

Automation of the loading units employed in RWE Power AG's opencast mines

Vollautomatisierung der Beladewagen in den Tagebauen der RWE Power AG

ARNE VESTWEBER, REIK WINKEL, WILFRIED GAU, HARTWIG RESSING, Germany

1 Introduction and motivation

The competition with other energy sources and the complex political conditions necessitate continuous efficiency improvements of the entire value-added chain of lignite mining, lignite-based electricity generation and lignite upgrading. To effectively meet these requirements, the Opencast Mine segment of RWE Power AG among other things is pursuing the strategy of automating mining processes where this is purposeful and technically feasible with the aim of lowering labour costs and ensuring a consistent, reproducible operation of the systems to prevent overloading and minimize damage. A multi-stage strategy [1] is applied to gradually increase the automation level of the main mine equipment. At present the second automation step, with the automation of the loading units as the core module, is being implemented.

The loading unit is the link between the bucket wheel excavator and the belt conveyor. It is usually connected with the excavator via a telescope bridge and follows it as far as the bridge extension permits (see Figure 1). In RWE Power AG's Rhenish lignite mining area, 20 bucket wheel excavators are in operation, including 17 equipped with a loading unit with an attached feeding table. The material is loaded onto the conveyor belt by the feeding table, which is fitted with garlands, guiding the belt at the point of material feeding and precisely positioning it.

Until 2004, many loading units were semi-automated as part of the first automation step [2]. In this operating mode, the feeding

1 Einleitung und Motivation

Der Wettbewerb gegenüber anderen Energieträgern und die komplexen politischen Rahmenbedingungen erfordern kontinuierliche Effizienzsteigerungen in der gesamten Wertschöpfungskette der Braunkohlengewinnung, -verstromung und -veredelung. Um dieses Ziel nachhaltig zu erfüllen verfolgt die Sparte Tagebaue der RWE Power AG u.a. die Strategie, die Bergbauprozesse – soweit wirtschaftlich sinnvoll und technisch machbar – zu automatisieren. Die Zielsetzungen sind dabei Personalkostensenkungen sowie ein gleichmäßiger reproduzierbarer Betrieb der Anlagen zur Vermeidung von Überlastungen und Minimierung von Schäden. In einer mehrstufigen Strategie [1] wird der Automatisierungsgrad der Großgeräte sukzessive erhöht. Derzeit befindet sich der zweite Automatisierungsschritt, in dem die Vollautomatisierung der Beladewagen Kernmodul ist, in der Umsetzung.

Der Beladewagen ist das Bindeglied zwischen Schaufelradbagger und Bandanlage. Er ist üblicherweise über eine Teleskopbrücke mit dem Hauptgerät verbunden und folgt diesem in den Grenzen des Brückenauszugs (s. Abbildung 1). Im Rheinischen Braunkohlenrevier der RWE Power AG werden 20 Schaufelradbagger betrieben, von denen 17 über einen Beladewagen mit angehängtem Aufgabebisch verfügen. Die Aufgabe des Materials auf das Förderband erfolgt dabei, indem der mit Girlanden ausgestattete Aufgabebisch das Band am Punkt der Materialaufgabe führt und präzise positioniert.

Bis 2004 wurden viele Beladewagen im Zuge des ersten Automatisierungsschrittes teilautomatisiert [2]. In dieser Betriebsart wird der Aufgabebisch in der vom Geräteführer eingestellten Position gehalten und der Geradlauf des Förderbandes überwacht. Somit muss der Beladewagen nur dann mit einem Geräteführer besetzt werden, wenn er verfahren werden soll (ca. 30 % der Betriebszeit). Ziel der Vollautomatisierung ist, zusätzlich die Lenkung und die Anstellantriebe des Aufgabebisches zu steuern und somit sämtliche Bedienfunktionen zu automatisieren.

Das Projekt stellt eine besondere Herausforderung an die Ingenieure dar, da keine fertige Komplettlösung verfügbar ist, auf die zurückgegriffen werden kann. Vielmehr mussten neue Techniken entwickelt und existierende Produkte so integriert werden, dass sie sowohl den rauen Umgebungsbedingungen des Tagebaubetriebes standhalten als auch die sicherheitstechnischen Erfordernisse erfüllen.

Die Umsetzung des Pilotprojektes „Vollautomatisierung Beladewagen“ erfolgte durch die Firma Cegelec am Bagger 282 im Tagebau Inden, wobei die Firma indurad als Unterlieferant der Radarsensorik fungierte. Das im Folgenden exemplarisch vorgestellte Konzept ist auf sämtliche Beladewagen anwendbar, die über einen angehängten Aufgabebisch verfügen.

Dipl.-Ing. ARNE VESTWEBER,
RWE Power AG, Frechener Straße 12, D-50226 Frechen
Tel. +49 (0) 2234-935-69641, Fax +49 (0) 201-1212-32105
e-mail: Arne.Vestweber@rwe.com

Dr.-Ing. REIK WINKEL, MBA,
indurad GmbH – The Industrial Radar Company,
Marienbongard 10, D-52062 Aachen
Tel. +49 (0) 241-538070-70, Fax +49 (0) 241 538070-99
e-mail: reik.winkel@indurad.com

Dipl.-Ing. WILFRIED GAU,
RWE Power AG, Dürwisser Straße, D-52249 Eschweiler
Tel. +49 (0) 2403-994-64700, Fax +49 (0) 2403-994-88-64700
e-mail: Wilfried.Gau@rwe.com

Dipl.-Ing. HARTWIG RESSING,
Cegelec Automatisierungstechnik GmbH & Co. KG,
Widdersdorfer Straße 205, D-50825 Köln
Tel. +49 (0) 221-5491-261, Fax +49 (0) 221-5491-271
e-mail: hartwig.ressing@cegelec.com

table is kept in the position set by the equipment operator and the running of the conveyor belt monitored. Thus, the loading unit needs to be staffed with an operator only when it is to be traversed (approx. 30 % of the operating time). The aim of automation is to additionally control the steering and the slewing and hoisting drives of the feeding table, hence automating all operating functions.

This project poses a special challenge to the engineers as there is no ready-made complete solution available that they could fall back on. Instead, new technologies had to be developed and existing products integrated in a way that enables them both to withstand the rough conditions prevailing in an opencast mine and to meet safety requirements.

The "Loading unit automation" pilot project was implemented on excavator 282 in the Inden opencast mine by the Cegelec Company, with the subcontractor indurad supplying the radar sensor technology. The concept outlined by way of example in the following is applicable to all loading units equipped with a feeding table.

2 System overview and automation concept

The automatic system of the loading unit covers virtually all operating situations. Only a few special situations, such as equipment transport outside the belt conveyors or the avoidance of obstacles (e.g. drainage wells), necessitate manual operation of the car. To exploit synergies, the automatic system is based on the technology used for and experience gained with the semi-automatic system. In addition, there is always the backup option of deactivating the automatic functions and operating the equipment manually.

To do justice to the project's high degree of innovation and fulfil the complex requirements, the pilot device was gradually developed in three automation steps covering all stages up to the production of the planned overall functionality:

1. control of the feeding table (Chapter 2.4),
2. steering control of the loading unit (Chapter 2.5),
3. drive command generation for the loading unit (Chapter 2.6).

The fully automatic system is designed such that it can be activated from the operator's cabin of the loading unit. Subsequently, all sub-modes and functions can be selected from the operator's cabin of the excavator, so that the loading unit operator's cabin no longer needs to be staffed. Detailed settings of individual parameters of the automatic system can only be made by trained and qualified electronics personnel in the switchgear of the loading unit.

2.1 Functional safety

When integrating new technology, the fulfilment of safety requirements always takes top priority. At the start of the automation project, a safety review on the basis of the new DIN EN ISO 13849-1 standard was thus systematically developed by an interdisciplinary team. The key element of this safety review is a risk assessment (conducted here in accordance with the DIN EN ISO 14121-1 standard), which serves to identify risks and determine the resulting requirements to be met by the safety-relevant part of the control system.

The review showed that automation and the associated reduction in crew numbers entail new risks, in particular collisions of the feeding table with the conveyor frames caused by malfunctions of the automatic system and collisions of the feeding table with front or rear terminals.

To reduce these risks, a collision protection device (cf. Figure 3) was designed which, by testing for an electrical earth fault in case of contact with earthed parts, stops all slewing and hoisting drives of the loading unit before a collision occurs. A circuit structure with two parallel paths, one of which in conventional contactor design, enables the required safety level (Performance Level c) to be reached.

2 Systemübersicht und Automatisierungskonzept

Die Vollautomatisierung des Beladewagens deckt nahezu alle Betriebssituationen ab. Nur in wenigen Sondersituationen wie Gerätetransporten außerhalb der Bandanlagen oder dem Umfahren von Hindernissen (z.B. Entwässerungsbrunnen) ist eine manuelle Bedienung des Gerätes erforderlich. Um Synergieeffekte zu nutzen basiert die Vollautomatik auf der Technik und den Erfahrungswerten der Teilautomatik. Darüber hinaus existiert als Rückfallebene stets die Möglichkeit, die Automatikfunktionen zu deaktivieren und die Geräte manuell zu bedienen.

Um dem hohen Innovationsgrad des Projektes und den komplexen Anforderungen gerecht zu werden wurde das Pilotgerät in drei Automatisierungsstufen sukzessive bis zur Herstellung der geplanten Gesamtfunktionalität entwickelt:

1. Regelung des Aufgabebetisches (Kapitel 2.4),
2. Lenkungsregelung des Beladewagens (Kapitel 2.5),
3. Generierung der Fahrbefehle des Beladewagens (Kapitel 2.6).

Die Vollautomatik ist so konzipiert, dass die Anwahl der Automatik aus dem Beladewagenführerstand erfolgt. Danach können sämtliche Unterbetriebsarten und Funktionen vom Hauptgeräteführerstand aus angewählt werden, sodass kein Personal mehr an den Beladewagenführerstand gebunden ist. Detaileinstellungen einzelner Parameter der Automatik können ausschließlich von geschultem Elektrofachpersonal in der Schaltanlage des Beladewagens vorgenommen werden.

2.1 Funktionale Sicherheit

Bei der Integration neuer Technik ist die Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen stets die oberste Prämisse. Zu Beginn des Automatisierungsvorhabens wurde daher auf Basis der neuen Norm DIN EN ISO 13849-1 eine Sicherheitsbetrachtung systematisch von einem interdisziplinären Team entwickelt. Zentraler Bestandteil einer Sicherheitsbetrachtung ist die Gefahrenanalyse (hier durchgeführt nach Norm DIN EN ISO 14121-1), in der die Gefahren identifiziert und die sich daraus ergebenden Anforderungen an den sicherheitsgerichteten Teil der Steuerung ermittelt werden.

Die Analyse zeigte, dass sich neue Gefahren durch die Automatisierung und die damit einhergehende Reduzierung der Gerätebesatzung ergeben. In erster Linie sind dies Kollisionen des Aufgabebetisches mit den Bandgerüsten durch eine Fehlfunktion der Automatik sowie Kollisionen des Aufgabebetisches mit Front- oder Heckstationen.

Um diesen Gefahren zu begegnen wurde eine Kollisionsschutzeinrichtung (vgl. Abbildung 3) konstruiert, welche durch Prüfung auf einen elektrischen Erdschluss bei Berührung mit geerdeten Teilen sämtliche Anstellantriebe des Beladewagens vor Eintreten einer Kollision stoppt. Durch eine Schaltungsstruktur mit zwei parallelen Pfaden, von denen einer in konventioneller Schütztechnik realisiert ist, wird das geforderte Sicherheitsniveau (Performance Level c) erreicht.

Die Sicherheitsbetrachtung zeigte darüber hinaus, dass die implementierten RWE Power Normschaltungen den Anforderungen genügen und der 1963 in Betrieb genommene Bagger 282 auch mit Vollautomatisierung des Beladewagens nach wie vor sicher betrieben wird.

2.2 Sensortechnik

Zentraler Bestandteil von Automatisierungssystemen ist neben der Regelungs- und der Steuerungstechnik die Messung der relevanten Größen, die hier durch die in Abbildung 1 dargestellte Sensorik realisiert wird. Wesentliche Aufgabe bei der Projektumsetzung ist die Integration der unterschiedlichen Sensoren in das Gesamtsystem.

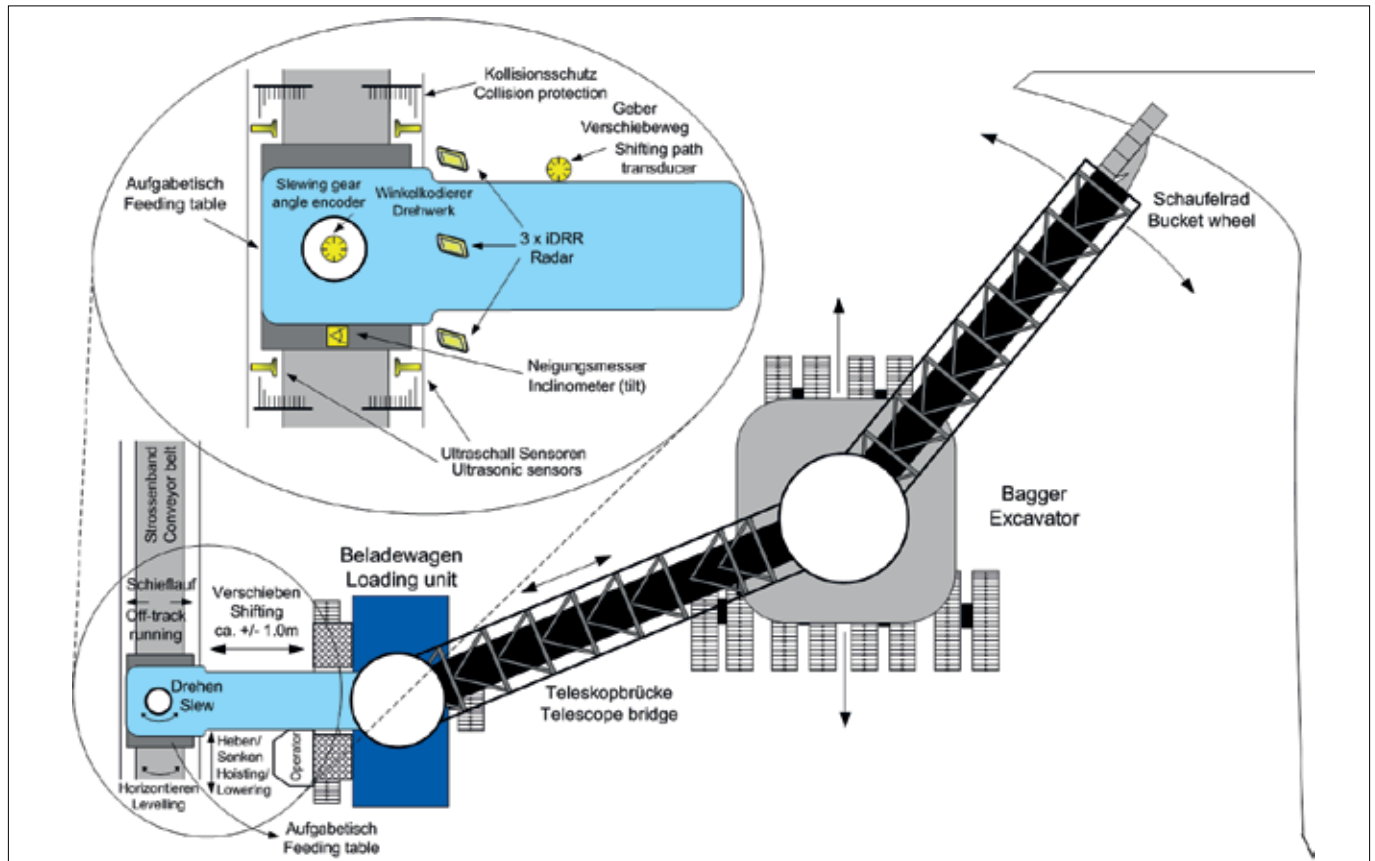


Fig. 1: Overview of the adjustment options of the loading unit and the sensors installed on excavator 282

Abb. 1: Übersicht über die Anstellmöglichkeiten des Beladewagens und die verwendete Sensorik am Bagger 282

The safety review also showed that the implemented RWE Power standard circuits fulfil the requirements and that excavator 282, commissioned in 1963, can still be operated safely after fitting the loading unit with a fully automatic system.

2.2 Sensor technology

The central task of automation systems, apart from I&C, is the measurement of relevant variables, which in this case is performed by the sensors shown in Figure 1. One of the main tasks to be fulfilled in the execution of the project is the integration of the various sensors into the overall system.

To establish the lateral inclination of the feeding table, an inclinometer that determines absolute inclination relative to the earth's surface was installed. Lateral belt offset in the feeding table is detected by four ultrasonic sensors [2] that determine the distance to the belt edges. An angle encoder establishes the rotation of the feeding table and a transducer the extension of the discharge belt. In addition, the measured quantities of sensors that already exist, e.g. the position of the travel gear steering shaft or bridge angle and extension, are used.

There was no known, tried and tested solution available for determining the relative position between the feeding table and the conveyor frames. Within the scope of extensive field trials different ultrasonic sensors, RFID systems and radar sensors were tested for use on the feeding table [3]. In addition, the option of using the laser sensors that were chosen for the automatic system of the trippers [4] only a few years ago was assessed. The RFID systems turned out to be unsuitable as did the ultrasonic sensors due to lacking reliability regarding the required measuring distance and the fact that they merely have a one-dimensional measurement range.

Thanks to the considerable advance in radar technology, radar sensors forming two-dimensional images were available for the

Zur Erfassung der Querneigung des Aufgabebisches wurde ein Neigungssensor installiert, der die absolute Neigung zur Erdoberfläche bestimmt. Den seitlichen Gurtversatz im Aufgabebisch detektieren vier Ultraschallsensoren [2] durch Ermittlung des Abstandes zu den Bandkanten. Ein Winklkodierer ermittelt die Drehung des Aufgabebisches, ein Geber den Auszug des Abwurfbandes. Darüber hinaus werden Messgrößen bereits vorhandener Sensorik verwendet, wie z.B. die Spindelstellung der Fahrwerks-Lenkspindel oder Brückenwinkel und -auszug.

Zur Realisierung der relativen Positionsbestimmung zwischen Aufgabebisch und Bandgerüsten existierte keine bekannte ausgereifte und erprobte Lösung. Im Rahmen umfangreicher Feldversuche wurden verschiedene Ultraschallsensoren, RFID-Systeme und Radarsensoren für den Einsatz am Aufgabebisch erprobt [3]. Darüber hinaus wurde die Einsatzmöglichkeit der erst vor einigen Jahren für die Automatisierung der Bandschleifenwagen [4] ausgewählten Lasersensoren beurteilt. Die RFID-Systeme stellten sich als nicht geeignet heraus. Auch die Ultraschallsensoren schieden aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit in der notwendigen Messdistanz und wegen des lediglich eindimensionalen Messbereichs aus.

Dank des erheblichen Fortschritts in der Radartechnik standen für die Versuche zweidimensional abbildende Radarsensoren zur Verfügung. Eindimensionale Füllstandsradarsensoren haben sich in vielen anspruchsvollen Messumgebungen bereits als Stand der Technik etabliert. Radartechnik hat im Vergleich zu Lasertechnik den Vorteil, dass die Messungen von Umgebungsfaktoren wie Staub, Nebel, Regen und Schnee nicht signifikant beeinflusst werden. Dies liegt an der unterschiedlichen Wellenlänge der jeweils genutzten elektromagnetischen Strahlung ($\lambda_{\text{Laser}} = 1 \mu\text{m}$; $\lambda_{\text{Radar}} = 4 \text{mm}$). Sind die schwebenden Partikel in der Luft größer als die zum Messen genutzte Wellenlänge, verursachen diese ungewollte Streuungen und Reflektionen. Da fast alle in der Luft frei schwebenden Partikel größer als die Laserwellenlänge sind,

tests. One-dimensional level radar sensors have established themselves as state of the art in many challenging measuring environments. Compared with laser technology, radar technology has the benefit of measurements not being significantly influenced by ambient factors such as dust, fog, rain or snow. This is due to the different wavelengths of the electromagnetic radiation used in each case ($\lambda_{\text{Laser}} = 1 \mu\text{m}$; $\lambda_{\text{Radar}} = 4 \text{mm}$). If the floating particles in the air are larger than the wavelengths used for the measurement, they cause unintentional scattering and reflections. Since almost all particles floating in the air are larger than the laser wavelength, the rough environment results in errors in the case of laser measurements. Owing to their longer wavelength, radar sensors furnish both reliable values and enable measurements to be taken even if the sensor disc is soiled. Another significant advantage of radar technology is the robust component design. High vibratory loads occur at the feeding table (mounting location of the radar sensors), thus damage to the optical system and precision parts of the laser sensors is likely. Radar sensors, on the other hand, have already proven their robustness in the case of heavy vibratory and shock loads when installed on shearers employed in underground coal mining [5].

For these reasons, radar sensors were identified as suitable technology for this application. The high range and angular resolution required for automation was achieved only by the indurad DualRangeRadar (iDRR).

2.3 Radar sensor technology

The job of the radar sensors is to determine the height (x) and lateral offset (y) of the feeding table relative to the conveyor frames and the angle between the loading unit and the belt conveyor. This data is used as a basis for controlling the feeding table and steering the loading unit.

Since the integration of the radar sensors into the overall system was an innovative task with a high development share, this sensor technology and method are described in detail in the following.

2.3.1 Hardware

The employed iDRR has a wide measurement range of $\pm 25^\circ$ (Figure 2) and is able to supply consistently high angular accuracy. Several objects at the same distance can also be neatly separated into individual reflection centres (e.g. idlers and frame edge or water tube and frame edge). In addition, it is possible to electronically readjust the iDRR by $\pm 16^\circ$ perpendicularly to the 2D representation direction, permitting the rotation of the feeding table of approx. $\pm 3^\circ$ to be compensated and the backscatter of extremely high frequency to be maximized.

2.3.2 Installation

Three iDRR sensors, spaced approx. 2.50 m apart, were installed on the loading unit. The conveyor frames were defined as a reference for determining the position of the loading unit. To allow gaps between the 7.50 m long conveyor frames to be bridged and ensure that valid data is available as a positioning basis, three sensors were installed per loading unit.

The alignment of the iDRR sensors was optimized such that they are a) perpendicular to the external plate of the conveyor frame edges, so that as much energy as possible is reflected and b) arranged at a sufficient distance so that the frame edges are registered even with maximum car movements. To prevent interference with the travel path, they were installed on excavator 282 at a maximum distance of 1.20 m to the conveyor frame (Figure 3).

2.3.3 Data acquisition and processing

All radar sensors record their surroundings 15 times per second and transmit the raw data to the indurad RadarProcessingUnit (iRPU) per CAN bus. The iRPU is based on an industrial PC (IPC)

kommt es in der rauen Umgebung bei einer Lasermessung zu Fehlergebnissen. Aufgrund der größeren Wellenlänge liefert die Radarsensorik nicht nur zuverlässige Messwerte, sondern ermöglicht auch Messungen bei verschmutzter Sensorscheibe. Ein weiterer bedeutender Vorteil der Radartechnik ist die robuste Ausführung der Komponenten. Am Aufgabebereich (Montageposition der Radarsensoren) bestehen hohe Vibrationsbelastungen, sodass Schäden an der Optik und Feinmechanik der Lasersensoren zu befürchten sind. Radarsensoren dagegen haben sich bereits bei starken Schwingungs- und Schockbelastungen beim Einsatz auf einem Walzenschrämlader im untertägigen Steinkohlenbergbau als robust erwiesen [5].

Aus diesen Gründen wurde die Radarsensorik als geeignete Technik für diesen Anwendungsfall identifiziert. Die zur Automatisierung benötigte genaue Entfernung- und Winkelauflösung wurde lediglich durch den indurad DualRangeRadar (iDRR) erreicht.

2.3 Radarsensorik

Die Aufgabe der Radarsensoren besteht darin, Höhe (x) und seitlichen Versatz (y) des Aufgabebereiches relativ zu den Bandgerüsten und den Winkel zwischen Beladewagen und Bandanlage zu bestimmen. Genutzt werden diese Daten als Basis für die Regelung des Aufgabebereiches und die Lenkung des Beladewagens.

Da die Integration der Radarsensoren in das Gesamtsystem eine Aufgabe mit hohem Entwicklungsanteil und innovativem Charakter darstellte, wird diese Sensorik und Verfahrensweise im Folgenden näher beschrieben.

2.3.1 Hardware

Der genutzte iDRR verfügt über einen breiten Messbereich von $\pm 25^\circ$ (Abbildung 2) und kann eine durchgehend hohe Winkelgenauigkeit liefern. Auch mehrere Objekte in gleicher Entfernung lassen sich sauber in einzelne Reflexionszentren trennen (z.B. Bandrollen und Gerüstkante oder Wasserrohr und Gerüstkante). Zudem lässt sich der iDRR senkrecht zur 2D-Abbildungsrichtung noch um $\pm 16^\circ$ elektronisch nachjustieren, wodurch die Verdrehung des Aufgabebereiches von ca. $\pm 3^\circ$ kompensiert und die Rückstreuung der Millimeterwellen maximiert wird.

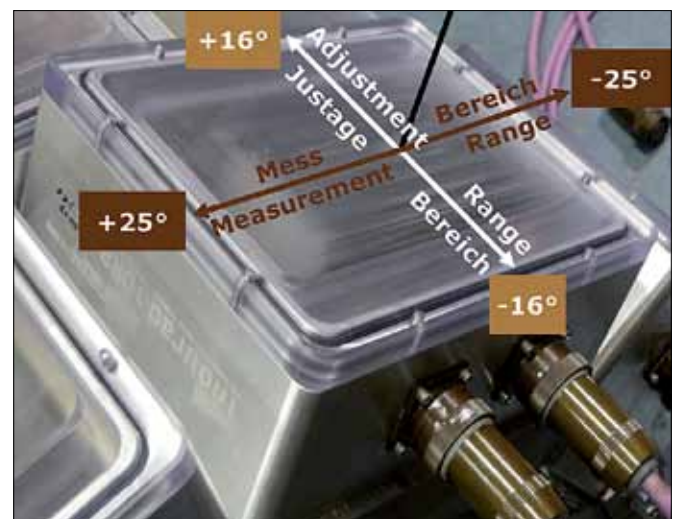


Fig. 2: iDRR sensor with measurement range and adjustment range
 Abb. 2: iDRR-Sensor mit Messbereich und Justagebereich

2.3.2 Installation

Auf dem Beladewagen werden drei iDRR-Sensoren mit einem Abstand von ca. 2,50 m eingesetzt. Als Referenz für die Positionsbestimmung des Beladewagens wurden die jeweiligen Bandgerüste definiert. Damit Lücken zwischen den etwa 7,50 m

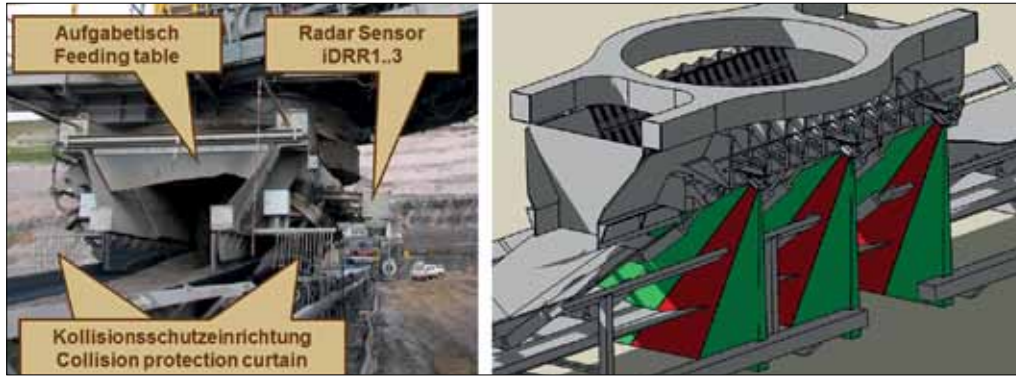


Fig. 3: Mounting position and alignment of the iDRR sensors and the collision protection curtains
 Abb. 3: Montageposition und Ausrichtung der iDRR-Sensoren sowie der Kollisionsschutzeinrichtungen

platform with a Linux operating system and the indurad software framework. The iRPU determines the position of the reflection centres in terms of distance, angle and intensity and classifies and filters it on the basis of geometric criteria (by conveyor frame edge, water tube, ground and garlands, etc.). The data is processed in 500-ms intervals to permit the noise caused by vibrations and other disturbances to be eliminated by averaging right at the start of the processing chain. With the aid of tracking filters, the distance to the conveyor frame edge is individually determined by all sensors and converted to Cartesian coordinates (x, y). Subsequently, the three pairs of variates are compared.

In addition, the iRPU, using a computational model, calculates a virtual regression line that represents the angle between the loading unit and the belt conveyor as “travel direction offset with an accuracy of about 0.1°”. This angle, determined over several conveyor frames, is used as an input variable for the steering control system of the loading unit.

2.3.4 Data analysis

Figure 4, top left, shows the positions of the three iDRR sensors and a frame gap by way of example. The top right diagram shows the progression of the x and y values over about three conveyor frames in automatic mode. As can be seen, the independent recordings of the three sensors are precise and consistent in a

langen Bandgerüsten überbrückt werden können und stets valide Daten als Basis der Positionierung vorhanden sind, wurden pro Beladewagen drei Sensoren montiert.

Die Ausrichtung der iDRR Sensoren wurde dahingehend optimiert, dass sie a) senkrecht zu dem Außenblech der Bandgerüstkanten stehen, damit möglichst viel Energie zurück gestrahlt wird, und b) soweit entfernt angebracht sind, dass auch bei maximalen Bewegungen des Gerätes die Gerüstkanten erfasst werden. Um den Fahrweg nicht zu beeinträchtigen, wurden sie auf dem Bagger 282 in max. 1,20 m Entfernung zur Bandgerüstkante installiert (Abbildung 3).

2.3.3 Datenerfassung und -verarbeitung

Alle Radarsensoren erfassen das Umfeld 15 Mal pro Sekunde und leiten die Rohdaten per CAN-Bus an die indurad RadarProcessingUnit (iRPU) weiter. Die iRPU basiert auf einer Industrie-PC (IPC) Plattform mit einem Linux-Betriebssystem und dem indurad Software Framework. Auf der iRPU wird die Lage der Reflexionszentren in Entfernung, Winkel und Intensität bestimmt und anhand geometrischer Kriterien klassifiziert und gefiltert (in Bandgerüstkante, Wasserrohr, Boden, Girlanden usw.). Die Daten werden in 500-ms-Intervallen verarbeitet, um bereits am Anfang der Verarbeitungskette das durch Schwingungen und andere Störgrößen hervorgerufene Rauschen durch Mittelung zu eliminieren. Mit Hilfe

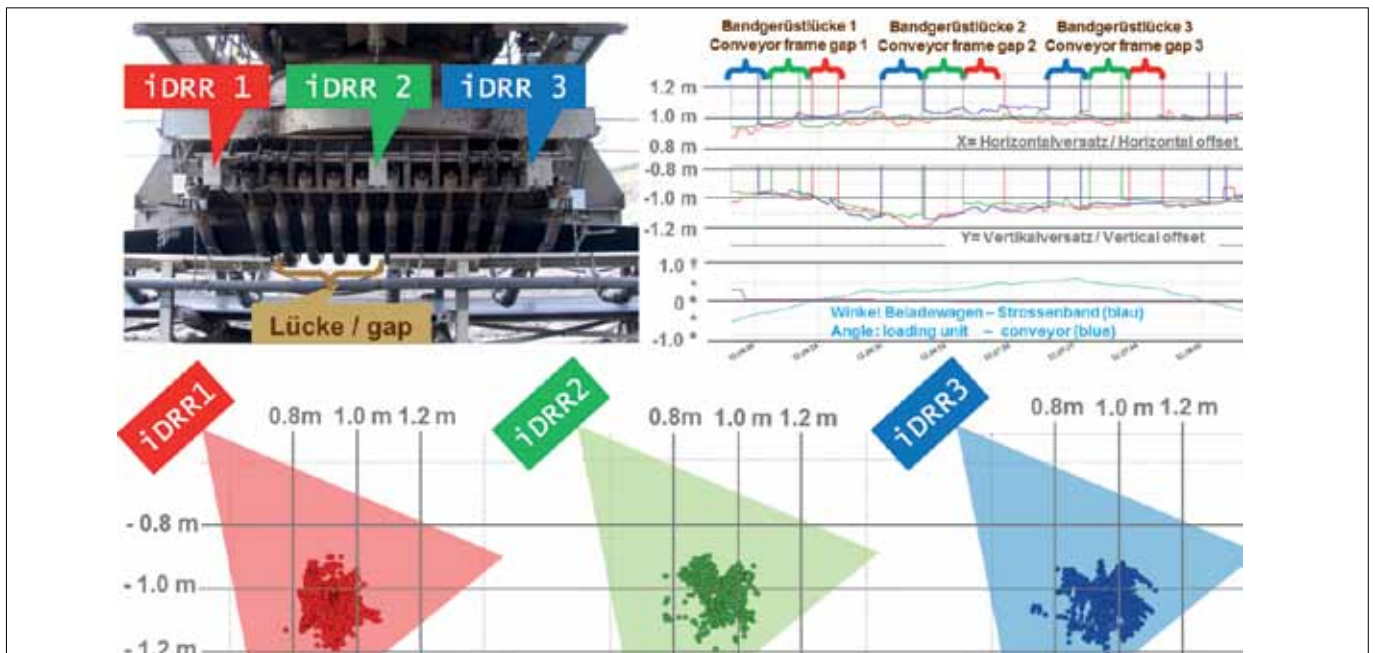


Fig. 4: Arrangement of the iDRR sensors (top left), position-time diagram of the measured values over three conveyor frames (top right) and x,y scatter diagrams over approx. 15 conveyor frames (bottom)

Abb. 4: Anordnung der iDRR-Sensoren (oben links), Position-Zeit-Diagramm der Messwerte über drei Bandgerüste (oben rechts) und x,y-Punkt-diagramme über ca. 15 Bandgerüste (unten)

narrow corridor of ± 0.05 m, although the point being travelled over in each case is measured with a time lag.

The bottom diagram in Figure 4 shows the range in which the feeding table is moved relative to the conveyor frame edges in automatic mode. In the three x and y scatter diagrams, the positions are plotted over a travel distance of approx. 100 m or 15 conveyor frames in an accumulated manner. The movement range is in a narrow corridor of approx. ± 0.15 m, reducing even the usual movement range in manual mode. On the basis of the 2D iDRR radar sensors and an efficient, fault-tolerant evaluation algorithm, the radar solution provides a reliable foundation for the following control systems that is unaffected by weather conditions.

2.4 Control of the feeding table

The feeding table is positioned with the aid of four slewing and hoisting drives, three of which are designed hydraulically (discharge belt traversing drive, feeding table slewing gear, levelling mechanism of feeding table) and one electrically (feeding table hoist winch) in the case of the pilot device.

Even though the specific requirements to be met by the various slewing and hoisting drive control systems vary, the balance between the control quality and stress on the drives must always be optimized since these factors normally have a negative effect on each other.

2.4.1 Control of feeding table height above the conveyor frame

The feeding table can be raised and lowered by means of a hoist winch. If the feeding table is positioned too low, it threatens to collide with the frames. If it is too high, lifting and sagging of the belt are increased, the load on the idlers of the feeding table is too high and, especially in poor weather conditions, off-track running of the belt is promoted.

The averaged height values of the radar sensors are used as a basis for controlling the height of the feeding table. A three-position controller ensures that the deviation of the actual from the setpoint values stays in a defined range at all times. The switching points were determined by experiments such that they permit sufficiently precise positioning while limiting the number of adjustment movements. If the loading unit is traversed, the height setpoint automatically increases by a parameterizable factor, since there would otherwise be a risk of collision during travel due to the unevenness of the working level.

2.4.2 Control of the lateral position of the feeding table and belt running within the feeding table

If the distance between the loading unit and the conveyor frames changes, this has to be compensated by the traversing drive of the discharge belt so that the conveyor belt can still be guided centrally over the frames. If the radar sensors detect too large a lateral offset of the feeding table, the drive is controlled according to a similar principle as when controlling height.

If the lateral position of the conveyor belt substantially deviates from the centre, this may lead to material being unloaded next to the conveyor or to the belt folding onto itself. Rotating the feeding table eliminates this problem, as this results in a lateral offset of the belt. With the aid of the ultrasonic sensor data the position of the belt is established and used to calculate a setpoint for the angular position of the feeding table. It is positioned according to the setpoint by automatic control of the slewing gear.

2.4.3 Control of the lateral inclination of the feeding table

To enable a precise adjustment of belt running via the slewing gear even in varying load conditions, the lateral inclination of the feeding table must always remain in the region of the zero position. The automatic system counteracts deviations by controlling

von Trackingfiltern wird der Abstand zur Bandgerüstkante von allen Sensoren einzeln ermittelt und in kartesische Koordinaten (x,y) umgerechnet. Daraufhin werden die drei Wertepaare verglichen.

Weiterhin berechnet die iRPU mit einem Rechenmodell eine virtuelle Regressionsgerade, die den Winkel zwischen Beladewagen und Bandanlage als „Fahrtrichtungsoffset“ mit einer Genauigkeit von etwa $0,1^\circ$ darstellt. Dieser über mehrere Bandgerüste ermittelte Winkel wird als Eingangsgröße der Lenkungsregelung des Beladewagens verwendet.

2.3.4 Datenanalyse

In Abbildung 4 sind oben links die Positionen der drei iDRR Sensoren sowie eine Gerüstlücke beispielhaft gekennzeichnet. Die nebenstehende Grafik oben rechts zeigt den Verlauf der x- und y-Werte über etwa drei Bandgerüste bei Automatikfahrt. Deutlich wird, dass die von den drei Sensoren unabhängig erfassten Werte in einem engen Korridor von $\pm 0,05$ m präzise und plausibel erfasst werden, obwohl der jeweils überfahrene Punkt zeitversetzt gemessen wird.

Die untere Grafik in der Abbildung 4 zeigt den Bereich, in dem der Aufgabetisch relativ zu den Bandgerüstkanten im Automatikbetrieb bewegt wird. In den drei x- und y-Punktdiagrammen sind die Positionen über ca. 100 m Fahrweg bzw. 15 Bandgerüste akkumuliert aufgetragen. Der Bewegungsbereich liegt in einem engen Korridor von ca. $\pm 0,15$ m und verkleinert damit sogar den im manuellen Modus üblichen Bewegungsbereich. Die Radarlösung stellt auf Basis der 2D-iDRR-Radarsensoren und einem leistungsfähigen und fehlertoleranten Auswertalgorithmus eine zuverlässige witterungsunabhängige Grundlage für die nachfolgenden Regelungen zur Verfügung.

2.4 Regelung des Aufgabetisches

Die Positionierung des Aufgabetisches wird mit Hilfe von vier Anstellantrieben durchgeführt, von denen beim Pilotgerät drei Antriebe hydraulisch (Verfahrentrieb Abwurfband, Drehwerk Aufgabetisch, Horizontierung Aufgabetisch) und ein Antrieb elektrisch (Hubwinde Aufgabetisch) ausgeführt ist.

Auch wenn sich die konkreten Aufgabenstellungen an die Regelungen der einzelnen Anstellantriebe unterscheiden, muss stets eine Optimierung zwischen Regelgüte und Beanspruchung der Antriebe erfolgen, da sich diese Faktoren im Normalfall gegenseitig negativ beeinflussen.

2.4.1 Regelung der Höhe des Aufgabetisches über dem Bandgerüst

Der Aufgabetisch kann mittels Hubwinde in seiner Höhe verstellt werden. Ist der Aufgabetisch zu niedrig positioniert, droht Kollision mit den Gerüsten. Bei zu hoher Positionierung werden Aufmuldung und Durchhang des Bandes erhöht, die Rollen des Aufgabetisches zu hoch belastet und – insbesondere bei schlechten Wetterbedingungen – der Schiefelauf des Bandes gefördert.

Als Grundlage für die Höhenregelung des Aufgabetisches dienen die gemittelten Höhenmesswerte der Radarsensoren. Ein Dreipunktregler sorgt dafür, dass die Abweichung von Soll- und Istwert stets in einem definierten Bereich liegt. Die Schaltpunkte wurden experimentell so ermittelt, dass diese eine ausreichend genaue Positionierung bei gleichzeitig geringer Anzahl von Anstellbewegungen zulassen. Wird der Beladewagen verfahren, erhöht sich der Höhensollwert automatisch um einen parametrierbaren Betrag, da sonst wegen Unebenheiten des Planums während der Fahrt Kollisionsgefahr bestehen würde.

2.4.2 Regelung der seitlichen Lage des Aufgabetisches und des Gurtaufes innerhalb des Aufgabetisches

Verändert sich der Abstand des Beladewagens zu den Bandgerüsten, muss dies, um den Fördergurt weiterhin mittig über die

the levelling mechanism on the basis of the data measured by an inclinometer.

2.5 Steering control of the loading unit

The greatest challenge in terms of control was the steering control system. It is intended to guarantee that the loading unit always moves parallel to the conveyor frames at a constant distance, while fulfilling control quality requirements. The only manipulated variable is the steering shaft, which permits angle ϕ (Figure 5) of the two steerable travel gear units to be modified in opposite directions. The extension path of the discharge belt boom and the x values of the radar sensors are used to determine the distance between the loading unit and the conveyor frames. Angle λ can be determined from the regression line calculated by the inductad RadarProcessingUnit. This data is the input variable for the control system. This system is designed in a cascaded manner, with the angle controller forming the internal control loop and the distance controller constituting the superordinate external control loop. A shaft position setpoint is formed on the basis of the control process. If it deviates from the actual value, the adjustment movements of the steering shaft required to correct the car's position are triggered during travelling motions of the loading unit.

Implementation was a complex matter for several reasons, including:

- inaccuracies in the determination of the distance and angle between the loading unit and the belt conveyor caused by measuring inaccuracies, necessary smoothing effects in the evaluation algorithm and rough ambient conditions,
- non-linear steering behaviour due to load dependence when the steering shaft was controlled,
- limited testing opportunities due to high time requirements and high maintenance costs,
- interdependence of the manipulated variables of distance and angle due to the characteristics of the tandem travel gear,
- effects of the uneven working level, varying horizontal forces of the bridge support and internal clearance in the steering mechanism on the steering behaviour of the loading unit.

The steering control parameters had to be optimized. Test runs showed that the control quality was insufficient in some situations.

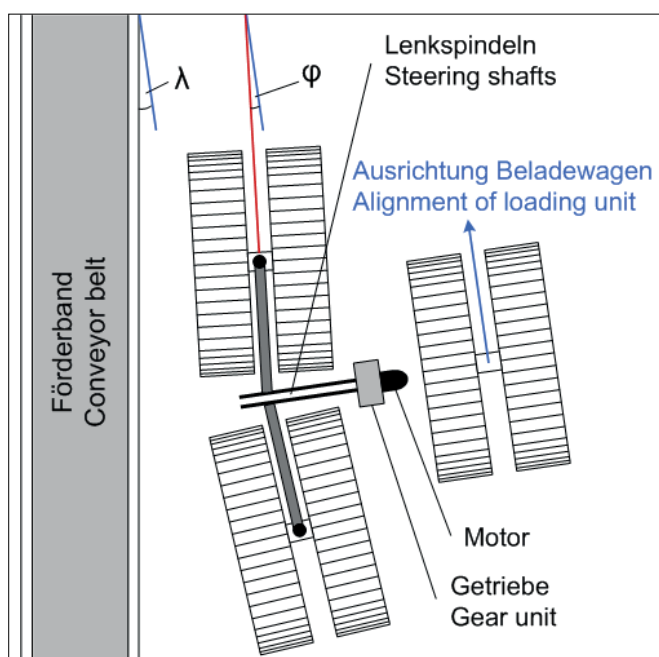


Fig. 5: Schematic diagram of the loading unit's steering system
Abb. 5: Prinzipdarstellung des Lenksystems des Beladewagens

Gerüste führen zu können, über den Verfahrentrieb des Abwurfbandes ausgeglichen werden. Wird von den Radarsensoren ein zu großer seitlicher Versatz des Aufgabebisches detektiert, erfolgt nach vergleichbarem Prinzip – wie bei der Höhenregelung – die Ansteuerung des Antriebs.

Weicht die seitliche Position des Förderbandes im Aufgabebisch deutlich von der Mittellage ab, kann dies zu Materialabladungen neben dem Band oder zum Umklappen des Bandes führen. Durch Verdrehen des Aufgabebisches kann dem entgegen gewirkt werden, da dadurch ein Querversatz des Gurtes herbeigeführt wird. Mit Hilfe der Ultraschallsensordaten wird eine Lageerfassung des Bandes durchgeführt und daraus ein Sollwert für die Winkelstellung des Aufgabebisches errechnet. Durch eine automatische Ansteuerung des Drehwerkes erfolgt die Positionierung auf den Sollwert.

2.4.3 Regelung der Querneigung des Aufgabebisches

Um auch bei wechselnden Lastverhältnissen eine präzise Einstellung des Gurtlaufs über das Drehwerk vornehmen zu können, muss die Querneigung des Aufgabebisches stets im Bereich der Null-Lage gehalten werden. Die Automatik wirkt Abweichungen – auf Basis der Messdaten eines Neigungssensors – durch Ansteuerung der Horizontierung entgegen.

2.5 Lenkungsregelung des Beladewagens

Die größte regelungstechnische Herausforderung bestand in der Realisierung der Lenkungsregelung. Diese hat zum Ziel, eine mit gleichem Abstand konstant parallele Fahrt des Beladewagens zu den Bandgerüsten unter Einhaltung der benötigten Regelgüte zu gewährleisten. Die einzige Stellgröße ist dabei die Lenkspindel, über die der Winkel ϕ (Abbildung 5) der beiden lenkbaren Fahrwerke in gegenläufiger Richtung verändert werden kann. Über den Auszugweg des Abwurfbandauslegers und die x-Werte der Radarsensoren wird der Abstand zwischen dem Beladewagen und den Bandgerüsten bestimmt. Der Winkel λ ergibt sich aus der in der inductad RadarProcessingUnit berechneten Regressionsgerade. Diese Daten stellen die Eingangsgrößen der Regelung dar. Die Regelung ist kaskadiert aufgebaut, wobei der Winkelregler den inneren Regelkreis bildet und der Abstandsregler den übergeordneten äußeren Regelkreis. Aus dieser Regelung wird ein resultierender Spindelstellungssollwert gebildet. Weicht dieser vom Istwert ab, wird bei Fahrbewegungen des Beladewagens die zur Korrektur benötigte Anstellbewegung der Lenkspindel ausgelöst.

Die Umsetzung wies aus verschiedenen Gründen einen komplexen Charakter auf. Diese waren:

- Ungenauigkeiten in der Bestimmung von Abstand und Winkel zwischen Beladewagen und Bandanlage durch Messungenauigkeiten, notwendige Glättungseffekte in der Auswertelalgorithmik und raue Umgebungsbedingungen,
- nicht lineares Lenkverhalten aufgrund Lastabhängigkeit bei Ansteuerung der Lenkspindel,
- eingeschränkte Testmöglichkeiten wegen hohen Zeitbedarfs und hoher Instandhaltungskosten,
- gegenseitige Abhängigkeit der Stellgrößen Abstand und Winkel durch die Charakteristik des Tandemfahrwerks,
- Einflüsse auf das Lenkverhalten des Beladewagens durch unebenes Planum, variierende Horizontalkräfte der Brückenaufgabe und Lose in der Lenkmechanik.

Optimierungsbedarf bestand im Hinblick auf die Parameter der Lenkungsregelung. In Fahrttests wurde beobachtet, dass die Regelgüte in einigen Situationen nicht ausreichend war. Dies war dann der Fall, wenn bei schräg zur Bandanlage stehendem Beladewagen häufige Fahrtrichtungswechsel vorgenommen wurden und dazwischen nur kurze Fahrstrecken von maximal 60 m lagen. Begründet werden kann dies durch Lose im Lenksystem, die hier besonderen Einfluss erhalten, da bei schräg stehendem

This was the case when frequent changes occurred in the direction of motion while the loading unit was positioned diagonally to the belt conveyor with only short distances of 60 m at most in between. This might be caused by internal clearance in the steering system that has a particularly strong effect because, if the loading unit is positioned diagonally, the required steering direction is opposed depending on the direction of motion. This problem was eliminated by increased steering movements within a short time span following the reversal of motion direction.

2.6 Generation of loading unit drive commands

According to the automation concept, loading unit travel is to be automated as well. The main job of the logic developed for the generation of drive commands is to position the loading unit such that it does not restrict the operation of the excavator. The logic was further optimized in line with these requirements, so that the distances to be covered are as short as possible. The calculations are based on the equipment geometries. Both the relative position of the loading unit and the excavator, which is determined on the basis of the bridge extension and angle, and the deployment situation of the excavator are of significance. Different parameter sets are used depending on whether the excavator moves in or counter to the working direction. Apart from the need to employ the specified, typical mining methods, the reason for this is that different distances are to be expected depending on the excavator operating mode.

In special situations not covered by this logic, the drive commands can be given manually from the operator’s cabin of the excavator, with the remaining functionality of the automatic system being maintained in its entirety.

3 Implementation

To keep interference with the mining processes to a minimum, new system components are always commissioned during short equipment outages or in coordination with parallel measures.

To ensure more efficient implementation, RWE Power increasingly uses virtual commissioning techniques [6]. Within the scope of a thesis [7], a model for the simulation of driving behaviour, steering

Beladewagen die benötigte Lenkungsrichtung je nach Fahrrichtung entgegengesetzt ist. Behoben wurde das Problem durch verstärkte Lenkbewegungen in einem kurzen Zeitbereich nach der Fahrtrichtungsumkehr.

2.6 Generierung der Fahrbefehle des Beladewagens

Das Automatisierungskonzept sieht vor, auch die Fahrt des Beladewagens automatisch durchzuführen. Die Hauptaufgabe der zur Erzeugung der Fahrbefehle entwickelten Logik ist dabei, den Beladewagen so zu positionieren, dass er den Geräteeinsatz des Bagger-Hauptgerätes nicht einschränkt. Unter Einhaltung dieser Vorgabe wurde die Logik weiter optimiert, sodass möglichst geringe Fahrdistanzen zurückgelegt werden müssen. Die Basis der Berechnungen sind die Gerätegeometrien. Dabei ist nicht nur die relative Position zwischen Beladewagen und Bagger-Hauptgerät von Bedeutung, die anhand des Brückenauszugs und Brückenwinkels ermittelt wird, sondern auch die Einsatzsituation des Großgerätes. Es werden unterschiedliche Parametersätze verwendet, abhängig davon, ob der Bagger in oder entgegen der Arbeitsrichtung fährt. Neben der Einhaltung der vorgegebenen typischen Abbauverfahrenswesen hat dies den Hintergrund, dass je nach Geräteeinsatz unterschiedliche Fahrstrecken zu erwarten sind.

In Sondersituationen, die nicht durch diese Logik abgedeckt werden können, ist es jederzeit möglich, die Fahrbefehle vom Hauptgeräteführerstand aus manuell abzusetzen. Dabei bleibt die übrige Funktionalität der Vollautomatik in vollem Umfang erhalten.

3 Implementierung

Um die Bergbauprozesse in möglichst geringem Maß zu beeinflussen, wird die Inbetriebnahme neuer Anlagenteile stets in kurzen Gerätestillständen oder in Absprache mit parallelen Maßnahmen durchgeführt.

Um eine effizientere Umsetzung zu ermöglichen kommen bei RWE Power vermehrt Techniken der virtuellen Inbetriebnahme [6] zum Einsatz. Im Zuge einer Diplomarbeit [7] wurde ein Modell zur Simulation des Fahrverhaltens, der Lenkungsregelung und der damit zusammenhängenden Störgrößen entwickelt. Dadurch

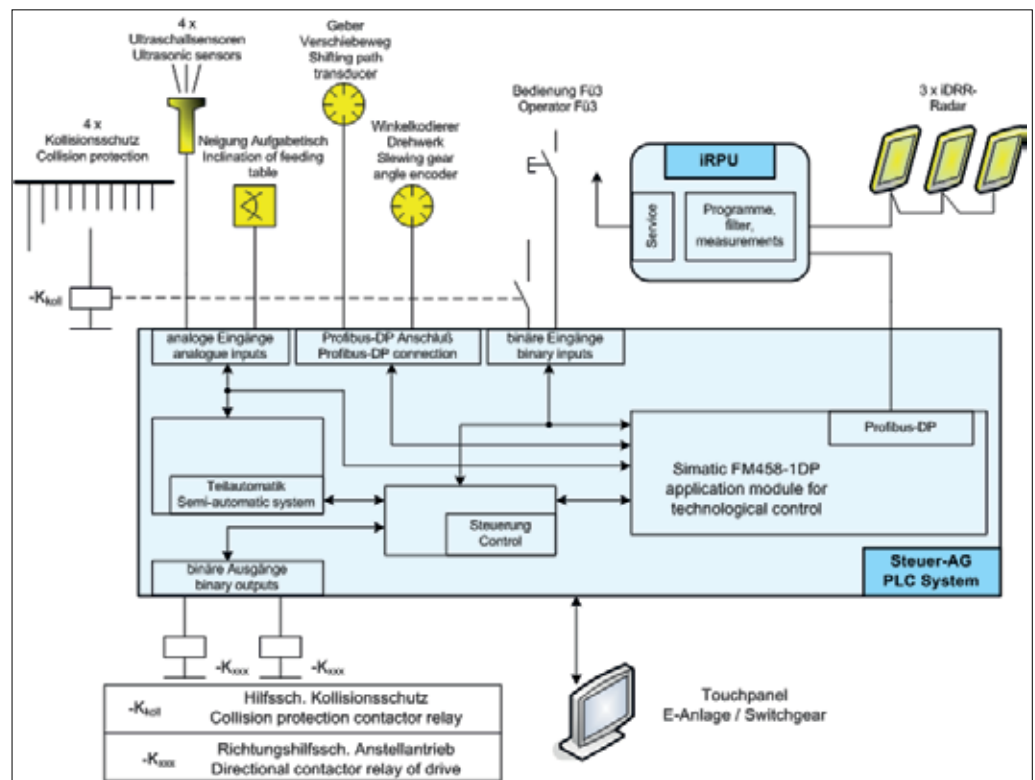


Fig. 6: Overview of the most important control modules and the sensor connection

Abb. 6: Übersicht über die wesentlichen Steuerungsbausteine und die Anbindung der Sensorik

control and the associated disturbances was developed. In this way, the feasibility of the control system could be proven and the effect of various disturbances determined. In addition, optimization measures could be carried out on the real equipment without the need for time-consuming and cost-intensive tests.

Since the automatic functions are integrated into the existing control structure, the smooth interaction of all installed components is of great significance. Figure 6 shows the most important control modules and the connection of the sensors. The core piece of the system is an automation system with an integrated control assembly that generates all control commands.

To allow effective optimization, efficient tools for the recording of the data of the automation system were used that also permit the application of complex mathematical functions to the stored data. Approx. 60 digital and analogue signals were constantly recorded and evaluated. Remote access to the employed PCs from the offices of the system suppliers and integrators was necessary to enable quick analysis and near real-time elimination of errors. In addition, video recordings were able to provide in-depth information on extraordinary events.

3.1 Operating experience

The equipment required for loading unit automation was installed on excavator 282 and commissioned during the basic main planned outage of the excavator in 2008/2009. Once the systems were basically operational, the sensors were calibrated and optimized as part of a multi-stage programme until the stability required for the task at hand was achieved. The parameter sets developed in the theoretical analyses marked the start of the second stage. In several steps, individual control systems, some of them based on one another, were tested and improved.

The various test runs were conducted during ongoing operations and standstills. The most important underlying condition was that the equipment could be operated in defined modes in a reproducible manner. It was essential in the initial stage that the working level should be even as this permitted disturbances to be injected individually, allowing valuable information as to the further development to be obtained. Once stability was proven, defined combinations of disturbances were tested as well. The last experimental runs simulated extreme situations, such as extraordinary unevenness of the working level.

After sufficient operational stability was achieved, test operation was started so as to permit systematic optimizations of the system prior to the start of the trial run agreed upon in the contract. In this three-shift test operation, the mine operator crew documented implausible movements and disturbances, which were subsequently analyzed using the measurement recordings.

The degrees of freedom of the independent travelling motions of the loading unit were also implemented in conjunction with on-site personnel in several steps, starting with the travelling motions most frequently executed by the car. In the subsequent steps, the degrees of freedom were expanded and special situations included. This procedure was advantageous in that the crews gradually familiarized themselves with the automated travelling motions and that it ensured their in-depth involvement. This boosted acceptance and commitment. The persons responsible for commissioning also benefited from this way of proceeding since intermediate steps clearly indicated boundaries and detail errors were quickly detected.

Following the execution of test operation, the trial run was carried out to prove sufficient overall availability of the system.

3.2 Results

The trial run was performed over a period of one month with an unmanned operator's cabin of the loading unit and successfully

konnte die Machbarkeit der Regelung nachgewiesen und der Einfluss verschiedener Störgrößen ermittelt werden. Zudem wurden Optimierungen ohne zeit- und kostenintensive Tests am realen Gerät möglich.

Da die Automatikfunktionen in die bestehende Steuerungsstruktur integriert werden, ist ein reibungsloses Zusammenspiel aller eingesetzten Komponenten von hoher Bedeutung. Abbildung 6 zeigt die wesentlichen Steuerungsbausteine sowie die Anbindung der Sensorik. Das Kernstück des Systems ist ein Automatisierungssystem mit integrierter Regelungsbaugruppe, welche sämtliche Steuerbefehle erzeugt.

Um eine effektive Optimierung zu ermöglichen, kamen leistungsfähige Werkzeuge zur Aufzeichnung der Daten des Automatisierungssystems zum Einsatz, die auch die Anwendung komplexer mathematischer Funktionen auf die gespeicherten Daten ermöglichen. Es wurden ca. 60 digitale und analoge Signale ständig aufgezeichnet und ausgewertet. Ein Fernzugriff auf die verwendeten PCs aus den Büros der Systemlieferanten und -integratoren war für schnelle Analysemöglichkeiten und zeitnahe Fehlerbeseitigungen wichtig. Darüber hinaus konnten Videoaufnahmen jederzeit vertiefte Informationen zu außergewöhnlichen Ereignissen liefern.

3.1 Betriebserfahrungen

Die Montagearbeiten der Technik für die Beladewagenautomation am Bagger 282 und die Grundinbetriebnahmen wurde während der Grundinstandsetzung des Gerätes in 2008/2009 durchgeführt. Nachdem die Systeme grundsätzlich betriebsbereit waren, wurde in einem mehrstufigen Programm zuerst die Sensorik kalibriert und soweit optimiert, dass für die Aufgabenstellung ausreichende Stabilität erreicht war. Mit den in den theoretischen Betrachtungen entwickelten Parametersätzen für alle Regelungen wurde die zweite Stufe gestartet. In mehreren Schritten wurden einzelne, teils aufeinander aufbauende Regelungen getestet und verbessert.

Die einzelnen Fahrversuche wurden während des laufenden Betriebes und bei Stillständen durchgeführt. Wesentliche Randbedingung war, dass definierte Betriebszustände reproduzierbar gefahren werden konnten. Essenziell war im Anfangsstadium, dass bei ebenem Planum gearbeitet wurde, weil hierdurch die Störgrößen einzeln injiziert werden konnten und wertvolle Rückschlüsse für die Weiterentwicklung ermittelt wurden. Mit nachgewiesener Stabilität wurden später auch definierte Kombinationen der Störgrößen geprüft. In letzten Testreihen wurden Extremsituationen simuliert wie z.B. starke Unebenheiten des Planums.

Nach Erreichen einer ausreichenden betrieblichen Stabilität wurde ein Testbetrieb gestartet, der vor Beginn des vertraglich vereinbarten Probetriebs systematische Optimierungen des Systems ermöglichen sollte. In diesem Testbetrieb dokumentierte die Betreiberbesatzung im dreischichtigen Betrieb nicht plausible Bewegungen und Störungen, die dann anhand der Messaufzeichnungen analysiert wurden.

Auch die Freiheitsgrade der selbstständigen Fahrbewegungen des Beladewagens wurden gemeinsam mit dem Personal vor Ort in mehreren Stufen implementiert. Dabei wurde mit den Fahrbewegungen begonnen, die das Gerät mit der höchsten Häufigkeit durchführt. In den Folgeschritten wurden die Freiheitsgrade erweitert und Sondersituationen eingebracht. Vorteilhaft an diesem Vorgehen war auch, dass sich die Besatzungen sukzessive an die automatisierten Fahrbewegungen gewöhnten und intensiv eingebunden wurden. Hierdurch stieg die Akzeptanz und das Engagement. Auch die Inbetriebnehmer profitierten von der Vorgehensweise, weil durch Zwischenschritte die Grenzen deutlich aufgezeigt wurden und Detailfehler zügig herausgearbeitet werden konnten.

Nach Durchführung des Testetriebs wurde, zum Nachweis einer ausreichend hohen Gesamtverfügbarkeit des Systems, der Probetrieb absolviert.

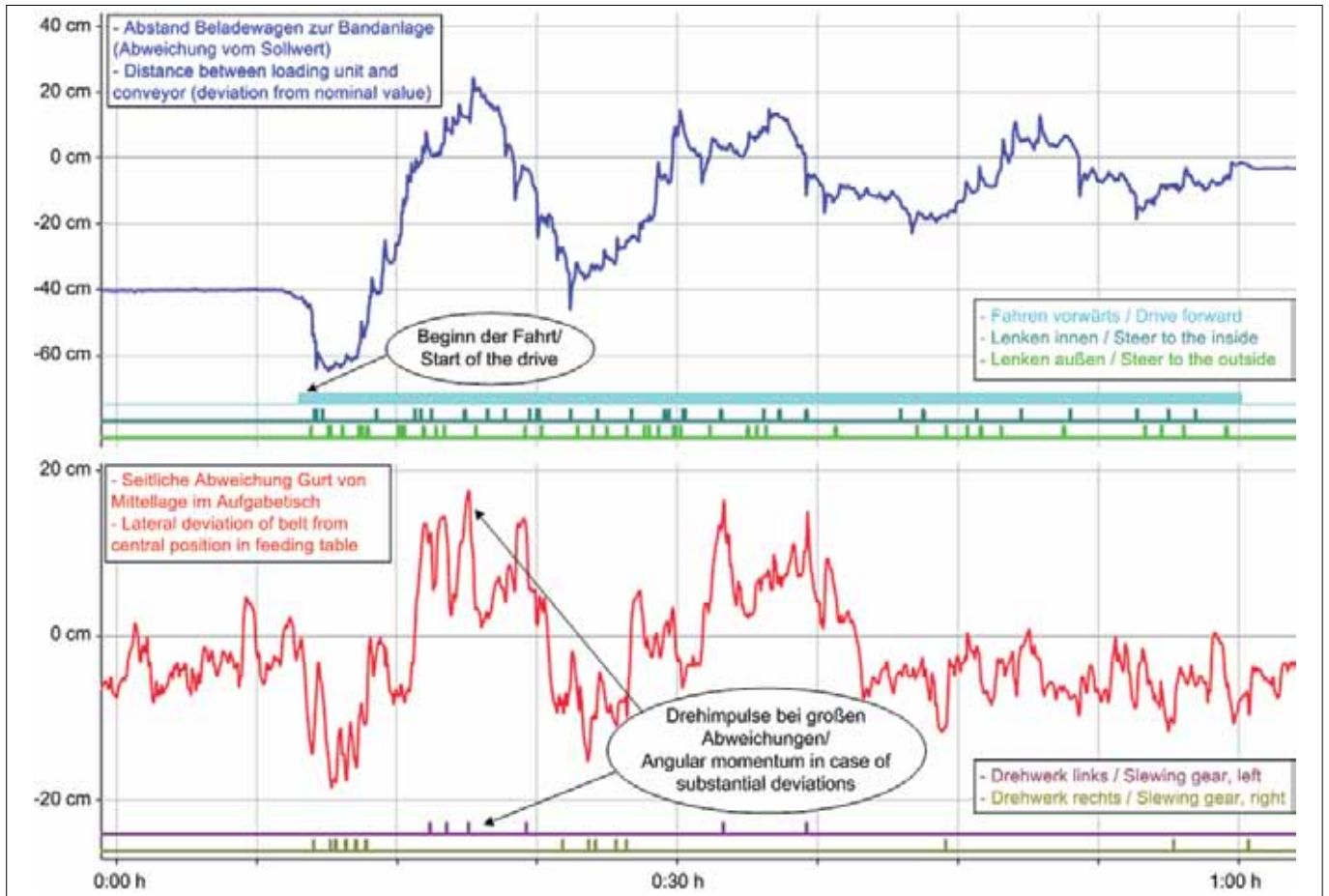


Fig. 7: Measurement recording of a loading unit test run

Abb. 7: Messaufzeichnung einer Testfahrt des Beladewagens

completed in November 2010. During this time, the fully automatic system was active for approx. 700 hours and the loading unit covered a distance of some 15 km in automatic mode.

At over 99 %, availability – the central evaluation criterion for the quality of the overall system – was in the range of the contractual requirements. The positioning of the feeding table in vertical and horizontal direction and the setting of its lateral inclination was always sufficiently precise. This created the basic conditions needed to implement belt position and steering control. The belt position control system succeeded in significantly reducing the number of stoppages of the conveyor belt caused by off-track running compared with the uncontrolled operation of other, semi-automated loading units. The functionality of the steering control system can be evaluated by looking at the distance between the loading unit and the conveyor frames during travelling motions. The control quality was in line with the contractual agreements. In particular when covering long distances the loading unit was positioned very precisely as shown in the top diagram in Figure 7. When travelling motions are initiated, the loading unit has a considerable offset to the target distance. It is steered with a slightly overshooting control response until it moves, very precisely, parallel to the conveyor frames at a constant distance. The second diagram presents the correlation of the shown variables to be adjusted. The deviation of the belt from the central position evidently depends on the steering behaviour of the loading unit. The slewing gear has to correct any deviations that occur.

4 Outlook

The automatic system will initially be installed on three other loading units. Excavator 275 in the Inden opencast mine poses a special

3.2 Ergebnisse

Der Probetrieb wurde bei unbesetztem Beladewagenführerstand über einen Zeitraum von einem Monat durchgeführt und im November 2010 erfolgreich beendet. Während dieser Zeit war die Vollautomatisierung ca. 700 Stunden aktiv und der Beladewagen legte eine Fahrstrecke von rund 15 km im Automatikbetrieb zurück.

Die Verfügbarkeit, das zentrale Bewertungskriterium der Qualität des Gesamtsystems, lag mit über 99 % im Bereich der vertraglichen Anforderungen. Die Positionierung des Aufgabetsches in vertikaler und horizontaler Richtung sowie die Einstellung von dessen Querneigung erfolgte stets in ausreichender Genauigkeit. Dies schaffte die Grundbedingungen zur Realisierung der Gurtlage- und der Lenkungsregelung. Die Gurtlagerregelung konnte die Zahl der Stillsetzungen des Förderbandes aufgrund von Gurtschieflauf im Vergleich zum unregelmäßigen Betrieb anderer teilautomatisierter Beladewagen signifikant reduzieren. Die Funktionalität der Lenkungsregelung kann durch Betrachten des Abstandes zwischen Beladewagen und Bandgerüsten bei Fahrbewegungen bewertet werden. Die Regelgüte lag dabei im Rahmen der vertraglichen Vereinbarungen. Insbesondere bei langen Fahrstrecken wurde der Beladewagen sehr präzise positioniert, wie das obere Diagramm in Abbildung 7 zeigt. Beim Einleiten der Fahrbewegung weist der Beladewagen einen deutlichen Versatz zum Sollabstand auf. Er wird mit leicht überschwingendem Regelverhalten gelenkt, bis er eine sehr präzise parallele Fahrt mit konstantem Abstand zu den Bandgerüsten erreicht. Das zweite Diagramm verdeutlicht die Korrelation der dargestellten auszuregelnden Größen. Die Abweichung des Gurtes von der Mittelposition hängt hier offensichtlich vom Lenkverhalten des Beladewagens ab. Das Drehwerk muss entsprechende Abweichungen korrigieren.

challenge as the material is not loaded onto the conveyor belt by a feeding table but by a slewable discharge belt in combination with a travelling hopper. Since these two components are not mechanically connected, additional sensors for determining the relative position are required. Three additional iDRR radar sensors are to be installed for this purpose.

The majority of the other loading units employed in the RWE Power's Rhenish lignite mining area will presumably gradually be fully automated in the course of the implementation of all automation modules of the second automation step at the various pieces of main mine equipment.

To further reduce maintenance costs, the automatic system might in future be further developed such that the loading unit's drive commands are generated not only on the basis of the equipment geometries but additionally on the basis of the planned travelling motions of the excavator. The knowledge of future excavator assignments and the GPS coordinates of the excavator and the loading unit allow these travelling motions to be forecast so that the loading unit can be ideally positioned, minimizing the distances to be covered.

5 Summary

Interlocking automation modules permit further cost-reduction potential to be exploited in RWE Power AG's opencast mines, with the automation of the loading units being an important core element. The complexity of the task and its high development share necessitated an intensive optimization process and interdisciplinary collaboration between electrical, mechanical and mining engineers. Radar sensor technology can open up new options in different fields of application.

Simulation techniques permitting systems to be commissioned virtually without time-consuming and cost-intensive tests on the real equipment have proven useful and will be increasingly used in future automation projects. Efficient tools for recording and analyzing in conjunction with remote access enable more economic and efficient working, thus supporting the efficient commissioning of complex automatic systems.

References/Literatur

- [1] Ballmann, S. (2007): Teilautomatisierung von Großgeräten im Braunkohlentagebau. *World of Mining* **59**, 3: 162.
- [2] Ballmann, S., Hardt, F.-P. & Kulik, L. (2004): Automatisierungsprojekte an den Großgeräten im Tagebau Hambach. – *Bergbau* **55**: 108-114.
- [3] Nienhaus, K. & Winkel, R. (2006): Automatische Positionierung von Bandübergaben mittels RFID basierter Distanzbestimmung. – *Kolloquium für Innovation im Braunkohlenbergbau, DEBRIV 11/2006*: 47.
- [4] Pelzer, W. & Jacobs, H. (2005): Fahrerloser Förderbetrieb von Bandschleifenwagen auf Raupenfahrwerken bei RWE Power AG. – *Surface Mining* **57**: 2-11.
- [5] Stuckmann, W. (2010): Innovativer Walzenlader SL 750 EiControlPlus – Technik mit menschlichen Zügen. – *Eickhoff Bochum, Presseerklärung bauma Innovationspreis, München*.
- [6] Mittmann, R., Rosenberg, H. & Nieß, T. (2010): Simulator für Schaufelradbagger in Braunkohlentagebauen der RWE Power AG. – *World of Mining* **62**, 2: 82.
- [7] Sobol, A. (2010): Entwicklung und Simulation eines mehrstufigen Konzeptes zur automatischen Lenkungsregelung eines Beladewagens. – *Diplomarbeit Hochschule Bonn-Rhein-Sieg Campus Sankt Augustin, Fachbereich EMT*.

4 Ausblick

Die Vollautomatisierung wird zunächst an drei weiteren Geräten umgesetzt. Eine besondere Herausforderung stellt dabei der Bagger 275 im Tagebau Inden dar, weil dort die Aufgabe des Materials auf das Förderband nicht durch einen Aufgabebisch realisiert wird, sondern durch ein schwenkbares Abwurfband in Kombination mit einem Aufgabewagen. Da zwischen diesen beiden Komponenten keine mechanische Verbindung besteht, wird zusätzliche Sensorik für die relative Positionsbestimmung benötigt. Für diese Aufgabe ist der Einsatz von drei weiteren iDRR Radarsensoren geplant.

Ein Großteil der weiteren Beladewagen des Rheinischen Braunkohlenreviers der RWE Power wird voraussichtlich im Zuge der Realisierung sämtlicher Automatisierungsmodule des zweiten Automatisierungsschrittes an den jeweiligen Großgeräten sukzessive vollautomatisiert.

Zur weiteren Reduzierung der Instandhaltungskosten könnte die Automatik zukünftig dahingehend weiterentwickelt werden, dass die Generierung der Fahrbefehle des Beladewagens nicht nur auf Basis der Gerätegeometrien durchgeführt wird, sondern zusätzlich auf Basis der geplanten Fahrbewegungen des Bagger-Hauptgerätes. Durch Kenntnis der zukünftigen Baggeraufträge sowie der GPS-Koordinaten des Hauptgerätes und des Beladewagens sind diese Fahrbewegungen prognostizierbar, sodass der Beladewagen ideal positioniert werden kann und so die Fahrstrecken minimiert werden.

5 Zusammenfassung

Durch ineinander greifende Automatisierungsmodule können in den Tagebauen der RWE Power AG weitere Potenziale zur Kostensenkung genutzt werden. Die Vollautomatisierung der Beladewagen stellt hierfür eine wichtige Kernkomponente dar. Wegen der Komplexität der Aufgabe und des hohen Entwicklungsanteils waren ein intensiver Optimierungsprozess und eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Elektro-, Maschinen-, und Bergbauingenieuren notwendig. Die Radarsensorik kann in verschiedenen Anwendungsbereichen neue Wege eröffnen.

Simulationstechniken, die virtuelle Inbetriebnahmen ohne zeit- und kostenintensive Tests am realen Gerät ermöglichen, haben sich als sinnvoll erwiesen und werden vermehrt bei zukünftigen Automatisierungsprojekten Anwendung finden. Für die Unterstützung einer effizienten Inbetriebnahme komplexer Automatisierungsaufgaben helfen leistungsfähige Werkzeuge zur Aufzeichnung und Analyse in Verbindung mit Fernzugriffen, wirtschaftlicher und effizienter zu arbeiten.