

**Diese Arbeit wurde vorgelegt am Institute of Mineral Resources Engineering**

The present work was submitted to the Institute of Mineral Resources  
Engineering

**Stand der Technik und Ausblick der Automatisierungstechnik für  
den diskontinuierlichen Transport Untertage**

**Projektarbeit**

**Project Thesis**

von / Presented by

**Sandra Katharina Fahl**

1. Prüfer / Examiner 1 **Prof. Dr. Bernd Lottermoser**

Betreuer / Supervisor **Antje Matthäus, M.Sc.**

Aachen, 27.01.2016

# Eidesstattliche Versicherung

---

Name, Vorname

Matrikelnummer

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Projektarbeit mit dem Titel

## **Stand der Technik und Ausblick für den diskontinuierlichen Transport Untertage**

selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

### **Belehrung:**

#### **§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt**

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

#### **§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt**

(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## **Inhaltsverzeichnis**

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung .....	1
2 Automatisierungstechnik im Bergbau .....	2
2.1 Definition und Begriffsabgrenzungen.....	2
2.2 Historische Entwicklung.....	6
3 Nutzen der Automatisierung .....	9
4 Anforderungen an die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport.....	13
4.1 Automatisierungstechnik auf betrieblicher Ebene.....	14
4.2 Automatisierungstechnik der Betriebsmittel.....	18
5 Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport in der Praxis.....	22
5.1 Forschungsprojekte .....	22
5.2 Kommerzielle Systeme .....	23
6 Fazit .....	29
7 Ausblick.....	30
8 Literaturverzeichnis.....	31
Anhang .....	36

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ACS	Access Control System (Zugangskontrollsystem)
AGV	Automated Guided Vehicles
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
FIFO	Fly-in Fly-out
HUNS	High Speed Navigation System
IMU	inertiale Messeinheit (inertial measurement unit)
Ladar	Laser detection and ranging
LHD	Load Haul and Dump Machine (Schau-felfahrlader)
LKAB	Luossavaara-Kirunavaara Aktiebolag
MCS	Mission Control System
MOC	Mining Operations Centre (Remote Kontrollzentrum)
PCS	Production Control System
Radar	Radio detection and ranging
UPNS 4D+ System	Untertägiges 4D+ Positionierungs-, Navigations-, und Mappingsystem

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Manuell gesteuerter LHD (Gustafson 2013 S. 10) .....	4
Abbildung 2-2 Tele-Remote Steuerstand (Duff, Caris et al. 2010 S. 415).....	5
Abbildung 2-3 Notfallwegweiser in einem Flugzeug (Lufthansa Technik AG 2015)....	6
Abbildung 3-1 Entwicklung des Nutzungsfaktors durch Automatisierung (Wahlquist 2015) .....	10
Abbildung 4-1 Torro 50D Muldenkipper am ACS Tor (Burger 2006 S. 556) .....	14
Abbildung 4-2 Architektur der betrieblichen Automatisierungstechnik .....	16
Abbildung 4-3 Definierter Pfad im Raum .....	18
Abbildung 4-4 Korrektur der Koppelnavigation (Mäkelä 2001 S. 28) .....	19
Abbildung 4-5 Ausschnitt aus der Knotenpunktkarte eines Bergwerkes (Larsson, Broxvall et al. 2005 S. 5) .....	20
Abbildung 4-6 Visualisierter Laserscan einer Strecke (Darling Geomatics 2015) .....	21
Abbildung 5-1 MineGem Bedienerinterface (Caterpillar 2013 S. 4) .....	26
Abbildung 5-2 Sensorik des Scooptram Automatisierungssytemes (Gustafson 2011 S. 19).....	27
Abbildung 5-3 Remote Vehicle Unit (Nautilus International Control & Engineering Ltd. 2016) .....	28

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2-1 Sieben Automatisierungsbegriffe (eigene Bearbeitung nach (Lever 2011 S. 805)) ..... 3

### 1 Einleitung

Unser heutiger Lebensstandard hängt von der stetigen Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe ab. Die weltweite Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen steigt kontinuierlich. Daneben steigen die sozialen, wirtschaftlichen und umwelttechnischen Anforderungen die bei der Rohstoffförderung berücksichtigt werden und die Komplexität der geologischen Verhältnisse der Lagerstätten nimmt zu. Der stetig abnehmende Wert mineral und die steigende Teufe in der abgebaut wird, erfordern eine Weiterentwicklung der Abbautechnologie und eine vollständige Lagerstättenausnutzung. Die Bergbauindustrie setzt zunehmend Automatisierungstechnologie ein, um diesen Anforderungen gerecht zu werden und Rohstoffe sicherer, umweltfreundlicher, effizienter und selektiver gewinnen zu können. (Lever 2011 S. 805)

Der diskontinuierliche Transport ist ein zentraler und essentieller Teil der konventionellen Gewinnung. Ein diskontinuierlicher Betrieb kann flexibler auf die Entwicklung der volatilen Rohstoffmärkte reagieren. Darüber hinaus können viele Lagerstätten aufgrund der geologischen Gegebenheiten ausschließlich untertägig und konventionell gewonnen werden.

Im Hinblick auf die europäische Rohstoffindustrie, stellt die Automatisierung eine Chance dar, vorhandene Ressourcen wirtschaftlich abbauen zu können und die Versorgung der heimischen Märkte mit kritischen Rohstoffen wie den Seltenen Erdelementen zu sichern. Insbesondere die deutsche Wirtschaft ist aufgrund ihrer industriellen Ausrichtung im Hochtechnologiebereich auf eine stetige Versorgung mit kritischen Rohstoffen zwingend angewiesen.

Zurzeit gibt es keinen detaillierten Überblick über den Stand der Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport. Die bisherigen technischen Entwicklungen und noch zu lösende Problematiken, wurden nicht zusammenhängend erfasst. Ziel dieser Arbeit ist es diese Lücke zu schließen. Der Fokus liegt dabei, auf der Beschreibung der Automatisierungssysteme für die Betriebsmittel und auf betrieblicher Ebene, sowie deren Nutzen für die Rohstoffindustrie. Es wird ein Bezug zu aktuellen Forschungsprojekten und zu kommerziellen Automatisierungslösungen hergestellt und ein Ausblick auf die zukünftige Entwicklung gegeben.

## **2 Automatisierungstechnik im Bergbau**

Das Laden und Fördern von Haufwerk, von der Ortsbrust zu einem Abwurfpunkt, ist ein zentraler Arbeitsschritt der konventionellen Gewinnung und des Streckenvortriebes. Der Transport macht einen erheblichen Teil der Produktionskosten eines Bergwerkes aus. Die gesamte konsekutive Prozesskette des Gewinnungsbetriebes ist davon abhängig. In untertägigen Bergwerken werden für den Transport oftmals Load Haul and Dump Machines (LHDs) eingesetzt. Nach dem Abkippen des Haufwerkes an einer Kippstelle, wie zum Beispiel einer Erzrolle oder einem Bunker, wird das Material in einem diskontinuierlich arbeitenden Betrieb meist mit Haul Trucks weitergefördert. Ein LHD kann auch direkt auf einen Haul Truck fördern. Der Transport muss schnell, sicher und möglichst störungslos erfolgen. Um dies zu erreichen und zur weiteren Steigerung der Produktivität und Arbeitssicherheit ist die Automatisierung der LHDs und Haul Trucks sinnvoll. (Lever 2011 S. 805)

### **2.1 Definition und Begriffsabgrenzungen**

Zur Erläuterung der Bedeutung der Automatisierung und ihres potentiellen Einflusses auf den diskontinuierlichen Transport müssen einige Definitionen genannt und Begriffe abgegrenzt werden.

Laut deutscher Industrienorm bezeichnet Automatisierung das Ergebnis des Einsatzes von Automaten (DIN 19233). Automaten sind künstliche Systeme, die selbsttätig ein Programm befolgen. Anhand des Programms trifft der Automat selbständig Entscheidungen zur Steuerung und Regelung von Prozessen. Im Vergleich dazu werden bei der Mechanisierung eines Prozesses diese Steuerungs- und Regelungsaufgaben hingegen nicht von künstlichen Systemen übernommen. Ein mechanisierter Arbeitsvorgang wird von Menschen geleistet, die von Maschinen lediglich unterstützt werden. (Gustafson 2013 S. 1)

Laut Paul Lever, ist die in Tabelle 2-1 angegebene, auf den Bergbau angepasste Definition von sieben Begriffen am zweckmäßigsten, um unterschiedliche Automatisierungsstadien zu beschreiben. Die möglichen Betriebsmodi eines LHDs spiegeln diese Automatisierungsstadien wieder. Die Betriebsmodi werden von den Automatisierungstechnikern nicht einheitlich bezeichnet. Momentan sind folgende fünf Be-

triebsstrategien im Einsatz: Die manuelle Steuerung, die Remote Steuerung, die Tele-Remote Steuerung sowie der Copilot Modus und der autonome Modus.

Tabelle 2-1 Sieben Automatisierungsbegriffe (eigene Bearbeitung nach (Lever 2011 S. 805))

Automatisierungsstufe	Beschreibung
Mechanisiert:	Aufgaben werden von Maschinen ausgeführt
Automatisch:	Die Maschine ist nicht in der Lage selbständig Entscheidungen zu treffen. Die Maschine erledigt Aufgaben anhand klar definierter Regeln.
Semi-automatisch:	Die Maschine wird teilweise automatisch und teilweise manuell gesteuert.
Automatisierung:	Alle Aufgaben und Prozessschritte des Bergwerks werden von Maschinen ausgeführt. Die Maschinen werden nicht von menschlichen Arbeitskräften gesteuert.
Autonom:	Die Maschine funktioniert eigenständig und ohne menschliche Aufsicht
Robotik:	Die Maschinen können ihre Umgebung wahrnehmen und daraus logisch schlussfolgern. Solche Roboter werden für die Automatisierung der schwierigen, unprognostizierbaren und unberechenbaren Aufgaben in der Rohstoffindustrie benötigt.
Intelligent:	Die Maschine ist lernfähig und kann neue Situationen verstehen und mit einer Anpassung reagieren.

Die **manuelle Steuerung** von LHDs wird in der Bergbauindustrie am häufigsten verwendet. Ein Fahrer befindet sich in einer geschlossenen Fahrerkabine, an Board des LHDs. Aus der Abbildung 2-1 wird ersichtlich, dass die Kabine lotrecht zum Fahrweg angebracht ist, damit der Fahrweg bei Vorwärts- und Rückwärtsfahrt gleichermaßen überblickt werden kann, anders als beispielsweise bei einem Radlader. (Voigt 2012)



Abbildung 2-1 Manuell gesteuerter LHD (Gustafson 2013 S. 10)

Bei der **Remote Steuerung** eines LHDs befindet sich der Fahrer außerhalb des LHD. Der Fahrer steuert den LHD mithilfe einer Fernbedienung aus 10 bis 200 m Abstand. Er befindet sich aber immer noch in Sichtweite des LHD. (Gustafson 2013 S. 1)

Eine **Tele-Remote Steuerungssituation** ähnelt der einer Remote Steuerung. Der Fahrer hat permanent die vollständige Kontrolle über den LHD. Zwischen dem Fahrer und dem LHD liegt jedoch eine größere Distanz. Deshalb erfordert die Tele-Remote Steuerung eine Modifikation des LHDs. Beispielsweise die Installation von Onboard Kameras und eines Computersystemes, dass alle Funktionen des LHD (Lenkung, Bremsung, Beschleunigung, Schaufelbewegungen et cetera) kontrolliert, erforderlich. Daneben wird ein High-Speed Kommunikationsnetzwerk benötigt. Wie die Abbildung 2-2 zeigt, bedient der Fahrer den LHD an einem Steuerstand, der sich beispielsweise in einem zentralem Kontrollraum Untertage befindet. Der Kontrollraum kann auch an der Tagesoberfläche, in einem mobilen Fahrzeug oder in 1000 km Entfernung liegen. (Lever 2011 S. 809)

Der **Copilot Modus** ist eine Variante der Tele-Remote Steuerung bei der, der Fahrer durch eine automatisierte Lenkung unterstützt wird. Der Fahrer lenkt den LHD nicht mehr physikalisch sondern das Automatisierungssystem lenkt den LHD. Es folgt autonom der Strecke und verhindert eine Kollision mit den Stößen. Der Fahrer vollzieht die Bewegung des Fahrzeuges als Supervisor in Echtzeit auf einem Grubenriss nach. Fahrtrichtungsänderungen bestimmt der Fahrer mithilfe eines Joysticks. (Sandvik Mining and Construction 2007)



Abbildung 2-2 Tele-Remote Steuerstand (Duff, Caris et al. 2010 S. 415)

Im **autonomen Modus** bestimmt der Fahrer ein Ziel für das Fahrzeug (den LHD oder Haul Truck). Dann übernimmt das Self Guidance System die Kontrolle über das Fahrzeug und fährt den festgelegten Weg. Normalerweise füllt der Fahrer die Schaufel des LHDs im Tele-Remote Modus und wechselt dann in den autonomen Modus, damit der LHD selbständig zur Kippstelle fährt, das Fördergut abkippt und zurück zur Ladestelle fährt. Im autonomen Modus kann ein Fahrer mehrere Fahrzeuge simultan steuern. Ein vollständig autonomes System würde die Schaufel automatisch füllen. Bisher scheiterten alle Versuche ein kommerzielles System zu entwickeln, das diesen Arbeitsschritt zuverlässig automatisiert. In Testreihen konnten keine funktionalen Voreinstellungen für die notwendigen Parameter des Automatisierungssystems getroffen werden. Zum Beispiel, konnte der Schaufelfüllungsgrad aufgrund der starken Varianz der Fragmentierung des Haufwerks nicht korrekt gesteuert werden. (Lever 2011 S. 809), (Caterpillar Global Mining a 2008 S. 3)

Entscheidend für die automatisierte Lenkung und die autonome Navigation von LHDs und Haul Trucks, ist die Verwendung einer geeigneten Sensorik. Aus Sicherheitsgründen müssen für Tele-Remote gesteuerte und autonome Fahrzeuge zusätzlich strenge Sicherheitsvorkehrungen vorhanden sein, beispielsweise abgetrennte Arbeitsbereiche mit strikten Zugangskontrollen und Mechanismen zur Kollisionsverhütung. (Schunnesson, Gustafson et al. 2009 S. 776)

## 2.2 Historische Entwicklung

Die Verwendung von automatisierten LHDs ist seit über 20 Jahren technische Realität. Die Bergbauindustrie hat unterschiedliche Navigationssysteme und Sensorik, mit dem Ziel den diskontinuierlichen Transport durch LHDs und Haul Trucks vollständig zu automatisieren, getestet. Das Ziel vollständig autonome und intelligente LHDs und Haul Trucks zu entwickeln, konnte bis heute nicht realisiert werden. Alle Bergwerke die automatisierte LHDs nutzen beziehungsweise testen, setzen gleichzeitig auch manuell gesteuerte LHDs ein. (Lever 2011 S. 809)

Erste Ansätze der Automatisierung beruhten auf starr geführten Systemen, die einer gleisgebundenen Führung ähnelten. Die entwickelten Systeme gehören zu einer der fünf Kategorien: versenkte Kabel, aufgemalte Linien, retroreflexives Band oder Lichtlinien. Diese Wegweiser wurden entlang der Achse der Strecke ausgerichtet und an den Stößen oder auf dem Fahrweg angebracht. Durch die Wegweiser geführt, blieb das Fahrzeug mittig in der Strecke ausgerichtet und eine Kollision mit den Stößen wurde verhindert. (Gustafson 2013 S. 10)

Vergleichbar mit den frühen Automatisierungssystemen sind beispielsweise die in Abbildung 2-3 dargestellten Notfallwegweiser in einem Flugzeug. Retroreflexives Band oder Lichtlinien führen orientierungslose Passagiere zu den Notausgängen.

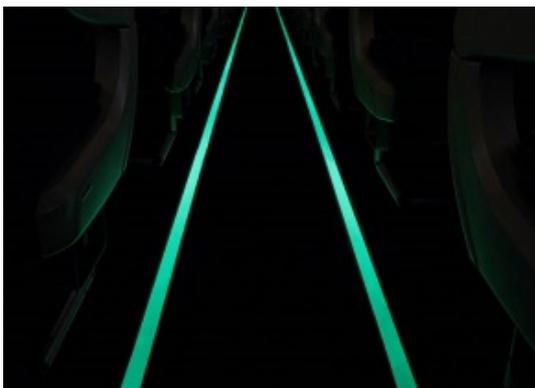


Abbildung 2-3 Notfallwegweiser in einem Flugzeug (Lufthansa Technik AG 2015)

Das Eisenerzbergwerk Kirunavaara (Kiruna) in Nordenschweden ist ein hervorragendes Beispiel für die historische Entwicklung der Automatisierungstechnik in der Rohstoffindustrie. Bereits in den 1980er Jahren initiierte der schwedische Betreiber Luossavaara- Kirunavaara AB (LKAB) unterschiedliche Forschungsprojekte zur Automatisierung einzelner Prozessschritte der diskontinuierlichen Gewinnung. Neben der Forschung im Bereich automatisierter LHDs, entwickelte LKAB bereits in den 1990er

---

Jahren in Zusammenarbeit mit Atlas Copco ein vollautomatisches Tieflochproduktionsbohrgerät. (Ericsson, Ramström et al. 2011 S. 1)

1987 initiierte LKAB in Kooperation mit dem Bergbaumaschinenhersteller Ara (heute Sandvik) das **SALT 1** Forschungsprojekt. Die Ziele des Projektes waren unbemannte Fahrzeuge und Remote gesteuerte LHDs zu entwickeln und zweitens LHDs zu entwickeln, die aus einem zentralem Kontrollraum Tele-Remote gesteuert werden. Im Test waren die Verfügbarkeit der LHDs und die erreichten Produktionsmengen zu gering, um diese Ziele wirtschaftlich zu realisieren. Deshalb wurde SALT 1 1991 eingestellt. (Corke and Roberts 1997 S. 55), (Schunnesson, Gustafson et al. 2009 S. 778f)

Um die Probleme von SALT 1 zu lösen, initiierte LKAB zusammen mit Tamrock (heute ebenfalls Sandvik) Ende der 1980er Jahre ein neues Projekt (**SALT 2**). Ein Großversuch mit versenkten Kabeln als Wegweiser wurde durchgeführt. Dafür wurden Leiterschleifen in die Fahrwege betoniert. Das System funktionierte. Die geplanten Produktionsmengen und die gewünschte Verfügbarkeit der LHDs wurde nicht erreicht. Der LHD erreichte nur eine Geschwindigkeit von höchstens 8 km/h. Im Jahr 1993 wurde SALT 2 aufgegeben, da das System nicht flexibel genug war. Die LHDs konnten nur in zuvor betonierten und präparierten Strecken mannos fahren. Eine schnelle, flexible Anpassung der Fahrtrouten der automatisierten LHDs war unmöglich. Zur Zeit des Tests wurde der Weitungsbau in Kiruna als Abbaufahren angewendet und nicht das heutige Teilsohlenpfeilerbruchbauverfahren. Mit dem Weitungsbau als Abbaufahren waren die Investitions- und Wartungskosten des infrastrukturbasierten Systems nicht wirtschaftlich finanzierbar. (Schunnesson, Gustafson et al. 2009 S. 778f), (Corke and Roberts 1997 S. 55)

Im Jahr 1997 testete die schwedische Firma Q- Navigator AB in Kiruna, im Rahmen des **SALT 3** Projektes, ein Navigationssystem, dass zusammen mit der Firma NDC AB entwickelt wurde. Ein ähnliches System hatte die Firma NDC AB zuvor seit 1991 weltweit bereits für die Automatisierung von 700 Automated Guided Vehicles (AGVs) in Fabriken eingesetzt. Das System verwendete retroreflexives Band als Wegweiser. Auf dem LHD wurden ein Laserscanner, ein Odometer und ein Knickwinkelkodierer als Sensorik installiert. Im Test erreichte der LHD, während der Tele-Remote Steuerung, seine Höchstgeschwindigkeit von 22 km/h. Das sogenannte

HUNS (High Speed Navigation System) wurde Teil der Automatisierungstechnik von LKAB. Im Oktober 1997 gab LKAB den ersten semi-automatischen Tamrock 2500 für das Bergwerk Kiruna in Auftrag. (Erikson and Kitok 1991 S. 15.34), (Schunnesson, Gustafson et al. 2009 S. 776)

Das Ziel des anschließendem **SALT 4** Projektes war es 15 automatisierte LHDs von einem zentralem, übertägigem Kontrollraum aus zu steuern. Das SALT 4 System basierte auf dem Prinzip der absoluten Navigation mit künstlichen Orientierungspunkten. Ende 2001 wurde ein Kontrollraum im Hauptverwaltungsgebäude eingerichtet. Zu diesem Zeitpunkt wurden 11 automatisierte LHDs eingesetzt. Aus unterschiedlichen Gründen stoppte LKAB nach dem Jahr 2007 zwischenzeitlich die Verwendung von automatisierten LHDs. (Gustafson 2011 S. 22f), (Larsson 2007S. 24)

Seit 2011 verwendet LKAB in Kiruna das System AutoMine Lite vom schwedischen Maschinenhersteller Sandvik. Im Vergleich zum vorher verwendeten SALT 4 System, besitzt AutoMine Lite einen verbesserten autonomen Modus und benötigt keine Infrastruktur. (Roberts, Duff et al. 2000 S. 3791)

### 3 Nutzen der Automatisierung

Der Einsatz von automatisierten Fahrzeugen erhöht die **Arbeitssicherheit**, **Produktivität**, **Qualität** und **Effizienz** der Rohstoffförderung. Darüberhinaus kann die Automatisierung zu einer besseren Umweltverträglichkeit beitragen.

Die offensichtlichen Vorteile der Automatisierung hinsichtlich der **Arbeitssicherheit** sind, dass Arbeitskräfte einen direkten Gefahrenbereich verlassen können. Zum Beispiel durch das (teil-) automatisierte Laden von Haufwerk aus einer ungesicherten Weitung. Bereits durch den Einsatz eines Remote gesteuerten LHDs werden die Arbeitskräfte nicht mehr der Gefahr eines Steinschlages ausgesetzt. Gesundheitliche Risikofaktoren wie Lärm, Staub, Hitze, Vibrationen und die Monotonie der Arbeit bleiben bestehen. Die Verlagerung der Arbeitsplätze in einen zentralen Kontrollraum stellt eine erhebliche Aufwertung der Arbeitsbedingungen da. Die Anzahl von Unfällen reduziert sich.

Im chilenischem Kupferbergwerk El Teniente gab es in den vier Jahren nach Einführung automatisierter Transportfahrzeuge keinen Arbeitsunfall mit Arbeitsausfall (Revuelta, Reyes et al. 2010 S. 12). Daneben werden insbesondere langfristige gesundheitliche Schädigungen reduziert. Arbeitskräfte mit gesundheitlichen Einschränkungen können weiterhin sinnvoll beschäftigt werden. Darüberhinaus wird mit einem altersgerechterem Arbeitsplatz auf die Bedürfnisse einer alternden Belegschaft eingegangen. (Noort and McCarthy 2009 S. 50), (Lever 2011 S. 805), (Corke and Roberts 1997 S. 53)

Wichtige Faktoren für die **Wirtschaftlichkeit** eines Bergwerkes sind die Produktivität und Effizienz des Abbauprozesses. Ein maßgeblicher Indikator für die Wirtschaftlichkeit sind die Kosten pro Tonne gefördertem Wertmineral. Ziel eines jeden Gewinnungsbetriebes ist es diese Kosten so gering wie möglich zu halten, um das Produkt auf den volatilen Rohstoffmärkten selbst in Niedrigpreisphasen gewinnbringend verkaufen zu können. Aufgrund der sinkenden Qualität der Lagerstätten ist eine Optimierung der Produktivität und Effizienz notwendig. (McNab and Garcia-Vasquez 2011 S. 1)

Eine Möglichkeit den Anteil der Transportkosten an den Abbaukosten zu senken, ist der Einsatz größerer Transportfahrzeuge. Die Optimierung der Fahrzeugkapazitäten

erreicht zunehmend die Grenzen des realisierbaren. Eine weitere Steigerung der Produktivität erfordert die Optimierung anderer Faktoren wie zum Beispiel dem Nutzungsfaktor der Fahrzeuge. (Roberts, Duff et al. 2000 S. 3775), (Caterpillar Global Mining b 2008 S. 1)

Der Nutzungsfaktor der Betriebsmittel erhöht sich durch Automatisierung wesentlich. Autonome Betriebsmittel sind unabhängig von Schichtwechseln, vorgeschriebenen Pausen oder dem Abwettern nach Sprengungen einsetzbar, die theoretisch mögliche Nutzung beträgt 24 h pro Tag. Hans Wahlquist stellt in Abbildung 3-1 die prognostizierte Entwicklung des Nutzungsfaktors durch den Einsatz von Automatisierungstechnik dar. Er prognostiziert eine Verbesserung der Auslastung von 40-80 % durch die Verwendung autonomer Maschinen. Weiteres Potenzial zur Erhöhung der Auslastung um 10-20 % sieht er in einem Mining Operation Centre (MOC), durch das die Planung und das Management der Gewinnungsschritte (teilweise) durch automatisierte, intelligente Systeme erfolgt. Weitere Details sind in Kapitel 4-1 beschrieben. (Karas 2015 S. 6, Wahlquist 2015)

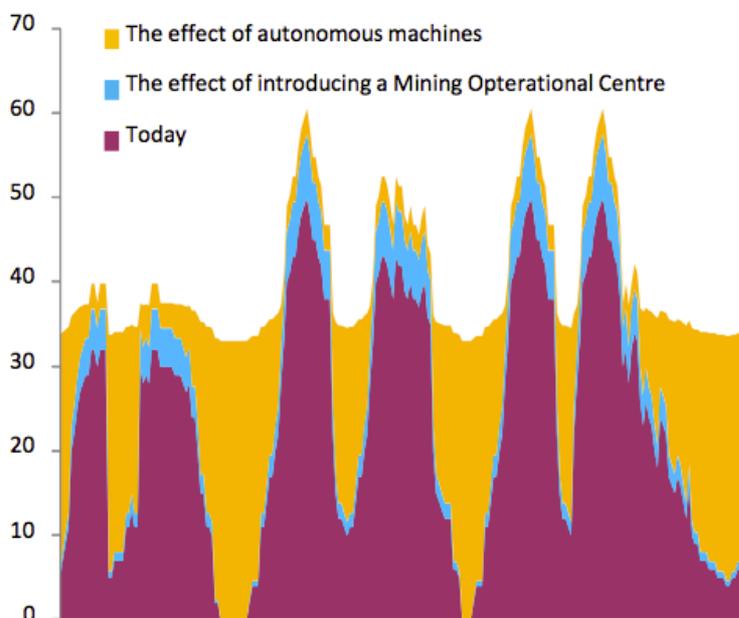


Abbildung 3-1 Entwicklung des Nutzungsfaktors durch Automatisierung (Wahlquist 2015)

Selbst bei einer Tele-Remote Steuerung der Betriebsmittel können eine größere Anzahl von Tonnen pro Mannschicht gefördert werden. Ein Testlauf von automatisierten, Tele-Remote gesteuerten LHDs im schwedischen Bergwerk Malmberget führte zur Erhöhung der Produktivität um 10-20 % (Caterpillar Global Mining b 2008 S. 1).

Totzeiten für die Anfahrt des Personals zum oder den Wechsel des Betriebspunktes entfallen. Die Bediener autonomer Fahrzeuge können weitere Aufgaben der Prozessüberwachung übernehmen, beispielsweise die Überwachung eines automatisierten Brechers an der Kippstelle des LHDs. (Revuelta, Reyes et al. 2010 S. 13)

Die Einsparung der direkten Arbeitskosten, die beispielsweise etwa 20 % der Betriebskosten eines Haul Trucks ausmachen, ist offensichtlich wenn keine Fahrer zur Steuerung benötigt werden. Beziehungsweise ein Fahrer im autonomen Modus durchschnittlich bis zu drei LHDs überwachen kann. Auch die indirekten Arbeitskraftkosten sinken. Die Kosten für Einstellung und Einarbeitung der Mitarbeiter werden, ebenso wie mögliche Arbeitsplatzstandort bezogene Kosten, gespart. Weltweit wächst die Zahl der Bergwerke, die ihre Arbeitskräfte im Fly- in- Fly out System (FIFO) beschäftigen. Sowohl die Investitionskosten als die laufenden Kosten für eine solche Unterbringung und das Beschäftigungssystem entfallen. (Ritter 2001 S. 230), (Lever 2011 S. 805)

Der Fachkräftemangel ist insbesondere in einer Boom Phase, in der die Produktionskapazitäten ausgebaut werden, ein wesentliches Hindernis für die Bergbauindustrie. Besonders in entlegenen Regionen ist es für Bergwerksbetreiber schwierig freie Stellen mit qualifizierten Mitarbeitern zu besetzen. Zudem ist die Kündigungsquote von FIFO Arbeitskräften deutlich höher als die von stationärem Personal. Die Unternehmen bieten häufig monetäre Anreize um entgegen zuwirken. Durch die Verlagerung der Arbeitsplätze in einen urbanen Bereich, werden die Arbeitsplätze für neue Gruppen potentieller Mitarbeiter erschlossen. (McNab and Garcia-Vasquez 2011 S. 3)

Ein weiterer Vorteil der Automatisierung ist die verbesserte **Qualität** der Planung und des Managements. Durch den Einsatz eines Mining Operations Centre werden Aufgaben gezielter und effektiver geplant und zuverlässig ausgeführt. Dadurch ergeben sich verbesserte Arbeitsabläufe im gesamten Gewinnungsbetrieb. Die auf den Transport folgenden Prozessschritte können besser auf den Transport abgestimmt werden. Zum Beispiel ist ein konstanter Förderstrom eine bessere Grundlage für eine optimale Aufbereitungstechnik. Die Routen und Arbeitstakte automatisierter LHDs und Haul Trucks können besser aufeinander abgestimmt werden. Notwendige Wartungen und Arbeitsunterbrechungen (wie zum Beispiel das Tanken) können optimal in die Abbauplanung integriert werden. (Lever 2011 S. 805), (Horberry 2012 S. 419)

Eine größere Gleichmäßigkeit und Präzision ermöglicht eine präzisere Simulation des Bergwerksbetriebes, wodurch Probleme früher erkannt und beseitigt werden. Die automatisierten Fahrzeuge liefern kontinuierlich Echtzeitdaten über die Produktion. Anpassungen sind daher zeitnah möglich. Insgesamt ergeben sich weniger ungeplante Störungen im Betriebsablauf. (Burger 2006 S. 559)

Daneben verbessern sich die Einsatzbedingungen der Maschinen durch eine optimale Steuerung der Maschinenfunktionen. Zum Beispiel kann der Gangwechsel perfekt an die Bedingungen der Umgebung angepasst werden. Dadurch sinkt der Energieverbrauch und der Verschleiß der Maschinen. Insbesondere der Reifenverschleiß sinkt erheblich. Unfälle durch Kollisionen mit anderen Fahrzeugen oder den Stößen werden verhindert. Die Kosten für die Reparatur der Fahrzeuge und eventuell des Grubengebäudes entfallen. Ein geringerer Dieserverbrauch ist zudem umweltfreundlicher und der geringere Ausstoß von Dieselemissionen erleichtert die Bewetterung. (Revuelta, Reyes et al. 2010 S. 12f), (Caterpillar Global Mining a 2008 Issue 3 S. 3f)

Durch Automatisierung können Bereiche abgebaut werden, die vorher unzugänglich oder nicht wirtschaftlich abbaubar waren. Besonders schmale, gangförmige Lagerstätten und Lagerstätten in großer Teufe können vollständig abgebaut werden. Durch die höhere Lagerstättennutzung steigt die Ressourceneffizienz und die **Umweltverträglichkeit** des Abbaus. Der Einsatz minimal invasiver Abbaumethoden, die weniger Umwelteinwirkungen zur Folge haben, steigt mit der zunehmenden Entwicklung von Automatisierungstechniken. (Horberry 2012 S. 419), (Karas 2015 S. 36)

#### **4 Anforderungen an die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport**

Autonome Transport Systeme werden grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilt: Die Systeme der betrieblichen Ebene und die Systeme der Betriebsmittel, die Onboard Systeme genannt werden. Sämtliche Teilsysteme der Automatisierungstechnik müssen sowohl wirtschaftlich als technisch realisierbar sein. Die wichtigsten Faktoren sind die Flexibilität, Zuverlässigkeit und Wartbarkeit der automatisierten Systeme. Der automatisierte Transport muss sich störungslos in den Gesamtprozess des Bergwerks einfügen und die notwendige Produktionsleistung muss erreicht werden. (Lever 2011 S. 806)

Automatisierungstechnik wird in anderen Industriezweigen umfangreich und erfolgreich eingesetzt. Im Produktionssektor werden klar definierte Produktionszyklen in einer bekannten und wohl definierten Umgebung automatisiert. Rohstoffe werden hingegen typischerweise in einer Folge von Einzelprozessen abgebaut. Die einzelnen Schritte werden dabei von sehr variablen und unvorhersehbaren Einflüssen determiniert. Daher müssen Automatisierungssysteme für die Bergbauindustrie in der Lage sein, diese Einflüsse und die resultierenden Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren. Zusätzlich werden die Systeme 365 Tage im Jahr den rauen Umgebungsbedingungen in einem Bergwerk ausgesetzt. Aus diesem Grund kann existierende Automatisierungstechnologie aus anderen Industriezweigen nicht umstandslos auf die Bergbauindustrie übertragen werden. Die Technologie muss auf die äußeren Einflüsse des untertägigen Bergbaus zu denen Staubemissionen, Einwirkungen von extremen Klima, mangelndes Tageslicht und der fehlende GPS Empfang zählen, angepasst werden. Allerdings fahren LHDs und Haul Trucks klar definierte Routen, in einem repetitivem Arbeitszyklus. Innerhalb des strukturierten Grubengebäudes ist ihre Bewegungsfreiheit eingeschränkt, deshalb war eine Teilautomatisierung der Transportfahrzeuge, mit Technologie die AGVs im Produktionssektor nutzen, bereits im Jahr 1997 möglich. (Lever 2011 S. 806, 809), (Corke and Roberts 1997 S. 53)

Trotzdem ist die akkurate Lokalisierung und Positionierung der Fahrzeuge Untertage mit einem geeignetem Navigationssystem eines der essentiellsten Teilsysteme der Automatisierungstechnik. Potentiell störende Einflüsse wie beispielsweise Knäpper

Anforderungen an die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport

---

oder unebene Fahrwege dürfen nicht zu Störungen im Betriebsablauf führen. Sollte es dennoch zu Störungen kommen, muss ein geeignetes Backup System zur Verfügung stehen. Eine Redundanz sollte auf allen Ebenen der Automatisierungstechnik, von der Sensorik bis zur Steuerungssoftware gegeben sein. Der Vorteil der erhöhten Zuverlässigkeit und Flexibilität des diskontinuierlichen Transportes gegenüber dem kontinuierlichem Transport muss bestehen bleiben. Das System muss schnell und angemessen auf betriebliche Veränderungen reagieren können. (Corke and Roberts 1997 S. 53)

Strikte Anforderungen bezüglich der Sicherheit müssen erfüllt werden. Beispielsweise durch eine Zugangskontrolle und geeignete Kollisionsverhütungsmechanismen. Das Zugangskontrollsystem (ACS) registriert und verhindert den Zugang durch unbefugtes Personal. Darüber hinaus verhindert es die ungeplante Ausfahrt der autonomen Fahrzeuge und unterstützt die Durchführung von geplanten Aus- oder Einfahrten. Die Abbildung 4-1 zeigt die Einfahrt zum gesichertem Bereich im Finsch Bergwerk in Südafrika. Die Einfahrt kann wie abgebildet mit einem Tor oder mit einer Laserbarriere gesichert werden. (Burger 2006 S. 555), (Pâques, Janti et al. 1998 S. 195)



Abbildung 4-1 Torro 50D Muldenkipper am ACS Tor (Burger 2006 S. 556)

#### **4.1 Automatisierungstechnik auf betrieblicher Ebene**

Die Systeme der betrieblichen Ebene sind ein Interface (eine Schnittstelle) zwischen dem menschlichem und dem autonomem, software-basiertem Mine Planning und Mine Management. Sie stellen Daten für die Unternehmensprozessüberwachung

---

Anforderungen an die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport

---

bereit und kontrollieren sowie optimieren das System, dass die autonomen Fahrzeuge steuert. Für die Übermittlung der Daten ist ein **High Speed Kommunikationsnetzwerk** erforderlich. In Abbildung 4-2 ist beispielhaft die Architektur der betrieblichen Automatisierungssysteme dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht die Zusammenhänge der im folgendem beschriebenen Komponenten. (Lever 2011 S. 806)

Der Begriff **Mine Planning** beschreibt das Festlegen der Ziele und Prioritäten, die die Basis des Mine Managements bilden. Hierbei ist die Mitwirkung eines Menschen essentiell. Er muss abwägende Entscheidungen treffen zum Beispiel hinsichtlich der Produktionsmenge in Relation zu den Ausgaben (beispielsweise Spritverbrauch, Maschinenverschleiß) oder der kurzfristigen Produktionserhöhung gegenüber der langfristigen Effizienz. Diese expliziten und impliziten Ziele müssen in das (teil-) autonome Mine Management System eingefügt werden. (Lever 2011 S. 806f)

**Mine Management** beschreibt das Optimieren der bestehenden Vorgänge, um die durch das Mine Planning determinierten Ziele zu erreichen. Zu einem (teil-) automatisiertem Mine Management System gehört ein Mine Monitoring System. Ein solches System speichert alle relevanten Parameter: Erzproduktion, Bergeproduktion, Materialverbrauch et cetera. Ein autonomes Mine Monitoring System tätigt nach Analyse der Daten zum Beispiel selbständig Nachbestellungen. Des Weiteren kann aus den Daten der Status einzelner Geräte analysiert und Gründe für Störungen gefunden werden. (Lever 2011 S. 807), (Ganguli, Beer et al. 2011 S. 724)

Zu einem effizientem Datenmanagement gehört ein Archivierungssystem, dass die Daten aus den Monitoring System mit den Daten anderer Systeme verknüpft und abspeichert. Ein geeignetes Interface ist notwendig damit unterschiedliche Beteiligte zum Beispiel die Geschäftsführung, die Finanzabteilung oder die Wartungsabteilung auf die für sie relevanten Daten zugreifen können. Dadurch kann zum Beispiel ein effektives Verschleiß Monitoring stattfinden. Das System alarmiert und plant die Wartung bevor es zum Versagen des Bauteils oder der Maschine kommt, die notwendigen Reparaturen werden bereits bei der routinemäßigen Wartung durchgeführt. Teure Totalausfälle und ungeplante Reparaturen werden reduziert. Darüber hinaus wird ein Institutionelles Gedächtnis erstellt, ein Erfahrungsschatz, auf dessen Hilfe beispielsweise weniger umfangreich ausgebildete Mitarbeiter zurückgreifen können. Andere oder neue Bergwerksstandorte können ebenfalls vom gesammeltem Wissen

## Anforderungen an die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport

profitieren. (Ganguli, Beer et al. 2011 S. 724), (Schunnesson, Gustafson et al. 2009 S. 780)

Bestandteil eines Mine Management Systems für den diskontinuierlichen Transport kann ein **Dispatching System** sein, mit dem die Routen der Fahrzeuge im Bergwerk optimal aufeinander abgestimmt werden. Den detaillierten Aufbau eines Dispatching Systems für autonome Fahrzeuge erläutern zum Beispiel Saayman, Craig und Camisani-Calzolari (Saayman, Craig et al. 2006). (Ganguli, Beer et al. 2011 S. 724)

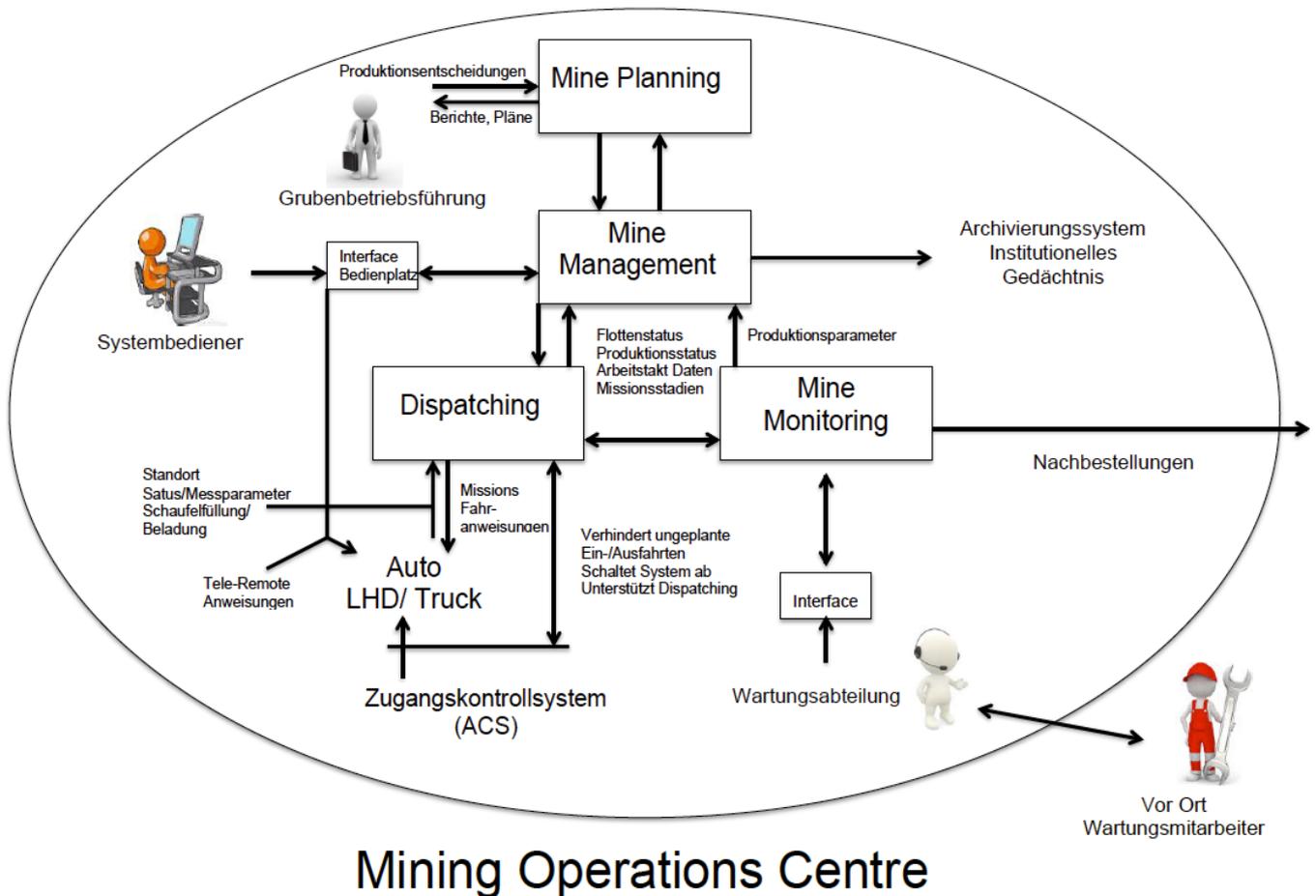


Abbildung 4-2 Architektur der betrieblichen Automatisierungstechnik

Im **Mining Operations Centre** (MOC), das auch Remote Kontrollzentrum genannt wird, erfolgt die Überwachung, Kontrolle und Analyse der Daten sämtlicher Systeme, in einem einzigem Kontrollraum statt in einer Vielzahl von dezentralen Kontrollräumen. Das MOC ist eine Plattform für die Prozessautomatisierung und Business-Integration. Durch den Zugang zu allen relevanten Daten können Entscheidungen

des Mine Managements und Mine Plannings schnell und präzise fällen. Darüber hinaus ermöglicht das übergreifende Kontrollzentrum, die Kooperation von Fachleuten aus unterschiedlichen Bereichen. Dadurch wird Silo-Denken abgebaut und die Mitarbeiter betrachten nicht nur die eigene Spezialisierung sondern den Gesamtprozess. So findet eine Verknüpfung der Abbauplanung, der Umsetzung und Maschinenwartung statt. Darüber hinaus ist eine Remote Unterstützung der Mitarbeiter vor Ort möglich. Der Bergbaukonzern Rio Tinto testet beispielsweise die Remote Unterstützung von Wartungsmitarbeitern mit Hilfe von Helmkameras und tragbaren Computern. Theoretisch kann sich das MOC überall auf der Welt befinden. Ein Standort im urbanem Raum ist aus den in Kapitel 3 beschriebenen wirtschaftlichen Gründen sinnvoll. Das MOC des teilautomatisierten Olympic Dam Bergwerkes befindet sich beispielsweise in der australischen Stadt Perth, etwa 2400 km vom Bergwerk entfernt. (McNab and Garcia-Vasquez 2011 S. 9), (Lever 2011 S. 810)

Ein entscheidender Faktor bei der Entwicklung und Einführung der Automatisierungssysteme ist der Mensch. Der Erfolg des Automatisierungssystems hängt maßgeblich von dem Wissen, den Fähigkeiten und der Akzeptanz seiner Bediener ab. Erkenntnisse aus anderen Industriezweigen zeigen, dass eine Fehlfunktion des Automatisierungssystems häufig aus einer fehlerhaften menschlichen Bedienung resultiert. Ein frühzeitiges Einbeziehen des Endbenutzers in die Entwicklung und ein User-Centred Design des Automatisierungssystem sind deshalb wichtig. Nach Einführung des Systems sollte das Design aufgrund des Feedbacks der Endbenutzer angepasst werden. Die Arbeitskräfte müssen angemessen qualifiziert und in der Bedienung des Automatisierungssystem ausreichend geschult sein. Daneben ist die Akzeptanz der neuen Technologie wichtig. Das System muss den Bediener bei der Erledigung seiner Aufgaben unterstützen. Verwirrt es den Bediener oder ist nicht zu seiner Zufriedenheit gestaltet, kann das zu einer Ablehnung führen. Folgen der Ablehnung können sein, dass das System entweder nicht benutzt oder (un)wissentlich fehlbenutzt wird. (Horberry 2012 S. 420- 423), (Lynas and Horberry 2012 S. 4f), (Lynas and Horberry 2011 S. 74-80)

## 4.2 Automatisierungstechnik der Betriebsmittel

Die Onboard Automatisierungssysteme bestehen aus einem Navigationssystem, einem Computer zur Datenverarbeitung, einer (kabellosen) Schnittstelle zum betrieblichen Kommunikationssystem und aus Sensoren zur Erfassung des Zustandes und der Umgebung des Fahrzeuges. (Mäkelä 2001 S. 23f)

Das Navigationssystem kann auf zwei unterschiedlichen theoretischen Prinzipien basieren: der absoluten oder der reaktiven Navigation. In der Praxis werden Hybrid Systeme aus reaktiver und absoluter Navigation verwendet, um die Vorteile beider Prinzipien zu kombinieren. (Larsson 2007 S. 24)

**Absolute Navigation** ist definiert als die Navigation anhand eines vordefinierten Pfades, der durch einen Koordinatensatz innerhalb eines globalen Koordinatensystems determiniert ist (Abbildung 4-3). Global bedeutet das, dass Koordinatensystem einen fixen Ursprungspunkt hat und nicht relativ zum sich bewegendem Fahrzeug definiert ist. Die Lokalisierung des Fahrzeuges ist für dieses Prinzip essentiell. Lokalisierung bedeutet, dass die geschätzte Position des Fahrzeuges im globalem Koordinatensystem jederzeit bekannt ist. (Larsson 2007)

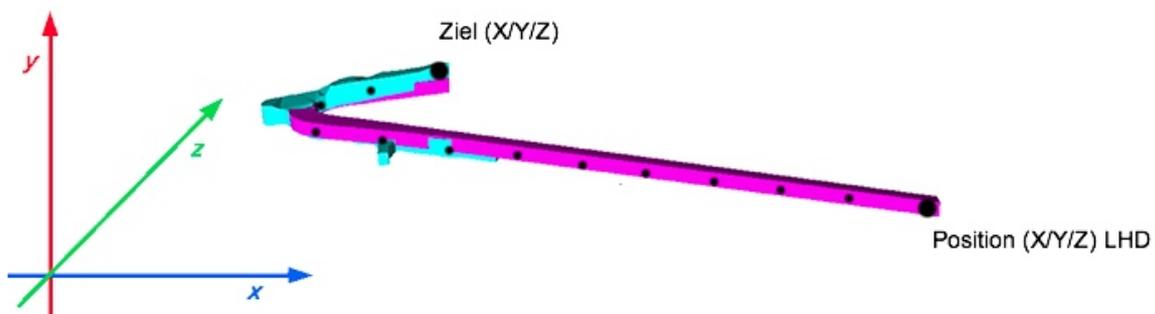


Abbildung 4-3 Definierter Pfad im Raum

Die Position des Fahrzeuges wird mit Hilfe von Koppelnavigation näherungsweise bestimmt. Koppelnavigation ist die kontinuierliche, approximative Ortsbestimmung aufgrund von Bewegungsrichtung (Kurs) und Bewegungsgeschwindigkeit. Als Sensorik zur Ermittlung der Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit, dient eine inertielle Messeinheit (IMU). Die IMU enthält Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Daneben wird Odometrie verwendet. Ein Odometer zählt die Radumdrehungen eines Fahrzeuges und berechnet daraus die zurückgelegte Strecke. Sowohl die IMU als

Anforderungen an die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport

---

das Odometer produzieren einen Messfehler (zum Beispiel durch das Rutschen der Räder). Dieser Fehler wird kontinuierlich größer, da eine neu gekoppelte Position auf einer fehlerbehafteten, vorherigen Position beruht. Der Fehler muss periodisch, durch eine exakte Ortbestimmung des Fahrzeuges anhand der Peilung eines Punktes bekannter Position, herausgerechnet werden. Zur Peilung können künstliche oder natürliche Orientierungspunkte verwendet werden, deren Position bekannt ist. Die regelmäßige Korrektur der Abweichung vom Sollkurs durch Peilungen stellt Abbildung 4-4 dar. (Gustafson 2011 S. 13), (Mäkelä 2001)

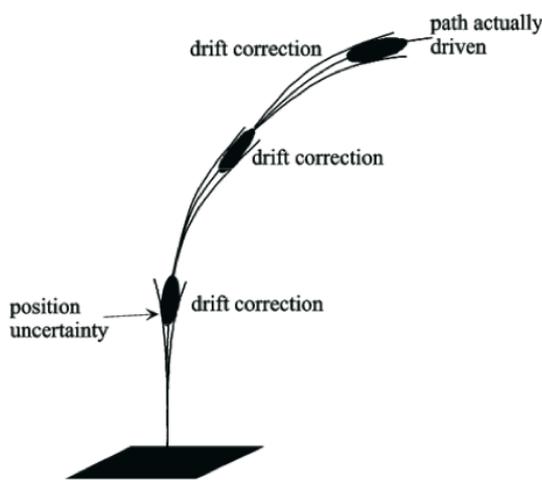


Abbildung 4-4 Korrektur der Koppelnavigation (Mäkelä 2001 S. 28)

Ein absolutes Navigationssystem hat keine Möglichkeit seine Umgebung wahrzunehmen. Es benutzt eine metrische Karte um den Pfad, dem das Fahrzeug folgt, vorzudefinieren. Auf Hindernisse, die in dieser ursprünglichen Karte nicht verzeichnet sind, kann das System nicht reagieren. Dies ist ein erheblicher Nachteil. Mit einem plötzlich auftretendem Hindernis wie einem großem Stein würde das Fahrzeug kollidieren. Deshalb werden in der Praxis zusätzlich zum absoluten Navigationssystem, Kollisionsverhütungsmechanismen eingesetzt. Das System erweitert die bestehende Karte mit auftretenden Veränderungen, simultan zur Lokalisierung des Fahrzeuges. Dadurch entsteht ein Hybrid System aus absoluter und reaktiver Navigation. (Larsson 2007)

Das Prinzip der **reaktiven Navigation** beruht nicht auf einem vordefiniertem Pfad. Stattdessen werden analog zur menschlichen Wahrnehmung Sensoren verwendet, um die Umgebung des Fahrzeuges zu analysieren. Aus den ermittelten Informatio-

---

## Anforderungen an die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport

nen, bestimmt das Fahrzeug seine Position relativ zur Umgebung. Das reaktive Navigationssystem steuert das Fahrzeug ähnlich wie ein menschlicher Fahrer, der sich in der Mitte der Strecke hält und Kollisionen mit Hindernissen und den Stößen vermeidet. In etwa wie ein menschlicher Fahrer, der solange einer Strecke folgt, bis er zu einem Streckenkreuz kommt und sich dann für eine der möglichen Abzweigungen entscheidet, reagiert das reaktive Navigationssystem. Am Streckenkreuz benutzt das reaktive Navigationssystem Informationen aus einer Knotenpunktkarte, um eine Routenentscheidung zu treffen.

Eine Knotenpunktkarte (Abbildung 4-5) ist vergleichbar mit dem Plan einer U-Bahn. Relevante Punkte (Streckenkreuze, Abbauörter, Kippstellen) sind als Knoten dargestellt. Die Karte enthält keine metrischen Details, sondern stellt die Strecken zwischen den Knoten in Segmenten dar. Das Navigationssystem erkennt wie ein menschlicher Fahrer mithilfe von charakteristischen Merkmalen oder künstlich angebrachten Orientierungshilfen, an welchem Streckenkreuz (Knotenpunkt) sich das Fahrzeug befindet. Dieses Prinzip der reaktiven Navigation, den exakten Standort des Fahrzeuges nur zu bestimmen, wenn eine Veränderung der Umgebung auftritt wird als opportunistische Lokalisierung bezeichnet. (Mäkelä 2001 S. 28), (Larsson, Broxvall et al. 2005 S. 7f)

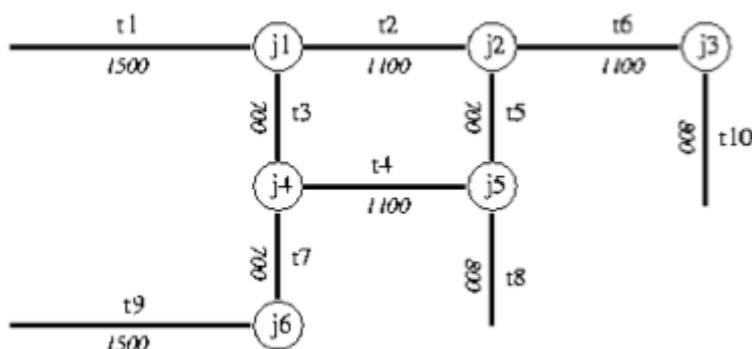


Abbildung 4-5 Ausschnitt aus der Knotenpunktkarte eines Bergwerkes (Larsson, Broxvall et al. 2005 S. 5)

Typische Sensoren, die Onboard Automatisierungssysteme zur Erfassung des Zustandes und der Umgebung des Fahrzeuges verwenden sind Laserscanner, Ladar- oder Radarsensoren sowie optische Kameras. Zur typischen Onboard Sensorik eines LHDs zählt zusätzlich ein Knickwinkelkodierer. (Indurad GmbH 2016), (Caterpillar Global Mining a 2008 S. 3), (Sandvik Mining and Construction 2009)

Ladar (Laser detection and ranging) ist eine dem Radar (Radio detection and ranging) ähnliche Methode zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung. Beide Systeme emittieren Wellen (die sich lediglich in ihrer Frequenz unterscheiden). Diese Wellen werden von Objekten in der Umgebung des Fahrzeuges reflektiert. Durch die Analyse des reflektierten Signals wird der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum Objekt berechnet. (Hornby 2010 S. 889)



Abbildung 4-6 Visualisierter Laserscan einer Strecke (Darling Geomatics 2015)

Mithilfe von Laserscannern werden Streckenprofile vermessen. Die Messdaten eines Laserscans sind in Abbildung 4-6 visualisiert. Die charakteristischen Merkmale der Strecken, die messtechnisch erfasst wurden, dienen als natürliche Orientierungspunkte für die absolute und reaktive Navigation. (Larsson 2007 S. 49)

Ein LHD ist aus zwei Teilen aufgebaut zwischen denen sich ein Knickgelenk befindet. Um die mechanische Steuerung des LHDs automatisieren zu können, werden Informationen über die Bewegungen dieses Knickgelenkes benötigt. Deshalb wird unter dem Knickgelenk ein sogenannter Knickwinkelkodierer angebracht, der die Bewegungen des Knickgelenkes misst. Der Knickwinkelkodierer ist ein elektronisches Potentiometer. (Nautilus International Control & Engineering Ltd. 2016)

## 5 Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport in der Praxis

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über ausgewählte Automatisierungslösungen für die Bergbauindustrie. Es gibt sowohl einige Forschungsprojekte auf dem Gebiet als auch kommerzielle Lösungen. Zu vielen der Forschungsprojekte und kommerziellen Systeme sind kaum Informationen öffentlich verfügbar, da die beteiligten Hersteller und Bergwerksbetreiber zögern, Informationen zu veröffentlichen, durch die sie ihren Wettbewerbsvorteil verlieren könnten. (Lever 2011 S. 806)

### 5.1 Forschungsprojekte

Zur Steigerung des Automatisierungsgrades von Bergbaumaschinen wird im Rahmen des europäischen **I<sup>2</sup>Mine** (Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future) Forschungsprojektes unter anderem eine neue Vermessungstechnologie untersucht. Die Technologie basiert auf der Echtzeitvermessung mit Infrarottrackingkameras. Ziel des Projektes ist ein Navigationssystem für autonome Maschinen zu entwickeln:

- Das universell für unterschiedliche Maschinen einsetzbar ist.
- Das mehrere Maschinen simultan kontrollieren kann.
- Das neben der Navigation der Maschinen für andere Vermessungszwecke verwendet werden kann.
- Das preisgünstige Sensoren einsetzt. (Chemelina, Lammer et al. 2014 S. 680f)

Ein Konsortium an dem neben zwei anderen Universitäten und vier Unternehmen, das Institut für Maschinentchnik der Rohstoffindustrie (IMR) der RWTH Aachen und das Aachener Unternehmen Indurad GmbH beteiligt ist, arbeitet momentan an der Entwicklung eines untertägigen Navigations-, Positionierungs-, und Mappingsystem. Ziel des interdisziplinären Forschungsprojektes ist es, ein mobiles, autonomes und intelligentes Robotik System zu entwickeln. Das **UPNS 4D+** System (Untertägiges 4D+ Positionierungs-, Navigations-, und Mappingsystem) soll zur effizienten selektiven Gewinnung von komplexen Lagerstätten, für die hochproduktiven Blockbruchbau Abbauverfahren ungeeignet sind, eingesetzt werden. Das System soll die absolute Positionierung innerhalb der Lagerstätte, autonome Navigation (3D) und die kon-

tinuierliche Echtzeit Aufzeichnung (4D) von räumlichen und geologischen Daten (4D+) ermöglichen.

Das UPNS 4D+ Konzept sieht eine Teilung des Systems in Vermessungs- und Produktionsphase vor. Während der Vermessungsphase werden Daten von optischen Sensoren (unter anderem Laserscannern), Radarsensoren, einer IMU und weiterer Sensorik erfasst. Die Daten werden automatisch für das Produktionssystem ausgewertet. Es wird eine detaillierte sechsdimensionale Karte des Bergwerkes erstellt. Diese Karte enthält ein teilautonom erstellte Analyse über die Lage von Klüften und des Nebengesteins. Das Produktionssystem, dass auf einem LHD des Herstellers GHH Fahrzeuge installiert wird, benutzt robuste Radarsensoren. Laut Indurad sind Radarsensoren zuverlässiger als Laserscanner. Das Produktionssystem erweitert das, durch den Vermessungsroboter erstellte, Lagerstättenmodell mit neuen Echtzeitdaten. (Indurad GmbH 2016)

Darüberhinaus gibt es Forschungsprojekte zur Weiterentwicklung der betrieblichen Automatisierungstechnik und des MOC. Dazu zählt das **Mine of the Future** Projekt des Bergwerkskonzerns Rio Tinto. Ziel dieses Projektes ist unter anderem, das für die Automatisierung des Pilbara Tagebaus eingesetzte, MOC weiterzuentwickeln. Rio Tinto untersucht beispielweise in wie weit Virtual-Reality-Brillen zur Fernunterstützung der vor Ort tätigen Mitarbeiter einsetzbar sind. (Lever 2011 S. 810f)

Das **MARA** (Mine Automation Reference Architecture) Projekt der School of Mechanical and Mining Engineering der University of Queensland arbeitet an der Entwicklung eines Referenzsystems zur Verbesserung der Verknüpfung und Interaktion zwischen bestehenden betrieblichen Automatisierungssystemen. (Dudley and McAree 2013 S. 1795f)

## 5.2 Kommerzielle Systeme

Die vier Systeme, Auto Mine (Sandvik), MineGem (Caterpillar), Scooptram Automation System (Atlas Copco), Automated Guidance System (Nautilus) sind kommerziell erhältlich und werden weltweit in verschiedenen Bergwerken eingesetzt. Anhang 1 und Anhang 2 geben einen detaillierten Überblick über die Bergwerke, die diese kommerziellen Automatisierungslösungen verwenden. Die Systeme autonomisieren das Fahren und Abkippen, während die Schaufel im Tele-Remote Modus gefüllt wird.

Ältere Systeme benötigten Infrastruktur. Infrastrukturbasierte Systeme sind unflexibel und Menschen müssen in potentiell gefährlichen Bereichen arbeiten, um die Infrastruktur zu installieren. Deshalb basieren die aktuellen Systeme entweder auf dem Prinzip der absoluter oder der reaktiver Navigation, für die keine Infrastruktur benötigt wird. (Gustafson 2011 S.14)

### **AutoMine**

Das AutoMine System wurde vom schwedischen Bergbaumaschinenhersteller Sandvik in dessen Versuchsbergwerk im finnischen Tampere, in Zusammenarbeit mit finnischen Universitäten, entwickelt. Das System ist intelligent und lernfähig. So kann es zum Beispiel falls ein LHD über einen großen Stein fährt, im Bereich des Steins eine Geschwindigkeitsbegrenzung einführen. Folgende Fahrzeuge halten entweder vor dem Stein oder fahren mit niedriger Geschwindigkeit. (Gustafson 2011 S. 14f)

Das AutoMine System besteht aus Bausteinen, die auf die Anforderungen des Kunden angepasst werden:

- Das Production Control System (PCS) ist ein Mine Planning und Mine Management System zur Optimierung der Produktivität. Das PCS von AutoMine ist auf das Blockbruchbau Abbauverfahren angepasst.
- Das Mission Control System (MCS) ist ein Dispatching System, es enthält das Interface für den LHD Bediener und steuert und überwacht den Verkehr der autonomen Fahrzeuge
- Das Access Control System (ACS) überwacht den Zugang zum Bereich, indem die automatisierten Fahrzeuge arbeiten
- MineLAN ist der Markenname des Hochgeschwindigkeitsbreitband Datenübertragungssystem von AutoMine
- Das AutoMine Onboard Automatisierungssystem kontrolliert die mechanischen Funktionen des Fahrzeugs und enthält ein Monitoring- und Navigationssystem. (Sandvik Mining and Construction 2007)

Das AutoMine Navigationssystem mit dem Markennamen InfraFREE beruht auf dem Prinzip der absoluten Navigation (Koppelnavigation mit natürlichen Orientierungspunkten im Bergwerk). Es wurde von Sandvik in Kooperation mit dem finnischen Unternehmen Navitec Systems entwickelt. In das InfraFREE System müssen in einer

Lernphase Informationen über das Aussehen des Grubengebäudes einprogrammiert werden, damit autonome Fahrzeuge ihre Position bestimmen können. Auf den Fahrzeugen sind Laserscanner installiert mit denen das Profil der Strecke gescannt wird. Nachdem in der Lernphase ein manuell gesteuertes Fahrzeug, das Profil einer Strecke ermittelt hat, können Fahrzeuge in dieser Strecke autonom fahren. Das InfraFREE System ermittelt die Position des autonomen Fahrzeugs, indem es die Scandaten des autonomen Fahrzeuges mit den zuvor ein gespeicherten Daten abgleicht. Weiterhin sind auf dem autonomem Fahrzeug ein Videosystem installiert, das Videoinformationen für die Tele-Remote Steuerung bereitstellt. Die Funkverbindung des Fahrzeugs mit dem grubenweitem Kommunikationsnetzwerk wird über WLAN hergestellt. (Gustafson 2011 S. 16), (Larsson 2007 S. 22)

Das Automatisierungssystem **AutoMine Lite** basiert auf dem AutoMine System. AutoMine Lite wurde zur Automatisierung einzelner LHDs, die in Abbaukammern mit ungesicherter Firste (wie zum Beispiel beim Weitungsbau üblich) arbeiten, entwickelt. Mit AutoMine Lite können LHDs sowohl autonom als auch im Copilot Modus gesteuert werden. Laut dem Hersteller Sandvik ist das System flexibler als AutoMine und für kleinere Betriebe geeignet. (Sandvik Mining and Construction 2009)

### **MineGem**

Der Maschinenhersteller Caterpillar bot seit 2004 ein Automatisierungssystem mit dem Markennamen MineGem an. Inzwischen wird das System als Bestandteil der MineStar Produktreihe unter dem Markennamen Command for Underground verkauft. In der MineStar Produktreihe sind darüberhinaus (teil-) automatisierte Mine Management und Monitoring Systeme sowie Automatisierungssystem für den Einsatz im Tagebau erhältlich. (Caterpillar 2016)

MineGem wurde in Kooperation mit dem australischem CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) Institut und australischen Universitäten entwickelt. Details der Entwicklung und Testresultate beschreiben Roberts, Duff und Corke (Roberts, Duff et al. 2001). Wie AutoMine Lite besitzt MineGem einen autonomen und einen Copilot Modus. Zum System gehört ein Kommunikationssystem mit dem Markennamen LARN das auf den 802.11a/b/g WLAN Standards basiert sowie ein Zugangskontrollsystem. Ein Ausschnitt aus dem MineGem Bedienerinterface ist in Abbildung 5-1 dargestellt. (Gustafson 2011 S. 17), (Caterpillar 2013 S. 9f)



Abbildung 5-1 MineGem Bedienerinterface (Caterpillar 2013 S. 4)

Das Navigationssystem das MineGem zu Grunde liegt, basiert auf dem Prinzip der reaktiven Navigation und opportunistischen Lokalisation. Das Onboard System von MineGem besteht aus einem Onboard Computer, zwei Kameras, Laserscannern und zwei Ladar Sensoreinheiten. Nach dem Prinzip der opportunistischen Lokalisation, bestimmt das Navigationssystem die Position des Fahrzeuges in Relation zu relevanten Punkten. Um die Position zu bestimmen gleicht das Navigationssystem, die durch das Ladarsystem ermittelten Informationen mit existierenden Streckenprofilen, aus einer Datenbank ab. Die Datenbank der Streckenprofile wird durch eine Vermessung des Bergwerks mit Laserscannern erstellt. (Caterpillar Global Mining a 2008)

## Scooptram Automation

Der Atlas Copco Konzern bietet ein Automatisierungssystem mit dem Markennamen Scooptram Automation an. Das System besitzt einen autonomen und einen Tele-Remote Modus. Onboard Sensorik und die Route Master Software steuern das Fahrzeug im autonomen Modus. Das autonome Fahrzeug kann nur entlang vorher aufgezeichneter Routen fahren. Die Datenverarbeitung erfolgt mit einem Server Rack, dass sich neben dem Bedienplatz im Kontrollraum befindet. Passend zum

System bietet Atlas Copco ein Kommunikationsnetzwerk an. Es kann auch ein bestehendes WLAN Netzwerk genutzt werden, falls es bestimmte technische Anforderungen erfüllt. Die minimale Bandbreite beträgt beispielsweise 2 Mb und ein DHCP Server ist notwendig. Das Zugangskontrollsystem, benutzt eine Laserbarriere und arbeitet redundant zum Route Manger System. Zur Onboard Sensorik (Abbildung 5-2) zählen: ein Front- und Hecklaserscanner, Kameras, eine IMU, ein Knickwindelkodierer, ein Odometer, sowie eine Kommunikationseinheit mit zwei redundanten Antennen. Ein Onboard Computer übernimmt die mechanische Steuerung des LHDs. Das Navigationssystem, das Teil von Scooptram Automation ist, beruht wie das Navigationssystem von MineGem auf dem Prinzip der reaktiven Navigation und opportunistischen Lokalisation. (Gustafson 2011 S. 18), (Atlas Copco Rock Drills AB 2011 S. 1- 4)

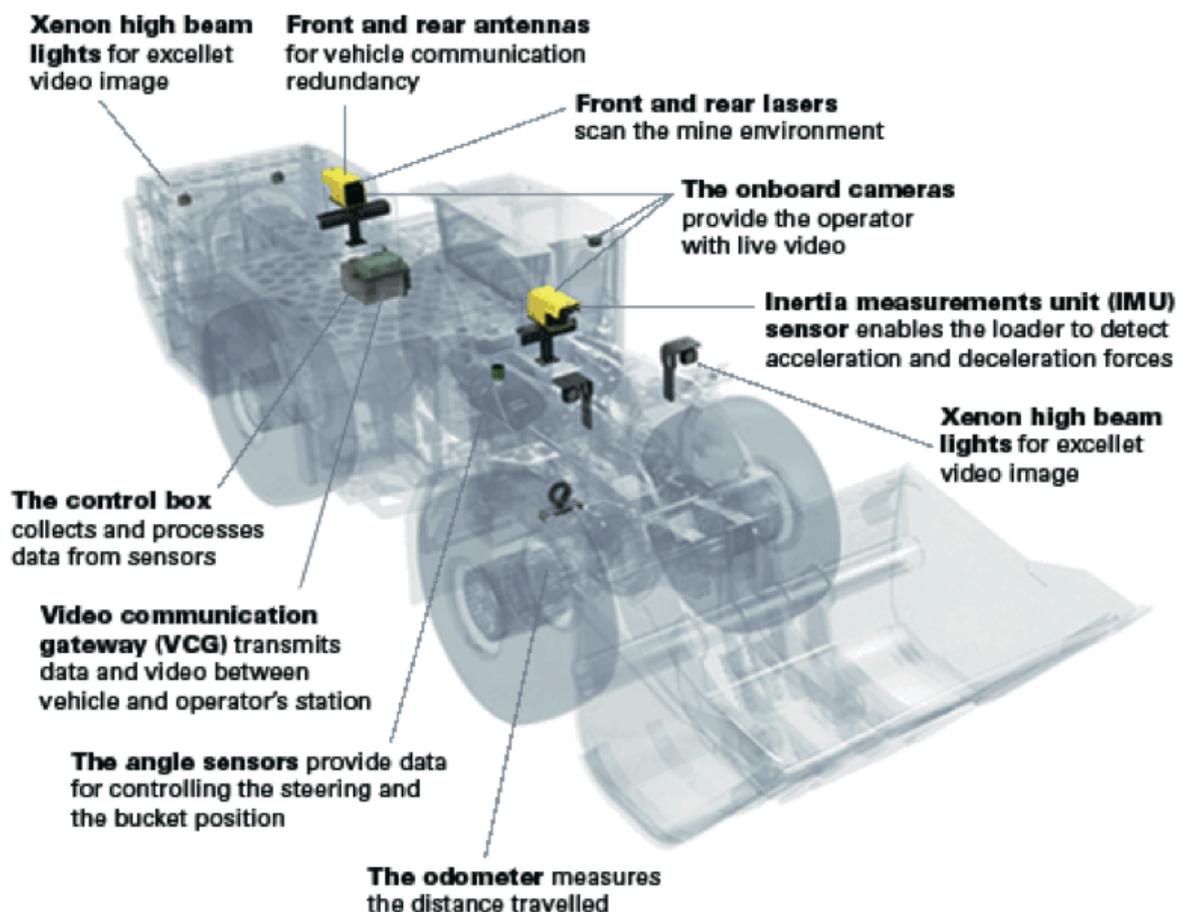


Abbildung 5-2 Sensorik des Scooptram Automatisierungssystems (Gustafson 2011 S. 19)

## Automated Guidance System (AGS)

Das kanadische Unternehmen Nautilus International Control and Engineering verkaufte seit 2011 ein Automatisierungssystem mit dem Markennamen Automated Guidance System (AGS). Nach eigenen Angaben begann Nautilus im Jahr 1999 mit der Entwicklung des ersten Prototypen. Mit Hilfe dieses Prototypen wurde das System 14 Jahre lang weiterentwickelt. Im Jahr 2010 wurde das AGS auf einem CAT R1700 LHD installiert und im kanadischen Flin-Flon Bergwerk in Manitoba getestet.

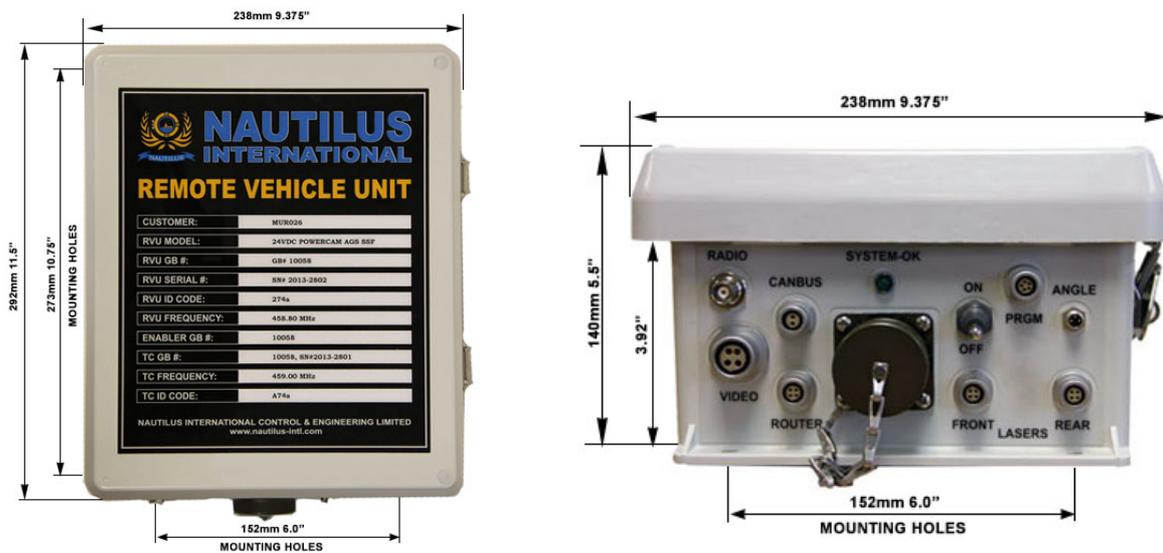


Abbildung 5-3 Remote Vehicle Unit (Nautilus International Control & Engineering Ltd. 2016)

Laut Nautilus können mit dem AGS LHDs von Caterpillar, Sandvik, Atlas Copco sowie LHDs anderer Hersteller gesteuert werden. Es wird eine Remote Vehicle Unit (Abbildung 5-3) auf dem LHD installiert. Daran sind ein Knickwinkelkodierer und zwei Laserscanner, in die eine Kamera integriert ist, angeschlossen. Jeweils ein Laserscanner ist nach vorne und einer nach hinten ausgerichtet. Zum AGS gehört ein Funkkommunikationssystem und ein Zugangskontrollsystem, dass auf einer Laserbarriere basiert. Bevor der LHD eine Route autonom fahren kann, muss die Route, durch das abfahren der Route im Tele-Remote Modus, in das AGS einprogrammiert werden.

## 6 Fazit

Es gibt fünf Betriebsmodi für LHDs und Haul Trucks: Die manuelle Steuerung, die Remote- und Tele-Remote Steuerung, den Copilot und den autonomen Modus. Die Betriebsmodi spiegeln die Automatisierungsstadien wieder. Für eine vollständige Automatisierung des diskontinuierlichen Transports werden autonome, intelligente Betriebsmittel benötigt. Teilautomatisierte LHDs sind seit über 20 Jahren technische Realität.

Durch den Einsatz von automatisierten Fahrzeugen erhöht sich die Arbeitssicherheit, Produktivität, Qualität und Effizienz der Rohstoffförderung. Darüberhinaus kann die Automatisierung zu einer besseren Umweltverträglichkeit beitragen.

Autonome Transport Systeme werden grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilt: Die Systeme der betrieblichen Ebene und die Onboard Systeme. Die Systeme der betrieblichen Ebene sind eine Schnittstelle zwischen dem menschlichen und dem autonomen, software-basiertem Mine Planning und Mine Management. Sie stellen Daten für die Unternehmensprozessüberwachung bereit und kontrollieren sowie optimieren das System, das die autonomen Fahrzeuge steuert.

Die Lokalisierung und Positionierung der Fahrzeuge mit einem Navigationssystem ist ein essentielles Teilsystem der Onboard Automatisierungssysteme. Das Navigationssystem basiert entweder auf dem Prinzip der absoluten oder der reaktiven Navigation. In der Praxis werden Hybridsysteme verwendet, um die Vorteile beider Prinzipien zu kombinieren. Unterschiedliche Sensoren wie Laserscanner, Radar oder Ladar, optische Kameras und eine inertielle Messeinheit ermitteln Messdaten, die das Onboard Automatisierungssystem zur Steuerung, Positionierung und Überwachung des autonomen Fahrzeuges benötigt.

Es gibt vier kommerzielle Automatisierungslösungen: Auto Mine (Sandvik), Mine-Gem/Command for Underground (Caterpillar), Scooptram Automation System (Atlas Copco), Automated Guidance (Nautilus), die weltweit in mindestens 28 Bergwerken eingesetzt werden. Diese Systeme automatisieren das Fahren von LHDs und Haul Trucks sowie das Abkippen des Haufwerkes. Das Füllen der Schaufel erfolgt im Tele-Remote Modus. Es gibt vielversprechende Forschungsprojekte zur Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik der Betriebsmittel und der betrieblichen Ebene.

## 7 Ausblick

Um die Automatisierungstechnik für den diskontinuierlichen Transport weiterzuentwickeln sind folgende Faktoren von Bedeutung:

- In der Entwicklung eines Automatisierungssystems für kleine Bergwerke mit komplexeren Lagerstättenverhältnissen und selektiven Abbauverfahren liegt großes Potential. Das UPNS 4D+ Projekt ist ein konstruktiver Ansatz. Der weltweite Anteil der Bergwerke, die autonome LHDs und Haul Trucks einsetzen ist, verschwindend gering. Die Gründe könnten in den hohen Investitionskosten, die zur Installation von Automatisierungstechnik getätigt werden müssen, liegen. Daneben müssen die Bergwerke momentan bestimmte Anforderungen erfüllen, um von der Automatisierung zu profitieren. Je entlegener ein Bergwerksstandort ist und je höher die Produktionsmengen des Bergwerkes sind, desto spürbarer ist der Nutzen der Automatisierung. Hochproduktive Blockbruchbaubergwerke erzielen momentan den größten Nutzen. Für kleinere Betriebe erweisen sich die Systeme häufig als zu unflexibel. Daneben lassen sich die Systeme kaum in den laufenden Betrieb integrieren. (Schunnesson, Gustafson et al. 2009 S. 778, 780), (Indurad GmbH 2016)
- Ein System, das das Laden des Haufwerks automatisiert bietet viel Entwicklungspotential. Dafür müssen die bestehenden Möglichkeiten zur autonomen Lagebeurteilung soweit verbessert werden, dass die vielen verschiedenen Funktionen, die momentan vom menschlichem Bediener ausgeführt werden, substituiert werden können. (Lever 2011 S. 812)
- Die Ausbildung der Arbeitskräfte hinsichtlich der Verwendung von Automatisierungstechnik sollte verbessert werden. Wenn ihre Qualifikation und ihr Fachwissen verbessert wird, unterstützt dies den erfolgreichen Einsatz von High-Tech Automatisierungstechnologie. (Lynas and Horberry 2012 S. 78)

## 8 Literaturverzeichnis

Atlas Copco Rock Drills AB (2011). "Atlas Copco Scooptram Automation Technical specification." [http://www.atlascopco.com.au/Images/Spec\\_Scooptram\\_Automation\\_9851\\_2632\\_01\\_tcm795-1543759.pdf](http://www.atlascopco.com.au/Images/Spec_Scooptram_Automation_9851_2632_01_tcm795-1543759.pdf). (zuletzt eingesehen am 23.01.2016)

Burger, D. J. (2006). "Integration of the mining plan in a mining automation system using state-of-the-art technology at De Beers Finsch Mine." *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 106: 553-559.

Caterpillar (2013). "Command for Underground Technical Specifications." <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10338828>. (zuletzt eingesehen am 23.01.2016)

Caterpillar (2016). "Command for Underground." [http://www.cat.com/en\\_US/support/operations/technology/cat-minestar/command/command-for-underground.html](http://www.cat.com/en_US/support/operations/technology/cat-minestar/command/command-for-underground.html). (zuletzt eingesehen am 23.01.2016)

Caterpillar Global Mining a (2008). "Automation keeping workers safe at LKAB Malmberget Mine." *Viewpoint* 3: 1-5.

Caterpillar Global Mining b (2008). "Building the technologies for the mine sites of the future: The time is right for autonomy." *Viewpoint* 4: 1-5.

Chemelina, K., et al. (2014). Real-Time Machine Guidance with Tracking Cameras. In: 6th International Symposium High Performance Mining. Aachen: 679-687.

Corke, P. and J. Roberts (1997). Automation of underground Truck Haulage. In: *Underground Mining Methods and Communication Systems*. Newcastle, CSIRO: S. 53 -65.

Darling Geomatics (2015). "3 D Laser Scanning and Mine Surveying." [http://www.darlingltd.com/3d\\_laser\\_scanning/mine\\_surveying\\_3d\\_scanning.html](http://www.darlingltd.com/3d_laser_scanning/mine_surveying_3d_scanning.html). (zuletzt eingesehen am 23.01.2016)

Dudley, J. J. and P. R. McAree (2013). Why the mining industry needs a reference architecture for automation initiatives. In: *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Wollongong, Australia: 1792-1797.

Duff, E., et al. (2010). The development of a telerobotic rockbreaker. In: Field and Service Robotics. Berlin-Heidelberg, Springer: S. 411- 420.

Ericsson, P., et al. (2011, 6.01.2016). "Experiences with a new generation automated long hole drilling rigs at LKAB Kiruna mine in northern Sweden."  
[http://www.minewiki.org/index.php/Experiences\\_with\\_a\\_new\\_generation\\_automated\\_long\\_hole\\_drilling\\_rigs\\_at\\_LKAB\\_Kiruna\\_mine\\_in\\_northern\\_Sweden](http://www.minewiki.org/index.php/Experiences_with_a_new_generation_automated_long_hole_drilling_rigs_at_LKAB_Kiruna_mine_in_northern_Sweden). (zuletzt eingesehen am 11.12.2015)

Erikson, G. and A. Kitok (1991). Automatic loading and dumping using vehicle guidance in a Swedish mine. In: International Symposium in Mine Mechanisation and Automation. Colorado: 15.33-15.44.

Ganguli, R., et al. (2011). Mine Communications, Monitoring, and Control. In: Darling P (Hrsg), SME Mining Engineering Handbook Volume One. Littleton, SME: S. 717-730.

Gustafson, A. (2011). Automation of Load Haul Dump Machines. Luleå, University Press: S. 8- 56.

Gustafson, A. (2013). Automation of Load Haul and Dump Machines Comparative performance analysis and maintenance modeling Operation and Maintenance Engineering. Luleå, University Press. ( zugleich Dissertation Luleå University of Technology)

Horberry, T. (2012). "The Health and Safety Benefits of New Technologies in Mining: A Review and Strategy for Designing and deploying Effective User-Centred Systems." Minerals 2: 417 - 425.

Hornby, A. S. (2010). Oxford Dictionary of Current English. Oxford, Oxford University Press.

Indurad GmbH (2016). "UPNS4D+: Underground 4D+ Positioning, Navigation and Mapping System." <http://indurad.com/index.php?id=82>. (zuletzt eingesehen am 20.01.2016)

Karas, H. (2015). Robotics in mining. In: EUMICON Linz: 1-42.

Larsson, J. (2007). Reactive navigation of an autonomous vehicle in underground mines. Örebro, University Press. ( zugleich Licentiate Thesis Örebro University of Technology)

Larsson, J., et al. (2005). A Navigation System for Automated Loaders in Underground Mines. In: 5th International Conference on Field and Service Robotics, Port Douglas.

Lever, P. (2011). Automation and Robotics. In: Darling P (Hrsg), SME Mining Engineering Handbook Volume One. Littleton, SME: S. 805-824.

Lufthansa Technik AG (2015). "GuideU Reliable and maintenance-free emergency floor path marking." <http://www.lufthansa-technik.com/guideu-product>. (zuletzt eingesehen am 10.12.2015)

Lynas, D. and T. Horberry (2011). "Human Factor Issues with Automated Mining Equipment." The Ergonomics Open Journal 4: 74-80.

Lynas, D. and T. Horberry (2012). Exploring the Human Factors Challenges of Automated Mining Equipment. Brisbane, Minerals Industry Safety & Health Centre, University of Queensland.

Mäkelä, H. (2001). "Overview of LHD navigation without artificial beacons." Robotics and Autonomous Systems 36: 21-35.

McNab, K. and M. Garcia-Vasquez (2011). Autonomous and remote operation technologies in Australian mining. Prepared for CSIRO Minerals Down Under Flagship, Minerals Futures Cluster Collaboration by the Centre for Social Responsibility in Mining Sustainable Minerals Institute The University of Queensland. Brisbane.

Nautilus International Control & Engineering Ltd. (2016). "Automated Guidance - News Bulletin." <http://www.nautilus-intl.com/nautilus-ags-automated-guidance-system/>. (zuletzt eingesehen am 20.01.2016)

Noort, D. and P. McCarthy (2009). "Automated underground mining " International Mining January: 50.

Pâques, J.-J., et al. (1998). Safety requirements for an automatic mining truck without onboard operator. In: International Conference and Advances in Vehicle Control and Safety. Amiens, France: 195-200.

Revuelta, J., et al. (2010). "El Teniente goes deeper." International Mining October 10-15

Ritter, A. (2001). Canada: From Fly-In, Fly-Out to Mining Metropolis. In: McMahon G, Remy F (Hrsg), Large Mines and the Community: Socioeconomic and Environmental Effects in Latin America, Canada, and Spain. Canada, World Bank: 223-261.

Roberts, J. M., et al. (2001). "Reactive navigation and opportunistic localization for autonomous underground mining vehicles." Information Sciences 145: 127- 146.

Roberts, J. M., et al. (2000). Autonomous Control of Underground Mining Vehicles using Reactive Navigation. International Conference on Robotics & Automation. San Francisco: 3790 - 3795.

Saayman, P., et al. (2006). "Optimization of an autonomous vehicle dispatch system in an underground mine." The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy 106: 77-86.

Sandvik Mining and Construction (2007). "Sandvik automation in action."  
<http://construction.sandvik.com/news-media/case-stories/sandvik-automation-in-action/>. (zuletzt eingesehen am 29.12.2015)

Sandvik Mining and Construction (2009). "Sandvik AutoMine underground mining system: What it does and how it works."  
<http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/9885/Internet/AU09003.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A/www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/9885/Internet/AU09005.NSF/NAUnique/E0C0340BF0A36274CA25768700005908&banner=/sandvik/9885/Internet/AU09003.nsf/LookupAdm/BannerForm%3FOpenDocument>. (zuletzt eingesehen am 20.01.2016)

Schunnesson, H., et al. (2009). Performance of Automated LHD machines: A Review. In: 18th International Symposium on Mine planning and Equipment Selection (MPES) Banff: 773- 782.

Voigt, K. I. (2012). Automatisierungstechnik. Wiesbaden, Springer Gabler Verlag.

---

Wahlquist, H. (2015). Main Target - increased efficiency by mining activities during 24 hours. In: Karas H (Hrsg), Robotics in mining. In: EUMICON Linz: 1-42.

Walker, S. (2012). "The Drivers of Autonomy Both underground and on surface, autonomous mining machines becoming increasingly attractive." Engineering and Mining Journal August: 52 - 56.

**Anhang**

Anhang 1 Übersicht Bergwerke mit autonomen Transport (Gustafson 2011 S. 17) . 37

Anhang 2 Ergänzung Übersicht der Bergwerke mit autonomen Transport (eigene  
Bearbeitung nach (Walker 2012 S. 54), (Nautilus International Control &  
Engineering Ltd. 2016))..... 38

## Anhang

### Anhang 1 Übersicht Bergwerke mit autonomen Transport (Gustafson 2011 S. 17)

Company	Mine	Country	Using	Manu- facturer	Automatic system	LHD/ Truck
Teck Cominco and Barrick Gold	Williams mine	Canada	Presently	Sandvik	AutoMine	Truck
BHP Billiton	Olympic Dam mine	Australia	Presently	Caterpillar	MINEGEM	LHD
Boliden Mineral AB	Garpenberg	Sweden	Presently, starting up phase	Sandvik	AutoMine Lite	LHD
Codelco	El Teniente, Diablo regimiento	Chile	Not currently in use	Sandvik	AutoMine	LHD
Codelco	El Teniente, Pipa Norte	Chile	Not currently in use	Sandvik	AutoMine	LHD
Codelco	El Teniente  Pilar Norte	Chile	Presently	Sandvik	AutoMine	LHD
DeBeers Consolidated mines	Finsch mine	South Afrika	Presently	Sandvik	AutoMine	Truck and previously one LHD
VALE INCO Limited	Stobi mine	Canada	Stopped 2005/2006	Wagner	Light wire guidance system	LHD and truck
VALE INCO Limited	Creighton mine	Canada	Stopped appr. 2003		Light wire guidance system	LHD
Inmet	Pyhäsalmi mine	Finland	Presently	Sandvik	AutoMine Lite	LHD
LKAB	Kirunavaara mine	Sweden	On and of from the 80ies, have recently installed one semi- automatic LHD	Sandvik	SALT4, AutoMine Lite	LHD
LKAB	Malmberget mine	Sweden	Presently	Caterpillar	MINEGEM	LHD
Newmont Mining Corporation	Jundee mine	Australia	Presently	Caterpillar	MINEGEM	LHD
XSTRATA	Brunswick division	Canada				
Northgate Minerals Corporation	Stawell gold mine	Australia		Caterpillar	MINEGEM	LHD
Rio Tinto	Northparkes mines	Australia	Not in use, only tests	Caterpillar	MINEGEM	LHD
Rio Tinto	Diavik mine	Canada	Was used during 2010. Presently stopped due to going underground	Atlas Copco	Scooptram automation	LHD
Lappland Goldminers AB	Zinkgruvan	Sweden	1989-1990	GHH	Painted lines on ceiling	LHD
XSTRATA	Mt Isa Mines Ltd	Australia	Project on hold	Sandvik	AutoMine	LHD

## Anhang

### Anhang 2 Ergänzung Übersicht der Bergwerke mit autonomen Transport (eigene Bearbeitung nach (Walker 2012 S. 54), (Nautilus International Control & Engineering Ltd. 2016))

Unternehmen	Bergwerk	Land	Status	Hersteller	Automatisierungssystem	LHD/Truck
Newcrest	Cadia East	Australien	Seit 2009	Sandvik	AutoMine	LHD
Newcrest	Ridgeway Deep	Australien	Seit 2007	Sandvik	AutoMine	LHD
Rio Tinto	Argyle Diamond Mine	Australien	In Benutzung	Sandvik	AutoMine	LHD
Rio Tinto	Northpark Mines	Australien	Seit 2010	Sandvik	AutoMine	LHD
Newmont	Waihi Mine	Neuseeland	Seit 2011	Nautilus	Automated Guidance	LHD
Newmont	Favona Mine	Neuseeland	Seit 2011	Nautilus	Automated Guidance	LHD
Newmont	Midas Mine	USA	Seit 2012	Nautilus	Automated Guidance	LHD
Randgold Resources und Anglo Ashanti	Kibali Gold Mine	Demokratische Republik Kongo	Seit 2014	Nautilus	Automated Guidance	LHD
OZ Minerals	Prominent Hill	Australien	Seit 2012	Nautilus	Automated Guidance	LHD
Dominion Diamonds	Ekati Mine	Kanada	Seit 2014	Nautilus	Automated Guidance	LHD
Goldcorp	Red Lake Mine	Kanada	In Benutzung	Nautilus	Automated Guidance	LHD
Goldcorp	Eleonore Mine	Kanada	In Benutzung	Nautilus	Automated Guidance	LHD
St. Barbara Limited	Gwalia Mine	Australien	In Benutzung	Nautilus	Automated Guidance	LHD
St. Barbara Limited	King of the Hills	Australien	In Benutzung	Nautilus	Automated Guidance	LHD
Kingsgate Consolidated Ltd.	Challenger Mine	Australien	In Benutzung	Nautilus	Automated Guidance	LHD