



Bild 3: Beschädigung der Anlagenkonstruktion durch Gurtschieflauf

1.2 Ungeplante Stillstände

In der Regel werden Wartungsarbeiten an Gurtförderern, die einen Stillstand der Anlage benötigen, in festgeschriebenen zeitlichen Abständen und anhand von Wartungs- und Inspektionsplänen durchgeführt [2]. In dieser Zeit können der Fördergurt oder Verschleißteile, die direkt mit diesem in Kontakt stehen, inspiziert, gewartet, instandgesetzt oder verbessert werden. Tätigkeiten, die in diesen geplanten Stillständen durchgeführt werden, sind beispielsweise Gurtwechsel, Vulkanisationsarbeiten am Fördergurt, Rollenwechsel, Installation von Fördergurtabstreifern oder der Verschleißteilwechsel an diesen, Modifikationen an Übergaben, Arbeiten an Umlenk- und Einschnürtrommeln etc.

Bei diesen Aufgaben innerhalb geplanter Anlagenstillstände stoßen Anlagenbetreiber häufig auf verschiedene Problemstellungen, die im weiteren Betrieb zu ungeplanten Stillständen führen können.

- Faktor Zeit

Viele der oben genannten Tätigkeiten beanspruchen viel Zeit. Stillstandszeiten werden aber von vielen Anlagenbetreibern gering gehalten, um die Produktion wieder starten zu können. Dies führt in einigen Fällen dazu, dass nur die unbedingt nötigen Arbeiten durchgeführt werden.

- Faktor Personal

Werden die Arbeiten in geplanten Stillständen vom vorhandenen Personal auf der Anlage durchgeführt, besteht die Möglichkeit von fehlendem Fachwissen des Personals für die Durchführung spezifischer Tätigkeiten. Dies kann dazu führen, dass Arbeiten nicht fachgerecht ausgeführt werden und im späteren Verlauf ungeplante Stillstände zur Folge haben.

- Faktor Verschleißzeit

Wenn ein Überblick über die Verschleißzeit von Anlagenkomponenten fehlt, kann es dazu kommen, dass bei geplanten Stillständen diese Teile nicht gewechselt werden. Dies kann im weiteren Betrieb der Anlage ebenso zu ungeplanten Stillständen führen.

2 Effiziente Fördergurtreinigungssysteme und deren Vorteile

Abstreifer sind auf den ersten Blick unscheinbare Geräte, die jedoch einen großen Teil zur Betriebssicherheit und Effizienz einer Fördergurtanlage beitragen können. Installiert kurz nach dem Ablaufpunkt des Gurtes von der Abwurftrammel oder auch direkt an der Trommel, reinigen sie den Fördergurt von anhaftendem Material und führen dieses dem Förderstrom zu.

Ein gut konstruierter Bandabstreifer sollte effektiv reinigen, eine lange Lebensdauer haben und nur minimale Wartung erfordern. [3]

Die Effizienz eines Abstreifers hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Konstruktionsmerkmale – Fähigkeit der Reinigungssegmente, in ständigem Kontakt mit der Gurtoberfläche zu bleiben oder sich dem Profil des Bandes anzupassen
- Zustand und Form der Reinigungssegmente, einzelne oder segmentierte Reinigungssegmente
- Position des Reinigungssegmentes in Bezug auf die Gurtlaufrichtung
- Material des Reinigungssegmentes – Gummi, Kunststoff, Stahl, Keramik oder Hartmetall
- Ausrichtung, Vorspannung und Wartung des Abstreifers
- Anpressdruck des Reinigungssegments gegen die Förderbandoberfläche
- Art und Zustand der Gurtverbindung
- Betriebsweise, Geschwindigkeit und dynamisches Verhalten des Förderbandes
- Schüttguteigenschaften, mild, mittel, schwer (gemäß CEMA Standard 550) [4]

Die Fähigkeit des Systems, in ständigem Kontakt mit dem Förderband zu bleiben, bedeutet, dass es dessen Bewegungen, Vibrationen und seitliche Verschiebungen absorbieren muss. Hierzu ist eine ausreichende Vorspannung des Systems und seiner Elemente von Nöten. Der Abstreifer sollte über eine individuelle Federung pro Modul sowie eine weitere für den ganzen Abstreifer verfügen. So können optimale Reinigungsleistung und Bandsicherheit gewährleistet werden.

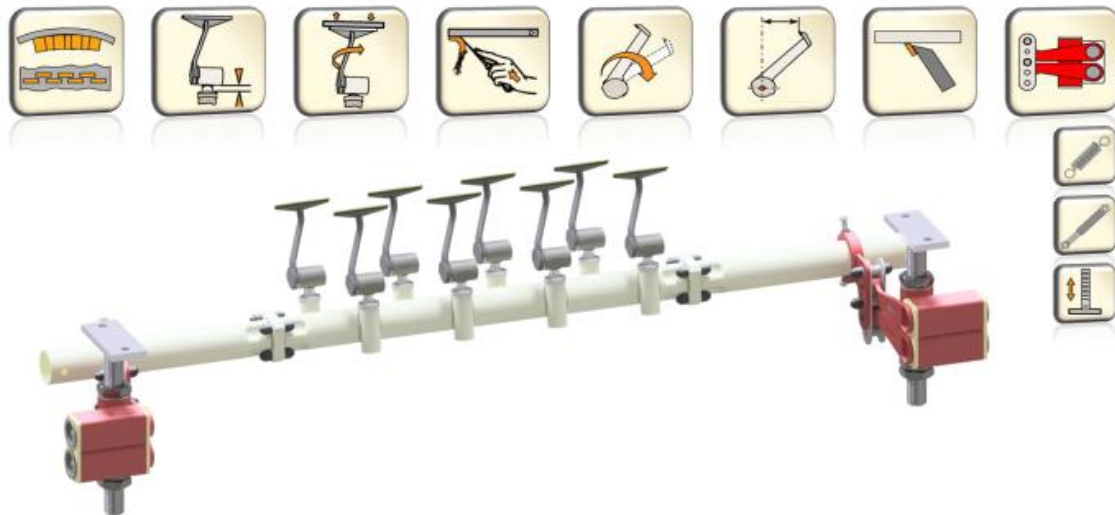


Bild 4: Konstruktionsmerkmale des HOSCH Abstreifers Typ C2

Eine gründliche Reinigung des Fördergurtes vermindert vor allem Carryback und seine negativen Folgen für die gesamte Anlage, wie sie in Kapitel 1.1 beschrieben sind.

Folgen, die durch den Einsatz von Abstreifern entstehen, die nicht den Gegebenheiten der Förderanlage angepasst werden können, sind höhere Mengen an Carryback.

Ebenso kann es dazu kommen, dass sich bei Verlust von Gurtkontakt Fördergut zwischen Abstreifer und Fördergurt festsetzt. Dies führt durch Reibung zu hohem Verschleiß des Gurtes sowie im schlimmsten Fall zu Gurtschäden. Der Verlust von Gurtkontakt ist häufig die Folge von fehlenden Konstruktionsmerkmalen, die Federung und Dämpfung des Abstreifers ermöglichen (Bild 4).

Effiziente Abstreifsysteme haben weiterhin den Vorteil, dass durch lange Standzeiten die Zeiträume zwischen geplanten Stillständen oft erhöht werden können, was insgesamt die Betriebsstunden der Anlage erhöht.

3 Digitale Systeme zur Effizienzsteigerung in Förderbandanlagen

In der Schwerindustrie und im Bergbau gibt es einen zunehmenden Trend zum Einsatz von Maschinen mit digitaler Fernüberwachung. Damit diese digitalen Anwendungen funktionieren, ist es oft notwendig, zusätzliche elektrische Installationen vorzunehmen, Anlagenteile oder sogar ganze Anlagen zu modernisieren. Die Firma HOSCH, ein führender Anbieter von mechanischen Bandreinigungssystemen, nutzt die privilegierte Position des Abstreifers, um eine schlanke und dennoch effektive Fernüberwachung des Förderbandes zu ermöglichen. Die HOSCH-Forschungsingenieure testeten verschiedene Sensorlösungen hinsichtlich der Lieferung von aussagekräftigen, zuverlässigen Daten über die Abstreiferleistung und den Gurtzustand.

Zusätzlich werden die Service- und Wartungsarbeiten von HOSCH-Technikern weltweit durch digitale Software unterstützt. Dies unterstützt papierloses Arbeiten sowie eine schnelle und effektive Servicedurchführung.

Die digitalen Systeme zur Fördergurtüberwachung und Servicedurchführung werden im Folgenden kurz erläutert.

3.1 Fördergurtüberwachung

Permanenter Gurtkontakt in allen Situationen, wie in Kapitel 2 beschrieben, ist eine Folge von bestimmten Konstruktionsmerkmalen von Abstreifern. Nur durch ständiges Aufrechterhalten des Gurtkontaktes kann eine effektive Überwachung des Fördergurtes ermöglicht werden. Die Konstruktionsmerkmale von HOSCH-Abstreifern ermöglichen es dem Abstreifer, auf Unregelmäßigkeiten auf der Gurtoberfläche mit Ausweichbewegungen oder Auslenkung zu reagieren. Diese Eigenschaften in Verbindung mit der Datenerfassung ermöglichen die Anzeige von Gurtschäden oder Anomalien im Förderbetrieb. Um eine effektive Maßnahme zur Datenerfassung und –übertragung zu erreichen, haben die HOSCH-Forschungsingenieure verschiedene Szenarien eingehend getestet. Analysiert und getestet wurden sowohl direkte als auch indirekte Messkonzepte, kombiniert mit verschiedenen Datenübertragungskonzepten wie Ethernet, WiFi, LTE und NBloT.

Jedes dieser Datenübertragungskonzepte erwies sich in verschiedenen Anwendungsszenarien als effizient, je nach Standort, Datenmenge und Häufigkeit der Übertragung. Abgestimmt auf die angewandte Datenübertragungstechnologie wurde bei den Versuchen die Stromversorgung berücksichtigt. Die Tests umfassten eine nicht kontinuierliche Datenübertragung für IoT-Geräte mit geringem Stromverbrauch und Batteriebetrieb, um eine Fernanwendung zu ermöglichen. Bei den Tests mit stationärer Stromversorgung wurden hohe Frequenzen und kontinuierliche Datenübertragung für eine detailliertere Überwachung berücksichtigt.

Die Forschungsarbeit zu diesen Themen begann bereits im Jahre 2018. Heute hat die Firma HOSCH zwei verschiedene Lösungen zur Fernüberwachung von Fördergurten entwickelt, die bereits seit mehreren Jahren erfolgreich in der Praxis funktionieren. Beide Systeme sind nachrüstbare Digitalisierungslösungen ohne großen Installationsaufwand und werden im Folgenden beschrieben.

3.1.1 Batteriebetriebene Fördergurtüberwachung mit indirekter Messung

HOSCH^{iris} DETECT ist eine Kombination aus einem batteriebetriebenen Beschleunigungssensor in Verbindung mit NB-IoT-Datenübertragung und einer einfachen Bedienbarkeit. Das System kann ohne großen Aufwand mittels einer Klemme an jedem HOSCH-Abstreifer montiert werden. Nach der Installation wird eine Kontrollmessung durchgeführt und Grenzwerte festgelegt. In einer App werden eine oder mehrere Kontaktadressen für Benachrichtigungen angelegt (Bild 5 und Bild 6).

Bei einer Überschreitung der Grenzwerte im Produktionsbetrieb wird eine weitere Detailmessung vorgenommen. Wird der Grenzwert in dieser Messung erneut überschritten, wird eine automatische E-Mail-Benachrichtigung an die Kontaktperson vor Ort gesendet. Das System ist nahezu mühelos zu installieren und zu nutzen, wobei die Fähigkeit zur Erkennung von Trends und unkritischen Schäden begrenzt ist. Aufgrund des indirekten Messansatzes erkennt es jedoch Unregelmäßigkeiten oder Schäden in der Bandoberfläche zuverlässig.

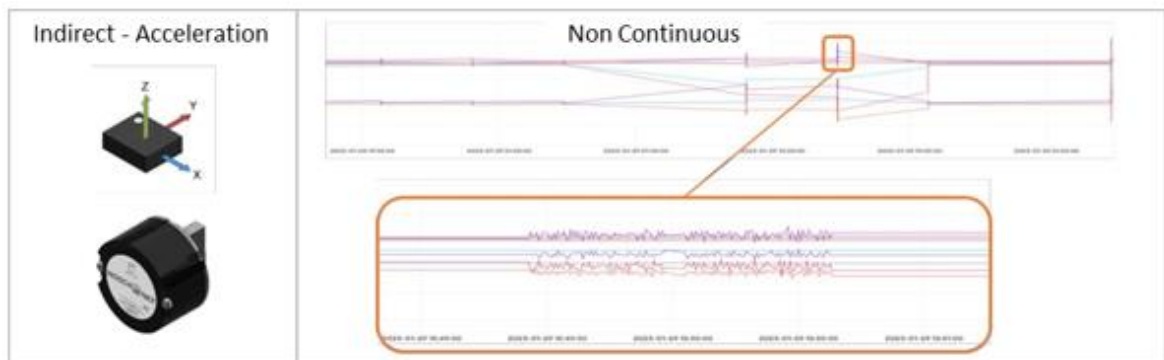


Bild 5: Datensignatur einer batteriebetriebenen Fernüberwachungslösung auf der Grundlage indirekter Messung mit einem dreiachsigen Beschleunigungssensor



Bild 6: HOSCH^{iris} DETECT Installation an einem HOSCH-Abstreifer Typ D2

3.1.2 Kontinuierliche Fördergurtüberwachung und Datenvisualisierung

HOSCH^{iris} DISCOVER liefert über eine Kombination aus einer stationär betriebenen Industrie-PC-Einheit, einem Magnetfeldsensor und einem kontinuierlichen Datenstrom über Ethernet, WiFi oder LTE hochpräzise Live-Daten über die Bandoberfläche. Diese Lösung informiert sofort über kleinste Veränderungen und Unregelmäßigkeiten der Bandoberfläche durch direkte Messung. Während ein minimaler Installationsaufwand erforderlich ist, liefert diese Lösung durch einen kontinuierlichen Datenstrom detailliertere und größere Datenmengen. Weiterhin bietet die Lösung eine Datenvisualisierung, durch die Live-Daten in Echtzeit über individualisierte Dashboards abgelesen werden können, sowie einen Video Livestream direkt vom Band (Bilder 7 bis 9).

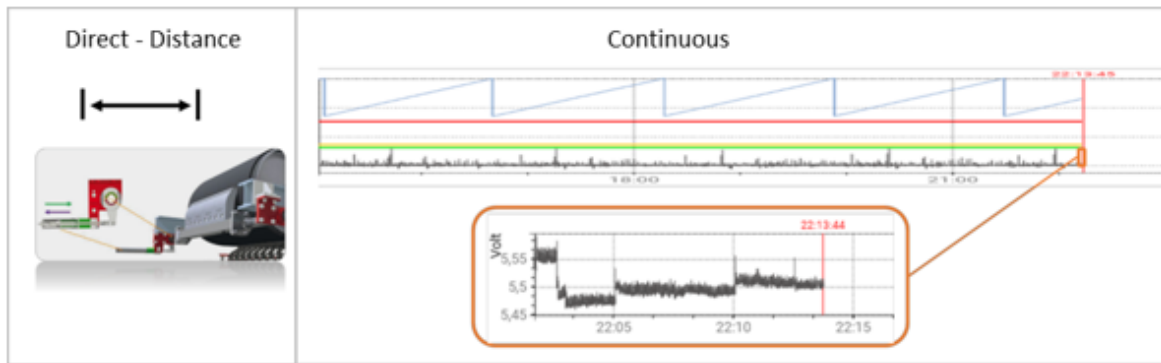


Bild 7: Datensignatur einer stationär betriebenen Fernüberwachungslösung auf Basis direkter Messung mit einem Magnetfeldsensor



Bild 8: HOSCH^{iris} DISCOVER Datenverarbeitungs-PC



Bild 9: HOSCH^{iris} DISCOVER Dashboard

3.2 Digitale Service-Plattform

Über die digitale Service-Plattform HOSCH^{iris} DATA wird jedes HOSCH-Gerät weltweit zunächst inventarisiert. Diese Inventarisierung umfasst sämtliche Details, die mit dem verbauten Gerät in Verbindung stehen (Anlage, Gerätetyp und Konfiguration, Standort, Datum, letzte Wartung, Zustand und weitere eventuelle Zusatzinformationen).


Bei jedem Service, der nun an diesem inventarisierten Gerät durchgeführt wird, werden die Arbeiten beschrieben, die verbauten Ersatzteile erfasst und ein digitaler Servicebericht erzeugt, der per Mail direkt zum Auftraggeber geschickt wird (Bild 11).

Die digitale Erfassung erfolgt über einen NFC-Tag an der Anlage (Bild 10), der ebenfalls über einen QR-Code verfügt. Falls der QR-Code beschädigt ist, kann weiterhin über das Scannen des NFC-Chips auf die Plattform zugegriffen werden.

Die Vorteile des HOSCH^{iris} DATA sind ein verbesserter Überblick über Service- und Wartungsarbeiten, eine digitale Wartungshistorie und den damit verbundenen reduzierten Planungsaufwand, sowie Informationen über Verschleißzeiten.



Bild 10: HOSCH^{iris} DATA NFC/QR Tag

Service report


Type: Maintenance (In Progress)

- Created at: 03-26-22
- Operation: Test Operation NFC21
- Location: Test Plant NFC21
- Plant/Area: Test Plant NFC21
- Conveyor: NFC21
- Position: Test ConveyorNFC21_LR_0.20_H
- Device type: B6-C
- Device-ID: 040160EA690680

Device detail:

Type	Article number	Changed
End-section	0544630	
Mounting	0551520	
Assembly carrier-Midsection	0541510	
Module / Blades / Blocks	SET000045	1
Elements	0530279	9
Module / Blades / Blocks	SET000056	5
Assembly carrier locking device	SET0551591	
Spindle	SET0000136	
Other / accessories / small parts	0562230	

Summary

1. Maintenance Team
2. Maintenance Type
3. Conveyor Status - Prior Service
4. Scraper Status - Prior Service

Bild 11: HOSCH^{iris} DATA Service-Report

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag liefert einen Überblick über Effizienzsteigerungen, die an Gurtförderanlagen durch den Einsatz von effizienten Fördergurtabstreifern sowie durch digitale Fördergurtüberwachung und digitales Servicemanagement erreicht werden können.

In Kapitel 1 wurden zunächst verschiedene Herausforderungen im Betrieb von Gurtförderanlagen dargestellt. Speziell betrachtet wurden hier die Themen Carryback und ungeplante Stillstände von Förderanlagen.

Im zweiten Kapitel wurde gezeigt, wie durch den Einsatz von effizienten Reinigungssystemen Carryback und seine negativen Folgen für die Anlage minimiert werden können. Die Schlussfolgerung hier ist, dass durch effiziente Abstreifer mit langen Standzeiten die Anlagenverfügbarkeit erhöht werden kann.

Im dritten Kapitel wurden verschiedene digitale Systeme zur Gurtbandüberwachung vorgestellt, die in Verbindung mit HOSCH-Abstreifern Anomalien in der Gurtoberfläche sowie Schäden in ihrer Entstehung frühzeitig erkennen können. Hier ist die Schlussfolgerung, dass durch digitale Überwachung zu einer Effizienzsteigerung bezüglich der Verhinderung größerer Bandschäden und den damit zusammenhängenden Stillstandzeiten und Kosten erreicht werden kann. Zum anderen kann aber auch Personal effizienter eingesetzt werden. Manuelle Kontrollen der Förderbandoberfläche gehören durch effiziente Fördergurtüberwachung der Vergangenheit an.

Ebenso wurde im dritten Kapitel die digitale Service-Plattform HOSCH^{iris} DATA vorgestellt. Durch digitale Service-Berichte, Wartungshistorien und Übersicht über Verschleißzeiten können Planungsaufwände im Service reduziert werden.

Quellenverzeichnis:

- [1] <https://www.roller.com.tw/solutions/carryback> (Datum des Zugriffs: 29.06.2023)
- [2] Richtlinie VDI 3970, Leitfaden für die Aufstellung eines Instandhaltungsplans für Stetigförderer, 2013
- [3] Richtlinie VDI 3605, Belt conveyors for bulk material – Cleaning devices, 2012
- [4] CEMA, Belt Conveyors for Bulk Materials, Kapitel 11, 2020

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Digitale Fernüberwachung von Bandreinigungssystemen Produktivität steigern und Schäden vermeiden dank geplanter Instandhaltung

Jonas Zahn



Partners in Productivity

Jonas Zahn
Flexco Europe GmbH
Maybachstraße 9
72348 Rosenfeld

Digitale Fernüberwachung von Bandreinigungssystemen

Flexco Europe hat mit der IoT-Plattform Elevate eine intelligente Industrie-4.0-Lösung entwickelt, mit der Betreiber von Förderbandanlagen ihre Förderbänder in Echtzeit überwachen können. Der Betreiber erhält somit Zugriff zu einer einfach zu bedienenden Plattform, die Wartungen dank datenbasierter Entscheidungen vereinfacht und beschleunigt oder gar Ausfallzeiten der Förderbandanlage durch proaktives Handeln verhindern kann.

1 Flexco Elevate – Produktivität steigern und Schäden vermeiden

Fallen in Berg- oder in Zementwerken unerwartet Förderbänder aus, kann das für die Verantwortlichen teuer werden, denn der Betrieb steht erstmal still. Flexco liefert mit Elevate die passende Antwort, eben genau solche Stillstandszeiten über ein ganzheitliches Überwachungssystem zu reduzieren oder gar zu vermeiden.

Bisher haben Mitarbeiter Förderbänder und deren Komponenten, wie Bandabstreifer, vor Ort auf ihren Zustand überprüft. Dazu musste eine Begehung der kompletten Förderstrecke erfolgen. Das ist nicht nur zeitaufwändig, sondern auch nicht ganz ungefährlich. Denn die Techniker müssen sich unter Umständen in enge Zwischenräume drängen, um die Anlage zu inspizieren. Konnten sie ein Problem ausfindig machen, warteten sie auf das Serviceteam – und auf Ersatzteile. Bis die Anlage wieder einsatzbereit war, verging so wertvolle Zeit. Doch Flexco Elevate ermöglicht den Betreibern von Förderbandanlagen in Zukunft proaktiv anstatt reaktiv zu agieren und somit deren Effizienz zu steigern.

1.1 Daten sammeln, Erkenntnisse gewinnen, Maßnahmen ableiten

Die Daten der Plattform werden über an Förderbandabstreifern angebrachte Elevate-Geräte gewonnen. Diese verbinden sich per Knopfdruck über Wi-Fi oder Mobilfunk mit der Cloud, Kabel sind damit nicht erforderlich. Mit einer App, die sich der Nutzer auf dem Mobiltelefon oder Tablet installiert, kann er alle Förderband-Spezifikationen bei der Montage der Geräte vor Ort eingeben. Dabei sind sowohl die Installation und Inbetriebnahme als auch das Überwachen schnell und einfach in der Handhabung.

Die App überträgt alle Daten an die Cloud, sodass die Eingaben direkt auch im i3-Dashboard ersichtlich sind. Über dieses digitale und intuitiv zu bedienende Dashboard erhält der Mitarbeiter Warnungen und Benachrichtigungen: Sind Störsignale aufgetreten? Wie ist die aktuelle Position und Abnutzung des Förderbandabstreifers? Wann sollte die nächste Wartung vorgenommen werden? Dazu kommen unter anderem technische Daten zum Förderbandsystem oder zu den Laufzeiten von Band und Bandabstreifer.

Durch die gewonnenen Daten sind Betreiber in der Lage, rechtzeitig fundierte Entscheidungen zu treffen und Maßnahmen abzuleiten. Etwa im Falle eines auftretenden Störsignals mit einer proaktiven Bandbegehung vor Ort, sodass Betreiber in der Lage sind, Probleme frühzeitig zu beheben und nicht - wie bisher - erst reagieren, wenn es bereits zu einem schwerwiegenden Ausfall gekommen ist.

Zudem lässt sich das Elevate-System für die Optimierung von Wartungsarbeiten nutzen, sodass diese gezielter geplant und effizienter durchgeführt werden können. Denn die Leistung der Bandabstreifer und der Zustand des Förderbandes sind jederzeit und von

überall aus zu beurteilen, ohne Servicetechniker loszuschicken. So hat der Betreiber alle wichtigen Daten im Blick und kann seine Ressourcen zielgerichteter planen.

Das Elevate-System sammelt Daten und liefert Informationen direkt nach der Inbetriebnahme und sorgt so unmittelbar für eine Steigerung der Effizienz – einen Mehrwert ab Tag eins!

1.2 Das Elevate-System

Bei der Konzeption des Elevate-Systems standen geringster Aufwand mit maximalem Nutzen für den Endanwender im Fokus, sodass sich die Systemkomponenten wie folgt darstellen (Bild 1):

i3 GERÄT

Für die Umsetzung ist lediglich ein Gerät je Förderbandabstreifer erforderlich, das über Mobilfunk oder Wi-Fi die per Sensor gewonnenen Daten an die Cloud überträgt und dank Batteriebetrieb ohne den Anschluss störender Kabeln auskommt.

i3 MOBILE APP +

Die i3 Mobile App + ermöglicht zum einen eine schnelle und einfache Installation und bietet zum anderen während des Betriebes eine unkomplizierte Dokumentation von Serviceaktivitäten.

i3 DASHBOARD

Das i3 Dashboard bietet einen direkten Zugang zu den Daten, welche in Echtzeit generiert werden.

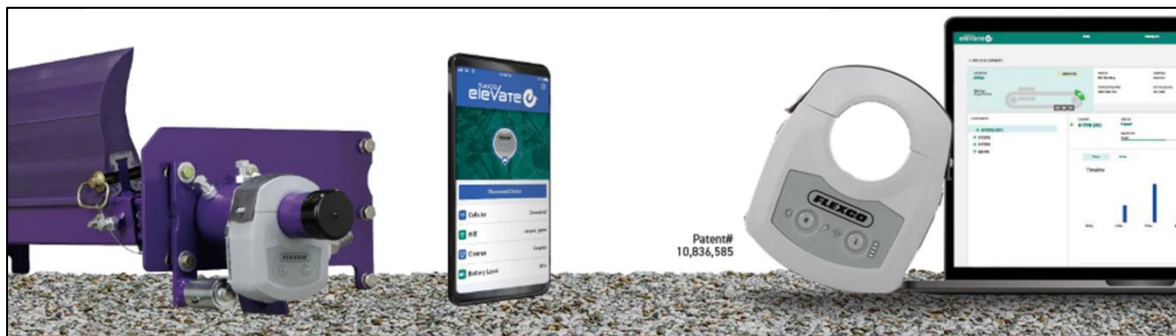


Bild 1: Systemkomponenten im Überblick - i3 Gerät, i3 Mobile App +, i3 Dashboard

1.3 Kontrollleuchte für Förderbandanlagen

Ähnlich der Motorkontrollleuchte bei einem Auto warnt Flexco Elevate, wenn das Förderband gewartet werden muss, sodass keine unerwünschten Ereignisse am Förderband übersehen werden und deren Auswirkungen im schlechtesten Fall nicht erst bei ungeplantem Stillstand der Anlage auffallen. Das intuitive Dashboard bietet dabei die Möglichkeit, einen ganzheitlichen Überblick über die Förderbandanlage zu behalten und beinhaltet folgende Informationen:

- Technische Daten des Förderbandsystems.
- Einbauort, Funktion und Laufzeit des Förderbandabstreifers.

- Verschleiß von PU- und Hartmetallabstreifblättern.
- Erinnerung für das Nachspannen der Feder des Förderbandabstreifers.
- Benachrichtigung bei unüblichen Ereignissen/Auffälligkeiten.
- Erkennung von unbefugtem Eingriff.
- Detaillierte Wartungsprotokolle mit Informationen über Zeitpunkt und Inhalt der Wartungen an der Förderbandanlage.

1.4 Der Mehrwert auf einen Blick

AMORTISATION AB DEM ERSTEN TAG

Sobald das Elevate-Gerät installiert ist, sind die gewonnenen Daten umgehend über das Elevate Dashboard ersichtlich.

ASSETMANAGEMENT

Elevate erstellt einen digitalen Zwilling aller an den Förderbandanlagen installierten Flexco-Abstreifer, was eine effizientere Ressourcenplanung ermöglicht.

EINFACH UMZUSETZEN

Das Elevate-Gerät kann schnell und einfach auf bestehende Förderbandabstreifer montiert werden, sodass kein zusätzlicher Kosten- oder Zeitaufwand für weiteres Equipment, wie Gateways o. Ä., entsteht.

EINFACH ZU INSTALLIEREN

Dank intuitiver Steuerung per App und einer einfachen Montage ist die Installation „quasi per Knopfdruck“ in weniger als 5 Minuten je Gerät erledigt.

EINFACH ZU ÜBERWACHEN

Unmittelbare Information darüber, wenn Auffälligkeiten am Förderband festzustellen sind sowie auch über den Status des Förderbandabstreifblatts.

VERBESSERTE SICHERHEIT

Elevate reduziert den Bedarf an physischen Inspektionen entlang der Förderbandanlage.

DIGITALE SERVICEAUFZEICHNUNGEN

Elevate bietet die Möglichkeit, Servicemaßnahmen digital zu erfassen.

Dass Flexco Elevate auch monetär lohnenswert ist, haben bereits reale Anwendungsfälle bewiesen (siehe Bild 2).

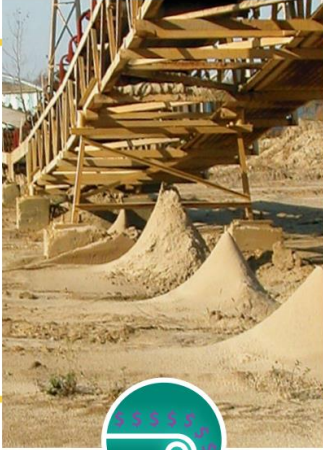
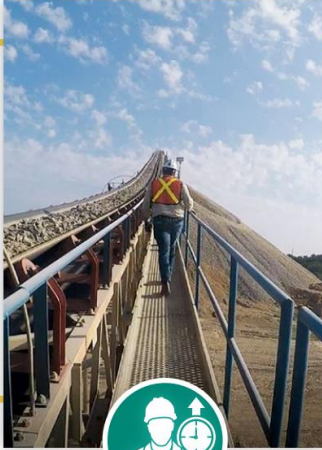




		
		
<p>Flexco Elevate® steigert die Produktion im Schotterbetrieb um mehr als 1 Mio. USD, indem es Dateneinblicke zur Verringerung des Rücktrags nutzt.</p>	<p>Flexco Elevate® spart 51.000 USD an Arbeits- und Wartungskosten im Bergbaubetrieb ein, da die Echtzeitüberwachung die manuelle Inspektion überflüssig macht.</p>	<p>Mit Flexco Elevate® werden die Kosten für den Austausch von Förderbändern im Bergbaubetrieb in der Höhe von 250.000 USD verhindert, da Förderbandrisse frühzeitig erkannt werden.</p>

Bild 2: Reale Einsparpotenziale dank Flexco Elevate

Zusammenfassung

Flexco Elevate ermöglicht es Unternehmen in der Schüttgutfördertechnik, schnell und einfach den nächsten Schritt in Richtung Digitalisierung zu beschreiten. Bei der Implementierung steht Flexco seinen Kunden als Partner zur Seite, sodass dank Fernüberwachung von Bandreinigungssystemen die Möglichkeiten einer digitalen Welt genutzt und die Produktivität von Förderbandanlagen gesteigert werden kann.

Quellenverzeichnis:

- [1] Flexco Elevate. (Datum des Zugriffs: 14.06.2023);
Verfügbar unter: <https://Flexcoelevate.com/Flexco-Elevate>

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

Wertschätzung am laufenden Band

Wilfried Dünwald



Dipl.- Ing. Wilfried Dünwald
ScrapeTec trading GmbH
Altfelder Str. 190
47475 Kamp-Lintfort

Wertschätzung am laufenden Band

1 Einleitung

In vielen Industriezweigen sind die Übergaben von Bandanlagen entscheidend für den reibungslosen Betrieb und gleichzeitig wesentliche Kostenschwerpunkte. Dabei entstehen spezifische Herausforderungen, die die Kosten und die Produktivität beeinflussen. Prallprozesse bei Übergabepunkten führen zu Verschleiß, erhöhten Wartungskosten und schnellerem Verschleiß von Maschinen. Verschüttungen von Materialien an den Übergaben bedeuten Ressourcenverlust, Reinigungskosten und Arbeitsunterbrechungen. Die Staubentwicklung kann Gesundheits- und Umweltrisiken und zusätzliche Kosten verursachen. Geeignete Lösungen und Sicherheitsvorkehrungen an Übergabepunkten sind von großer Bedeutung, um Kosten zu minimieren und die Effizienz zu steigern. Effiziente Übergaben erhöhen die Produktivität, vermeiden unnötige Arbeiten, gewährleisten die Arbeitssicherheit und minimieren potenzielle Gesundheitsrisiken.

1.1 Wertschätzung am laufenden Band

Die Produkte des Unternehmens ScrapeTec sind Neuentwicklungen, welche nahezu wartungsfrei, ohne Gurtkontakt und Verschleiß der Bänder „nachrüstbar“ sind (Bild 1). Dank zahlreicher Zubehörmaterialien können die Produkte, individuell angepasst, an nahezu allen Förderband-Übergaben genutzt werden. Die Produkte sind einsetzbar, gleichwohl ob Zucker oder Groberz, nasses oder pulverartiges Material gefördert wird. Das wesentliche Produkt ist der AirScrape in Verbindung mit dem TailScrape, eine kontaktfreie Seitenabdichtung, welche den Venturi-Effekt nutzt.

Der DustScrape rundet das Staubkonzept ab, indem er die beim Übergabeprozess entstehende Prozessluft durch ein spezielles Filtertuch entweichen lässt, bei gleichzeitigem Rückhalt der Staubpartikel.

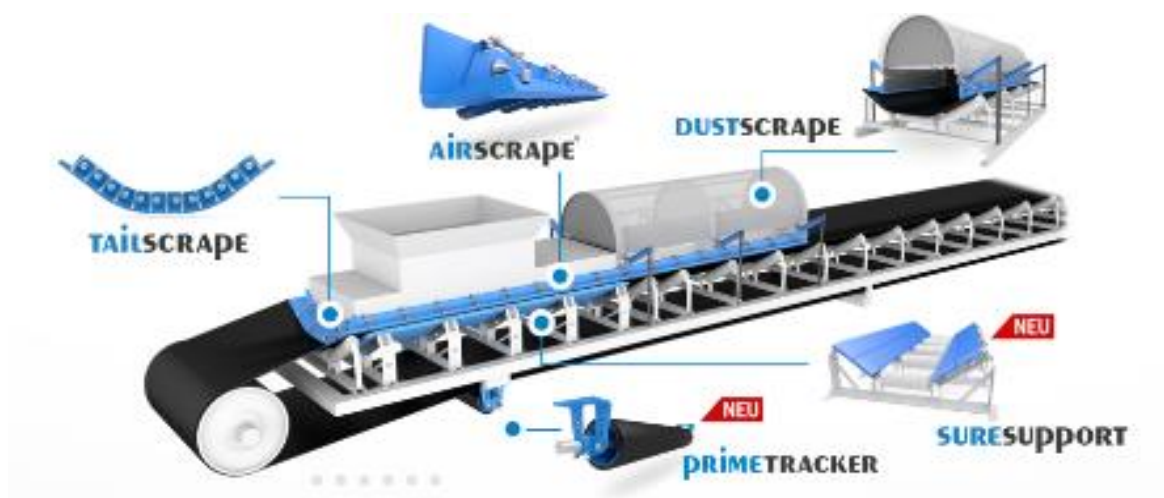


Bild 1: Übergabelösungen von ScrapeTec

1.2 AirScrape und TailScrape

AirScrape® ist ein patentiertes, in Deutschland hergestelltes Seitenabdichtungssystem für Gurtförderer. Es schwebt berührungsfrei über dem Fördergurt und erzeugt einen Luft-Sog, indem Luft von außen in Richtung Gurtmitte geleitet wird. Durch die Installation von AirScrape® können Unternehmen ihre Förderprozesse optimieren, die Produktivität steigern und gleichzeitig Umweltauswirkungen verringern. Das Seitenabdichtungssystem ist einfach zu installieren, wartungsfreundlich und bietet eine langanhaltende Leistung.

Der TailScrape basiert wie der AirScrape® auf dem Venturi-Prinzip. Dank der intelligenten Lamellenstruktur an der Unterseite wird ein Unterdruck im Förderbereich erzeugt. Dadurch kann nichts über den millimetergroßen Spalt entweichen, da Luft durch den Unterdruck einströmt. Staubentwicklung und Verschüttungen werden dadurch um bis zu 100 % reduziert. Der TailScrape arbeitet berührungslos zum Gurt und erfordert daher keine regelmäßige Wartung. In Kombination mit dem AirScrape ermöglicht der TailScrape erhebliche Einsparungen bei Kosten und Ressourcen. Zudem erfüllt die signifikante Reduzierung von Staubentwicklung und Verschmutzungen die Anforderungen an Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz.

In Kombination mit AirScrape bietet TailScrape eine effektive passgenaue Abdichtung einer Übergabe.

2 DustScrape

Durch den Einsatz von ScrapeTec-Staubschutzlösungen, insbesondere rund um den DustScrape an Förderanlagen, können fast die gesamten Staubemissionen und Energiekosten für die Staubabsaugung auf null reduziert werden. In vielen Fällen wird sogar auf bestehende aktive Absaugungen verzichtet, nachdem die Filtertuchlösung eingebaut wurde. Diese bewährte Kombination aus Filtertuch und AirScrape hat sich weltweit als Staubschutzlösung etabliert. Kunden berichten von nachgewiesenen Kosteneinsparungen an ihren Förderanlagen, was zur starken Motivation führt, auch andere Anlagen mit DustScrape, AirScrape und TailScrape auszustatten. Die Einsparungen beschränken sich nicht nur auf Energiekosten, sondern umfassen auch Reinigungskosten und Wartungsaufwand, da der Staubschutz wartungsfrei ist und Reinigungsunterbrechungen am Band entfallen. ScrapeTec verfügt über umfangreiche Erfahrung und kann interessierten Betreibern individuell die Vorteile einer Staubschutzlösung rund um den DustScrape vermitteln.

3 PrimeTracker – Neue Technologie für eine saubere Gurtführung

Der PrimeTracker ist einfach zu installieren, zuverlässig ohne Reibung, einsetzbar auch für reversierbare Bänder. Diese neu entwickelte Tracker-Technologien haben es ermöglicht, durch Massenungleichgewicht einfach und unkompliziert den Gurt zentral zu steuern. So kommt es nicht mehr zu einem Verlauf des Förderbandes, der zu hohen Schäden und Mehrkosten führen kann. Diese Konstruktion verwendet ein flexibles Zentrallager im mittleren Drehpunkt anstelle einer festen Achse bei 45°. Dies ermöglicht eine völlig freie 360°-Bewegung um die Mitte des Trackers, wodurch ein spezielles Design geschaffen

wurde. Ergebnisse in der Praxis haben gezeigt, dass diese Konstruktion viele Vorteile gegenüber der Konstruktion mit fester Achse hat. Der einfache Einbau des PrimeTrackers durch die neu entwickelte Halterung ist zu nennen und er funktioniert perfekt bei Gurten, die in beide Richtungen laufen.

4 Forschung & Entwicklung: DustScape

Das Interesse im Hause ScrapeTec gilt auch ständig der Forschung und Neu- bzw. Weiterentwicklung von Komponenten.

Die Kombination und das Zusammenspiel von vorhandenen Absauganlagen in Verbindung mit einer DustBox soll erforscht werden. Ist eine Absaugung in Betrieb, ergibt sich eine definierte Luftströmung „rückwärts“ durch das Filtertuch. Da die staubhaltige Luft kraftfrei nun angesaugt wird, wird deutlich weniger Energie benötigt bei gleichzeitiger Sicherstellung einer ausreichenden Luftgeschwindigkeit in den Rohrleitungen, um Verstopfungen hier zu vermeiden. Wird die Absaugung gewartet oder fällt sie aus, arbeitet die Dustbox in ihrer vorgesehenen Luftrichtung/Arbeitsweise (Bild 2).

Hierzu sucht die ScrapeTec Unternehmen und/oder Universitäten, welche die Zusammenhänge gemeinsam erforschen und die Ergebnisse bewerten.

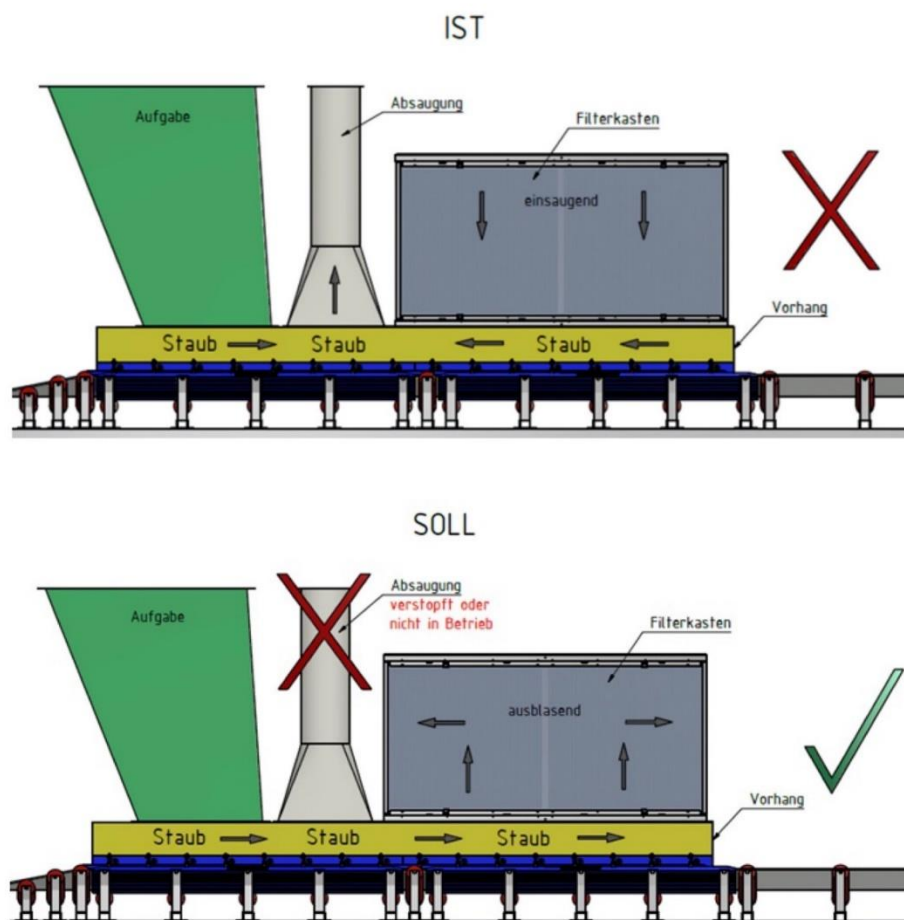


Bild 2: Absauganlage mit Dustbox

5 Forschung & Entwicklung: Prime Tracker – Die intelligente Gurt-Führungsrolle

Der E-PrimeTracker ist mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet und arbeitet Remote und sendet seine Daten zum Gurtlauf-Status an Monitoring-Systeme (Bild 3). In der Rolle sind Sensoren verbaut, welche neben dem Schiefelauf weitere zentrale und aussagekräftige Kennwerte erfassen, zum Beispiel: die Gurtposition, die Bandgeschwindigkeit oder die Qualität einer Gurtverbindung bezogen auf die Richtung. Über z. B. akustische Sensoren können beginnende Schäden von Komponenten erfasst werden. Die aufbereiteten Sensordaten lassen sich zudem ganz einfach in die marktüblichen Systeme der vorbeugenden Instandhaltung integrieren und auch mit der von ScrapeTec entwickelten App mobil abrufen. Aus den übermittelten Daten kann der Anwender Servicebedarf ableiten, weil die Sensoren Veränderungen zuverlässig detektieren und frühzeitig – bevor es zu größeren Schäden oder Bandstillstand kommt – eine Warnmeldung ausgeben. Außerdem sammelt der E-PrimeTracker, wenn gewünscht, die erfassten Daten und dokumentiert sie.

Mehrere E-PrimeTracker sind derzeit im Einsatz und werden auf die Verlässlichkeit ihrer Aussagen getestet. KI wird hier zum Einsatz kommen. Hier arbeitet ScrapeTec zusammen mit österreichischen und deutschen Universitäten.

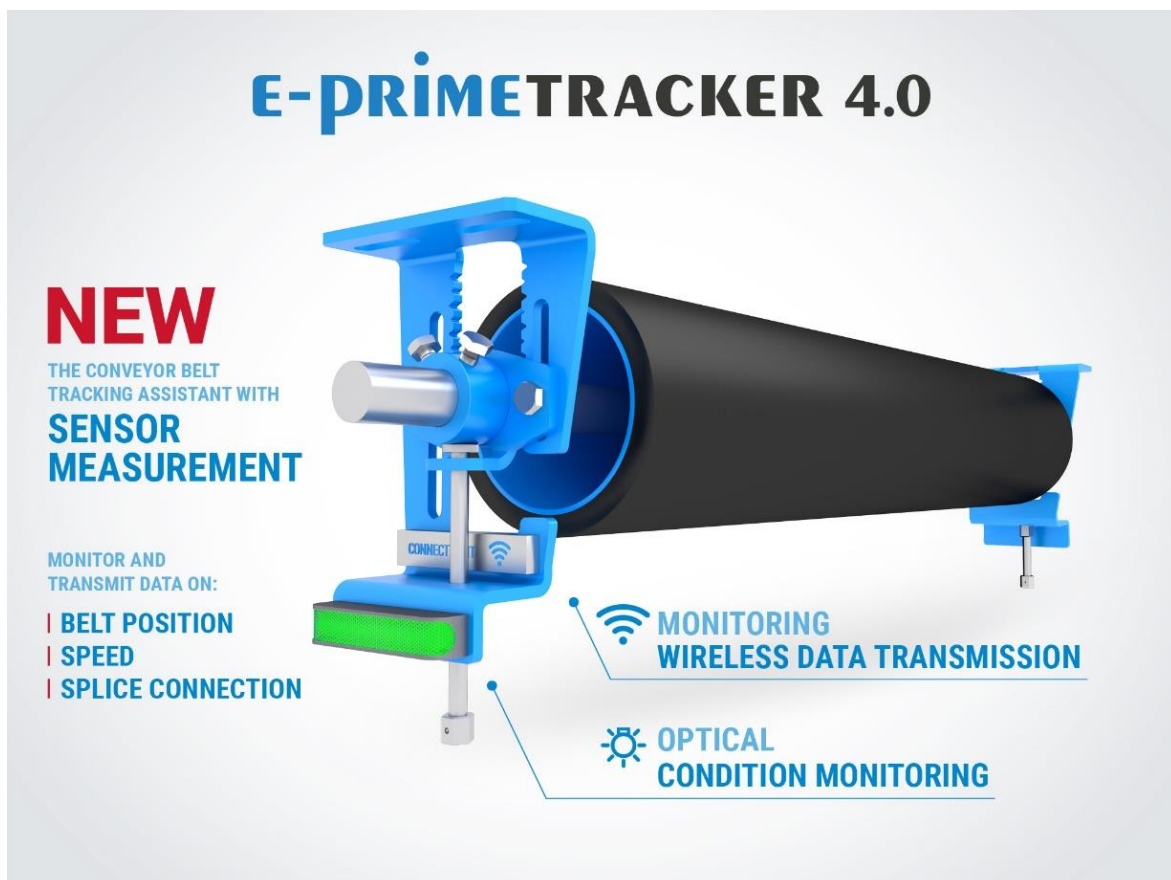


Bild 3: Intelligente Gurt-Lenkrolle E-PrimeTracker 4.0

Zusammenfassung

Die Produkte des Unternehmens ScrapeTec sind für den wartungsfreien Einsatz an den Übergaben von Förderbandanlagen konzipiert und verhindern die Staubentwicklung und Verschüttung von Material an diesen neuralgischen Punkten.

Quellenverzeichnis:

- [1] Dünwald, W.: Wertschätzung am laufenden Band.
- [2] ScrapeTec Trading GmbH: Firmenunterlagen, 2015
- [3] ScrapeTec Trading GmbH: Firmenunterlagen, 2022
- [4] Bilder Internet, Google Search: „Skirting Conveyor Belt“

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

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

Norman Stamm



Dipl.-Ing. (FH) Norman Stamm
RWE Power AG
Technik Braunkohle
Elektrotechnik-Förderanlagen
Am Tagebau
52382 Niederzier

Automatisierungsprojekte und Assistenzsysteme zur Effizienzsteigerung des Bunker- und Großgerätebetriebs in den Tagebauen der 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 den 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 tageszeitabhängige regenerative Stromerzeugung aus Wind und Sonne zu ergänzen.

Die Automatisierungsprojekte unterstützen den sozialverträglichen Personalabbau zur Reduzierung der Fixkosten und damit Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit der Braunkohlenverstromung (vgl. Bild 1).

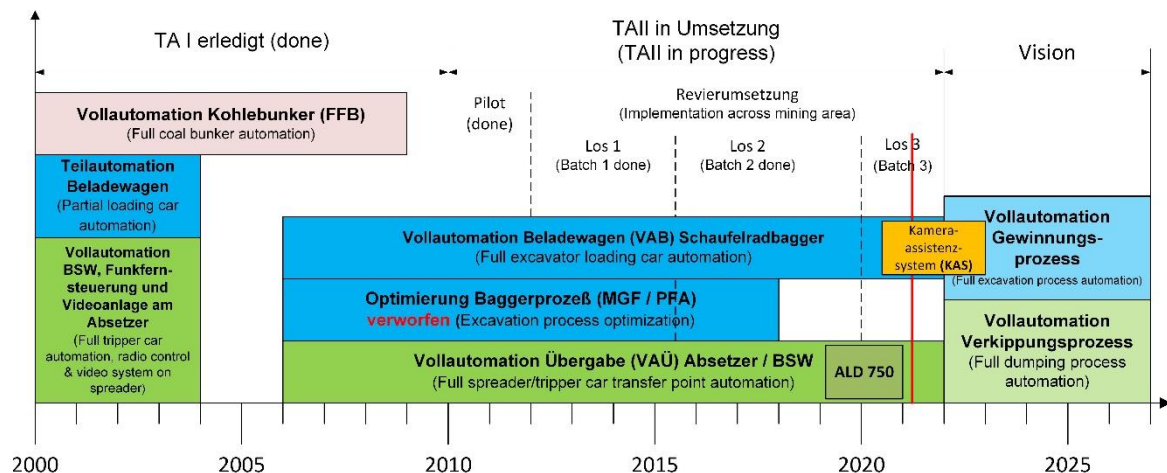


Bild 1: Umsetzungsstrategie zur Erhöhung des Automatisierungsgrades

Wesentliches Ziel dabei ist, neben der Personalkostenreduzierung, die Vergleichmäßigung 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 mehr weiterverfolgt. Aufgrund der gegebenen Wirtschaftlichkeit liegen dabei aktuell Videoassistenzsysteme im Fokus, die kostengünstig,

flexibel und schnell umgesetzt werden können, um damit eine Förderung mit situativ reduziertem Bedienpersonal und gleichzeitig dessen Entlastung zu ermöglichen.

2 Bagger-Automatisierung

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

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 ihres Verbrauches optimiert.

Neben den bereits in den 90er Jahren entwickelten Geräteführerautomatiken und -hilfen wurde das Assistenzsystem zur Gerätepositionsdatenerfassung im Jahre 2009 eingeführt. Dieses System speist mit den Gerätepositionsdaten das Betriebsführungssystem SAMASA (Satellitengestützte Bagger, Materialfluss- und Absetzersteuerung). Diese Geländemodelldaten werden dem Geräteführer in den Führerständen inkl. der hinterlegten, digitalen Einsatzpläne angezeigt. Im Rahmen einer weiteren Effizienzsteigerung werden diese Informationen zudem über mobile Endgeräte 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, z. B. der vollautomatischen Übergaberegulierung der Absetzer (VAÜ) eingeflossen.

Als Revierprojekt wurden die Leitungstrommelantriebe aller Fördergeräte ab 2005 einheitlich mit Umrichterantrieben und Winkelkodierern zur Pendelstellungs- und Trommellängenerfassung ausgerüstet. Diese Technik ermöglichte, die Einspeisestelle automatisch zu überfahren. Früher mussten zwei Bediener vor Ort sein, um die Einspeisestelle im Handbetrieb zu 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 Beladekopfsteuerung, 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 den 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 Baggerschaufeln erzeugt enorme Erschütterungen in den Führerständen, die nicht durch gefederte Sitze und Schwingungsautomatik kompensiert werden konnten. Daher wurde 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 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.

Der 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 z. B. mittels Zahnsegmenten zu nutzen. Dies wäre, aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit des Planums, technisch kaum zuverlässig umsetzbar gewesen.

Der vollautomatische Beladewagen (VAB) basiert auf 5 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 (vgl. Bild 2).

2 Bagger-Automatisierung Vollautomatischer Beladewagen



Bild 2: Vollautomatischer Beladewagen Bagger (VAB)

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 automatisierte Beladewagen noch in Betrieb.

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 (TA 1). 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 wurden über 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 verhindert. 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. Ab 2014 wurden 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 Beladewagens 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 Übergaberegulung (VAÜ) ausgerüstet. Aufgabe des Geräteführers im Handbetrieb ist, die Materialübergabe zwischen Absetzer und Schwenkband vom Bandschleifenwagen immer in Deckung zu halten. Die Aufgabe 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 selbstständig. 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 (vgl. Bild 3) übertragen und gerätespezifisch weiterentwickelt. Seit 2016 wurden umgerüstete Anlagen nach einem Test- und

Probetrieb in den 2-Mann-Betrieb überführt. Heute sind in Summe 12 Absetzer mit dieser Technik in Betrieb. Der letzte Absetzer befindet sich aktuell in der Ausrüstung.

3 Absetzer-Automatisierung Vollautomatische Übergaberegung

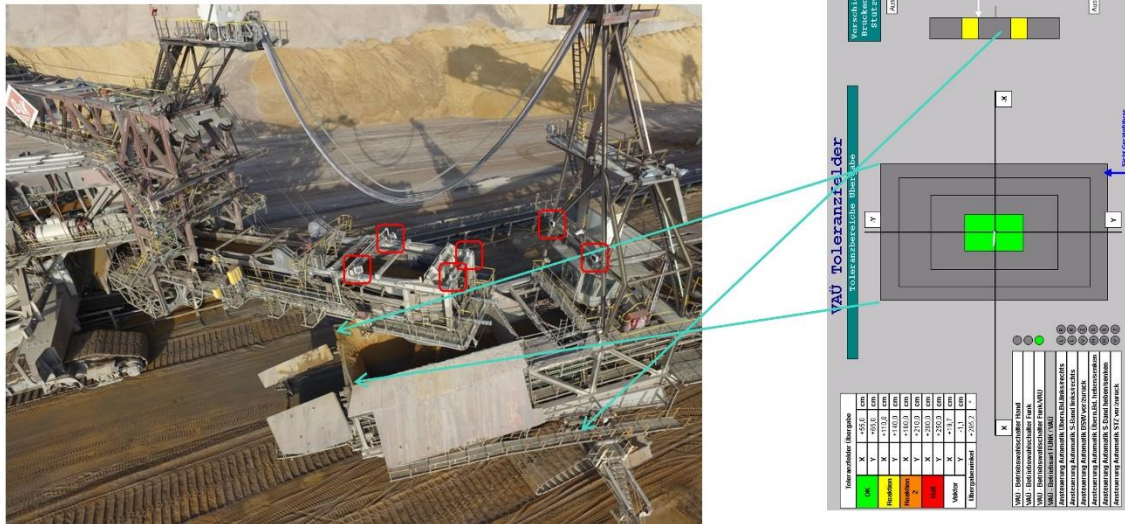


Bild 3: Vollautomatische Übergabe Absetzer (VAÜ)

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 9 Videokameras, eine automatische Lenkungsregelung für den Absetzer sowie eine Programmsteuerung für die automatische Verkippung 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.

Ausblick

Wegen der kürzeren Laufzeit der Tagebaue aufgrund des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes verlagert sich der Schwerpunkt der Automatisierungsprojekte. Der Fokus der weiteren Effizienzsteigerung des Großgerätebetriebs liegt in den Bereichen der Videoassistenzsysteme und der Prozessverbesserung von Teilprozessen. Beispiel hierfür ist das derzeit installierte Kameraassistenzsystem für Schaufelradbagger (vgl. Bild 4). Ziel dabei ist, situativ und zeitanteilig mit weniger Bedienpersonal pro Schicht am Bagger auszukommen. 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.

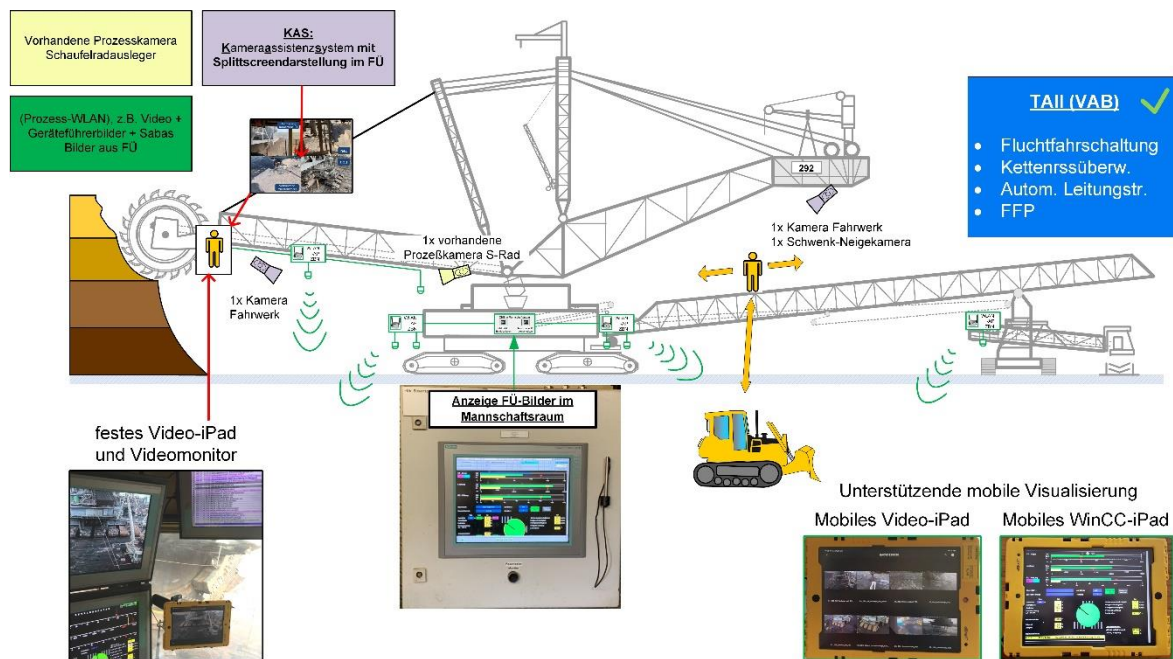


Bild 4: Kameraassistenzsystem Bagger (KAS)

Bereits die in der vorhandenen IP-Kameratechnik integrierten Algorithmen ermöglichen weitere Schritte, indem 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 mehrerer Absetzer durchführen kann. Voraussetzungen dafür sind leistungsfähige Netzwerkstrukturen und die Entwicklung betriebstauglicher Auswertungen.

27. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2023

Innovationen – Nachhaltigkeit – Trends – Effizienz – Lebensdauer

3D Bestandserfassung, Visualisierung und Erkennung von Materialanbackungen in Silos

Oliver Jakobs

Julien Pierre



Julien Pierre, M. Sc., M. Sc.

indurad GmbH

Belvedereallee 5

52070 Aachen

3D-Bestandserfassung, Visualisierung und Erkennung von Materialanbackungen in Silos

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf den aktuellen Stand der Technik zur Bestimmung des Füllstandes von Silos im Schüttgutbereich eingegangen. Diese werden nach den verschiedenen Technologien und Messtypen vorgestellt und differenziert. Anschließend wird im Detail auf die indurad-Lösung, deren Basis hochgenaue Radare beinhaltet, eingegangen und die Möglichkeiten, die aus der Kombination dieser speziellen Sensorik und der adaptiven Software resultieren. Schlussfolgernd werden noch tatsächliche Kundenreferenzen einschließlich der Problemstellungen vorgestellt und die wirtschaftlichen Vorteile einer genauen volumetrischen Erfassung der Schüttgüter.

1 Stand der Technik

Die Silomesstechnik hat sich in den letzten Jahren erheblich weiterentwickelt. Zuvor wurden Silos oft manuell überwacht, indem Mitarbeiter regelmäßig den Füllstand überprüften. Heutzutage werden jedoch immer häufiger automatische Messsysteme eingesetzt, die den Füllstand kontinuierlich überwachen und die Daten in Echtzeit liefern.

In den letzten Jahren haben sich auch drahtlose Messsysteme in der Silomesstechnik etabliert. Diese Systeme verwenden Sensoren, die drahtlos mit einer zentralen Steuereinheit kommunizieren und so den Füllstand überwachen können. Diese drahtlosen Systeme bieten den Vorteil, dass sie flexibel und einfach zu installieren sind und keine Verkabelung erforderlich ist.

Die verwendete Messtechnologie ist abhängig von der Material-Charakteristik und dem Bedarf der Genauigkeit der Messung. Neben der Klassifizierung der verschiedenen Messtechniken können diese in die verschiedenen Technologien eingeteilt werden. Diese werden im Folgenden beschrieben.

1.1 1D-Messtechnik

Im Folgenden werden verschiedene 1D-Messtechnologien, die für die Füllstandsmessung in Silos eingesetzt werden können, erläutert. Die gängigsten Technologien sind Ultraschall, Radar und die kapazitive Messung, welche im Folgenden beschrieben werden.

Ultraschallmessung: Bei der Ultraschallmessung wird ein Ultraschallsensor am oberen Teil des Silos angebracht. Der Sensor sendet Ultraschallwellen aus, die am Füllstand reflektiert werden. Die Laufzeit der Schallwellen wird gemessen und daraus der Füllstand berechnet. Ultraschallmessungen sind relativ einfach und kostengünstig, können jedoch durch Staub, Feuchtigkeit oder andere Hindernisse beeinträchtigt werden.

Radar-Messung: Bei der Radar-Messung wird ein Radarsensor am oberen Teil des Silos angebracht. Der Sensor sendet elektromagnetische Wellen aus, die am Füllstand reflektiert werden. Die Laufzeit der Wellen wird gemessen und daraus der Füllstand berechnet. Radar-Messungen sind genauer als Ultraschallmessungen und weniger anfällig für Störungen. Diese können jedoch teurer sein.

Kapazitive Messung: Bei der kapazitiven Messung werden Elektroden im Silo angebracht. Der Füllstand wird anhand der Kapazitätsänderung zwischen den Elektroden gemessen. Kapazitive Messungen sind genauer als Ultraschallmessungen und weniger anfällig für

Störungen, erfordern jedoch eine aufwändigere Installation.

Jede dieser 1D-Messtechnologien hat ihre Vor- und Nachteile und eignet sich für unterschiedliche Anwendungen und Silotypen. Die Auswahl der geeigneten Technologie hängt von Faktoren wie Genauigkeitsanforderungen, Umgebungsbedingungen und Budget ab.

1.2 2D-Messtechnik

1.2 Diverse 2D-Messtechnologien können für die Füllstandsmessung in Schüttgut-Silos eingesetzt werden. Die meistgenutzten Technologien sind Laser, Kamerasysteme, Mikrowellenmesstechnik und akustische Messungen. Diese Technologien werden im Folgenden kurz beschrieben.

Laserscanning: Bei der Laserscanning-Technologie wird ein Laserstrahl im Silo rotiert oder abgetastet, um ein 2D-Profil des Füllstands zu erstellen. Der Laserstrahl wird von der Oberfläche des Schüttguts reflektiert und von einem Sensor erfasst. Durch die Analyse des reflektierten Signals kann der Füllstand im Silo berechnet werden. Laserscanning bietet eine hohe Genauigkeit und ist weniger anfällig für Störungen wie Staub oder Verklumpungen.

Bildverarbeitung: Bei der Bildverarbeitungstechnologie wird eine Kamera am oberen Teil des Silos angebracht, um Bilder der Füllstandsoberfläche zu erfassen. Durch die Analyse der Bilder kann der Füllstand im Silo berechnet werden. Die Bildverarbeitung bietet eine hohe Genauigkeit und ist besonders geeignet für Schüttgüter mit unebener Oberfläche oder unterschiedlicher Korngröße.

Mikrowellenmessung: Bei der Mikrowellenmessung werden Mikrowellenimpulse in das Silo gesendet und die reflektierten Impulse gemessen. Durch die Analyse der Laufzeit und Intensität der reflektierten Impulse kann der Füllstand im Silo berechnet werden. Mikrowellenmessungen sind weniger anfällig für Störungen wie Staub oder Verklumpungen und eignen sich gut für Schüttgüter mit hoher Feuchtigkeit oder Dichte.

Akustische Messung: Bei der akustischen Messung werden Schallwellen im Silo erzeugt und die Laufzeit der reflektierten Schallwellen gemessen. Durch die Analyse der Laufzeit kann der Füllstand im Silo berechnet werden. Akustische Messungen sind weniger anfällig für Störungen wie Staub oder Verklumpungen und eignen sich gut für Schüttgüter mit niedriger Dichte oder poröser Struktur.

Jede dieser 2D-Messtechnologien hat ihre Vor- und Nachteile und eignet sich für unterschiedliche Anwendungen und Schüttguttypen. Die Auswahl der geeigneten Technologie hängt von Faktoren wie Genauigkeitsanforderungen, Umgebungsbedingungen und Budget ab.

1.3 3D-Messtechnik

Verschiedene 3D-Messtechnik wird ähnlich zu den 2D Technologien angeboten, um eine genauere Erfassung der Volumina zu ermöglichen. Dabei wird zwischen Lasertechnik, Kamerasystemen, Time-of-Flight Sensorik und akustischer Messung unterschieden, welche nachfolgend erläutert werden.

Laserscanning: Bei der Laserscanning-Technologie wird ein Laserstrahl im Silo rotiert oder abgetastet, um ein 3D-Profil des Füllstands zu erstellen. Der Laserstrahl wird von der Oberfläche des Schüttguts reflektiert und von einem Sensor erfasst. Durch die Analyse des reflektierten Signals kann der Füllstand im Silo berechnet werden. Laserscanning bietet eine hohe Genauigkeit und ist weniger anfällig für Störungen wie Staub oder Verklumpungen.

Bildverarbeitung: Bei der 3D-Bildverarbeitungstechnologie werden mehrere Kameras am oberen Teil des Silos angebracht, um ein 3D-Bild der Füllstandsoberfläche zu erfassen. Durch die Analyse der Bilder kann der Füllstand im Silo berechnet werden. 3D-Bildverarbeitung bietet eine hohe Genauigkeit und ist besonders geeignet für Schüttgüter mit unebener Oberfläche oder unterschiedlicher Korngröße.

Time-of-Flight (ToF) Sensoren: Bei der ToF-Technologie werden Infrarotlichtimpulse im Silo ausgesendet und die Laufzeit der reflektierten Impulse gemessen. Durch die Analyse der Laufzeit kann der Füllstand im Silo berechnet werden. ToF-Sensoren bieten eine hohe Genauigkeit und sind weniger anfällig für Störungen wie Staub oder Verklumpungen.

Akustische Messung: Bei der 3D-akustischen Messung werden mehrere Schallwellensensoren im Silo angebracht. Die Laufzeit und Intensität der reflektierten Schallwellen werden gemessen und daraus der Füllstand im Silo berechnet. 3D-akustische Messungen sind ebenfalls weniger anfällig für Störungen wie Staub oder Verklumpungen und eignen sich gut für Schüttgüter mit niedriger Dichte oder poröser Struktur.

Jede dieser 3D-Messtechnologien hat ihre Vor- und Nachteile und eignet sich für unterschiedliche Anwendungen und Schüttguttypen. Die Auswahl der geeigneten Technologie hängt von Faktoren wie Genauigkeitsanforderungen, Umgebungsbedingungen und Budget ab. Es ist auch möglich, verschiedene Technologien zu kombinieren, um eine noch genauere und zuverlässigere Füllstandsmessung zu erreichen.

1.4 Problematik des Standes der Technik

In der aktuellen Messtechnik für Schüttgut-Silos treten verschiedene Probleme auf, die zu ungenauen Messungen führen können. Eines dieser Probleme ist Staub und Verklumpungen. Schüttgut-Silos sind oft staubig und können Verklumpungen aufweisen, die die Messtechnologien stören und zu Fehlmessungen führen können. Dadurch können die Messergebnisse ungenau sein oder sogar komplett ausfallen.

Ein weiteres Problem ist die unebene Oberfläche des Schüttguts in einem Silo. Besonders bei Schüttgütern mit unterschiedlicher Korngröße kann dies zu Schwierigkeiten bei der Messung führen. Die Messtechnologien haben Schwierigkeiten, eine genaue und einheitliche Oberfläche zu erfassen, was zu ungenauen Messergebnissen führen kann.

Auch die Feuchtigkeit des Schüttguts kann die Messungen beeinflussen. Einige Schüttgüter weisen eine hohe Feuchtigkeit auf, die die Reflexion von Laserstrahlen oder Mikrowellenimpulsen beeinträchtigen kann. Dadurch können ungenaue Messergebnisse entstehen.

Die Genauigkeit der Messungen kann je nach Messtechnologie variieren. Einige Technologien bieten eine höhere Genauigkeit als andere, sind jedoch auch teurer. Es kann eine Herausforderung sein, eine Messtechnologie zu finden, die sowohl den Genauigkeitsanforderungen als auch dem Budget entspricht.

Zusätzlich erfordern die Messtechnologien regelmäßige Wartung und Kalibrierung, um eine zuverlässige Messung sicherzustellen. Dies kann zeitaufwändig und kostspielig sein.

Die genannten Probleme in der aktuellen Messtechnik für Schüttgut-Silos können zu ungenauen Messungen, Betriebsstörungen und ineffizienter Lagerverwaltung führen. Es ist daher wichtig, diese Herausforderungen zu berücksichtigen und nach Lösungen zu suchen, um eine zuverlässige und genaue Füllstandsmessung in Schüttgut-Silos zu gewährleisten.

2 indurad Radar-Lösungen für Silos

Durch den Einsatz von Radarmesstechnik der nächsten Generation und adaptiven Softwarelösungen kann mit indurad eine präzise und verlässliche Bestandskontrolle für alle Arten von Silos realisiert werden. Die iSilo-Lösung kann in Bergwerken, Fabriken, Schmelzhütten und Häfen eingesetzt werden. Die Lösung ist für alle Schüttgüter geeignet, unter anderem für gebrochenes Erz, Kohle, Braunkohle, Kali, Schwefel, Salz, Zement, Teer, Sand, Getreide, Holzpellets oder Düngemittel. Die einzusetzende Messtechnik kann dem Bedarf aufgrund der Charakteristik des Materials angepasst werden.

2.1 1D-Indurad-Radar-Messung

Die iSilo-Füllstandsmessung erfasst den tatsächlichen Füllstand des Silos. Je nach gewähltem Modul erhöht sich die Genauigkeit der Messung - ein Upgrade vom iSilo 1D- auf das iSilo 2D- oder iSilo 3D-Modul reduziert den Messfehler und bietet weitere wertvolle Funktionen. Die gesammelten Informationen werden dabei in Echtzeit zum einen an die SPS übertragen, aber auch in der indurad eigenen HMI-Schnittstelle angezeigt und können dementsprechend genutzt werden. Die Auslegung der Sensorik wird dabei auch an die abzudeckende Distanz angepasst, um z. B. auch Rollöcher auszustatten.

2.2 2D-indurad Radar Messung

Die iSilo Materialquerschnittsmessung ist sowohl in den Modulen iSilo 2D als auch iSilo 3D verfügbar. Die Querschnittsmessung wird in verschiedene virtuelle Behälter mit eigenen Materialhöhen aufgeteilt, um die Live-Daten-Informationen über den Füllzustand des Silos zu erhöhen. Virtuelle Behälter werden von der Software erstellt, um die Anbindung an bestehende SPS/SCADA-Systeme zu erleichtern. Ein iSilo-2D-Radar, das in einer Linie mit mehreren Beschickungs- und/oder Entleerungspunkten montiert wird, kann die Genauigkeit im Vergleich zu einer 1D-Lösung deutlich erhöhen und Möglichkeiten zur Bestimmung bestimmter Materialverhaltensprobleme aufzeigen.

2.3 3D-indurad Radar Messung

Die iSilo-Funktion für die volumetrische Messung von Materialien ist für das iSilo 3D-Modul verfügbar. Unser 3D-Radar ermöglicht ein präzises Scannen des Materialquerschnitts und den Aufbau eines 3D-Modells durch Ableitung eines hochauflösenden 3D-Oberflächenmodells aus einer dichten Punktwolke. Anstelle mehrerer 1D-Sensoren, die regelmäßig gewartet werden müssen und aufgrund der geringeren Anzahl von Messpunkten pro Fläche eine geringere Genauigkeit aufweisen, wird das Bild von einem einzigen 3D-Radarsensor erzeugt, der auf einer schwenkbaren Plattform montiert ist. Um die Anbindung an das bestehende SPS-System zu vereinfachen, kann ein Schachfeld aus virtuellen Behältern erstellt werden. Diese Funktion liefert eine detaillierte Information über den aktuellen Silostatus.

2.4 indurad-Visualisierung

Die iWEB-Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) ist eine intuitive Webanwendung, die eine detaillierte Diagnose und leicht zugängliche Visualisierungen ermöglicht. Sie ermöglicht dem Kunden den Zugriff auf das System zur Einrichtung, Parametrierung, Visualisierung und Prozessanalyse. Die Prozessdaten werden im Browser im Live-Modus angezeigt und durch eine Echtzeit-Update-Technologie nach dem Push-Prinzip permanent aktualisiert (Bild 1). Durch gestaffelte, berechtigungsbasierte Zugriffsebenen (vom Maschinenbediener bis zum Instandhaltungsleiter) können sich mehrere Benutzer gleichzeitig mit unterschiedlichen Rechten (nur Lesen oder Änderungen einleiten) mit dem iWEB verbinden.

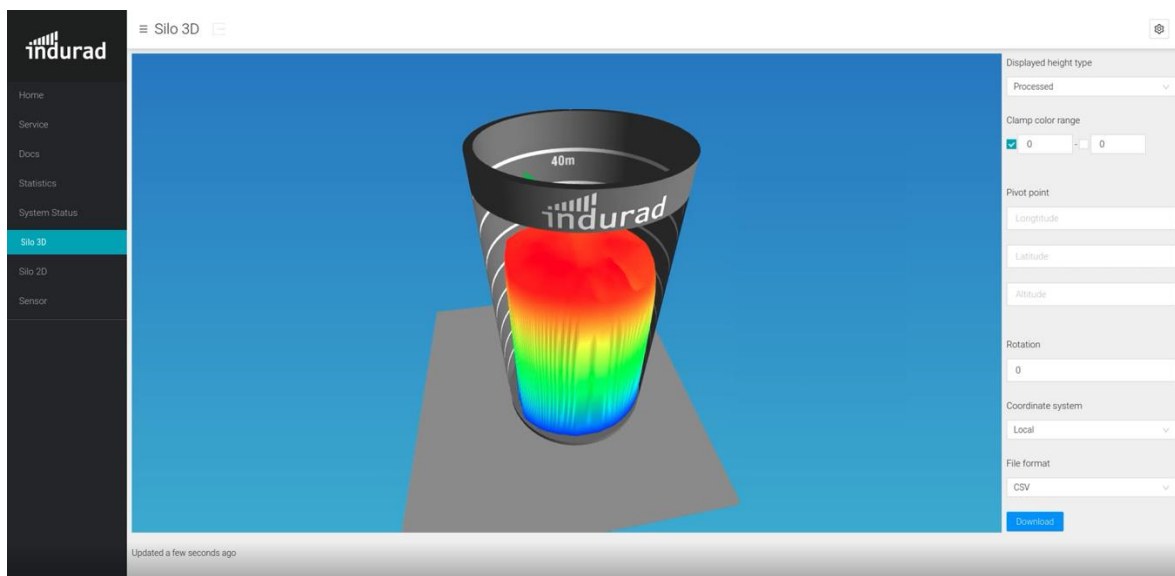


Bild 1: indurad HMI Web-Visualisierung

Das iWEB verfügt über SCADA-ähnliche Funktionen in Bezug auf die Visualisierung, ist jedoch vollständig in die indurad Recheneinheit (iRPU) selbst als Intranet-Webserver für einfachen Browser-Zugriff integriert. Der Zugriff erfolgt über Ethernet/LAN und kann vollständig in das Anlagennetzwerk integriert werden. Für den Zugriff auf die iWEB-Benutzeroberfläche wird lediglich ein PC, ein Laptop oder ein industrieller Touchscreen

benötigt, der über das Netzwerk mit der iRPU verbunden und mit einem Standardbrowser (z. B. Chrome, Edge, Firefox etc.) ausgestattet ist.

2.5 Erweiterte 3D-Funktionen der indurad-Lösung

Mithilfe der hochauflösenden 3D-Radare und der adaptiven Software ist es möglich, neben der hochgenauen Volumina-Bestimmung mögliche Effekte wie „Anbackungen“ zu erkennen. Diese können zum einen ab einem bestimmten Schwellwert in der Visualisierung erkannt werden, jedoch auch als spezifische Volumina ausgegeben werden. Die Erkennung solcher Effekte hat den Vorteil, eine Wartung der Silos dementsprechend einzuplanen und besser mit dem tatsächlichen nutzbaren Volumen planen zu können.

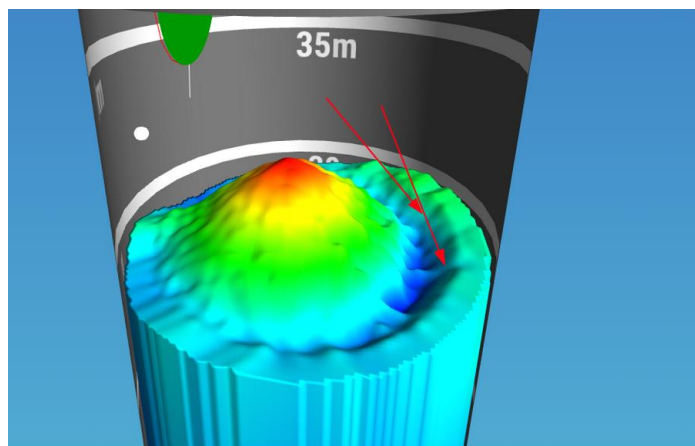


Bild 2: Erkennung von Materialanbackungen in Silos

Zusätzlich können über weitere Sensorik andere Effekte wie Brückenbildung festgestellt werden (Bild 2) und ein Signal an die SPS übermittelt werden, um die bestehende Problematik zu lösen.

3 Anwendungsfälle der indurad Lösung

Im Folgenden werden verschiedene reale Problematiken vorgestellt und die angewandte indurad-Lösung.

3.1 Hochtemperaturanwendung im Klinker-Bereich

In einem Zementwerk in Griechenland ist es von entscheidender Bedeutung, dass der Werksleiter rund um die Uhr über genaue Informationen zum Füllstand verfügt, um die richtigen Entscheidungen treffen zu können. Das Klinkersilo fungiert als Lager- und Pufferbereich zwischen dem Ofen und der Mühle. Daher ist es wichtig, sowohl die verfügbare Kapazität als auch den Restbestand zu kennen, um eine reibungslose Steuerung der vor- und nachgelagerten Produktion sicherzustellen. Die indurad-iSilo-Lösung stellt dem Kunden jederzeit diese Informationen zur Verfügung. Darüber hinaus ermöglicht die Lösung die Sichtbarkeit des aktuellen Totbestands im Silo, der zur Berechnung der aktuellen verfügbaren Kapazität und zur Umsetzung von Korrekturmaßnahmen wie beispielsweise der Wandreinigung genutzt werden kann. Die

Indurad-Radarlösung überwindet die Grenzen anderer Technologien, indem sie in Umgebungen mit hohen Temperaturen über 100°C, staubiger Umgebung und Feuchtigkeit im Material scannen kann. Der Sensor erfordert keine regelmäßige Reinigung oder Neukalibrierung.

3.2 Volumetrische Erfassung von Aluminiumpulver

Der vorliegende Fall bezieht sich auf ein Aluminiumwerk in Island, das Aluminiumoxid zur Beschickung der Produktionsanlage von weit entfernten Lieferanten aus der ganzen Welt per Schiff erhält. Um die Produktionsausbeute zu maximieren, ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Silo nahezu leer ist, wenn ein Schiff eintrifft, um die größtmögliche Lieferung aufnehmen zu können, ohne die Produktionsprozesse zu unterbrechen. Eine genaue Kenntnis des Materialvolumens in den Silos ist daher unerlässlich, um in einer Umgebung mit langen Vorlaufzeiten optimale Dispositionsentscheidungen treffen zu können.

Der Kunde wurde auch beim Entladen des Schiffs mit betrieblichen Herausforderungen konfrontiert, da keine Informationen zur individuellen Anpassung der 17 Füllstellen des Silos zur Verfügung standen. Das geladene Material war manchmal ungleichmäßig verteilt. Um die ungleichmäßige Verteilung zu korrigieren, konnten die Bediener den Ladevorgang nur verlangsamen, um das Material nach unten rutschen zu lassen und eine gleichmäßigere Verteilung zu erreichen. Durch die Beobachtung dieses Effekts während des Schiffsentladevorgangs waren die Bediener in der Lage, verschiedene Gruppen von Befüllungspunkten anzupassen, um eine gleichmäßigere Befüllung zu gewährleisten. Dies führte zu einer Reduzierung ungeplanter und kostspieliger Liegezeiten.

4 Wirtschaftliche Vorteile einer präzisen Volumina-Erfassung

Die genaue Messung von Silos für Schüttgüter bietet eine Vielzahl von wirtschaftlichen Vorteilen. Einer davon ist die effiziente Lagerverwaltung. Durch die präzise Bestimmung des Füllstands im Silo können Unternehmen ihren Lagerbestand besser verwalten und die Nachbestellung von Schüttgut optimieren. Dies hilft, Engpässe oder Überfüllungen zu vermeiden und die Lagerkapazität effizient zu nutzen.

Ein weiterer Vorteil ist die Reduzierung von Betriebsunterbrechungen. Mit einer genauen Silomessung können Unternehmen den Füllstand genau überwachen und rechtzeitig Maßnahmen ergreifen, um eine Überfüllung oder eine zu niedrige Füllmenge zu verhindern. Dies vermeidet Produktionsausfälle und gewährleistet die Betriebskontinuität.

Die Kostenoptimierung ist ein weiterer wichtiger Aspekt. Durch eine genaue Silomessung können Unternehmen den Verbrauch von Schüttgut besser kontrollieren und unnötige Verschwendung vermeiden. Dies führt zu einer Reduzierung der Kosten für den Schüttgutverbrauch und verbessert die Rentabilität.

Die Sicherheit wird durch eine genaue Silomessung ebenfalls verbessert. Potenzielle Risiken wie Überfüllung oder unzureichende Füllmenge können erkannt und vermieden werden, was das Risiko von Unfällen oder Schäden an den Silos reduziert und für eine sicherere Arbeitsumgebung sorgt.

Schließlich trägt eine genaue Silomessung zur Kundenzufriedenheit bei. Unternehmen können ihre Kunden besser bedienen, indem sie Schüttgut zuverlässig in der richtigen Menge und zum richtigen Zeitpunkt liefern. Dies steigert die Kundenzufriedenheit und hilft, langfristige Kundenbeziehungen aufzubauen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine genaue Silomessung zu einer verbesserten Effizienz, Kostenoptimierung, Sicherheit und Kundenzufriedenheit führt. Diese trägt zur Steigerung der Rentabilität und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen bei.

Zusammenfassung

Der Stand der Technik in der Silomesstechnik hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt. Früher wurden Silos manuell überwacht, aber heute werden immer häufiger automatische Messsysteme eingesetzt, die den Füllstand kontinuierlich überwachen und Echtzeitdaten liefern.

Es gibt verschiedene Messtechniken für die Füllstandsmessung in Silos. Zu den gängigsten 1D-Messtechnologien gehören Ultraschall, Radar und kapazitive Messungen. Diese Technologien bieten jeweils Vor- und Nachteile und eignen sich für unterschiedliche Anwendungen und Silotypen.

Für die 2D-Messtechnik werden Laser, Kamerasysteme, Mikrowellenmessungen und akustische Messungen eingesetzt. Diese Technologien ermöglichen eine genauere Erfassung der Füllstandsoberfläche und bieten ebenfalls Vor- und Nachteile für verschiedene Anwendungen und Schüttguttypen.

Darüber hinaus gibt es 3D-Messtechniken wie Laserscanning, Bildverarbeitung, Time-of-Flight-Sensorik und akustische Messungen. Diese ermöglichen eine präzisere Erfassung des Volumens und bieten erweiterte Funktionen zur Erkennung von Effekten wie Anbackungen oder Brückenbildung.

indurad bietet Radarlösungen für Silos an, die präzise und zuverlässige Bestandskontrollen ermöglichen. Ihre iSilo-Lösung kann für verschiedene Schüttgüter eingesetzt werden und bietet 1D-, 2D- und 3D-Messtechniken mit adaptiver Software und einer benutzerfreundlichen HMI-Schnittstelle.

Die Anwendungsfälle für die indurad-Lösung umfassen Hochtemperaturanwendungen im Klinkerbereich, die volumetrische Erfassung von Aluminiumpulver und weitere Szenarien, bei denen eine genaue Kenntnis des Füllstands entscheidend ist, um optimale Entscheidungen zu treffen und betriebliche Herausforderungen zu bewältigen.

Eine präzise Silomessung bietet wirtschaftliche Vorteile wie effiziente Lagerverwaltung, Reduzierung von Betriebsunterbrechungen, Kostenoptimierung, verbesserte Sicherheit und Kundenzufriedenheit.

Insgesamt trägt eine genaue Silomessung zur Steigerung der Rentabilität und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen bei, indem sie Effizienz, Kostenoptimierung, Sicherheit und Kundenzufriedenheit verbessert.

Quellenverzeichnis:

- [1] Emerson Automation Solutions: Advances in Silo Level Measurement Technology. Verfügbar unter: <https://www.emerson.com/documents/automation/advances-in-silo-level-measurement-technology-en-107442.pdf>
- [2] Siemens: Ultrasonic Level Measurement in Silos. Verfügbar unter: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/level-measurement/ultrasonic-level-measurement-in-silos.html>
- [3] Endress+Hauser: Capacitive Level Measurement in Silos. Verfügbar unter: <https://www.endress.com/en/field-instruments-overview/level-measurement/capacitance-level-measurement-in-silos>
- [4] BinMaster: Wireless Silo Level Monitoring Systems. Verfügbar unter: <https://www.binmaster.com/news/press-releases/wireless-silo-level-monitoring-systems>
- [5] VEGA: State-of-the-Art Silo Level Measurement. Verfügbar unter: https://www.vega.com/en/home_de/branchen/chemie/loesungen/silolevelmessung



Richtlinien zur Schüttgut-Fördertechnik

VDI 2320	Übersichtsblätter Stetigförderer; Trogkettenförderer
VDI 2322	Auslegung und Errichtung von Gurtförderern für Schüttgut
VDI 2324	Senkrecht-Becherwerke
VDI 2329	Pneumatische Förderanlagen; Grundlagen, Anlagen, Baugruppen
VDI 2330 Blatt 1	Schneckenförderer für Schüttgut; Allgemeine Beschreibung
VDI 2330 Blatt 2	Schneckenförderer für Schüttgut; Auslegung von horizontalen, leicht geneigten Schneckenförderern
VDI 2330 Blatt 3	Schneckenförderer für Schüttgut; Auslegung von vertikalen Schneckenförderern
VDI 2330 Blatt 4	Schneckenförderer für Schüttgut; Auslegung von stark geneigten Schneckenförderern
VDI 2333	Schwingförderer für Schüttgut
VDI 2341	Gurtförderer für Schüttgut; Tragrollen und Tragrollenabstände
VDI 2694	Bunker und Silos; Beschickung, Lagerung und Austragung von Schüttgut
VDI 3602 Blatt 1	Gurtförderer für Schüttgut; Antriebe, Bauarten
VDI 3602 Blatt 2	Gurtförderer für Schüttgut; Antriebe, Betriebsweise
VDI 3603	Gurtförderer für Schüttgut - Spann-, Ablenk- und Umkehrstationen
VDI 3604	Gurtförderer für Schüttgut; Übergabeeinrichtungen
VDI 3605	Gurtförderer für Schüttgut; Reinigungseinrichtungen
VDI 3606	Gurtförderer für Schüttgut; Förderstrecke
VDI 3607	Gurtförderer für Schüttgut; Maßnahmen zur Überwachung der Funktionstüchtigkeit
VDI 3608	Gurtförderer für Schüttgut; Fördergurt
VDI 3622	Gurtförderer für Schüttgut - Gurttrommeln
VDI 3623	Metallabscheider in Gurtförderern und Schüttguttransportanlagen
VDI 3671	Pneumatische Förderanlagen; Empfehlungen zu Anforderungen und Eigenschaften
VDI 3970	Leitfaden für die Aufstellung eines Instandhaltungsplans für Stetigförderer
VDI 3971	Mechanische Steil- und Senkrechtförderer für Schüttgut; Bauarten und Auswahl
VDI 3972	Lagerplätze für Schüttgut; Verfahren und stetige Fördereinrichtungen
VDI 4435	Kurvengängige Gurtförderer für Schüttgut; Bauarten und Auswahl
VDI 4436	Messen von Massen- und Volumenströmen in der Schüttgut-Fördertechnik
VDI 4437	Plattenbandförderer für Schüttgut; Übersichtsblätter Stetigförderer
VDI 4438	Schlauchgurtförderer; Auslegungskriterien, Berechnung und Sicherheitshinweise
VDI 4439	Förderung, Umschlag und Lagerung von Schüttgütern; Vermeidung, Verringerung von Staubemissionen
VDI 4456	Gurtförderer für Schüttgut; Bandanlagen-Bewertungsanalyse (BBA) zur Effizienzsteigerung in der Fördertechnik
VDI 4459	Gestaltung energieeffizienter Muldengurtförderer
VDI 4473	Abrasionsverschleißprüfstand für Komponenten von Schüttgutförderanlagen; Verschleißstopfverfahren
VDI 5022 (NEU)	Auslegung und Betrieb von Gurtförderern bei tiefen Temperaturen
VDI XXXX (NEU)	Überwachungseinrichtungen

erhältlich unter www.beuth.de

erarbeitet vom VDI GPL FA 307

Stand: Februar 2023

betreut von Dr.-Ing. Thomas Sowa
sowa@vdi.de

www.ilm.ovgu.de/schuettgut

Institut für Logistik und Materialflusstechnik
Fakultät für Maschinenbau
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg



39106 Magdeburg
Universitätsplatz 2
Gruson Gebäude (Geb. 10)

Telefon: 0391 - 67 58604
Telefax: 0391 - 67 42646
ilm@ovgu.de

ISBN-13: 978-3-948749-29-3