

From Conveyor Element to Intelligent, Interlinked Operating Assistant: Chains – Smarter and more Reliable with Sensors

Developments in mining chain technology have led to a massive increase in the transmittable forces, along with a corresponding rise in production performance, and have helped extend the length of the winning face. At the same time, the potential offered by the available materials has been largely exhausted. In the same way, the space restrictions imposed on underground chain conveyors have seen developments taken to their limits with the introduction of geometrically more compact chain links. Given the power density of today's face conveyor installations it is now standard practice to spread the forces over two conveyor chain strands. From the current perspective, ongoing improvements and further increases in performance can be achieved by introducing real-time

monitoring of the chain forces and status conditions. Such measures have the capacity to accurately record and evaluate loads and stresses whose nature and intensity have previously only been based on estimations. Developing a method for successfully transferring data to the other parts of the winning installation, with corresponding reactive feedback, will mean that lifetime extensions and possibly even smaller dimensioning of the chain system will be both conceivable and feasible.

Bridge pieces with measurement ports, which are specially inserted into instrumented chain links, now provide scope for sensor modules – which may contain several different types of sensor – to be incorporated along with an energy source.

Aus Fördererelement wird intelligenter, vernetzter Betriebsassistent: Ketten – smarter und sicherer mit Sensoren

Die Entwicklungen in der Bergbaukettentechnik haben zu einer enormen Steigerung der übertragbaren Leistungen und damit zur Erhöhung der Förderleistungen sowie zur Verlängerung der Gewinnungsfront geführt. Dabei wurden die Möglichkeiten der zur Verfügung stehenden Werkstoffe weitgehend ausgeschöpft. Ebenso wurden die räumlichen Restriktionen der untertägigen Kettenförderer durch geometrisch kompaktere Kettengliedformen zu Grenzen hin entwickelt. Dabei ist die Kraftsplittung auf zwei Stränge bei der herrschenden Leistungsdichte in der Streb-fördertechnik ohnehin Standard. Verbesserung und weitere Leistungssteigerungen sind aus heutiger Sicht mithilfe einer echt-

zeitnahen Überwachung der Kräfte und Zustände in der Kette möglich, um die bislang in Form und Ausprägung nur abschätzba-ren Beanspruchungen exakt zu erfassen und zu bewerten. Gelän-ge ein Datentransfer an die übrigen Teilsysteme der Gewinnung mit entsprechender reaktiver Rückkopplung, sind Standzeitver-längerungen und möglicherweise kleinere Dimensionierungen der Kettensysteme denkbar und möglich. Der Beitrag stellt in Messglieder eingefügte, mit Messöffnungen ausgestattete Ste-ge vor, die es ermöglichen, Sensormodelle – auch mit mehreren verschiedenartigen Sensoren – mit einer Energieversorgung zu integrieren.

1 Introduction

The ongoing mechanisation of winning operations in the coal, lignite and potash industries would not have been possible without accompanying advances in chain technology. The fundamental cornerstones of this 75-year development history have been as follows:

- Increase in feasible production levels (> 5,000 t/h) and increase in face length (> 450 m) by at least a factor of 10.
- Increase in nominal chain size from 16 to 60 mm with the development of corresponding bending, welding and tempering techniques.

1 Einleitung

Die fortschreitende Mechanisierung im Streb-bau auf Stein- und Braunkohle sowie Kalisalz wäre ohne eine begleitende Entwicklung der Kettentechnik nicht möglich gewesen. Die wesentlichen Eckpunkte dieser etwa 75-jährigen Entwicklungshistorie sind:

- Steigerung der technisch realisierbaren Förderleistungen (> 5000 t/h) sowie Verlängerung der Gewinnungsfront (> 450 m) um mindestens den Faktor 10.
- Vergrößerung der Nenngrößen von 16 auf 60 mm mit Entwicklung entsprechender Biege-, Schweiß- und Vergütungs-technik.

- Doubling of the transmittable forces as a result of an increase in the nominal tensile stress from 0.4 to 0.8 kN/mm² and beyond.
- Fourfold increase in conveyor chain speed from about 0.4 to around 1.6 m/s (and as much as 3.6 m/s in the case of plough chains).
- Introduction of parallel twin inboard chains in long strands thanks to force- and path-controlled calibration.
- Effective corrosion protection by means of hot-dip galvanising.

This list does not include the huge efforts made by chain manufacturers over the years to develop geometrically more compact chain links in order to cope with the reduced clearance becoming available in the bottom race of the conveyor. The larger-sized vertical links have for years been produced either by forge-flattening welded links or, in the case of low-height links, by forging from new.

From a purely manufacturing perspective it would be possible to develop chain "hardware" of even larger dimensions. However, it is questionable whether this would make sense from an application or operational point of view. What ultimately counts at the end of the mining process chain is the yield of mineral material and the associated costs. When it comes to high-performance longwall faces a smart and reliable approach may well be feasible by fitting sensors and interlinking the mechanical core component, namely the chain, with the other machines that comprise the face winning system.

2 Damage factors and chain operating life

The operating life of face conveyor chains is affected by three key factors:

- wear;
- corrosion;
- fatigue.

For a mining conveyor chain the start-up of a new production face also marks the commencement of a degradation process that progressively affects its mechanical properties (breaking strength, ultimate elongation and sustainable load cycles). In the case of

- Verdopplung der übertragbaren Kräfte durch Erhöhung der nominellen Bruchspannung von 0,4 auf 0,8 kN/mm² und darüber hinaus.
- Steigerung der Kettengeschwindigkeiten im Förderer um den Faktor 4 von etwa 0,4 auf etwa 1,6 m/s (Hobelketten sogar bis zu 3,6 m/s).
- Einsatz paralleler Doppelmittelketten in langen Strängen durch kraft- und weggesteuertes Kalibrieren.
- Wirksamer Korrosionsschutz durch Feuerverzinkung.

Unberücksichtigt bleiben in dieser Aufzählung die großen Anstrengungen der Kettenhersteller, den kleiner werdenden Durchgangshöhen im Untertrum der Förderer durch Entwicklung geometrisch kompakterer Gliedformen zu begegnen. Vertikal eingebaute Kettenglieder größerer Abmessungen werden seit Jahren entweder aus Schweißgliedern schmiedetechnisch abgeflacht oder bei ganz niedrigen Ausführungsformen sogar von vornherein als Schmiedestück hergestellt.

Eine weitere Entwicklung der Ketten-„Hardware“ in noch größere Dimensionen ist fertigungstechnisch denkbar. Es ist jedoch fraglich, ob das anwendungstechnisch bzw. betrieblich sinnvoll ist. Was zählt, ist am Ende der gesamten bergbaulichen Prozesskette das Ausbringen an mineralischem Rohstoff und die damit verbundenen Kosten. In der Hochleistungstreibtechnik ist eine smarte und sichere Vorgehensweise durch Sensorbestückung und Vernetzung ihres maschinentechnischen Kernelements Kette mit den anderen Maschinen des Gewinnungssystems denkbar.

2 Schädigungsfaktoren und Kettenstandzeiten

Die Standzeiten von Strebförderketten werden von drei Schädigungsgrößen beeinflusst:

- Verschleiß,
- Korrosion,
- Ermüdung.

Mit dem Anlauf eines Gewinnungsbetriebs setzt bei Ketten ein Schädigungsprozess ein, der fortlaufend zu einer Minderung ihrer mechanischen Eigenschaften führt (Bruchkraft, Bruchdehnung und ertragene Schwingspielzahl). Unterliegen Ketten iso-

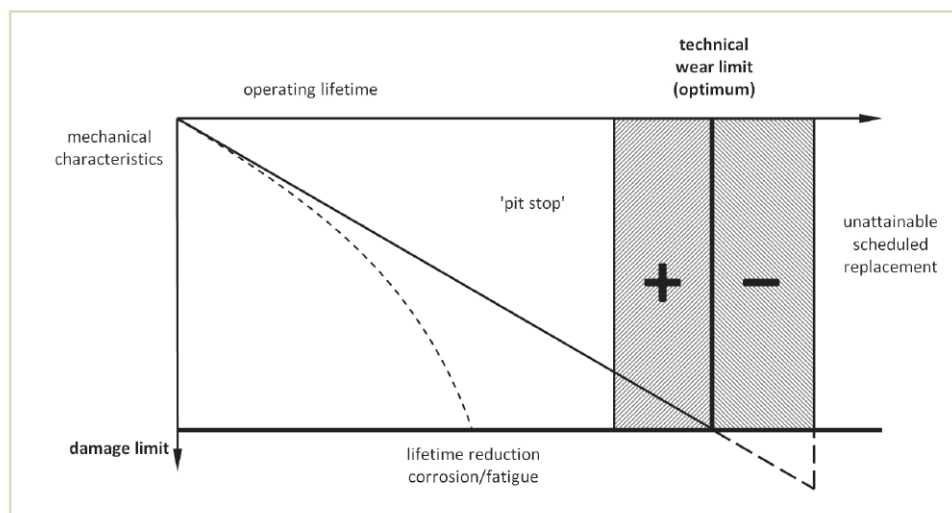


Fig. 1. Simplified depiction of chain service life. // Bild 1. Vereinfachte Darstellung Kettenstandzeit.

liert einem Verschleißprozess, verläuft die Alterungskurve linear (Bild 1). In Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Förderguts (Bergeteinhalt) ändert sich der Einfallwinkel dieser Alterungsgeraden. In einigen Betrieben werden Förderleistungen von mehreren Millionen Tonnen erreicht. Bei reinen Verschleißsituationen erfolgt der Kettenwechsel oftmals vorsorglich auch bei unterkritischen Verschleißzuständen nach Auslaufen einer Bauhöhe (Boxenstopp-Strategie). Dadurch wird ein störungsfreier Kettenbetrieb in der Folgebauhöhe sichergestellt. Die eigentliche technische Verschleißgrenze der Ketten wurde jedoch noch nicht erreicht. Der Wechsel des Verschleißsystems Kette

chains that are exposed to wear in isolation this ageing process will be a linear one (Figure 1). However, the angle of this ageing line will change as a function of the composition of the material being conveyed (dirt content). Some faces achieve production levels of several million tonnes. In situations of purely abrasive wear a chain may often be replaced as a precautionary measure on reaching the end of a panel, even if the wear status is regarded as "subcritical" (the pit-stop strategy). This helps ensure a trouble-free chain run in the subsequent panel. However, it also means that the chain has not yet reached its actual technical wear limit. On the other hand, changing over the chain while the face is still in production is a laborious and cost-intensive operation. This is the kind of fate that befalls a mine operator if a winning panel is unable to reach its boundary, or a scheduled operational stoppage for urgent and time-consuming equipment repairs cannot be made, because of a damaged chain interrupting the production process. The basic rule is: the stability of the system is always more important than the potential service life.

What is much more difficult is to assess is the life-shortening impact of overlapping degradation processes. Many coal faces are affected by aggressive corrosion conditions and here damage is crucially initiated by the seemingly innocuous spray water (1). This wets the coal that adheres to the gaps between the chain joints and dissolves the mineral content of the fines. If the chain is not protected by galvanisation pitting and cavitation can then develop in these electrochemically active gaps and also at other build-up points. Corrosion cavities and pitting will in turn provide entry points for progressive crack formation deep down. The growth of these cracks will subsequently be promoted by cyclic pulsating stress until fatigue fracture occurs. The crack propagation rate will increase as the load-bearing cross section becomes smaller. Depending on the operating conditions and the fracture toughness of the chain material under corrosion conditions chains may fail after just a few hundred thousand tonnes of mineral production.

Similar damage mechanisms will operate in the case of crack initiation due to wear or as a result of unavoidable friction stress. If cracks develop in chain-link zones that are subject to tensile stress the former will tend to open up and become deeper (2). Because of the high friction stresses involved this crucially affects plough chains running quickly through narrow guides, though is less frequently a problem for conveyor chains. Damage exacerbating corrosion will also occur in some cases.

In the case of overlapping damage mechanisms the degradation of the chain's mechanical properties will be characterised by a falling curve progression (Figure 1).

Pure fatigue, without significant wear, is only really encountered in the case of highly stressed plough chains, and even then only rarely.

For the sake of completeness it should be noted that a different set of operating conditions apply to the gate conveyors installed downstream of the production unit. As these installations are relatively short (< 60 m) their chains are more frequently deflected in relation to the same production tonnage. This leads to an increase in the pitch of the chain links due to wear and tear beyond critical limits, a phenomenon that develops much more quickly here than is the case with face chains. The effective in-

dagegen ist während eines laufenden Betriebs aufwendig und kostenintensiv. Ähnliches widerfährt dem Betreiber, wenn der Auslauf der Bauhöhe oder eine planmäßige Betriebsunterbrechung für unaufschiebbare, zeitintensive Anlageninstandsetzungen wegen störungsverursachender Kettenschädigungen nicht mehr erreichbar ist. Es gilt grundsätzlich: Die Stabilität des Systems ist immer wichtiger als die Standzeit.

Weitaus schwieriger ist die Einschätzung des lebensdauerverkürzenden Einflusses von sich überlagernden Schädigungsprozessen. Viele untertägige Gewinnungsbetriebe in der Kohle sind durch aggressive Korrosionsbedingungen gekennzeichnet. Schädigungen werden vordringlich von dem an sich unbedenklichen Bedüsungswasser initiiert (1). Das in den Kettengelenkspalten anhaftende Fördergut wird dadurch befeuchtet und der Mineralinhalt aus dem Kohlenklein gelöst. In diesen elektrochemisch aktiven Spalten oder auch an anderen Anbackungen entsteht Mulden- und Lochfraß, sofern die Ketten nicht durch Feuerverzinkung geschützt sind. Korrosionsmulden und Korrosionslöcher wiederum bilden in ihrem Tiefsten Ansatzpunkte für fortschreitende Rissbildung. Das Wachstum dieser Risse wird in der Folge durch zyklische Schwellbeanspruchungen bis zum Ermüdungsbruch getrieben. Mit dem kleiner werdenden tragenden Querschnitt nimmt die Risswachstumsgeschwindigkeit zu. Je nach Einsatzumständen und Bruchzähigkeit des Kettenmaterials unter Korrosionseinfluss können Ketten bereits nach einigen hunderttausend Tonnen Förderleistung versagen.

Ähnliche Schädigungsmechanismen wirken bei einer Risseinleitung durch Verschleiß bzw. durch unvermeidliche Reibbeanspruchungen. Bilden sich Anrisse in Kettengliedzonen, die Zugspannungen unterliegen, öffnen und vertiefen sich diese (2). Dies betrifft vordringlich wegen hoher Reibbeanspruchungen in engen Führungen schnelllaufende Hobelketten, weniger häufig Förderketten. Zum Teil tritt schädigungsverschärfend Korrosion hinzu.

Bei überlagerten Schädigungsmechanismen ist die Abnahme der mechanischen Ketteneigenschaften durch einen progressiv fallenden Kurvenverlauf charakterisiert (Bild 1).

Reine Ermüdung ohne nennenswerten Verschleiß findet sich praktisch und nur in seltenen Fällen bei hochbeanspruchten Hobelketten.

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass bei den der Strebförderung nachgeschalteten Streckenförderern andersgeartete Betriebsbedingungen vorliegen. Da die Streckenförderer vergleichsweise kurz sind (< 60 m), werden ihre Ketten bei gleicher Fördertonnage häufiger umgelenkt. Im Ergebnis führt dies erheblich schneller als bei Strebketten zu einer Teilungszunahme der Glieder infolge Gelenkverschleißes über kritische Grenzwerte hinaus. Die wirksame Interaktion Kette/Kettenrad ist ab etwa einer Teilungsverlängerung von 3,5% nicht mehr gegeben. Kettenwechsel bei Streckenförderern in laufenden Bauhöhen sind daher geübte Praxis.

3 Betriebsbeanspruchungen

Das raue Betriebsgeschehen im untertägigen Strebbau, verstärkt durch unvorhersehbare Änderungen der geologischen und bergigsmechanischen Einflussparameter, führt zu einer Vielzahl von Beanspruchungen. Einige davon sind als regulär (systembedingt), andere als irregulär (ereignisbedingt) einzuordnen (Bild 2).

teraction between chain and sprocket will no longer be present beyond an extension in chain pitch of about 3.5%. It is therefore normal practice to replace gate-conveyor chains on panels that are still being worked.

3 Operational stresses

The harsh operating conditions encountered on a longwall face, which are aggravated by unpredictable changes in the geological and geomechanical parameters, create a huge array of stresses and strains. Some of these can be classified as regular (systemic) and some as irregular (event related) (Figure 2).

Function-related stress (power and speed transfer) and process-related stress (vertical deflection at the sprocket, vertical and horizontal deviation in synclines and anticlines, and snaking) are unavoidable. These can be recorded by means of sensors that detect and display the forces involved. The same applies to chain blockages, kinking and heavy starting at the chain assembly, all of which are process-related, undesirable and yet situationally unavoidable.

These function- and process-related stresses produce resultant stress levels. Systemic fatigue (concentration of values) and systemic wear (value comparison) are quantifiable. The crack formation that is caused by friction could possibly be detected and evaluated by means of acoustic emission measurements.

If necessary, the temperature resulting from any additional regularly occurring stress could be detected quite simply by using sensors. Corrosion, on the other hand, because of its two-phase progression (starting with pitting and cavitation followed by crack propagation due to stress corrosion) (1), would only be detectable with the aid of sensor technology requiring a level of effort and expense that is currently impossible to assess.

The greatest operational "evil", namely maladjusted pretension force, could be removed by employing interlinked sensor technology (chain and drive system). This would reduce the wear and energy consumption associated with over-tensioned chains and prevent the chain blockages that can occur when running under-tensioned chains.

4 Integration of measurement technology

Of the stress elements listed above there is always a tensile force present in the system while the installation is in operation. This force never completely disappears, even when the installation is at rest. The tensile force is altered by the chain circulation and loading process. Its tendency to increase linearly is overlaid alternately by dry friction oscillations and it only takes on a zero value for a brief moment at the points where the chain emerges from the drives (hanging chain), when it is free from tension.

The measurement and recording of the chain tensile forces, the comparison of these values for chain strands running alongside or counter to one another in the conveyor, and the mathematical evaluation of the value changes all provide a whole range of conclusions relating to the operating forces and stresses at play. This means that the most important measurement parameter has already been found.

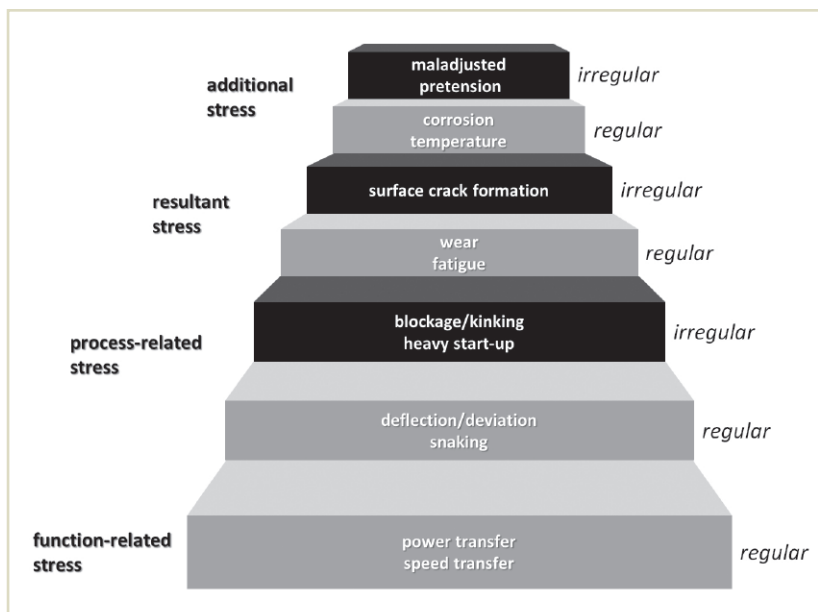


Fig. 2. Chain stress model according to (3).

Bild 2. Kettenbeanspruchungen mod. nach (3).

Die funktionsbedingten Beanspruchungen (Kraft- und Geschwindigkeitsübertragung) sowie die verfahrensbedingten Beanspruchungen (vertikale Umlenkung am Kettenrad, vertikale und horizontale Auslenkung bei Sätteln/Mulden und Rückschleifen) sind unvermeidbar. Sie lassen sich über Sensoren erfassen, die Kräfte ermitteln und aufzeichnen. Gleiches gilt für die unerwünschten, jedoch verfahrensbedingt, situativ unvermeidbaren Blockierungen, Verklankungen und Schweranläufe des Kettenbands.

Aus funktions- und verfahrensbedingten ergeben sich resultierende Beanspruchungen. Die systembedingte Ermüdung (Werteakkumulation) und der systembedingte Verschleiß (Wertevergleich) sind quantifizierbar. Die durch Reibung hervorgerufene Rissbildung ließe sich möglicherweise durch Acoustic-Emission-Messungen erkennen und bewerten.

Von den zusätzlichen regulären Beanspruchungen ließe sich – falls erforderlich – die Temperatur sensorisch einfach ermitteln. Die Korrosion hingegen wäre durch ihren zweiphasigen Verlauf (Start durch Loch- und Muldenfraß, Risswachstum durch Spannungsrissskorrosion) sensortechnisch nur über einen noch nicht abzuschätzenden hohen Aufwand zu detektieren (1).

Das größte betriebliche „Übel“, die unangepasste Vorspannkraft, wäre durch vernetzte Sensorik (Kette/Antrieb) zu beheben. Dadurch würden Verschleiß und Energieverbrauch bei überspannter Kette als auch Blockierungsrisiken bei unterspannter Kette vermeidbar.

4 Integration der Messtechnik

Von den oben aufgelisteten Beanspruchungen ist während des Betriebs stets eine Zugkraft im System vorhanden, die selbst bei Stillstand nicht vollständig verschwindet. Diese Zugkraft wird durch Umlauf und Beladung verändert. Ihre lineare Steigungstendenz wird durch trockene Reibschwingungen alternierend überlagert. Lediglich bei spannungsloser Kette an den Kettenausläufen der Antriebe (Hängkette) nimmt sie kurzzeitig einen Null-Betrag an.

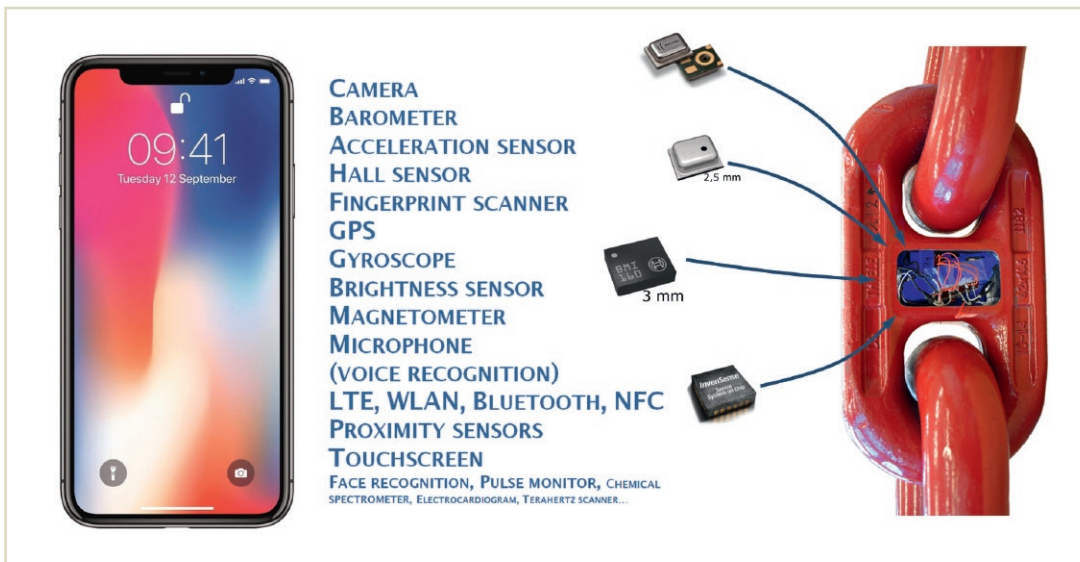


Fig. 3. Smartphone versus sensor chain.
Bild 3. Smartphone vs. Sensor-Kette.

In order to measure forces of this kind the obvious solution here is to employ the type of strain gauge that performs reliably and trouble-free in countless technical measurement and control applications and which is connected to form a Wheatstone bridge circuit. The changes in electrical resistance produced by the gauge's mechanical deformation can readily be converted into mechanical stresses and forces.

The question of finding a suitable mounting space in a chain link, without impairing its real function, requires some preliminary considerations. Even though the leg of the chain link is basically overdimensioned, as it only has to transfer about 50% of the tensile force compared with the crown, the complex nature of the load stresses and internal stresses at work means that geometric changes are only possible to a limited degree. A much simpler solution is to insert a bridge across the centre of the chain link. While this will clearly reinforce the measurement link, a few individual links of this kind distributed over the entire chain will have no measurable impact on the overall tensile behaviour of the chain. As well as creating the additional mounting space needed the central bridge also has the advantage of permitting measurement of the compressive forces arising due to the lateral contraction of the legs when force is applied. The unapparent but measurable deformation of the chain link that occurs in the linear-elastic tensile force range is a reliable measure of the tensile force arising here.

The bridge that is fixed across the centre of the chain link can adapt very well to the three-dimensional curves generated by the bending and deflection kinematics, provided that the function of the chain is not restricted. The bridge itself has no load-bearing function and its walls only have to withstand the small compressive forces arising from the lateral contraction of the chain link and protect the sensitive electronic components from knocks, impacts and dirt. Using previous designs as a reference the usable interior of the bridge V_N can be determined in approximate terms as a function of the respective nominal chain diameter d as follows:

$$V_N \approx d^3 \quad (1-1)$$

A chain of nominal size 42 x 146 mm therefore provides a cavity volume of around 74,000 mm³. This space can be completely

Die messtechnische Erfassung und Speicherung der Kettenzugkräfte, der Vergleich ihrer Beträge bei nebeneinander oder gegenläufig im Förderer eingesetzten Strängen sowie die rechnerische Auswertung der Werteveränderungen erlaubt eine Vielzahl von Rückschlüssen auf die Betriebsbeanspruchungen. Damit ist die wichtigste zu erfassende Messgröße bereits gefunden.

Naheliegender ist zur Messung von Kräften, die in zahlreichen technischen Mess- und Steuerungsanwendungen zuverlässig und störungsfrei eingesetzten Dehnmessstreifen (kurz: DMS), verschaltet zu einer Wheatstone'schen Messbrücke, einzusetzen. Die durch ihre mechanische Verformung veränderten elektrischen Widerstände lassen sich problemlos in mechanische Spannungen bzw. Kräfte umrechnen.

Die Frage nach einem geeigneten Einbauraum in einem Kettenglied, ohne seine eigentliche Funktion zu beeinträchtigen, bedarf einiger Vorüberlegungen. Obgleich der Kettengliedschenkel grundsätzlich überdimensioniert ist, da er im Gegensatz zur Rundung nur etwa 50% der Zugkraft überträgt, lässt jedoch die Komplexität der Last- und Eigenspannungen nur bedingte geometrische Veränderungen zu. Wesentlich einfacher ist das Einfügen eines Stegs in der Mitte des Kettenglieds. Zwar wird dadurch das betreffende Messglied versteift, doch haben wenige einzelne, in der Gesamtkette verteilte Messglieder auf das Gesamtdehnverhalten einer Kette keinen messbaren Einfluss. Neben dem erforderlichen zusätzlichen Einbauraum bietet ein Steg auch den Vorteil, dass Druckkräfte, welche durch die Querkontraktion der Schenkel bei Kraftbeaufschlagung entstehen, messbar sind. Die im linear-elastischen Zugkraftbereich nicht sichtbaren, aber messbaren Verformungen des Kettenglieds sind ein zuverlässiges Maß für die in ihm anstehende Zugkraft.

Der Steg im Innenraum des Kettenglieds kann an die sich aus der Um- und Abwinkelungskinematik ergebenden Raumkurven eng anschmiegen, sofern die Funktion der Kette nicht eingeschränkt wird. Der Steg selbst hat keine tragende Funktion und seine Wandung sollte nur den geringen Druckkräften aus der Gliedquerkontraktion standhalten sowie die empfindliche Elektronik vor Schlag, Stoß und Schmutz schützen. Der nutzbare

nom. size / Nenngröße	dimensions / Maße mm x mm	volume / Volumen mm ³	capacity / Kapazität mAh	weight / Masse g	capacity density / Kapazitätsdichte mAh/mm ³
AA	Ø14,55 x 50,30	8363	2600	16,7	0,31
½ AA	Ø14,55 x 25,15	4282	1200	8,9	0,28

Table 1. Comparative data for test batteries. // Tabelle 1. Vergleich der eingesetzten Batterien.

filled with electronic components and power sources. Here the actual sensor module (sensor and processor) only takes up about 4 % of the available volume. Additional miniaturised sensor devices could also be accommodated without any problem (Figure 3).

An integrated energy source, on the other hand, would take up much more space. Moreover, further requirements have to be met when batteries are being used:

- non-flammable electrolyte (intrinsic safety);
- minimum voltage 3.6 V;
- voltage stability to be maintained over the entire measurement period;
- high capacity (stored electrical charge).

Lithium thionyl chloride batteries (Li-SOCl₂) of size AA and ½ AA were fitted for previous tests (Table 1).

The mountings and connections for the batteries require at least the same amount of space as the battery body itself. For a chain of nominal size 42 this means that about 50 % of the measurement space is filled when two parallel connected AA batteries are employed. As the measurement bridge still has to be closed over, very little installation space will remain for any other energy supply elements.

This outlines the real problem created by an integral energy source. The process of continuous measurement and data storage requires a current strength of around 20 mA. Considerable thought was therefore given to the idea of supplying energy from an outside source or making the entire measurement system removable so that quick changeovers could be effected.

5 Data logging, processing and storage

The primary and most important detection variable in any conveyor chain operation will be those forces whose values are determined by the strain gauge system. This measurement parameter can be handled in three different ways (4):

- storage of the entire data as force-time curves;
- transmission of the measurement data by radio to external processing units;
- preparation (classification and compression) of the data with subsequent storage and/or radio transmission.

One of the recognised counting techniques for fatigue life calculation (Markov, Rainflow, etc.) is used for processing the measurement data (Figure 4). This approach, whereby the information is allocated to load classes, reduces the large quantity of data associated with the collective stress factors. The system analyses the magnitude and frequency of the stress amplitude but not the frequency and sequence of the results. The counting method calculates a damage sum, which is obtained by way of a damage

Steginnenraum VN lässt sich aus den bisherigen Konstruktionen näherungsweise in Abhängigkeit vom jeweiligen Kettennenn-durchmesser d bestimmen zu:

$$V_N \approx d^3 \quad (1-1)$$

Bei einer Kette der Nenngröße 42 x 146 mm steht mithin ein Hohlraumvolumen von etwa 74.000 mm³ zur Verfügung. Dieser Raum kann vollständig mit Elektronikbauteilen und Stromversorgung gefüllt werden. Dabei nimmt das eigentliche Sensormodul (Sensor und Prozessor) nur etwa 4 % des Volumens ein. Weitere miniaturisierte Sensorik wäre ebenfalls problemlos unterzubringen (Bild 3).

Wesentlich mehr Raum nimmt eine integrierte Energieversorgung in Anspruch. Darüber hinaus sind beim Einsatz von Batterien weitere Anforderungen zu beachten:

- Nichtentflammbarer Elektrolyt (Eigensicherheit),
- Mindestspannung 3,6 V,
- spannungsstabil über die gesamte Messdauer und
- hohe Kapazität (gespeicherte elektrische Ladung).

In den bisherigen Versuchen wurden Lithium-Thionylchlorid-Batterien (Li-SOCl₂) der Nenngröße AA und ½ AA verbaut (Tabelle 1).

Die Halterungen und Anschlüsse der Batterien benötigen mindestens das gleiche Volumen wie der Batteriekörper selbst. Für die Kette der Nenngröße 42 bedeutet dies beim Einsatz von zwei parallel verschalteten AA-Batterien, dass etwa 50 % des Messraumvolumens gefüllt sind. Da der Messsteg noch verschlossen werden muss, bleibt kaum noch Einbauraum für weitere Energieversorgungselemente.

Damit ist die eigentliche Schwierigkeit einer integrierten Energieversorgung beschrieben. Kontinuierliche Messungen und Datenspeicherung benötigten eine Stromstärke von etwa 20 mA. Daher werden intensive Überlegungen angestellt, Energie von außen zuzuführen oder das gesamte Messsystem über ein Schnellwechselsystem austauschbar zu gestalten.

5 Messwerverfassungen, Aufbereitung und Speicherung

Die primäre und wichtigste Erfassungsgröße beim Betrieb von Fördererketten stellen die Kräfte dar, deren Betrag durch die DMS ermittelt wird. Mit dieser Messgröße kann auf drei unterschiedliche Weisen verfahren werden (4):

- Speicherung der kompletten Daten als Kraft-Zeit-Verläufe,
- Übertragung der Messdaten per Funk an externe Auswerteeinheiten,
- Aufbereitung (Klassierung und Verdichtung) der Daten mit anschließender Speicherung und/oder Funkübertragung.

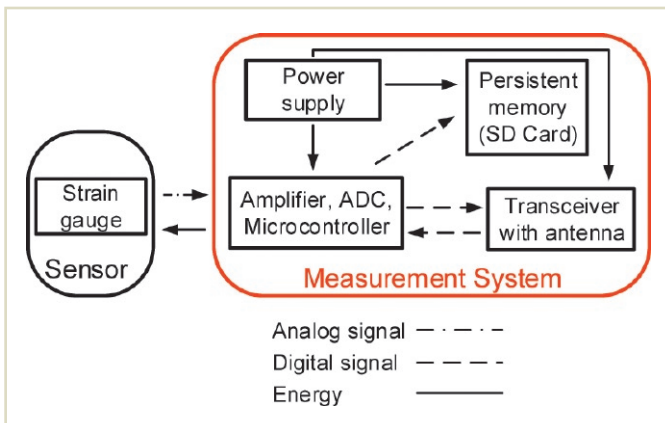


Fig. 4. Schematic diagram of the chain-sensor system according to (5).
Bild 4. Schema Ketten-Sensorsystem nach (5).

accumulation computation based on the stress-cycle (Wöhler) curve of the component. While component failure cannot be predicted, especially when it comes to overlapping damage factors, it can at least be localised in time.

6 Chain monitoring

Chain monitoring signifies the systematic recording (measurement and logging) of the stress parameters, their interpretation and transfer into a status assessment, and a near real-time transference to a process-monitoring control centre. The data transferred from the chain play a supporting role in the overall system control process.

6.1 Initial application on a longwall face

After numerous trial runs on a test conveyor at the Institute for Mining and Metallurgy Machinery (now Advanced Mining Technologies – AMT) of Aachen Technical University the system was deemed to be sufficiently advanced by 2016 for an underground trial on an actual face conveyor. Sobieski colliery in Poland, which is operated by the Tauron Energy Group based in Jaworzno, agreed to host a 10-day test. Sobieski mine, whose take covers an area of some 65 km², is located about 25 km south east of Katowice in the Upper Silesian coalfield region. The colliery's three active faces produce a combined gross output of around 14,500 t/d. A panel in 209 seam was chosen to test the system. The face in question, which measured 300 m in length, had a seam thickness of around 3.9 m and exhibited a dip of about 5 degrees (Table 2).

During one of the maintenance shifts two instrumented chains, each comprising five links of which two contained measuring devices, were fitted to the coal-face chain. The chain assembly in question had already been in service for some time. Immediately after fitting the measurement links were activated by radio and the measurement cycle begun. As calculated, the battery energy supply became exhausted after ten days and the instrumented chains were recovered for examination.

The interpretation of the measurement traces (Figure 5) produced the following summary findings (4):

- The expected upward trend in the force lines between the drives was superimposed by force amplitudes caused by dry friction oscillations.

Zur Aufbereitung der Daten wird eines der bekannten Zählverfahren (Markov, Rainflow etc.) der Betriebsfestigkeitsbeurteilungen herangezogen (Bild 4). Dadurch wird die Vielzahl der Messdaten auf Beanspruchungskollektive durch Zuordnung zu Lastklassen reduziert. Ausgewertet werden Größe und Häufigkeit der Beanspruchungsamplitude, nicht jedoch Frequenz und Reihenfolge der Ereignisse. Mithilfe der Zählverfahren wird eine Schadenssumme ermittelt, die sich durch eine Schadensakkumulationsrechnung gegen die Wöhlerkurve des Bauteils ergibt. Das Bauteilversagen kann zwar nicht vorhergesagt, insbesondere in Hinblick auf sich überlagernde Schädigungsfaktoren aber zumindest zeitlich eingegrenzt werden.

6 Ketten-Monitoring

Unter Ketten-Monitoring ist die systematische Erfassung (Messung und Protokollierung) der Beanspruchungsgrößen, ihre Auswertung und Überführung in eine Zustandsbeurteilung sowie eine echtzeitnahe Übermittlung an einen prozessüberwachten Leitstand zu verstehen. Die aus der Kette transferierten Daten sind unterstützend für die Gesamtsystemsteuerung nutzbar.

6.1 Ersteinsatz im Strebbau

Nach zahlreichen Erprobungen in einem Versuchsförderer am Institut für Maschinentechnik in der Rohstoffindustrie (heute Advanced Mining Technologies – AMT) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen war die Technik Mitte Juli 2016 soweit ausgereift, dass ein untertägiger Versuch in einem realen Strebförderer durchgeführt werden konnte. Das Bergwerk Sobieski des Energiekonzerns Tauron in Jaworzno/Polen stimmte einem zehntägigen Versuchseinsatz zu. Mit seinem Grubenfeld von etwa 65 km² liegt das Bergwerk Sobieski etwa 25 km südöstlich von Katowice im oberschlesischen Revier. Aus insgesamt drei Streben wird eine Bruttoförderung von etwa 14.500 t/d erbracht. Für den Einsatz wurde eine Bauhöhe im Flöz 209 mit einer Flözmächtigkeit von etwa 3,9 m ausgewählt. Der Streb war 300 m lang und wurde bei einem Einfallen von etwa 5° betrieben (Tabelle 2).

Während einer Wartungsschicht wurden zwei Messketten aus fünf Gliedern mit jeweils zwei Messgliedern in die bereits

Technical data (coal winning) / Technische Daten Gewinnung	
Drum shearer / Walzenlader	Joy 7 LS 22
Cutting width / Schnittbreite	800 mm
Speed of travel / Marschgeschwindigkeit	7 – 10 m/min
Face conveyor/ Strebförderer	Nowomag PSZ 950/ 3 x 500
Drive power (installed)/ Antriebsleistung (installiert)	2 x 500 kW
Hydrodynamic coupling / Hydrodynamische Kupplung	Voith 562 DTPKWL 2
Chain type / Kettentyp	THIELE DMK flat-link chain 42 x 146 / THIELE DMK Flachkette 42 x 146
Scraper bar spacing / Kratzerabstand	8 links / 8 Glieder
Chain speed / Kettengeschwindigkeit	1,31 m/s

Table 2. Face and machine data for the trial face at Sobieski mine.
Tabelle 2. Maschinendaten Einsatzstreb Bergwerk Sobieski.

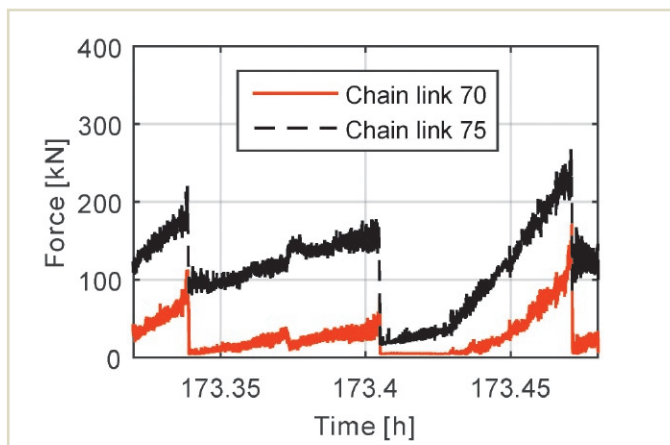


Fig. 5. Extract from chain force graph. // Bild 5. Ausschnitt Kettenkräfte.

- Due to the higher rate of wear (greater elongation) on the coal-face side the chain forces prevailing here were higher than on the goaf side.
- Evidence of heavy start-up of the conveyor with chain forces of around 700 kN (about 70 % above the fatigue limit). The conveyor was run to empty section by section, interrupted by six thermal motor shutdowns.
- Chain speed is load dependent and falls by 0.03 m/s per 100 kN of chain force.

6.2 Initial deployment for offshore rockfill operations

A somewhat different application for sensor-supported chain monitoring technology involves the offshore placing of rockfill for sub-sea pipe laying. In order to prepare the route of the proposed pipeline the sea floor is rendered level, where necessary, with a layer of crushed stone. After laying the pipeline is then covered with more stone material in order to protect it from movement by the sea currents.

The support vessels that carry out marine operations of this kind are loaded with up to 25,000 t of stone. The fill material is drawn up from the ship's bunkers and delivered to a downpipe. The latter consists of pipe segments inserted one inside the other that are held in place by two mining-grade chains of 30 x 108 mm nominal size. At the end of the downpipe, which may be as much as 1,200 m in length, a video-monitored ROV discharge head (remotely operated vehicle) ensures that the fill material is released on to exactly the right spot. The greatest risk during this operation lies in failing to detect a blockage in the downpipe, with the result that the latter cannot be salvaged.

The initial monitoring method was based on measuring the forces arising at the bearing bushes of the downpipe (Figure 6). A 24-hour measurement trial carried out in the summer of 2015 was then able to demonstrate that by taking direct measurements at the chains it was possible to detect force changes, and hence impending blockages, some two and a half minutes earlier than the indirect measurement technique (Figure 7). It was also shown that the chain forces measured by direct means were about 40 % below those determined at the bearings.

A long-term deployment is now being planned. By using an external energy source, with the data being transferred directly in real-time to a control station on board the vessel, the conditions

seit einiger Zeit im Betrieb befindliche Kette eingebaut. Unmittelbar nach dem Einbau wurden die Messglieder per Funk aktiviert und der Messzyklus gestartet. Wie vorausberechnet, waren die Energievorräte der Batterien nach zehn Tagen erschöpft, und die Messketten wurden zur Auslesung geborgen.

Die Interpretation der Messschriebe (Bild 5) führte zusammengefasst zu folgenden Erkenntnissen (4):

- Die erwarteten steigenden Kraftverläufe zwischen den Antrieben werden von Kraftamplituden, verursacht durch trockene Reibschwingungen, überlagert.
- Infolge höheren Verschleißes (größere Längung) der Kohlenstoßseite ist die dort herrschende Kettenkraft höher als an der Versatzseite.
- Schweranlauf des Förderers mit Kettenkräften um 700 kN (etwa 70 % oberhalb der Dauerfestigkeitsgrenze) konnte nachgewiesen werden. Der Förderer wurde abschnittsweise leergefahren, unterbrochen durch sechs thermische Motorabschaltungen.
- Die Kettengeschwindigkeit ist beladungsabhängig und sinkt je 100 kN Kettenkraft um 0,03 m/s.

6.2 Ersteinsatz in der Offshore-Steinschüttung

Einen anders gearteten Einsatz sensorgestützter Kettenüberwachung bietet die Offshore-Steinschüttung für die Verlegung von Rohrleitungen. Zur Vorbereitung der Verlegung von Rohrleitungen wird der Meeresgrund – sofern erforderlich – mit aufgeschüttetem gebrochenem Steinmaterial eingeebnet. Die verlegten Rohrleitungen werden anschließend mit Steinmaterial zugeschüttet und so gegen die Verschiebung infolge von Strömungen gesichert.

Dazu sind Schiffe mit einem Gesteinsvorrat von bis zu 25.000 t Material im Einsatz. Das Schüttmaterial wird aus den Schiffsbunkern abgezogen und einem Fallrohr zugeführt. Dieses besteht aus ineinandergesteckten Rohrsegmenten, die von zwei Bergbauketten der Nenngröße 30 x 108 mm gehalten werden. Am Ende des bis zu 1.200 m langen Fallrohrs wird durch einen Schüttkopf (Remote Operated Vehicle) videoüberwacht das Material gezielt ausgeleert. Das größte verfahrenstechnische Risiko besteht in ei-



Fig. 6. Measurement chain at the mouth of the downpipe.
Bild 6. Messkette Einlauf Fallrohr. Photo/Foto: THIELE

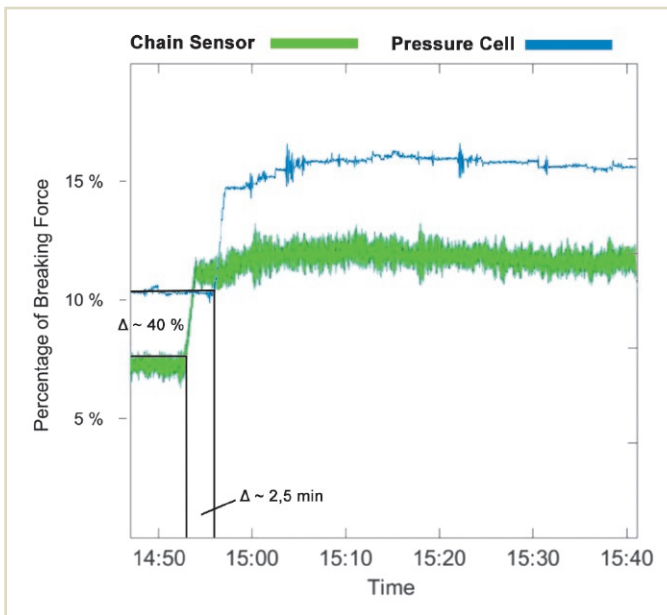


Fig. 7. Comparison of force plots from chain and bearing readings.
Bild 7. Vergleich Kraftverläufe Kette vs. Widerlager.

are significantly less complex than those encountered on a coal face.

7 Development prospects

A comprehensive chain monitoring regime should at least be capable of meeting continuous load monitoring and status monitoring requirements. Another desirable feature would include the possibility of communication between the chain monitoring system and other sub-systems associated with an automated mineral winning installation (winning machine and conveyor drives), so that the data generated by the chain monitoring regime could support the overall system control process (Figure 8).

It has hitherto been common practice to measure the loads and load characteristics (forces and force changes, differences in forces arising in parallel chain strands, speeds etc.) of longwall chain systems. The analysis and interpretation process would then be carried out in retrospect. The industry is now working hard on a more timely transfer of the data by way of regular communication with the measurement modules, by direct cable-linked transmission (stone filling) or by remote radio technology. Being able to transfer data in real-time is also a prerequisite for creating a status monitoring regime and providing support to the overall system control process. The basic feasibility of a remote radio-

ner nicht detektierten Verstopfung des Fallrohrs und darin, dass dieses anschließend nicht mehr geborgen werden kann.

Bislang wurden die Kräfte an den Lagerbuchsen des Fallrohrs gemessen. In einem 24-stündigen Messversuch im Sommer 2015 konnte nachgewiesen werden, dass die direkten Messungen in den Ketten (Bild 6) etwa zweieinhalb Minuten früher als die indirekten Messungen an den Widerlagern Kraftveränderungen und somit drohende Verstopfungen anzeigen (Bild 7). Außerdem wurde gezeigt, dass die direkt gemessenen Kettenkräfte in ihrem Niveau etwa 40 % unter den im Widerlager ermittelten Kräften lag.

Derzeit ist ein Langzeiteinsatz geplant. Durch eine Energieeinspeisung von außen und durch direkten Datentransfer in Echtzeit zum Leitstand auf dem Schiff sind die Verhältnisse erheblich weniger komplex als im Untertagebetrieb.

7 Entwicklungsperspektiven

Ein vollständiges Ketten-Monitoring müsste zumindest die Bedingung einer ständigen Last- und Zustandsüberwachung erfüllen. Als wünschenswerte Erweiterung kommt die Eröffnung von Kommunikationsmöglichkeiten des Ketten-Monitoringsystems mit den anderen Teilsystemen einer automatisierten Gewinnung (Gewinnungsgerät, Förderantrieb) infrage, sodass die aus dem Ketten-Monitoring generierten Daten die Steuerung des Gesamtsystems unterstützen (Bild 8).

Im praktischen Betrieb wurden bislang Lasten und Lastverläufe (Kräfte und deren Veränderungen, Kraftdifferenzen zwischen parallelen Strängen, Geschwindigkeiten etc.) gemessen. Eine Auswertung und Interpretation erfolgte erst im Nachhinein. An einem zeitnäheren Datentransfer über regelmäßigen Austausch der Messmodule oder über eine direkte Übertragung kabelgebunden (Steinschüttung) oder per Funkferntechnik wird derzeit intensiv gearbeitet. Den Datentransfer echtzeitnah zu verwirk-

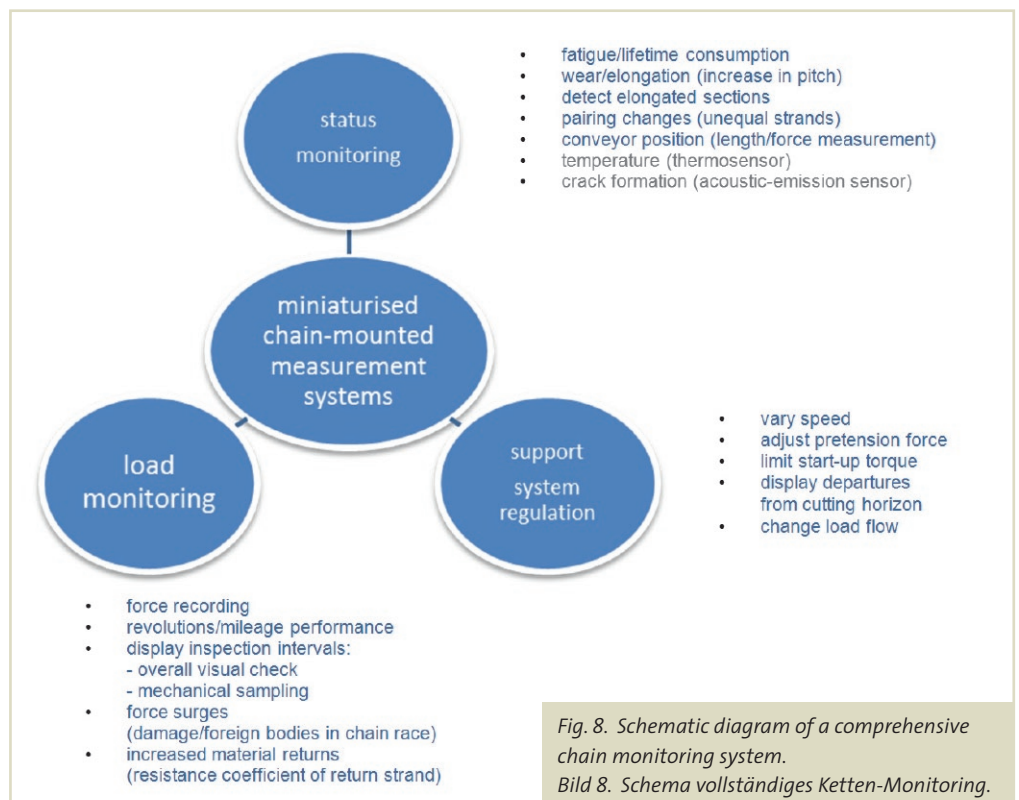
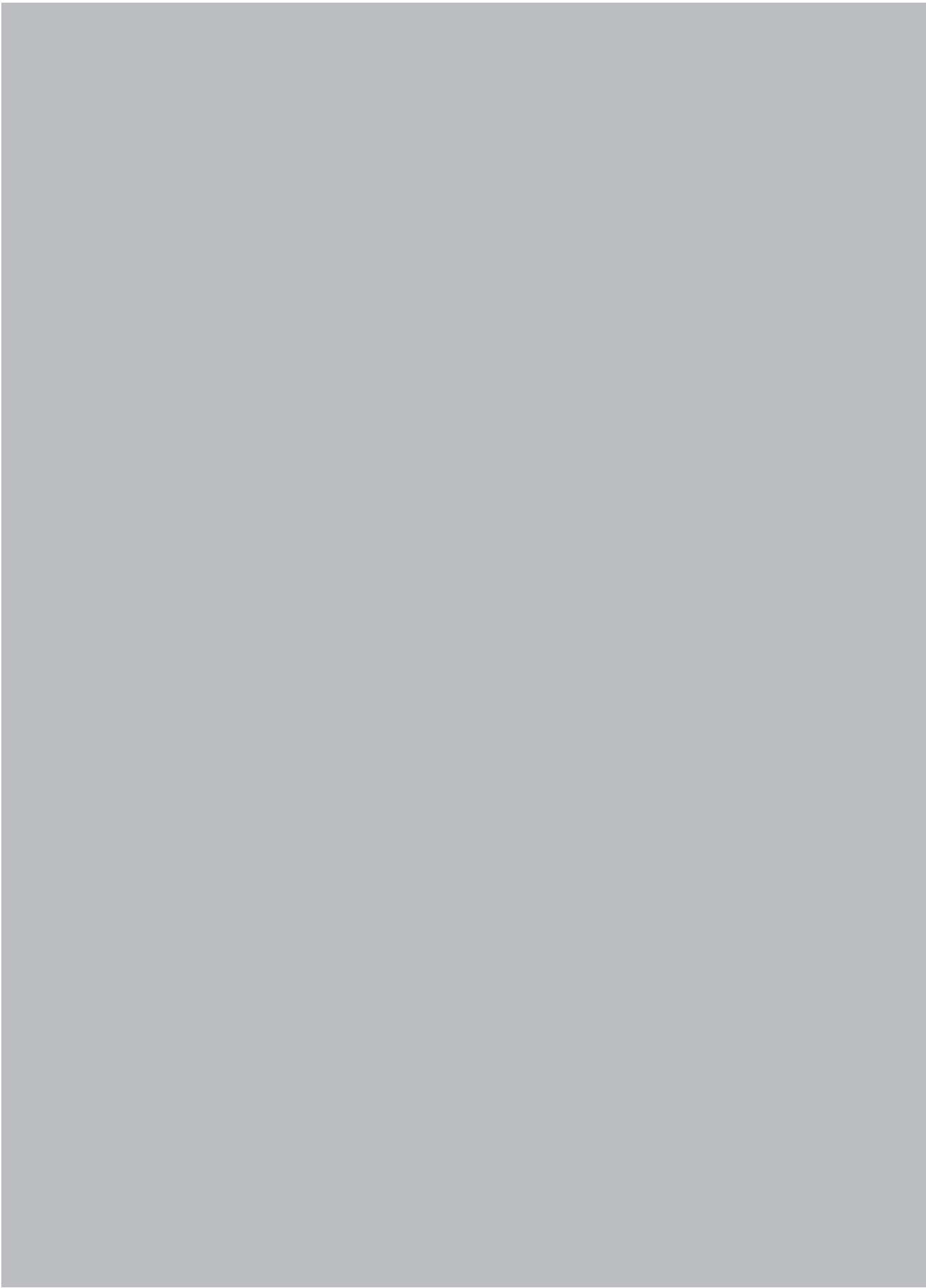


Fig. 8. Schematic diagram of a comprehensive chain monitoring system.
Bild 8. Schema vollständiges Ketten-Monitoring.



based data transmission system, even in the difficult operating environment that a chain conveyor has to contend with, has already been established (6). For a long-term measurement regime, storage-compatible data compression also presents a workable solution based on recognised counting techniques for fatigue life calculation.

8 Summary

Developments in mining chain technology over the years have led to a massive increase in the transmittable forces, along with a corresponding rise in production performance (> 5000 t/h), and have helped extend the length of the winning face by a least a factor of 10 (> 450 m). At the same time, the potential offered by the available materials has been largely exhausted. In the same way, the space restrictions imposed on underground chain conveyors – height clearance in the return strand and limited diameter of the drive return – have seen developments taken to their limits with the introduction of geometrically more compact chain links. Given the power density of today's face conveyor installations it is now standard practice to spread the forces over two conveyor chain strands.

From the current perspective, ongoing improvements and further increases in performance can be achieved by introducing real-time monitoring of the chain forces and status conditions. Such measures have the capacity to accurately record and evaluate loads and stresses whose nature and intensity have previously only been based on estimations. Developing a method for successfully transferring data to the other parts of the winning installation, with corresponding reactive feedback, will mean that lifetime extensions and possibly even smaller dimensioning of the chain system will be both conceivable and feasible.

Bridge pieces with measurement ports, which are specially inserted into instrumented chain links, now provide scope for sensor modules – which may contain several different types of sensor – to be incorporated along with an energy source. Admittedly, without an external energy supply or some other form of internal energy generation the battery capacity will impose limits on the range and duration of the measuring process.

The promising attempts made in this area to date certainly provide motivation for the further development of chain monitoring technology.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Philipp, G.; Gerth, A.: Abschätzung der Korrosionsgefährdung von Bergbauketten in Strebbetrieben. Mining Report Glückauf (152), Heft 2/2016, S. 138–148.
- (2) Philipp, G.; Calik, F.: Das zukünftige Entwicklungspotenzial der Kettenfördertechnik im Strebbau und eine Abschätzung ihrer Einsatzgrenzen. Mining Report Glückauf (150), Heft 1/2 2014, S. 14–33.
- (3) Kaci, V.; Wölfle, M.: Beanspruchung von Ketten im Betrieb. Glückauf (129) 1993, S. 420–424.
- (4) Philipp, G.; Schütz, M.; Nienhaus, K.: Ermittlung von Kettenkräften im Strebbetrieb durch Einsatz von miniaturisierten Messsystemen. World of Mining 2/17, S. 98–108.
- (5) Schütz, M.: Konzeptentwurf und Erprobung eines Messsystems zur verbesserten Bestimmung der Ablegereife von Rundstahlgliederketten. Dissertation RWTH Aachen (2016).
- (6) Pierburg, L.: Entwicklung eines Lebensdauersensors. Dissertation RWTH Aachen (2009).

lichen, ist ferner Voraussetzung für eine Zustandsüberwachung und Unterstützung der Gesamtsystemregelung. Die grundsätzliche Umsetzbarkeit einer funkferntechnischen Datenübertragung auch in den schwierigen Umfeldbedingungen eines Kettenförderers ist bereits geführt worden (6). Ebenso ist eine speicherfähige Verdichtung der Messdaten für Langzeitmessungen über die bekannten Zählverfahren der Betriebsfestigkeitslehre umsetzbar.

8 Zusammenfassung

Die Entwicklungen in der Bergbaukettentechnik der Vergangenheit haben zu einer enormen Steigerung der übertragbaren Leistungen und damit zur Erhöhung der Förderleistungen (> 5000 t/h) sowie zur Verlängerung der Gewinnungsfront (> 450 m) um mindestens den Faktor 10 geführt. Dabei wurden die Möglichkeiten der zur Verfügung stehenden Werkstoffe weitgehend ausgeschöpft. Ebenso wurden die räumlichen Restriktionen der untertägigen Kettenförderer – freie Rücktruhöhe und limitierter Durchmesser Antriebsumlenkung – durch geometrisch kompaktere Kettengliedformen zu Grenzen hin entwickelt. Dabei ist die Kraftspaltung auf zwei Stränge bei der herrschenden Leistungsdichte in der Strebördertechnik ohnehin Standard.

Verbesserung und weitere Leistungssteigerungen sind aus heutiger Sicht mithilfe einer echtzeitnahen Überwachung der Kräfte und Zustände in der Kette möglich, um die bislang in Form und Ausprägung nur abschätzbaren Beanspruchungen exakt zu erfassen und zu bewerten. Gelänge ein Datentransfer an die übrigen Teilsysteme der Gewinnung mit entsprechender reaktiver Rückkopplung, sind Standzeitverlängerungen und möglicherweise kleinere Dimensionierungen der Kettensysteme denkbar und möglich.

Eigens in Messglieder eingefügte, mit Messöffnungen ausgestattete Stege ermöglichen es, Sensormodelle – auch mit mehreren verschiedenartigen Sensoren – mit einer Energieversorgung zu integrieren. Allerdings ohne eine Energiezuführung von außen oder eine andersgeartete innere Energiegenerierung gibt die Batteriekapazität die Grenzen für Messumfang und -zeit vor.

Die bisherigen vielversprechenden Ansätze ermutigen zu weiterer Entwicklung des Ketten-Monitorings.

Author / Autor

Prof. Dr.-Ing. Günther Philipp, Geschäftsführer,
THIELE GmbH & Co. KG, Iserlohn/Germany