

Theory and Practical Experience of a Digital Twin for Optimal Operation and Maintenance of Belt Conveyors

A large part of the bulk material transport in mining is carried out by belt conveyors. This will increase in the future. The correct design, operation and maintenance are of decisive importance for their economic operation. Recent developments such as the use

of a digital twin of the conveyor can make a significant contribution here. This article is intended to present the theory and operational practice of the digital twin "BeltGenius" for conveyor systems developed by J. M. Voith SE & Co. KG, Crailsheim/Germany.

Theorie und Praxis eines Digitalen Zwillings für optimalen Betrieb und Instandhaltung von Bandanlagen

Ein Großteil des Schüttguttransports im Bergbau erfolgt über Gurtförderer. Dies wird in Zukunft zunehmen. Für ihren wirtschaftlichen Betrieb sind die richtige Auslegung, Bedienung und Wartung von entscheidender Bedeutung. Neuere Entwicklungen wie der Einsatz eines digitalen Zwillings der Bandanlage können hier einen

wesentlichen Beitrag leisten. Dieser Artikel soll die Theorie und betriebliche Praxis des von der J. M. Voith SE & Co. KG, Crailsheim, entwickelten digitalen Zwillings „BeltGenius“ für Förderanlagen vorstellen.

1 Introduction

A large part of the bulk material transport in mining is carried out by belt conveyors. This will increase in the future. The correct design, operation and maintenance are of decisive importance for their economic operation. Recent developments such as the use of a digital twin of the conveyor can make a significant contribution here. Since the term "digital twin" has almost become an inflationary buzzword that everyone understands differently, this article is intended to present the theory and operational practice of the digital twin "BeltGenius" for conveyor systems developed by J. M. Voith SE & Co. KG, Crailsheim/Germany.

2 Basics of the calculation model

2.1 Analytical calculation of the main resistance

The core of the digital twin is a mathematical simulation of the belt conveyor, comparable to the relevant calculation programs with which belt conveyors are usually designed. These calculation programs are based on formulas that supply the local movement resistances along the course of the belt depending on the respective operating parameters (1, 2).

The digital twin differs from conventional calculation programs as follows:

1. While the belt conveyor calculation programs are used "offline" for various operating states and loads as required, the digital

1 Einleitung

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

2 Grundlagen des Rechenmodells

2.1 Rundrechnung mit analytischer Berechnung des Hauptwiderstands

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

Der Digitale Zwillings unterscheidet sich gegenüber herkömmlichen Berechnungsprogrammen wie folgt:

- twin is operated with real operating data over longer periods of time – either offline with historical operating data or online parallel to ongoing operation.
2. While the belt conveyor calculation programs work with empirical values for previously unknown values of the parameters in the calculation formulas, with the digital twin the parameters are automatically determined from the comparison between calculated and measured drive power using optimization processes.
 3. Due to the high quality of the simulation, the digital twin allows quantitative statements on the load on all components and the evaluation of the components with regard to the load collectives achieved and their share of the energy consumption.
 4. The digital twin provides information on the optimal operation of the system, evaluations of the energy efficiency achieved in operational practice and detects deviations resulting from physical changes to the system.

The digital twins of different providers differ in the complexity and accuracy of the mathematical replica. J. M. Voith SE & Co. KG, Crailsheim/Germany, sees the advantage of its model in the analytical simulation of the main resistance in contrast to the virtual friction coefficient that is otherwise commonly used (1). Its analytical model is based on many operational measurements and includes the influence of the local belt tensile force on the material flexing, the specific properties of the belts on the rubber flexing, and the ambient temperature on the heating of the belts and the associated change in the movement resistance.

2.2 Allocation of the load

Since the lifting work has a significant influence on the power requirement – in terms of energy, 1 m lift corresponds to about 50 m horizontal transport – and a belt conveyor has always inclined sections (Figure 1), the movement resistances are very different in the individual sections of the belt conveyor.

Figure 2 shows two different load distributions with the same average load on a belt conveyor with four sections. It goes without saying that in the lower case – despite the same average load – the power requirement is considerably higher than in the upper.

Accordingly, the position of the belt scale must be known for the digital twin and the loading of the upper run must be correctly synchronized with the associated motor power at every point in time.

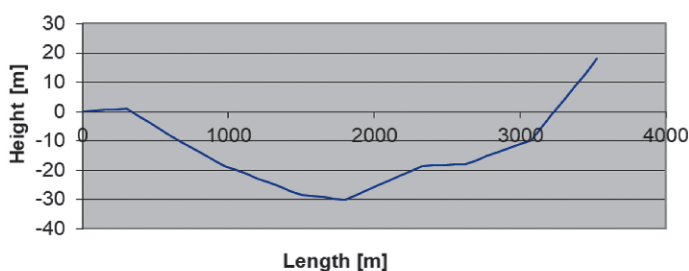


Fig. 1. Elevation of a relatively flat belt conveyor in the Hambach lignite mine. // Bild 1. Höhenverlauf einer relativ shlig verlaufenden Bandanlage im Tagebau Hambach. Source/Quelle: Voith

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

Die Digitalen Zwillinge verschiedener Anbieter unterscheiden sich in der Komplexität und Genauigkeit der mathematischen Nachbildung. Voith sieht den Vorteil seines Modells in der analytischen Nachbildung des Hauptwiderstands im Unterschied zu dem ansonsten allgemein verwendeten fiktiven Reibbeiwert (1). Das analytische Voith-Modell basiert auf vielen Betriebsmessungen und umfasst den Einfluss der örtlichen Gurtzugkraft auf die Materialwlkung, der spezifischen Eigenschaften der Gurte auf die Gummiewlkung sowie der Umgebungstemperatur auf die Erwärmung der Gurte und die damit einhergehende Änderung des Bewegungswiderstands.

2.2 Zuordnung der Beladung

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

In Bild 2 sind beispielhaft zwei unterschiedliche Beladungsverteilungen bei gleicher durchschnittlicher Beladung einer Band-

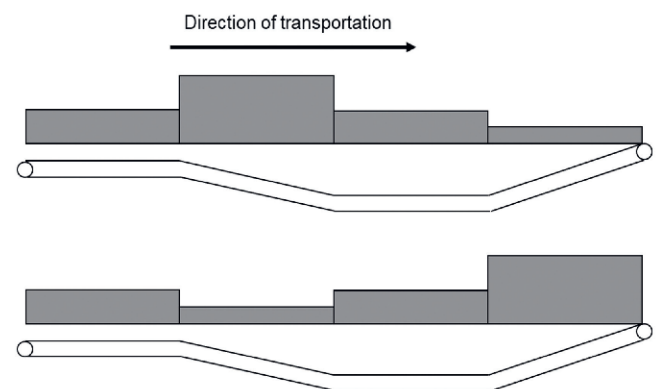


Fig. 2. Non-uniform loading as the cause of fluctuating power demand. Bild 2. Ungleichförmige Beladung als Ursache schwankenden Leistungsbedarfs. Source/Quelle: Voith

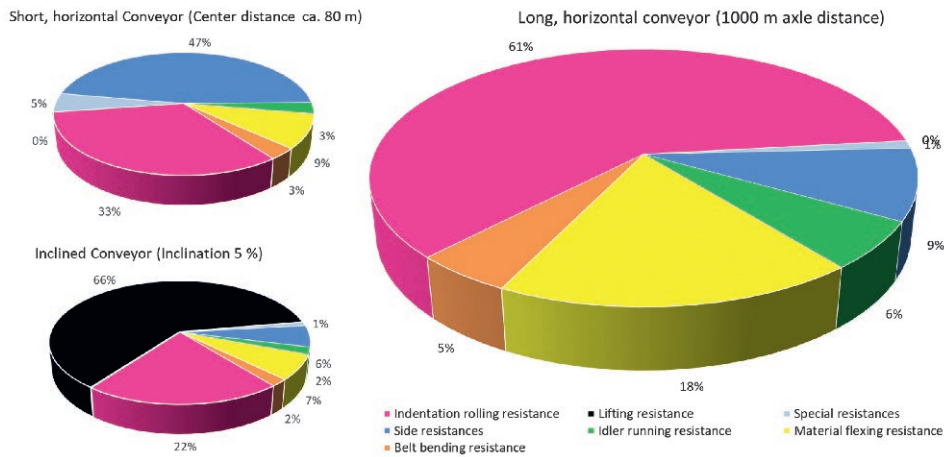


Fig. 3. Distribution of the moving resistance for long, horizontal belt conveyors according to Hintz (3).
Bild 3. Aufteilung des Bewegungswiderstands für lange, horizontal geführte Anlagen nach Hintz (3).

2.3 Consideration of different belts

The belts have the greatest influence on the moving resistance of a belt conveyor due to the internal damping against the deformation of the rubber (indentation rolling resistance and belt bending resistance) (Figure 3).

If belts from different manufacturers and production batches are used in the same belt conveyor, they can differ significantly in terms of their load-dependent moving resistance (Figure 4). In these cases – similar to the loading – the accuracy of the simulation depends on the position of the individual belts with their respective loading being known at all times. For this purpose, an RFID-based detection system was developed for BeltGenius, which records the start of each belt when it passes an antenna and synchronizes it with the load.

2.4 Setting up and initializing the digital twin

At the beginning, a structural data set of the belt conveyor is created, which contains the height of the belt along the conveyor, the position of the pulleys, drives, loading and unloading point, belt scale, tensioning device and the sensors for speed, belt tension measurement and belt detection as well as technical data of the main components. In principle all the information that is also required for a classical belt conveyor calculation.

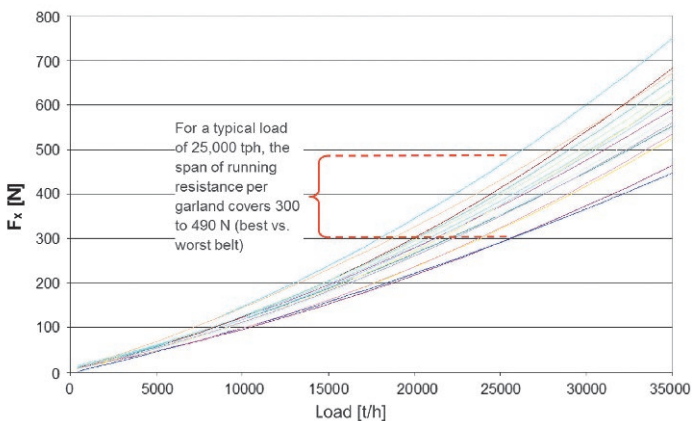


Fig. 4. Comparison of the moving resistance of different belts (B2800 St 4500 16:8, $v=7.5$ m/s) (4). // Bild 4. Vergleich des Bewegungswiderstands verschiedener Gurte (B2800 St 4500 16:8, $v=7,5$ m/s) (4).

anlage mit vier Abschnitten dargestellt. Es ist einsichtig, dass im unteren Fall – trotz gleicher Durchschnittsbelastung – der Leistungsbedarf erheblich höher ist als im oberen.

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

2.3 Berücksichtigung unterschiedlicher Gurte

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

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

2.4 Aufstellung und Initialisierung des Digitalen Zwillings

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

Die Initialisierung, d. h. die Bestimmung der Parameter zur exakten Beschreibung des Betriebsverhaltens, erfolgt anhand mehrerer Zeitabschnitte, die möglichst alle im Betrieb vorkommenden Beladungszustände und Umgebungstemperaturen umfassen. Durch ein mehrstufiges Optimierungsverfahren wird dann der Startparametersatz variiert, bis eine vorgegebene Iterations-schranke unterschritten wird. Die Zielfunktion für diesen Optimierungslauf ist die Fehlerquadratsumme QS aus der Differenz

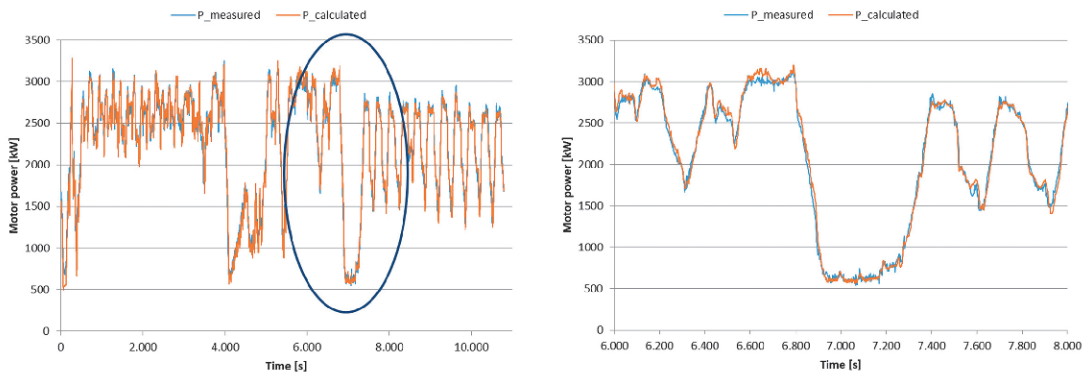


Fig. 5. Comparison of motor power between measurement and calculation.
Bild 5. Vergleich der Motorleistung zwischen Messung und Rechnung.
Source/Quelle: Voith

The initialization, i.e. the determination of the parameters for the exact description of the operating behavior, takes place on the basis of several time periods, which as far as possible include all load states and ambient temperatures occurring during operation. The start parameter set is then varied by a multi-stage optimization process until a specified iteration limit is achieved. The target function for this optimization run is the least squares sum Q_S from the difference between the calculated and measured motor power over all measuring points according to the following formula:

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

3 Examples of evaluations

3.1 Achieved precision

Figure 5 shows the reproduction quality for a belt conveyor in the Garzweiler open pit mine (nominal capacity 37,500 t/h, $v = 7.5$ m/s, B 2700 St 4500 16:8, motor power 2 x 2,000 kW, 850 m center distance).

3.2 Assessment of the energy efficiency of the belts used

Most belt conveyors are equipped with the belts from a single manufacturer, which is why the individual belt sections differ significantly less in terms of energy efficiency than shown in figure 4. The high level of replication accuracy in figure 5 required the specific properties of the individual belts to be taken into account. This is possible with BeltGenius if a belt detection system is used. In these cases, the respective parameters are also determined for each belt by an automatic optimization process. Figure 6 shows the determined energy efficiency of the ten belt sections from the example above. It should be noted that compared to the results from 2009 shown in figure 4, significant improvements in the energy consumption of the belts can already be seen.

With the digital twin, very precise forecasts can be made as to how the belt conveyor would behave under different operating conditions. It is possible, e.g., to calculate what the energy consumption would be if other belts were used. For the system considered here, the time range shown in figure 5 with regard to energy consumption was determined for the following three variants:

1. current status: existing mix of ten different belts;
2. best-case scenario: exclusive use of the best of the ten belts;
3. worst-case scenario: exclusive use of the worst of the ten belts.

zwischen berechneter und gemessener Motorleistung über alle Messpunkte gemäß folgender Formel:

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

3 Beispiele für Auswertungen

3.1 Erzielte Genauigkeit

Bild 5 zeigt die Nachbildungsgüte für eine Bandanlage im Tagebau Garzweiler (Nennförderleistung 37.500 t/h, $v = 7.5$ m/s, B 2700 St 4500 16:8, Motorleistung 2 x 2.000 kW, 850 m Achsabstand).

3.2 Beurteilung der Energieeffizienz der eingesetzten Gurte

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

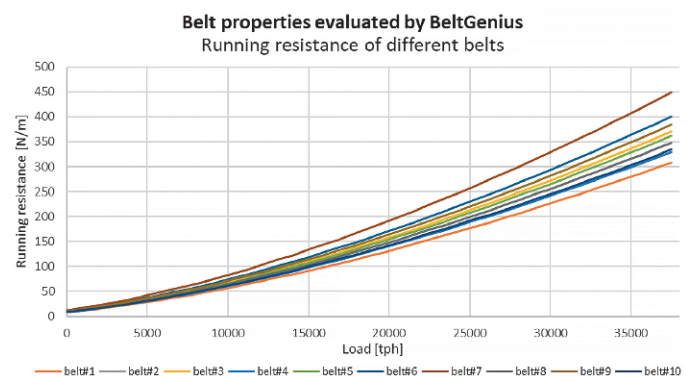


Fig. 6. Resistance to movement of the belts in the belt system from Chapter 3.1. // Bild 6. Bewegungswiderstände der Gurte in der Bandanlage aus Kap. 3.1. Source/Quelle: Voith

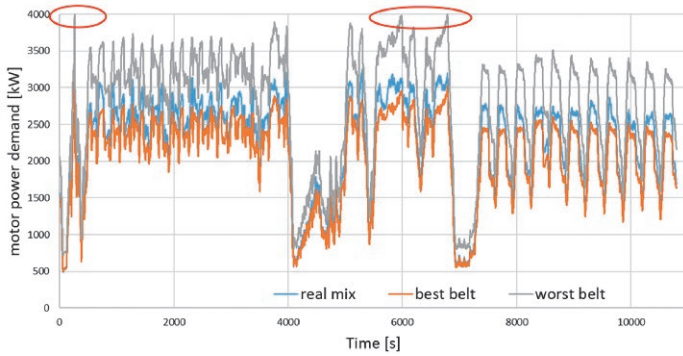


Fig. 7. Variant analysis of the energy consumption when using different belts. // Bild 7. Variantenbetrachtung des Energieverbrauchs beim Einsatz unterschiedlicher Gurte. Source/Quelle: Voith

The results are as follows (Figure 7):

- With the actually installed combination of ten belts, the energy consumption is 6,733 kWh or 115 Wh/(t*km).
- If only the best of these belts were installed, the energy consumption would be 6,195 kWh or 105 Wh/(t*km).
- The worst belt, on the other hand, would drive the power consumption to 8,328 kWh or 142 Wh/(t*km) and pushes the installed capacity to its limits.

It should be noted that these results include 1,683 kWh of energy consumption, which cannot be influenced by the belts.

3.3 Evaluations regarding system utilization and energy consumption

BeltGenius offers a number of very useful overviews showing utilization and specific energy consumption of different time periods can be seen. One time range is the operating time of the conveyor system from start-up to shutdown. Figures 8 to 11 show this as an example for a Chilean copper mine over the period of one year.

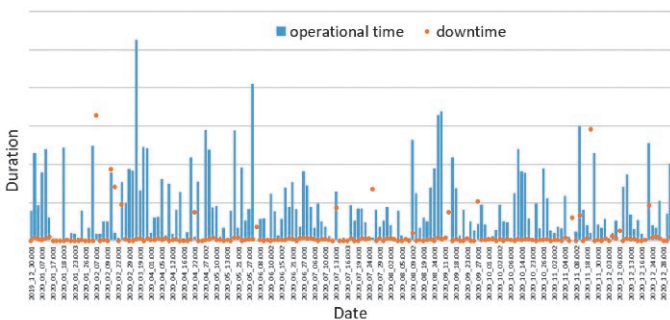
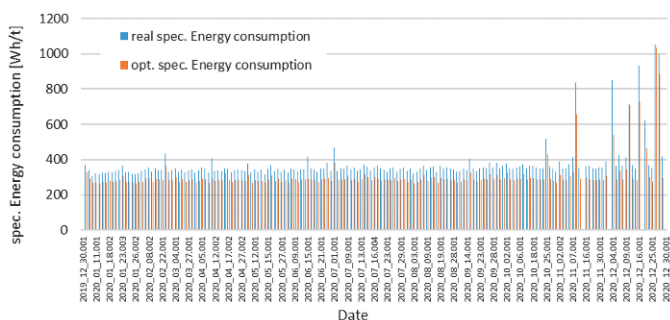


Fig. 8. Operating time and idle time between the individual time periods. Bild 8. Betriebs- und Stillstandszeit zwischen den einzelnen Zeitbereichen. Source/Quelle: Voith



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

1. Ist-Zustand: Vorhandener Mix aus zehn unterschiedlichen Gurten,
2. Best-case-scenario: Ausschließliche Verwendung des besten der zehn Gurte,
3. Worst-case-scenario: Ausschließliche Verwendung des schlechtesten der zehn Gurte.

Ergebnis (Bild 7):

- Bei der tatsächlich verbauten Kombination aus zehn Gurten beträgt der Energieverbrauch 6.733 kWh bzw. 115 Wh/(t*km).
- Würde nur der beste dieser Gurte verbaut, läge der Energieverbrauch bei 6.195 kWh bzw. 105 Wh/(t*km).
- Der schlechteste Gurt hingegen würde den Stromverbrauch auf 8.328 kWh oder 142 Wh/(t*km) treiben – und die installierte Leistung an ihre Grenzen bringen.

Hierbei ist zu beachten, dass diese Ergebnisse 1.683 kWh Energieverbrauch beinhalten, der nicht durch die Gurte beeinflusst werden kann.

3.3 Auswertungen bezüglich Anlagenausnutzung und Energieverbrauch

BeltGenius bietet eine Reihe sehr nützlicher Übersichtsdarstellungen, aus denen Ausnutzung und spezifischer Energieverbrauch verschiedener Zeitbereiche zu erkennen sind. Ein Zeitbereich ist die Betriebszeit der Bandanlage vom Anfahren bis zum Stillsetzen. Die Bilder 8 bis 11 zeigen dies beispielhaft für ein chilenisches Kupferbergwerk über den Zeitraum eines Jahres.

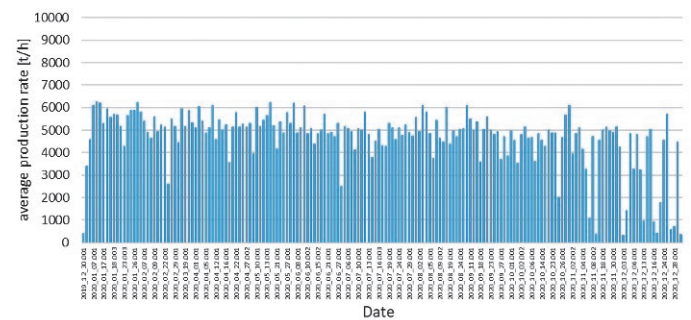


Fig. 9. Average conveying capacity achieved in the individual time periods. Bild 9. Durchschnittlich erzielte Förderleistung in den einzelnen Zeitbereichen. Source/Quelle: Voith

Fig. 10. Real specific energy consumption per tonne of conveyed material in comparison to an equally high but constant conveying capacity. Bild 10. Realer spezifischer Energieverbrauch je Tonne gefördertes Material im Vergleich zu einer gleich hohen, aber gleichmäßigen Förderleistung. Source/Quelle: Voith

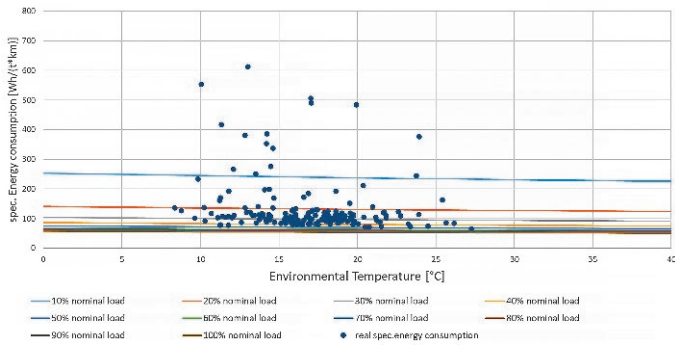


Fig. 11. “Theoretical specific energy consumption as a function of the ambient temperature for different conveying capacities” and real achieved specific energy consumption per tonne and kilometer of transport performance.
 Bild 11. Kennfeld „Theoretischer spezifischer Energieverbrauch als Funktion der Umgebungstemperatur für verschiedene Förderleistungen“ und real erzielte spezifische Energieverbräuche pro Tonne und Kilometer Transportleistung.
 Source/Quelle: Voith

3.4 Specific calculation results for individual time periods

With the currently valid set of structure and status parameters, a number of parameters are calculated for each time period and stored in topic-specific files, from which the desired visualizations are generated. Figure 12 shows some examples of this.

3.4 Spezifische Berechnungsergebnisse für einzelne Zeitbereiche

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

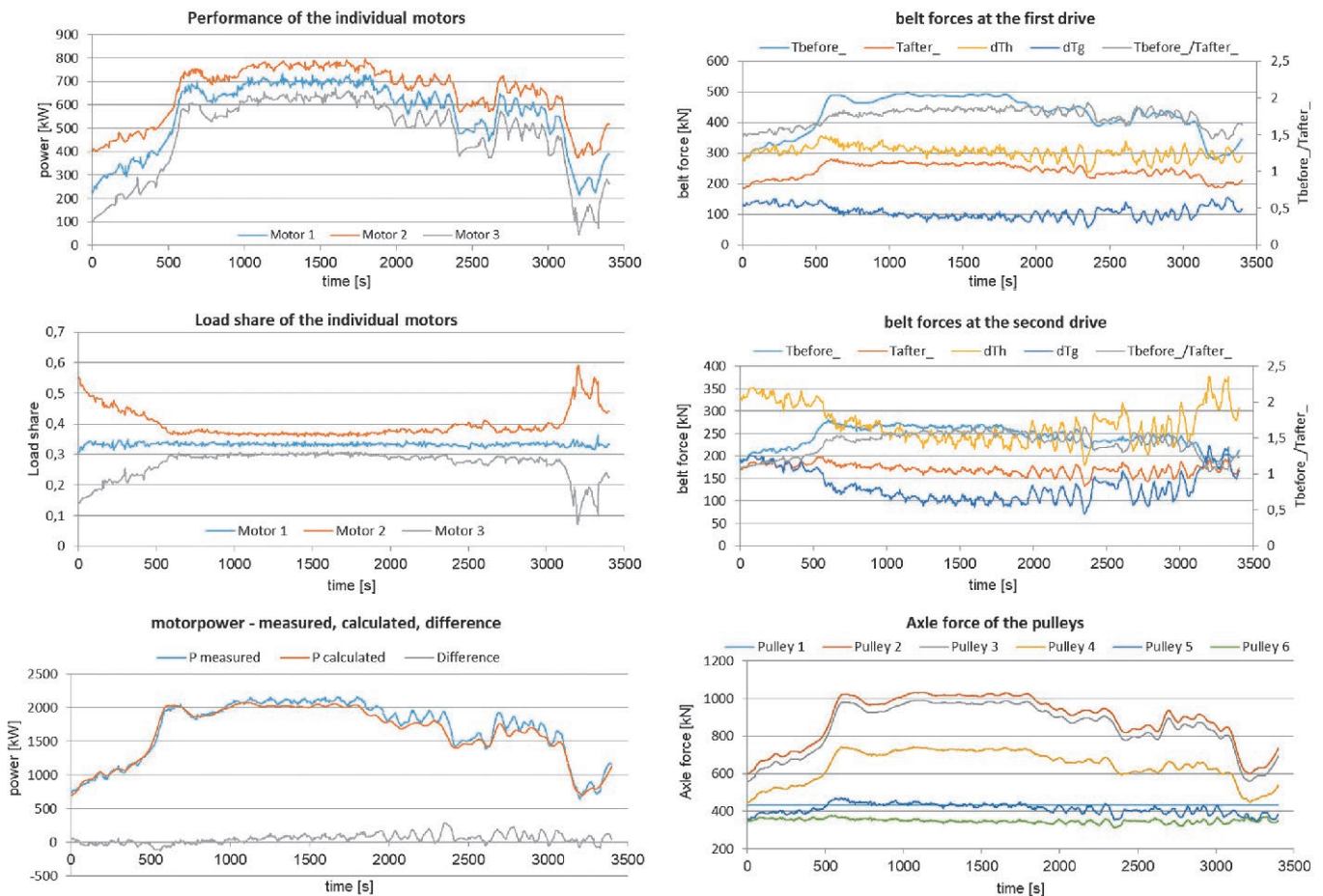


Fig. 12. Examples of individual evaluations of a time range. // Bild 12. Beispiele individueller Auswertungen eines Zeitbereichs. Source/Quelle: Voith

3.5 Lifetime estimation of components

For most components, there is currently no operational load measurement available or not used for economic reasons. The only evaluation criterion is often the installation time. However, BeltGenius can seamlessly record the relevant forces or moments as well as paths and angles of rotation for all moving parts. If the relationship between stress and service life consumption is known, service

3.5 Lebensdauerabschätzung der Komponenten

Für die meisten Komponenten ist derzeit keine Betriebslastfassung verfügbar oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht eingesetzt. Einziges Beurteilungskriterium ist oft die Einbauzeit. BeltGenius kann jedoch für alle beweglichen Teile die relevanten Kräfte oder Momente sowie Wege und Drehwinkel lückenlos erfassen. Ist der Zusammenhang zwischen Beanspruchung und

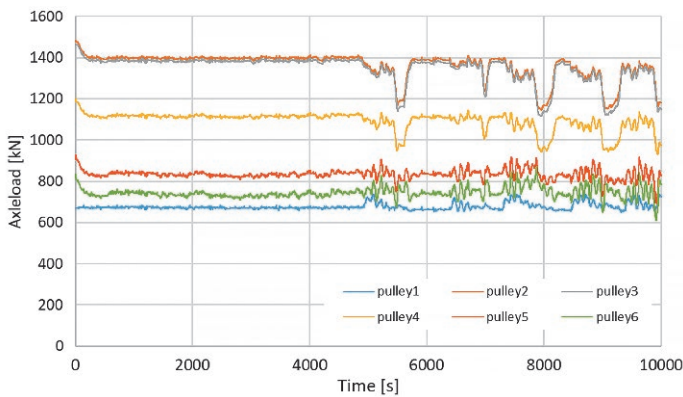


Fig. 13. Axle loads of the six pulleys for a period of 10,000 s.
Bild 13. Achslasten der sechs Trommeln für einen Zeitbereich von 10.000 s. Source/Quelle: Voith

life forecasts can be automatically generated from this. In most cases, however, this relationship is not known in advance or only under operating conditions that are significantly different from the current ones. Since such predictions are of great economic importance, it makes sense to look for the respective connections for the various components. In addition to the date of installation and removal of the components, a record of all possible influencing factors is required in order to find a correlation between different calculation approaches and the real operating times achieved.

The evaluation of the roller bearings of the six pulleys according to (5) is presented here as a simple example of a theoretical service life estimation with BeltGenius. Figure 13 shows the course of the axle loads of these six pulleys for a real-time range of 10,000 s. The calculated service life according to (5) for the respective bearing load (= half axle load) can be calculated for each individual second. The summation of the reciprocal values then results in the lifetime consumption for this time range.

Pulley 2 and 3 have the highest axle loads, but are also fitted with different roller bearings than the other pulleys. Figure 14 shows the percentage of lifetime consumption for those 10,000 s. The bearings of pulley 4 and 5 are practically fatigue-resistant (curves for pulley 4 and 5 are superimposed on the x-axis).

Other possible influencing variables that were not taken into account here but are available as data: Ambient temperature, number of start-ups and standstill times and thus the cooling times. This theoretical calculation could then be improved with the operating times actually achieved. Other components can be viewed in a similar manner. In addition to the belt speed, the radial loads from the belt and loading weight as well as the orthogonal components of the local belt tension are available for the idlers, for the belt connections the changing stress caused by the belt tension, etc.

4 Practical examples of detected deviations and errors

4.1 Coal mine in Australia (underground)

For a coal mine in Australia, a period of ten weeks was analyzed using BeltGenius. The reason for this was persistent problems with intermittent overloads, which led to shutdowns of the fully loaded conveyor. Each of these overload shutdowns led to a longer downtime during which the conveyor had to be partially emptied manually before it could start up again.

Lebensdauerverbrauch bekannt, können daraus automatisch Lebensdauerprognosen generiert werden. In den meisten Fällen ist dieser Zusammenhang jedoch nicht im Voraus bekannt oder nur unter Betriebsbedingungen, die sich deutlich von den aktuellen unterscheiden. Da solche Vorhersagen von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind, ist es sinnvoll, für die verschiedenen Komponenten nach den jeweiligen Zusammenhängen zu suchen. Neben dem Datum des Ein- und Ausbaus der Komponenten benötigt man eine Aufzeichnung aller möglichen Einflussfaktoren, um eine Korrelation zwischen verschiedenen Berechnungsansätzen und den erreichten realen Betriebszeiten zu finden.

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

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

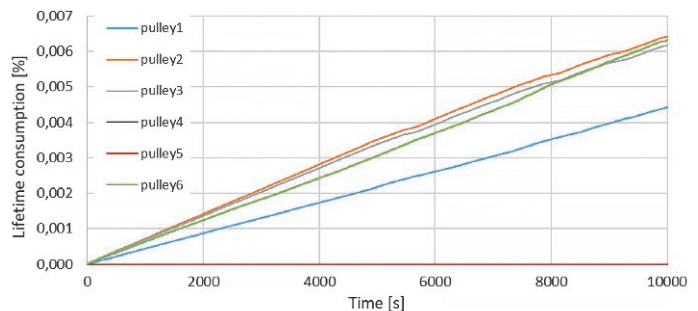


Fig. 14. Theoretical degradation of the service life of the six drums in the considered time range of 10,000 s.
Bild 14. Theoretischer Lebensdauerverzehr der sechs Trommeln im betrachteten Zeitbereich von 10.000 s. Source/Quelle: Voith

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

4 Praxisbeispiele erkannter Abweichungen und Fehler

4.1 Kohlebergwerk in Australien (unter Tage)

Für ein Kohlebergwerk in Australien wurde ein Zeitraum von zehn Wochen mittels BeltGenius analysiert. Anlass waren anhaltende Probleme mit zeitweiser Überlast, die zu Abschaltungen des voll-

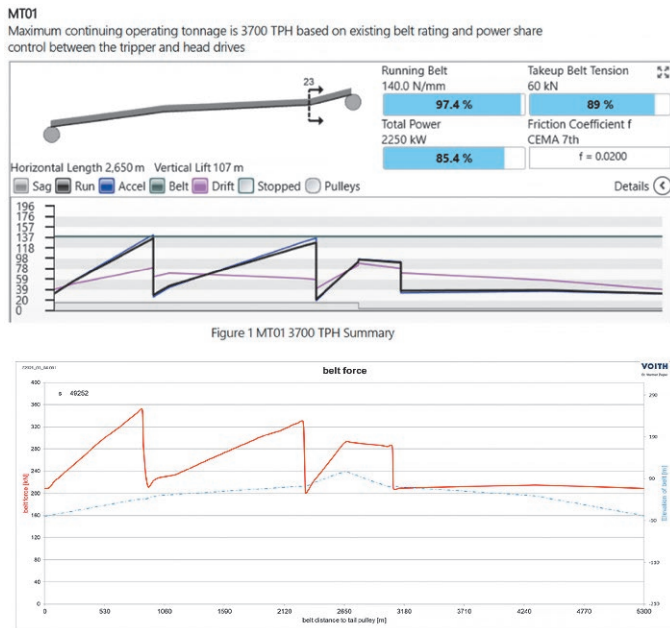


Fig. 15. Comparison of the belt force curve expected according to the expert opinion with the belt force curve calculated by the consultant.
Bild 15. Vergleich vom laut Gutachten erwarteten mit dem vom Consultant errechneten Gurtkraftverlauf. Source/Quelle: Voith

The analysis using BeltGenius revealed errors in the control of the drives and the belt tensioning device. The cause was that the belt tension measuring devices behind the two tripper drives did not supply any measured values when 200 kN was exceeded, which the controller interpreted as too low belt tension, reduced the power on these drives and further increased the belt tension. In addition to the unnecessary overload shutdowns caused by this, a pulley shaft also broke.

Figure 15 shows the comparison of the belt tensile force calculated by a consultant for an even loading of 3,700 t/h in comparison with the calculation by BeltGenius for a real average loading of 2,640 t/h. You can see that with the real (lower) load, the maximum belt tensile force of approximately 360 kN was around 2.6 times the 137 kN calculated by the consultant.

Since BeltGenius can very precisely determine the course of the belt force based on the belt force measured on the tensioning winch, it is possible to dispense with the unreliable belt tension measuring devices behind the two tripper drives.

Figure 16 shows the sometimes very poor power distribution between the five motors (each with a rated power of 440 kW). The control unnecessarily reduces the power of motors 4 and 5, particularly when there is a higher power requirement, which causes the overload shutdowns.

beladenen Förderers führten. Jede dieser Überlastabschaltungen führte zu einem längeren Stillstand, in dem die Anlage teilweise leereschaufelt werden musste, damit sie wieder anfahren konnte.

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

Bild 15 zeigt den Vergleich der von einem Consultant errechneten Gurtzugkraft für eine gleichmäßige Beladung von 3.700 t/h im Vergleich mit der Berechnung von BeltGenius für eine reale Beladung von durchschnittlich 2.640 t/h. Man sieht, dass bei der realen (niedrigeren) Beladung die maximale Gurtzugkraft mit ca. 360 kN rund das 2,6-fache der vom Consultant berechneten 137 kN betrug.

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

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

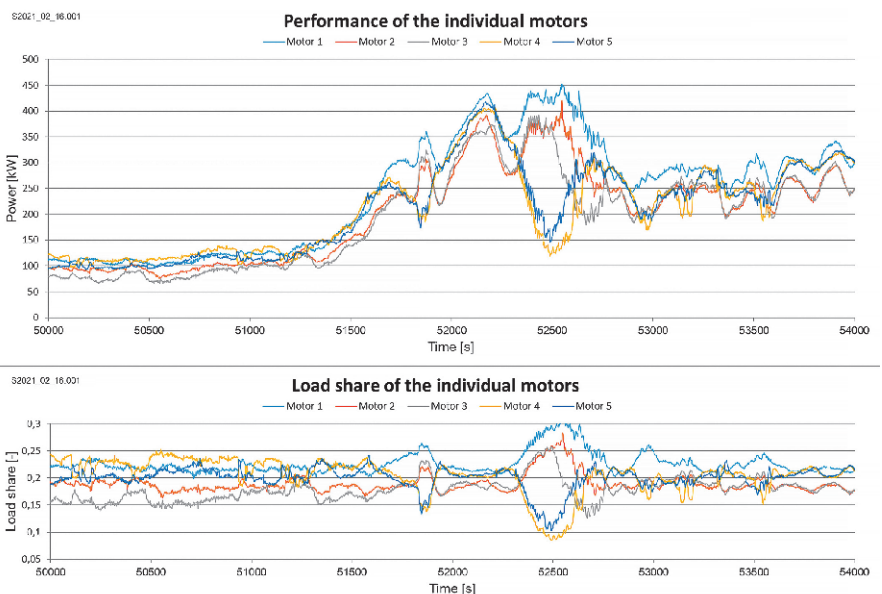


Fig. 16. Power and load distribution of the motors.
Bild 16. Leistungen und Lastaufteilung der Motoren. Source/Quelle: Voith

4.2 Kupfertagebau in Chile

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

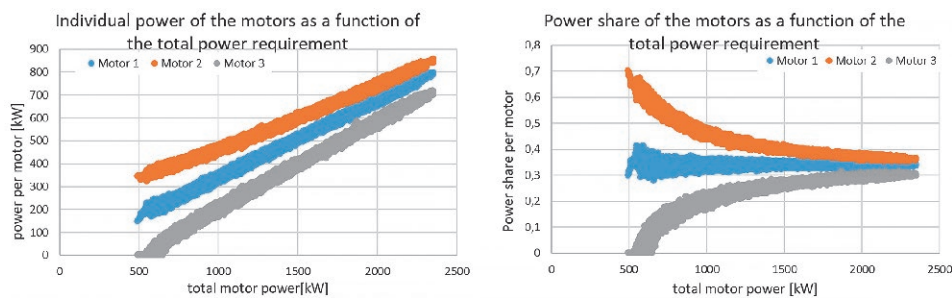


Fig. 17. Individual power and power distribution of the three motors as a function of the total power.
Bild 17. Einzelleistung und Leistungsaufteilung der drei Motoren als Funktion der Gesamtleistung.
Source/Quelle: Voith

4.2 Copper mine in Chile (open pit)

A whole year was evaluated for this copper mine. Of the three most important deviations – temperature-dependent offset error of the belt scales in the range of 5 to 8% of the nominal power, poor power distribution, faulty start-up processes – only the poor power distribution of the three slip-ring motors (3 x 1,250 kW) is explained here (Figure 17).

Especially with a low total power < 600 kW, the contribution of motor 3 is particularly small and is taken over by motor 2. This is disadvantageous for the transmission of drive 3, since too little load leads to damage to the roller bearings. BeltGenius can be used to determine the gradient of the motor characteristics and the effective diameter of the drive pulleys and to simulate measures to improve the power distribution, e. g., specific information on changing the continuous slip resistance.

Incidentally, the analysis of the system with regard to belt safety, motor power and filling cross section showed that an increase in output from the current 7,000 to 9,000 t/h is possible without any problems (Figure 9).

4.3 Copper mine in Chile (underground)

Four weeks of operating time were analyzed here and the following deviations were found:

- Belt scale signal has a time offset that jumps between 0 and 120 s.
- Belt scale signals are temporarily too low by up to 800 t/h.
- The drive control of the direct drives produces vibrations, which explain the premature failure of a drive pulley after only one year of operation.

In particular, the failure of a drive pulley after only one year of operation poses a major problem for the customer, since the cause has not yet been determined and there was uncertainty about the future performance of the system.

BeltGenius gave indications of a very volatile power distribution and oscillations in the drive power. Measurements then initiated found the cause in the unfavorable design of the drive control. Figure 18 shows a section of these measurements for one of the four drive motors (start-up process, empty conveyor system).

5 Summary

The use of a digital twin for belt conveyors, which can be adapted to any belt conveyor with little effort and repro-

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

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

4.3 Kupferbergwerk in Chile (unter Tage)

Hier wurden vier Wochen Betriebszeit analysiert und folgende Abweichungen festgestellt:

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

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

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

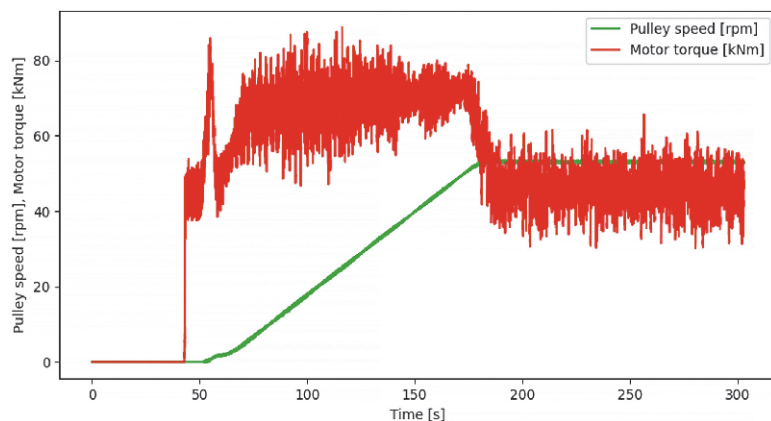


Fig. 18. Vibration excitation by the motor control of the direct drives.
Bild 18. Schwingungsanregung durch die Motorsteuerung der Direktantriebe.
Source/Quelle: Voith

duces them exactly using real measured values – enables a quick overview of the condition, efficiency and utilization of the system. In this way, starting points for improvement can be identified and quantified. This is a significant advancement compared to the usual calculation and simulation tools.

In the fight against climate change, efforts to reduce energy consumption must also be stepped up in mining. Conveyor belt systems are much cheaper in terms of energy consumption compared to the use of trucks and are more economical overall from a transport distance of approximately 3 km. There is still considerable potential for improvement in the design of the belt conveyors and the selection of the components. This can be shown and realized by BeltGenius.

BeltGenius offers an even greater savings potential as an instrument for the optimal operation of the systems. In the example of Chilean opencast copper ore mining discussed here, the average savings potential by avoiding production gaps and correspondingly lower – but more even – production capacity is around 20%. Significantly greater savings would result if a constantly high conveying capacity could be achieved and the operating time would be reduced by the avoided production gaps. That sounds trivial, because every miner always strives for a high output anyway. However, it is much more economical to strive for a constantly high level of utilization instead of trying to make up for gaps in funding and downtimes with temporary peak performance. Here, BeltGenius can show the management the economic effects when making decisions about improving the operational organization.

Another perspective for the use of a digital twin results from the fact that the expertise for optimal operation and maintenance of conveyor systems can be assumed by fewer and fewer operators. A monitoring system for belt conveyors is needed that increasingly replaces this expert knowledge. However, learning, maintaining and expanding such a system requires close cooperation with the operator.

References / Quellenverzeichnis

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

5 Zusammenfassung

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

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

Ein noch deutlich größeres Einsparpotential bietet BeltGenius als Instrument für den optimalen Betrieb der Anlagen. So liegt im hier behandelten Beispiel des chilenischen Kupfererztagebaus das durchschnittliche Einsparpotential durch Vermeidung von Förderlücken und entsprechend geringerer – aber gleichmäßiger – Förderleistung bei rd. 20%. Erheblich größere Einsparungen würden sich ergeben, wenn eine konstant hohe Förderleistung erreicht werden könnte und die Betriebszeit durch die vermiedenen Produktionslücken reduziert würde. Das klingt trivial, denn jeder Bergmann strebt ohnehin immer nach einer hohen Förderleistung. Es ist jedoch viel wirtschaftlicher, eine konstant hohe Auslastung anzustreben, anstatt durch temporäre Spitzenleistungen Förderlücken und Stillstandszeiten wettmachen zu wollen. Hier kann BeltGenius dem Management bei der Entscheidung bezüglich der Verbesserung der betrieblichen Organisation die wirtschaftlichen Auswirkungen aufzeigen.

Eine weitere Perspektive für den Einsatz eines Digitalen Zwillings ergibt sich daraus, dass die Expertise für optimalen Betrieb und Instandhaltung von Bandanlagen bei immer weniger Betreibern vorausgesetzt werden kann. Es braucht ein Monitoringsystem für Bandanlagen, das dieses Expertenwissen zunehmend ersetzt. Ein solches System anzulernen, zu pflegen und zu erweitern erfordert jedoch eine enge Zusammenarbeit mit dem Betreiber.

Author / Autor

Dr.-Ing. Manfred Ziegler, Vice President Engineering Belt Conveyor, J. M. Voith SE & Co. KG, Crailsheim/Germany