

Projekt: Studie zur Emissionsreduktion von Fahrzeugen im Unter-Tage-Bau

Abschlussbericht



Karlsruhe, den 31.12.2017

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Dipl.-Ing. Jan Siebert

Karlsruher Institut für Technologie / KIT

Institut für Fahrzeugsystemtechnik / FAST

Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen / Mobima

Rintheimer Querallee 2

76131 Karlsruhe

www.fast.kit.edu/mobima/

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kaiserstraße 12

76131 Karlsruhe

USt-IdNr. DE266749428

Präsident: Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka

Vizepräsidenten: Dr. Ulrich Breuer, Prof. Dr. Thomas Hirth,
Prof. Dr. Oliver Kraft, Christine von Vangerow,
Prof. Dr. Alexander Wanner

LBBW/BW Bank

IBAN: DE44 6005 0101 7495 5001 49

BIC/SWIFT: SOLADEST600

Inhaltsverzeichnis

1	Organisatorisches	7
1.1	Kurzvorstellung des Forschungsvorhabens	7
1.2	Kurzvorstellung der beteiligten Unternehmen und Gruben	7
1.2.1	Mobima / Karlsruher Institut für Technologie	7
1.2.2	e-mobil BW	8
1.2.3	Grube A.....	8
1.2.4	Grube B.....	8
1.2.5	Grube C	9
1.2.6	Grube C	9
2	Vorgehen im Projekt.....	11
3	Ergebnisse AP1: Untersuchung eingesetzter Förderfahrzeuge.....	13
3.1	Grube A	14
3.1.1	Radlader R1A	14
3.1.2	Radlader R2A	16
3.1.3	Dumper D1A	17
3.1.4	Berauber B1A	18
3.2	Grube B	20
3.2.1	Fahrlader LHD1B	20
3.2.2	Betontransporter BT1B	21
3.2.3	Mobilbagger B1B	22
3.3	Grube C	24
3.3.1	Fahrlader LHD1C	24
3.3.2	Berauber B1C	25
3.3.3	Schiebekastenfahrzeug (SKF) D1C	26
3.3.4	Fahrlader LHD2C	27
3.4	Grube D	29
3.4.1	Radlader R1D	29
3.4.2	Berauber B1D	30
3.4.3	Radlader R2D	30
3.4.4	Dumper D1D	31
4	Ergebnisse AP2: Analyse möglicher Energiespeichersysteme	33
4.1	Stand der Technik: Fossiler Energiespeicher Diesel	34
4.2	Alternative Primärenergieträger: LNG (Liquefied Natural Gas).....	34
4.3	Wasserstoff als Energiespeicher.....	35
4.4	Batterien als Energiespeicher	35
4.4.1	Blei-Säure-Batterien	36
4.4.2	Lithium-Ionen-Batterien	37
5	Ergebnisse AP3: Erarbeitung möglicher Fahrzeugkonzepte.....	41
5.1	Konzepte für den emissionsreduzierten Untertagebau	41
5.1.1	Modifiziertes Rightsizing	41
5.1.2	Betriebliche Prozessoptimierung	42
5.1.3	Nachrüsten oder Ersetzen von (Alt-)Motoren	44

5.1.4	Konstruktiver Leichtbau	45
5.1.5	Alternativer Primärenergieträger LNG	46
5.1.6	Alternativer Sekundärenergieträger Druckluft.....	47
5.1.7	Elektrifizierung von Fahrzeugen und Fahrzeugverbunden	47
5.1.8	Einsatz von Hybridfahrzeugen	47
5.1.9	Weitere Konzepte: Geschlossene Fahrzeugkabine & Atemschutzgeräte	48
5.2	Hybride mobile Arbeitsmaschinen	50
5.2.1	Hybride Bagger	52
5.2.2	Hybride Dumper und Transportfahrzeuge	53
5.2.3	Hybride Fahr- und Radlader	53
5.2.4	Hybride Teleskoplader	54
5.3	Emissionsreduzierung durch Elektrifizierung	54
5.3.1	Forschungsfelder der Elektrifizierung mobiler Arbeitsmaschinen für den Untertagebau	54
5.3.2	Energieübertragung durch Induktion.....	55
5.3.3	Kabelgebundene Fahrzeuge.....	56
5.3.4	Fahrleitungsgebundene Fahrzeuge	59
5.3.5	Batteriebetriebene Fahrzeuge	60
5.3.6	Weitere elektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen am Markt.....	63
5.3.7	Elektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen als Gegenstand aktueller Forschung	63
5.3.8	Brennstoffzellenfahrzeuge	63
6	Emissionsreduzierung durch Elektrifizierung in ausgewählten Gruben	66
6.1	Grube A	70
6.1.1	Radlader R1A.....	70
6.1.2	Radlader R2A.....	71
6.1.3	Dumper D1A	72
6.1.4	Berauber B1A.....	73
6.2	Grube B	73
6.2.1	LHD 1B.....	73
6.2.2	Betontransporter BT1B	74
6.2.3	Mobilbagger B1B.....	74
6.3	Grube C	75
6.3.1	Fahrlader LHD1C	75
6.3.2	Berauber B1C	76
6.3.3	Schiebekastenfahrzeug D1C	76
6.3.4	Fahrlader LHD2C	78
6.4	Grube D	78
6.4.1	Radlader R1D	78
6.4.2	Berauber B1D	79
6.4.3	Radlader R2D	79
6.4.4	Transportfahrzeug D1D	79
6.5	Zusammenfassung AP3	81
7	Ergebnisse AP4: Forschungsbedarf	84
7.1	Elektrifizierte Grube im Untertagebau.....	84
7.2	Modulare Batteriepacks für mobile Arbeitsmaschinen.....	84

7.3	Ferngesteuerte, teilautonome oder automatisierte Grube.....	85
7.4	Elektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen	86
7.5	Alternative Energiequellen für mobile Arbeitsmaschinen im Untertagebau	87
8	<i>Ergebnisse AP5: Methode zur Verallgemeinerung.....</i>	88
8.1	Schritt 1: Akquise von Rahmendaten der Grube.....	88
8.2	Schritt 2: Definition relevanter Fahrzeuge u. Identifikation relevanter Leistungsklassen durch Clusterung.....	88
8.3	Schritt 3: Vorauswahl umsetzbarer grubenweiter / fahrzeugspezifischer Maßnahmen zur Emissionsreduzierung.....	90
8.4	Schritt 4: Spezifische Datenakquise der Fahrzeuge / Fahrzeugverbunde – Bestimmung des Emissionsreduzierungspotentials.....	90
8.4.1	Emissionsreduzierungspotential einer mobilen Arbeitsmaschine	91
8.4.2	Datenauswertung.....	92
8.5	Schritt 5: Konzeptauswahl und Konzeptverifizierung mittels der Grubendaten	98
8.6	Schritt 6: Konzeptumsetzung	99
8.7	Schritt 7: Bewertung der Umsetzung, Validierung des Konzepts	99
8.8	Schritt 8: Konzeptoptimierung	99
9	<i>Literaturverzeichnis.....</i>	100

1 Organisatorisches

1.1 Kurzzvorstellung des Forschungsvorhabens

Im Rahmen der Studie zur Emissionsreduktion von Fahrzeugen im Untertagebau wurden Maßnahmen erarbeitet, um die Dieselmotoremissionen (DME) zu reduzieren. An der Studie waren unter anderen vier Bergwerke in Baden-Württemberg beteiligt. Im Rahmen der Studie wurden ausgewählte in den Bergwerken eingesetzte Förderfahrzeuge bezüglich ihrer Häufigkeit und ihres Energieverbrauchs untersucht. Für diese Untersuchungen wurden verschiedene Messreihen gefahren, die die Fahrzeuge in ihrem täglichen Betrieb abbildeten. Um vielversprechende Maßnahmen generieren zu können, wurde in einem weiteren Schritt der Stand der Technik und Forschung von Energiespeichersystemen und emissionsreduzierten mobilen Arbeitsmaschinen recherchiert und dokumentiert. Daraus wurden Maßnahmen abgeleitet, die zur DME-Reduzierung untertage beitragen können. Als Schlüsseltechnologie wurde in dieser Studie die Elektrifizierung mobiler Arbeitsmaschinen gesehen, da elektrifizierte Fahrzeuge lokal keine DME erzeugen. Ausgewählte Fahrzeuge in den beteiligten Bergwerken wurden hinsichtlich ihrer Elektrifizierbarkeit untersucht und entsprechende Konzepte wurden erarbeitet.

Auf Basis der im Rahmen der Studie gesammelten Ergebnisse wurde anschließend der Forschungsbedarf abgeleitet, der bei der Umstellung eines Bergwerks auf emissionsfreie Gewinnung gedeckt werden muss. Weiterhin wurde das in der Studie angewendete Vorgehen in Form einer Methode zusammengefasst, die angewendet werden kann, um beliebige andere Bergwerke auf eine DME-freie Produktion umzustellen. Abbildung 1-1 zeigt das Projektablaufdiagramm.

Arbeitspaket	Monate								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Untersuchung eingesetzter Förderfahrzeuge									
2 Analyse möglicher Energiespeichersysteme									
3 Erarbeitung möglicher Fahrzeugkonzepte									
4 Forschungsbedarf aufzeigen									
5 Methodik zur Verallgemeinerung erstellen									
6 Dokumentation									

Abbildung 1-1: Projektablaufdiagramm

Die Durchführung der Studie wurde durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg gefördert.

1.2 Kurzzvorstellung der beteiligten Unternehmen und Gruben

1.2.1 Mobima / Karlsruher Institut für Technologie

Das Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe, ist eine international anerkannte Anlaufstelle für Fragen aus dem Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen und durchführende Forschungsstelle des Projekts. Die Kernkompetenzen des Mobima liegen bei der Antriebstechnik mobiler Arbeitsmaschinen (hydraulisch, elektrisch) und bei der Systembetrachtung mobiler Arbeitsmaschinen und deren Umfeld. [1]

1.2.2 e-mobil BW

Die e-mobil BW ist die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH des Bundeslandes Baden-Württemberg. Die Agentur versteht sich „...als zentrale Anlauf- und Beratungsstelle für alle Belange der Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie...“ und „...unterstützt und gestaltet dadurch aktiv den Technologie- und Gesellschaftswandel hin zu einer nachhaltigen Mobilität der Zukunft.“ [2].

Die e-mobil BW arbeitet zusammen mit einem Netzwerk von „[...] Partnern aus Wirtschaft, Wissenschaft und der öffentlichen Hand...“ und „treibt [...] dadurch die Industrialisierung und Markteinführung zukunftsfähiger Mobilitätslösungen voran.“ [2]. Zur Strategie der Agentur gehören weiterhin die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen, die Anwendung und Demonstration des Systems Elektromobilität, die Positionierung des Wirtschafts- und Wissenschaftsstandortes Baden-Württemberg, die Aus-, Fort- und Weiterbildung für zukunftsweisende Mobilitätssysteme sowie Kommunikation und der Wissenstransfer. [2]

Die e-mobil BW unterstützte im Vorfeld zum Forschungsvorhaben bei der Organisation und Antragsstellung, zur Laufzeit bei der Durchführung, Bearbeitung und Koordination. [2]

1.2.3 Grube A

Die Gewinnung in Grube A erfolgt ausschließlich konventionell, d.h. im Bohr- und Sprengvortrieb im Kammer- und Festenbau. Die Lagerstelle ist flächig und eben. Nach der Sprengung wird das Haufwerk mittels Radlader auf Dumper verladen, die das ungebrochene Rohmaterial zum Grubenbrecher transportieren. Unter Tage gibt es drei Lagerstellen für Material unterschiedlicher Qualität (Körnung, Reinheit, ...). Durch die Auswahl der Abschlüsse vor Ort wird eine bestimmte Qualität gewählt und über einen Brecher in die Zwischenlager gefahren. Unter Tage werden folgende Tätigkeiten ausgeführt:

- Konventionelle Gewinnung: Bohren und Sprengen, Verladung mittels Radlader
- Beschickung des Grubenbrechers durch Dumper
- Berauben durch schlagendes Beraubegerät

Das untertägige Streckennetz beläuft sich auf ca. 100 km, dabei weist die Grube keine relevanten Steigungen auf. Die Grube liegt in einer maximalen Tiefe von 170 m unter der Oberfläche und 60 m über dem Niveau des Flusses Neckar. In der Grube herrschen konstante 11 °C, das Klima ist trocken. Die Bewetterung der Grube liegt bei ca. 2000 – 3250 m³/min Frischwetter. Je nach Kundenlage wird ein- oder zweischichtig gearbeitet.

Die Grube verfügt über eine 20 kV-Einspeisung, die teilweise auch innerhalb der Grube erreichbar ist. Zur Unterverteilung wird die Ausgangsspannung zuerst auf 1 kV und anschließend auf 0,4 kV bei 125 A heruntertransformiert. [3; 4]

1.2.4 Grube B

In Grube B liegt das abzubauen Gestein als steil stehende Gänge vertikal im Berg. Durch eine spiralförmige Wendel mit Steigungen von 14 bis maximal 18 % wird der Höhenunterschied zwischen den einzelnen Sohlen überwunden. Der eigentliche Abbau findet ausgehend von der Wendel mit Querschlägen im Bohr- und Sprengvortrieb statt. Der Transport des Materials unter Tage erfolgt mittels Untertageradladern (LHDs, engl. Load Haul Dump), die das Material nach der Sprengung aufladen und zu vertikal verlaufenden Sturzschtächten bringen, wo sie das gewonnene Gestein abkippen. Ein Lader legt vom Abbauort bis zu den Sturzschtächten zwischen 50 und 300 m zurück. LKWs fahren in die Grube und werden an diesen Sturzschtächten beladen. Unter Tage werden folgende Tätigkeiten ausgeführt:

- Konventionelle Gewinnung: Bohren und Sprengen, Verladung und Transport zu den Sturzschtächten
- Berauben: Beraubegerät entfernt lose Felsbrocken an den Decken und Wände.
- Betontransport: Zwei Betontransporter bringen Spritzbeton von der Mischstation zur Betonspritze.

Das Streckennetz untertage ist ca. 30 km groß und kann über einen Stollen beziehungsweise über eine LKW-Rampe befahren werden. Die Grubeneingänge befinden sich auf 550 m über Normalnull (NN). Abwärts gelangt man derzeit bis auf -50 m unter NN und aufwärts bis auf eine Höhe von 650 m über NN. In der Grube herrscht eine Temperatur von 20°C bei einer Luftfeuchte von 100 %. Bewettert wird die Grube mit ca. 3500 – 4000 m³/min Frischwetter. Es wird im Zwei- oder Dreischichtbetrieb gearbeitet, wobei die Nachtschicht für Sevicearbeiten genutzt wird.

Elektrisch ist die Grube durch ein IT-Netz mit 800 kVA nach außen angebunden. Über vier Transformatoren wird der Strom redundant auf 400 V umgewandelt und weiterverteilt. [3; 5]

1.2.5 Grube C

In Grube C wird Salz für Industrieanwendungen und Streusalz produziert. Die Gewinnung in der Grube erfolgt zu einem Drittel konventionell im Bohr- und Sprengvortrieb und zu zwei Dritteln schneidend durch Continuous Mining. Das Salz wird im Kammer- und Festenbau abgebaut. Aus den Abbaubereichen wird das gewonnene Salz über ein grubenweites, zentral gesteuertes Bandanlagenetz und Schächte nach über Tage transportiert. Hierzu wird das Salz nach dem Sprengen von LHDs aufgeladen und zu Revierbrechern mit Bandanschluss gefahren. Bei schneidender Gewinnung übernimmt ein Dumper den Transport vom Continuous Miner (CM) zur Bandanlage. Die Grube wird außer zum Abbau von Salz auch noch zum Einlagern von Fremdmaterial genutzt. Dieses wird von über Tage in Bigpacks oder durch Fördergefäße der Schachtanlage und anschließender Bandförderung angeliefert.

Zusätzlich wird unter Tage Salz zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen eingelagert. Für die Studie relevante Tätigkeiten sind:

- Konventionelle Gewinnung: Bohren und Sprengen, Verladen durch LHDs in Revierbrecher mit Bandförderanlagenanschluss
- Maschinelle Gewinnung: Continuous Mining, Materialtransport durch Dumper
- Beraubung: durch Beraubegeräte

Über vier Schächte ist die Grube mit der Tagesoberfläche verbunden. Ein Streckennetz von ca. 800 km verbindet die einzelnen Abbaubereiche miteinander. Die Hauptstrecken werden zum Transport von Personen und Material genutzt. Abgebaut wird das Salz in einer Teufe von ca. 200 m. In der Grube herrscht ein trockenes Klima mit konstanten 20°C. Bewettert wird die Grube über hierfür extra angelegte Bewetterungsstrecken mit 20.000 m³/min Frischwetter. Es wird im Dreischichtbetrieb gearbeitet.

Das Stromnetz der Grube ist als 20/10 kV IT-Netz ausgeführt. Über Sicherungskästen (je 10kV) und Transformatoren wird der Strom unterverteilt und je nach Bedarf zur Verfügung gestellt. [6; 7]

1.2.6 Grube C

Die Salzgewinnung in Grube C erfolgte bisher konventionell im Bohr- und Sprengvortrieb, seit Mitte 2017 auch maschinell mit einer Teilschnittmaschine. Nach der Sprengung wird das Material von Radladern aufgenommen und zu einem Revierbrecher mit Bandanschluss gefahren, über welches das gebrochene Fördergut schließlich an die Oberfläche transportiert wird. Durch ein weitreichendes System aus Förderbändern werden im konventionellen Vortrieb keine Dumper benötigt. Die zur Seite getriebenen Gänge haben eine maximale Länge von 200 m. Fahrwege werden durch das regelmäßige Umsetzen der Brecher kurz gehalten. Zusätzlich zum Salzabbau wird die Grube zum Einlagern von Versatzmaterial genutzt. Dieses wird von LKWs von über Tage direkt in die Grube geliefert und dort durch einen vollelektrischen Umschlagbagger auf grubeneigene LKWs mit Schiebekästen umgeladen. Diese bringen das Versatzmaterial zum designierten Versatzort. Nach dem Abladen des Materials wird ein Radlader eingesetzt, um das Material im Versatzlager zu verdichten und firstbündig abzuschließen. Unter Tage konnten folgende Tätigkeitsprofile definiert werden:

- Konventionelle Gewinnung: Bohren und Sprengen, Verladen mittels Radlader

- Maschinelle Gewinnung: Teilschnittmaschine, Materialtransport durch Dumper
- Berauben: durch Beraubegeräte

Das aktive Streckennetz beläuft sich auf 30 km. Es gibt zwei Schrägschächte, einen Kleineren für Befahrungsfahrzeuge und das Förderband sowie einen LKW-Schacht. Der Abbaubereich befindet sich 80 – 130 m unter der Oberfläche. Im Bergwerk herrscht ein trockenes Klima mit ca. 17 °C. Bewettert wird die Grube mit 8000 m³/min Frischwetter durch 8 Lüfter über einen zusätzlichen Schacht. Es wird im Zweischichtbetrieb gearbeitet.

Das Stromnetz der Grube ist als 20 kV IT-Netz mit einer Unterverteilung zu 500 V und 6 kV ausgeführt. [6; 8]

2 Vorgehen im Projekt

Die Arbeitspakete AP1 – AP6, Abbildung 1-1, wurden entsprechend dem im Folgenden beschriebenen Vorgehen bearbeitet, siehe Abbildung 2-1.

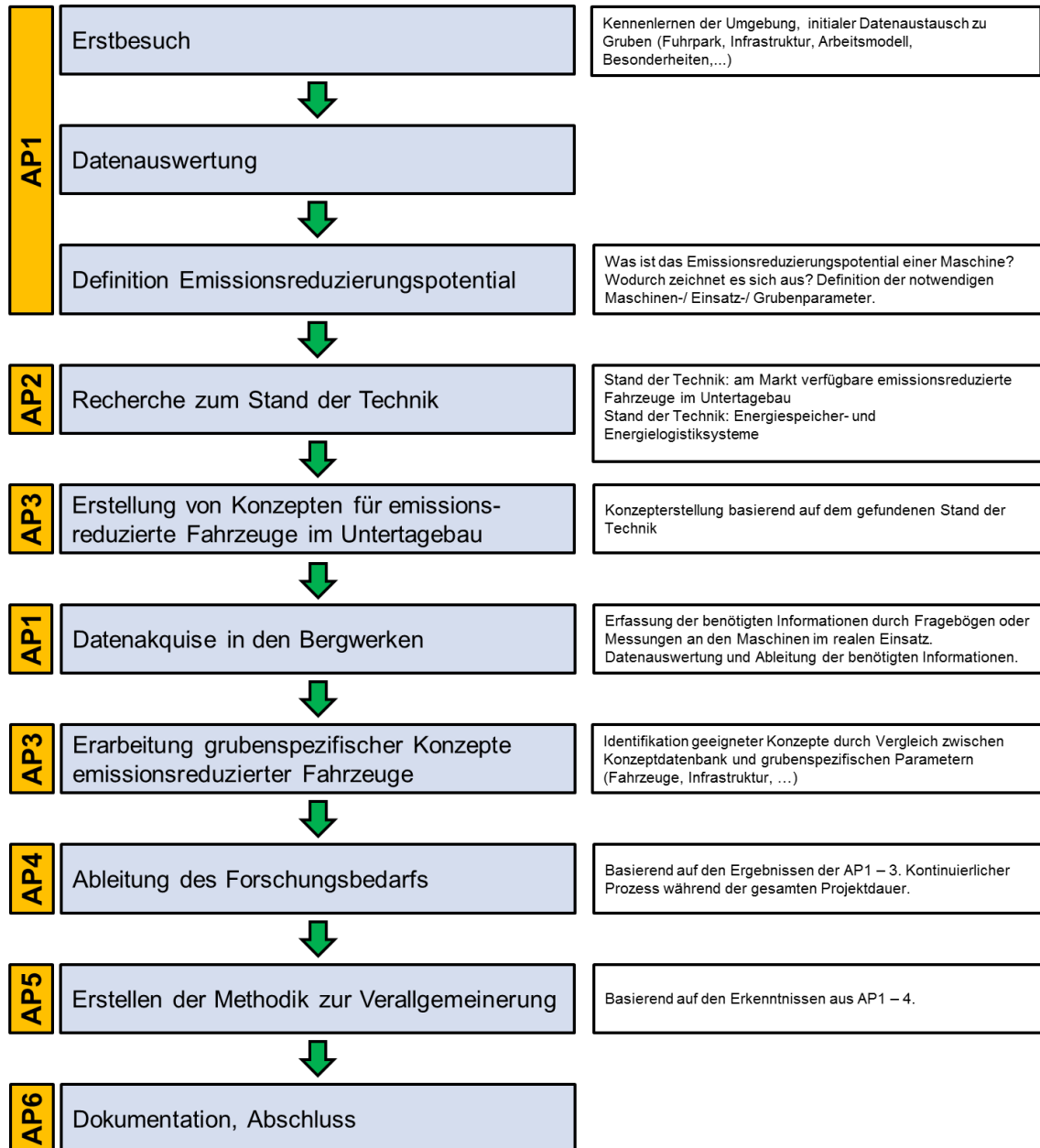


Abbildung 2-1: Vorgehen im Forschungsvorhaben, [9]

Zu Beginn des Projektes wurden Erstbesuche in allen beteiligten Gruben durchgeführt und grubenspezifische Daten erfasst und aufgenommen. Hierzu zählten unter anderem Informationen zu folgenden Punkten:

- Allgemeine Daten zu den Gruben (Produktion, geologische Daten, Größe, Infrastruktur,...)
- Fuhrpark und vor Ort eingesetzte Fahrzeuge
- Tätigkeiten der einzelnen Fahrzeuge u. Fahrzeugverbunde
- Arbeits-/Schichtenmodell
- Besonderheiten (z.B. spezielle zu berücksichtigende Umgebungsbedingungen)

Im Rahmen dieser Besuche fanden jeweils eine Begehung der Gruben sowie ausführliche Diskussionen mit den Projektpartnern und Verantwortlichen statt.

Nach der Auswertung dieser Daten wurde das Emissionsreduzierungspotential einzelner Maschinen definiert und weitere zu erfassende Größen identifiziert. Für diese wurden entsprechende Messungen zur Datenerfassung geplant.

Parallel dazu wurde im Rahmen einer ausführlichen Recherche der Stand der Technik von emissionsreduzierten Untertage-Fahrzeugen ermittelt. Hierbei wurden die am Markt verfügbaren Maschinen und der Stand der Technik und Forschung bei Energiespeicher- und Energielogistiksystemen erfasst.

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wurden im nächsten Schritt allgemeine Konzepte für emissionsreduzierte Fahrzeuge und Fahrzeugverbunde im Untertagebau definiert. Der Lösungsraum wurde hierbei sehr offen und einschränkungsfrei gehalten um eine möglichst große Vielzahl an Konzepten zu generieren.

Anschließend wurden im Rahmen erneuter Grubenbesuche die entsprechenden Daten erfasst. Maschinenbezogene Daten wurden mittels Fragebögen erfasst. Weiterhin wurden alle zu betrachtenden Maschinen während ihrer konkreten Tätigkeiten vermessen. War eine Vermessung nicht möglich, so wurden die Daten entweder durch Skalierung von anderen, vergleichbaren Maschinen erzeugt oder unter Verwendung anderer zur Verfügung stehender Informationsquellen und in Absprache mit den Maschinenbetreibern erzeugt. Aus den so gewonnenen Daten konnten Energie- und Leistungsanforderungen der Maschinen während einer repräsentativen Schicht berechnet werden.

Durch Abgleichen der grubenspezifischen Daten mit der Konzeptdatenbank wurden im nächsten Schritt konkrete, auf die einzelnen Gruben abgestimmte Konzepte erarbeitet und ausformuliert. Zusätzlich wurde in diesem Schritt der Forschungsbedarf abgeleitet.

Abschließend wurde eine Methodik zur Verallgemeinerung erstellt, die die im Projekt durchgeführten Teilschritte zu einer Gesamthandlungsempfehlung verknüpft, mit deren Hilfe die Reduzierung von Dieselmotoremissionen in Untertagebau-Betrieben umgesetzt und vorangetrieben werden kann.

3 Ergebnisse AP1: Untersuchung eingesetzter Förderfahrzeuge

Im Untertagebau werden eine Vielzahl verschiedener Fahrzeuge und Maschinen eingesetzt. Im Rahmen der Studie wurden folgende ausgewählte Maschinen untersucht:

- Radlader, Fahrlader (LHDs)
- Dumper, LKWs
- Beraubegeräte
- Betonmischer

Alle weiteren Fahrzeuge, die nicht betrachtet wurden, werden entweder schon in emissionsreduzierter Form eingesetzt (z.B. teil-elektrifizierte Bohrwägen, kabelgebundene LHDs), sind in emissionsreduzierter Form am Markt verfügbar (z.B. elektrifizierte Befahrungsfahrzeuge, elektrifizierte Gabelstapler) oder haben aufgrund ihres Einsatzprofils keinen großen Einfluss auf die thematisierte Fragestellung, da sie z.B. nur sehr selten eingesetzt werden. Die ausgewählten Maschinen werden als Hauptenergieverbraucher im laufenden Betrieb angesehen und verursachen daher auch den größten Anteil an Dieselmotoremissionen. Um die DME unter Tage zu reduzieren, sollten aber alle unter Tage eingesetzten Fahrzeuge möglichst emissionsfrei ausgeführt bzw. betrieben werden.

Die Untersuchungsergebnisse in Kapitel 3 sind einheitlich aufgebaut: Zuerst erfolgt eine Kurzbeschreibung der Maschine mit den entsprechenden notwendigen Maschinenkenndaten (installierte Motorleistung nach Herstellerangaben / Datenblatt oder nach Angaben des Grubenbetreibers, max. Drehmoment und korrespondierende Drehzahl des Dieselmotors). Im Anschluss daran werden der Einsatz der Maschine und ihre Tätigkeiten erfasst und kurz beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Energieverbrauchsuntersuchung dargestellt.

Der Energieverbrauch der Maschinen wurde anhand von Messdaten ermittelt, die im Betrieb der Maschinen aufgenommen wurden. Die Daten (Motordrehmoment, Motordrehzahl, Spritverbrauch) wurden anschließend aufbereitet und für die weitere Auswertung vorbereitet. In den Messschrieben wurden dabei die einzelnen Tätigkeiten der Maschinen identifiziert und deren Dauer und Energieinhalt bestimmt. Näheres zur Berechnung findet sich in Kapitel 8.

Aus den Messdaten wurde anschließend für jedes Fahrzeug eine *repräsentative Schicht* erstellt. Die repräsentative Schicht erstreckt sich über einen Zeitraum von 8 h. In diesen 8 h führt das Fahrzeug zu einer gewissen Zeit, der Einsatzzeit, seine Tätigkeiten aus. Die Differenz zwischen Schichtdauer und Einsatzzeit ergeben sich durch Pausen. Die Dauer der einzelnen Tätigkeiten und damit auch deren Anteil am Gesamtenergieverbrauch wurde prozentual gewichtet. Die Identifikation der prozentualen Anteile erfolgte unter Abstimmung mit den Gruben-/Fahrzeugsbetreibern. Wurde ein Fahrzeug nur für eine Tätigkeit eingesetzt, so bestand die repräsentative Schicht zu 100 % aus dieser Tätigkeit. Basierend auf der repräsentativen Schicht wurde anschließend der Gesamtenergieverbrauch für die dort verrichtete Einsatzzeit berechnet. Der Energieverbrauch bezieht sich auf den Energieinhalt der in Form von Diesel zugeführten chemischen Energie. Die entsprechenden Kennwerte finden sich in Kapitel 4.1.

Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Maschinen zu erreichen, wurden die spezifischen Tätigkeiten der Maschinen unter drei Haupttätigkeiten zusammengefasst, die für jede Maschine anwendbar sind: Unter der Tätigkeit „Arbeiten“ werden alle Tätigkeiten zusammengefasst, die zum täglichen Arbeitseinsatz einer Maschine gehören. Für LHDs zählt hierzu z.B. das Aufladen des Materials an der Ortsbrust, das Transportieren und Abladen des Materials und das Zurückfahren hin zur Ortsbrust. Bei Dumpfern fällt unter Arbeiten der komplette Transportprozess, d.h. Fahren im beladenem und unbeladenem Zustand.

Die Tätigkeit „Fahren“ wird von Fahrzeugen ausgeführt, die zur Ausübung ihrer Arbeitstätigkeit häufige Ortswechsel haben, wie z.B. Berauber, und beschreibt den Fahrprozess zwischen den einzelnen Positionen, an denen das Fahrzeug seine Tätigkeit „Arbeit“ verrichtet.

Die Tätigkeit „Leerlauf“ beschreibt die Zeiten, während denen der Dieselmotor der Maschine unbelastet, d.h. im Leerlauf betrieben wird. Bei Dumpfern findet dies üblicherweise während des Beladens statt. Bei LHDs treten Leerlaufzeiten z.B. dann auf, wenn mehrere Fahrzeuge bei einspuriger Fahrbahn aufeinander warten müssen.

Eine feingranularere Aufteilung der Tätigkeiten könnte hier mehr Informationen über die einzelnen Maschinen liefern – die in der Studie untersuchten Informationen sind allerdings auf diesem Niveau gut ermittelbar und darstellbar.

3.1 Grube A

Folgende Fahrzeuge wurden näher untersucht (Abbildung 3-1). Detailliertere Informationen finden sich in [3].

Nr.	Fahrzeuge		Tätigkeit	Datenakquise
	Typ	Bezeichnung		
3.1.1	Radlader	R1A	Arbeiten	Messung
3.1.2	Radlader	R2A	Arbeiten	Skalierung
3.1.3	Dumper	D1A	Arbeiten	Skalierung
3.1.4	Berauber	B1A	Arbeiten, Fahren	Messung

Abbildung 3-1: Übersicht zur Datenakquise, Grube A

3.1.1 Radlader R1A

Der Diesel-Radlader R1A entspricht der Leistungsklasse 200 kW und hat eine Nutzlast von 7 t. Bei 1400 1/min stellt der Motor der Maschine ein maximales Motormoment von ca. 1274 Nm zur Verfügung. Abbildung 3-2 zeigt den Verladeprozess, wie er in der Grube stattfindet.

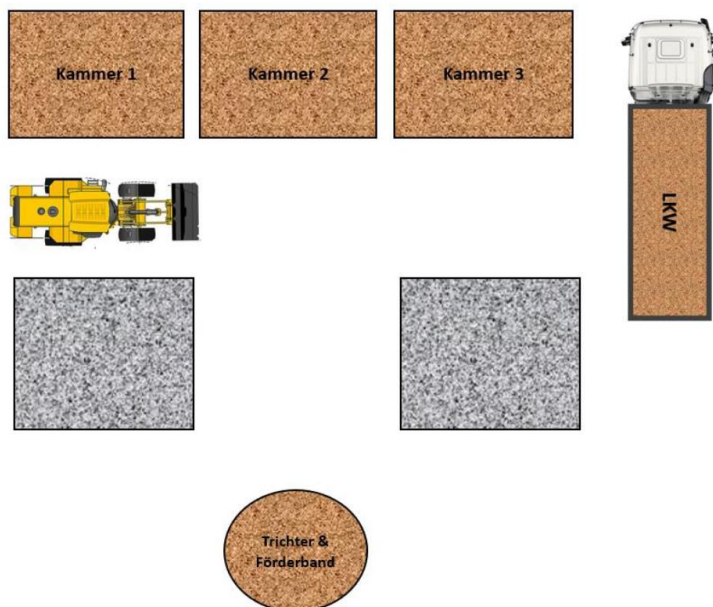


Abbildung 3-2: Einsatz Radlader R1A, Grube A, [3]

Der Radlader wird dazu eingesetzt, die gewünschte Mischung des Verladematerials herzustellen. Die repräsentative Schicht des Fahrzeugs besteht gemäß den Angaben der Betreiber zu 100% aus der Tätigkeit **Arbeiten**. Der effektive Aktionsradius der Maschine beträgt ca. 250 m. [3]

Abbildung 3-3 zeigt die Leistungsverteilung des Fahrzeugs während der repräsentativen Schicht. Es ist deutlich zu sehen, dass der Radlader zwar sein gesamtes Leistungsspektrum benötigt, mehr als 70% der angeforderten Leistungswerte liegen allerdings unter 50% der Motornennleistung. Unter 3% aller Leistungspunkte fallen in den höchsten Leistungscluster. Es ist daher denkbar, eine Maschine mit einer niedrigeren Motorleistung einzusetzen, die dadurch aber besser ausgelastet wäre. Aufgrund des signifikant hohen Anteils des fünften Leistungsclusters sollte die Leistung der Maschine in diesem Bereich liegen.

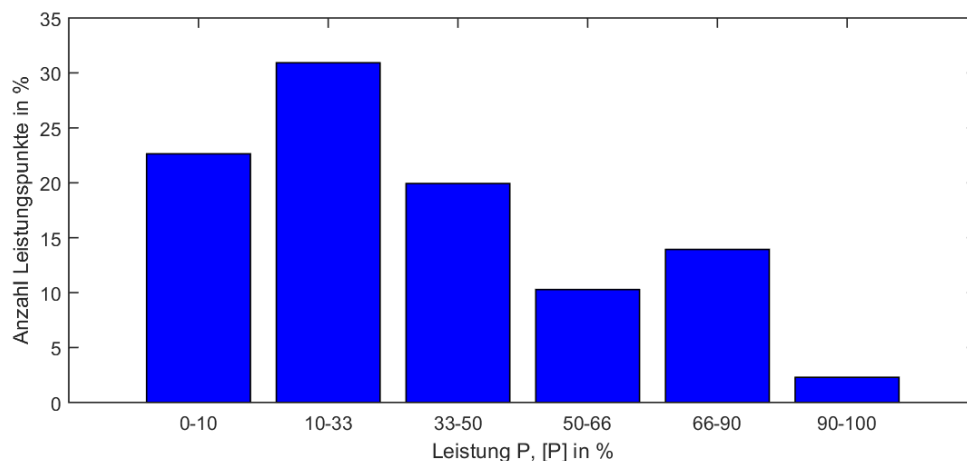


Abbildung 3-3: Leistungsverteilung rep. Schicht, Radlader R1A, Grube A, [3]

Die Messungen haben ergeben, dass der Radlader während einer 8 h-Schicht ca. 5,5 h (330min) im Einsatz ist, (vgl. Abbildung 3-4, links). In dieser Zeit benötigt die Maschine eine Dieselsgesamtenergie von 1161 kWh. Daraus errechnet sich ein Motorwirkungsgrad von ca. 35%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 120 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 22 L/h. Die Gesamtenergie teilt sich auf die einzelnen Tätigkeiten gemäß Abbildung 3-4, rechts auf:

- Leerlauf 11 kWh (<1%)
- Arbeiten 1150 kWh (99%).

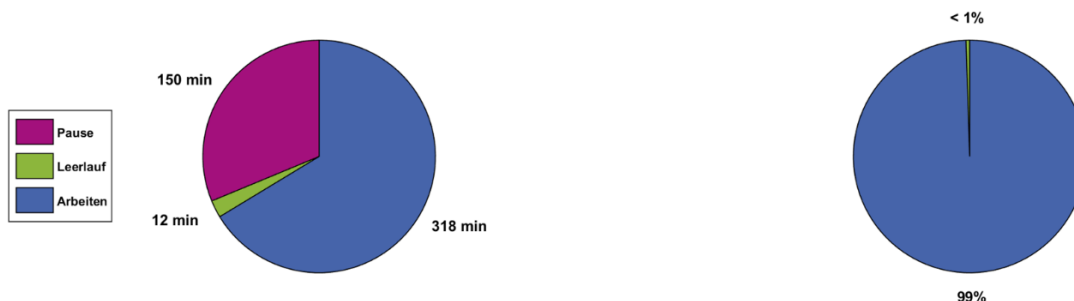


Abbildung 3-4: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, Radlader R1A, Grube A

Die Maschine hat während der repräsentativen Schicht nur einen sehr geringen Leerlaufanteil von ca. 12 Minuten, was für eine hohe Auslastung spricht.

3.1.2 Radlader R2A

Der Radlader R2A wird in der Grube zur Verladung des Haufwerks auf Dumper eingesetzt, welches durch die Sprengung entstanden ist. Der Maschine entspricht einer Leistungsklasse von 150 kW und hat ein maximales Drehmoment von 941 Nm bei 1450 1/min. [3]

Die Leistungsverteilung während der repräsentativen Schicht ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Die Abbildung zeigt ein ausgeprägtes Plateau über dem 2ten bis 5ten Leistungscluster (10% - 90%). Sowohl im Bereich minimaler Leistung (0% - 10%) als auch im Bereich maximaler Leistung (90% - 100%) liegen jeweils unter 2% aller Leistungspunkte. Aufgrund des hohen Anteils des 5ten Clusters (66% - 90%) mit 32% wäre daher Rightsizing bei dieser Maschine möglich, allerdings sollte die Leistung der neuen Maschine dem Leistungsbereich des 5ten Clusters entsprechen. [3]

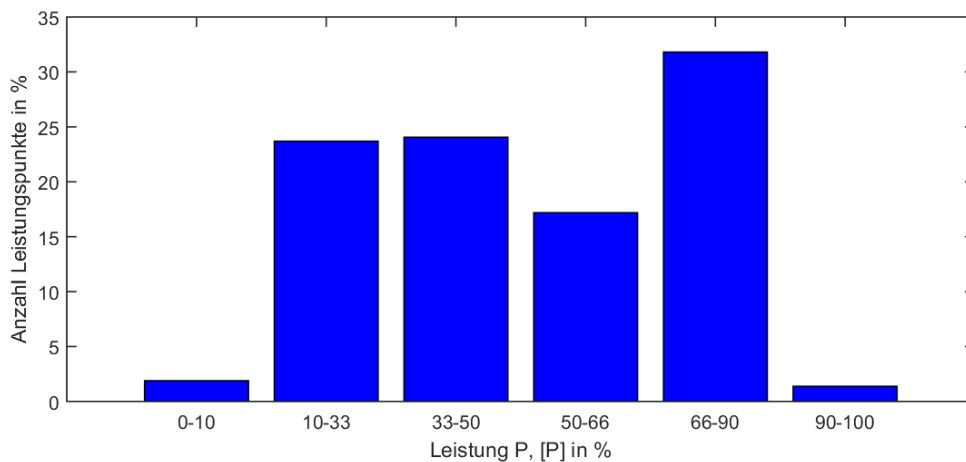


Abbildung 3-5: Leistungsverteilung rep. Schicht, Radlader R2A, Grube A, [3]

In der repräsentativen Schicht benötigt die Maschine eine Dieselen Energiemenge von 1645 kWh und führt zu 100% die Tätigkeit Arbeiten aus. Während einer repräsentativen Schicht von 8 h wird das Fahrzeug ca. 6 h (360 min) eingesetzt. Daraus errechnet sich ein Motorwirkungsgrad von ca. 28%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 170 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 28 L/h. Abbildung 3-6 zeigt die Zeit- und Energieverteilung. Die Gesamtenergie teilt sich auf in:

- Leerlauf 16 kWh (<1%)
- Arbeiten 1629 kWh (99%).

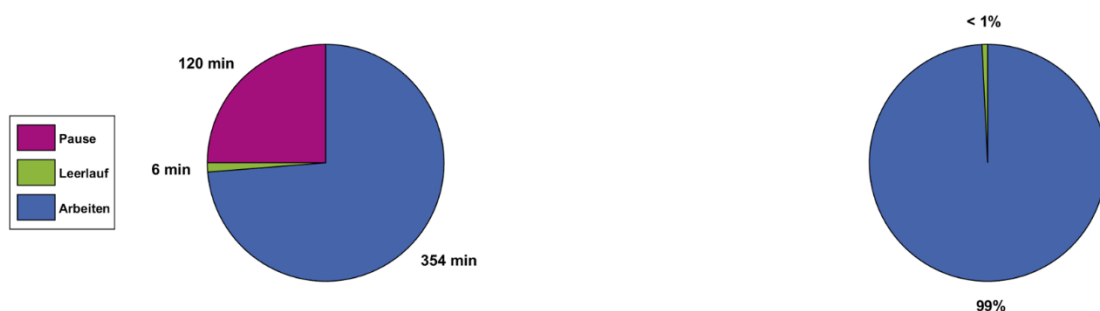


Abbildung 3-6: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, Radlader R2A, Grube A

Die Messungen haben eine geringe Leerlaufzeit von unter 6 Minuten während einer repräsentativen Schicht ergeben, was für eine hohe Auslastung und einen sehr unterbrechungsfreien Arbeitsprozess spricht. Hierfür spricht auch die Leistungsverteilung in Abbildung 3-5.

3.1.3 Dumper D1A

Im Zusammenspiel mit dem Radlader R2A ist es die Aufgabe des Dumpers D1A, das gesprengte Material zum zentralen Grubenbrecher zu transportieren. In Grube A werden insgesamt drei Dumper zum Materialtransport eingesetzt, wobei normalerweise immer zwei Fahrzeuge zwischen dem Radlader und dem Brecher pendeln. Der D1A entspricht einer Motorleistung von 250 kW und besitzt dabei eine maximale Nutzlast von 28 Tonnen. Das maximale Drehmoment der Maschine wird vom Hersteller mit 1680 Nm bei ca. 1400 1/min angegeben. Die anderen Dumper der Grube wurden nicht gesondert betrachtet, da alle Fahrzeuge annähernd der gleichen Leistungsklasse entsprechen und die gleiche Tätigkeit ausführen. [3]

Der Dumper D1A konnte im Rahmen der Studie nicht vermessen werden. Die der Beurteilung zugrunde liegenden Daten wurden daher aus den Messungen des Dumpers D1D aus Grube D (siehe Kapitel 3.4.4) abgeleitet und skaliert, da beide Fahrzeuge ähnlich eingesetzt werden. [3]

Während des Förderns legt der Dumper eine durchschnittliche Strecke von 1,5 km einfach zurück. Abbildung 3-7 zeigt das Leistungsprofil der Maschine in einer repräsentativen Schicht, die aus 40% (144 min) **Leerlauf** und 60% (216 min) **Arbeiten** besteht. (vgl. Abbildung 3-8) Während des Leerlaufes wird der Dumper beladen. Ein Förderspiel dauert ca. 15 Minuten. [3]

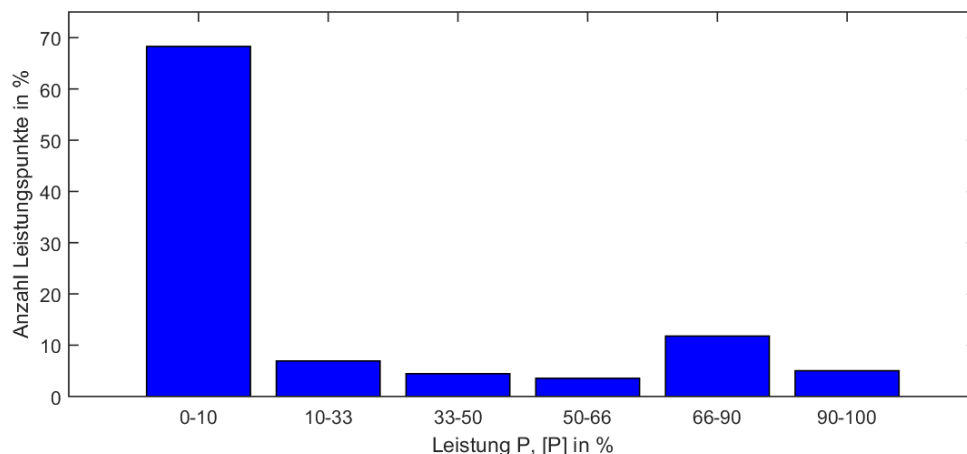


Abbildung 3-7: Leistungsverteilung rep. Schicht, Dumper D1A, Grube A, [3]

In Abbildung 3-7 ist deutlich zu erkennen, dass der Großteil der vom Dumper abgeforderten Leistung in der niedrigsten Klasse von 0% - 10% liegt, was auf einen hohen Anteil an Leerlauf oder Betrieb bei niedriger Belastung hinweist. Trotzdem benötigt das Fahrzeug seine komplette Leistungsspanne. Ein weiterer Peak liegt im 5ten Cluster (66% - 90%).

In einer repräsentativen Schicht von 8 h führt das Fahrzeug ca. 24 Ladespiele aus und ist damit ca. 6 h (360 min) im Einsatz. Der Motorwirkungsgrad des Fahrzeugs wurde berechnet zu 31% - an dieser Stelle sei aber nochmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den verwendeten Daten um skalierte Messdaten von einer anderen Maschine handelt.

Der Dumper benötigt nach der Berechnung eine Dieselen Energiemenge von 1970 kWh. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 203 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 34 L/h.

Abbildung 3-8 zeigt die zeitliche Verteilung der verschiedenen Tätigkeiten sowie die anteilig benötigten Energien:

- Leerlauf 158 kWh (8%)
- Arbeiten 1812 kWh (92%).

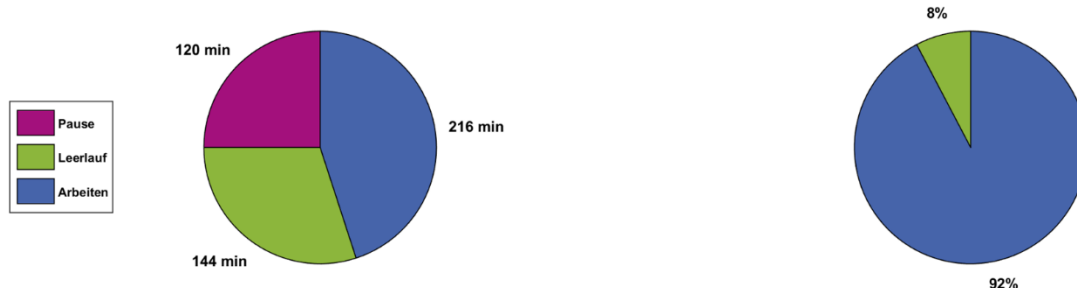


Abbildung 3-8: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, D1A, Grube A

3.1.4 Berauber B1A

Der Berauber B1A ist eine Ausbruchmaschine aus der Leistungsklasse 150 kW. Der Dieselmotor des Fahrzeugs stellt max. 1050 Nm Drehmoment bei einer Drehzahl von 1500 1/min zur Verfügung. Die Maschine wird in der Grube zum Berauben der Firste und der Seitenwände eingesetzt. Da der Berauber in der Grube häufiger in nicht durchschlägigen Bereichen arbeitet, ist die Emissionsbelastung in der Maschinenumgebung besonders hoch. [3]

Die Maschine führt die Tätigkeiten **Fahren**, **Leerlauf** und **Arbeiten** aus. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Maschinen nur während der Arbeitstätigkeit (Berauben) ihre maximal installierte Motorleistung benötigt. Im Vergleich dazu benötigen Umsetzfahrten, die zum Profil Fahren zählen, allerdings deutlich mehr Energie. Dementsprechend sollten Umsetzfahrten dieses Fahrzeugs generell auf ein Minimum reduziert werden. Abbildung 3-9 zeigt das Leistungsprofil der Maschine während einer repräsentativen Schicht. Die Gewichtungsfaktoren wurden mit den Maschinenbetreibern abgestimmt. Die repräsentative Schicht setzt sich aus 25% (90 min) Fahren, 15% (54 min) Leerlauf und 60% (216 min) Arbeiten zusammen. Während einer repräsentativen Schicht von 8 h ist der Berauber ca. 6 h davon im Einsatz (vgl. Abbildung 3-10). Dabei benötigt das Fahrzeug eine Dieselen Energiemenge von 1276 kWh. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 132 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 22 L/h. Der Motorwirkungsgrad der Maschine errechnet sich daraus zu ca. 46%. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der anderen Maschinen erscheint dieser Wert sehr hoch. [3]

Abbildung 3-9 zeigt die Leistungsverteilung des Beraubers. Nur ca. 2% aller Leistungspunkte liegen im Bereich des höchsten Clusters (90% - 100%), was darauf hinweist, dass die Maschine sehr selten unter Volllast betrieben wird. Daher wäre Rightsizing denkbar, allerdings sollte die Maschine mindestens eine Leistung im Bereich des 5ten Clusters (66% - 90%) haben, um die an sie gestellten Anforderungen erfüllen zu können. Ca. 60% aller Leistungspunkte liegen im Bereich von 50% - 66%.

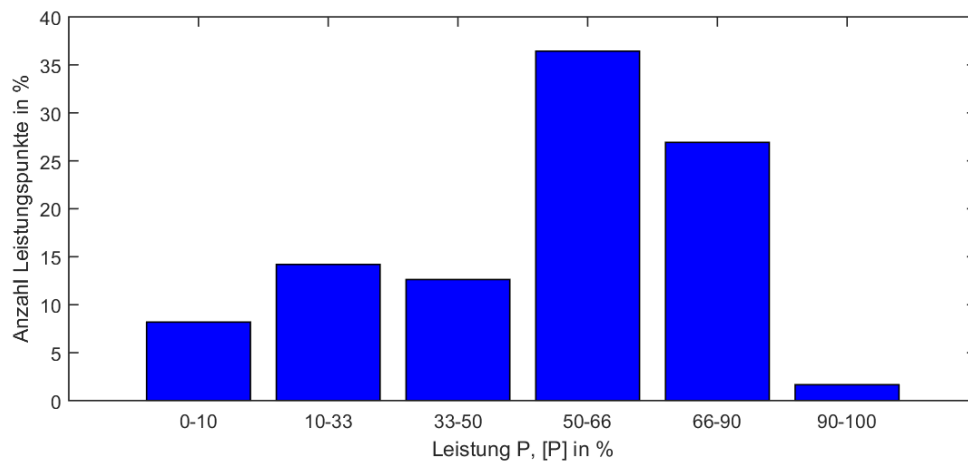


Abbildung 3-9: Leistungsverteilung rep. Schicht, Berauber B1A, Grube A, [3]

Abbildung 3-10 zeigt die Zeit- und Energieverteilung der Maschine während der repräsentativen Schicht. Die Gesamtenergiemenge von 1276 kWh verteilt sich zu:

- Leerlauf 25 kWh (2%)
- Fahren 396 kWh (31%)
- Arbeiten 855 kWh (67%)

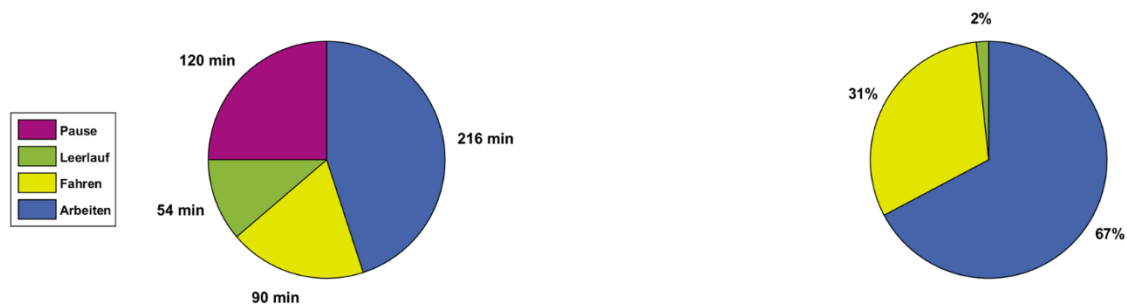


Abbildung 3-10: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) rep. Schicht, Berauber B1A, Grube A

In der Einsatzzeit der repräsentativen Schicht wurden ca. 54 min Leerlauf mit berücksichtigt – dies entspricht ca. 15% der Gesamteinsatzzeit.

3.2 Grube B

Folgende Fahrzeuge wurden näher untersucht (Abbildung 3-11). Detailliertere Informationen finden sich in [3].

Nr.	Fahrzeuge		Tätigkeit	Datenakquise
	Typ	Bezeichnung		
3.2.1	Fahrlader	LHD1B	Arbeiten, Fahren	Messung
3.2.2	Betontransporter	BT1B	Arbeiten, Fahren	Messung
3.2.3	Mobilbagger	B1B	Arbeiten, Fahren	Skalierung

Abbildung 3-11: Übersicht zur Datenakquise, Grube B

3.2.1 Fahrlader LHD1B

Der LHD1B ist ein dieselbetriebener Fahrlader mit einer zulässigen Nutzlast von 6,8 Tonnen und entspricht der Leistungsklasse 150 kW. Der Motor der Maschine hat ein maximales Drehmoment von 931 Nm bei 1400 1/min.

Während der repräsentativen Schicht von 8 h ist das Fahrzeug ca. 5,5 h (330 min) im Einsatz. Das Fahrzeug übt in dieser Zeit die Tätigkeiten **Fahren** zu 10% und **Arbeiten** zu 80% aus (vgl. Abbildung 3-13). Die Auswertung der Messungen hat ergeben, dass die Maschine ca. 10% ihrer Einsatzzeit im Leerlauf betrieben wurde. Abbildung 3-12 zeigt die gesamte Leistungsverteilung der repräsentativen Schicht. [3]

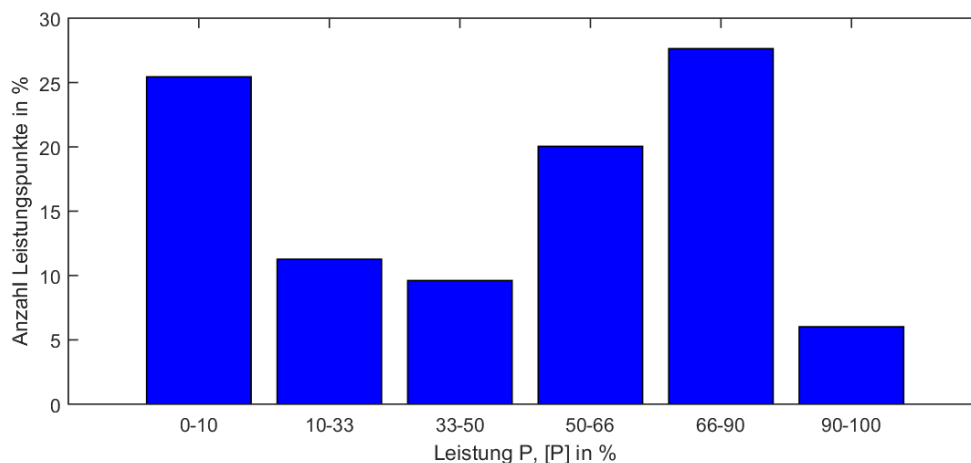


Abbildung 3-12: Leistungsverteilung rep. Schicht, Fahrlader LHD1B, Grube B, [3]

Abbildung 3-12 verdeutlicht, dass das komplette Leistungsspektrum des Fahrladers abgerufen wird. Mehr als 50% aller Leistungspunkte liegen in den oberen drei Leistungsklustern (50 - 100%). Darauf basierend kann die Aussage getroffen werden, dass die Leistung der Maschine zu ihrem Einsatz passt.

Während der repräsentativen Schicht benötigt das Fahrzeug eine Dieselen Energiemenge von 1329 kWh. Damit ergibt sich ein VKM-Wirkungsgrad von ca. 39%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 137 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 25 L/h.

Die Gesamtenergiemenge unterteilt sich gemäß Abbildung 3-13:

- Leerlauf 53 kWh (4%)
- Fahren 199 kWh (15%)
- Arbeiten 1077 kWh (82%)

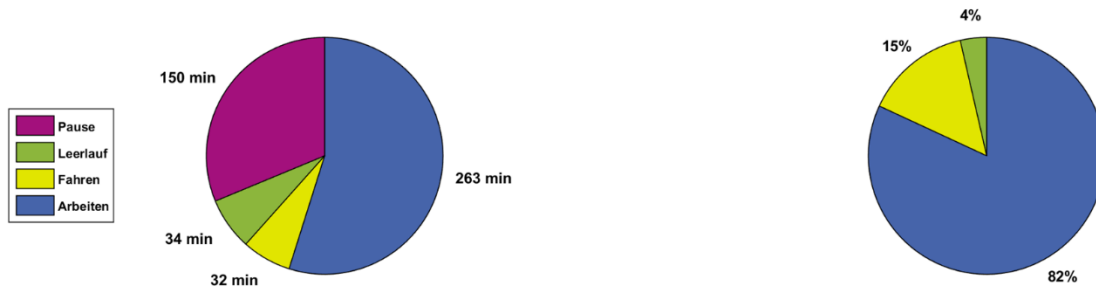


Abbildung 3-13: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, Fahrlader LHD1B, Grube B

Die scheinbar über 100% liegende Energieverteilung ist auf Rundungsfehler zurück zu führen.

3.2.2 Betontransporter BT1B

In der Grube B wird der Betontransporter BT1B eingesetzt. Der Betontransporter gehört zur Motorleistungs-klasse 100 kW, mit einer Nutzlast von 10 Tonnen. Der Dieselmotor stellt max. 670 Nm bei 1600 1/min zur Verfügung [3]. Während der repräsentativen Schicht von 8 h ist das Fahrzeug ca. 5,5 h (330 min) im Einsatz und führt die Tätigkeiten **Fahren** (12%) und **Arbeiten** aus (88%). Abweichend von der bisherigen Konvention wurden beim Betonmischer die Tätigkeiten Fahren und Arbeiten so unterschieden, dass zum Arbeiten jeder Zustand gehört, bei dem der Betonmischer be- oder entladen wird bzw. Beton transportiert. Zum Fahren zählen Leerfahrten. Die Begründung für diese Entscheidung liegt in der Tatsache, dass der Betonmischer nur bedingte Ähnlichkeit mit einem Dumper hat. Über das Fahrzeug können nur schwer allgemein gültige Aussagen getroffen werden, da sowohl die zu transportierte Menge als auch die Transportstrecke vom jeweiligen Einsatzort abhängen. Daher werden für die repräsentative Schicht folgende weitere Annahmen getroffen: Die Maschine steht ca. 20 min an der Betonstation und fährt danach voll (4 m³ Beton) ca. 40 min zum Einsatzort. Dort verweilt sie 12 min und fährt anschließend leer wieder zur Station zurück. Hin- und Rückweg haben die gleiche Länge. [3]

In Abbildung 3-14 ist die Leistungsverteilung der repräsentativen Schicht zu sehen.

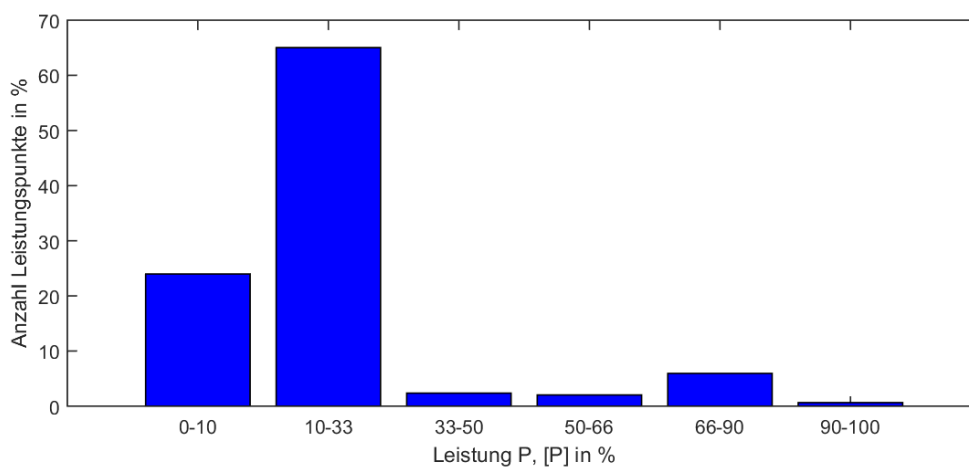


Abbildung 3-14: Leistungsverteilung rep. Schicht, Betontransporter BT1B, Grube B [3]

Abbildung 3-14 zeigt, dass der Leistungsbereich des BT1B zwar ganz ausgeschöpft wird, jedoch der Großteil aller Leistungspunkte (über 80%) in den unteren beiden Leistungsklustern liegt (0 – 33%). Ca. 60% aller Leistungspunkte liegen im Bereich von 10 – 33%, was dem Arbeiten entspricht. Maximale Leistung benötigt das Fahrzeug nur während des Fahrens. Die restlichen 22% aller Leistungspunkte liegen im niedrigsten Leistungsbereich von 0 – 10% unter dem Arbeitsbereich. Diese ergeben sich aus Leerlauf und Fahren mit niedriger Last.

Während der repräsentativen Schicht benötigt das Fahrzeug eine Dieselen Energiemenge von ca. 397 kWh. Daraus errechnet sich ein Motorwirkungsgrad von ca. 44%. [3] Auch dieser Wirkungsgrad erscheint unter Berücksichtigung der anderen Maschinen als deutlich zu hoch. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 41 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 7 L/h.

Die Gesamtenergiemenge unterteilt sich wie in Abbildung 3-15 zu sehen ist folgendermaßen:

- Leerlauf 20 kWh (5%)
- Fahren 83 kWh (21%)
- Arbeiten 294 kWh (74%)

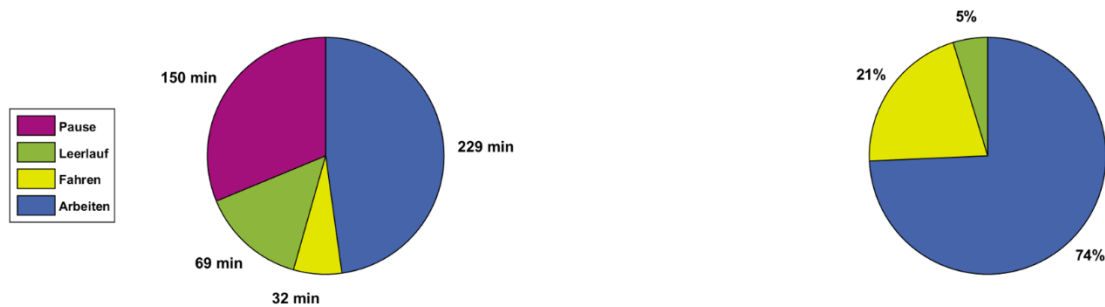


Abbildung 3-15: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, BT1B, Grube B

Einsatzbedingt hat die Maschine einen signifikanten Anteil an Leerlauf, insgesamt 69 Minuten (siehe Abbildung 3-15) während einer repräsentativen Schicht, die vor allem dann entstehen, wenn die Maschine be- und entladen wird.

3.2.3 Mobilbagger B1B

Der B1B ist ein Mobilbagger, der für Beraubearbeiten eingesetzt wird. Die Maschine ist dazu mit einer Gesteinsfräse als Anbaugerät ausgestattet. Der Dieselmotor entspricht der 100 kW Leistungsklasse und liefert 400 Nm Maximaldrehmoment bei einer Drehzahl von 1500 1/min. Der Mobilbagger konnte nicht vermessen werden. Da in der Studie kein anderes ähnliches Fahrzeug vermessen wurde, wurde ein künstlicher Arbeitszyklus generiert, der sich an den Vorgaben der Grubenbetreiber sowie an den in den Datenblättern der Maschine vorhandenen Informationen orientiert. [3]

Der Berauber ist ca. 2 h pro 8 h-Schicht im Einsatz. Der B1B übt während einer repräsentativen Schicht die Tätigkeiten **Fahren** (24%) und **Arbeiten** (61%) aus. 15% der Zeit ist das Fahrzeug im Leerlauf. Das Tätigkeitsprofil Fahren beinhaltet Umsetzfahrten und das Tätigkeitsprofil Arbeiten steht für die Beraubearbeiten des B1B. Die Leistungsverteilung ist in Abbildung 3-16 dargestellt.

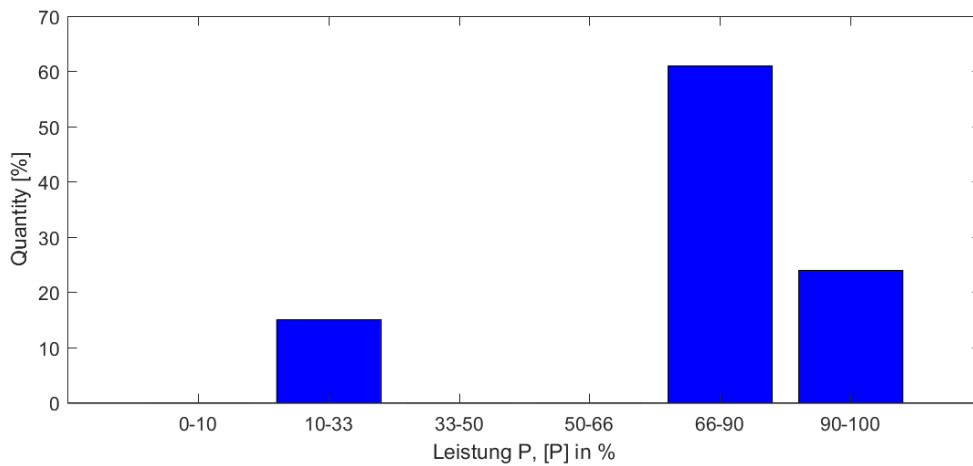


Abbildung 3-16: Leistungsverteilung rep. Schicht, Berauber B1B, Grube B [3]

In der repräsentativen Schicht benötigt die Maschine ca. 229 kWh Dieselenergie. Die Energiemenge lässt sich folgendermaßen den Tätigkeiten zuweisen: (vgl. Abbildung 3-17):

- Leerlauf 5 kWh (2%)
- Fahren 90 kWh (39%)
- Arbeiten 134 kWh (59%)

Für den Motor der Maschine wurde ein Wirkungsgrad von 38% angenommen. Damit ergibt sich ein Gesamtspritverbrauch von ca. 23 Liter und ein durchschnittlicher Dieselvebrauch der Maschine von ca. 12 L/h.



Abbildung 3-17: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, Mobilbagger B1B, Grube B

Insgesamt ist das Fahrzeug während einer repräsentativen Schicht 18 Minuten im Leerlauf, siehe Abbildung 3-17.

3.3 Grube C

Folgende Fahrzeuge wurden näher untersucht (Abbildung 3-18). Detaillierte Informationen finden sich in [6].

Nr.	Fahrzeuge		Tätigkeit	Datenakquise
	Typ	Bezeichnung		
3.3.1	Fahrlader	LHD1C	Arbeiten, Fahren	Messung
3.3.2	Berauber	B1C	Arbeiten, Fahren	Messung
3.3.3	Schiebekastenfahrzeug	D1C	Arbeiten	Messung
3.3.4	Fahrlader	LHD2C	Arbeiten, Fahren	Messung

Abbildung 3-18: Übersicht zur Datenakquise, Grube C

3.3.1 Fahrlader LHD1C

Der LHD1C ist ein Fahrlader mit 21 Tonnen Nutzlast. Der Lader entspricht einer Leistungsklasse von 400 kW. Der Dieselmotor stellt das max. Drehmoment von 2215 Nm bei 1200 1/min zur Verfügung. Zwischen den einzelnen Abbaurevieren der Grube C sind Fahrten notwendig. Die Zeit für eine Fahrt beträgt ca. 1 h. Während dieser legt er eine Strecke von maximal 25 km zurück. Die Förderleistung des LHD1C variiert zwischen 300 - 500 Tonnen / h. Bei der Messung des Fahrzeugs wurden die Tätigkeitsprofile **Fahren** und **Arbeiten** erfasst. In der repräsentativen Schicht ist das Fahrzeug ca. 7 h (420 min.) von 8 h Schichtdauer im Einsatz. Die Schicht setzt sich aus 86% Arbeiten und 14% Fahren zwischen den Revieren zusammen. Abbildung 3-19 zeigt das Leistungsprofil der Schicht. [6]

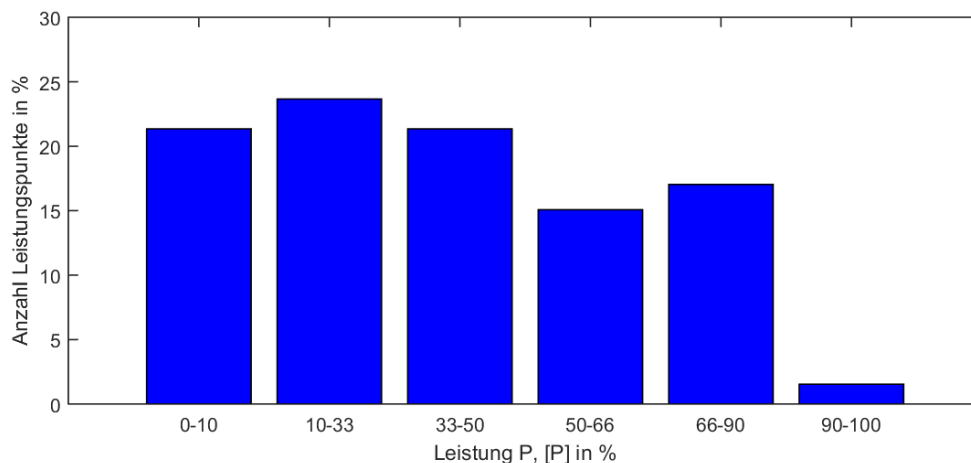


Abbildung 3-19: Leistungsverteilung rep. Schicht, Fahrlader LHD1C, Grube C, [6]

Die Leistungsverteilung der Maschine weist in den unteren drei Clustern (0 – 50%) ein Plateau von jeweils über 20% auf, vom 4ten bis zum 6ten Cluster (50 - 100%) fällt sie ab. Die Leistungsverteilung zeigt, dass die Maschine ihr komplettes Leistungsspektrum benötigt. Der Anteil an Punkten im 6ten Cluster liegt aber deutlich unter 5%. Daher sollte auch bei dieser Maschine Rightsizing überprüft und ggfs. durchgeführt werden. Der hohe Anteil an Punkten in der untersten Leistungsklasse (0 – 10%) weist darauf hin, dass die Maschine trotz hoher Auslastung häufig im Leerlauf oder Schubbetrieb, z.B. durch Bremsen, betrieben wird.

Während einer repräsentativen Schicht benötigt das Fahrzeug 2834 kWh an Dieselenergie. Daraus errechnet sich ein Motorwirkungsgrad von ca. 40%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 292 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 42 L/h.

Abbildung 3-20 stellt die Zeitverteilung und die Energieverteilung während der repräsentativen Schicht dar:

- Leerlauf 10 kWh (<1%)
- Fahren 448 kWh (15%)
- Arbeiten 2376 kWh (84%)

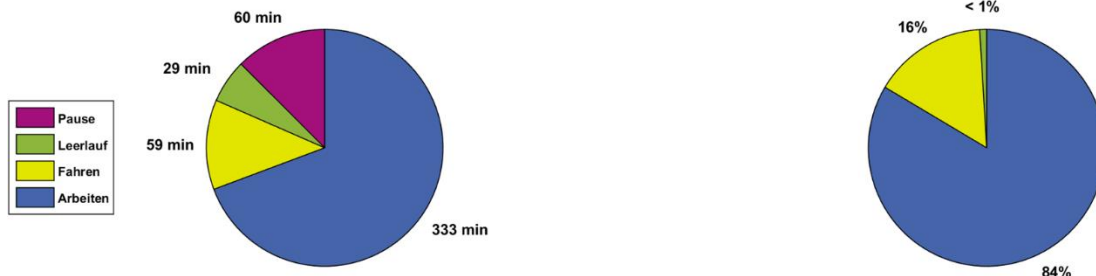


Abbildung 3-20: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, LHD1C, Grube C

3.3.2 Berauber B1C

Der Motorleistung des Berauber B1C liegt in der Leistungsklasse von 200 kW. Der Motor besitzt ein max. Drehmoment von 1206 Nm. Die dazu gehörige Drehzahl ist unbekannt. Pro Stunde beraubt die Maschine eine Fläche von ca. 450 m² und ist während einer 8 h Schicht ca. 6 h (360 min) im Einsatz, siehe Abbildung 3-22. Zum Erreichen der einzelnen Abbaureviere legt der Berauber pro Schicht unterschiedliche Distanzen im Bereich von 1 - 20 km zurück. Die Maschine übt die Tätigkeiten **Fahren** (12%) und **Arbeiten** (88%) aus, wobei das Tätigkeitsprofil Arbeiten alle Beraubearbeiten einschließt. [6]

Abbildung 3-21 stellt die Leistungsverteilung der Maschine in der repräsentativen Schicht dar.

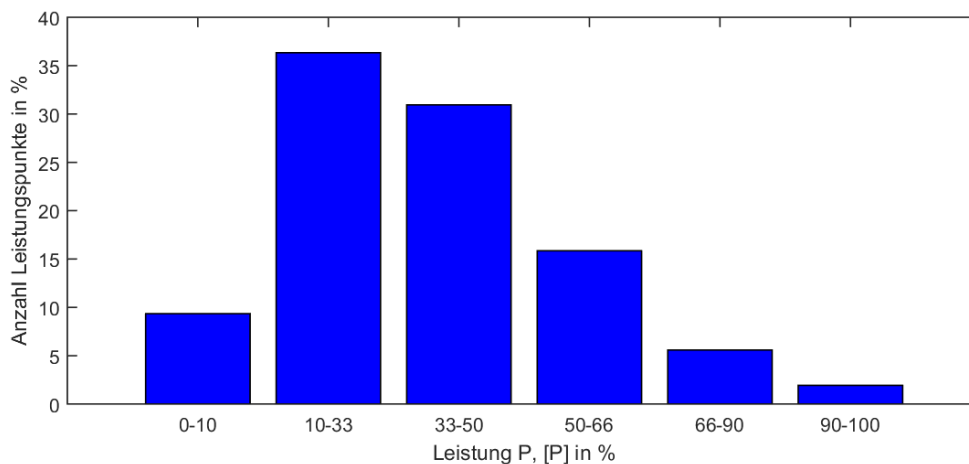


Abbildung 3-21: Leistungsverteilung rep. Schicht, Berauber B1C, Grube C, [6]

Der Leistungsschwerpunkt in der Verteilung liegt zwischen dem 2ten und 3ten Cluster (10 - 50%). Sowohl der erste (0 – 10%) als auch der fünfte Cluster (66 - 90%) haben nur einen Anteil von jeweils 6 – 7 %. Im höchsten Cluster (90 - 100%) befinden sich nur ca. 2% aller Leistungspunkte. Die Verteilung deutet darauf hin, dass Rightsizing um mindestens einen, gegebenenfalls sogar um zwei Leistungscluster möglich ist.

Im vermessenen Zeitraum hatte das Fahrzeug nur eine sehr geringe Leerlaufzeit von ca. 5 Minuten, siehe Abbildung 3-22. Hierfür spricht auch der sehr geringe Anteil an Leistungspunkten in der unteren Leistungsklasse, Abbildung 3-21.

In einer repräsentativen Schicht benötigt der Berauber 1401 kWh Dieselenergie. Es ergibt sich ein Motorwirkungsgrad von ca. 41%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 144 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 24 L/h. Die Gesamtenergie verteilt sich wie folgt (vgl. Abbildung 3-22):

- Leerlauf 14 kWh (1%)
- Fahren 168 kWh (12%)
- Arbeiten 1219 kWh (87%)

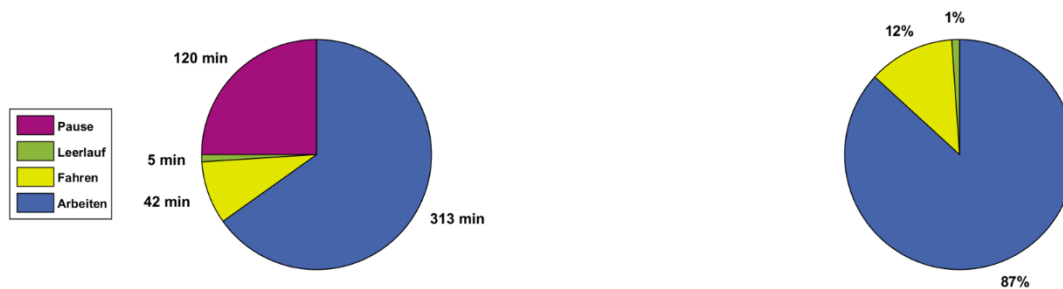


Abbildung 3-22: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, Berauber B1C, Grube C

3.3.3 Schiebekastenfahrzeug (SKF) D1C

Das Schiebekastenfahrzeug D1C wird im Rahmen der schneidenden Gewinnung eingesetzt und transportiert das vom CM gewonnene Material zum lokalen Förderband. Der Motor entspricht der Leistungsklasse 200 kW und hat ein maximales Drehmoment von 1400 Nm bei 1450 1/min. Das Fahrzeug besitzt eine Nutzlast von 30 Tonnen und erreicht damit eine Förderleistung von 150 - 300 Tonnen/h. Es werden zwei Fahrzeuge gleichzeitig eingesetzt, sodass sich Stillstandszeiten lediglich durch Wartezeiten und Beladevorgänge sowie durch unplanmäßige Unterbrechungen ergeben. Während der Einsatzzeit legt das Fahrzeug bis zu 16 km zurück. Als Tätigkeiten wurden **Arbeiten** und **Leerlauf** definiert. Aus den Messungen konnte für beide Tätigkeiten ein Verhältnis von ca. 55% (Arbeiten) zu 45% (Leerlauf) ermittelt werden. [6]

Abbildung 3-23 zeigt das Leistungsprofil während der repräsentativen Schicht von 8 h, während denen das Fahrzeug 6 h im Einsatz ist. Zwar wird die gesamte Leistungsbreite des D1C genutzt, jedoch ist der signifikant höchste Anteil mit ca. 72% im Bereich der niedrigsten Leistung zwischen 0 – 10%. Die Cluster zwischen 33 – 100% werden nur mit einem sehr geringen Anteil von jeweils unter 5% genutzt. Dies bestätigt die Annahme, dass das D1C sehr häufig im Leerlauf betrieben wird. Wie eingangs beschrieben handelt es sich bei dieser Maschine um ein Schiebekastenfahrzeug, d.h. ein Transportfahrzeug, welches sein Ladevolumen durch einen hydraulischen Antrieb mittels eines Schiebers vergrößern bzw. verkleinern kann. Diese Funktion wird üblicherweise während des Beladens oder Entladens eingesetzt. Die Leerlaufbetrachtung schließt daher die Betätigung des hydraulischen Schiebeantriebs während des Beladens mit ein, da diese nur für sehr kurze Zeiträume erfolgt. Das Entladen hat einen vergleichsweise geringen Anteil an den Standzeiten, zudem wird währenddessen ebenfalls die Hydraulik betätigt. Die Leistungsverteilung weist darauf hin, dass ggfs. auch eine Maschine kleinerer Leistungsklasse eingesetzt werden kann. Hierfür muss allerdings noch genauer untersucht werden, für welche Tätigkeit die maximale Motorleistung der Maschine benötigt wird.

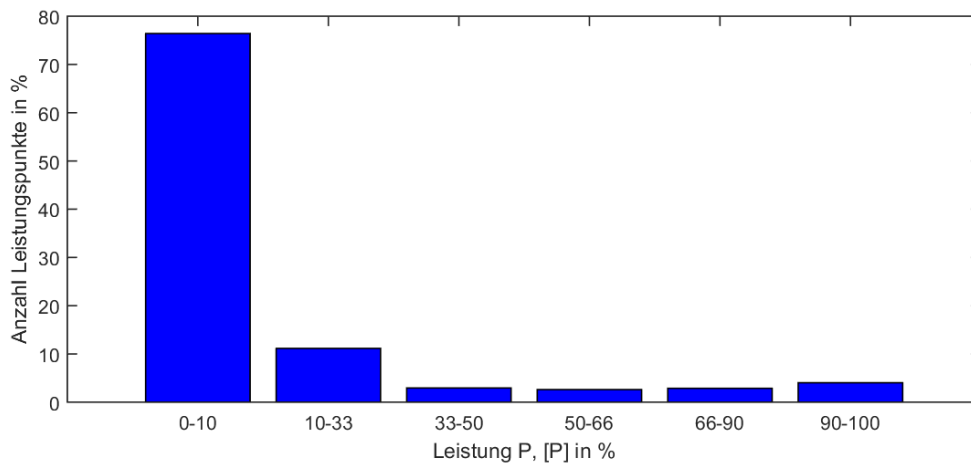


Abbildung 3-23: Leistungsverteilung rep. Schicht, Schiebekastenfahrzeug D1C, Grube C, [6]

Während der repräsentativen Schicht benötigt das Fahrzeug ca. 740 kWh Dieselenergie. Es errechnet sich ein Motorwirkungsgrad von ca. 29%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 76 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 13 L/h. Das Tätigkeitsprofil sowie die zeitliche Verteilung der Tätigkeiten sind in Abbildung 3-24 grafisch dargestellt. Die benötigte Energiemenge teilt sich auf zu:

- Leerlauf 133 kWh (18%)
- Arbeiten 607 kWh (82%)

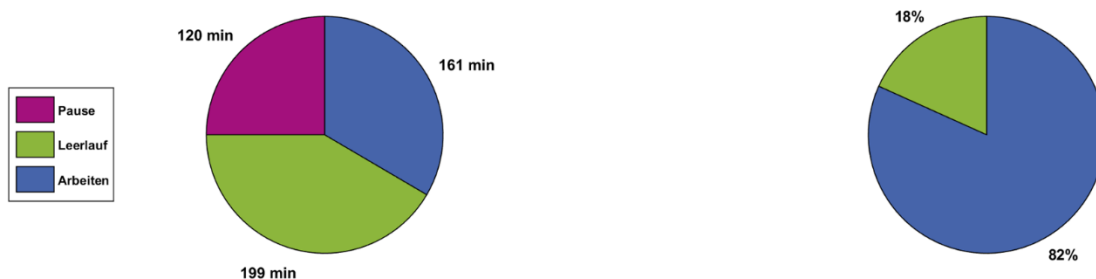


Abbildung 3-24: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, SKF D1C, Grube C

Es errechnet sich eine Gesamtzeit von 199 Minuten, die das Fahrzeug während einer repräsentativen Schicht im Leerlauf verbringt, siehe Abbildung 3-24.

3.3.4 Fahrlader LHD2C

Der Fahrlader LHD2C wird sowohl im Sprengvortrieb als auch im Versatz verwendet. Er besitzt eine Nutzlast von 17 Tonnen. Die Motornennleistungsklasse der betrachteten Maschine beträgt 300 kW (werkseitig gedrosselt), der Motor liefert ein Drehmoment von 2080 Nm bei 1200 1/min (ungedrosselt). Zur Vermeidung von Stillstandszeiten sind zwei Fahrzeuge gleichzeitig im Einsatz. Pro Stunde fördert der Fahrlader 100 - 200 t und legt maximal eine Strecke von 32 km zurück. Bei der Messung des Fahrzeuges wurden die Tätigkeiten **Fahren** (14%) und **Arbeiten** (86%) erfasst. Das Tätigkeitsprofil Arbeiten beinhaltet den Versatz. [6]

In Abbildung 3-25 ist das Leistungsprofil während der repräsentativen Schicht dargestellt.

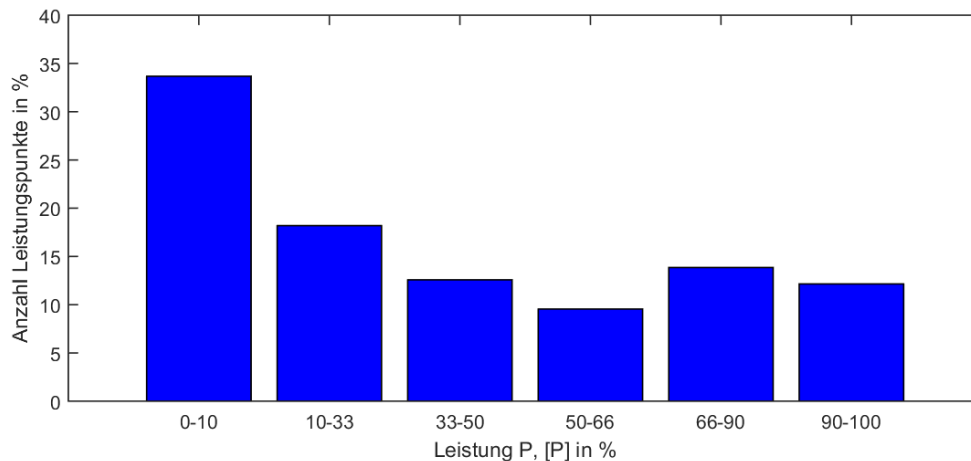


Abbildung 3-25: Leistungsverteilung rep. Schicht, Fahrlader LHD2C, Grube C, [6]

Der Großteil aller Leistungspunkte, ca. 34%, befindet sich im 1ten Cluster (0 - 10%). An zweiter Stelle steht der zweite Cluster (10 - 33%) mit ca. 18%. Zwischen dem dritten und sechsten Cluster (33 - 100%) liegt ein Plateau bei ca. 14%. Da im Cluster der höchsten Leistung (90 - 100%) ca. 13% aller Punkte liegen ist Rightsizing wahrscheinlich nicht möglich. Trotzdem sollte untersucht werden, warum der Anteil an Punkten im untersten Cluster so hoch ist.

Die repräsentative Schicht des Fahrzeugs besteht aus 86% Arbeiten und 14% Fahren, das Fahrzeug ist hierfür ca. 7 h (420 min) im Einsatz. Der Gesamtenergieverbrauch der repräsentativen Schicht beträgt damit 2470 kWh, die Maschine hat demnach einen Motorwirkungsgrad von ca. 35%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 255 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 36 L/h.

Abbildung 3-4 zeigt die Zeitliche Verteilung der Tätigkeiten der Maschine sowie die Energieverteilung während einer repräsentativen Schicht. Die Gesamtenergie unterteilt sich zu:

- Leerlauf 24 kWh (<1%)
- Fahren 395 kWh (16%)
- Arbeiten 2051 kWh (83%)

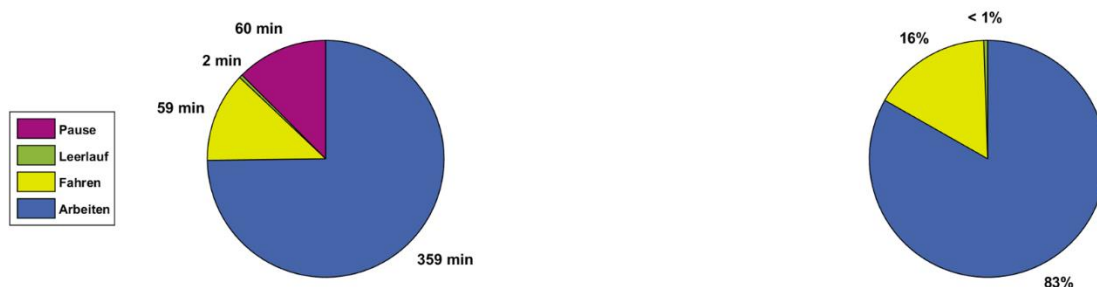


Abbildung 3-26: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, LHD2C, Grube C

3.4 Grube D

Abbildung 3-27 führt alle Fahrzeuge auf, die untersucht wurden. Genauere Informationen finden sich in [6].

Nr.	Fahrzeuge		Tätigkeit	Datenakquise
	Typ	Bezeichnung		
3.4.1	Radlader	R1D	Arbeiten	Messung
3.4.2	Berauber	B1D	Arbeiten, Fahren	Messung Grube C
3.4.3	Radlader	R2D	Arbeiten, Fahren	Skalierung R1D
3.4.4	Dumper	D1D	Arbeiten	Messung

Abbildung 3-27: Übersicht zur Datenakquise, Grube D

3.4.1 Radlader R1D

In der Grube D wird der Radlader R1D zum Laden und Fördern im Bohr- und Sprengvortrieb verwendet. Die Maschine gehört zur Motorleistungsklasse von 300 kW mit einem maximalen Drehmoment von 1959 Nm bei 1200 1/min. Der R1D ist in einer Schicht für ca. 5 h (300 min.) im Einsatz. Den Rest des Tages wird das Fahrzeug in der Regel nicht benutzt. Während der repräsentativen Schicht verrichtet das Fahrzeug zu 100% die Tätigkeit **Arbeiten**. Abbildung 3-28 zeigt das Leistungsprofil der repräsentativen Schicht. [6]

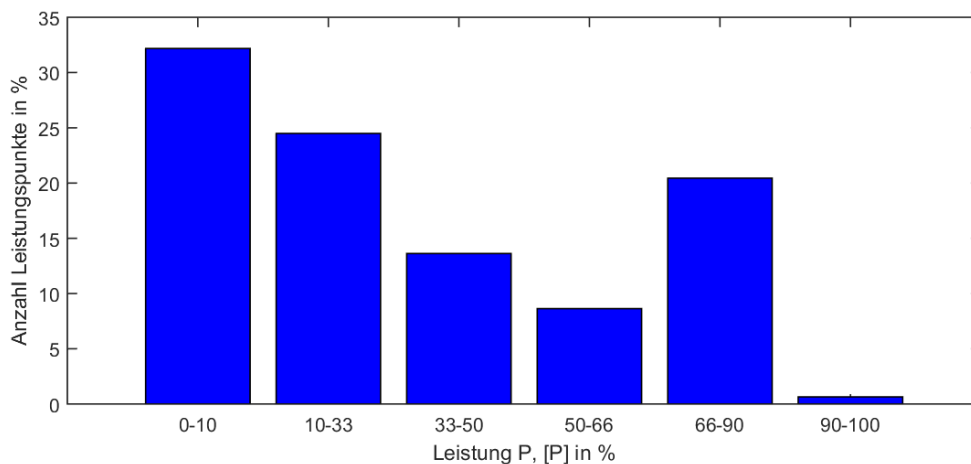


Abbildung 3-28: Leistungsverteilung rep. Schicht, Radlader R1D, Grube C, [6]

Das gesamte Leistungsspektrum der Maschine wird ausgeschöpft, wobei der Volllastbereich 90 - 100% mit ca. 2% am geringsten verwendet wird. Die größte Anzahl an Leistungspunkten liegt im ersten und zweiten Cluster (0 – 33%) mit jeweils 26%. Mit knapp 23% steht der fünfte Cluster (66 - 90%) an dritter Stelle. Gemäß der Leistungsverteilung wäre auch bei dieser Maschine Rightsizing in den Bereich des fünften Clusters möglich.

Bei einem Energieverbrauch in der repräsentativen Schicht von 1265 kWh ergibt sich ein Motorwirkungsgrad von ca. 41%. Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht berechnet sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 130 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 26 L/h. Die gesamte Energie wird für die Tätigkeit Arbeiten verwendet.

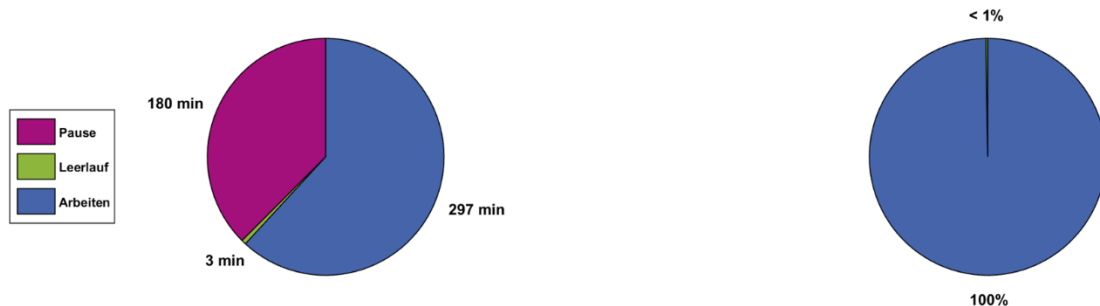


Abbildung 3-29: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, R1D, Grube C

Abbildung 3-29 kann entnommen werden, dass der Radlader nur sehr geringe Leerlaufzeiten von 3 Minuten in der repräsentativen Schicht hat. Dies spricht für eine sehr hohe Auslastung der Maschine.

3.4.2 Berauber B1D

Der B1D der Grube D und das Fahrzeug B1C der Grube C werden gleich eingesetzt. Dementsprechend wird an dieser Stelle auf den entsprechenden Abschnitt Kapitel Nr. 3.3.2 verwiesen, der auch für die Grube D Gültigkeit hat.

3.4.3 Radlader R2D

Der R2D ist ein Radlader, der zum Verdichten und Schieben von Versatzmaterial eingesetzt wird. Das Fahrzeug ist hierzu mit einem Schiebeschild ausgestattet und ist der Motorleistungsklasse von 200 kW zuzuordnen. Das Motordrehmoment von 1623 Nm wird bei 1150 1/min erreicht. Die repräsentative Schicht setzt sich zusammen aus den Tätigkeiten **Fahren** und **Arbeiten**. Das Tätigkeitsprofil Fahren beinhaltet das Fahren zu den einzelnen Kammern. Das Tätigkeitsprofil Arbeiten besteht aus dem Schieben des Versatzes. Jeder Schub dauert ca. 30 Sekunden und es gibt pro Zyklus 5 Schübe, was zu einer Zeit von ca. 2,5 Minuten Arbeiten führt. Das Vermessen des R2D war nicht möglich, daher wurde zur Ergebniserzeugung auf eine vergleichbare Maschine, R1D, zurückgegriffen. Deren Messergebnisse wurden nach vergleichbaren Tätigkeiten ausgewertet und entsprechende Messschriebabschnitte wurden zu einer repräsentativen Schicht zusammengesetzt. In der repräsentativen Schicht ist das Fahrzeug ca. 6,5 h von 8 h im Einsatz. Die Einsatzzeit wiederum besteht aus ca. 44% **Fahren** und 56% **Arbeiten**. Das Leistungsprofil der repräsentativen Schicht ist in Abbildung 3-30 ersichtlich. Die maximale Leistung wurde vom R1D auf den R2D skaliert. [6]

Die Leistungsverteilung der repräsentativen Schicht zeigt Abbildung 3-30. Die Leistungsverteilung zeigt, dass die Maschine während der repräsentativen Schicht ihr gesamtes Leistungsspektrum ausschöpft. Vor allem der fünfte Leistungscluster (66 - 90%) hat einen Anteil von über 56%. Mit ca. 36% liegen der erste und zweite Cluster (0 – 33%) an zweiter Stelle. In der Mitte der Leistungsverteilung, Cluster drei und vier (33 - 66%), ist ein Plateau auf jeweils unter 5 %.

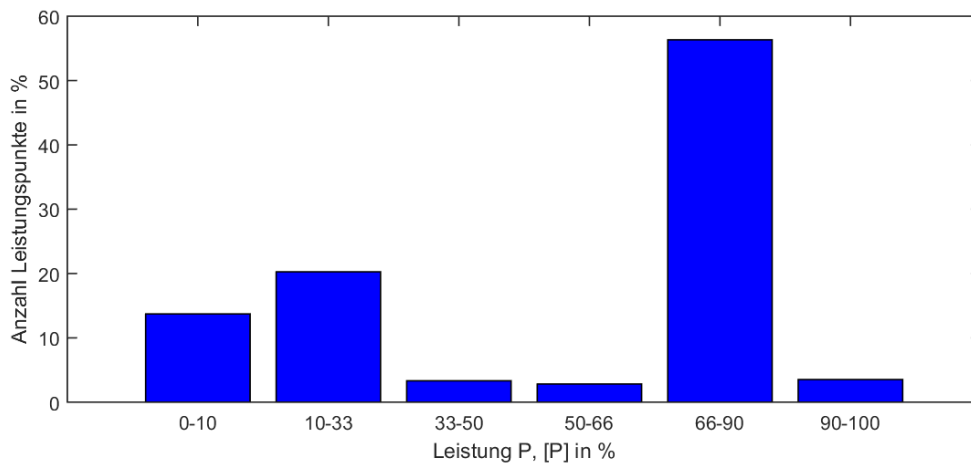


Abbildung 3-30: Leistungsverteilung rep. Schicht, Radlader R2D, Grube D, [6]

Bei einer Einsatzzeit von 6,5h (390 min.) pro Schicht ergibt sich eine Dieselen Energiemenge von 2574 kWh. Der Motor hat damit einen Wirkungsgrad von ca. 34%. [6] Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 265 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 41 L/h. Die Energiemenge wird in Abbildung 3-31 den Tätigkeiten zugeordnet:

- Fahren 1158 kWh (45%)
- Arbeiten 1416 kWh (55%)



Abbildung 3-31: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, R2D, Grube D

In der wie beschrieben erstellten repräsentativen Schicht hat das Fahrzeug keine Leerlaufzeiten, siehe Abbildung 3-31.

An dieser Stelle sei nochmal darauf hingewiesen, dass die hier angegebene repräsentative Schicht nicht gemessen, sondern aus Messungen des R1D erstellt wurde, da die Messung an dem R2D aufgrund fehlender Schnittstellen nicht möglich war. Im Sinne einer stärkeren Belastbarkeit sollten die Messungen ggfs. an einer anderen Maschine durchgeführt werden, die während der Messung die Tätigkeiten des R2D übernimmt.

3.4.4 Dumper D1D

Das Vermessen des eigentlich für die Transportaufgabe zuständige Fahrzeug war aufgrund technischer Hindernisse nicht möglich. Daher wurden die Messungen an einem Schiebekastenfahrzeug, Dumper D1D, als Ersatz durchgeführt, welches das Tätigkeitsprofil der üblicherweise eingesetzten Fahrzeuge übernommen hatte. In der repräsentativen Schicht führt das Fahrzeug ca. 30 Fahrten je 20 m³ Muldeninhalt aus. Die zurückgelegte Strecke je Förderspiel beträgt dabei je 3 km bei einer Nutzlast von 38 Tonnen. Das Fahrzeug gehört

zur Motorleistungsklasse 300 kW, mit einem max. Motordrehmoment von 2466 Nm bei 1200 1/min. Das untersuchte Tätigkeitsprofil besteht aus den Tätigkeiten **Arbeiten** und **Leerlauf**. Die Leerlaufzeit beträgt 40% und das Tätigkeitsprofil Arbeiten wird zu 60% ausgeführt und beinhaltet den Transport des Versatzmaterials vom Umschlagbunker zur Kammer. [6]

In Abbildung 3-32 ist das Leistungsprofil des D1Ds während der repräsentativen Schicht dargestellt.

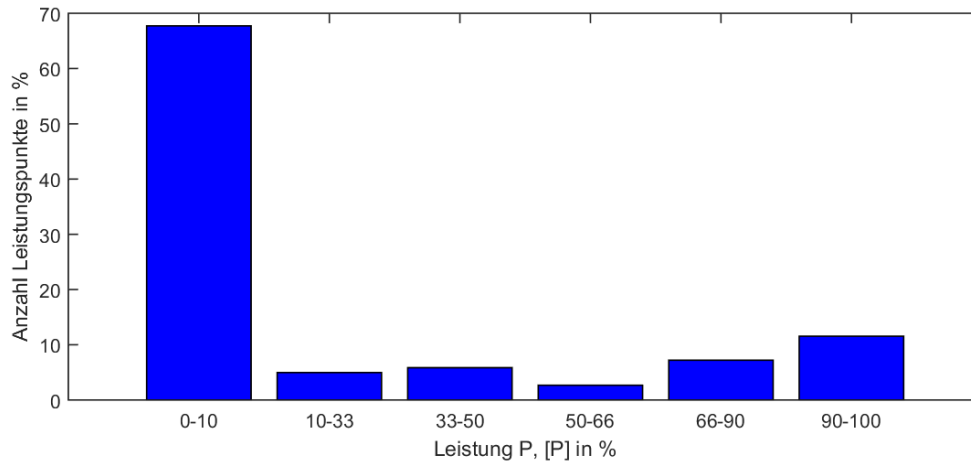


Abbildung 3-32: Leistungsverteilung rep. Schicht, LKW D1D, Grube D, [6]

Die Messung zeigt, dass der Großteil der Leistungspunkte im Bereich niedrigerer Leistungen bis 33% liegt. Über 65% der Leistungspunkte liegen in Cluster 1 (0 – 10%). Dies stimmt mit dem Tätigkeitsprofil der Maschine überein, da diese während des Beladens still steht, d.h. der Motor wird im Leerlauf betrieben. Während einer repräsentativen Schicht von 8 h befand sich das Fahrzeug ca. 6,5 h (390 min.) im Einsatz, vgl. Abbildung 3-33 links. In dieser Einsatzzeit verbraucht das Fahrzeug ca. 2134 kWh Dieselenergie und hat damit einen Motorwirkungsgrad von ca. 37%. [6] Bezogen auf die Einsatzzeit in der repräsentativen Schicht ergibt sich daraus ein Gesamtspritverbrauch von ca. 220 Liter bei einem durchschnittlichen Spritverbrauch von ca. 34 L/h.

Der Energieverbrauch lässt sich wie in Abbildung 3-33 dargestellt unterteilen in:

- Leerlauf 171 kWh (8%)
- Arbeiten 1963 kWh (92%)

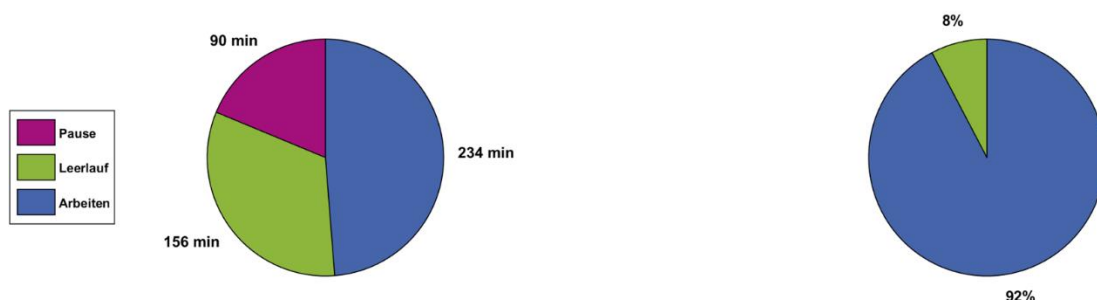


Abbildung 3-33: Zeitverteilung (links) und Energieverteilung (rechts) der rep. Schicht, D1D, Grube D

Abbildung 3-33 kann noch zusätzlich die signifikant hohe Leerlaufzeit von 156 Minuten während einer repräsentativen Schicht entnommen werden.

4 Ergebnisse AP2: Analyse möglicher Energiespeichersysteme

Dem Stand der Technik sind verschiedene Energiespeichersysteme für mobile Anwendungen bekannt. Hierzu zählen:

- Chemische Speicher (Flüssigkraftstoffe, LNG, Batterien,...)
- Mechanische Speicher (Schwungrad, Federn,...)
- Hydraulische Speicher (Blasenspeicher, Kolbenspeicher,...)
- Elektrische Speicher (SuperCaps,...)

Abbildung 4-1 stellt Energiespeichersysteme in Form eines Ragone-Plots dar. Dabei werden die Energiedichte auf der x-Achse und die Leistungsdichte auf der y-Achse aufgetragen. Prinzipiell können nach diesem Diagramm Speichersysteme in Energie- und Leistungsspeicher eingeteilt werden. Der Unterschied liegt darin, dass Energiespeichersysteme eine geringe Leistung bei hoher gespeicherter Energie zur Verfügung stellen können, d.h. über einen längeren Zeitraum kann eine größere Menge Energie in geringerer Rate freigegeben werden. Leistungsspeicher hingegen können kurzfristig hohe Energie und damit eine hohe Leistung freigegeben, die gesamte gespeicherte Energie ist allerdings sehr begrenzt. Typische Leistungsspeicher sind hydraulische Blasenspeicher.

Aus Abbildung 4-1 ist direkt zu erkennen, dass sowohl Diesel als auch Wasserstoff eine hohe Energie- und Leistungsdichte aufweisen. Damit sind sie allen anderen Speichersystemen deutlich überlegen.

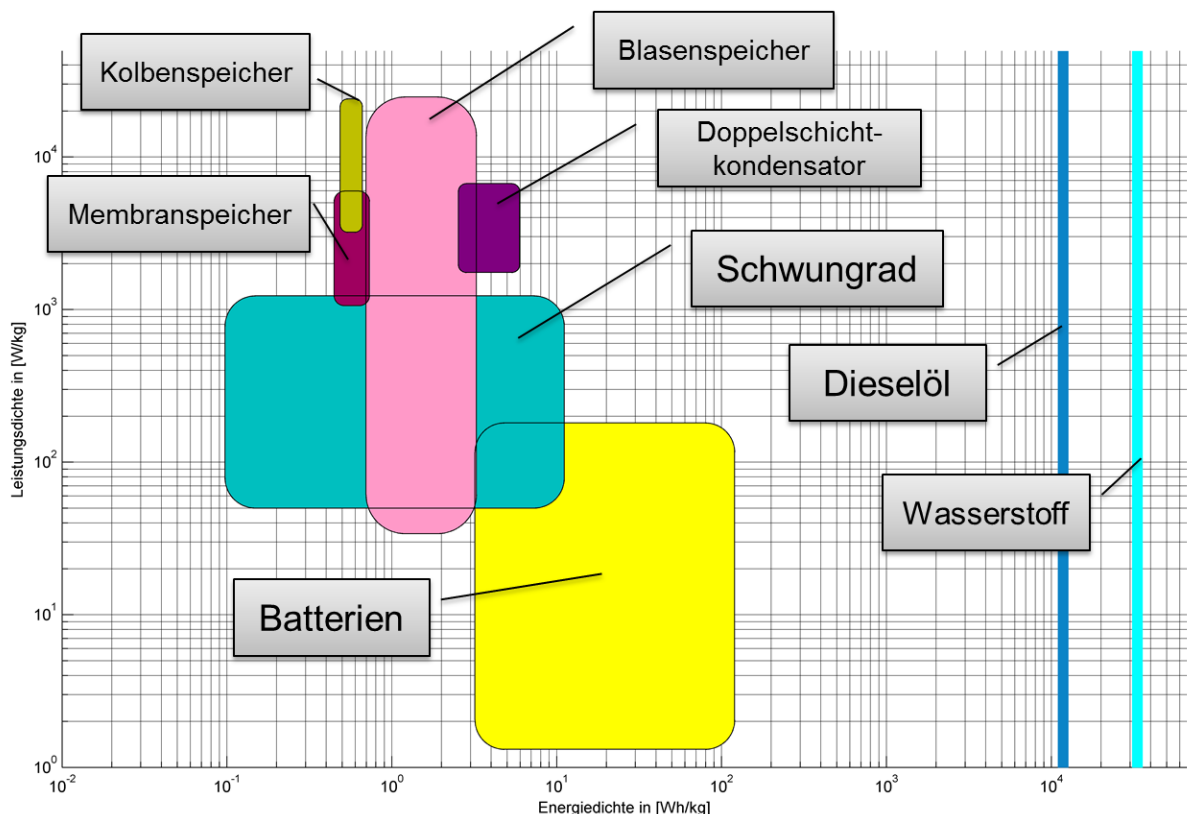


Abbildung 4-1: Ragone-Plot Energiespeichersysteme für mobile Anwendungen, [10]

Um die Emissionsreduzierung im Untertagebau erfolgreich umsetzen zu können, werden vorerst hauptsächlich Energiespeicher benötigt, da Leistungsspeicher nur kurzzeitig Energie aufnehmen und abgeben können, z.B. durch Rekuperation aus Bremsvorgängen oder Bergfahrten – den Hauptteil an umgesetzter Energie muss

aber immer noch ein Energiespeicher liefern. Aufgrund der, im Vergleich zu anderen Energiespeichersystemen, hohen Energiedichten werden im weiteren Verlauf des Berichts nur chemische Energiespeicher (Diesel / Benzin, LNG, Batterien allgemein) betrachtet.

4.1 Stand der Technik: Fossiler Energiespeicher Diesel

Viele mobile Arbeitsmaschinen des Stands der Technik werden durch Dieselmotoren angetrieben. Dies liegt unter anderem an den deutlichen Vorteilen, die der Primärenergieträger „Diesel“ hat:

- Hohe Energiedichte von 11,94 kWh / kg [11]
- Geringe logistische Anforderungen (Transport / Lagerung / Verfügbarkeit)
- Einfaches und schnelles Befüllen der Maschinen mit Primärenergie
- Gut Distribution durch weit ausgebaute Infrastruktur

Zudem hat die langjährige Verwendung der Dieseltechnologie und der entsprechenden Komponenten für eine hohe technische Reife gesorgt, was den Diesel zum bevorzugten Antrieb bei großen zu transportierenden Massen macht [6]. Bei der Verbrennung des Kraftstoffs entstehen allerdings Verbrennungsprodukte wie z.B. Partikel, NO_x, CO_x oder auch Schwefel, was nach aktueller Gesetzeslage eine komplexe und aufwändige Abgasnachbereitung notwendig macht. Durch innermotorische Maßnahmen, wie z.B. Common-Rail-Einspritzung oder eine Abgasrückführung (AGR), können einzelne Verbrennungsprodukte minimiert werden. Neben den innermotorischen werden Dieselmotoren noch mit außermotorischen Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung versehen, z.B. Dieselpartikelfilter (DPF) oder Katalysatoren (SCR), die wiederum zusätzlichen Bauraum auf den Maschinen benötigen. [6]

DPF werden zur Reduktion von im Wesentlichen aus Kohlenstoff (Ruß) bestehenden Partikelemissionen verwendet. Die höchsten Abscheideraten (>90 %) bietet ein sog. geschlossener DPF. Die Abgase durchströmen hierbei ein poröses Material, an dessen Oberfläche sich die Partikel ansammeln. Um ein Verstopfen des DPF zu verhindern, muss der DPF regelmäßig regeneriert werden. Dies kann entweder passiv durch permanente Oxidation oder aktiv durch gezielte temporäre Temperaturerhöhung zur Verbrennung der Partikel erfolgen („freibrennen“). Die notwendige Regenerationstemperatur beträgt ca. 650 °C bzw. 400 °C unter Einsatz von Additiven. [6]

Stickoxide werden durch SCR-Katalysatoren reduziert. Durch Einspritzung einer Harnstofflösung vor dem Katalysator reagieren die Stickoxide (NO, NO₂) zu reinem Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O). Die aktuell am Markt verfügbare Harnstofflösung „AdBlue“ ermöglicht eine Reduzierung der Stickoxide von mehr als 80 %. [6]

Weitere Verbesserungsmaßnahmen an Verbrennungsmotoren, wie z.B. Reduzierung von Motorgewicht und Reibungsverlusten oder Erhöhung der hubraumbezogenen Leistung (Downsizing), liefern einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 44 %. Andere Quellen der Literatur beziffern den maximal möglichen Gesamtwirkungsgrad verbrennungsmotorisch angetriebener Antriebsstränge auf maximal 30 %. [6]

4.2 Alternative Primärenergieträger: LNG (Liquefied Natural Gas)

In den letzten Jahren hat die Attraktivität von flüssig-gespeichertem Methan, LNG (Liquefied Natural Gas), stetig zugenommen. Die LNG-Versorgung in Deutschland ist weiträumig ausgebaut (siehe z.B. [12]) und daher ist ein Anschluss an das LNG-Netz sehr einfach möglich. Außerdem kann LNG durch einige konstruktive Änderungen sowohl in Otto- als auch in Dieselmotoren verbrannt werden. Auch ein Mischbetrieb (Dual-Fuel) ist dabei möglich. [6]

Die Verbrennung von LNG hat gegenüber der Verbrennung von Diesel bedeutende Vorteile: Untersuchungen zeigen, dass die Stickoxidemissionen um bis zu 35 %, die Partikelemissionen um bis zu 100 % reduziert werden können. Weiterhin wird der CO₂-Ausstoß aufgrund des günstigen Kohlenstoff-Wasserstoff-Verhältnis um bis zu 25 % reduziert. [6]

LNG wird in speziell isolierten Tanks gelagert und bedarf vergleichsweise wenig Volumen. Da das flüssige Gas nicht perfekt isoliert werden kann und immer Energie von der Umgebung aufnimmt, erwärmt es sich zwangsläufig, wobei ein Teil verdampft. Das verdampfte Methangas muss entweder verbraucht werden oder durch Überdruckventile freigesetzt werden.

Problematisch ist bei LNG der Methanschluß, d.h. der Ausstoß von unverbranntem Methan, zu sehen, da Methan als 21-mal umweltschädlicher als CO₂ angesehen wird. Ein 3-Wege-Katalysator kann unverbranntes Methan teilweise oxidieren. Weitere Entwicklungen zur Reduzierung bzw. zur Vermeidung von Methanschluß werden durch weitere Optimierungen der Verbrennungsmotoren und der Abgasnachbehandlung erwartet. [6]

4.3 Wasserstoff als Energiespeicher

Elementarer Wasserstoff hat eine Energiedichte von ca. 33,3 kWh/kg, die damit wesentlich höher ist als die von Diesel, und kann z.B. durch die Elektrolyse von Wasser mittels elektrischer Energie gewonnen werden. Reiner Wasserstoff ist gasförmig bis zu einer Temperatur von ca. 21,15 K – erst darunter kondensiert Wasserstoff zu einer klaren, farblosen Flüssigkeit. [13]

Um Wasserstoff im Vergleich zu anderen Energieträgern bewerten zu können, müssen gravimetrische und volumetrische Energiedichten auf das gewählte Speichersystem bezogen werden.

Durch Oxidation in einer Brennstoffzelle (PEMFC, Polymerelektrolyt Fuel Cell) kann aus Wasserstoff unter Entstehung von Wasser elektrische Energie gewonnen werden. Die chemische Reaktion in der Brennstoffzelle erfolgt bei Betriebstemperaturen von 80 °C - 85 °C. Da die dabei entstehende Abwärme allerdings nicht, wie beim Verbrennungsmotor, mit dem Abgas abgeführt werden kann, ist eine aufwändige Kühlung der Brennstoffzelle notwendig. Da die Umwandlung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser in einer Brennstoffzelle nicht reversibel ist, eignen sich Brennstoffzellen nicht zur Rekuperation. [14]

Vorteile von Wasserstoff sind neben der hohen Energiedichte der mögliche Transport im gasförmigen oder flüssigen Zustand, eine gute Speicherbarkeit und eine schnell durchführbare Befüllung. Die Speicherung von Wasserstoff kann durch Druckerhöhung auf 250 – 700 bar oder durch Temperaturabsenkung bis zum Siedepunkt (-253 °C) in Druckbehältern erfolgen. Weitere Speichermöglichkeiten sind das chemische Binden von Wasserstoff in Kristallgittern (Metallhydride) oder in Flüssigkeiten (Methanol, Erdgas). Für Mobilanwendungen werden häufig Druckspeicher mit bis zu 700 bar eingesetzt, was einer gravimetrischen Energiedichte von ca. 2,15 kWh/kg und einer volumetrischen Energiedichte von ca. 0,8 kWh/l entspricht. [6]

Nachteilig bei Wasserstoff ist das Gefahrenpotential aufgrund der Knallgasreaktion von Wasserstoff und Sauerstoff. Außerdem ist die Herstellung von elementarem Wasserstoff zur Elektrolyse sehr energieaufwändig und teuer. Die Elektrolyse von Wasser gilt als energiewirtschaftlich sinnvoll, wenn „nichtfossile Energieträger zur Stromerzeugung eingesetzt und der erzeugte reine Sauerstoff ebenfalls verwendet wird. Der energetische Wirkungsgrad technischer Wasserelektrolyseure liegt bei 70–90%. [13] [6]

4.4 Batterien als Energiespeicher

Batterien sind elektrochemische Energiespeicher bzw. –wandler, die elektrische Energie in chemische und thermische Energie umwandeln. Die thermische Energie wird dabei als Verlust an die Umgebung abgegeben. Die chemische Energie wird in Form von reaktiven Verbindungen über einen begrenzten Zeitraum in der Batterie gespeichert. Im alltäglichen Sprachgebrauch wird häufig zwischen Batterie und Akkumulator dadurch

unterschieden, dass Akkumulatoren wieder aufgeladen werden können, Batterien hingegen nicht. In dem vorliegenden Bericht wird lediglich der Begriff „Batterie“ verwendet.

Das Entladen der Batterie erfolgt durch Umwandeln der chemischen Verbindung in elektrische Energie, welche an den Polen der Batterie in Form einer Gleichspannung abgegriffen werden kann.

Batterien haben eine begrenzte Lebenserwartung aufgrund einer begrenzten Anzahl an möglichen Ladezyklen. Unter einem Ladezyklus versteht man das vollständige Auf- und wieder Entladen der Batterie – Teilladungen (und – entladungen) werden bis auf 100 % aufsummiert. Unter der maximalen Zyklenanzahl wird die Anzahl an vollständigen Ladezyklen verstanden, bis die Nennkapazität der Batterie auf 80 % der Ausgangsnennkapazität gefallen ist. Einfluss auf die Zellalterung haben neben der Zellart vor allem auch Temperatur, Spannungslage, die Zyklenanzahl, die Zyklientiefe (entnommene bzw. zugeführte Amperestunden pro Zyklus) sowie die Stromstärke. Die Vielzahl an Parametern macht eine zuverlässige Vorhersage der Lebensdauer einer Batterie sehr schwierig. Zudem unterscheiden sich die theoretischen Werte von Batterien häufig stark von den Werten im praktischen Einsatz. [15]

Nach aktuellem Stand der Technik gibt es verschiedene Batteriearten bzw. –technologien. Zu den wirtschaftlich und technisch bedeutendsten Arten zählen Bleibatterien und Lithium-Ionen-Batterien, weswegen diese beiden Batteriearten detaillierter beschrieben werden. Abbildung 4-2 zeigt einen Vergleich verschiedener Batteriearten im Überblick.

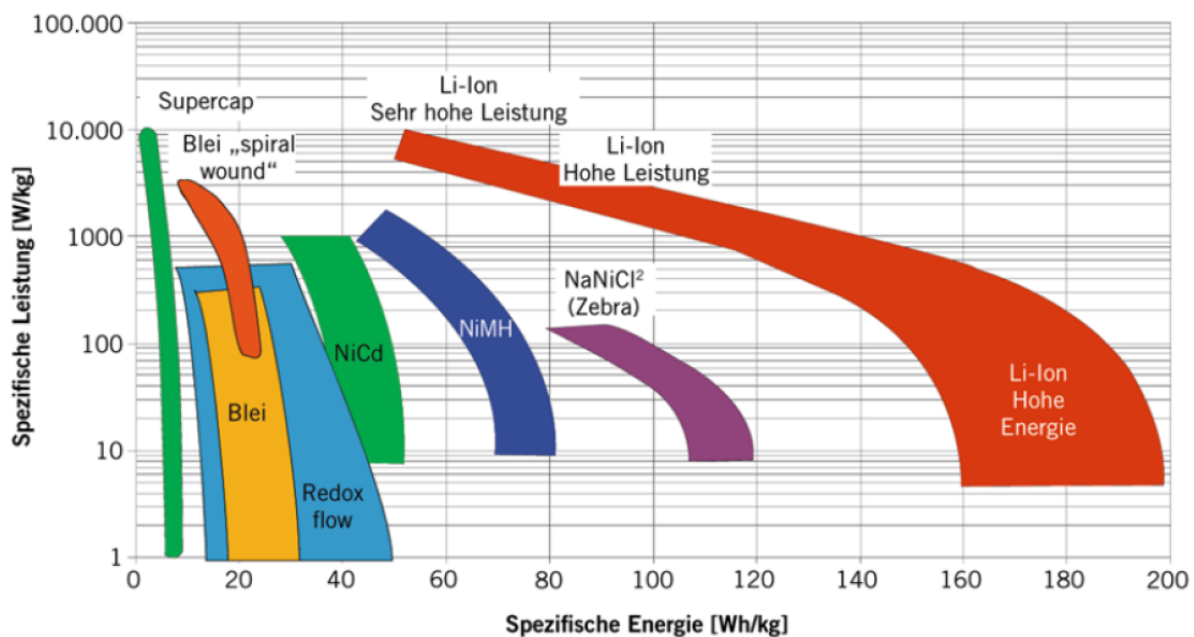


Abbildung 4-2: Ragone-Plot verschiedener Batterietypen, [16]

4.4.1 Blei-Säure-Batterien

Blei-Säure-Batterien haben eine lange Historie und werden vielfältig eingesetzt. Aufgrund ihres hohen Reifegrads und geringer Kosten finden sie Verwendung z.B. als Starterbatterie in nahezu allen Fahrzeugen oder als Traktionsbatterie in Gabelstaplern. [3]

Nach aktuellem Stand der Technik haben Blei-Säure-Batterien mit einer praktischen Energiedichte von ca. 40 Wh/kg eine geringe Energie- und Leistungsdichte gegenüber anderen Batteriesystemen oder fossilen Energiespeichern. Weiterhin ist die Ladeakzeptanz der Batterien in bestimmten Ladungsbereichen stark von der Temperatur oder von der vorherigen Benutzung abhängig. Als maximale Ladezyklenanzahl werden ca. 200 – 1100 Ladezyklen angegeben. [3]

Aufgrund der sehr hohen Stückzahl, in der die Batterien produziert werden, sind Blei-Säure-Batterien im Vergleich zu anderen Batterieformen kostengünstig und haben darüber hinaus auch noch den Vorteil, dass sie fast vollständig recycelt werden können. [3]

4.4.2 Lithium-Ionen-Batterien

Mit einer gravimetrischen Energiedichte von bis zu 250 Wh/kg und einer volumetrischen Energiedichte zwischen 160 Wh/l und 670 Wh/l bieten Lithium-Ionen-Batterien nach aktuellem Stand der Technik das höchste Potential für den Einsatz in elektrifizierten Fahrzeugen. Sie bieten darüber hinaus eine Leistungsdichte von maximal 5000 Wh/kg und eine maximale Zyklenanzahl von über 5000 Vollladezyklen. Der Wirkungsgrad von Lithium-Ionen-Batterien beim Laden und Entladen liegt bei über 95 %. [3]

Die Eigenschaften einer Lithium-Ionen-Batterie werden entscheidend von der Materialzusammensetzung der Elektroden beeinflusst. Beim Laden der Batterien wandern Li-Ionen von der Anode durch den Elektrolyten und den Separator zur Kathode. Graphit besitzt auf molekularer Ebene eine Schichtstruktur, in der sich die Li-Ionen einlagern können. Der Elektrolyt besteht aus einem brennbaren organischen Lösungsmittel. Auf der Kathode bildet sich beim ersten Ladevorgang ein nicht brennbarer Schutzschild. Dieses ist unter normalen Bedingungen eine Sicherheitsbarriere. Bei hohen Temperaturen (über 120°C) kann sich die Barriere jedoch auflösen und es kann zur Selbstentzündung kommen. Wenn ein anderes Elektrodenmaterial wie Nano-Titan oder Eisenphosphat eingesetzt wird, kann dieser Effekt verhindert werden. [17]

Batterien mit Elektroden aus Lithium-Ferrit-Phosphat haben hier gegenüber anderen Materialpaarungen deutliche Vorteile hinsichtlich Sicherheit und Schnellladbarkeit, siehe Abbildung 4-3. Diese Elektrodenmaterialien sind für Fahrzeuge geeignet und bis 200 °C sicher. [18]

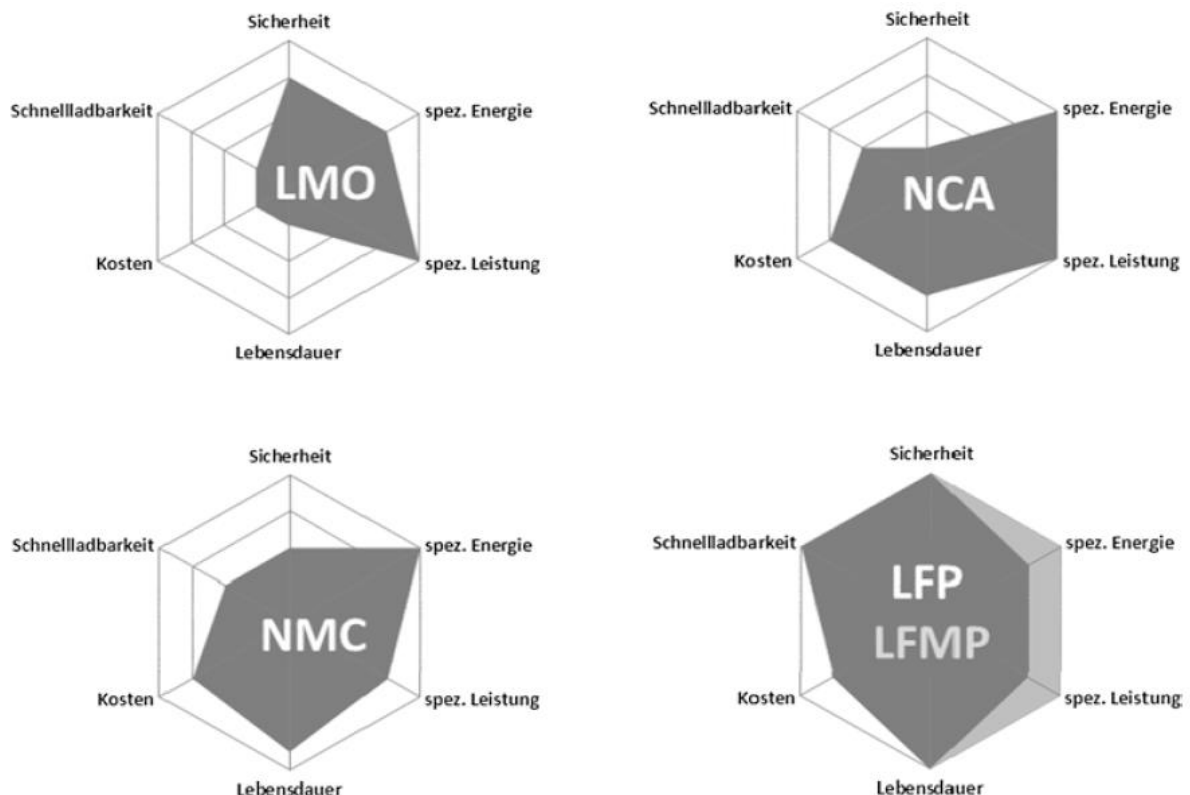


Abbildung 4-3: Übersicht der Eigenschaften verschiedener Elektrodenmaterialien von Li-Ionen-Batterien, [18];

Legende: LMO: Lithium-Manganoxid, NCA: Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid, NMC: Nickel-Mangan-Kobalddioxid, LFP: Lithium-Ferrit-Phosphat

Lithium-Ionen-Batterien müssen mit einer elektronischen Schutzschaltung versehen werden, da der Betrieb in bestimmten Spannungsbereichen zum Zersetzen der Batterien bis hin zum Brand führen kann, bei dem eine Lithium-Ionen-Batterie das 10fache der elektrischen Energiemenge in Wärme freisetzen kann. Durch ein gutes Qualitätsmanagement bei der Produktion können die Sicherheitsrisiken der Batterien deutlich reduziert werden. [19]

Durch den Zusammenschluss von mehreren einzelnen Batteriezellen zu Batteriepacks können höhere Energieinhalte und Batteriespannungen erreicht werden, die gespeicherte Energie geht dadurch aber teilweise im Kühl- oder Batteriemanagementsystem verloren. [3]

Andere Batterieformen

Neben den bereits erwähnten gibt es noch weitere Batteriebauformen, z.B.:

- Nickel-Cadmium- bzw. Nickel-Metallhydrid-Batterien
- Natrium-Schwefel, Natrium-Nickelchlorid-Batterien
- Redox-Flow-Batterien
- Doppelschichtkondensatoren

Im Folgenden wird auf jede der oben genannten Batterieformen kurz eingegangen. Für Anwendungen im Bereich mobiler Arbeitsmaschinen haben sie jedoch bisher keine Bedeutung und werden daher nur sehr kurz beschrieben.

Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd)

Die gravimetrische Energiedichte von NiCd-Batterien beträgt bis zu 60 Wh/kg. Sie verfügen über eine sehr hohe Strombelastbarkeit und haben ein hervorragendes Tieftemperaturverhalten bis zu -40°C . Aufgrund der EU-weiten Einschränkung zur Verwendung von Cadmium dürfen NiCd -Batterien nur noch in wenigen Anwendungen (z.B. medizinische od. sicherheitsrelevante Bereiche) eingesetzt werden. [18; 13]

Nickel-Metallhydrid-Batterien

Die NiMH-Batterie wurde 1990 als Weiterentwicklung der NiCd -Batterie eingeführt und verfügt anstelle des Cadmium über eine Wasserstoffspeicherlegierung aus Nickel und Seltenen Erden. Aktuelle NiMH-Batterien erreichen gravimetrische Energiedichten von bis zu 80 Wh/kg. Genau wie die NiCd -Batterien, haben NiMH-Batterien „einen internen chemischen Überlade- und Tiefentladeschutz und sind damit geeignet für die Zusammenstellung von Akkupacks ohne aufwändige Elektronik“ [18]. Sie werden daher häufig in Hybridfahrzeugen eingesetzt. [18; 13]

Sowohl NiMH- als auch NiCd -Batterien unterliegen einer Alterung durch den sog. Memory-Effekt, dem Verlust an Kapazität bei alkalischen Batterien aufgrund von mehrfacher Teilentladung.

Natrium-Schwefel

NaS-Batterien haben gravimetrische Energiedichten von bis zu 200 Wh/kg und sind kostengünstig in der Herstellung. Die Betriebstemperaturen der Batterien betragen ca. $250 - 300^{\circ}\text{C}$. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen haben die Batterien thermische Verluste, die einer Selbstentladung entsprechen. NaS-Batterien finden Anwendung als stationäre Energiespeicher im MW-Bereich. [13; 18]

Natrium-Nickelchlorid-Batterien

Diese Batterieart hat ebenfalls hohe Betriebstemperaturen, hat dabei allerdings eine geringere gravimetrische Energiedichte von bis zu 120 Wh/kg. Sie gilt als sichere Alternative zur NaS-Batterie aufgrund ihrer begrenzten Toleranz gegenüber Überladung und Tiefentladung. Verwendet werden diese Batterien bei Kleinserien von Elektrofahrzeugen und in Spezialanwendungen. [13; 18]

Redox-Flow-Batterien

„Redox-Flow-Batterien sind mit den Brennstoffzellen insofern verwandt, als dass beide elektroaktiven Komponenten (für die Anoden- und die Kathodenreaktion) aus zwei Vorrattanks von außen einem elektrochemischen Reaktor (Cellstack) zur Reaktion zugeführt werden.“ [18]. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass Energieinhalt und Leistung der Batterie unabhängig voneinander skaliert werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Aktivmateriallösungen nach Gebrauch wieder im Reaktor elektrochemisch regeneriert werden können. Aufgrund der sehr geringen gravimetrischen Energiedichte von ca. 10 – 30 Wh/kg sind allerdings gegenwärtig nur stationäre Anwendungen zu finden. [18; 13]

Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren haben eine nur sehr geringe gravimetrische Energiedichte von bis zu 20 Wh/kg. Allerdings verfügen sie über eine sehr hohe Lebensdauer von bis zu 1 Million Ladezyklen und können sehr schnell geladen und wieder entladen werden. Doppelschichtkondensatoren, oder Supercaps, werden für Rekuperations- und Beschleunigungsvorgänge in Fahrzeugen eingesetzt. [13; 18]

Die Forschung befasst sich weiterhin mit folgenden Batterieformen:

- Lithium-Schwefel-Batterie
- Lithium-Luft-Batterie
- Lithium-Feststoff-Batterie
- Aluminium-Luft-Batterie
- Magnesium-Schwefel-Batterie

Lithium-Schwefel-Batterie

Lithium-Schwefel-Batterien werden schon seit den 60er Jahren untersucht, da sie sehr vielversprechende Eigenschaften haben. Schwefel ist toxikologisch unbedenklich und nahezu unbegrenzt verfügbar. Es werden gravimetrische Energiedichten von bis zu 600 Wh/kg erwartet. Allerdings ist ihre Lebensdauer nach aktuellem Stand noch sehr begrenzt (ca. 1500 Lebenszyklen). Dies ist vor allem auf den sog. Shuttle-Mechanismus zurück zu führen (siehe z.B. [18]). Hinzu kommt, dass die Kathoden der Zellen eine Volumenänderung der Lade-/Entladeprodukte von bis zu 80 % kompensieren können müssen, was einen negativen Einfluss auf die praktisch erreichbaren Energiedichten hat. LiS-Batterien sind weiterhin Teil der aktuellen Forschung, eine Marktreife wird bis 2020-2024 erwartet. [18]

Lithium-Luft-Batterie

Lithium-Luft-Batterien fanden erstmals 1996 in der Literatur Erwähnung und wurden seitdem weiter erforscht. Es wird eine hohe gravimetrische Energiedichte von bis zu 1700 Wh/kg erwartet. Die Batterien selbst sind – im Gegensatz zu anderen Batterieformen, aber ähnlich einer Brennstoffzelle – ein offenes System, da an der

Kathode atmosphärischer Sauerstoff umgesetzt wird. Während des Entladens wird Sauerstoff von außen zugeführt, was dazu führt, dass die Masse der Batterie mit dem Entladezustand steigt. Aktuelle Schwerpunkte der Forschung liegen auf der „Suche nach geeigneten, chemisch stabilen Elektrolyten und Elektrodenmaterialien“ [18]. Weiterhin gibt es noch keine einfache Lösung für eine Membran, die unerwünschte Bestandteile der atmosphärischen Luft (z.B.: Stickstoff, Wasserstoff, Kohlendioxid,...) vor dem Eintritt hindern und dadurch Nebenreaktionen vermeiden kann. In der Literatur wird der aktuelle Stand der Forschung bei Li/O²-Zellen daher auf der Ebene der Grundlagenforschung angesehen. Eine Marktreife wird nicht vor 2030 erwartet. [18]

Die weiteren aufgeführten Batterieformen Lithium-Feststoff-Batterie, Aluminium-Luft-Batterie und Magnesium-Schwefel-Batterie sind der Vollständigkeit halber erwähnt und werden nicht näher erörtert, da der Beginn ihrer Marktreife und kommerziellen Nutzung noch nicht abgesehen werden kann.

5 Ergebnisse AP3: Erarbeitung möglicher Fahrzeugkonzepte

5.1 Konzepte für den emissionsreduzierten Untertagebau

Im Folgenden werden allgemeine Konzepte vorgestellt, die zur Emissionsreduzierung im Untertagebau beitragen können. Eine grubenspezifische Prüfung der Umsetzbarkeit erfolgt im weiteren Verlauf des Kapitels.

Generell kann Emissionsreduzierung durch Ansätze der **Prozessoptimierung**, der **Technologieoptimierung** und des **Technologiewechsels** erreicht werden (siehe Abbildung 5-1):

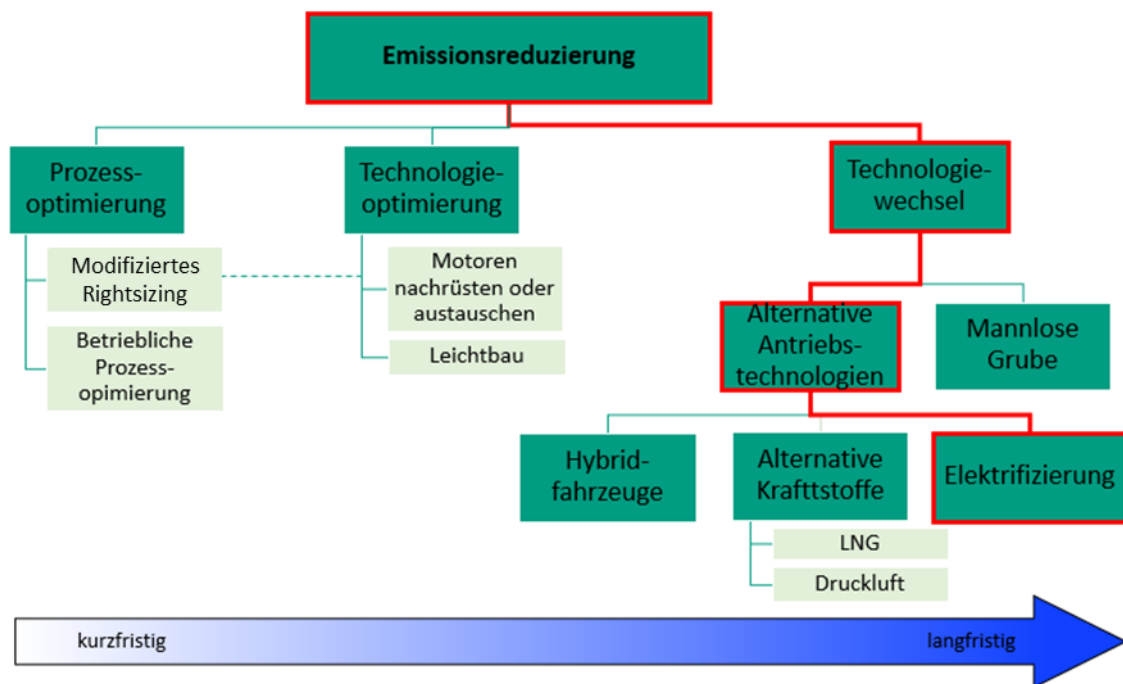


Abbildung 5-1: Ansätze zur Emissionsreduzierung unter Tage, [3]

Maßnahmen der **Prozessoptimierung** greifen beim Einsatz und dem Gebrauch der Fahrzeuge bzw. Fahrzeugverbunde. Beispielhafte Maßnahmen hierfür sind **modifiziertes Rightsizing** und die **betriebliche Prozessoptimierung**.

Bei Maßnahmen durch Technologieoptimierung werden die einzelnen Fahrzeuge bzw. Fahrzeugverbunde selbst und deren Optimierungspotential mit Fokus auf Emissionsreduzierung betrachtet. Hierzu zählen Maßnahmen wie z.B. das **Nachrüsten oder Ersetzen von Motoren** oder **konstruktiver Leichtbau**.

Maßnahmen des **Technologiewechsels** schlagen die Verwendung von alternativen Primär- bzw. Sekundärenergiespeichern bzw. alternativen Antriebskonzepten vor. Hierzu zählen **Flüssigerdgas (LNG)**, **Druckluftmotoren**, **Elektrifizierung allgemein** oder die **Hybridisierung** von Fahrzeugen.

5.1.1 Modifiziertes Rightsizing

Im Rahmen dieser Studie durchgeführte Messungen haben belegt, dass die im Fahrzeug installierte Motorleistung nur zu einem sehr geringen Anteil im täglichen Fahrzeugbetrieb abgerufen wird. Indem die installierte Motorleistung reduziert wird (z.B. durch Verwendung von Maschinen mit geringerer Leistung) können die Emissionen in Untertagebetrieben voraussichtlich reduziert werden. Hinzu kommt die Tatsache, dass die vom

Gesetzgeber vorgeschriebene Formel zur Ermittlung der notwendigen Bewetterungsmenge die im Fahrzeug installierte Motorleistung als Bewertungsgrundlage verwendet. Daher hat eine Reduzierung der installierten Motorleistung auch positive Auswirkungen auf die gesamte Emissionssituation der Grube. [6]

Abbildung 5-2 zeigt die Bewertung der Maßnahme „Modifiziertes Rightsizing“. [6]

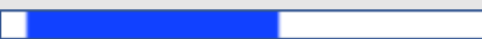
Modifiziertes Rightsizing			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Emissionsreduzierung für einzelne Tätigkeiten möglich		Genaue Kenntnis der Tätigkeiten und Motordaten notwendig	
Geringere Ausfallanfälligkeit bei Aufteilung auf mehrere Fahrzeuge			

Abbildung 5-2: Bewertung der Maßnahme „Modifiziertes Rightsizing“, [6]

Die Maßnahme „modifiziertes Rightsizing“ hat lediglich mitigierende Auswirkungen, da trotz Rightsizing nach wie vor DME (Dieselmotoremissionen) auftreten. Weiterhin muss vor Umsetzung der Maßnahme für jeden Motor individuell untersucht werden, wie sich der Schadstoffausstoß durch die Leistungsverschiebung ändert, die das Lastprofil eines größeren Motors für einen kleineren Motor bedeutet. Daher muss jede von der Maschine ausgeführte Tätigkeit individuell untersucht werden. Weiterhin muss überprüft werden, ob die geforderte Umschlagsleistung von einer durch Rightsizing optimierten Maschine erreicht werden kann. [6]

Trotzdem bringt das modifizierte Rightsizing Vorteile mit sich, unter anderem auch die Tatsache, dass bei mehreren kleinen Maschinen die Ausfallwahrscheinlichkeit der Produktion deutlich geringer ist als bei wenigen großen. Zudem sind z.B. elektrifizierte Fahrzeuge nur im mittleren Leistungsbereich am Markt verfügbar. [6]

5.1.2 Betriebliche Prozessoptimierung

Die betriebliche Prozessoptimierung hat ein hohes Potential zur Reduzierung lokaler Emissionen. Hierzu zählen die **Optimierung des Abbauprozesses**, eine **Optimierung der Fahrzeugeinteilung**, eine **Optimierung der Fahrzeugverwendung** und eine **Optimierung der Bewetterung**. [3; 6]

Abbildung 5-3 zeigt die Bewertung der Maßnahme „**Optimierung des Abbauprozesses**“. Die Ergebnisse der in den Gruben durchgeführten Untersuchungen legen nahe, dass die Tätigkeit „Gewinnung im Bohr- & Sprengvortrieb“ mitunter der größte Verursacher von Emissionen unter Tage ist, gleichzeitig aber auch am schwersten durch emissionsreduzierende Maßnahmen zu optimieren ist. Abhilfe kann hierbei dadurch geschaffen werden, dass von der konventionellen zur schneidenden Gewinnung gewechselt wird. Entsprechende Maschinen (Voll- und Teilschnittmaschinen) sind in ausreichender Anzahl am Markt vorhanden und machen den Einsatz von mehreren Fahrzeugen (Bohrwägen, LHDs) unnötig. Maschinen der schneidenden Gewinnung, wie z.B.

Continuous Miner, arbeiten durch ihren elektrohydraulischen Antrieb und bei ausreichender Staubreduzierung lokal vollständig emissionsfrei. [6]

Umstieg auf schneidende Gewinnung			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Fuhrparkverkleinerung möglich		Störanfällig	
Emissionsfreiheit im Abbaubereich möglich		Flexibilität problematisch	
Erschütterungsfreier Abbau unter Wohngebieten		Nur bei ausreichender Ausdehnung und Mächtigkeit effektiv	

Abbildung 5-3: Bewertung der Maßnahme „Betriebliche Prozessoptimierung“, [6]

Auch der Transport des gewonnenen Materials kann nach aktuellem Stand der Technik lokal emissionsfrei erfolgen, z.B. durch flexibel angeordneten Förderbänder oder elektrifizierte Dumper. Da Förderbänder eine hohe Umschlagsleistung erforderlich machen, um rentabel eingesetzt werden zu können, und es zudem nur wenige elektrifizierte Dumper am Markt gibt, stellt der emissionsfreie diskontinuierliche oder kontinuierliche Materialtransport geringer Mengen unter Tage noch eine Schwierigkeit dar. [6]

Größtes Problem bei der Umstellung auf maschinelle Gewinnung sind die hohen Investitionskosten sowie die aktuell noch hohe Störanfälligkeit der Maschinen. Zudem müssen auch die örtlichen Gegebenheiten auf ihre Eignung zur maschinellen Gewinnung hin untersucht werden. [6]

Durch die **Optimierung der Fahrzeugeinteilung** können die Emissionen unter Tage zwar nicht reduziert werden, dafür aber deren lokale Konzentration. Abbildung 5-4 zeigt die Bewertung der Maßnahme. Ähnlich der Klassifizierung für PKWs, könnten alle in der Grube eingesetzten Fahrzeuge nach ihren DME klassifiziert werden. Weiterhin können schlecht bewetete oder hoch frequentierte Bereiche in einer Grube ermittelt und ausgewiesen werden. Mit den Fahrzeugklassen und den Emissionszonen unter Tage können dann entsprechende Strategien zur Befahrung der einzelnen Bereiche erarbeitet werden, um die DME-Konzentration möglichst gering zu halten. Abbildung 5-4 zeigt die Bewertung dieser Maßnahme. [6]

Neben der Fahrzeugeinteilung kann auch eine **Optimierung der Fahrzeugverwendung** durchgeführt werden. Damit verbundene Maßnahmen haben zwar nur mitigierenden Charakter, sind dafür aber meist relativ einfach umzusetzen, da es sich in erster Linie um Betriebsanweisungen für einzelne Maschinen handelt. Folgende Handlungen gilt es zu vermeiden, um einen lokal möglichst emissionsfreien Fahrzeugbetrieb zu gewährleisten:

- Das Laufenlassen des Dieselmotors im Stand ist unbedingt zu vermeiden. Es ist denkbar, dass für diese Anweisung eine fahrzeugspezifische Stillstandsmindestdauer ermittelt werden muss, trotzdem sollte während Stillstandszeiten der Motor grundsätzlich ausgeschaltet bleiben.

- Leerfahrten (mit mobilen Arbeitsmaschinen) sollten vermieden werden. Dies kann z.B. durch entsprechende Einsatzplanung oder durch zusätzliche niedermotorische Befahrungsfahrzeuge ermöglicht werden.

Diese und weitere Handlungsempfehlungen können der Richtlinie TRGS 554 [20] entnommen werden. [6]

Fahrzeugeinteilung		
Umsetzung	kurzfristig 	langfristig
Kosten	günstig 	teuer
Lebensdauer	kurz 	lang
Einschätzung	mitigierend 	lösend
Vorteile		Nachteile
Schnell umsetzbar		Emissionsreduzierung lediglich lokal
Vermeidung unnötiger Fahrten		Möglicherweise mehr Fahrzeuge benötigt

Abbildung 5-4: Bewertung der Maßnahme „Optimierung der Fahrzeugeinteilung“, [6]

Eine weitere Möglichkeit, um Emissionen unter Tage zu reduzieren, ist die **Optimierung der Grubenbewetterung**. Je nach installierter Lüfterleistung kann diese Maßnahme relativ einfach umgesetzt werden. Auch können bauliche Maßnahmen, z.B. Wetterstrecken, Wetterschutztüren, Lutten,..., im Untertagebau zielführend umgesetzt werden. Aufgrund der Komplexität und des hohen Aufwands wurde diese Maßnahme im Projekt nicht weiter verfolgt, da die Möglichkeiten der Bewetterungsoptimierung den Grubenbetreibern hinlänglich bekannt sind. Zudem ist diese Maßnahme lediglich als mitigierend zu sehen und kann daher nur eine kurzfristige Übergangslösung darstellen. [6]

5.1.3 Nachrüsten oder Ersetzen von (Alt-)Motoren

Ein Teil der Fahrzeuge in den Gruben arbeitet mit Motoren veralteter Abgasgesetzgebungsstufen. Bei diesen Maschinen ist eine signifikante Reduzierung der Emissionen allein durch Nachrüsten von weiteren Filtersystemen oder Austausch des alten mit einem Motor neuester Generation möglich. Abbildung 5-5 zeigt die Bewertung der Maßnahme. [6]

Die Umsetzung ist kurz- bis mittelfristig möglich. Mit Rußpartikelfiltern können der Abgasgesetzgebungsstufe Stage IV vergleichbare Rußpartikelemissionen erreicht werden. Das Einhalten der neuen Werte für Stickoxide hingegen ist mit deutlich mehr Aufwand verbunden, da hierfür ein SCR-System (Selective-Catalytic-Reduction) zur Abgasnachbehandlung installiert werden muss. Ein SCR-System benötigt hohe Abgastemperaturen um zuverlässig arbeiten zu können, die nicht jeder Verbrennungsmotor ohne weiteres bereitstellen kann. Eingriffe in die Motorsteuerung werden hierfür notwendig, die üblicherweise nur vom Motorhersteller vorgenommen werden können. Alternativ kann der Motor durch einen neuen Motor nach der aktuellen Abgasgesetzgebung ersetzt werden. [6]

Die Lebensdauer dieser Maßnahme ist nur schwer einzuschätzen, wird aber eher als kurz bis mittel angesehen, da der vorangegangene Trend darauf hindeutet, dass sich die Abgasgesetzgebung noch weiter verschärfen wird. Das eigentliche Problem der Emissionsreduzierung wird dadurch zwar vorübergehend gelöst, vermieden werden können Emissionen auf diesem Wege nach aktuellem Stand der Technik allerdings nicht. [6]

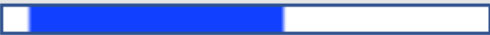
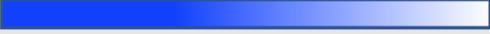
Nachrüsten oder Ersetzen von Motoren			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Erreichen der Stage IV PM-Werte durch Nachrüsten		NO _x -Werte nur mit Stufe IV Tauschmotoren erreichbar	

Abbildung 5-5: Bewertung der Maßnahme „Nachrüsten oder Ersetzen von Motoren“, [6]

5.1.4 Konstruktiver Leichtbau

Durch Einsparung beim Fahrzeuggewicht kann der Kraftstoffverbrauch einer Maschine, insbesondere bei Leerfahrten reduziert werden. Abbildung 5-6 zeigt die Bewertung der Maßnahme „Leichtbau“. [3]

Leichtbau			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Know-How in der Automobilbranche vorhanden		Kippen des Fahrzeugs bei falscher Beladung	
Einsparpotential bei laufenden Kosten		Hohe der Investitionskosten	
		Kosten für Forschung & Entwicklung	

Abbildung 5-6: Bewertung der Maßnahme "Leichtbau", [3]

Da bei mobilen Arbeitsmaschinen - im Gegensatz zu PKWs - das Verhältnis von Nutzlast zu Eigengewicht relativ hoch ist, ist das Potential der Einsparung im Vergleich geringer. Auch die Stückzahlen der Arbeitsmaschinen sind signifikant geringer als beim PKW. Hinzu kommt, dass mobile Arbeitsmaschinen deutlich höheren, meist mehrachsigen Belastungen ausgesetzt sind, die von dem Maschinengestell aufgenommen werden müssen. Aufgrund der geringeren Stückzahlen und der mit Leichtbau verbundenen hohen Investitionskosten in Forschung und Entwicklung ist diese Maßnahme auf absehbare Zeit nicht geeignet, um zur Problemlösung beizutragen. Insofern sie dennoch umgesetzt wird, hat sie lediglich eine mitigierende, aber keine lösende Wirkung auf das Problem. [3]

5.1.5 Alternativer Primärenergieträger LNG

Eine weitere Möglichkeit der Emissionsreduzierung stellt der Einsatz alternativer Kraftstoffe, z.B. LNG (Liquefied Natural Gas) dar. Die Vorteile von LNG gegenüber Diesel wurden in Kapitel 4.2 bereits näher erörtert. Abbildung 5-7 zeigt die Bewertung der Maßnahme. [3]

Zur Verbrennung des LNG bieten sich Otto- wie Dieselmotoren an. Am Markt verfügbar sind auch Kombinationen von Motoren die zwischen den Kraftstoffen umschalten können aber auch Varianten die einen Mischbetrieb fahren. Hierbei wird ca. 25 % der Energie aus Diesel erzeugt, während der Großteil von ca. 75 % aus LNG erzeugt wird. Problematisch bei der LNG-Verbrennung ist der Methanschlupf, d.h. unverbranntes Methan, welches als Abgas aus der Maschine entweicht. Zurzeit ist kein Arbeitsplatzgrenzwert für Methan in Kraft. Es ist jedoch möglich, dass ein solcher zukünftig eingeführt wird und zusätzliche Katalysatoren zur Neutralisation entweichender Methangase benötigt werden. Speziell auf Methan ausgelegte Motoren würden erhöhte Umbaumaßnahmen oder Austausch der Aggregate erfordern und hohe Kosten nach sich ziehen. Am Markt sind bisher nur vereinzelt mobile Arbeitsmaschinen mit LNG-Antrieb verfügbar (außer Gabelstapler). [3]

VKM mit LNG			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Findet bereits in Schiffsmotoren und anderen Fahrzeugen Verwendung		Eventuell höhere Abgasbelastung durch Methanschlupf	
Problemlösung zunächst für CO, CO ₂ , NO _x		Bedarf einer neuen Infrastruktur	
Verwendung herkömmlicher Otto- und Dieselmotoren		Energetisch schlechter Wirkungsgrad	
Durch geeignete Infrastruktur wenig Stillstandszeiten der Fahrzeuge		Endliche Ressource	

Abbildung 5-7: Bewertung der Maßnahme „VKM mit LNG“, [3]

5.1.6 Alternativer Sekundärenergieträger Druckluft

Als weiterer alternativer Sekundärenergieträger kann Druckluft mit entsprechenden Druckluftmotoren gesehen werden. Die Vorteile der vollständigen lokalen Emissionsfreiheit, eines weitestgehend unschädlichen Betriebsmediums und eines simplen pneumatischen Systems sind nicht von der Hand zu weisen. Ihnen gegenüber stehen jedoch der Aufbau einer neuen komplexen Infrastruktur und ein sehr schlechter Wirkungsgrad. Außerdem sind aktuell keine entsprechenden Fahrzeuge am Markt vorhanden. Durch die hohe Kompressibilität und die geringe Viskosität sind Verluste durch Undichtigkeiten sowie thermische Verluste bei der Expansion und Kompression zu erwarten. Untertage muss ein Versorgungsnetz mit Druckluft, z.B. in Form von großen Drucklufttanks und lokalen Kompressoren verfügbar sein. [3]

Da Druckluft in Antrieben mobiler Arbeitsmaschinen noch nicht auf dem Markt ist, wird die Umsetzung als langfristig eingeschätzt. Zudem müssen komplett neue Fahrzeuge angeschafft werden, was mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Ist der Schritt der Entwicklung und Einführung erst einmal geschafft, ist das Problem der Emissionen unter Tage allerdings vollständig und langfristig gelöst. Abbildung 5-8 zeigt die entsprechende Bewertung in der Übersicht. [3]

Druckluftmotoren			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Lokal emissionsfrei		Aufwendige Aufbereitung	
Einfaches System		Bedarf einer neuen Infrastruktur	
		Sehr schlechter Wirkungsgrad	

Abbildung 5-8: Bewertung der Maßnahme „Druckluftmotoren“, [3]

5.1.7 Elektrifizierung von Fahrzeugen und Fahrzeugverbunden

Da die Elektrifizierung von Fahrzeugen aus heutiger Sicht in Hinblick auf Emissionsreduzierung am vielversprechendsten ist, wird diese Maßnahme in Kapitel 5.3 gesondert und detaillierter behandelt.

5.1.8 Einsatz von Hybridfahrzeugen

Durch die Kombination von verschiedenen Energiewandlern und Speichersystemen lässt sich der Wirkungsgrad des Gesamtsystems steigern und in Folge dessen können die Emissionen reduziert werden. Es sind viele verschiedene Konzepte denkbar. Da die Modifikationen auf Fahrzeugebene sind, ist eine Veränderung der Infrastruktur nicht notwendig und daher eine kurz- bis mittelfristige Realisierung möglich. Nachteilig ist jedoch, dass die Komplexität einzelner Maschinen durch die Hybridisierung steigt. Es sind daher aufwendige Entwicklungen und Tests notwendig, um einzelne Fahrzeuge auszurüsten. Weiterhin sind hybride Maschinen noch

nicht ausreichend am Markt verfügbar, der Trend zeigt hier allerdings eine deutliche Entwicklung hin zu einem breiteren Angebot bei allen mobilen Arbeitsmaschinen. [3]

Da die Technologien für hybride Fahrzeuge größtenteils bereits vorhanden sind, wird die Umsetzung als kurzfristig angesehen. Außerdem können Maschinen teilweise nachgerüstet werden, was die Kosten dieser Maßnahme, im Gegensatz zu einer Neuentwicklung, deutlich reduziert. Die Wirkung der Maßnahme auf das Problem hängt ab von der Art Hybridfahrzeug, die zum Einsatz kommt. Gegenwärtig haben die meisten Hybriden immer noch Dieselmotoren als Energiequelle, d.h. mit Fahrzeugen dieser Topologie kann das Problem nicht gelöst, sondern lediglich mitigiert werden. Dadurch wird auch die Lebensdauer der Maßnahme reduziert. Insofern dieselfreie Hybridlösungen verwendet werden, kann die Lebensdauer hochgesetzt und das Problem gelöst werden, allerdings ist in diesem Fall auch zu erwarten, dass die Kosten deutlich zunehmen werden. Das Thema der hybriden mobilen Arbeitsmaschinen wird gesondert in Kapitel 5.2 behandelt, da sich diese Maschinen vor allem in der Übergangsphase als zielführend und sinnvoll erweisen können. Abbildung 5-9 stellt die Bewertung dar. [3]

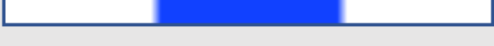
Hybridfahrzeuge			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Flexibilität		Zwei Energiequellen/Infrastrukturen	
Hoher Wirkungsgrad möglich		Komplexität des Systems steigt	
Vereint die besten Eigenschaften verschiedener Systeme			

Abbildung 5-9: Bewertung der Maßnahme „Hybridfahrzeuge“, [3]

5.1.9 Weitere Konzepte: Geschlossene Fahrzeugkabine & Atemschutzgeräte

Vor allem die gegenwärtig anstehenden Übergangszeiten zwischen dem aktuellem Stand und dem zukünftig geplanten Stand einer emissionsfreien Produktion stellt die einzelnen Gruben vor große Herausforderungen. Um diese Herausforderungen in einen beherrschbaren zeitlichen Rahmen zu fassen, können als Übergangslösung **Atemschutzgeräte und geschlossene Kabinen** auf den Fahrzeugen eingesetzt werden. Zusätzlich muss eine entsprechende betriebliche Richtlinie erlassen werden, die den Umgang mit den Atemschutzgeräten vorschreibt und als verbindlich erklärt. [3]

An dieser Stelle sei allerdings darauf hingewiesen, dass dieses Konzept, das der Studie zugrunde liegende Problem nicht löst, sondern lediglich mitigiert.

Geschlossene Fahrzeugkabinen & Atemschutzgeräte		
Umsetzung	kurzfristig 	langfristig
Kosten	günstig 	teuer
Lebensdauer	kurz 	lang
Einschätzung	mitigierend 	lösend
Vorteile		Nachteile
Minimaler Aufwand für die Fzg.-Hersteller und Grubenbetreiber		Einschränkung der Arbeitsbedingungen
Umgeht das Emissionsproblem...		..., löst es aber nicht
-		Benötigte Messtechnik aktuell nicht kostengünstig verfügbar

Abbildung 5-10: Bewertung der Maßnahme „Geschlossene Fahrzeugkabinen & Atemschutzgeräte“, [3]

5.2 Hybride mobile Arbeitsmaschinen

Nach [10] wird ein Antriebsstrang einer mobilen Arbeitsmaschine als Hybrid bezeichnet, wenn er aus mindestens zwei verschiedenen Antrieben und deren zugehörigen Quellen besteht sowie die Rückgewinnung und Speicherung von Bewegungs- und / oder Lageenergie ermöglicht. Bei der Rückgewinnung wird ferner zwischen Rekuperation und Regeneration unterschieden. Unter Rekuperation versteht man „die Rückgewinnung kinetischer oder potentieller Energie und deren Speicherung in einer technisch einfach nutzbaren Form“ [10]. Als Regeneration hingegen wird eine Rückgewinnung ohne Zwischenspeicherung bezeichnet, d.h. die zurückgewonnene Energie wird direkt im System genutzt. Abbildung 5-11 stellt die Entwicklung hybrider mobiler Arbeitsmaschinen in einer zeitlichen Übersicht dar.

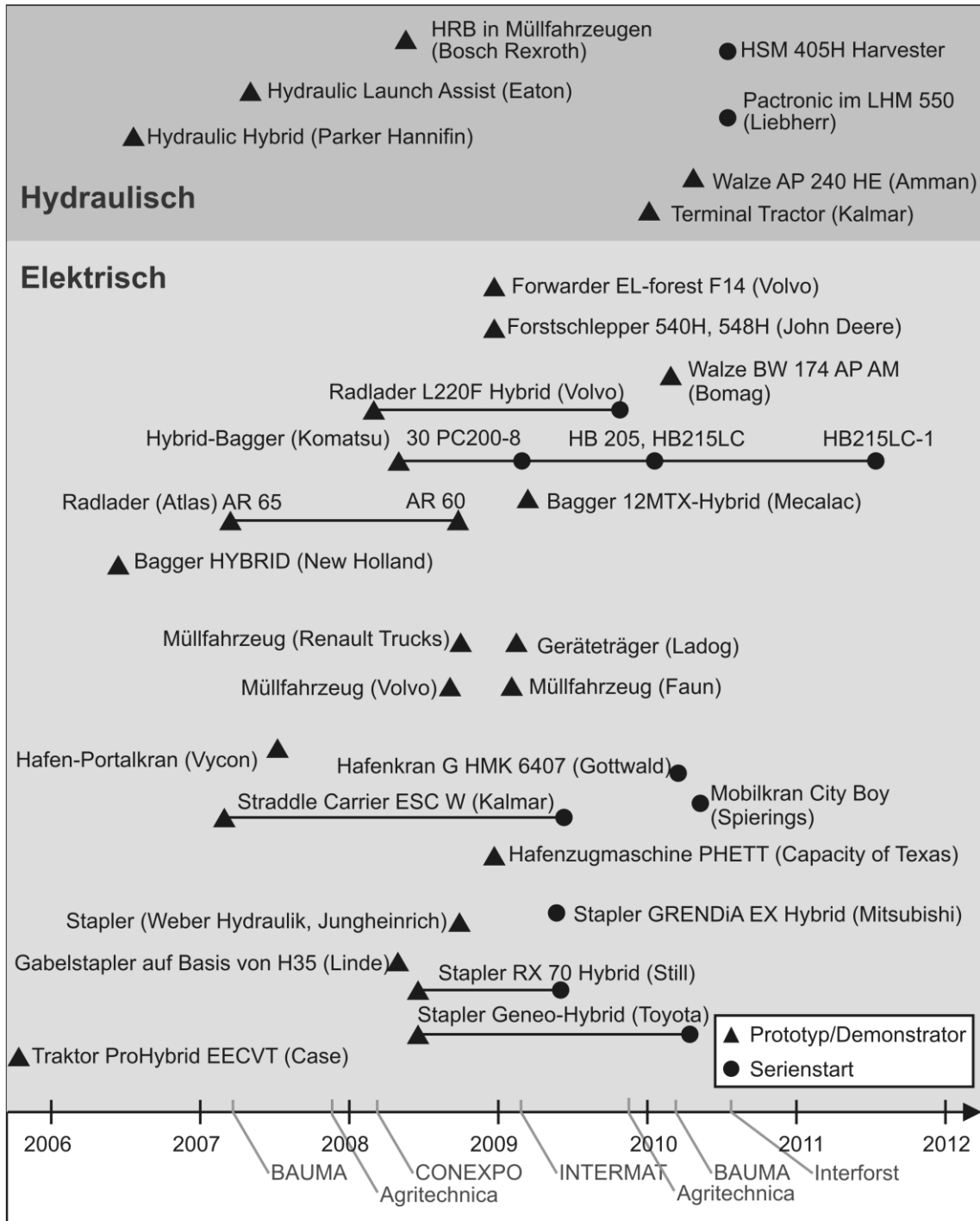


Abbildung 5-11: Entwicklung hybrider mobiler Arbeitsmahttps://www.dropbox.com/sh/646jtz1fdz9umor/AACox0U-zIsDpL2Ppg9V0_8lra?dl=0LH schinen bis 2006 - 2012, [10]

Hybride Fahrantriebe können verschiedene Funktionen erfüllen, wie z.B.:

- Rekuperation / Regeneration
- Verschleißfreies Bremsen
- Leerlaufabschaltung / Start-Stopp-Betrieb
- (lokal) emissionsfreier Betrieb
- Betriebspunktstrategie
- Phlegmatisierung
- Rightsizing

- Downsizing
- Entkopplung von Nebenverbrauchern
- Boost
- Genset-Betrieb (mobile Stromversorgung)

An dieser Stelle sei auf die einschlägige Fachliteratur zum Thema hybride Antriebsstränge verwiesen, siehe z.B. [10].

Kernkomponente eines jeden hybriden Antriebsstrangs sind Energiespeicher aller Arten, siehe hierzu Abbildung 4-1. Weiterhin haben die gewählten Betriebsstrategien einen großen Einfluss auf das Effizienzsteigerungspotential eines Hybriden. Folgende Betriebsstrategien werden bereits heute bei hybriden Fahrzeugen umgesetzt (u.A.):

- **Leistungslimits:** In definierten Leistungsbereichen werden unterschiedliche Antriebsstränge eines Hybriden eingesetzt. Bspw. wird unter einer definierten Grenze nur eine Batterie, im Mittelbereich nur ein Verbrennungsmotor und im oberen Leistungsbereich werden beide zusammen eingesetzt.
- **Zero Emission:** Durch einen Hybridantrieb kann zeitlich begrenzt lokale Emissionsfreiheit erreicht werden. Der mögliche Zeitraum der Emissionsfreiheit hängt ab von der Größe des Speichers.
- **Ein-Punkt-Betrieb:** Hierbei wird der Primärantrieb, z.B. ein Dieselmotor, ausschließlich in seinem Bestpunkt betrieben. „Drehzahländerungen am Abtrieb müssen dann über ein stufenloses Getriebe gewährleistet werden, Momenten- bzw. Leistungsabweichung über den sekundären Antrieb.“ [10]. Die Speichergröße wird durch die Zeitanteile bestimmt, in denen die Leistungsanforderung des Systems über der Leistungsabgabe des Verbrennungsmotors liegen. Wird über längere Zeit Leistung unter dem Bestpunkt des Verbrennungsmotors angefordert, schaltet dieser sich ab.

Weitere Betriebsstrategien werden bereits eingesetzt bzw. sind Gegenstand aktueller Forschung. Die hier Aufgezählten geben nur einen Überblick über die Möglichkeiten, die ein hybrider Antriebsstrang mit sich bringt. Nähere Informationen hierzu finden sich in [10].

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik hybrider mobiler Arbeitsmaschinen kurz aufgeführt. Nähere Informationen hierzu finden sich in [21].

5.2.1 Hybride Bagger

- Mehrere Hersteller verfolgen den Ansatz, Energie aus der **Schwenkbewegung des Oberwagens** zurückzugewinnen. Hierfür gibt es verschiedene Konzepte: Der **Caterpillar 336E H** [22] rekuperierte rein hydraulisch mit zusätzlichen Hydrospeichern im Oberwagen. Der **Hitachi ZH210 Hybrid** [23], der **Komatsu HB215** und der **Komatsu HB365** [24] rekuperieren die Energie aus dem Schwenkwerk durch einen Elektromotor und speichern die Energie in Supercaps zwischen. Die Rückspeisung der Energie erfolgt z.B. zur Entlastung des Verbrennungsmotors oder zum Schwenken des Oberwagens.
- Der **SK210H** [25] der Firma Kobelco rekuperierte die Schwenkenergie ebenfalls elektrisch, speichert die Energie allerdings in Lithium-Ionen-Batterien zwischen. Zusätzlich regenerieren Stiel- und Hubzylinder Energie beim Absenken des Arms.
- Die Firma Liebherr rekuperierte bei einigen Baggermodellen die potentielle Energie des Auslegers durch einen dritten, mit Gas gefüllten Zylinder, direkt unter dem Arm (siehe [26]). Die im Gas gespeicherte Energie kann anschließend wieder dazu verwendet werden, den Arm anzuheben. Der Hersteller stellt durch das System **ERC** Energieeinsparungen von bis zu 30 % in Aussicht.
- Die Firma Sennebogen [27] vertreibt unter dem Namen „**Green Hybrid**“ ein Energierückgewinnungssystem vor allem für große Umschlagmaschinen, das „ähnlich dem ERC von Liebherr, die Energie beim Absenken des Auslegers in einem Hydraulikspeicher zwischenspeichert um diese dem folgenden Hub wieder zur Verfügung stellen zu können.“
- Die Firma DMS vertreibt mit dem **Takeuchi TB216** [28] einen diesel-elektro-hybriden Minibagger, der vor allem zum Einsatz in geschlossenen Räumen vorgesehen ist. Die Maschine kann sowohl rein

dieselmotorisch als auch rein elektrisch über einen Kabelanschluss betrieben werden und arbeitet damit lokal vollständig emissionsfrei.

- Die Firma Wacker Neuson vertreibt den Kompaktbagger **803 Dual Power** [29], der entweder mit dem integrierten Dieselmotor oder alternativ über ein anflanschbares mobiles und elektro-hydraulisch angetriebenes Aggregat betrieben werden kann. Dadurch arbeitet der Kompaktbagger lokal emissionsfrei.
- Im Forschungsprojekt **STEAM** der RWTH Aachen [30] wurde ein rein hydraulischer hybrider Bagger entwickelt, bei dem die Hydraulikpumpe der Maschine durch einen Speicherkreis von den Verbrauchern vollständig entkoppelt ist und nur zum Aufrechterhalten des Drucks im Speicherkreis dient. Dadurch kann der Dieselmotor im optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Verluste durch Umwandlungen, wie sie z.B. bei diesel-elektrischen Hybriden entstehen, entfallen, da die Hydraulik als einzige Domäne eingesetzt wird.

5.2.2 Hybride Dumper und Transportfahrzeuge

- Moderne Muldenkipper / Dumper für den Übertagebetrieb, z.B. [31; 32] werden üblicherweise mit diesel-elektrischem Antriebsstrang ausgestattet.
- Die Firma Volvo CE hat im Rahmen ihrer Concept-Vehicle Reihe den Dumper „**Centaur**“ vorgestellt. Das Fahrzeug soll laut Angaben des Herstellers über ein effizientes elektrisches Hybridsystem verfügen, welches z.B. Energie durch regeneratives Bremsen rückgewinnen kann, siehe [33].
- Die Firmen Bosch und Nikola Motor Company haben zusammen die Zugmaschinen **Nikola ONE** und **Nikola TWO** entwickelt, zwei elektrisch betriebene Langstrecken-LKWs mit Batterie und Brennstoffzelle. Laut Angabe des Herstellers hat das Fahrzeug mit einer Tankfüllung eine Reichweite von bis zu 1900 km und soll ab 2021 auf dem Markt verfügbar sein. [34]
- Die Firma Siemens hat das **eHighway System** vorgestellt, ein Oberleitungssystem für LKWs. [35] Die Fahrzeuge verfügen dabei über Stromabnehmer auf dem Dach, über die die Stromversorgung des Fahrzeugs auf Langstrecken sicher gestellt wird. Auf allen verbleibenden Strecken wird das Fahrzeug durch den eingebauten Hybridantrieb versorgt. Hierfür sind verschiedene Ausführungen denkbar (Verbrennungsmotor, Batterie, Brennstoffzelle,...). Die im Fahrzeug verbauten Elektromotoren ermöglichen zudem die Rückgewinnung der Bremsenergie.

5.2.3 Hybride Fahr- und Radlader

- Die Firma Komatsu Joy Global stellt mit dem LHD **Joy 22HD** einen diesel-elektrischen, seriell-hybriden LHD mit einer Leistung von 320 kW und einer Schaufelkapazität von 9 m³ her. Der Dieselmotor erzeugt elektrische Energie über einen Generator, der dann die Radmotoren mit Energie versorgt. Beim Bremsen kann Energie durch das „Kinetic Energy Storage System (KESS)“ zurückgewonnen werden, die anschließend zum Beschleunigen eingesetzt werden kann. [36]
- Die Firma Volvo Construction Equipment stellt auf ihrer Homepage den Radlader **Volvo LX1** als seriellen elektrischen Hybrid vor. Ein deutlich kleinerer Dieselmotor als bei vergleichbaren Maschinen treibt bei der Maschine einen Generator an, der wiederum die Radnabenmotoren versorgt. Über Energiespeichersysteme kann Energie im Betrieb zurückgewonnen und im weiteren Verlauf wieder verwendet werden. [37; 38]
- Die Firma Hitachi hat auf der Intermat 2015 den hybriden Radlader **ZW220HYB-5** vorgestellt, ebenfalls ein serieller Hybrid. [39]
- Die Firma John Deere vertreibt mit dem Radlader **644K** ebenfalls einen seriell-hybriden Radlader mit 171 kW Motorleistung und 19 Tonnen Einsatzgewicht. [40]
- Im Rahmen des Forschungsprojekts TEAM [41] wurde der „**grüne Radlader**“ entwickelt, der unter anderem über ein hydrostatisches Hybridsystem verfügt, welches überschüssige Energie aufnehmen und an den Dieselmotor der Maschine wieder abgeben kann.

5.2.4 Hybride Teleskoplader

- Die Firma Merlo hat 2013 einen hybriden Teleskoplader auf der Agritechnica vorgestellt [42]. Das Fahrzeug verfügt über eine 30 kWh-Batterie und kann dadurch entweder vollelektrisch oder mit Dieselunterstützung betrieben werden. Der Diesel wird bei Bedarf zum Laden der Batterie eingesetzt
- Im IGF-Forschungsprojekt „Antriebsstrang mit Energierückgewinnung: Entwicklungsmethodik und Betriebsstrategien für mobile Arbeitsmaschinen“ wurde unter anderem ein hydraulisch-hybrider Teleskoplader inklusive einer Betriebsstrategie entwickelt, die es ermöglicht, sowohl aus der Arbeitskinematik als auch aus dem Fahrantrieb Energie zurückzugewinnen und sie über einen weiteren Hydraulikmotor dem Dieselmotor wieder zur Verfügung zu stellen. [43]

5.3 Emissionsreduzierung durch Elektrifizierung

Durch Elektrifizierung der eingesetzten Fahrzeuge können die lokal verursachten Dieselmotoremissionen wirkungsvoll und dauerhaft reduziert bzw. verhindert werden. Am Markt sind hierfür bereits Maschinen aus allen Bereichen vorhanden, allerdings teilweise nur in sehr eingeschränkten Leistungsbereichen. Zusätzlich ist die Anzahl an Anbietern elektrifizierter Fahrzeuge eher als gering einzustufen. Zu den bereits elektrifizierten Untertagefahrzeugen zählen:

- Bohr- und Sprengwagen
- Kabelgebundene / batteriebetriebene LHDs
- Voll- und Teilschnittmaschinen
- Oberleitungsgeführte / batteriebetriebene Dumper
- Förderbänder

Vor allem Bohr- und Sprengwägen, kabelgebundene LHDs, Förderbänder und Voll- bzw. Teilschnittmaschinen sind am Markt verfügbar, um die an sie gestellten Anforderungen weitestgehend zu erfüllen. Relativ neu und daher noch nicht ausreichend vorhanden sind rein batteriebetriebene Fahrzeuge wie z.B. batteriebetriebene LHDs oder Dumper.

Im Folgenden wird zuerst ein Überblick über die Forschungsfelder der Elektrifizierung gegeben, die nach aktuellem Stand im Fokus liegen. Im Anschluss daran werden für den Untertagebau relevante elektrifizierte Maschinen am Markt aufgezeigt. Nähere Informationen finden sich in [21].

5.3.1 Forschungsfelder der Elektrifizierung mobiler Arbeitsmaschinen für den Untertagebau

Vor allem durch Elektrifizierung mobiler Arbeitsmaschinen kann ein lokal emissionsfreier Betrieb im Untertagebau ermöglicht werden. Viele der hierfür notwendigen Technologien, wie z.B. Fahrleitungen und Kabel, sind bereits am Markt vorhanden und etabliert. Allerdings sind dieselmotorisch angetriebene Maschinen elektrifizierten Maschinen, aufgrund der hohen Energiedichte von Dieselmotorkraftstoff und der sehr einfachen Betankung der Maschinen, immer noch überlegen. Abbildung 5-12 zeigt eine Übersicht zur Elektrifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen. [3]

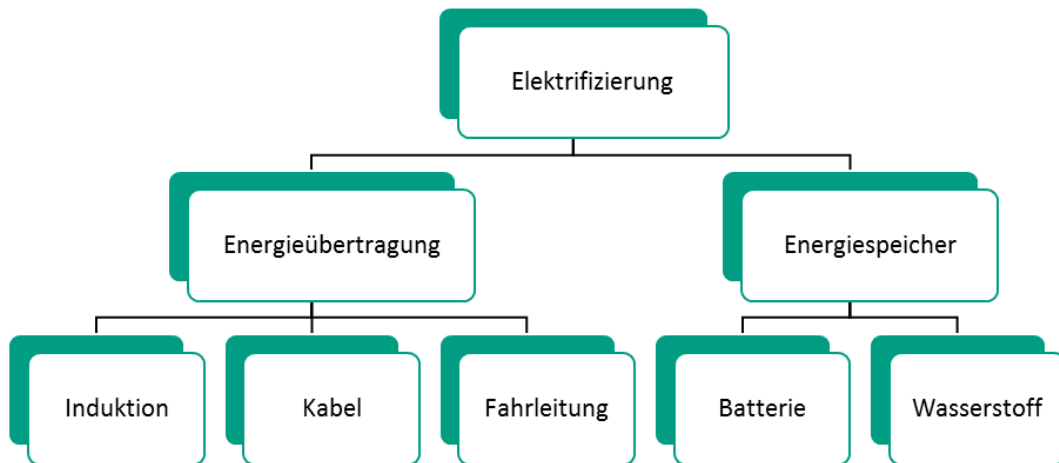


Abbildung 5-12: Forschungsfelder der Elektrifizierung, [3]

Kernpunkte der Elektrifizierung sind die Energieübertragung und Energiespeicherung. Je nachdem ob eine kontinuierliche Energieübertragung gewährleistet werden kann, kann auf der Maschine auf einen Energiespeicher weitestgehend verzichtet werden. Durch einen zusätzlichen Energiespeicher kann die Flexibilität der Maschine weiter erhöht werden, da dadurch auch eine Unterbrechung der Energieübertragung möglich wird. Zur Übertragung hoher elektrischer Leistungen haben sich Kabel und Fahrleitungen bewährt, induktive Verfahren sind hier eher ungeeignet. Als Energiespeicher elektrifizierter Fahrzeuge eignen sich vordergründig Batterien, da diese ge- und entladen werden können. In Verbindung mit einer Brennstoffzelle kann Wasserstoff ebenfalls elektrische Energie zur Verfügung stellen, der Prozess ist allerdings irreversibel auf der Maschine. [3]

5.3.2 Energieübertragung durch Induktion

Vor allem batteriebetriebene Kleingeräte werden bereits durch Induktion geladen. „Kontaktlose Übertragungssysteme bestehen im Wesentlichen aus einem transformatorischen Übertragungssystem, mit dem die Energie gegenüber einem konventionellen Transformator über einen großen Luftspalt (mehrere Dezimeter) und bei hohen Frequenzen (einige hundert Kilohertz) übertragen wird. Unter Verwendung weichmagnetischer Kernmaterialien und Litzenleiter für die Wicklungen sowie durch Resonanzbetrieb lässt sich der Wirkungsgrad solcher Systeme signifikant erhöhen.“ [44].

Wesentlicher Vorteil des induktiven Ladens ist die einfache Handhabung. Das entsprechende zu ladende Gerät muss dazu in einer Ladeposition abgestellt werden, worauf der Ladeprozess automatisch startet. Die Energieübertragung erfolgt über elektromagnetische Felder zwischen der Primär- und der Sekundärspule. Sobald das Gerät aus der Ladeposition entfernt wird, bricht der Ladeprozess ab. Dies ist gleichzeitig ein Nachteil des induktiven Ladens: Der Wirkungsgrad der Energieübertragung hängt von der Größe des Luftspalts zwischen Primär- und Sekundärspule ab. Je nach Größenordnung ist das genaue und reproduzierbare Positionieren von mobilen Arbeitsmaschinen mit einem erheblichen Aufwand verbunden. [3]

Aktuelle Entwicklungen der induktiven Energieübertragung ermöglichen Ladeleistungen im Kilowattbereich. Haupttreiber der Entwicklungen ist die Automobilindustrie. Der Ladetechnikhersteller Brusa Elektronik AG entwickelt zusammen mit der Daimler AG und der BMW Group eine induktive Ladetechnologie mit 3,7 kW Ladeleistung, die in absehbarer Zeit Serienreife erreichen soll. [45; 46] Ein weiteres Ladesystem, welches bereits am Markt erhältlich ist und Ladeleistungen von 3,3 kW – 7,2 kW ermöglicht wird von der Firma Evatran betrieben. Unter anderem wird dieses Ladesystem bei den Fahrzeugen Nissan Leaf und Tesla S eingesetzt. [47] Das Teilinstitut für Bahnsystemtechnik des Karlsruher Institut für Technologie beschäftigt sich im Rahmen eines Forschungsprojekts mit der Entwicklung eines induktiven Ladesystems mit 22 kW Ladeleistung. [48] Für mobile Arbeitsmaschinen gibt es bisher keine induktiven Ladesysteme am Markt.

Insofern der induktive Ladeprozess für mobile Arbeitsmaschinen erfolgreich umgesetzt werden kann, ist z.B. eine Verlängerung der Einsatzdauer einer Maschine durch häufiges Teilladen möglich. Dies ist vor allem für Maschinen wie z.B. Dumper sehr interessant, da diese während eines Zyklus sowohl an der Belade- als auch an der Entladestation für einige Minuten stehen und aufgeladen werden könnten. Abbildung 5-13 zeigt die Bewertung der Energieübertragung durch Induktion. An dieser Stelle sei aber nochmal darauf hingewiesen, dass induktive Energieübertragung nur in Verbindung mit einem Energiespeicher auf den Maschinen und nur auf Maschinen sinnvoll eingesetzt werden kann, die regelmäßig an den gleichen Positionen stehen. Abbildung 5-13 stellt die Bewertung dar. [3]

Energieübertragung per Induktion			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Kabellose Energieübertragung		Schwierige Umsetzung	
Häufiges Teilladen möglich		Sonstige Elektronik muss unanfällig gegenüber den Induktionsfeldern sein	

Abbildung 5-13: Bewertung der Maßnahme „Energieübertragung per Induktion“, [3]

5.3.3 Kabelgebundene Fahrzeuge

LHDs

Kabelgebundene LHDs werden schon seit mehreren Jahren im Untertagebau eingesetzt. Dementsprechend gibt es eine große Auswahl an Fahrzeugen und Herstellern am Markt. Kabellängen sind bis maximal 330 m am Markt verfügbar. [9]

Abbildung 5-14 gibt eine Übersicht über die am Markt verfügbaren kabelgebundenen LHDs. Kabelgebundene LHDs sind aufgrund des einfachen Systemaufbaus sehr robust und haben daher große Wartungs- und Reparaturintervalle. Moderne Kabelabrollmechanismen machen das Auf- und Abtrommeln des Kabels im Betrieb zuverlässig möglich. Trotzdem ist und bleibt das Kabel der limitierende Faktor beim Einsatz dieser Fahrzeuge: Die Reichweite des Kabels ist begrenzt und das hinterhergeführte Kabel macht dabei genau geplante Fahrmanöver notwendig, damit das Kabel z.B. nicht an Ecken und Kanten beschädigt oder überfahren wird. Zudem ist es schwierig, zwei Maschinen im gleichen Bereich arbeiten zu lassen, ohne dass sie sich gegenseitig die Kabel beschädigen. Weiterhin birgt das abgerollte Kabel ein Gefahrenpotential für Menschen hinter der Maschine, da das Kabel bei schlechter Kabelführung auf dem Boden hin- und herrollen oder im ungünstigsten Fall aufgrund plötzlich auftretender Zugspannung durch die Maschine nach oben schnellen kann. [6]

Kabelgebundene LHDs						
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung	Nutzlast	max. Geschw. (beladen)	Versorgungsspannung	Kabellänge
		in kW	in Tonnen	in km/h	in V	in m
Atlas Copco	EST2D	56	3,6	9,8	575	174
Atlas Copco	EST3.5	74,6	6	8,82	1000	244
Atlas Copco	EST1030	132	10	15	1000	300
GHH	LF-10HE	160	9,5	16	1000	245
GHH	LF-14HE	200	12	16	1000	230
GHH	LF-21HE	250	21	18	1000	250
Sandvik	LH203	55	3,5	10,3	400	n.a.
Sandvik	LH409	110	9,6	12	660	n.a.
Sandvik	LH514E	132	14	18,9	1000	n.a.

Abbildung 5-14: Marktverfügbarkeit kabelgebundener LHDs, Stand September 2017, [6]

Shuttle-Cars

Shuttle-Cars sind Fahrzeuge, die z.B. im Kohlebergbau eingesetzt werden. Die Ladefläche der Fahrzeuge ist mit einem Kettenfördersystem ausgestattet, was das Entladen auch in sehr niedrigen Gängen ermöglicht. Üblicherweise beschicken Shuttle-Cars Bandförderanlagen. Auf dem Markt sind sie sowohl kabel- als auch batterieelektrisch mit verschiedenen Nutzlasten vorhanden. Abbildung 5-15 gibt eine Übersicht über am Markt verfügbare kabelgebundene Shuttle-Cars.

Kabelgebundene Shuttlecars						
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung	Nutzlast	max. Geschw. (beladen)	Versorgungsspannung	Kabellänge
		in kW	in Tonnen	in km/h	in V	in m
Joy (Komatsu)	SC BC	50-85	8 - 16	9,6	n.a.	n.a.
Phillips	HC	85	12 - 20	8,5	480 - 1140	n.a.

Abbildung 5-15: Marktverfügbarkeit kabelgebundene Shuttle-Cars, Stand September 2017, [6]

Selbstfahrende Förderbänder

Einige Hersteller bieten selbstfahrende, elektrisch betriebene Förderbänder an, siehe Abbildung 5-16. Diese sind als Alternative zum Dumperbetrieb an Voll- und Teilschnittmaschinen zu sehen.

Selbstfahrende Förderbänder				
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung	Förderleistung (Salz)	Versorgungsspannung
		in kW	in Tonnen / h	in V
Joy (Komatsu)	FCT	n.a.	< 1600	n.a.
PM&P	Flexiveyor	n.a.	< 1200	n.a.

Abbildung 5-16: Marktübersicht selbstfahrende Förderbänder, Stand September 2017, [6]

Greiferlader

Die Firma Atlas-Copco bietet als einziger Hersteller sogenannte „Greiferlader“ an. Greiferlader sind vollelektrifizierte Maschinen für die konventionelle Gewinnung, die je nach Ausführung mit Greifern oder einer Armkinematik ausgestattet sind. Die Maschine kann entweder mittels Diesel oder einer kleinen Traktionsbatterie selbstständig versetzt werden. Einmal am Einsatzort angekommen, wird sie an das Stromversorgungsnetz der Grube angeschlossen. Mit der Greiferkinematik zieht die Maschine das gebrochene Material auf einen Überkopfförderer, der hinter der Maschine z.B. einen Dumper oder ein Förderband beladen kann. Abbildung 5-17 gibt eine Übersicht über die angebotenen Maschinenvarianten. [9]

Greiferlader						
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung	Förderleistung (mit Dichte = 2,2 g / cm ³)		Versorgungsspannung	Geschw. eL. / Diesel
		in kW	in m ³ / min	in Tonnen / min	in V	in km / h
Atlas Copco	7HR	54,7	3,5	7,7	400 - 1000	3 / 10
Atlas Copco	7HR-B	54,7	3	6,6	400 - 1000	3 / 10
Atlas Copco	10HR	100	5	11	400 - 1000	3 / 12
Atlas Copco	10HR-B	100	4	8,8	400 - 1000	3 / 12

Abbildung 5-17: Marktübersicht Greiferlader, Stand September 2017, [9]

Bewertung der Maßnahme „Kabelgebundene Fahrzeuge“

Unter Berücksichtigung des Stands der Technik kann mit kabelgebundenen Fahrzeugen ein lokal emissionsfreier Betrieb in Teilen einer Grube ermöglicht werden. Allerdings muss hierfür eine komplette Neuorganisation der betroffenen Bereiche durchgeführt werden, um es z.B. mehreren Maschinen zu ermöglichen, zur gleichen Zeit an der gleichen Ortsbrust zu arbeiten. Weiterhin ist der Arbeitsbereich der einzelnen Maschinen auf die Kabellänge begrenzt, d.h. ohne geeignete Transportkonzepte zwischen den verschiedenen Einsatzorten verlieren die Maschinen deutlich an Flexibilität. Eine große Bedeutung kommt auch dem Abrollmechanismus hinzu, der vor allem bei Fahrladern und Shuttle-Cars zuverlässig und sicher funktionieren muss. Abbildung 5-18 zeigt die Bewertung der Maßnahme „Kabelgebundene Fahrzeuge“.

Kabelgebundene Fahrzeuge			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Ständige Energieversorgung		Arbeitsbereich auf Kabellänge begrenzt	
Hohe Fahrzeugauslastung		Erschwerter Betrieb mit mehreren Fahrzeugen in einem Bereich	
Teilweise schon in Verwendung		Problematische Wärmeabfuhr aus dem aufgerollten Kabel bei höheren Leistungen	
Sehr hoher Wirkungsgrad		Erfordert zuverlässigen Abrollmechanismus	

Abbildung 5-18: Bewertung der Maßnahme "Kabelgebundene Fahrzeuge", [3]

5.3.4 Fahrleitungsgebundene Fahrzeuge

Fahrleitungen (Ober- und Unterleitungen) haben sich bereits in vielen Bereichen der Logistik bewährt (z.B. Schienenverkehr, Stadtbusse). Typische Fahrzeuge, die zum Betrieb an Fahrleitungen geeignet sind, sind z.B. Dumper, da sie häufig die gleichen Wege zurücklegen, z.B. von der Beladeposition hinter der Vollschnittmaschine zur Abladestation am Förderband. Um den Vorbauaufwand durch das Verlegen des Oberleitungsnetzes zu reduzieren, sollten Maschinen mit eingebautem Energiespeicher verwendet werden, die die „letzte Meile“ mit Energie versorgen können. [6]

Der Hersteller Atlas Copco Kiruna hat oberleitungsgebundene Dumper entwickelt, die aufgrund eines schwenkbaren Fahrleitungskontakts um bis zu zwei Meter um die Leitungsebene ausweichen können. Zusätzlich verfügen diese Fahrzeuge z.B. über kleine Dieselmotoren, die auch einen von der Fahrleitung getrennten Einsatz ermöglichen. Andere Konzepte, z.B. durch auf dem Dach aufgerollte Kabeltrommeln sind ebenso am Markt verfügbar. Die Fahrzeuge wurden in der Eisenerzmine Kiruna eingesetzt, die von der LKAB Gruppe betrieben wird. Die LKAB (Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag) ist ein schwedisches Bergbauunternehmen, welches zu 100 % im Besitz des schwedischen Staates ist. [49; 50]

Abbildung 5-19 zeigt eine Marktübersicht zu fahrleitungsgeführten Dumpfern.

Oberleitungsgeführte Dumper						
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung (Diesel / Elektrisch)		Nutzlast in Tonnen	max. Geschw. (beladen) in km/h	Versorgungsspannung in V
		in kW	in kW			
Atlas Copco Kiruna	EMT 35	72	2 x 200	35	n.a.	690
	EMT 50	107	2 x 355	50	n.a.	690

Abbildung 5-19: Marktübersicht Fahrleitungsgeführte Dumper, Stand September 2017, [9]

Für Gewinnungsmaschinen, wie z.B. LHDs, gibt es noch kein geeignetes Fahrleitungskonzept, da dieses die Flexibilität zu arg einschränken und / oder den Vorbauaufwand deutlich erhöhen würde. Abhilfe könnten hier z.B. einfach verlegbare Firsten-/ Sohlenkontakte mit kleinen verbauten Traktionsbatterien schaffen. Die Batterie wird immer genau dann geladen, wenn Kontakt besteht, kann das Fahrzeug aber in einem begrenzten zeitlichen Rahmen selbst versorgen. Ein dementsprechendes Konzept gibt es noch nicht am Markt. [3]

Abbildung 5-20 zeigt die Bewertung der Maßnahme „Fahrleitungsgebundene Fahrzeuge“.

Fahrleitungsgebundene Fahrzeuge			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Rekuperationsmöglichkeiten		Laufende Kosten durch Streckennetzausbau	
Verbesserung der Produktivität möglich		Problematischer Einsatz in ungesicherten Bereichen	
Günstiger Einsatz auf Rampen		Gefahr durch Oberleitung/Sohlenleitung	

Abbildung 5-20: Bewertung der Maßnahme "Fahrleitungsgebundene Fahrzeuge", [3]

5.3.5 Batteriebetriebene Fahrzeuge

Mobile Arbeitsmaschinen mit Batterien als Energiespeicher ermöglichen einen lokal dieselmotoremissionsfreien Betrieb. Die notwendige Batteriekapazität hängt maßgeblich von der Maschine und der damit ausgeführten Tätigkeiten ab. Vor allem Maschinen mit sehr hohem Energie-/Leistungsbedarf können nach aktuellem Stand der Technik nur ungenügend batterieelektrisch betrieben werden. Im Verlauf der letzten Jahre hat sich das Angebot an am Markt befindlichen batterieelektrischen mobilen Arbeitsmaschinen zwar deutlich vergrößert, allerdings unterliegen die Fahrzeuge teilweise nationalen bzw. internationalen Regeln und Normen, die dazu führen, dass nicht jede Maschine in jedem Land eingesetzt werden kann. Trotzdem ist eindeutig der Trend hin zu einer größeren Auswahl an batterieelektrischen mobilen Arbeitsmaschinen festzustellen, wie das folgende Kapitel darstellt. In Abbildung 5-21 sind batteriebetriebene Fahrzeuge und deren Potential bewertet. [3]

Batteriebetriebene Fahrzeuge			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Guter Gesamtwirkungsgrad		Begrenzte Energiemenge	
Höchste Flexibilität		Lange Ladezeiten	
Teilladen und Zwischenladen möglich		Begrenzte Lebensdauer/Zyklusanzahl	
Batterieseitig Optimierungen zu erwarten		Unausgereifte Technologie	
Einfacher Systemaufbau, eine Antriebsquelle		Erweiterung des elektrischen Netzes mit Ladestation	

Abbildung 5-21: Bewertung der Maßnahme "Batteriebetriebene Fahrzeuge", [3]

LHDs

Gegenwärtig bieten 6 Hersteller batteriebetriebene LHDs für den (inter-)nationalen Markt an. Die Fahrzeuge bewegen sich im Bereich von ca. 1,1 – 11 Tonnen Lademenge und haben je nach Hersteller unterschiedliche Batteriepakete, Einsatzdauern und Ladestrategien. [9]

Als Traktionsbatterien werden bei den am Markt vorhandenen LHDs ausschließlich Li-Ionen-Batterien eingesetzt, hierbei größtenteils LiFePO₄-Batterien. Die Batterien sind üblicherweise auf eine Einsatzzeit von ca. 4 h dimensioniert. [9]

Je nach Hersteller werden die Maschinen mit einem Batterielade- oder Batteriewechselsystem ausgestattet. Eine Batterieladestation erhöht die Stillstandszeiten der Maschine aufgrund der teilweise langen Ladezeiten. Batteriewechselsysteme versprechen je nach Hersteller ein sehr schnelles Austauschen der Batterien im Rahmen von ca. 20 – 40 min Wechselzeit, sind allerdings in der Anschaffung deutlich teurer, da zusätzlich zur Ladestation noch das Equipment zum Batteriewechsel sowie Wechselbatterien angeschafft werden müssen. Andererseits sind die Batterien in ihrer Zykluszahl begrenzt und erreichen durch ein Wechselsystem eine höhere zeitliche Lebensdauer im Betrieb, da sie zum Beispiel nur noch eine Schicht pro Tag anstelle von zwei oder drei Schichten verrichten müssen, wodurch genügend Zeit zum Laden und Warten der Batterie entstehen kann. Abbildung 5-22 können die aktuell am Markt verfügbaren Fahrzeuge, deren Hersteller und Lademengen entnommen werden. [9]

Batteriebetriebene LHDs						
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung	Nutzlast	max. Geschw. (beladen)	Versorgungsspannung	Batteriekapazität
		in kW	in Tonnen	in km/h	in V	in kWh
Aramine	L120B	25	1,1	8	220	24
Artisan	153	85	3	12	600	88 (132)
Atlas Copco	ST7 Battery	108	6,8	22	630	165
GE	BP AC LHD	36,7	5	7,72	240	214,8
RDH	MM 3TEB	75 - 149	3	n.a.	280	n.a.
RDH	MM 300 EB	75 - 149	5,4	n.a.	470	n.a.
RDH	MM 600 EB	75 - 149	11	n.a.	470	n.a.
Sandvik	LH307B	n.a.	6,7	n.a.	n.a.	n.a.

Abbildung 5-22: Marktverfügbarkeit Batterie-LHDs, Stand September 2017, [9; 6]

Während der Bearbeitung des Forschungsprojektes hat der Hersteller **Artisan Vehicle Systems** einen batteriebetriebenen LHD mit 16 Tonnen Nutzlast angekündigt, welcher voraussichtlich ab dem ersten Quartal 2018 auf dem Markt verfügbar sein soll. Neben der bisher größten Lademenge am Markt soll das Fahrzeug zudem noch über eine erhöhte Fahrgeschwindigkeit verfügen. Nähere Spezifikationen sind gegenwärtig noch nicht bekannt. [6]

Dumper

Die Recherche hat ergeben, dass es batteriebetriebene Dumper zurzeit nur von zwei Herstellern am Markt angeboten gibt, siehe Abbildung 5-23. Weiterhin muss geklärt werden, ob die Fahrzeuge auch für den europäischen bzw. deutschen Markt freigegeben werden können.

Batteriebetriebene Dumper						
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung	Nutzlast	max. Geschw. (beladen)	Versorgungsspannung	Batteriekapazität
		in kW	in Tonnen	in km/h	in V	in kWh
Joy (Komatsu)	BH	2 x 75	11,4 - 18,2	9,7	240	n.a.
RDH	HM 800-20EB	74 - 223	18 / 20	n.a.	620	n.a.

Abbildung 5-23: Marktverfügbarkeit batteriebetriebene Dumper, Stand September 2017, [9]

Während der Bearbeitung des Forschungsprojektes hat der Hersteller **Artisan Vehicle Systems** mit dem **Z40** einen batteriebetriebenen Dumper mit 40 Tonnen Nutzlast und einer Batteriekapazität von 300 – 600 kWh vorgestellt, welcher voraussichtlich ab Ende 2017 auf dem Markt verfügbar sein soll. Laut Angaben des Herstellers verfügt die Maschine über vier Elektromotoren als Antrieb und ist aufgrund ihres komplett überarbeiteten Designs deutlich kompakter als eine vergleichbare Dieselmachine. Weiterhin soll die Maschine laut Herstellerangaben “[...] in der Spitze die doppelte Pferdestärke aufweisen wie ein vergleichbares Diesel-Modell, wobei es nur ein Achtel von dessen Hitze abstrahlt.“ [51]. Weitere Informationen sind bisher nicht bekannt, weswegen die Maschine auch nicht in Abbildung 5-23 aufgeführt werden konnte. [6; 52]

Shuttle-Cars

Abbildung 5-24 gibt eine Marktübersicht über batteriebetriebene Shuttle-Cars.

Batteriebetriebene Shuttlecars						
Hersteller	Bezeichnung	Motorleistung	Nutzlast	max. Geschw. (beladen)	Versorgungsspannung	Batteriekapazität
		in kW	in Tonnen	in km/h	in V	in kWh
Hager	15TEN30	2 x 88	13,6	7,6	600	n.a.
Phillips	FC B	85	12 - 30	8,5	480 - 1140	n.a.

Abbildung 5-24: Marktverfügbarkeit batteriebetriebener Shuttle-Cars, Stand September 2017, [6]

5.3.6 Weitere elektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen am Markt

- Die Firma Takeuchi vertreibt einen batteriebetriebenen Kettenbagger (**TB 1140E / SUNCAR**) mit 75 kW Leistung, einem Einsatzgewicht von 16 Tonnen und einer Lithium-Ionen-Batterie. [53]
- Die Firma Kramer Allrad vertreibt einen vollelektrischen Radlader (**5055e**) mit einem Einsatzgewicht von ca. 4 Tonnen und einem Schaufelinhalt von 0,65 m³. Der Fahrmotor hat eine Leistung von 15 kW, die Hydraulik eine Leistung von 22 kW. Die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs beträgt 16 km/h. [54]

5.3.7 Elektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen als Gegenstand aktueller Forschung

- Die Firma John Deere entwickelt gegenwärtig einen batteriebetriebenen Traktor mit 130 kW Motorleistung. Die Maschine soll damit eine Einsatzzeit von ca. 4 h bei 3 h Ladezeit erreichen. Als Traktionsbatterie kommt eine Li-Ionen-Batterie mit ca. 3100 Ladezyklen zum Einsatz. [9]
- Die Firma John Deere untersucht aktuell Einsatzmöglichkeiten von kabelgebundenen Traktoren. In einem Forschungsprojekt wird eine Maschine mit 300 kW Motorleistung durch ein 1000 m langes Kabel bei 6 – 10 kV Spannung versorgt. Zentraler Gegenstand des Forschungsprojekts ist die Bahnsteuerung des Traktors sowie das Ablegen und Aufrollen des Kabels. Die Fahrgeschwindigkeit in Feldversuchen betrug bisher 20 km/h. [55]
- Die Firma Paus entwickelt gerade mit dem **Paus Minca 5.1 Hybrid** ein Fahrzeug, welches sowohl durch ein anbaubares Dieselaggregat als auch eine Batterie versorgt werden kann. Das Fahrzeug ist bereits am Markt vorhanden und wird zu Testzwecken bereits eingesetzt. [56]
- Die Firma Volvo Construction Equipment entwickelt elektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen im Rahmen der „Concept Vehicle“-Reihe. Hierzu zählen ein elektrifizierter Radlader und ein Bagger. Nähere Informationen sind noch nicht vorhanden. [33]
- Die Firma Volvo Construction Equipment hat die Prototypen **LX1** und **HX1** entwickelt. LX1 ist ein hybrid-elektrischer Radlader mit elektrischen Fahrmotoren, elektrohydraulischer Steuerung, Energiespeichersystem und einem deutlich kleineren Dieselmotor. Zusätzlich wurde die gesamte Maschinenarchitektur an das neue System angepasst. Nach Aussagen von Volvo CE kann der LX1 die gleiche Arbeit erledigen wie ein Radlader einer Leistungsklasse höher. HX1 ist eine autonome, batterieelektrische Mulde zum Materialtransport. Beide Maschinen sind noch nicht am Markt verfügbar. [37]

5.3.8 Brennstoffzellenfahrzeuge

Elektrifizierte Fahrzeuge mit dem Sekundärenergieträger Wasserstoff, einem Tank und einer eigenen Brennstoffzelle bieten eine ähnlich hohe Flexibilität wie Dieselfahrzeuge, da ihre Reichweite nicht so stark begrenzt

ist wie die von kabel- oder fahrleitungsgebundenen Fahrzeugen und sie zudem schnell betankt werden können. Allerdings muss für Brennstoffzellen eine Wasserstoff-Tank-Infrastruktur unter Tage installiert werden, wobei zuerst durch den gesetzlichen Rahmen geklärt werden muss, inwiefern Wasserstoff unter Tage als Treibgas eingesetzt werden darf. Weiterhin sind nur vereinzelt brennstoffzellenbetriebene mobile Arbeitsmaschinen am Markt verfügbar, wovon keine eine Untertagemaschine darstellt. [6]

Vor allem der Sicherheitsaspekt muss bei Untertagemaschinen mit Wasserstoff-Brennstoffzelle berücksichtigt und entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden. Laut [57] sind die entstehenden Sicherheitsrisiken aber als durchaus beherrschbar einzustufen.

Abbildung 5-25 kann die Bewertung der Maßnahme entnommen werden.

Wasserstoff und Brennstoffzelle			
Umsetzung	kurzfristig		langfristig
Kosten	günstig		teuer
Lebensdauer	kurz		lang
Einschätzung	mitigierend		lösend
Vorteile		Nachteile	
Tankmöglichkeit und somit geringe Ladezeiten ähnlich Diesel		keine Marktverfügbarkeit	
Sicherheitsrisiken weitestgehend beherrschbar		Neue Sicherheitsrisiken	
		Bedarf einer neuen Infrastruktur	

Abbildung 5-25: Bewertung der Maßnahme "Wasserstoff und Brennstoffzelle", [6]

6 Emissionsreduzierung durch Elektrifizierung in ausgewählten Gruben

Nach Beschluss durch den projektbegleitenden Ausschuss lag der Fokus der Studie auf der Elektrifizierung im Untertagebau. Im Folgenden werden nun die Ergebnisse für die beteiligten Gruben vorgestellt und kurz diskutiert. Zuerst wird hierfür das Vorgehen bei der Ergebniserarbeitung vorgestellt.

Anhand der unter Kapitel 3 erfassten Daten werden im Folgenden Einsparpotentiale ermittelt und elektrifizierte Konzepte für die entsprechenden Maschinen untersucht. Wie unter Kapitel 5.3 beschrieben, kommen hierbei hauptsächlich *batteriebetriebene*, *kabelgebundene* oder *ober- bzw. unterleitungsgeführte* Fahrzeuge in Frage. Je nach Fahrzeug werden diese beschriebenen Maßnahmen untersucht und ggfs. wird deren Umsetzung näher beschrieben.

Hierfür wird zuerst die ursprüngliche Maschine mit einer exemplarischen elektrifizierten Maschine gleicher Art verglichen, um Energieeinsparungen zu ermitteln. Dem Vergleich liegt Abbildung 6-1 zugrunde:

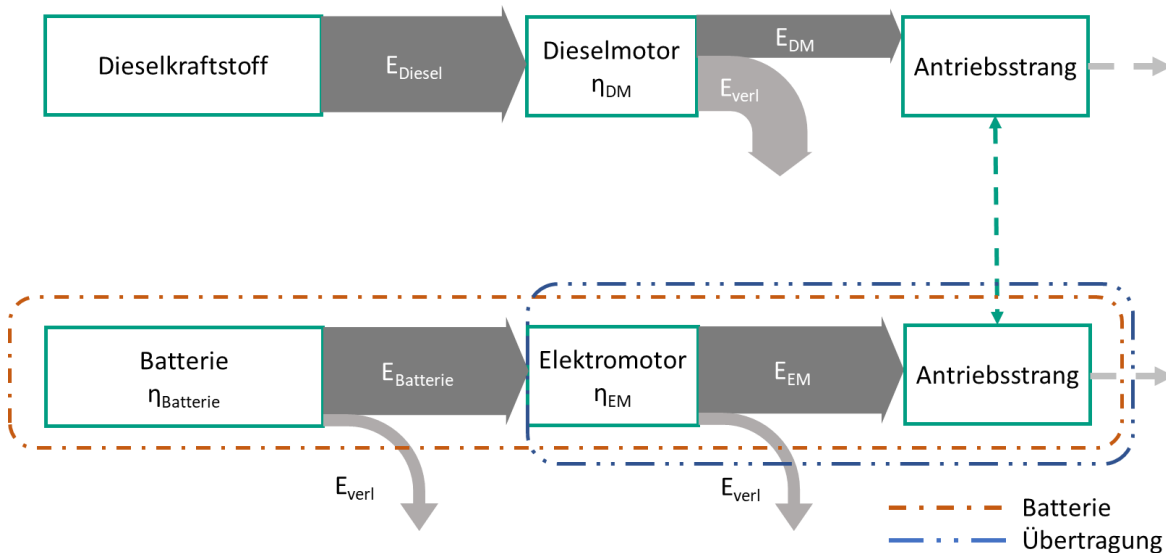


Abbildung 6-1: Sankey-Diagramme zum Vergleich von VKM-betriebener und elektrifizierter Maschine [6]

Um den besseren Wirkungsgraden elektrifizierter Maschinen gerecht zu werden, wird der Energiebedarf einer leitungsgeführten Maschine (siehe Abbildung 6-1, „Übertragung“) nach Formel (I) berechnet:

$$E_{\text{Übertragung}} = E_{\text{Diesel}} * \frac{\eta_{DM}}{\eta_{EM}} \quad (I)$$

Der Wirkungsgrad des Dieselmotors wird entsprechend Kapitel 3 angenommen, der Wirkungsgrad der Elektromotoren wird mit $\eta_{EM} = 95 \%$ definiert (siehe z.B. [58]).

Der Energiebedarf einer batteriebetriebenen Maschine (siehe Abbildung 6-1, „Batterie“) berechnet sich gemäß Formel (II):

$$E_{\text{Batterie}} = E_{\text{Diesel}} * \frac{\eta_{DM}}{\eta_{EM} * \eta_{Batterie}} \quad (II)$$

Die Energiemengen $E_{\text{Übertragung}}$ und E_{Batterie} stellen dabei die Energiemengen dar, die in einer Batterie vorhanden sein bzw. im Falle der Übertragung vom Kabel an die Maschine geliefert werden muss, um unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade die gleiche Tätigkeit ausführen zu können wie das dieselbetriebene Fahrzeug. Der Wirkungsgrad der Batterie bezieht sich dabei auf die Wandlungsverluste und setzt die in der

Batterie gespeicherte Energie und die an die Maschine abgegebene Energie ins Verhältnis. Er wird zu $\eta_{\text{Batterie}} = 90 \%$ angenommen. Durch den so definierten Wirkungsgrad werden Kapazitätsverluste aufgrund der Alterung der Batterien berücksichtigt, siehe Kapitel 4.4.

E_{Diesel} wird dabei immer aus der repräsentativen Schicht ermittelt, siehe Kapitel 3 und berechnet sich nach Formel (III):

$$E_{\text{Diesel}} = \frac{E_{\text{Rep}}}{\eta_{\text{DM}}} \quad (\text{III})$$

Bei Batteriesystemen wird untersucht, wie viele Batterieladungen notwendig sind, um die in der repräsentativen Schicht umgesetzte Energiemenge zur Verfügung zu stellen. Da Untertagemaschinen im Fokus stehen, werden zur Berechnung der Batterieanzahl die aktuell größten Batterien am Markt verwendet, die auf solchen Maschinen gefunden wurden. Diese haben eine Kapazität von 165 kWh (Atlas Copco ST7 Battery) bzw. 220 kWh (GE Fairchild Mining Equipment). Zur Reduzierung der Komplexität der folgenden Betrachtung wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die angegebene Batteriekapazität vollständig zur Verfügung steht, d.h. die üblicherweise in der Literatur angegebene maximale Entladespanne von ca. 80 % wird vernachlässigt. Dies ist an dieser Stelle zulässig, da eine Batterie auf die notwendige Batteriekapazität hin ausgelegt werden und eine entsprechend höhere Kapazität aufweisen kann, die die Entladespanne zulässt.

Die zur Berechnung der notwendigen Zeit zum Laden der Batterie notwendige Ladeleistung orientiert sich an einem aktuell am Markt für mobile Arbeitsmaschinen verfügbaren System. Die Ladestation wird von der Firma Artisan hergestellt und hat eine Leistung von 65 kW bei 575 VAC Eingangsspannung. Für das Laden der Batterien wird ein Wirkungsgrad von $\eta_{\text{Batterie}} = 90 \%$ angesetzt. Eine Batterie mit 165 kWh Energieinhalt benötigt damit ca. 3 h zum Laden, 220 kWh benötigen ca. 4 h Ladezeit.

Nach [13] sind auch höhere Ladeleistungen möglich. Die Literatur empfiehlt Laderaten von 1 C für Lithium-Ionen-Akkus. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass der Innenwiderstand einer Batterie im unteren und oberen Ladungszustand abweicht. Der C-Wert oder C-Faktor gibt die maximalen Lade- und Entladeströme einer Batterie bezogen auf die Nennkapazität an. „Der Kehrwert 1/C gibt die Zeit an, die eine Batterie mit der vom Hersteller bestimmten Kapazität Q_0 mit dem maximal zulässigen Strom entladen werden kann.“ [13]. Wird beispielsweise eine Batterie mit 165 kWh Kapazität und einer Batteriespannung von 630 V mit der oben angegebenen Ladeleistung von 65 kW geladen, so entspricht dies vereinfacht einer Laderate von ca. 0,4 C. Bei einer Laderate von 1 C kann die gleiche Batterie innerhalb von ca. 1 h fast vollständig geladen werden. Entsprechend muss die Ladeleistung von 65 kW auf 165 kW erhöht werden. Unter Berücksichtigung des bereits angegebenen Ladewirkungsgrads wird eine Ladeleistung von 183 kW über 1 h benötigt, was einer Laderate von ca. 1,1 C entspricht. Denkbar sind auch noch höhere Laderaten, allerdings können diese zu Schäden an den Batterien führen und deren Kapazität dauerhaft reduzieren. [13]

Bei elektrifizierten Maschinen entfallen die Leerlaufverluste des Dieselmotors. Für den Energiebedarf eines elektrischen Systems werden daraufhin nur die Energien für Arbeiten und Fahren einbezogen. Im Sinne der Übersichtlichkeit wird darauf verzichtet, auf diese Tatsache bei jeder Maschine hinzuweisen.

Sofern möglich, wird das Rekuperationspotential der einzelnen Maschinen explizit berechnet. Die Berechnung erfolgt über die Unterschiede in der potentiellen Energie einer Maschine, die eine schräge Ebene hoch und wieder herunter fährt. Zusätzlich werden Verluste durch Rollreibung berücksichtigt. Die Berechnung gibt dadurch eine konservative obere Abschätzung des Rekuperationspotentials. Abbildung 6-2 veranschaulicht alle für die Berechnung notwendigen Größen.

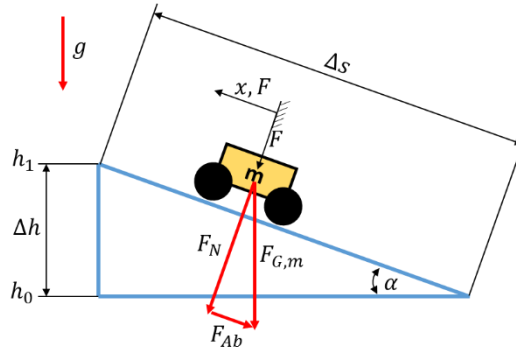


Abbildung 6-2: Skizze zur Berechnung des Rekuperationspotentials

Die Einsparung durch Rekuperation berechnet sich aus Formel (IV):

$$\eta_{Einsp} = \frac{(E_{Auf} - E_{Ab}) - (E_{Auf} - E_{Ab} - E_{Rek})}{E_{Auf} - E_{Ab}} \quad (IV)$$

In der Berechnung wird der Energieaufwand verglichen, den ein Fahrzeug mit bzw. ohne Rekuperation hat, wenn es die gleiche Steigung hoch und herunter fährt. Dabei wird außerdem berücksichtigt, dass das Fahrzeug bei beiden Fahrten nicht die gleiche Masse haben muss. Die Energie E_{Auf} stellt dabei die Energie dar, die ein Fahrzeug beim Hochfahren aufwenden muss und berechnet sich gemäß Formel (V)

$$E_{Auf} = \Delta s \cdot (F_{Ab} + F_{Rollreibung}) = \Delta s m_{Auf} g (\sin(\alpha) + c_R \cos(\alpha)) \quad (V)$$

c_R stellt dabei den dimensionslosen Rollwiderstandskoeffizienten dar. Für die Berechnung wird $c_R = 0,03$ angenommen, was der Paarung (Auto-)Reifen auf Schlaglochstrecke entspricht. m_{Auf} ist die Masse des Fahrzeugs während der Hochfahrt, Δs der Weg, den das Fahrzeug auf der Schräge zurücklegt. Alle weiteren Größen können Abbildung 6-2 entnommen werden.

Die Energie, die ein konventionelles Fahrzeug dazu aufwenden muss, um eine Steigung herunter zu fahren ist normalerweise null, d.h. es gilt:

$$E_{Ab} = 0 \quad (VI)$$

Dies wird für alle Rekuperationsberechnungen angenommen.

Im Falle eines rekuperationsfähigen Fahrzeugs kann Energie bei der Bergabfahrt rückgewonnen werden. Diese resultiert aus der auf das Fahrzeug wirkenden Hangabtriebskraft und wird durch die Verluste durch Rollreibung reduziert, Formel (VII):

$$E_{Rek} = \Delta s \cdot (F_{Ab} - F_{Rollreibung}) = \Delta s m_{Ab} g (\sin(\alpha) - c_R \cos(\alpha)) \quad (VII)$$

Durch Einsetzen der Formeln (V) - (VII) in (IV) erhält man durch Umformen schließlich Formel (VIII):

$$\eta_{Einsp} = \frac{E_{Auf} - (E_{Auf} - E_{Rek})}{E_{Auf}} = \frac{E_{Rek}}{E_{Auf}} = \frac{\Delta s m_{Ab} g (\sin(\alpha) - c_R \cos(\alpha))}{\Delta s m_{Auf} g (\sin(\alpha) + c_R \cos(\alpha))} = \frac{m_{Ab}}{m_{Auf}} \cdot \frac{(\tan(\alpha) - c_R)}{(\tan(\alpha) + c_R)} \quad (VIII)$$

Der Quotient $\frac{m_{Ab}}{m_{Auf}}$ stellt die Masse des herunterfahrenden mit der Masse des hochfahrenden Fahrzeugs ins Verhältnis. Abbildung 6-3 stellt Formel (VIII) als Diagramm dar. Auf der x-Achse ist die Steigung eines Gefälles aufgetragen, auf der y-Achse das Verhältnis $\frac{E_{Rek}}{E_{Auf}}$ gemäß Formel (VIII). Die einzelnen Kurven unterscheiden sich im Quotienten $\frac{m_{Ab}}{m_{Auf}}$.

Zur Verdeutlichung wird an dieser Stelle ein kurzes Beispiel vorgestellt: Ein Fahrzeug fährt eine Steigung mit 12 % hoch und wieder runter. Dabei verändert sich die Masse des Fahrzeugs nicht, d.h. das Fahrzeug wiegt genauso viel beim Hochfahren, wie beim Runterfahren, z.B. 10 Tonnen. Im Diagramm, Abbildung 6-3, ist daher die grüne 100 %-Kurve auszuwählen. Aus dem Diagramm kann nun ein Rekuperationspotential von 60 %

der zum Hochfahren notwendigen Energie abgelesen werden. Wird das gleiche Fahrzeug auf dem höchsten Punkt seiner Fahrstrecke so beladen, dass sich seine Masse auf 140 % (14 Tonnen) erhöht, so können bei der Bergabfahrt schon ca. 85 % der zum Hochfahren notwendigen Energie rekuperiert werden. Im Gegensatz dazu reduziert sich das Rekuperationspotential der Bergabfahrt auf nur ca. 40 %, wenn die Fahrzeugmasse am höchsten Punkt auf 70 % (7 Tonnen) reduziert wird.

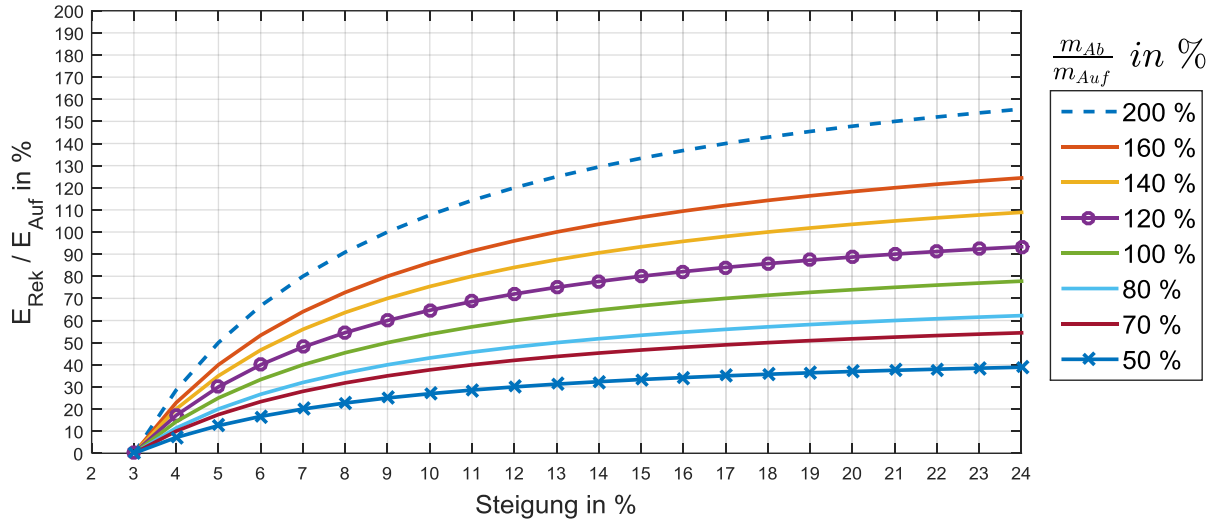


Abbildung 6-3: Rekuperierbare Energie nach Formel (VIII)

Um bestimmen zu können, welche Energie der Batterie durch die Rekuperation zugeführt werden kann, wird weiterhin ein rekuperationsfähiger, vereinfachter Antriebsstrang als Berechnungsgrundlage verwendet, siehe Abbildung 6-4.

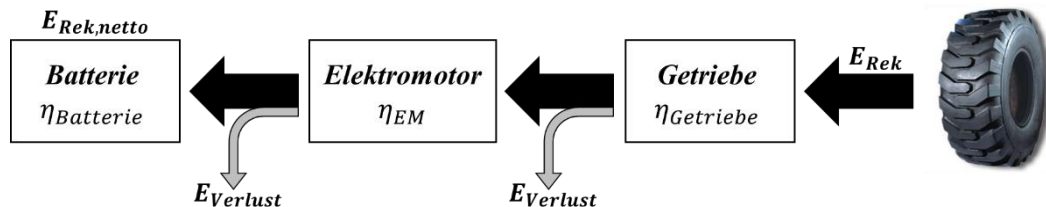


Abbildung 6-4: Skizze rekuperationsfähiger Antriebsstrang

Die Berechnung erfolgt gemäß Formel (IX)

$$E_{\text{Rek,netto}} = E_{\text{Rek}} \cdot \eta_{\text{Getriebe}} \cdot \eta_{\text{EM}} \cdot \eta_{\text{Batterie}} = 0,77 \cdot E_{\text{Rek}} \quad (\text{IX})$$

Für den Wirkungsgrad des Untersetzungsgetriebes am Rad wird $\eta_{\text{Getriebe}} = 90 \%$ angenommen. $E_{\text{Rek,netto}}$ beschreibt daher die nach der Rekuperation in der Batterie enthaltene Energiemenge.

Grundlage der Berechnung sind die unter Kapitel 4.4 aufgeführten Angaben. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden alle verwendeten Parameter tabellarisch aufgeführt. Diese wurden konsequent verwendet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleisten zu können.

Parameter	Wert
Gravimetrische Energiedichte Li-Ion-Batterie	250 Wh / kg
Volumetrische Energiedichte Li-Ion-Batterie	160 – 670 Wh / dm ³
Wirkungsgrad Dieselmotor η_{DM}	Nach Berechnung
Wirkungsgrad Elektromotor η_{EM}	0,95 %

Wirkungsgrad Batterie η_{Batterie}	0,90 %
Wirkungsgrad Getriebe η_{Getriebe}	0,90 %

6.1 Grube A

Aufgrund der ebenen Lagerstätte ist in Grube A keine Rekuperation aus Bergfahrten möglich. Lediglich Rekuperation aus Bremsvorgängen wäre denkbar. Entsprechende Untersuchungen / Berechnungen wurden bisher nicht durchgeführt.

6.1.1 Radlader R1A

Der im Schutter- und Verladeprozess eingesetzte Radlader hat eine hohe Auslastung und geringe Stillstandszeiten. Die Maschine ist je nach Bedarf 1- oder 2-schichtig im Einsatz. In der repräsentativen Schicht benötigt das Fahrzeug ca. 1161 kWh Dieselenergie. Bei einem Wirkungsgrad von 35% stehen der Maschine daher ca. 407 kWh Energie zur Verfügung. Für die Maschine wurden Batterie- und Kabelbetrieb näher untersucht.

Ein batterieelektrischer Radlader benötigt im Vergleich zu einem Diesel-Radlader aufgrund der besseren Wirkungsgrade 476 kWh von der Batterie zur Verfügung gestellte Energie. Die Maschine kann bei einer Batteriegröße von 165 kWh mit einem 2- oder 3-Batterie-Wechsel-System versorgt werden. Ein Batteriewechsel muss bei dem oben angegebenen Energieverbrauch nach ca. 2 h erfolgen.

Abbildung 6-5 stellt den Einsatz des Batterie-Wechsel-Systems zeitlich dar. Am Beispiel des Radladers R1A wird der Ablauf detaillierter beschrieben. Dieser ist für alle anderen Maschinen analog erstellbar. Es wird eine Batteriewechselzeit von jeweils 15 Minuten angenommen (Quelle nach [59]). Es wird außerdem angenommen, dass zu Beginn der Schicht alle Batterien vollständig geladen sind und dass in der Schicht eine Pause von insgesamt 0,5 h in Stunde 4 stattfindet.

Zu Beginn der Schicht befindet sich Batterie 1 im Fahrzeug. Gegen Ende Stunde 2 wird Batterie 1 aus- und Batterie 2 eingebaut. Während der Pause kann Batterie 2 im Fahrzeug für ca. 0,5 h zwischengeladen werden, was bei einer Ladeleistung von 65 kW einer Energiemenge von ca. 30 kWh entspricht und damit eine Verlängerung der Einsatzzeit von Batterie 2 um ca. 20 Minuten ermöglicht. Anschließend kann nun entweder Batterie 1 (2-Batterie-Wechsel-System) oder Batterie 3 (3-Batterie-Wechsel-System) ins Fahrzeug eingebaut werden, wofür ca. 15 Minuten Wechselzeit eingeplant werden müssen.

Nach Ende der Schicht hat Batterie 1 noch eine Restenergiemenge von ca. 25%, Batterie 2 ist bereits zu ca. 40% geladen. Um die Zeitverluste von 30 Minuten durch Batteriewechsel zu kompensieren, kann die Schicht um eine halbe Stunde verlängert werden, die mit der eingebauten Batterie erfolgen kann. Anschließend wird allerdings ein Zeitraum von ca. 2 – 3 h benötigt, um alle Batterien wieder vollständig zu laden, was Zeitverzögerungen bei Folgeschichten bedeuten könnte. Ggfs. muss eine dritte Batterie hinzugezogen werden, die zu Beginn der dritten Schicht bereits voll ist.

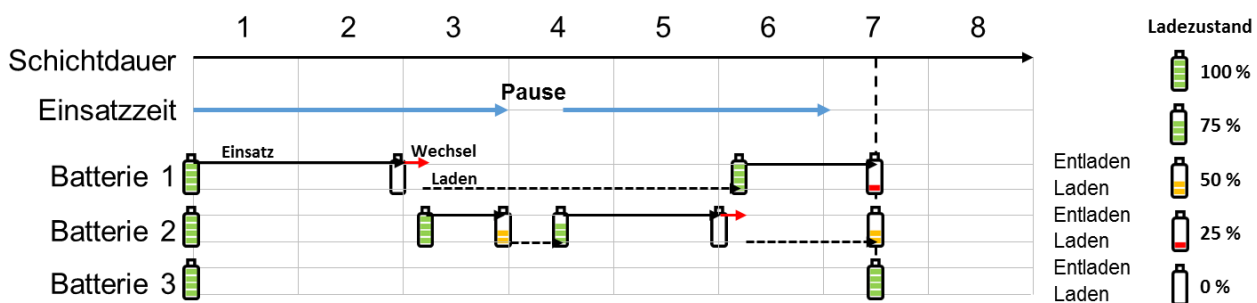


Abbildung 6-5: Batterieeinsatzzeiten R1A

Unter Berücksichtigung erhöhter Laderaten (z.B. 1,1 C) könnten die Ladezeiten der Batterien deutlich reduziert werden, so dass Batterie 2 während der Pause wieder vollständig geladen werden könnte. Gegen Ende der Schicht, siehe Abbildung 6-6, hat Batterie 1 noch ca. 50%, Batterie 2 ca. 75% der max. Energiemenge. Die bereits beschriebene Verlängerung um 30 Minuten kann auch hier wieder problemlos gefahren werden. Aufgrund der erhöhten Laderate hat Batterie 2 nach Ende der verlängerten Schicht bereits eine Kapazität von ca. 100% erreicht, während Batterie 1 bei ca. 25% ist. Um beide Batterien wieder vollständig zu laden, wird daher lediglich ein Zeitraum von ca. 1 h benötigt, d.h. die nächste Schicht könnte ohne Verzögerung beginnen.

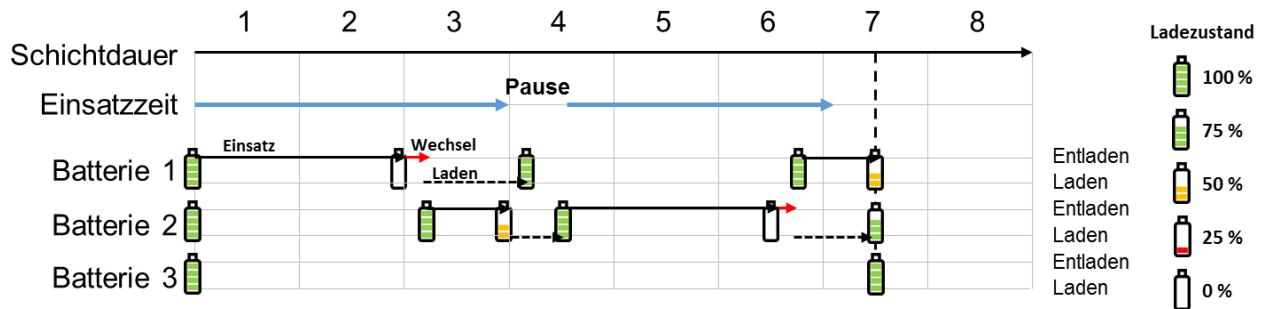


Abbildung 6-6: Batterieeinsatzzeit R1A, Laderate 1C

Generell gilt es, die Anzahl an Batteriewechseln auf ein Minimum zu reduzieren bzw. die Maschinen so zu betreiben, dass Batteriewechselzeiten z.B. auf Pausenzeiten gelegt werden können, um keine Produktionseinbußen hinnehmen zu müssen.

Als Alternative ist eine kabelgebundene Lösung zu sehen. Der Arbeitsbereich der Maschine ist auf ca. 250 m begrenzt und kann bei entsprechender Anbindung der Maschine mit einem Kabellader bedient werden, siehe Abbildung 3-2. Ggfs. muss dazu allerdings die Anordnung der Silo- und Verladeanlage verändert bzw. die Umgebung entsprechend angepasst werden (z.B. Vortrieb von weiteren Rangiergängen). [3]

Aktuell ist auf dem Markt keine Maschine verfügbar, die den Radlader R1A in seiner Umgebung ersetzen kann. Bisher gibt es keine batteriegetriebenen Radlader für die Baustoffindustrie in einer geeigneten Leistungsklasse und auch batteriebetriebene LHDs sind nicht in der notwendigen Leistungsklasse vorhanden. Kabelgebundene LHDs sind in entsprechenden Ausführungen auf dem Markt vorhanden und könnten eingesetzt werden. Allerdings muss bei den LHDs überprüft werden, ob diese LKWs beladen können, da dies in der betrachteten Grube gefordert wird. [3]

Des Weiteren wird in der Grube gefordert, dass die Maschine so flexibel sein muss, dass sie einen anderen Lader im Abbruch ersetzen kann. Hierdurch ist eine kabelgebundene Lösung nicht zeitlich effektiv einsetzbar.

6.1.2 Radlader R2A

Der Radlader ist bei seiner Arbeit im Schuttbetrieb stark ausgelastet und hat durch die beiden pendelnden Dumper kaum Stillstandszeiten. In der repräsentativen Schicht benötigt das Fahrzeug ca. 1645 kWh an Dieselenergie. Die Einsatzorte wechseln häufig.

Für die Maschine wurden Batterie- und Kabelbetrieb untersucht.

Ein vergleichbares batterieelektrisches Fahrzeug benötigt für die gleiche Tätigkeit aufgrund der besseren Wirkungsgrade ca. 539 kWh an Energie. Bei diesem Fahrzeug ist daher nur der Betrieb mit einem 3-Batterie-Wechselsystem denkbar. Sowohl 165er als auch 220er Batterien können verwendet werden, allerdings wird bei 165er Batterien ein zusätzlicher Wechsel gegen Ende der Schicht benötigt. Der erste Batteriewechsel der 165er erfolgt nach 110 min, der erste Wechsel der 220er erfolgt nach ca. 2,5 h.

Unter Berücksichtigung des Ladewirkungsgrads kann in der Pause von 0,5 h die Batterie um ca. 30 kWh wiederaufgeladen werden, was die Einsatzzeit einer Batterie unter den beschriebenen Einsatzbedingungen um

max. 19 min verlängert. Bei einer Laderate von 1,1 C wäre es möglich, die Maschine mit nur zwei Batterien zu betreiben, unter Verwendung von 220er Batterien sogar mit nur einem Wechsel.

Aufgrund der häufigen Einsatzortwechsel ist ein kabelgebundenes Arbeiten nur mit erhöhtem Aufwand umsetzbar, da die Maschine zum Umsetzen eine zusätzliche Energiequelle benötigt. Hierzu könnte ein Dieselaggregat oder eine Traktionsbatterie an den Radlader angehängt werden. Dieselaggregate für kabelgebundene LHDs sind bereits auf dem Markt erhältlich, bringen aber wieder das Problem der weiterhin vorhandenen (aber deutlich reduzierten) DME mit sich. Traktionsbatterien sind für diesen Einsatz noch nicht vorhanden. Eine weitere Alternative wäre es, die Maschine zu schleppen, falls der Antriebsstrang des Fahrzeugs dies zulässt. [3]

Bisher gibt es am Markt keine batteriegetriebenen Radlader für die Baustoffindustrie in einer geeigneten Leistungsklasse. Eine batteriebetriebene Maschine der entsprechenden Motorleistung ist verfügbar (RDH MM 600 EB). Kabelgebundene LHDs sind in entsprechenden Ausführungen auf dem Markt vorhanden und könnten eingesetzt werden, allerdings kann das Umsetzen bisher nur mit Dieselaggregaten erfolgen. Außerdem muss geprüft werden, ob mögliche Alternativmaschinen die geforderte Hubhöhe zum Beladen von hausinternen Dumpfern sowie zum außerplanmäßigen Beladen von LKWs erreichen. [3]

6.1.3 Dumper D1A

Der Dumper D1A benötigt in seiner repräsentativen Schicht ca. 1970 kWh Dieselenergie zum Verrichten seiner Tätigkeit. Die Dumper werden von den Ladern im Abbaugebiet beladen und transportieren das Material dann weiter zu einem zentralen Brecher, der das Material zerkleinert und an ein Förderband übergibt. Vor allem beim Beladen entstehen signifikante Leerlaufzeiten. Aufgrund der häufig gleichen Fahrwege werden für das Fahrzeug die beiden Konzepte Oberleitungsbetrieb und Batteriebetrieb untersucht.

Ein batteriebetriebener Dumper benötigt im Vergleich zu einer dieselgetriebenen Maschine 530 kWh und damit deutlich weniger Energie, da neben den besseren Wirkungsgraden auch die Verluste durch Leerlauf entfallen. Hinzu kommt, dass die Maschine während den ursprünglichen Leerlaufzeiten zwischengeladen werden kann. In der repräsentativen Schicht befindet sich das Fahrzeug ca. 144 min im Leerlauf. Bei 65 kW können ca. 126 kWh Energie zwischengeladen werden, bei einer Laderate von 1,1 C sogar mehr als zwei volle Batterieladungen. Während der Pause können zusätzliche ca. 30 kWh zwischengeladen werden.

Ohne Berücksichtigung der Zwischenladung im Stillstand und mit der Zwischenladung in der Pause kann der Dumper mit einem 3-Batterie-Wechselsystem mit 165 kWh-Batterien betrieben werden, benötigt in der Schicht allerdings drei Batteriewechsel, was zu einem Wechselzeitverlust von 45 min führt, der allerdings ausgeglichen werden kann. Mit Berücksichtigung der Zwischenladung reicht ein Batteriewechsel pro Schicht, um das Fahrzeug zu betreiben. Auch ist es denkbar, das Fahrzeug z.B. mit einer 220er Batterie und einer Laderate von 1,1 C wechsellos zu betreiben.

Eine alternative Lösung für diese Grube wäre das Installieren eines Oberleitungsnetzes auf den häufig genutzten Hauptstrecken. In Verbindung mit kleinen Traktionsbatterien auf den Fahrzeugen ist es möglich eine gewisse Zeit von der Oberleitung getrennt zu fahren. Die Batterien werden bei Fahrten auf der Hauptstrecke aufgeladen während die Maschine von der Fahrleitung versorgt wird. Dadurch könnte das benötigte Maß an Flexibilität in der Grube erreicht werden. Der Gesamtwirkungsgrad wäre gegenüber eine Vollbatterielösung höher, da der Energieverlust beim Laden der Batterien für die Energie auf den Hauptstrecken entfällt. [3]

Aktuell sind auf dem Markt oberleitungsgeführte Dumper mit 35 Tonnen Nutzlast vorhanden, allerdings gibt es noch keine elektrisch-hybriden Fahrzeuge mit Oberleitungskontakten und Traktionsbatterie. Daher kann der Dumper D1A nur bedingt durch ein Oberleitungsfahrzeug ersetzt werden. [3]

Batteriebetriebene Dumper sind in dieser Nutzlastklasse zwar noch nicht auf dem Markt vorhanden, allerdings kann ggfs. der vom Hersteller Artisan System Vehicles vorgestellte Dumper Z40 eingesetzt werden. Eine entsprechende Prüfung sollte erfolgen, sobald das Fahrzeug am freien Markt erhältlich ist.

6.1.4 Berauber B1A

Die Messungen an dem Fahrzeug haben gezeigt, dass vor allem das Umsetzen mit einem hohen Energieaufwand verbunden ist. In einer repräsentativen Schicht hat das Fahrzeug 1276 kWh Dieselenergie verbraucht. Ein elektrifizierter Berauber benötigt im Vergleich zum Dieselfahrzeug 672 kWh Energie für den gleichen Einsatz. Für das Fahrzeug wurden die Konzepte Batterie- und Kabelbetrieb näher untersucht.

Aufgrund der hohen Energiemenge kann das Fahrzeug nur mit einem 3-Batterie-Wechselsystem mit 220er Batterien oder größer betrieben werden. Die Pausenzeiten in einer Schicht (in der rep. Schicht min. 0,5 h) kann zum Zwischenladen der Batterien um ca. 30 kWh genutzt werden, was deren Reichweite um ca. 15 min verlängert. Damit ergeben sich drei Wechsel pro Schicht und damit ein Zeitverlust von 45 Minuten. Diese können allerdings ohne weiteren Wechsel ausgeglichen werden. Durch Erhöhen der eingebauten Batteriekapazität, z.B. auf 330 kWh, was zwei 165er Batterien entspricht, könnte das Fahrzeug mit nur einem Wechsel in der gesamten Schicht betrieben werden.

Da vor allem das Fahren der Maschine mit einem hohen Energieaufwand verbunden ist, sollte die notwendige Batteriewechselstation entweder in unmittelbarer Umgebung des Fahrzeugs aufgestellt werden oder die Wechselbatterie durch ein Servicefahrzeug zum Berauber transportiert werden.

Alternativ zur Batterie kann auch ein kabelgebundener Berauber eingesetzt werden. Da der Einsatzradius des Beraubers sehr begrenzt ist, ist die Kabelanbindung denkbar. Das Fahrzeug kann zum Beispiel mit einem anschließbaren Stromaggregat oder einer Traktionsbatterie eigenständig Umsetzfahrten durchführen. Im Falle einer anhängbaren Batterie könnte diese am vorhandenen Grubennetz zwischengeladen werden, sobald das Fahrzeug am gewünschten Einsatzort angekommen und über das Kabel am Grubennetz angebunden ist. [3]

Aktuell sind keine elektrifizierten Berauber am Markt verfügbar, weder kabelgebunden noch batteriebetrieben. Dementsprechend sind die oben genannten Lösungen zwar möglich, allerdings nicht kurzfristig und langfristig nur bedingt umsetzbar. [3]

6.2 Grube B

In der Grube B ist die Rekuperation durch Bergfahrten generell möglich, da die Lagerstätte nicht horizontal sondern vertikal im Gebirge liegt und entsprechend abgebaut wird.

6.2.1 LHD 1B

Der Lader benötigt in seiner repräsentativen Schicht eine Dieselenergie von ca. 1329 kWh. Aufgrund der häufigen Einsatzortwechsel und der Umgebung vor Ort wird ein kabelgebundenes Konzept für diesen LHD ausgeschlossen. Daher wird im Folgenden nur der Einsatz einer Batterie untersucht.

Eine batteriebetriebene Maschine benötigt für die repräsentative Schicht ca. 607 kWh Energie und kann daher mit einem 3-Batterie-Wechselsystem mit 165er Batterien betrieben werden. Die erste Batterie muss nach ca. 90 Minuten gewechselt werden. Durch Zwischenladen in der Pause kann die Reichweite der Batterie um ca. 30 Minuten erhöht werden. Während der Schicht sind drei Batteriewechsel notwendig. Der dadurch entstehende Zeitverlust von ca. 45 Minuten kann aber mit der letzten Batterie kompensiert werden.

Einzigartig im Vergleich mit den anderen Gruben der Studie ist, dass in dieser Grube ein starkes Gefälle von stellenweise bis zu 18 % besteht. Dadurch werden Rekuperationsvorgänge ermöglicht. Die Tätigkeit „Bergaufladen“, ein Teil des grubenspezifischen Arbeitsprofils, wurde hierfür untersucht. Je nachdem ob die Maschine voll beladen die Steigung herab oder hinauf fährt, ist das Rekuperationspotential größer. Nach Abbildung 6-3 können bei einem Quotienten $\frac{m_{Ab}}{m_{Auf}} = 130\%$ und einer durchschnittlichen Steigung von bis zu 16%

bis zu 85% der zum Hochfahren notwendigen Energie rekuperiert werden. Bei 194 kWh in der repräsentativen Schicht entspricht dies ca. 165 kWh Energie. Hiervon könnten nach Formel (IX) ca. 127 kWh der Batterie wieder zugeführt werden. Bei 165er Batterien kann dadurch auf einen Wechsel verzichtet werden. Die Nutzung

dieses Potentials setzt einen rekuperationsfähigen Antriebsstrang der Maschine voraus, der nach heutigem Stand der Technik bei dieser Maschine noch nicht vorliegt.

Ein vergleichbarer Lader ist als batteriebetriebene Maschine auf dem Markt verfügbar. Daher kann diese Maschine ersetzt werden. [3]

6.2.2 Betontransporter BT1B

Der Betontransporter wird dazu eingesetzt, um Beton von der Betonladestelle in die Gänge zu transportieren, in denen Material zum Ausbau benötigt wird. Die Betonladestelle befindet sich in etwa mittlerer Höhe des Bergwerks. Dadurch legt das Fahrzeug regelmäßig signifikante Höhenunterschiede zurück, was ein Rekuperationspotential darstellt. Bestimmte Teile der Wendel werden während jeder Fahrt wiederkehrend benutzt. Die Abschnitte variieren je nach Ziel. Dementsprechend kommt eine kabelgebundene Lösung nicht in Frage. Auch Fahrleitungen sind in diesem Fall nicht zielführend. Daher wird für den Betontransporter ein batteriebetriebenes Fahrzeug untersucht.

Während einer repräsentativen Schicht benötigt das dieselpetriebene Fahrzeug ca. 397 kWh Dieselenergie. Ein elektrifiziertes Fahrzeug benötigt für den gleichen Einsatz aufgrund der besseren Wirkungsgrade des Antriebsstrangs ca. 168 kWh an Energie. Damit kann das Fahrzeug unter Berücksichtigung einer kurzen Pause zum Zwischenladen mit einer 165 kWh-Batterie während einer kompletten Schicht betrieben werden. Um die Batteriegröße weiter reduzieren zu können, wäre es denkbar, die Maschine während des Betonbe- und entladens z.B. durch eine Kabelverbindung zwischenzuladen. Das Beladen mit Beton dauert ca. 20 min, die Zeit zum Entladen an der Spritzbetonpumpe wurde nicht erfasst. In jedem Transportspiel könnten bei 65 kW Ladeleistung dadurch ca. 22 kWh Energie nachgeladen werden, womit die Maschine eine Schicht vollständig absolvieren kann. Bei einer durchschnittlichen Steigung von 16% und einem Massenquotienten von $\frac{m_{Ab}}{m_{Auf}} = 55\%$ hat die Maschine in ihrer repräsentativen Schicht ein Rekuperationspotential von ca. 35% der zur Hochfahrt notwendigen Energie. Bei drei Auffahrten in der Schicht á 88 kWh ergeben sich so 92% rückgewinnbare Energie. Daraus berechnet sich die rückspeisbare Energie zu $E_{Rek,netto} = 71\text{ kWh}$.

Auf dem Markt ist bisher kein batteriebetriebener Betonmischer vorhanden.

6.2.3 Mobilbagger B1B

Der als Berauber eingesetzte Mobilbagger hat eine vergleichsweise kurze Einsatzdauer von 2 h pro Schicht. Währenddessen benötigt er ca. 229 kWh Dieselenergie. Für ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug muss ca. 102 kWh Energie von der Batterie bereitgestellt werden.

Auf dem Markt ist eine batteriebetriebene Maschine vergleichbarer Leistungsklasse vorhanden, die den Mobilbagger ersetzen könnte, siehe Kapitel 5.3.6. Die Maschine von der Firma Suncar ist mit einer nicht wechselbaren 170 kWh Batterie ausgestattet. Der Hersteller der Maschine gibt eine aktuelle Ladezeit bei einem Ladestrom von 63 A mit 4 h an und weist zusätzlich darauf hin, dass eine Ladestation mit 150 kW Ladeleistung Gegenstand der aktuellen Entwicklung ist, die das Laden des Akkus in ca. 1 h ermöglichen soll. Dies entspricht einer Laderate von fast 0,9 C. [53]

Aufgrund der geringen Einsatzzeit der Maschine von nur 2 h pro Schicht ist die notwendige Ladezeit für die Batterie unproblematisch. Daher kann der oben genannte Bagger eingesetzt werden.

Auch denkbar ist es, den Mobilbagger in eine elektrifizierte Version mit einer Kombination aus Traktionsbatterie und Kabelanschluss umzurüsten. Die Batterie dient zum Umsetzen der Maschine. Vor Ort wird die Maschine dann über Kabel an das Grubennetz angeschlossen und so der große Anteil des Energiebedarfs des Arbeitsprozesses gedeckt. Während die Maschine am Grubennetz angeschlossen ist, kann die Traktionsbatterie wieder geladen werden, so dass ein erneutes Umsetzen wieder möglich ist.

Der Mobilbagger kann nach dem aktuellen Kenntnisstand durch eine am Markt vorhandene gleichwertige Maschine mit fest installierter Batterie ersetzt werden. Ein kabelgebundenes Konzept mit Traktionsbatterie ist in dieser Leistungsklasse nicht auf dem Markt vorhanden.

6.3 Grube C

Aufgrund der weitestgehend ebenen Lagerstätte ist in der Grube C Rekuperation aus Bergfahrten vernachlässigbar.

6.3.1 Fahrlader LHD1C

Der Fahrlader wird im Mehrschichtbetrieb eingesetzt und hat dabei einen sehr hohen Energieumsatz. Weiterhin wird die Maschine flexibel an verschiedenen Orten eingesetzt.

Für die Maschine wurde ein batterie- und kabelgebundener Betrieb näher untersucht.

Der dieselbetriebene LHD verbraucht in der repräsentativen Schicht 2834 kWh Dieselenergie. Der notwendige Energiegehalt eines batteriebetriebenen LHDs liegt aufgrund des verbesserten Wirkungsgrads des elektrischen Antriebsstrangs bei ca. 1194 kWh. Mit der nach dem Stand der Technik maximalen gravimetrischen Energiedichte von 250 Wh/kg hätte eine entsprechende Batterie eine Masse von ca. 5 t und benötigt einen Bauraum von bis zu 8 m³. Dem entgegen steht der Kraftstofftank mit einer Größe von 0,7 m³ und einem Gewicht von 560 kg. Eine Batterie dieser Größe würde vor allem die Nutzlast der Maschine beeinflussen. Daher ist ein Batteriewechselsystem für diese Maschine zwingend. [6]

Darüber hinaus sind die bisher angenommenen Batteriegrößen 165 kWh und 220 kWh zu klein für die Maschine, was zu 6 und mehr Batteriewechsel in der Schicht führen würde. Daher wird für den Fahrlader ein 3-Batterie-Wechsel-System mit 3 Batteriepaketen mit jeweils mindestens 440 kWh Energieinhalt vorgeschlagen. Jedes Paket setzt sich aus zwei 220 kWh Batterien zusammen.

Die Batterien müssten nach ca. 2,5 h ausgetauscht werden. Bei Batterien dieser Größenordnung sollte die Ladeleistung von 65 kW erhöht werden, da ansonsten das Laden einer Batterie fast 7 h in Anspruch nimmt. Durch Zwischenladen in einer einstündigen Pause kann die Reichweite einer der Batterien um ca. 20 Minuten verlängert werden. Trotz der beiden notwendigen Wechsel während der Schicht kann die Maschine durch das Zwischenladen auch den Wechselzeitverlust kompensieren. Um eine direkt anschließende zweite Schicht zu ermöglichen, ist eine weitere volle Batterie notwendig.

Bei Erhöhung der Laderate auf 1,1 C kann die Maschine bei dem untersuchten Energieverbrauch mit zwei Batterien angegebener Kapazität im Wechsel durchgehend betrieben werden.

Aufgrund der von Seiten des Betreibers geforderten hohen Flexibilität der Maschine ist eine rein kabelgebundene Lösung nur schwer umsetzbar. Für ein entsprechendes Konzept ist zumindest eine zusätzliche Energiequelle für Umsetzfahrten zwischen den Revieren notwendig. Eine entsprechende Traktionsbatterie könnte entweder auf dem Fahrzeug untergebracht oder an das Fahrzeug angehängt werden. Die aktuell am Markt verfügbare maximale Kabellänge bei LHDs beträgt ca. 250 m – 300 m. Für den Bohr- und Sprengbetrieb in der Grube C wird eine Kabellänge zwischen 300 m und 400 m benötigt. Die größte Hürde für ein kabelgebundenes Fahrzeug wäre der Abbau selbst, da in der Grube C mehrere Lader im gleichen Revier eingesetzt werden. Ein deutlich erhöhter Planungsaufwand wäre notwendig um zu verhindern, dass sich die Fahrzeuge gegenseitig behindern oder die Kabel beschädigen. Daher wird ein kabelgebundenes Konzept als nicht zielführend angesehen. [6]

Aktuell sind am Markt noch keine Batterie-LHD mit der geforderten Nutzlast von 21 t zu finden. Laut Angaben des Herstellers Artisan soll im Frühjahr 2018 ein batteriebetriebener LHD mit einer Nutzlast von 16 Tonnen auf den Markt gebracht werden, der ggfs. als Ersatz der Maschine eingesetzt werden könnte. Es muss geprüft

werden, ob die benötigte Energiemenge sowie die geforderte Ladeleistung zur Verfügung gestellt werden kann. Aktuell werden von Artisan Batteriepacks mit 300 kWh und einer Ladestation von 65 kW angeboten. [6] Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass es für den Fahrlader LHD1C nach aktuellem Stand der Technik keine Lösung gibt, die Maschine im Kontext ihres Einsatzes zu elektrifizieren. [6]

6.3.2 Berauber B1C

Der Gesamtenergieverbrauch des Beraubers während der repräsentativen Schicht beträgt 1401 kWh Dieselenergie. Ein entsprechendes elektrifiziertes Fahrzeug würde aufgrund der besseren Wirkungsgrade nur ca. 574 kWh benötigen. Für die Maschine werden Kabel- und Batteriebetrieb untersucht.

Mit einem 3-Batterie-Wechselsystem mit jeweils 220 kWh Energieinhalt kann die Maschine während einer Schicht durchgehend betrieben werden. Die erste Batterie der Maschine müsste nach ca. 2 h 20 min gewechselt werden. Insgesamt wären zwei Wechsel pro Schicht notwendig. Weiterhin kann während Pausenzeiten zwischengeladen werden, was die Reichweite einer Batterie um bis zu 36 min erhöhen kann. Die Wechselzeitverluste können mit der vorhandenen Energie kompensiert werden. [6]

Wird anstelle der 220er eine 165er Batterie verwendet, so erhöht sich die Wechselanzahl auf 3, was zu ca. 45 Minuten Wechselzeit führt, die allerdings ebenfalls mit der vorhandenen Batteriekapazität kompensiert werden kann.

Bei Erhöhung der Laderate auf 1,1 C kann die Maschine mit einem 2-Batterie-Wechsel-System betrieben werden, wobei hierbei die größere Batterie gewählt werden sollte, um die Anzahl der Wechsel möglichst gering zu halten.

Alternativ könnte ein kabelgebundener Berauber eingesetzt werden. Der lokale Arbeitsbereich der Maschine ist mit ca. 15 x 7 Meter eher gering, allerdings wird der Berauber in verschiedenen Kammern im gesamten Abbaubereich eingesetzt und benötigt daher eine flexible Möglichkeit, um Umsetzfahrten durchführen zu können. Daher bietet sich eine Kombination eines Kabelanschlusses mit einem Dieselmotor oder einer Batterie als ein weiteres Konzept an. Kabelgebundene LHDs werden bereits mit einer vergleichbaren Motorleistung bei einer Versorgungsspannung von 1000 V und mit einer Kabellänge von 250 m angeboten, siehe [21]. Mit einem geeigneten Anschlusspunkt entlang der Hauptvortriebsstrecke und einem entsprechenden Netzausbau ist ein Einsatz bis ans Ende mehrerer Kammern möglich. [6]

Das Kabel der Maschine muss vor Beschädigungen durch selbständig herabfallendes oder beim Berauben gelöstes Material geschützt werden. Ein entsprechend robustes Kabel sowie ein geschützt eingebauter Abrollmechanismus sind unumgänglich. [6]

Aktuell sind noch keine elektrifizierten Berauber am Markt verfügbar, weder als Batteriefahrzeug noch als Kabel- Batterie-Hybrid. Die benötigte Motorleistung sowie Kabellänge und Batteriekapazität sind bereits auf dem Markt vorhanden und müssen an das Fahrzeug angepasst werden. Durch Erhöhung der Versorgungsspannung der Maschine können dünnere Kabel verwendet werden, was die Reichweite der Maschine steigern würde. Dies wiederum würde den Energiebedarf für Umsetzfahrten reduzieren. [6]

6.3.3 Schiebekastenfahrzeug D1C

Das Schiebekastenfahrzeug D1C benötigt 740 kWh Dieselenergie während der repräsentativen Schicht. Ein elektrifiziertes (batteriebetriebenes) Fahrzeug benötigt ca. 204 kWh, da Leerlaufverluste entfallen.

Für die Maschine wurden die Möglichkeiten Batteriebetrieb, Fahrleitungen und Ersatz durch flexible Förderbänder untersucht.

Aufgrund der im Vergleich zu anderen Fahrzeugen eher geringen Energieanforderung kann das SKF mit einem 2-Batterie-Wechselsystem á 165 kWh betrieben werden. Durch Zwischenladen während einer Pause von

1 h kann bei 65 kW Ladeleistung die Reichweite der eingebauten Batterie um ca. 90 Minuten verlängert werden. Dadurch wäre es möglich, das Fahrzeug während der gesamten Schicht mit nur einer Batterie zu betreiben.

Vor allem am Continuous Miner ergeben sich häufige und länger andauernde Stillstandszeiten des SKF, was Zwischenladen möglich macht. Insofern durch die Zwischenladungen genug Energie übertragen werden kann, wäre sogar eine deutlich kleinere Batterie denkbar. Hierfür wird allerdings ein Ladekonzept benötigt, welches möglichst ohne Eingriff eines Menschen (Stecker oder Ähnliches) die Energieübertragung sicherstellen kann. Da die Position des SKF am CM vorgegeben ist, wäre es möglich, die Ladevorrichtung an dieser Maschine anzubringen, die selbst bereits am Grubennetz angeschlossen ist. Entsprechende Konzepte sind noch nicht auf dem Markt vorhanden.

Eine weitere Möglichkeit für die Maschine wäre die kontinuierliche Energieübertragung durch Oberleitungen. Der Energiebedarf der Maschine würde sich dadurch auf 175 kWh reduzieren. Um oberleitungsfreie Wegstrecken zu überbrücken, können Fahrzeuge eingesetzt werden, die zusätzlich über ein kleines Dieselaggregat oder im Idealfall über eine Traktionsbatterie verfügen. Aktuell ist noch kein Konzept eines fahrleitungsgelinkten Dumpers in Kombination mit Traktionsbatterie auf dem Markt vorhanden. [6]

Als Alternative zum Dumper, einem Unstetigfördermittel, könnten flexible Förderbänder eingesetzt werden. Dies würde den Einsatz von Dumpern hinter dem Continuous Miner unnötig machen. Hinzu kommt der Vorteil, dass diese Förderbänder rein elektrisch ausgeführt werden und dem Vortrieb des CM selbstständig folgen können. Ein modularer Aufbau erlaubt eine Anpassung an den Abstand zur Bandanlage. Abbildung 6-7 zeigt schematisch das Konzept zur lokalen emissionsfreien Gewinnung. [6]

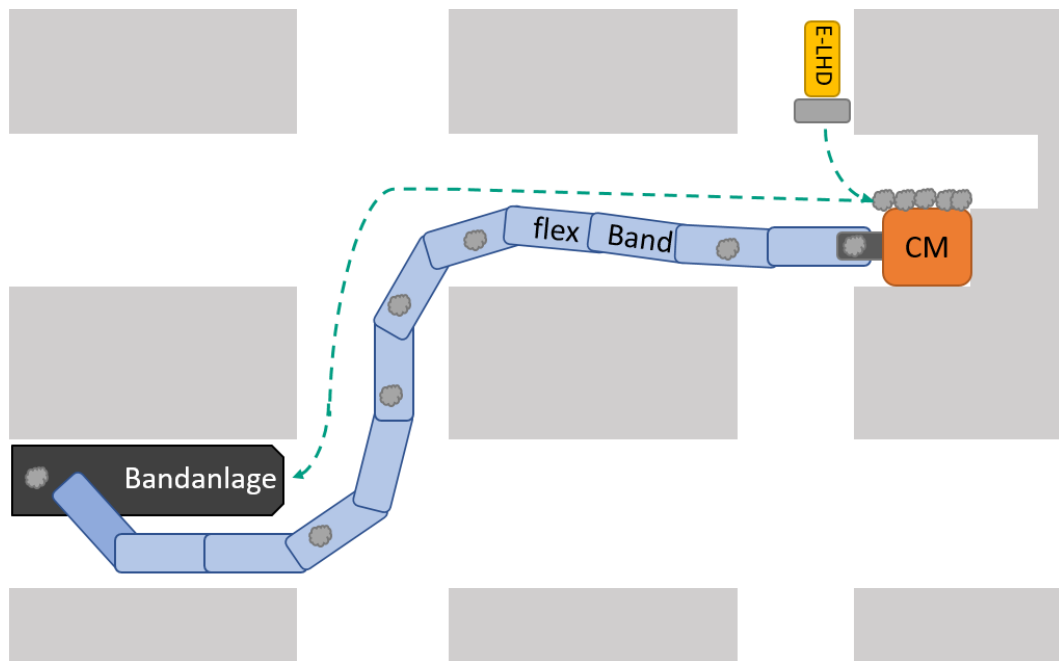


Abbildung 6-7: Mögliches Konzept zur lokalen emissionsfreien Gewinnung [6]

Bei der Sicherstellung eines kontinuierlichen Einsatzes des CM in den Revieren kann durch den Einsatz flexibler Förderbänder die Produktion möglicherweise sogar gesteigert werden. Allerdings sind diese Anlagen in der Anschaffung sehr kostspielig und deutlich unflexibler als einzelne Dumper, was z.B. beim Ausfall des entsprechenden CMs oder der Förderanlage dafür sorgen würde, dass die gesamte Gewinnungskette stillsteht. Damit die Anlage wirtschaftlich eingesetzt werden kann muss außerdem sichergestellt werden, dass der CM eine ausreichend hohe Förderleistung erreicht. [6]

Aktuell sind noch keine batteriebetriebenen Dumper mit einer Nutzlast von 30 Tonnen auf dem Markt vorhanden, allerdings kann ggfs. der vom Hersteller Artisan System Vehicles vorgestellte Dumper Z40 eingesetzt werden. Eine entsprechende Prüfung sollte erfolgen, sobald das Fahrzeug am freien Markt erhältlich ist.

Fahrleitungsgebundene Dumper gibt es mit einer Nutzlast von 35 Tonnen auf dem Markt, allerdings muss deren aktuelle Verfügbarkeit noch überprüft werden. Flexible Förderbandanlagen sind auf dem Markt vorhanden, allerdings ist deren Förderleistung um den Faktor 1,5 – 2 über der Förderleistung der eingesetzten Continuous Miner, was zu einer nur unzureichenden Auslastung und dadurch zu einer eingeschränkten Wirtschaftlichkeit der Anlage führen könnte. [6]

6.3.4 Fahrlader LHD2C

Der im Versatz eingesetzte Fahrlader LHD2C benötigt pro Schicht ca. 2470 kWh Dieselenergie zur Ausübung seiner Tätigkeit. Mehrere Fahrzeuge werden gleichzeitig im Mehrschichtbetrieb eingesetzt. Ein entsprechender batterieelektrischer LHD benötigt für die gleichen Tätigkeiten aufgrund der besseren Wirkungsgrade ca. 1012 kWh Energie pro Schicht. Für die Maschine wurden der Kabel- und Batteriebetrieb untersucht.

Aufgrund der ähnlichen Energieanforderungen wie der LHD1C ist für den LHD2C ebenfalls ein 3-Batterie-Wechselsystem mit Batterien á 440 kWh empfehlenswert. Die erste Batterie müsste nach ca. 3 h gewechselt werden. Durch Zwischenladen in einer einstündigen Pause kann die Reichweite einer Batterie um ca. 30 min verlängert werden. Insgesamt sind zwei Wechsel notwendig. Die dadurch entstehenden Zeitverluste können aber mit der vorhandenen Batteriekapazität kompensiert werden.

Durch Erhöhen der Laderate auf 1,1 C kann die Maschine auch mit einem 2-Batterie-Wechsel-System á 440 kWh Batterien betrieben werden. Geringere Kapazitäten machen keinen Sinn, da ansonsten die Batteriewechsel zu viel Zeit in Anspruch nehmen würden.

Da die Versatzstrecke in der Grube C kleine Steigungen enthält, kann die benötigte Energiemenge durch Rekuperation voraussichtlich weiter gesenkt werden. Entsprechende Untersuchungen wurden allerdings noch nicht durchgeführt.

Wie auch beim LHD1C sind die von Seiten des Betreibers an den LHD2C gestellten Anforderungen hinsichtlich der Flexibilität sehr hoch, da er z.B. häufig Umsetzfahrten bewerkstelligen können muss. Daher ist auch hier ein Batterie-LHD vorzuziehen. [6]

Aktuell ist kein LHD am Markt verfügbar, der den LHD2C in seinem entsprechenden Einsatz ersetzen kann. Der vom Hersteller Artisan angekündigte batterieelektrische LHD mit 16 t Nutzlast könnte den LHD2C nach aktuellem Kenntnisstand hinsichtlich der Maschinendaten ersetzen. [6]

6.4 Grube D

Aufgrund der weitestgehend ebenen Lagerstätte ist in der Grube D Rekuperation aus Bergfahrten vernachlässigbar.

6.4.1 Radlader R1D

Der R1D benötigt in einer repräsentativen Schicht ca. 1265 kWh Dieselenergie. Die Maschine wird typischerweise nur in der ersten Schicht eingesetzt. Aufgrund des hohen Anteils an wechselnden Einsatzbereichen und Umsetzfahrten wurde für die Maschine nur der Batteriebetrieb untersucht.

Zur Ausübung seiner Tätigkeit benötigt das batterieelektrische Fahrzeug eine Energiemenge von 563 kWh an elektrischer Energie. Um das Fahrzeug durchgehend betreiben zu können, ist daher ein 3-Batterie-Wechselsystem mit mindestens 165 kWh Energieinhalt pro Batterie notwendig. Die erste Batterie müsste nach ca. 90 Minuten gewechselt werden. Durch Zwischenladen in den Pausenzeiten (ca. 1 h in der rep. Schicht)

kann die Reichweite einer Batterie um bis zu 30 min erhöht werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Maschine nur in der ersten Schicht im Einsatz ist, den Rest des Tages allerdings nicht bewegt wird, wäre für diesen Radlader auch ein 1-Batterie-Konzept mit einer entsprechend großen Batterie denkbar. [6]

Die durch drei Wechsel verursachten Zeitverluste von ca. 45 Minuten können mit der vorhandenen Batteriekapazität kompensiert werden. Durch Erhöhen der Laderate auf 1,1 C kann die Maschine mit einem 2-Batterie-Wechsel-System á 165 kWh betrieben werden. Um die Wechselzeit zu reduzieren wäre es sinnvoll, die Kapazität der Batterien auf 220 kWh zu erhöhen.

Aktuell sind noch keine batteriebetriebenen Radlader dieser Größe auf dem Markt vorhanden. [6]

6.4.2 Berauber B1D

In der Grube D konnte keine Messung des Beraubers erfolgen. Da es sich aber um das gleiche Modell mit einem ähnlichen Tätigkeitsprofil wie in Grube C handelt, ist das in 6.3.2 beschriebene Konzept ebenfalls auf diese Grube anwendbar.

6.4.3 Radlader R2D

Der R2D wird täglich in der ersten Schicht eingesetzt. Die restlichen Schichten steht er still. Während der repräsentativen Schicht benötigt das Fahrzeug ca. 2574 kWh Dieselenergie. Sein Einsatzgebiet erstreckt sich über mehrere Kammern, die von den Versatz-LKWs abwechselnd befüllt werden. Daher hat die Maschine häufige Umsetzfahrten in einer Schicht, was gegen eine Kabelanbindung spricht. Deswegen wurde für diese Maschine nur der Batteriebetrieb untersucht.

Die während der repräsentativen Schicht durch eine Batterie bereitzustellende Energie beträgt ca. 1024 kWh. Daher wird auch für diese Maschine ein 3-Batterie-Wechselsystem mit jeweils 440 kWh betrachtet. Dabei muss die erste Batterie nach ca. 1,4 h gewechselt werden. Es ergeben sich insgesamt drei Batteriewechsel während einer Schicht. Der daraus entstehende Zeitverlust von ca. 45 Minuten kann aber durch die vorhandene Batteriekapazität kompensiert werden. Durch Zwischenladen in einer einstündigen Pause kann die Reichweite einer Batterie um ca. 25 Minuten verlängert werden.

Durch Erhöhen der Laderate auf 1,1 C kann auch diese Maschine mit einem 2-Batterie-Wechselsystem á 440 kWh betrieben werden.

Aktuell sind noch keine batteriebetriebenen Radlader dieser Größe auf dem Markt vorhanden. [6]

6.4.4 Transportfahrzeug D1D

Für die Transportfahrzeuge wurden der Batteriebetrieb und die Anbindung an eine Oberleitung untersucht. Die Untersuchung wurde für den Dumper D1D durchgeführt, können aber auf die üblichen Transportfahrzeuge wie z.B. LKWs übertragen werden. [6]

Der Dumper benötigt in seiner repräsentativen Schicht 2134 kWh Dieselenergie. Ein elektrifizierter Dumper benötigt für den gleichen Einsatz ca. 758 kWh Energie aufgrund der besseren Wirkungsgrad und der entfallenden Leerlaufverluste.

Für die Maschine sind verschiedene Möglichkeiten von Batteriekonzepten denkbar. Zum Einen kann die Maschine mit einem 3-Batterie-Wechsel-System mit Batterien á 330 kWh durchgehend betrieben werden. Die Verlustzeit von 45 Minuten durch die drei notwendigen Wechsel kann mit der vorhandenen Kapazität kompensiert werden. Zwischenladen wäre bei diesem Konzept nicht notwendig.

Alternativ kann die Maschine während der Schicht mit einem 3-Batterie-Wechsel-System á 220 kWh betrieben werden, wenn die Möglichkeit zum Zwischenladen während einer einstündigen Pause sichergestellt ist. Dabei

wären pro Schicht drei Batteriewechsel notwendig. Der Zeitverlust von 45 Minuten kann ebenfalls kompensiert werden.

Insofern Stillstandszeiten am Umschlagplatz zum Zwischenladen verwendet werden können, könnte der Fahrzeugbatterie bei einer Stillstandszeit von ca. 156 min bei 65 kW Ladeleistung ca. 152 kWh an Energie zugeführt werden. Dadurch ist es möglich, eine Schicht mit einem 2-Batterie-Wechsel-System á 220 kWh auszuführen. Dies reduziert die Wechselverluste bei 2 Wechseln auf ca. 30 Minuten, welche durch die vorhandene Batteriekapazität kompensiert werden können.

Durch Erhöhen der Laderate auf 1,1 C und Zwischenladen in der Pause wäre bei dieser Maschine sogar ein 1-Batterie-Betrieb möglich. Da das Zwischenladen allerdings wichtig ist um die geforderte Einsatzzeit zu erreichen, sollte hierfür eine automatische Ladevorrichtung entwickelt werden, die die zur Verfügung stehende Ladezeit bestmöglich und ohne Einfluss des Fahrers ausnutzt.

Als Alternative zum Batteriebetrieb könnten in der Grube D oberleitungsgeführte Dumper eingesetzt werden, was den Energiebedarf auf 716 kWh senken würde. Die zurückgelegten Strecken im Versatz in der Grube sind zu weiten Teilen gleich und ändern sich lediglich in Abhängigkeit der zu versetzenden Kammern. Fahrleitungen lassen sich sowohl an der Firste als auch an der Sohle verlegen. Abbildung 6-8 zeigt den Aufbau eines möglichen Fahrleitungsnetzes. [6]

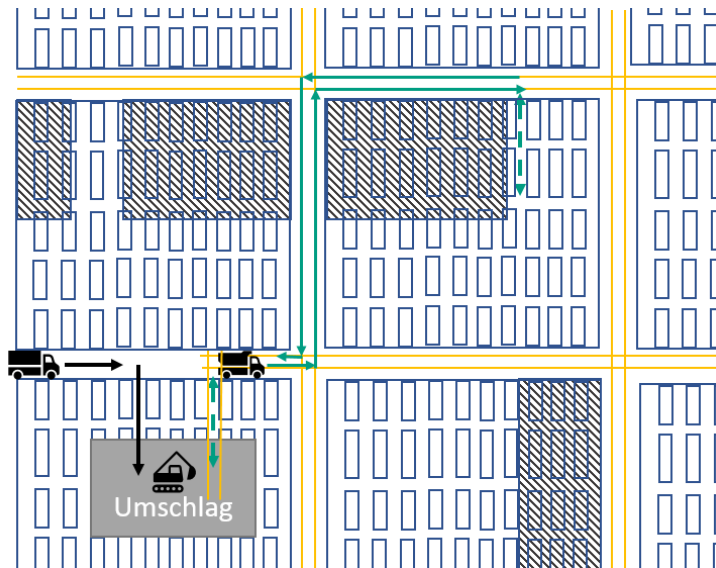


Abbildung 6-8: Fahrleitungsnetz für den Versatz [6]

Um die Flexibilität der Fahrzeuge zu erhöhen, sollte eine Kombination aus Schleppkabeln und Oberleitungskontakten eingesetzt werden, entsprechende Fahrzeuge sind dem Stand der Technik bekannt (siehe hierzu Kapitel 5.3). Alternativ kann eine zusätzliche Traktionsbatterie verwendet werden. Diese könnte während der Fahrt an den Fahrleitungen geladen werden und die „letzte Meile“ zum Zielort überbrücken. Ein entsprechendes Mischkonzept ist allerdings noch nicht auf dem Markt vorhanden. [6]

Aktuell sind noch keine batteriebetriebenen Dumper mit einer Nutzlast von 38 Tonnen auf dem Markt vorhanden, allerdings kann ggfs. der vom Hersteller Artisan System Vehicles vorgestellte Dumper Z40 eingesetzt werden. Eine entsprechende Prüfung sollte erfolgen, sobald das Fahrzeug am freien Markt erhältlich ist.

Fahrleitungsgebundene Dumper gibt es mit einer Nutzlast von 35 Tonnen bzw. 50 Tonnen auf dem Markt, allerdings muss deren aktuelle Verfügbarkeit noch überprüft werden. [6]

6.5 Zusammenfassung AP3

Die durchgeführte Studie hat gezeigt, dass am Markt Möglichkeiten vorhanden sind, um die Dieselmotoremissionen im Untertagebau, z.B. durch elektrifizierte Fahrzeuge, durch eine Umstellung von konventioneller auf schneidende Gewinnung oder durch auf Emissionsreduzierung ausgelegte Betriebsanweisungen für die einzelnen Fahrzeuge, zu reduzieren. Die Studie zeigt auch, dass eine vollständige Emissionsreduzierung noch nicht möglich ist. Folgende Gründe können hierfür angeführt werden:

- Eine Umstellung von konventioneller auf schneidende Gewinnung ist nur in Betrieben möglich, die die damit verbundenen hohen Investitionen leisten können bzw. die einen entsprechenden Materialumsatz pro Jahr haben. Zudem müssen nach Angaben der Grubenbetreiber die Materialvorkommen flächig sein und eine große Mächtigkeit mit nicht häufig wechselnden Abbauorten, wie sie z.B. in Salzbergwerken vorliegen, aufweisen. Weiterhin sind die Maschinen sehr groß und benötigen daher große Streckenquerschnitte. Laut Aussage der Betreiber ist der Prozess der schneidenden Gewinnung sehr störungsanfällig und komplex. Außerdem ist die Frage des emissionsfreien Materialtransports von der Gewinnungsmaschine noch nicht abschließend geklärt.
- Aktuell stehen auf dem Markt nur kleine batteriebetriebene LHDs zur Verfügung. Sie sind nicht für alle von ihnen geforderten Tätigkeiten geeignet bzw. können häufig die geforderte Umschlagsleistung nicht erreichen. Weiterhin sind batteriebetriebene Fahrzeuge deutlich teurer in der Anschaffung und benötigen in zeitlich wiederkehrenden Abschnitten neue Batterien. Eine vollständig neue Infrastruktur und eine auf sie ausgerichtete Prozessplanung muss zusätzlich einmalig erstellt werden. Diese beiden Argumente begründen schließlich die Aussage, dass die konventionelle Gewinnung (Bohren & Sprengen) nach dem heutigen Stand der Technik durch elektrifizierte Fahrzeuge nur im begrenzten Umfang dieselmotoremissionsfrei durchgeführt werden kann. Diese Einschätzung muss neu bewertet werden, wenn sich das Angebot des Marktes an für die konventionelle Gewinnung geeignete Maschinen ändert.
- Generell haben die am Markt verfügbaren Batterien noch keine ausreichende gravimetrische und / oder volumetrische Energiedichte, um den Anforderungen heute schon gerecht werden zu können. Der Trend zeigt aber, dass sich sowohl die Kosten als auch die gravimetrische Energiedichte von Batterien in den nächsten Jahren bedeutend ändern werden. [19]
- Die Laderaten aktuell auf dem Markt verfügbarer Ladesysteme sind noch zu gering und schränken daher die Anwendung batteriebetriebener Fahrzeuge deutlich ein. Dem Stand der Forschung sind schon heute Verfahren bekannt, mit denen Laderaten von 1 C und höher erreicht werden können – diese müssen noch in Form von für den Markt mobiler Arbeitsmaschinen kompatiblen technischen Systemen umgesetzt werden.
- Kabelgebundene Fahrzeuge (LHDs, Shuttle-Cars) können in vielen Bereichen der Gewinnung eingesetzt werden, haben aber aufgrund des Schleppkabels eine geringere Flexibilität und eine geringere Arbeitsgeschwindigkeit, als die dieselbetriebenen Fahrzeuge. Hinzu kommen Probleme mit den Abrollmechanismen auf den Fahrzeugen sowie eine mögliche Beschädigungen des Kabels durch die Umgebung. Zwei kabelgebundene Fahrzeuge an derselben Ortsbrust arbeiten zu lassen ist zwar denkbar, bedarf aber einer sehr sorgfältigen Prozessplanung. Die Reichweite der Fahrzeuge ist begrenzt, was eine Neuorganisation des Betriebs notwendig macht.
- Andere Antriebstechnologien, die lokale Emissionsfreiheit versprechen (LNG, Wasserstoff & Brennstoffzelle,...) sind noch nicht ausreichend auf dem Markt verfügbar, als das sie schon heute eingesetzt werden könnten. Teilweise fehlt hierfür noch der explizite gesetzliche Rahmen (LNG, Wasserstoff) für den Untertagebau. Studien weisen aber darauf hin, dass der gesetzeskonforme Einsatz möglich sein sollte, siehe [57].
- Viele Maßnahmen, die aus heutiger Sicht sinnvoll erscheinen und leicht durchführbar sind, wie z.B. das Austauschen alter Motoren, das Nachrüsten von Abgasnachbehandlungsmaßnahmen oder mo-

difiziertes Rightsizing können das Problem, Dieselmotoremissionen und deren schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, nicht lösen, sondern lediglich mitigieren. Es ist daher stets zu hinterfragen, ob diese Maßnahmen ergriffen werden sollten. Zur Erschließung einer Übergangszeit könnten diese Maßnahmen temporär zielführend sein, da sie relativ zeitnah und mit vergleichbar geringem finanziellem Aufwand umsetzbar sind. Ebenso sollten hierbei geschlossene Kabinen und Atemschutzgeräte berücksichtigt werden. Auf lange Sicht kann das vorliegende Problem dadurch allerdings nicht gelöst werden.

- Als Übergangslösungen eignen sich z.B. dieselelektrisch-hybride Fahrzeuge, insofern sie auf dem Markt vorhanden sind. Vor allem im Bereich der Straßenbaumaschinen sind hier früher Fortschritte zu erwarten, da bereits vereinzelt entsprechende Maschinen auf dem Markt vorhanden sind. Im Zuge der Einführung von Hybridfahrzeugen im Untertagebau müsste zusätzlich die aktuelle Gesetzgebung zur Bewetterung überarbeitet werden, da Hybridfahrzeuge durch entsprechende Betriebsmodi voraussichtlich geringere DME haben als konventionelle Fahrzeuge und daher die aktuelle Bewertungsgröße, die installierte maximale Dieselmotorleistung, ggfs. zu konservativ bzw. nicht mehr zielführend ist.

7 Ergebnisse AP4: Forschungsbedarf

Damit die von der Gesetzgebung vorgeschriebenen Schadstoffgrenzwerte zukünftig eingehalten werden können, ist eine Reduzierung der DME mobiler Arbeitsmaschinen notwendig. Die Studie hat hierfür folgende Punkte als Forschungsbedarf ergeben, deren Bearbeitung eine weitere DME-Reduzierung bis hin zum lokalen Null-Emissions-Betrieb ermöglicht:

- Elektrifizierte Grube im Untertagebau
- Modulare Batteriepacks für mobile Arbeitsmaschinen
- Ferngesteuerte, teilautonome oder automatisierte Grube
- Elektrifizierte mobile Arbeitsmaschine
- Alternative Energiequellen für mobile Arbeitsmaschinen im Untertagebau
- Emissionssimulation Mobiler Arbeitsmaschinen im Untertagebau

Im Folgenden werden die einzelnen Themen näher erläutert.

7.1 Elektrifizierte Grube im Untertagebau

Eine Möglichkeit zur Reduzierung von DME im Untertagebau stellt die Elektrifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen dar. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studie kann im Rahmen eines folgenden Forschungsprojektes eine ausgewählte Grube hinsichtlich ihrer Elektrifizierbarkeit genauer untersucht werden. Nach der Auswahl der Grube werden die Fahrzeuge identifiziert, die elektrifiziert werden sollen bzw. nach dem Stand der Technik elektrifizierbar sind. Entsprechende elektrifizierte Fahrzeuge werden beschafft, in Betrieb genommen und im realen Einsatz untersucht und bewertet. Darauf aufbauend wird in einem nächsten Schritte eine Betriebsstrategie für den gesamten Betrieb entworfen, die es ermöglichen wird, die Vorteile der elektrifizierten Fahrzeuge möglichst vollständig zu nutzen. Durch eine abschließende Bewertung anhand von Kriterien, die von Wissenschaft und Industrie gemeinsam definiert werden, wird das am besten geeignetste Strategiekonzept ausgewählt und umgesetzt. Nach der erfolgreichen Umsetzung des Gesamtkonzepts kann dieses im realen Betrieb untersucht werden. Durch die so gewonnenen Daten können die fahrzeugindividuelle Betriebsstrategie und die Gesamtbetriebsstrategie optimiert und angepasst werden. Weiterhin wird erwartet, dass im Laufe der Praxistests der Fahrzeuge neuer Forschungsbedarf entsteht.

Nach erfolgreicher Umsetzung des Konzepts steht eine in Teilen vollständig dieselemissionsfreie Grube zu Demonstrationszwecken, vertieftes KnowHow über die Anforderungen an den Einsatz von elektrifizierten Fahrzeugen im Untertagebau sowie eine in der Praxis validierte Methode zur Umstellung einer Grube auf emissionsfreien Betrieb durch die Elektrifizierung mobiler Arbeitsmaschinen zur Verfügung.

7.2 Modulare Batteriepacks für mobile Arbeitsmaschinen

Die durchgeführte Studie hat ergeben, dass vor allem die Energiedichte heutiger Batteriepacks ein großes Problem bei der Umstellung auf elektrifizierte untertägige Gewinnung im 1-Schicht -Betrieb sind. Neben der teilweise zu begrenzten gravimetrischen Energiedichte und den hohen Ladezeiten haben Batterien zudem eine begrenzte Lebensdauer und verursachen damit hohe Kosten durch eine regelmäßige Neuanschaffung. Die in der Literatur angegebene übliche Lebensdauer bezeichnet die Ladezyklenanzahl, nach der die Batterie nur noch 80 % ihrer Ausgangskapazität hat. Dies kann für eine Maschine mit einer hohen Energieanforderung zu wenig, für Maschinen mit geringeren Energieanforderungen allerdings noch ausreichend sein. Im Folgenden wird dies anhand zweier Beispielmaschinen verdeutlicht:

Im Beispiel werden ein LHD und ein Dumper betrachtet. Der LHD verfügt über ein 3-Batterie-Wechselsystem mit 440 kWh-Batterien, die durch den Zusammenschluss von zwei 220 kWh-Batteriezellen umgesetzt wurden. Am Ende der gemäß Literatur definierten Lebensdauer hat die Gesamtbatterie noch eine Restkapazität von

ca. 352 kWh, was eine Restkapazität von 176 kWh pro 220er Batterie bedeutet. Der Dumper benötigt für seinen Einsatz ein 2-Batterie-Wechselsystem mit einer Kapazität von jeweils 165 kWh, was durch die gealterten Batterien erfüllt werden kann. Jede der drei 440er Batterien kann damit in einen kompletten Wechselbatteriesatz für einen Dumper umgesetzt werden. Je nach Maschinenverhältnis in der Grube kann so der Batteriebedarf mehrerer Dumper gedeckt und ggfs. überzählige Zellen anderweitig eingesetzt, gelagert oder abverkauft werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes soll daher ein modulares Batteriepack-Konzept erarbeitet werden, welches eine Weiterverwendung einer Batterie „am Ende ihrer Lebensdauer“ auf anderen Maschinen ermöglicht.

Durch einen modularen Aufbau der Batteriepacks wäre es möglich, große Batteriepacks vor Ort mit geringem Aufwand in kleinere Batteriepacks zu zerlegen, die anschließend in Maschinen weiterverwendet werden können, die geringere Energieanforderungen haben. Zu entwickeln sind hierfür ein Konzept zum modularen Aufbau von Batteriepacks sowie geeignete Schnittstellen an den Maschinen, die einen betriebsweiten Austausch möglich machen. Die Entwicklung erfolgt am Fuhrpark einer ausgewählten Grube. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Fahrzeuge muss zunächst eine optimale Größe der kleinsten Batteriepack-Einheit für den vorgegebenen Fuhrpark definiert werden, um einerseits den Montageaufwand zu reduzieren, andererseits aber noch möglichst viele Fahrzeuge damit abdecken zu können. Damit einher geht die Entwicklung einer optimalen Verteilungsstrategie für die modularen Batteriepacks, die mit Verfahren aus der Graphentheorie (siehe [60]) ermittelt werden kann. Da die Batterien durch den hier vorgeschlagenen Einsatz weit über ihre normalerweise übliche Lebensdauer hinaus eingesetzt werden können, muss in einem weiteren Schritt untersucht werden, bis zu welchem Anteil der Ausgangskapazität der Einsatz einer Batterie noch sinnvoll und wirtschaftlich ist. Es gilt hierbei Indikatoren zu ermitteln, die über den Zustand der Batterie die notwendigen Informationen liefern, um einen sicheren Betrieb zu ermöglichen. Zusätzlich müssen geeignete Diagnoseverfahren entwickelt werden, um den Zustand erfassen zu können. Aus den gewonnenen Ergebnissen und dem gewählten Vorgehen im Projekt wird eine Methode abgeleitet, die es ermöglicht, ein modulares Lithium-Ionen-Konzept für andere Betriebe zu entwickeln und optimal umzusetzen.

Nach Abschluss des Projektes steht ein Konzept für modular aufgebaute Lithium-Ionen-Batterien sowie für die optimale Verwendung modularer Einzelzellen in einem vorgegebenen Betrieb zur Verfügung. Zudem liegt eine Methode vor, mit der die Erkenntnisse auf andere Betriebe angewendet werden können.

7.3 Ferngesteuerte, teilautonome oder automatisierte Grube

Das Problem der Emissionen im Untertagebau könnte auch dadurch gelöst werden, dass auf vor Ort arbeitende Menschen unter Tage komplett verzichtet und die Grube auf teilautonomen oder vollautomatisierten Betrieb umgestellt wird. Verschiedene Hersteller bieten bereits heute erste ferngesteuerte Maschinenkonzepte für die untertägige Gewinnung an.

Als Übergangstechnologie kann der Einsatz von ferngesteuerten Fahrzeugen entwickelt werden, die von einer von der Umgebungsluft unabhängigen Warte aus gesteuert werden können. Hierfür müssen geeignete Sensorkonzepte, Steuerungskonzepte und Betriebsstrategien für alle Maschinen entwickelt werden, die unter Tage eingesetzt werden. Der Fokus bei der Entwicklung liegt dabei auf der Nachrüstbarkeit der Konzepte auf Bestandsmaschinen. Auch muss ein geeigneter Weg der Signalübertragung an die Maschinen entwickelt werden. WLAN-Signale z.B. haben unter Tage aufgrund der häufigen Reflektionen an Wänden und Firsten eine schlechte Signalqualität und daher nur eine begrenzte Reichweite. Daher kommt vor allem den Sicherheitskonzepten der Maschinen eine große Bedeutung zu. Auch muss untersucht werden, welches Vorgehen im Falle einer Havarie zu wählen ist, da hierfür in den meisten Fällen Menschen in die Grube fahren müssen, um das havarierte Fahrzeug zu bergen.

Den nächsten Schritt stellen teilautonome oder autonome mobile Arbeitsmaschinen im Untertagebau dar. Da viele Maschinen häufig sehr repetitive Tätigkeiten ausführen (Bohr- und Sprengwagen, LHDs und Dumper im Bohr- und Sprengvortrieb, CM und Dumper im schneidenden Vortrieb) und die Umgebung unter Tage, im Vergleich zu Arealen über Tage, nach erfolgtem Abbau entweder weitestgehend unverändert bleibt und weiter genutzt oder verfüllt und dadurch nicht mehr weitergenutzt wird, ist die Automatisierung von mobilen Arbeitsmaschinen unter Tage voraussichtlich einfacher zu bewerkstelligen. Notwendig für autonome Maschinen unter Tage ist in jedem Fall eine Möglichkeit für die Maschinen, sich in ihrer Umgebung zu orientieren, die nicht auf GPS angewiesen ist.

Zunächst muss ein geeignetes Verfahren entwickelt werden, welches das Manövrieren in bestehenden Gruben ermöglicht und gleichzeitig lernfähig ist, da Gruben mit jedem Abbau stetig wachsen. Anschließend müssen geeignete Sensorkonzepte für Untertagemaschinen entwickelt werden, die die Autonomisierung ermöglichen. Weiterhin müssen geeignete Konzepte entstehen, wie die einzelnen Maschinen miteinander interagieren können, z.B. in einem Fahrzeugverbund aus Dumper und LHD im Bohr- und Sprengvortrieb. Mit Hilfe einer generellen Betriebsstrategie für autonome Gruben kann der Verkehr unter Tage entsprechend geführt werden, um ein optimales Arbeiten zu ermöglichen. Engpässe können durch automatisches Zuschalten von Fahrzeugen, Zeiten der Überproduktion durch automatisches Abschalten von Fahrzeugen ausgeglichen werden. Ein großer Schwerpunkt stellt das grubenweite bzw. fahrzeugindividuelle Sicherheitskonzept dar. Fahrzeuge müssen in der Lage sein, sich bei Fehlern selbständig in einen sicheren Bereich zurück bringen zu können, um eine Havarie zu vermeiden. Sollte dies aufgrund eines Defekts nicht mehr möglich sein, muss sich die Maschine selbstständig abschalten. In diesem Fall müssen andere Maschinen dazu in der Lage sein, auf das neu aufgetretene Hindernis selbständig zu reagieren, ggfs. Ausweichrouten zu finden oder aber die Produktion sofort herunterfahren zu können und entsprechende Fehlermeldungen an die Leitstelle der Grube senden können. Im Havariefall – und auch in allen anderen Fällen, in denen Menschen in die Grube müssen – dürfen Menschen von den autonomen Fahrzeugen nicht gefährdet werden.

Je nach Ausführung stehen nach Abschluss des geplanten Forschungsprojekts entweder Konzepte zur Umrüstung von Bestandsmaschinen auf ferngesteuerten oder teilautonomen Betrieb, oder Konzepte u./o. Demonstratorbetriebe mit teil- oder vollautonomer Gewinnung in Einzelbereichen zur Verfügung.

7.4 Elektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen

Im Rahmen eines Forschungsprojekts könnten ganzheitliche Konzepte zur Elektrifizierung von mobilen Arbeitsmaschinen für den Untertagebau entwickelt und umgesetzt werden. Konzepte des Stands der Technik dienen hierbei als Basis der Entwicklung. Ziel ist es, die Maschine von Grund auf als elektrifizierte Maschine zu konzipieren, um dadurch alle Vorteile, die die Elektrifizierung mit sich bringt, nutzen zu können. Hierzu zählt neben einem deutlich gesteigerten Wirkungsgrad vor allem auch die Möglichkeit der Rekuperation beim Bremsen oder bei Gefällefahrten. Im Rahmen des Projekts kann ein Prototyp einer Maschine aufgebaut werden, der im Praxiseinsatz weiter untersucht werden kann. Anhand dieser Maschine können anschließend konkrete Fragestellungen, wie z.B. das elektrische Bremsen am Hang bei vollgeladener Batterie, untersucht und entsprechende Lösungen erarbeitet werden. Aus dem Vorgehen im Projekt kann weiterhin eine Methode abgeleitet werden, die die Entwicklung elektrifizierter mobiler Arbeitsmaschinen im Kontext ihres Einsatzszenarios unterstützt.

Nach erfolgreicher Umsetzung eines Konzepts stehen ein funktionsfähiger Prototyp einer vollelektrifizierten mobilen Arbeitsmaschine für den Untertagebau sowie Konstruktions- und Auslegungsmethoden für vollelektrifizierte mobile Arbeitsmaschinen zur Verfügung.

7.5 Alternative Energiequellen für mobile Arbeitsmaschinen im Untertagebau

Im Rahmen einer weiteren Studie könnten alternative Primär- und Sekundärenergiequellen für mobile Arbeitsmaschinen untersucht werden. Die vorangegangene Studie hat gezeigt, dass z.B. LNG, Druckluft und Wasserstoff vielversprechend sind. Zu Beginn der Studie werden zuerst noch einmal alle dem Stand der Technik bekannten Primär- und Sekundärenergiequellen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht und bewertet. Für die gefundenen Energieträger wird anschließend der gesetzliche Rahmen für Maschinen im Untertagebau genau untersucht und daraus ermittelt, welche gesetzlichen Beschränkungen für alternative Primär- und Sekundärenergiequellen im Untertagebau gelten. In einem nächsten Schritt werden im Rahmen von Fallstudien die alternativen Energiequellen untersucht und deren Auswirkungen auf die Umgebung unter Tage ermittelt. Entstehen hieraus Konflikte mit dem gesetzlichen Rahmen, so werden geeignete Abhilfemaßnahmen definiert. Vor allem Sicherheitsaspekte müssen in den Fallstudien berücksichtigt und untersucht werden.

Nach Ende der Studie liegen Informationen über alternative Energiequellen und deren Umsetzbarkeit im Untertagebau vor, sowie ggfs. konkrete Empfehlungen für den Gesetzgeber, falls der gesetzliche Rahmen für die betrachteten Energiequellen noch nicht (ausreichend oder angepasst genug) vorhanden ist.

8 Ergebnisse AP5: Methode zur Verallgemeinerung

Im Folgenden wird das Vorgehen während der Bearbeitung der Studie näher beschrieben, um damit eine Methode aufzuzeigen, die auf eine beliebige Grube angewendet werden kann, um die Emissionsreduzierung dort voranzutreiben. Die hier aufgeführte Beschreibung stellt dabei den aktuellen Stand dar – die Methode selbst wird aller Voraussicht nach iterativ erweitert und an die Gegebenheiten in den einzelnen Gruben angepasst.

Zum Arbeiten mit der Methode wird ein allgemeines Verständnis des Bergbaus, der hierzu verwendeten Fahrzeuge und deren Tätigkeiten sowie der möglichen Maßnahmen zur Dieselemissionsreduzierung vorausgesetzt, die in diesen Abschlussbericht vorgestellt wurden.

8.1 Schritt 1: Akquise von Rahmendaten der Grube

Zuerst müssen alle notwendigen Rahmendaten der Grube erfasst werden. Hierzu zählen folgende Daten:

- a. Geometrische, geologische Grubendaten (Tiefe, Größe, Distanzen, Gefälle, lichte Weiten & Querschnitte), Grubenplan → Wegstrecken, Transportentfernungen, Rekuperationsgefälle
- b. Vorhandene Energielogistiksysteme (Spannungsniveau, el. Leistung, Primär-/Sekundärenergieträger, sonstige,...) → Batterie- od. Kabelbetrieb
- c. Betriebsspezifische Daten (Schichtenmodell, Gewinnungsmethode, Materialumsatz, Bewetterung,...)
- d. Eingesetzte Fahrzeuge und Fahrzeugverbunde in der Grube inklusive deren Tätigkeitsprofilen u. Fahrzeugdaten

Zur Erfassung dieser Daten eignen sich vorbereitete Fragebögen und Gespräche mit den Grubenbetreibern und / oder den Maschinenführern. Ziel der Initialdatenakquise ist es, eine Gesamtübersicht über den Betrieb zu erhalten und damit die Datenbasis zu legen, die für alle weiteren Schritte Grundvoraussetzung ist:

- Aus den geometrischen bzw. geologischen Daten werden Entfernungen u./o. Rekuperationspotential ermittelt. Außerdem kann durch die vorhandenen Streckenquerschnittsprofile eine Vorauswahl möglicher Maschinen getroffen werden.
- Die vorhandene Energielogistik gibt Informationen darüber, welche Emissionsreduzierungsmaßnahmen umsetzbar sind. Ausbau eines vorhandenen Netzes wird immer der kompletten Neuinstallation bevorzugt. Entsprechend kann auch durch diese Daten bereits eine Vorauswahl getroffen werden.
- Aus den betriebsspezifischen Daten und den Daten über eingesetzte Fahrzeuge und Fahrzeugverbunde werden die fahrzeugspezifischen Größen wie z.B. Einsatzzeit, Energiebedarf usw. ermittelt. Zudem werden die Tätigkeiten ermittelt, die die einzelnen Fahrzeuge ausführen und der damit verbundene Energieaufwand.

8.2 Schritt 2: Definition relevanter Fahrzeuge u. Identifikation relevanter Leistungsklassen durch Clusterung

Aus den in Schritt 1 erfassten Daten zu Fahrzeugen und deren Tätigkeiten werden in Schritt 2 zuerst die für die Emissionsreduzierung relevanten Fahrzeuge ermittelt. Folgende Einschränkungen sollten hierbei berücksichtigt werden:

- Befahrungsfahrzeuge werden bisher nicht berücksichtigt. Zum einen sind am Markt mehrere emissionsfreie, d.h. elektrifizierte, Fahrzeuge verfügbar, die als Befahrungsfahrzeuge z.B. für Salz- oder Gipsbergwerke, d.h. trockene und ebene Gruben eingesetzt werden können. Zum anderen ist deren Beitrag zur Emissionsbelastung unter Tage im Vergleich zu den Hauptemittenten in der Gewinnung sehr gering und kann daher durch die Grubenbewetterung kompensiert werden.

- Fahrzeuge, die bereits emissionsreduziert oder emissionsfrei eingesetzt werden (z.B. hybride oder vollelektrifizierte Bohr- und Sprengwägen, E-Stapler, Teil- und Vollschnittmaschinen,...) werden in der Betrachtung nicht berücksichtigt, da sie ebenfalls nur in sehr geringem Maße zur Emissionsbelastung unter Tage beitragen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, hybride Maschinen, z.B. diesel-elektrische Bohr- und Sprengwägen, im Rahmen eines Kleinprojektes auf vollelektrischen Betrieb umzustellen, da diese Maschinen nur einen geringen Fahranteil haben und daher nur eine eher kleine Traktionsbatterie und einen entsprechenden elektrischen Antriebsstrang benötigen. Der Hauptverbraucher (Bohrwerk, Sprengstoffpumpe,...) wird meistens elektrisch durch ein Kabel versorgt.

Typische Maschinen, die maßgeblich zu den Emissionen unter Tage beitragen sind:

- Radlader, Fahrlader, Bagger in jedem Tätigkeitsfeld (Gewinnung, Putzen, Berauben,...)
- Berauber allgemein
- Dumper, LKWs und andere Unstetigfördermittel
- Sonderfahrzeuge, wie z.B. Betonmischer, Spritzbetonpumpen, die rein dieselmotorisch angetrieben werden
- Sowie alle weiteren verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge, die eine hohe installierte Motorleistung haben, die zu einem (signifikanten) Teil einer Schicht abgerufen wird.

Wurde die Auswahl der relevanten Maschinen bzw. Maschinentypen getroffen, kann durch Clusterung der Motorleistung ermittelt werden, wo der Leistungsschwerpunkt der eingesetzten Maschinen liegt. Die Clusterung kann über den gesamten Fahrzeugbestand oder über einzelne Fahrzeugarten durchgeführt werden. Zur Clusterung werden alle zu betrachtenden Fahrzeuge in vordefinierten Leistungsklustern einsortiert und gezählt. Mittels Histogrammen können die Ergebnisse dargestellt werden.

In der Studie wurden als Cluster die von der Abgasnorm vorgegebenen Leistungsabstufungen gewählt, da sich die Maschinenhersteller für ihre Produkte an diesen orientieren. Je nach Ergebnis der Clusterung treten verschiedene Szenarien auf:

- **Großteil (oder alle) der Maschinen im gleichen Leistungsbereich:** Maßnahmen zur Emissionsreduzierung müssen diese Leistungsklasse abbilden können. Alle Maßnahmen deutlich unter dieser Leistungsklasse kommen voraussichtlich nicht in Frage, alle Maßnahmen mit Leistungsklassen deutlich darüber auch nicht.
- **Ausreißer in Leistungsklassen über dem Schwerpunkt:** Diese Maschinen sollten in der weiteren Untersuchung genauer analysiert werden. Ziel der Untersuchung ist herauszufinden, ob die installierte Leistung für die durch die Maschine(n) ausgeführte(n) Tätigkeit(en) wirklich benötigt wird. Ggfs. sollte anschließend die Maschinenauswahl überdacht und angepasst werden.
- **Ausreißer zu Leistungsklassen unter dem Schwerpunkt:** Diese Maschinen sollten ebenfalls näher betrachtet werden. Insofern die Ausreißer die gleichen Tätigkeiten erfüllen, wie die Maschinen im Leistungsschwerpunkt ist dies ggfs. ein Indiz dafür, dass der Leistungsschwerpunkt falsch gelegt ist, d.h. dass die Maschinen übermotorisiert sind. Weiterhin sollte untersucht werden, ob die Maschinen mit geringerer Leistung die Tätigkeiten der anderen Maschinen übernehmen können.
- **Kein Leistungsschwerpunkt identifizierbar:** Hier sollte generell die Zusammensetzung des Maschinenparks hinterfragt werden, da sich die vorhandene Maschinenleistung üblicherweise nach deren Einsatz in der Produktion richtet, d.h. in dieser Leistungsklasse sollte ein Schwerpunkt vorhanden sein. Unabhängig davon sollten alle Maschinen der höchsten und der niedrigsten Leistungsklasse als Ausreißer angesehen und wie bereits beschrieben behandelt werden.

8.3 Schritt 3: Vorauswahl umsetzbarer grubenweiter / fahrzeugspezifischer Maßnahmen zur Emissionsreduzierung

In Schritt 3 wird im Rahmen einer Vorauswahl entschieden, welche Ansätze der Emissionsreduzierung für die einzelnen Fahrzeuge, Fahrzeugverbunde oder die gesamte Grube prinzipiell in Frage kommen. Für die Entscheidung relevante Parameter sind z.B.:

- Der finanzielle Rahmen des Projektes
- Die Grubengröße bzw. Fahrzeuganzahl
- Die prognostizierte Lebensdauer der Grube
- Die gewünschte Lebensdauer der Maßnahme (Problem mitigieren oder lösen)

Abbildung 8-1 gibt einen Überblick über die in der Studie entwickelten Maßnahmen, bewertet nach den Parametern **Umsetzung** (bewertet den Zeitrahmen, der zur Umsetzung der Maßnahme notwendig ist), **Kosten**, **Lebensdauer** (bewertet, wie lange die Maßnahme eingesetzt werden kann), **Einschätzung** (Einschätzung der Wirksamkeit der Maßnahme, bewertet von mitigierend (lindernd) bis lösend) und **Leistungsklasse** (Leistungsklassen, für die die Maßnahme voraussichtlich eingesetzt werden kann). Anhand der Tabelle kann eine Vorauswahl der möglichen Maßnahmen aus den drei möglichen Ansätzen

- Prozessoptimierung
- Technologieoptimierung
- Technologiewechsel

getroffen werden. Die angegebenen Bewertungen der einzelnen Maßnahmen liefern eine erste Einschätzung, müssen aber im Einzelfall noch genauer überprüft werden.

Ansatz		Umsetzung	Kosten	Lebensdauer	Einschätzung	Leistungsklasse
Maßnahme	Prozessoptimierung					
	Modifiziertes Rightsizing	mittelfristig	mittel	kurz	mitigierend	alle
	Umstellung auf schneidende Gewinnung	langfristig	hoch	lang	lösend	groß
	Optimierung der Fahrzeugeinteilung	kurzfristig	gering	kurz	mitigierend	alle
	Technologieoptimierung					
	Motoren nachrüsten oder austauschen	mittelfristig	gering	kurz	mitigierend	alle
	Leichtbau	langfristig	hoch	kurz	mitigierend	alle
	Technologiewechsel					
	Mannlose Grube	langfristig	hoch	hoch	lösend	alle
	Elektrifizierung mobiler Arbeitsmaschinen	mittelfristig	mittel	hoch	lösend	klein - mittel
	Alternativer Kraftstoff LNG	mittelfristig	gering	mittel	mitigierend	mittel
	Alternativer Kraftstoff Druckluft	langfristig	hoch	lang	lösend	klein - mittel
	Hybridfahrzeuge	kurzfristig	mittel	mittel	mitigierend	mittel
	Minimalinvasive Maßnahmen					
	Optimierung der Bewetterung	kurzfristig	mittel	kurz	mitigierend	alle
	Atenschutzgeräte und geschlossene Kabinen	kurzfristig	gering	mittel	mitigierend	alle

Abbildung 8-1: Übersicht Emissionsreduzierungsmaßnahmen

8.4 Schritt 4: Spezifische Datenakquise der Fahrzeuge / Fahrzeugverbunde – Bestimmung des Emissionsreduzierungspotentials

Da der Fokus der Studie auf der Elektrifizierung als Maßnahme zur Emissionsreduzierung lag, wird im Folgenden die Methode anhand der Maßnahme „Elektrifizierung“ beschrieben.

In Schritt 4 werden die als relevant definierten Fahrzeuge genauer untersucht und deren Daten mit dem Ziel erfasst, das Emissionsreduzierungspotential der einzelnen Maschinen zu bestimmen.

8.4.1 Emissionsreduzierungspotential einer mobilen Arbeitsmaschine

Das Emissionsreduzierungspotential einer Maschine lässt sich bestimmen aus (siehe Abbildung 8-2):

- a. Einsatzprofil
- b. Leistungsprofil
- c. Energieprofil
- d. Ökonomieprofil einer Maschine

Die einzelnen Einflussgrößen werden im weiteren Verlauf näher definiert. Wichtig ist allerdings, dass alle vier Teilprofile einen Einfluss auf die Wirksamkeit bzw. Umsetzbarkeit einer Maßnahme an einer Maschine oder einem Fahrzeugverbund haben. Daher ist eine möglichst umfangreiche Datenerfassung Voraussetzung für eine zweckdienliche und erfolgreiche Umsetzung einer Maßnahme.

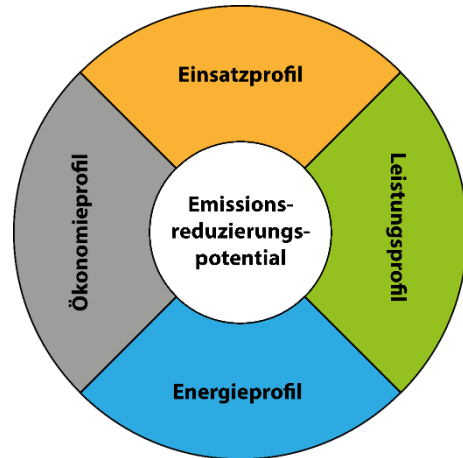


Abbildung 8-2: Emissionsreduzierungspotential, [9]

Zum **Einsatzprofil** einer Maschine zählen Informationen wie:

- Arbeitsablauf einer Schicht
 - Einsatzdauer, Einsatzort, Einsatzhäufigkeit
 - Tätigkeitsprofil & repräsentative Schicht
 - Stillstandsdauer und –häufigkeit
 - Stillstandsort (qualitativ) systematisch, flexibel, chaotisch
 - Systematische (wiederholende), flexible (regelmäßige) oder chaotische (unregelmäßige) Wege
- Gefahrenpotentialveränderung durch vorausgewählte Emissionsreduzierungsmaßnahmen
 - Für den Bediener
 - Für die Maschine
 - Für die Umgebung
- Umgebungsparameter, wie z.B.
 - Feuchtigkeit
 - schlechte Bewetterung
 - hohe Temperatur

Im **Leistungsprofil** einer Maschine werden folgende Informationen erfasst:

- Leistung-über-Zeit-Anforderung, ermittelt durch Berechnung aus Messung von Drehzahl & Drehmoment des VKM über Zeitspanne
- Tätigkeitsprofilrelevante Kenngröße, wie z.B.
 - Umschlagsleistung pro Zeiteinheit
 - Zurückgelegte Strecke pro Zeiteinheit
 - Beraubte Fläche pro Zeiteinheit
- Leistungsaufnahme
 - Zeitlich gesehene Leistungsaufnahme aus Messungen
 - Art der Leistungsaufnahme (konstant, transient, Peaks & Idle)

Das **Energieprofil** der Maschine besteht aus folgenden Informationen:

- Kraftstoffart und dessen Kenngrößen
- Tankhäufigkeit pro Zeiteinheit oder
- Spritverbrauch pro Zeiteinheit
- Energieaufnahme
 - Zeitlich gesehene Energieaufnahme aus Messungen / Spritverbrauch
 - Art der Energieaufnahme (konstant, transient, Peaks & Idle)

Das **Ökonomieprofil** der Maschine erfasst folgende Informationen:

- Rekuperationspotential pro Zeiteinheit
- Wirkungsgradveränderung durch Emissionsreduzierungsmaßnahmen
- Bewetterungseinsparung pro Zeiteinheit
- Infrastrukturanforderungen durch Emissionsreduzierungsmaßnahmen
- Amortisierungsrechnung

Die notwendigen Daten können auf verschiedenen Wegen erfasst werden:

- Fragebögen
- Interviews und Gespräche
- Messungen am Fahrzeug mittels Sensoren oder über CAN (wenn vorhanden)
- Beobachtung des Fahrzeugs bei den Tätigkeiten
- Auswertung von Datenblättern der Fahrzeuge

8.4.2 Datenauswertung

Aus den erfassten Daten der Maschinen können anschließend folgende wichtige Informationen gewonnen werden:

- Mit den Daten aus dem Einsatzprofil kann untersucht werden, ob eine gewählte Maßnahme für eine Maschine in Bezug auf deren Einsatz umsetzbar ist. Die aufgeführten Parameter müssen hierzu gegeneinander abgewogen und dieser Vergleich ausgewertet werden.
- Leistungs- und Energieprofil enthalten Informationen und Daten über den Energieumsatz der einzelnen Maschinen in Form von Messungen. Diese Datenbasis bildet die Grundlage für alle energetischen Untersuchungen der Maschinen.
- Das Ökonomieprofil liefert Aussagen zur Rentabilität von Maßnahmen an Maschinen und dient damit als Entscheidungsgrundlage.

Fahrzeugindividueller Energieumsatz pro Schicht

Unter Verwendung von Formel (X) kann der Energiebedarf einer Schicht für ein Fahrzeug berechnet werden:

$$E_{\text{Schicht},Mn} = \frac{1}{3600 \cdot 1000} \int_{t_{\text{Schichtanfang}}}^{t_{\text{Schichtende}}} P_{\text{Schicht}}(t) dt = \int_{t_{\text{Schichtanfang}}}^{t_{\text{Schichtende}}} M_{VKM}(t) \cdot 2\pi \cdot 60 \cdot n_{VKM}(t) dt \quad (X)$$

$$[E] = kWh; [P] = W; [t] = s; [M] = Nm; [n] = \frac{1}{min}$$

$M_{VKM}(t)$ und $n_{VKM}(t)$ sind dabei über Messungen an der Maschine zu ermitteln.

Eine andere Möglichkeit zum Ermitteln des schichtbezogenen Energieumsatzes besteht darin, den Spritverbrauch (gesamt oder zeitdiskret) zu erfassen und daraus den Energiebedarf des Fahrzeugs zu berechnen, Formel (XI):

$$E_{\text{Schicht},SV} = H_{i,Diesel} \cdot m_{Diesel} = H_{i,Diesel} \cdot \rho_{i,Diesel} \cdot V_{Diesel} \quad (XI)$$

$$[E] = kWh; [H] = \frac{kWh}{kg}; [\rho] = \frac{kg}{dm^3} = \frac{kg}{Liter}$$

Notwendige Angaben (Quelle: [11]):

$$\text{Heizwert Diesel: } H_{i,Diesel} = 11,9 \frac{kWh}{kg}, \text{ Dichte von Diesel: } \rho_{i,Diesel} = 0,820 - 0,845 \frac{kg}{dm^3}$$

$H_{i,Diesel}$ stellt dabei den Heizwert von Diesel dar, $\rho_{i,Diesel}$ dessen Dichte. V_{Diesel} ist die Menge an Diesel in Litern, die dem Fahrzeug durch Tanken zugeführt werden musste.

Aus beiden Größen kann der Motorwirkungsgrad des Fahrzeugs berechnet werden, Formel (XII):

$$\eta_{VKM} = \frac{E_{Schicht,Mn}}{E_{Schicht,SV}} * 100\% \quad (XII)$$

$$[E] = kWh, [\eta] = \%$$

Typische Motorwirkungsgrade von Verbrennungskraftmaschinen liegen im Bereich von 30 – 40 %. (siehe z.B. [61])

Der Energiebedarf einer Schicht $E_{Schicht}$ muss dem Fahrzeug in der vorgegebenen Zeit zur Verfügung gestellt werden. Für Konzepte der Energieübertragung (Oberleitungen, Kabel) ist diese Kenngröße nicht entscheidend, für alle Konzepte mit Energiespeicherung auf dem Fahrzeug dafür umso mehr. Aus Abbildung 4-1 können die gravimetrischen Energiedichten gängiger Energiespeicher entnommen werden – hieraus wird allerdings ersichtlich, dass die gravimetrische Energiedichte von Diesel um einen Faktor >100 größer ist als die gravimetrischen Energiedichten der am Markt verfügbaren Batterien. Die gravimetrische Energiedichte von elementarem Wasserstoff ist zwar größer als die von Diesel, allerdings muss für eine mobile Anwendung das Speichersystem mitberücksichtigt werden, was die Energiedichte deutlich reduziert, siehe Kapitel 4.3.

Aus dem Energiebedarf pro Schicht kann mit der maximal speicherbaren Energiemenge des gewählten Energiespeichers berechnet werden, wie viele Füllungen notwendig sind, Formel (XIII):

$$n_{Füllung} = \frac{E_{Schicht,Mn}}{E_{max,Speicher}} \quad (XIII)$$

$$[E] = kWh, [n] = 1$$

$E_{max,Speicher}$ hängt von dem verwendeten Energiespeicher ab und ist beim Hersteller zu erfragen. Typische Kenngrößen für Batterien können Kapitel 4.4 entnommen werden.

Anschließend muss überprüft werden, ob der gewählte Energiespeicher in der zur Verfügung stehenden Zeit wieder geladen werden kann. Generell ist hier als Benchmark das Betanken eines Dieselfahrzeugs zu sehen. Vor allem Zapfsäulen für Industrieanwendungen können Volumenströme von bis zu 130 l/min und mehr liefern. [62] Eine beispielhafte mobile Arbeitsmaschine mit einem 600 Liter fassenden Dieseltank wäre damit in ca. 4,6 min vollständig bedankt, wobei der im Tank vorhandene Dieselmotorkraftstoff einer Energiemenge von 5805 – 5983 kWh entspricht. Dies entspricht einer Ladeleistung von $P_{Lade,Diesel} = 7,6 - 7,8 MW$.

Das Tanken von LNG erfolgt, ähnlich wie Diesel, mit hohen Volumenströmen von bis zu 150 l/min. [63]

Zum Betanken mit Wasserstoff sind keine näheren Angaben zu finden. Allerdings wird von verschiedenen Herstellern angegeben, dass der Tankvorgang eines Wasserstofffahrzeugs vergleichbar lange dauert wie der eines herkömmlichen Fahrzeugs. [64]

Für Lithium-Ionen-Batterien sind aktuell Ladestationen mit einer Ladeleistung von 65 kW [6], im PKW-Bereich sogar bis zu 135 kW [65] auf dem Markt.

Aus der maximal möglichen Ladeleistung kann überschlägig berechnet werden, wie lange eine Vollladung des Energiespeichers benötigt, Formel (XIV):

$$t_{\text{vollladung}} = \frac{3600 \cdot E_{\text{max,Speicher}}}{P_{\text{max,Ladeleistung}}} \quad (\text{XIV})$$

$$[t] = s; [E] = kWh, [P] = kW$$

Die überschlägige Berechnung gibt nur einen Richtwert – die tatsächliche Ladedauer hängt von vielen Faktoren ab und kann hier daher nicht angegeben werden.

Aus der Anzahl der Füllungen $n_{\text{Füllung}}$ und der überschlägigen Ladedauer $t_{\text{vollladung}}$ kann ermittelt werden, wie viele Batterien notwendig sind, um das betrachtete Fahrzeug mit Batterien zu betreiben. Hierbei müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Wechselzeiten von Batteriewechselsystemen werden von verschiedenen Herstellern mit min. 15 min angegeben.
- Bei einer festinstallierten Batterie steht das Fahrzeug während der gesamten Ladedauer an einem Ort und kann daher nicht eingesetzt werden.

Im Folgenden wird näher auf die Punkte des Ökonomieprofils eingegangen.

Rekuperationspotential

Das Rekuperationspotential einer Maschine kann abgegriffen werden, wenn die Maschine über einen Mehrquadranten-Energiewandler verfügt. Zur Rekuperation eignen sich, je nach Topologie der Maschine, Bremsvorgänge und vor allem Bergabfahrten, da hierbei die massen- und höhenabhängige potentielle Energie des Fahrzeugs in kinetische Energie umgewandelt wird, die in herkömmlichen Fahrzeugen an den Bremsen in Wärme umgewandelt wird. Bei einem Fahrzeug mit Rekuperationsmöglichkeit kann die kinetische Energie abzüglich Umwandlungsverluste dem Speicher wieder zugeführt werden. Folgende Punkte sollten bei der Abschätzung berücksichtigt werden:

- Besonders geeignet sind Fahrzeuge, die Bergfahrten ausführen und dabei eine höhere Masse beim Herunterfahren als beim Herauffahren haben (z.B. LHD, der an der Spitze lädt und voll beladen bergab fährt).
- Bremsvorgänge können ggfs. rekuperiert werden. Dem Stand der Technik können hierfür z.B. hydraulische Systeme entnommen werden (siehe z.B. [66])
- Bei der Berechnung des Rekuperationspotentials müssen die Wandlungsverluste im Antriebsstrang in Form von Wirkungsgraden berücksichtigt werden. Hierfür können für eine erste Abschätzung Werte aus der Literatur verwendet werden.

Wirkungsgradveränderung durch Emissionsreduzierung

Verschiedene Maßnahmen der Emissionsreduzierung haben einen positiven Einfluss auf den individuellen Wirkungsgrad einer Maschine. Eine genaue Betrachtung kann nur am fertigen System im Einsatz durchgeführt werden. Dem Stand der Technik können allerdings folgende Informationen entnommen werden:

- Verbrennungskraftmaschinen haben einen hohen Anteil an Wärmeverlusten. Die Literatur gibt Wirkungsgradkennwerte von max. 43 % für Dieselmotoren an, siehe [61]. Im Vergleich dazu haben Batterien heutzutage schon Wirkungsgrade bei der Energiebereitstellung von über 96 % [16]. Das volle Potential der Wirkungsgradsteigerung lässt sich aber nur dann abrufen, wenn die entsprechende Maschine von Grund auf an die neue Antriebstechnologie angepasst wird.
- Hybridfahrzeuge verfügen häufig über Antriebsstrangtopologien, die sowohl einen motorischen als auch einen generatorischen Betrieb möglich machen. Dadurch können bei hybriden Fahrzeugen Rekuperationspotentiale ausgeschöpft werden, was die Gesamtenergie positiv beeinflusst. Weiterhin steigern Betriebsstrategien von Hybridfahrzeugen (siehe Kapitel 5.2) den Wirkungsgrad dieser Fahrzeuge zusätzlich.
- Maßnahmen, wie z.B. das Vermeiden von Leerlaufphasen, beeinflussen zwar nicht den Wirkungsgrad des Energiewandlers, allerdings beeinflussen sie den Gesamtenergieverbrauch einer Maschine und damit ihren Gesamtwirkungsgrad.

Bewetterungseinsparung pro Zeiteinheit

Die Bewetterungseinsparung durch Emissionsreduzierungsmaßnahmen muss für jede Maschine individuell bewertet werden. Generell kann allerdings festgehalten werden:

- Bei der Elektrifizierung einer mobilen Arbeitsmaschine entfallen alle Emissionen durch Verbrennungsmotoren. Dementsprechend können alle damit in Bezug stehenden Werte in der Bewetterungsberechnung zu null gesetzt werden.
- Mittels Downsizing kann die Eckleistung einer Maschine reduziert werden, was eine Bewetterungseinsparung ermöglicht.
- Alternative Kraftstoffe (Druckluft, LNG, Wasserstoff) können ebenfalls zu Bewetterungseinsparungen führen. Hierbei muss allerdings vor dem Einsatz geprüft werden, ob nicht durch deren Verwendung andere Probleme an Bedeutung gewinnen (z.B. Methanschlupf bei LNG). Der gesetzliche Rahmen zum Einsatz von LNG unter Tage muss noch eruiert werden.

Infrastrukturanforderungen durch Emissionsreduzierungsmaßnahmen

Maßnahmen aus dem Bereich des Technologiewechsels und die Umstellung auf schneidende Gewinnung haben hohe Anforderungen an die Infrastruktur einer Grube.

- Das untertägige Stromnetz muss an die neuen Anforderungen (z.B. durch einen CM oder kabelgebundene Maschinen) hinsichtlich der zulässigen Entnahmeleistung angepasst werden.
- Batteriesysteme benötigen Lade- u./o. Wechselstationen, die je nach Grubengröße nicht nur zentral aufzustellen sind.
- Ober-/Unterleitungen müssen vorgebaut und verlegt werden. Hinzu kommt eine regelmäßige Wartung.
- Alternative Kraftstoffe, wie z.B. LNG oder Wasserstoff, benötigen Untertage geeignete Tankstellen und Speichermöglichkeiten. Diese und vor allem deren Versorgung mit Kraftstoff von über Tage muss grubenweit sichergestellt werden.

Die Infrastrukturanforderungen müssen vor der Umsetzung ermittelt und von Fall zu Fall individuell bewertet werden.

Amortisationsrechnung

Die ermittelten Einsparungen können direkt in einer Amortisationsrechnung berücksichtigt werden. Im Folgenden wird eine exemplarische Kostenentwicklungsrechnung für ein batteriebetriebenes (fiktives) Fahrzeug durchgeführt:

Vergleich zwischen Diesel-LHD und Batterie-LHD

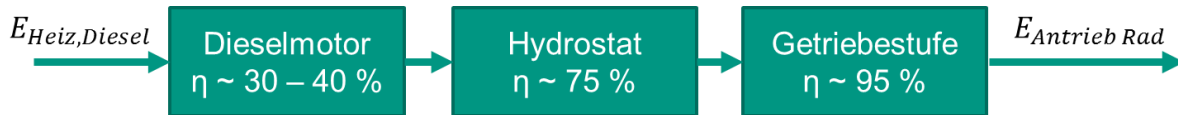


Abbildung 8-3: Antriebsstrang (Bsp.) Diesel-LHD, [6]

Das dieselbetriebene Fahrzeug besteht aus dem Dieselmotor selbst, einem hydrostatischem Fahrentrieb und einer Getriebestufe, die die vom Motor gelieferte Energie an die Räder verteilt (siehe Abbildung 8-3). Arbeitsfunktionen werden der Einfachheit halber nicht betrachtet, sind aber analog zu behandeln.

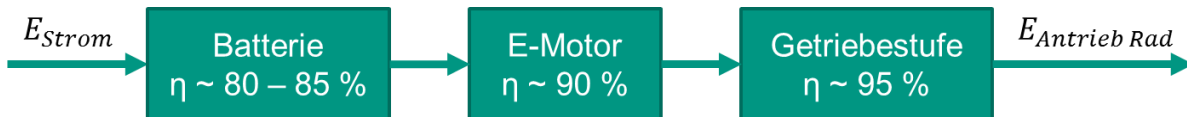


Abbildung 8-4: Antriebsstrang (Bsp.) Batterie-LHD, [6]

Das elektrifizierte Fahrzeug mit Batterie besteht aus der Batterie, einem E-Motor und ebenfalls einer Getriebestufe, die die vom Motor gelieferte Energie weiterverteilt (siehe Abbildung 8-4).

Es wird weiterhin für beide Fahrzeuge angenommen, dass der Energieumsatz in einer 8h-Schicht (Einschichtbetrieb) $E_{\text{Antrieb Rad}} = 450 \text{ kWh}$ entspricht. In der Schicht hat das Fahrzeug insgesamt 1h Pause, den Rest der Zeit ist das Fahrzeug unterbrechungsfrei im Einsatz. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass das Fahrzeug 10 y (Jahre) lang 220 d (Tage) pro Jahr in Betrieb ist.

Als Gesamtwirkungsgrad ergibt sich aus obigen Systemskizzen:

$$\eta_{\text{Diesel-LHD}} = \eta_{\text{Dieselmotor}} \cdot \eta_{\text{Hydrostat}} \cdot \eta_{\text{Getriebestufe}} = 22 - 29 \%$$

$$\eta_{\text{Batterie-LHD}} = \eta_{\text{Batterie}} \cdot \eta_{\text{E-Motor}} \cdot \eta_{\text{Getriebestufe}} = 68 - 73 \%$$

Den Fahrzeugen muss folgende Menge an Primärenergie in einer Schicht zugeführt werden:

$$E_{\text{PE,Diesel-LHD,min}} = \frac{E_{\text{Antrieb Rad}}}{\eta_{\text{Diesel-LHD,max}}} = 1552 \text{ kWh};$$

$$E_{\text{PE,Diesel-LHD,max}} = \frac{E_{\text{Antrieb Rad}}}{\eta_{\text{Diesel-LHD,min}}} = 2046 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{PE,Batterie-LHD,min}} = \frac{E_{\text{Antrieb Rad}}}{\eta_{\text{Batterie-LHD,max}}} = 616 \text{ kWh};$$

$$E_{\text{PE,Batterie-LHD,max}} = \frac{E_{\text{Antrieb Rad}}}{\eta_{\text{Batterie-LHD,min}}} = 662 \text{ kWh};$$

Als laufende Kosten im Betrieb werden lediglich die Kosten für die Energieträger bzw. Energiespeicher berücksichtigt. Wartungskosten und dergleichen werden nicht aufgeführt, sollten aber im konkreten Fall berücksichtigt werden.

Laufende Kosten: Diesel-LHD

Das Dieselfahrzeug verfügt über den Dieselmotor und den Tank, die beide auf die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs ausgelegt sind. Daher fallen hier keine laufenden Betriebskosten außer die des Primärenergieträgers an. Der aktuelle Preis pro Liter Diesel beträgt 1,148 € [67]. Die Dichte von Diesel wird mit $\rho_{i,Diesel} = 0,833 \frac{kg}{dm^3}$ angenommen.

$$K_{PE,Diesel,min} = K_{Diesel} * \frac{E_{PE,Diesel-LHD,min}}{H_{i,Diesel} * \rho_{i,Diesel}} = 182 \text{ €}; K_{PE,Diesel,max} = 239 \text{ €}$$

Die aufgenommene Energiemenge entspricht einem Dieselvolumen von

$$V_{Diesel,min} = \frac{E_{PE,Diesel-LHD,min}}{H_{i,Diesel} * \rho_{i,Diesel}} = 158 \text{ Liter}; V_{Diesel,max} = 208 \text{ Liter}$$

Bei einem Tankvolumen von 300 Liter kommt die Maschine mit einer Füllung über die komplette Schicht. Weiterer Zeitverlust durch Tanken entfällt.

Bezogen auf die Gesamteinsatzzeit von 10 Jahren @ 220 Tagen pro Jahr ergeben sich die gesamten laufenden Kosten zu:

$$K_{Ges,Diesel,min} = K_{PE,Diesel,min} * 10 * 220 = 400.400 \text{ €};$$

$$K_{Ges,Diesel,max} = 525.800 \text{ €}$$

Laufende Kosten: Batterie-LHD:

Der Strompreis für Industriestrom beträgt aktuell 17,12 Cent/kWh [68]. Damit verursacht der Batterie-LHD folgende laufende Kosten pro Schicht:

$$K_{PE,Batterie,min} = K_{Batterie} * E_{PE,Batterie-LHD,min} = 106 \text{ €}; K_{PE,Batterie,max} = 113 \text{ €}$$

Bei Batteriefahrzeugen müssen die begrenzte Kapazität und Lebensdauer der Batterien mit in die laufenden Kosten eingerechnet werden. Das Fahrzeug ist mit einer 200 kWh LiFePO-Batterie mit 3000 Vollladezyklen ausgestattet. Die Ladestation der Batterien kann 65 kW Ladeleistung bereitstellen.

Um die berechnete Energiemenge zur Verfügung stellen zu können, benötigt das Fahrzeug drei Batterien im Wechsel. Der Wechsel kann so geplant werden, dass dieser in den Pausenzeiten von Servicepersonal durchgeführt wird. Daher werden keine Verlustzeiten durch den Batteriewechsel berücksichtigt.

Gegenwärtig belaufen sich die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien auf ca. 300 – 600 €/kWh (siehe [9]). Es wird zur Vereinfachung ein Preis von 450 €/kWh angenommen. Damit hat eine Batterie genannter Größe einen Anschaffungspreis von:

$$K_{Batterie} = K_{Batterie \text{ pro kWh}} * E_{Batterie} = 90000 \text{ €};$$

Wie bereits oben festgehalten, benötigt das Fahrzeug mindestens drei Batterien im Wechsel, d.h.

$$K_{W-Batterien} = K_{Batterie} * 3 = 270.000 \text{ €};$$

Weiterhin hat eine Batterie nur eine begrenzte Lebensdauer von 3000 Vollladezyklen. Es wird angenommen, dass die Batterien immer zu 80 % geladen und entladen werden, d.h. effektiv stehen dem Fahrzeug 180 kWh Energie mit einer Batterieladung zur Verfügung. Pro Schicht werden daher vier Batterievollladungen benötigt.

Vereinfacht bedeutet dies, dass jede der drei Batterien pro Tag 1,3-mal geladen werden muss. Damit ergibt sich eine Lebensdauer der Batterien von jeweils:

$$t_{\max, \text{Batterie}} = \frac{3000 \text{ Zyklen}}{1,3 \frac{\text{Zyklen}}{d}} = 2307 d = 10 y 107 d$$

Entsprechend oben stehender Rechnung und Annahmen reichen die drei Batterien damit aus, das Fahrzeug 10 Jahre lang zu betreiben. Dadurch müssen allerdings die variablen Kosten für das batteriebetriebene Fahrzeug um die Kosten durch die Batterieabnutzung ergänzt werden, da nach ca. 10 Jahren drei neue Batterien beschafft werden müssen. Daraus ergeben sich die laufenden Kosten für einen Batterie-LHD zu:

$$K_{\text{Ges}, \text{Batterie}, \min} = 10 \cdot 220 \cdot K_{PE, \text{Batterie}, \min} + K_{W-\text{Batterien}} = 503200 \text{ €};$$

$$K_{\text{Ges}, \text{Batterie}, \max} = 518600 \text{ €}$$

Der Vergleich zeigt, dass Diesel- und Batterie-LHD unter den angegebenen Randbedingungen ähnlich hohe Kosten verursachen. Folgende Anmerkungen sollten zu dieser Berechnung berücksichtigt werden:

- In die bisherige Berechnung gehen die Anschaffungskosten der Fahrzeuge nicht ein. Diese liegen bei Batteriefahrzeugen deutlich über denen von Dieselfahrzeugen.
- Batterieelektrische Fahrzeuge gelten als deutlich wartungsärmer als vergleichbare Dieselfahrzeuge. Eine entsprechende Analyse der laufenden Wartungskosten sollte daher für beide Fahrzeuge durchgeführt und die Wartungskosten in der Berechnung mit aufgenommen werden.
- Die zukünftige Preisentwicklung von Diesel und Industriestrom wurde nicht berücksichtigt. Der Trend der letzten Jahre zeigt aber, dass beide Energieträger teurer werden. Weiterhin ist anzunehmen, dass Industriestrom auf lange Sicht eine geringere Kostensteigerung erfahren wird als Diesel.
- Der Trend in der Batterieentwicklung deutet darauf hin, dass sich bis ca. 2025 entweder die Kapazität der Batterien verdoppelt oder deren Kosten halbieren.[19] Dementsprechend reduzieren sich die durch Neuanschaffungen verursachten Kosten deutlich.
- Die Lebensdauer einer Batterie gibt die Anzahl an Vollladezyklen an, bis die Nennkapazität der Batterie auf 80 % der Ausgangsnennkapazität gefallen ist (siehe Kapitel 4.4). Maßnahmen, die das Weiterverwenden der gleichen Zelle ermöglichen, würden die laufenden Kosten der Batterien deutlich senken, da sich deren Einsatzzeit dadurch erhöht. Denkbar wäre z.B. eine Wiederaufbereitung oder eine Aufteilung von modularen Zellen auf andere Anwendungen, die eine geringere Kapazität benötigen. Auch der Weiterverkauf der „gealterten“ Zellen wäre denkbar. Entsprechende Maßnahmen können nach heutigem Stand nicht beziffert werden, hätten aber einen deutlichen Einfluss auf die Kosten von batterieelektrischen mobilen Arbeitsmaschinen.

Im Folgenden werden die verbleibenden Schritte der Methode aufgeführt und kurz erläutert. Diese wurden allerdings im Rahmen der Studie bisher nicht durchgeführt.

8.5 Schritt 5: Konzeptauswahl und Konzeptverifizierung mittels der Grunddaten

Im nächsten Schritt kann anhand des Emissionsreduzierungspotentials der einzelnen Maschinen ein für die konkrete Maschine mögliches Konzept ausgewählt werden. Treffen mehrere Konzepte zu, so ist mit einer Bewertung abzuwägen, welches Konzept am geeignetsten ist. Die für die Bewertung notwendigen Parameter (KPI, Key Performance Indicators) müssen definiert werden. Nach der Konzeptauswahl muss dieses nochmal mit den vorhandenen Daten abgeglichen und dessen Umsetzbarkeit und Zielerfüllung dadurch verifiziert werden.

8.6 Schritt 6: Konzeptumsetzung

In Schritt 6 wird das gewählte Konzept umgesetzt. Entsprechende Prozesse und Methoden sind bekannt und / oder der einschlägigen Fachliteratur des Stands der Technik zu entnehmen. Die Konzeptumsetzung umfasst hierbei alle notwendigen Schritte zur Umsetzung der Maßnahme, von der ersten Planung, über die Beschaffung und die Einführung bis hin zur Inbetriebnahme und Feldtests.

8.7 Schritt 7: Bewertung der Umsetzung, Validierung des Konzepts

Nachdem die Maßnahme erfolgreich umgesetzt wurde und in Betrieb gegangen ist, erfolgt in Schritt 7 die Bewertung und damit die Validierung der Maßnahme. Dieser Schritt ist wichtig, da nur so eine Bewertung der Funktionserfüllung erfolgen kann und damit Optimierungspotentiale aufgetan werden können. Die Bewertung erfolgt anhand der in Schritt 6 definierten KPIs. Die Bewertung und Validierung muss in Form eines Berichtes festgehalten werden, entsprechende Ergebnisse und Erkenntnisse müssen der ursprünglichen Konzeptdatenbank hinzugefügt werden, damit z.B. bei der Umsetzung aufgetretene Fehler nicht erneut gemacht werden. Schritt 7 bis Schritt 9 sind daher als Teil einer Iterationsschleife zu sehen.

8.8 Schritt 8: Konzeptoptimierung

Hat Schritt 7 konkretes Optimierungspotential ergeben, so sind in Schritt 8 entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Nach Abschluss der Optimierung schließt sich erneut Schritt 7 im Rahmen einer Iterationsschleife an.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Mobima: Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <http://www.fast.kit.edu/mobima/index.php>, Zugriff am: 26.09.2017.
- [2] e-mobil BW: e-mobil BW Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH. <http://www.e-mobilbw.de/de/>, Zugriff am: 26.09.2017.
- [3] Reisert, J. S.: Konzeptentwicklung zur Emissionsreduzierung von Fahrzeugen im Untertagebau in Gruben mit rein konventioneller Gewinnung. Karlsruhe 29.09.2017.
- [4] Siebert, J.: Besichtigungsbericht Grube A, 26.1.2016. Karlsruhe 27.03.2017.
- [5] Siebert, J.: Besichtigungsbericht Grube B, 02.02.2017. Karlsruhe 27.03.2017.
- [6] Dobbelaar, N.: Konzeptentwicklung zur Emissionsreduzierung von Fahrzeugen im Untertagebau in Gruben mit konventioneller und schneidender Gewinnung. Karlsruhe 29.09.2017.
- [7] Siebert, J.: Besichtigungsbericht Grube C, 09.02.2017. Karlsruhe 27.03.2017.
- [8] Siebert, J.: Besichtigungsbericht Grube D, 03.02.2017. Karlsruhe 27.03.2017.
- [9] Siebert, J.: Präsentation zum 1. Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses zum Projekt "Studie: Emissionsreduktion von Fahrzeugen im Unter-Tage-Bau". Karlsruhe 29.06.2017.
- [10] Thiebes, P.: Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen: Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine 2012.
- [11] Braess, H.-H. und Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2013.
- [12] Schmidt, S.: LNG-Tankstrategie für Mobile Arbeitsmaschinen. Karlsruhe Nov. 2017.
- [13] Kurzweil, P. und Dietlmeier, O. K.: Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, rechtliche Grundlagen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.
- [14] Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik: Grundlagen Materialien Anwendungen Gaserzeugung. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016.
- [15] Rahimzei, E.; Sann, K. und Vogel, M.: Kompendium: Li-Ionen-Batterien: im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektronik 2015.
- [16] Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.
- [17] Babel, G.: Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik: Lehr- und Arbeitsbuch. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.
- [18] Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2013.
- [19] Wohlfahrt-Mehrens, M.: Entwicklungsperspektiven elektrischer Energiespeicher. Karlsruhe 26.09.2017.
- [20] GMBI: Technische Regeln für Gefahrstoffe, Abgase von Dieselmotoren: TRGS 554 Oktober / 2008.
- [21] Siebert, J.: Projekt: Studie zur Emissionsreduktion von Fahrzeugen im Unter-Tage-Bau: Handout zum Stand der Technik von elektrifizierten mobilen Arbeitsmaschinen für den Einsatz im Unter-Tage-Bau. Karlsruhe 29.06.2017.
- [22] Caterpillar: 336E L/LN H. https://www.zeppelin-cat.de/fileadmin/Redaktion/Produkte/Bagger/Cat-Hybrid-bagger-336E-H/Datenblatt_336E_Hybrid.pdf, Zugriff am: 16.10.17.
- [23] Hitachi Construction Machinery: ZH210 Hybrid. <https://www.hitachicm.eu/wp-content/uploads/2016/03/KS-EN262EU.pdf>, Zugriff am: 16.10.17.

- [24] Komatsu Europe International N.V.: HB365LC Hybrid. http://www.kuhn.sk/content/download/HB365-3_UENSS18101_1702_ENG.pdf, Zugriff am: 16.10.17.
- [25] Kobelco Construction Machinery Europe B.V.: SK210H. https://www.kobelco-europe.com/wp-content/uploads/2017/01/GER_EU_SK210HLC_NLC.pdf, Zugriff am: 18.10.17.
- [26] Liebherr Hydraulikbagger GmbH: ERC-System (2016). S. 44.
- [27] Sennebogen: Green Hybrid. https://www.sennebogen.com/fileadmin/user_upload/Downloads_PDF_Broschueren/Broschueren_allgemein/Energy_saving_systems_brochure.pdf.
- [28] DMS Technologie GmbH: Takeuchi TB 216 Hybrid. <http://dms-tec.de/wp-content/uploads/2016/05/20160517-DMS-Brosch%C3%BCre-Hybridbagger-DRUCK-DE-Pfade.pdf>.
- [29] Wacker Neuson: 803 Dual Power. <http://www.cautrac.com/wp-content/uploads/2017/02/wn-803-dual-power-.pdf.pdf>, Zugriff am: 18.10.17.
- [30] RWTH Aachen: STEAM. http://www.bauma-innovationspreis.de/images/pressebilder-innovationen/2016/PDFs/RWTH-Aachen_Hybridbagger.pdf, Zugriff am: 16.10.17.
- [31] Caterpillar: Cat Mining Trucks. https://www.cat.com/en_IN/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18534162.html, Zugriff am: 27.10.2017.
- [32] Liebherr Mining Equipment Newport News Co.: Liebherr Mining Trucks. <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/269966/NTB%20T%20284%20-%2012.2016.pdf>.
- [33] Volvo Construction Equipment: Innovation. <https://www.volvoce.com/global/en/this-is-volvo-ce/what-we-believe-in/innovation/>, Zugriff am: 26.09.2017.
- [34] Bosch: Weltpremiere: Nikola Motors und Bosch bringen Lkws mit Brennstoffzelle auf Achse. <http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/weltpremiere-nikola-motors-und-bosch-bringen-lkws-mit-brennstoffzelle-auf-achse-126336.html>, Zugriff am: 18.10.17.
- [35] Siemens AG: eHighway. <https://www.siemens.com/global/de/home/produkte/mobilitaet/strassenverkehr/elektromobilitaet/ehighway.html>, Zugriff am: 18.10.17.
- [36] Joy Global - Komatsu Mining: JOY22HD. <https://mining.komatsu/docs/default-source/product-documents/underground/hard-rock-equipment/en-j22hdhddh01-22hdspec.pdf?sfvrsn=24>, Zugriff am: 18.10.17.
- [37] Volvo Construction Equipment: LX1 and HX1. <https://www.volvoce.com/global/en/this-is-volvo-ce/what-we-believe-in/innovation/lx1-and-hx1/>, Zugriff am: 26.09.2017.
- [38] Volvo CE: In der Elektrifizierung der Baumaschinen liegt die „Zukunft der Industrie“. <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/about-us/news/elektrifizierung-der-baumaschinen/>, Zugriff am: 18.10.17.
- [39] Hitachi Construction Machinery: Hitachi unveils hybrid wheel loader at Intermat. <https://www.hitachicm.eu/press-center/hitachi-unveils-hybrid-wheel-loader-at-intermat/>, Zugriff am: 19.10.17.
- [40] John Deere: 644K Hybrid. <https://www.deere.com/en/loaders/wheel-loaders/644k-hybrid-wheel-loader/>, Zugriff am: 19.10.17.
- [41] TU Dresden: Forschungsprojekt TEAM. <http://www.team-mobilemaschinen.de/>, Zugriff am: 27.10.2017.
- [42] Merlo Deutschland GmbH: Gold für Merlo Hybrid-Teleskop. <https://www.merlo.de/news/2013/gold-fuer-merlo-hybrid-teleskop/>, Zugriff am: 27.10.2017.
- [43] Geimer, M. und Frerichs, L.: Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben Antriebsstrang mit Energierückgewinnung: Entwicklungsmethodik und Betriebsstrategien für mobile Arbeitsmaschinen 08 / 2014.
- [44] VDE ETG Energietechnische Gesellschaft: Laden ohne Kabel - Die kontaktlos-induktive Energieübertragung in der Elektromobilität. <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/informationen/ladenohnekabel>, Zugriff am: 09.11.2017.

- [45] BWM Group: BMW Group treibt Entwicklung von Systemen für induktives Laden von Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen voran. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0186710DE/bmw-group-treibt-entwicklung-von-systemen-fuerinduktives-laden-von-elektro-und-plug-in-hybrid-fahrzeugenvoran?language=de>, Zugriff am: 09.11.2017.
- [46] Vogel, B.: Strom tanken wie von Zauberhand. http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_5538400.pdf, Zugriff am: 09.11.2017.
- [47] EVATRAIN Group: Plugless. <https://www.pluglesspower.com/>, Zugriff am: 09.11.2017.
- [48] Teilinstitut Bahnsystemtechnik: Induktive Energieübertragung. <http://www.fast.kit.edu/bst/5543.php>, Zugriff am: 09.11.2017.
- [49] Atlas Copco: Atlas Copco to acquire GIA, broadens offering for mining and tunneling, Zugriff am: 28.02.2018.
- [50] LKAB. <https://www.lkab.com/en/>, Zugriff am: 28.02.2018.
- [51] electrive.net: Bergbau: Artisan Vehicles zeigt elektrischen 40-Tonner - electrive.net. <https://www.electrive.net/2018/03/19/bergbau-artisan-vehicles-stellt-elektrischen-40-tonner-vor/>, Zugriff am: 27.03.2018.
- [52] Artisan Vehicles: Z40 - Artisan Vehicles. <http://www.artisanvehicles.com/z40/>, Zugriff am: 27.03.2018.
- [53] SUNCAR HK AG: Elektrobagger. <http://www.suncar-hk.com/de/elektrobagger/technik.php>, Zugriff am: 09.11.2017.
- [54] Kramer-Werke GmbH, Wacker Neuson Group: Kramer 5055e - Null Emission, volle Leistung. <http://www.kramer-online.com/de/produkt/model/5055e/>, Zugriff am: 20.11.2017.
- [55] Fachtagung Hybride und Energieeffiziente Antriebe für Mobile Arbeitsmaschinen; Karlsruher Institut für Technologie und Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau: Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen: 6. Fachtagung 15. Februar 2017 Karlsruhe. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2017.
- [56] Paus, H.: Batterieelektrisch Hybrid angetriebenes Befahrungsfahrzeug für den Bergbau: Motivation, Konzept, erste Erfahrungen. Karlsruhe 26.09.2017.
- [57] Wurster, R. und Schmidtchen, U.: DWV Wasserstoff-Sicherheits-Kompendium: [Report]. Berlin: DWV 2011.
- [58] Herold, G.: Grundlagen der elektrischen Energieversorgung. Stuttgart: Teubner 1997.
- [59] Jensen, S.: A Matter of Survival. <https://www.oemoffhighway.com/electronics/article/12246203/battery-powered-underground-mining-equipment>, Zugriff am: 28.02.2018.
- [60] Aigner, M.: Graphentheorie: Eine Einführung aus dem 4-Farben Problem. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Spektrum 2015.
- [61] Kreyenberg, D.: Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität: Total Cost of Ownership, Energieeffizienz, CO2-Emissionen und Kundennutzen. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016.
- [62] N.N.: Poel-Tec: Auto Technik Lexikon - Technik und Treibstoffe. <http://www.poel-tec.com/lexikon/zapfseule.php>, Zugriff am: 29.10.2017.
- [63] PitPoint.DE: LNG Tanken Einfach, schnell und sicher tanken. <http://www.pitpoint.nl/de/lng-tanken/>, Zugriff am: 29.10.2017.
- [64] Clean Energy Partnership CEP: H2 Infrastruktur. <https://cleanenergypartnership.de/h2-infrastruktur/betankung/>, Zugriff am: 29.10.2017.
- [65] EVANNEX: Understanding Tesla's lithium ion batteries. <https://evannex.com/blogs/news/understanding-teslas-lithium-ion-batteries>, Zugriff am: 29.10.2017.
- [66] WVMA e. V. Wissenschaftlicher Verein für Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe (Hrsg.): Hydrostatisch Regeneratives Bremssystem (HRB) 2007.

- [67] MWV Mineralöl Wirtschafts Verband eV: Durchschnittlicher Preis für Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2017* (Cent pro Liter). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/>, Zugriff am: 29.10.2017.
- [68] BDEW: Industriestrompreise* (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2017 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industries-trompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/>, Zugriff am: 29.10.2017.