FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · R. Micheli

H2IntraDrive – Einsatz einer wasserstoff-betriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen

Forschungsbericht

zu dem Forschungsvorhaben

H2IntraDrive – Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Konsortialpartnern im Forschungsvorhaben sind

BMW Group,
Linde Material Handling.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur unter dem Förderkennzeichen 03BS112B

Gefördert durch: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Koordiniert durch: NOW Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) gefördert.

nip Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Herausgegeben von:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner
fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,
Printed in Germany 2015

ISBN: 978-3-941702-58-5

fml – Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik
Technische Universität München
Boltzmannstr. 15
85748 Garching
Tel.: + 49.89.289.15955
Fax: + 49.89.289.15922
www.fml.mw.tum.de

Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens H2IntraDrive war die Erforschung des Ressourcenaufwandes von wasserstoffbetriebenen Gabelstaplern und Routenzugschleppern an einem innovativen Produktionsstandort sowie deren reale Betriebsbedingungen. Ferner sollte nachgewiesen werden, inwiefern der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen hinsichtlich energetischer Effizienz, Zuverlässigkeit, Lebensdauer sowie der ökologischen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit sinnvoll ist.

Als innovativer Produktionsstandort für die Erprobung der Flurförderzeuge wurde der BMW i Karosseriebau im BMW Group Werk Leipzig gewählt. Dort wurde von der BMW Group (BMW) die erste deutsche Wasserstoffinfrastruktur mit Indoor-Betankung in einer Produktionshalle aufgebaut und behördlich genehmigt. Parallel dazu wurden von Linde Material Handling (Linde MH) sechs Routenzugschlepper und fünf Gabelstapler mit Batterieantrieb für den Einsatz mit Brennstoffzellensystemen umgerüstet. Daraus resultierende Erkenntnisse aus Sicht des Anwenders wurden vom Lehrstuhl fml in einem Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen festgehalten.

Mit Hilfe von Messreihen, daraus abgeleiteten Kennzahlen und wissenschaftlichen Untersuchungen wurden u.a. in einem Technologievergleich Störmeldungen, Energiebedarfe, Betankungsmengen, Reichweiten, Wirkungsgrade, Lebensdauern und manuelle Handhabungsprozesse bewertet. Die Ergebnisse wurden dabei den Daten der konventionellen batteriebetriebenen Flurförderzeuge gegenübergestellt.

Im Rahmen einer Ökobilanz wurde die ökologische Nachhaltigkeit der Flurförderzeuge bewertet. Das Treibhauspotenzial über den gesamten Lebenszyklus von wasserstoffbetriebenen Schleppern und Gabelstaplern wurde dem von batteriebetriebenen gegenübergestellt. Dabei wurden zum einen konventionelle Energiepfade durch die Verwendung von Strom aus dem deutschen Strommix und Wasserstoff aus Dampfreformierung von Erdgas bewertet. Zum anderen wurde die Auswirkung der Verwendung von grünen Energiepfaden durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien und grün zertifiziertem Wasserstoff aus Elektrolyse von Wasser untersucht.

Für die Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit wurden Kostentreiber und -einflussfaktoren identifiziert und kategorisiert. Darauf aufbauend wurde ein Life-Cycle-Costing-Modell entwickelt und mit Hilfe der Kapitalwertmethode die Kosten der Flurförderzeuge über deren Lebenszyklus bestimmt. Hierfür wurde jeweils ein Basisszenario mit 50 Schleppern bzw. Gabelstaplern definiert und mit realen Kosten von Herstellern bewertet. Abschließend wurde der Einfluss verschiedenster Kostentreiber

durch Sensitivitäten analysiert. Dadurch konnten wesentliche Kosteneinflussfaktoren identifiziert werden.

Abschließend wurden im Rahmen eines Benchmarks die Flurförderzeuganwendung H2IntraDrive und Anwendungen in den USA untersucht. Infolgedessen konnten wesentliche Unterschiede zwischen den Rahmenbedingungen für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen in Deutschland und den USA identifiziert werden.

Die unterschiedlichen Fragestellungen und Themen innerhalb des Forschungsvorhabens führten zu einem umfangreichen Forschungsbericht. Im Forschungsbericht wurde versucht, einzelne Themen innerhalb eines Kapitels zu beschreiben. Infolgedessen können bei Bedarf einzelne Kapitel unabhängig voneinander gelesen werden. Ferner ist am Ende jedes Kapitels eine Zusammenfassung mit den wichtigsten Erkenntnissen aus der jeweiligen Fragestellung zu finden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **V**

Formelzeichenverzeichnis **XI**

1 Einleitung **1**

1.1 Projektziele und Arbeitsschwerpunkte 1

1.2 Projektpartner 2

1.3 Arbeitsplan 3

1.4 Zusammenarbeit mit Projektpartnern und Fördermittelgeber 7

2 Stand der Technik und Wissenschaft **9**

2.1 Flurförderzeuge 9

2.1.1 Begriffsdefinition 9

2.1.2 Einteilung der Flurförderzeuge 9

2.1.3 Bauformen 10

2.1.4 Flurförderzeugmarkt 13

2.2 Brennstoffzellensysteme 16

2.2.1 Brennstoffzellen 16

2.2.2 Aufbau und Funktionsweise Brennstoffzellensystem 18

2.2.3 Wasserstoffherstellung 20

2.2.4 Wasserstoffinfrastruktur 23

2.2.5 Beendete H_2-Flurförderzeuganwendungen in Deutschland 23

2.2.6 Aktuelle H_2-Flurförderzeuganwendungen in Europa 25

2.2.7 H_2-Flurförderzeuganwendungen außerhalb Europas 27

2.2.8 Brennstoffzellensystemmarkt 29

2.3 Batterien 30

2.3.1 Blei-Säure Batterien 30

2.3.2 Ladegeräte 33

2.3.3 Batteriemarkt 35

2.4 Ökologische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen 35

2.4.1 Ökobilanzierung von Flurförderzeugen 35

2.5 Wirtschaftliche Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen 37

2.5.1 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Flurförderzeugen 38

2.6 Fazit 39

3 H_2-Flurförderzeuganwendung H2IntraDrive 41

3.1 Anwendungsstandort BMW Group Werk Leipzig 41

3.2 H_2-Flurförderzeuge 42

3.2.1 Brennstoffzellenbetriebene Gabelstapler 42

3.2.2 Brennstoffzellenbetriebene Schlepper 43

3.3 H_2-Infrastruktur 44

3.3.1 Wasserstoffspeicher und Betankungsanlage 44

3.3.2 Dispenser 45

3.4 Herausforderungen für Anwender bei der Umsetzung von H2IntraDrive 46

3.5 Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen 47

4 Datenerhebung aus Erprobung und Betrieb 49

4.1 Vorgehensweise 49

4.1.1 Identifikation von Kenn- und Messwerten 49

4.1.2 Messequipment 50

4.1.3 Planung und Durchführung von Messungen 51

4.2 Ergebnisse aus dem Bereich Flurförderzeuge 52

4.2.1 Betriebsstunden H_2-Flurförderzeuge 52

4.2.2 Service und Wartungsausfälle H_2-Flurförderzeuge 54

4.2.3 Anwendungsspezifische Auswertung und Analyse des Gabelstaplereinsatzes 56

4.2.4 Anwendungsspezifische Auswertung und Analyse des Schleppereinsatzes 62

4.2.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse 65

4.3 Ergebnisse aus dem Bereich Infrastruktur 65

4.3.1 Wasserstoffverbrauch 65

4.3.2 Durchschnittliche Betankungsmengen 67

4.3.3 Energieverbrauch 70

4.3.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse 72

5 Technologievergleich Brennstoffzellensysteme und Batterien 73

5.1 Vorgehensweise 73

5.2 Kennzahlenfeld Reichweite 73

5.2.1 Reichweite 73

5.2.2 Wirkungsgrade 75

5.3 Kennzahlenfeld Zuverlässigkeit 76
5.3.1 Betriebliche Verfügbarkeit 76
5.3.2 Lebensdauer 77
5.4 Bewertung manueller Handhabungsprozesse 78
5.4.1 Batteriewechsel 78
5.4.2 Wasserstoffbetankung 80
5.4.3 Zeitliche Bewertung mit Hilfe der MTM-Analyse 81
5.4.4 Ergebnisse der zeitlichen Bewertung 83
5.4.5 Physische Belastung des Mitarbeiters 86
5.4.6 Fazit 88
5.5 Zusammenfassung 89

6 Ökologische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen 91
6.1 Grundlagen der Ökobilanz 91
6.1.1 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen 93
6.1.2 Sachbilanz 93
6.1.3 Wirkungsabschätzung 94
6.1.4 Auswertung 95
6.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz 96
6.2.1 Zieldefinition 96
6.2.2 Produktsysteme 96
6.2.3 Systemgrenzen und Allokation 97
6.2.4 Funktionelle Einheit und Referenzfluss 98
6.2.5 Datenerhebung und Datenqualität 98
6.2.6 Art der Wirkungsabschätzung 99
6.3 Modellerstellung und Sachbilanz 99
6.3.1 Herstellungsphase Flurförderzeug 100
6.3.2 Herstellungsphase Power Unit 102
6.3.3 Nutzungsphase 104
6.3.4 Recycling und Entsorgung 108
6.3.5 Transport 109
6.4 Wirkungsabschätzung und Ergebnisse 110
6.4.1 Schlepper 111
6.4.2 Gabelstapler 113
6.5 Zusammenfassung 115

7 Wirtschaftliche Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen 117
7.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse 117
7.1.1 Verfahren der Wirtschaftlichkeitskontrolle 117
7.1.2 Lebenszykluskostenrechnung 121
7.2 Life Cycle Cost-Modell 123
7.2.1 Kostenanalyse bei Flurförderzeugen 123
7.2.2 Bestimmung von Kostentreibern sowie Kosteneinflussfaktoren 123
7.2.3 Berechnungsmethodik 127
7.3 Definition von Rahmenbedingungen für das Basisszenario 130
7.3.1 Basisszenario Schlepper 130
7.3.2 Basisszenario Gabelstapler 135
7.4 Ergebnisse Basisszenarien 139
7.4.1 Schlepper 139
7.4.2 Gabelstapler 141
7.5 Sensitivitätsanalysen 142
7.5.1 Definition Eingangsparameter der Sensitivitätsanalysen 142
7.5.2 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Schlepper 145
7.5.3 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Gabelstapler 147
7.6 Zusammenfassung 149

8 Benchmark H_2-Anwendungen Deutschland und USA 151
8.1 Benchmarkingmethode 151
8.2 Datenerhebung 153
8.3 Diskussion der Daten 155
8.4 Zusammenfassung 158

9 Zusammenfassung und Ausblick 159
9.1 Zusammenfassung 159
9.2 Ausblick 162

10 Publikationen 163
10.1 H2IntraDrive-Homepage 163
10.2 Presseveranstaltungen H2IntraDrive 163
10.3 Vorträge 163
10.4 Veröffentlichungen 164
10.5 Geplante Publikationen 164

10.6 Weitere Berichterstattung über H2IntraDrive 165
10.6.1 Projektstart 165
10.6.2 Übergabe Flurförderzeuge 165
10.6.3 Zwischenfazit Brennstoffzellen-Gabelstapler 166

Literaturverzeichnis 167

Abbildungsverzeichnis 181

Tabellenverzeichnis 185

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
C_N	[Ah]	Nennkapazität der Batterie
C_0	[€]	Kapitalwert
$E_{FFZ,Bh}$	[kWh/h]	Energiebedarf Flurförderzeug pro Betriebsstunde
$EG_{BZ,nutzbar}$	[Ah]	Nutzbarer Energiegehalt eines Brennstoffzellen-systems
$EGPU_{nutzbar}$	[Ah]	Nutzbarer Energiegehalt der Power Unit
$EGPU,_{theoretisch}$	[Ah]	Theoretischer Energiegehalt der Power Unit
$FFZh_{Schicht}$	[h]	Anzahl an Flurförderstunden pro Schicht
$FFZh_{Schicht,Batterie}$	[h]	Anzahl an Flurförderstunden pro Schicht für E-Flurförderzeuge
$FFZh_{Schicht,H2}$	[h]	Anzahl an Flurförderstunden pro Schicht für H_2-Flurförderzeuge
GWP	[g CO_2-Äq.]	CO_2- Treibhausäquivalent
H_i	[kWh/kg]	Heizwert bzw. Lower Heating Value von Wasser-stoff
i	[%]	Kalkulationszinssatz
LD_{FFZ}	[h]	Lebensdauer des Flurförderzeuges
M	[kg/mol]	Molare Masse

m	[kg]	Masse
$m_{H2,Bz,max}$	[kg]	Maximaler Tankinhalt H_2-Flurförderzeug
m_i	[kg]	Masse der am Treibhauseffekt beteiligten Substanz
m_w	[kg]	Nachfüllmenge Wasser
N	[-]	Perioden
n	[mol]	Stoffmenge
$n_{Arbeitstage,Jahr}$	[-]	Anzahl der Arbeitstage pro Jahr
n_{FFZ}	[-]	Anzahl der Flurförderzeuge
$n_{H2,Bh}$	[kg]	Wasserstoffbedarf Flurförderzeug pro Betriebsstunde
$n_{Personal,Infra}$	[-]	Anzahl der Mitarbeiter Infrastruktur
$n_{Refuel,Schicht}$	[-]	Anzahl der Betankungen bzw. Batteriewechsel (Refuelings)
$n_{Schichten,Tag}$	[-]	Anzahl der Schichten pro Trag
p	[Pa]	Druck
p_A	[Pa]	Ausgangsdruck
$p_{273,15K}$	[Pa]	Druck bei 273,15 Kelvin
PK_{FFZ}	[€]	Personalkosten der Flurförderzeugfahrer
PK_{FFZh}	[€]	Personalkosten für die Flurförderzeugstunden pro Schicht

$PK_{FFZh,Batterie}$	[€]	Personalkosten für die Flurförderzeugstunden pro Schicht der Batterie-Flurförderzeuge
$PK_{FFZh,H2}$	[€]	Personalkosten für die Flurförderzeugstunden pro Schicht der H_2-Flurförderzeuge
PK_{Gesamt}	[€]	Personalkosten die mit einer Flurförderzeuganwendung in Verbindung stehen
PK_h	[€]	Personalkosten pro Stunde
PK_{Infra}	[€]	Personalkosten für den Betrieb der Infrastruktur
$PK_{weitere\ Tätigkeiten}$	[€]	Personalkosten für weitere Tätigkeiten
R	[J/molK]	Universelle Gaskonstante
$RWmax$	[h]	Maximale Reichweite des Flurförderzeugs
T	[K]	Temperatur
T_A	[K]	Ausgangstemperatur
$T_{273,15K}$	[K]	Absolute Temperatur bei 273,15 Kelvin
$t_{Anfahrt}$	[h]	Dauer für die Anfahrt zum Refueling
$t_{Ausfall,Schicht}$	[h]	Ausfallzeit pro Schicht
$t_{Brutto,Schicht}$	[h]	Bruttoarbeitsstunden pro Schicht
$t_{Netto,Schicht}$	[h]	Nettoarbeitsstunden pro Schicht
t_{Refuel}	[h]	Refuelingzeit
$t_{Störung,Schicht}$	[h]	Durchschnittliche Störungszeit pro Schicht
t_{Warten}	[h]	Wartezeit für das Refueling

$t_{Wartung,Schicht}$	[h]	Durchschnittliche Wartungszeit pro Schicht
U_{BZ}	[V]	Nennspannung des Brennstoffzellensystems
U_{PU}	[V]	Spannung der Power Unit
V	[m³]	Volumen
Z	[-]	Kompressionsfaktor
Z	[€]	Zahlungsströme der einzelnen Perioden
η	[-]	Wirkungsgrad der Power Unit
η_{Bz}	[-]	Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems
$\eta_{FFZ,Auslastung}$	[%]	Auslastung des Flurförderzeugs
η^{Ver}	[%]	betriebliche Verfügbarkeit
C_N	[Ah]	Nennkapazität der Batterie

1 Einleitung

Batteriebetriebene Flurförderzeuge (E-Flurförderzeuge) werden seit vielen Jahren in der Intralogistik eingesetzt. Lange Batterielade- und Abkühlzeiten führen zu zeit- und damit ressourcenaufwendigen Batteriewechseln sowie zu einer verminderten nutzbaren Betriebszeit der Fahrzeuge durch die Standzeiten während des Batteriewechsels. Ferner werden für die Batterieladung separate Laderäume mit Krane bzw. Hubeinrichtungen, Lüftungssystemen, Schutzwannen und Notfallduschen benötigt. Diese befinden sich innerhalb der Fertigungshallen und belegen dadurch meist wertvolle Produktionsflächen. Zudem entstehen während der Ladung der mit Schwefelsäure gefüllten Bleiakkumulatoren ätzende und für den Menschen gesundheitsschädliche Dämpfe. Folglich existieren bis heute Defizite im Umgang mit batteriebetriebenen Flurförderzeugen. Hinsichtlich der angesprochenen Aspekte bieten brennstoffzellenbetriebene Flurförderzeuge (H_2-Flurförderzeuge) im Vergleich zu Bleiakku-Flurförderfahrzeugen Vorteile. Sie können innerhalb weniger Minuten mit Wasserstoff befüllt werden. Ein deutlicher Anstieg der betrieblichen Verfügbarkeit der Fahrzeuge ist die Folge. Des Weiteren kann der Großteil der benötigten Wasserstoffinfrastruktur ins Freie verlagert werden, lediglich der Dispenser befindet sich in der Fertigungshalle. Ungeachtet dieser und weiterer Vorteile von Brennstoffzellensystemen sind in Europa nur einzelne prototypenhafte Anwendungen bekannt. Die Betrachtung einer Produktionsversorgung mit ausschließlich brennstoffzellenbetriebenen Flurförderzeugen und die daraus resultierenden Potenzialnachweise fehlen gänzlich.

1.1 Projektziele und Arbeitsschwerpunkte

Die primären Ziele des Forschungsvorhabens H2IntraDrive lagen in der erfolgreichen Erforschung

- des Ressourcenaufwandes von wasserstoffbetriebenen Gabelstaplern (H_2-Gabelstapler) und Routenzugschleppern (H_2-Schlepper) an einem innovativen Produktionsstandort,
- der Belastung der Wasserstoffkomponenten von Flurförderzeugen, insbesondere des Brennstoffzellensystems und
- der realen Betriebsbedingungen für Flurförderzeuge mit Brennstoffzellen bzgl. Tankzeiten, Wartung usw..

Während der Projektlaufzeit sollte zudem nachgewiesen werden, inwiefern ein Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen unter Produktionsbedingungen an einem innovativen Produktionsstandort hinsichtlich energetischer Effizienz, Zuverlässigkeit, Lebensdauer sowie der ökologischen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit sinnvoll ist. Darauf aufbauend waren die Arbeitsschwerpunkte des Vorhabens

- der Einsatz von fünf Gegengewichtsstaplern und sechs Routenzugschleppern in einer neu geplanten Werkshalle, welche mit Wasserstoff mehrschichtig betrieben werden,
- die Produktionsversorgung des CFK-Karosseriebaus im BMW Group Werk Leipzig mit ausschließlich H_2-Flurförderzeugen,
- der Aufbau der ersten deutschen Betankungsanlage mit Indoor-Betankung in einer Produktionshalle,
- der Einsatz von grün zertifiziertem Wasserstoff,
- der Technologievergleich zwischen Brennstoffzellensystemen und Bleiakkumulatoren bei Flurförderzeugen,
- die Untersuchung der ökologischen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen,
- die Untersuchung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen,
- die Wettbewerbs- bzw. Benchmark Analyse von H_2-Flurförderzeugen und
- die Untersuchung der Belastung der Wasserstoffkomponenten von Flurförderzeugen während der Erprobungszeit, insbesondere der Brennstoffzelle (Lebensdauer, Verfügbarkeit, etc.).

1.2 Projektpartner

Das Forschungsvorhaben H2IntraDrive wurde von den drei gleichgestellten Partnern BMW, Linde MH und Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München (TUM) bearbeitet, wobei die Rollen im Projekt klar verteilt waren. Wie in Abbildung 1-1 ersichtlich war die BMW Group für die Projektleitung und die Erprobung der H_2-Flurförderzeuge verantwortlich. Linde MH war hingegen für die Entwicklung der H_2-Flurförderzeuge zuständig. Zu diesem Zweck wurden seriennahe, normalerweise batteriebetriebene, Flurförderzeuge für den Betrieb mit Brennstoffzellensystemen modifiziert, getestet und zugelassen. Der Lehrstuhl fml führte die Abstimmung und Definition von Anforderungen an die Wasserstoffinfrastruktur (H_2-Infrastruktur), H_2-Flurförderzeuge und Schnittstellen zwischen Infrastruktur und Flurförderzeug durch. Zudem war dieser für die wissenschaftliche Begleitung im Projekt verantwortlich. Dazu zählten vor allem die Untersuchung der wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit der H_2-Flurförderzeuge sowie Benchmarking Betrachtungen zwischen der H2IntraDrive-Anwendung in Deutschland und H_2-Anwendungen in den USA.

Abbildung 1-1: Konsortialpartner des Forschungsvorhabens H2IntraDrive

Neben den eigentlichen Projektpartnern waren im Projekt eine ganze Reihe weiterer Industrieunternehmen mit involviert. Dazu zählten u.a. der Lieferant der H_2-Infrastruktur, die Brennstoffzellensystemlieferanten und der Service-Partner der Flurförderzeuge bei BMW vor Ort.

1.3 Arbeitsplan

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise im Förderprojekt dargestellt. Dabei werden neben den Arbeitspaketen (AP) des Lehrstuhls fml die AP der Projektpartner kurz beschrieben und die Verantwortlichen des jeweiligen AP in Klammern angegeben. Infolgedessen können inhaltliche Zusammenhänge zwischen den einzelnen AP besser aufgezeigt werden. In der späteren Ergebnisdarstellung werden jedoch vorwiegend die Ergebnisse des Lehrstuhls fml vorgestellt.

AP1: Projektmanagement (BMW)
Als Projektleiter übernimmt BMW auch das Projektmanagement. Hierbei werden die einzelnen AP und Inhalte koordiniert. Ferner werden regelmäßige Projekttreffen organisiert.

AP2: Anforderungsmanagement (Lehrstuhl fml)
Zunächst werden in diesem AP die Spezifikationen für die benötigte H_2-Infrastruktur zusammen mit dem Betreiber und den Lieferanten abgestimmt. Hierfür bedarf es u.a. Angaben zu Wasserstoffspeicher, Betankungsanlage, Dispenser, notwendigen baulichen Vorbereitungen sowie erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen. Parallel zu den Anforderungen an die Infrastruktur werden Anforderungen aus dem Betrieb bzw. der Erprobung der H_2-Flurförderzeuge erarbeitet. Neben den Arbeitssicherheitsanforderungen werden vor allem Lasten, Hubhöhen usw. berücksichtigt. Ferner werden die Schnittstellen zwischen dem Fahrzeug und der Infrastruktur spezifiziert. Dazu zählen die Betankungskupplung, die Absaugkupplung für das Kondensatwasser sowie die Erdung der Fahrzeuge. Abschließend werden die für die wissenschaftliche Bewertung benötigten Daten definiert. Darauf aufbauend werden geeignete Methoden (z.B. Datenlogger) für die Erhebung dieser Daten mit den Projektpartnern abgestimmt.

AP3: Spezifikation Brennstoffzellensystem (Linde MH)
Für die spezifische Auslegung des Brennstoffzellensystems muss der Einsatz bei BMW analysiert werden. Dabei werden Fahrprofile sowie erforderliche Leistungsabgaben der Brennstoffzellensysteme ermittelt. Infolgedessen können wichtige Auslegungsdaten wie beispielsweise die Kapazität des Energiespeichers im Brennstoffzellensystem oder die Fahrtdauer bis zum nächsten Tankeinsatz für diesen speziellen Einsatzfall festgelegt werden.

AP4: Integration der Brennstoffzellen in die Flurförderzeuge (Linde MH)
Die Integration der Brennstoffzellentechnik erfolgt in E-Flurförderzeuge und erfordert dort einige Modifikationen. Hierzu zählen Maßnahmen, die aufgrund des geringeren Gewichtes des Brennstoffzellensystems, der Zu- und Abfuhr der Kühlluft, der Absaugung des Kondensatwassers, der Wasserstoffbetankung, der Notausschaltung etc. notwendig sind. Bedingt durch den Einsatz von Wasserstoff sind weitere Maßnahmen erforderlich um die Sicherheit von Fahrer, Umgebung und Fahrzeug zu gewährleisten. Neben der Planung und Realisierung dieser Modifikationen wird das Brennstoffzellensystem inkl. Bedienterminal in das Fahrzeug integriert. Ferner werden die einzelnen Flurförderzeuge den qualitätssichernden Maßnahmen der Serienproduktion und dem Testprozedere (Fahrerprobung, Kipptest usw.) unterzogen. Abschließend wird aufgrund des Brennstoffzellenantriebes die Konformitätserklärung zur CE-Kennzeichnung überarbeitet.

AP5: Infrastrukturaufbau (BMW)
Für die geplante Erprobung im BMW Group Werk Leipzig muss eine stationäre Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden. Aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen im CFK-Karosseriebau dürfen die Flurförderzeuge während des Betriebes die Werkshalle nicht verlassen. Infolgedessen sollen diese in der Halle (indoor) betankt werden. Für den Infrastrukturaufbau müssen zunächst auf Basis der in AP2 definierten Spezifikationen Angebote von verschiedenen Lieferanten eingeholt und verglichen werden. Nach der Auftragsvergabe sind vorab bauliche Vorbereitungen wie Fundamentlegung, Durchbrüche für Rohrleitungen usw. zu treffen. Parallel dazu müssen behördliche Zulassungen und Betriebsgenehmigungen beantragt werden. Abschließend gilt es BMW vor Ort auf den Betrieb und Service der H_2-Infrastruktur vorzubereiten. Hierzu gehören Schulungen von Mitarbeitern sowie der Werksfeuerwehr.

AP6: Erprobung, Betrieb und Service der Flurförderzeuge (BMW)
In diesem Arbeitspaket gilt es die reibungslose Erprobung bzw. den Betrieb der Flurförderzeuge sicherzustellen. Hierfür sind anfängliche Testanwendungen sowie Schulungen der Flurförderzeugfahrer notwendig. Zudem werden zur Minimierung des Be-

treiberrisikos Notfallkonzepte für einen eventuellen Ausfall der Flurförderzeuge entwickelt. Abschließend gilt es, die Wartungen der Flurförderzeuge sowie Brennstoffzellensysteme sicherzustellen und diese organisatorisch umzusetzen.

AP7: Wissenschaftliche Begleitung (Lehrstuhl fml)

AP7.1: Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Bewertung der Umweltauswirkungen von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen im Vergleich zu batteriebetriebenen Flurförderzeugen. Dies erfolgt mit Hilfe einer Ökobilanz nach DIN ISO 14040. Hierfür werden zunächst Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz definiert, wobei der gesamte Life-Cycle der Flurförderzeuge betrachtet wird. Anschließend werden zusammen mit den beteiligten Unternehmen alle notwendigen Daten für die Erstellung der Sachbilanzen erhoben. Darauf aufbauend kann die Wirkungsabschätzung erfolgen. Abschließend gilt es verschiedene Anwendungsszenarien mit z.B. unterschiedlichen Energiepfaden zu bewerten.

AP7.2: Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen

Die wirtschaftliche Nachhaltigkeit wird in diesem Arbeitspaket mithilfe einer Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten von H_2-Flurförderzeugen und batteriebetriebenen Flurförderzeugen bewertet. Hierfür werden zu Beginn Einflussfaktoren auf die Kosten abgeleitet. Ziel ist die Ermittlung der gesamten Lebenszykluskosten von der Anschaffung bis zur Entsorgung der Flurförderzeuge sowie der notwendigen Infrastruktur. Anschließend wird ein Kostenmodell zur Bewertung eines „Basis-Szenarios“ erstellt. In der Ergebnisdiskussion werden die Kosten in einzelnen Bereichen wie Energiekosten, Investition Batterie/Brennstoffzelle und Investition Infrastruktur miteinander verglichen.

AP 7.3: Wirtschaftliche Bewertung von weiteren Flurförderzeuganwendungen

Auf Grundlage des in AP7.2 entwickelten Kostenmodells werden in diesem Arbeitspaket weitere Flurförderzeuganwendungen hinsichtlich eines wirtschaftlichen Einsatzes von H_2-Flurförderzeugen bewertet. Dabei werden unterschiedliche Parameter mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen untersucht. Aus den resultierenden Ergebnissen werden wesentliche Einflussfaktoren für einen wirtschaftlichen Betrieb von H_2-Flurförderzeugen abgeleitet. In der späteren Ergebnisdarstellung in diesem Bericht werden die Erkenntnisse aus AP7.2 und AP7.3 zusammenfassend dargestellt.

AP7.4: Technologievergleich und Benchmark

Im ersten Teilarbeitspaket wird die Brennstoffzellentechnologie mit der Batterietechnologie bei Flurförderzeugen verglichen. Dabei werden aus unterschiedlichen Kennzahlen sogenannte Kennzahlenfelder entwickelt. Die Kennzahlen werden anschließend erhoben bzw. berechnet und abschließend gegenübergestellt. Im zweiten Teilarbeitspaket wird mit Hilfe eines Benchmarkings die Anwendung im H2IntraDrive-Projekt mit Anwendungen in den USA verglichen. Ziel ist die Identifikation von wesentlichen Unterschieden bei den Rahmenbedingungen zwischen Deutschland und USA.

AP7.5: Dokumentation

Die in den Arbeitspaketen durchgeführten Arbeiten und die gewonnenen Ergebnisse werden in einem ausführlichen Schluss- bzw. Forschungsbericht dokumentiert. Abbildung 1-2 zeigt die Umsetzung der beschriebenen Arbeitspakete im Bericht. Nach der Einleitung und Projektvorgehensweise in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 der Stand der Technik und der Wissenschaft zum Thema wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge dargelegt. Ausgehend von den in den Arbeitspaketen 2 bis 7 durchgeführten Arbeiten des Lehrstuhls fml werden in den Kapiteln 2 bis 8 die wichtigsten Ergebnisse dargestellt. In Kapitel 3 wird die Flurförderzeuganwendung im Forschungsvorhaben H2IntraDrive vorgestellt. Die bei der Umsetzung gewonnenen Erfahrungen aus den AP2, AP5 und AP6 wurden in einem Leitfaden gebündelt. Dieser wird zudem in Kapitel 3 vorgestellt. In Kapitel 4 werden die wichtigsten Erkenntnisse und Kennzahlen aus der in AP6 durchgeführten Erprobung aufgezeigt. Darauf aufbauend werden die beiden Technologien Brennstoffzelle und Batterie bei Flurförderzeugen in Kapitel 5 verglichen (Teilpaket 1 von AP7.4). In Kapitel 6 wird anschließend die ökologische Nachhaltigkeit (AP7.1) und in Kapitel 7 die wirtschaftliche Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen (AP7.2 und AP7.3) bewertet. In Kapitel 8 wird die Anwendung von H2IntraDrive stellvertretend für H_2-Anwendungen in Deutschland mit weiteren Anwendungen in den USA verglichen, bevor in Kapitel 9 die durchgeführten Arbeiten abschließend zusammengefasst werden. Am Ende des Forschungsberichtes werden in Kapitel 10 die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Publikationen aufgelistet.

Abbildung 1-2: Struktur des Schlussberichtes

1.4 Zusammenarbeit mit Projektpartnern und Fördermittelgeber

Aufgrund der Struktur des Forschungsprojektes mit den Konsortialpartnern BMW und Linde MH sowie mehreren weiteren beteiligten Unternehmen wurden Austausche bzw. Arbeitstreffen auf verschiedenen inhaltlichen Ebenen organisiert.

In den ca. vierteljährlichen Projekttreffen wurden einzelne Arbeitsinhalte mit den Projektpartnern und dem Fördermittelgeber diskutiert. Ferner wurden aktuelle Problemstellungen und die weitere Vorgehensweise abgestimmt sowie konkrete Ergebnisse präsentiert. Die Treffen fanden abwechselnd bei BMW, Linde MH und am Lehrstuhl fml statt.

Zur konkreten Erarbeitung der Projektinhalte fanden zudem themenbezogene Arbeitstreffen mit einzelnen Projektpartnern und weiteren Unternehmen, wie z.B. Lieferanten, statt. Hier gilt es vor allem die zahlreichen Termine in Leipzig vor Ort hervorzuheben, die aufgrund der umfangreichen Messungen und Datenaufnahmen notwendig waren.

Des Weiteren wurde für die in Kapitel 8 durchgeführte Benchmarkinganalyse eine Dienstreise in die USA durchgeführt. Hierbei wurde das BMW Group Werk Spartanburg (BMW Spartanburg) sowie das VW-Werk in Chattanooga besichtigt.

An dieser Stelle möchten wir uns bei all denjenigen bedanken, die uns während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens H2IntraDrive unterstützt haben. Ganz besonders gilt dieser Dank unseren beiden Projektpartnern BMW und Linde MH, ohne die das Projekt in dieser Form nicht zustande gekommen wäre.

Daneben gilt unser Dank dem Fördermittelgeber Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, die mit der Projektbegleitung beauftragt war, und dem Projektträger Jülich.

2 Stand der Technik und Wissenschaft

2.1 Flurförderzeuge

2.1.1 **Begriffsdefinition**

Als Flurförderzeuge werden Fördermittel bezeichnet, die auf dem Boden ohne ein Schienensystem (gleislos) betrieben werden können. Sie werden überwiegend für den innerbetrieblichen Transport eingesetzt. Abhängig von ihrer Ausführung erfüllen Flurförderzeuge Aufgaben wie Befördern, Schieben, Heben, Stapeln oder Einlagern. Des Weiteren wird unterschieden zwischen fahrerlosen, mitgängergeführten und von einem Fahrer gesteuerten Geräten [VDI-3586].

2.1.2 **Einteilung der Flurförderzeuge**

Wie in Abbildung 2-1 dargestellt, können Flurförderzeuge motorisch angetrieben oder nicht motorisch (manuell) angetrieben sein [Mar-2011, S. 228], wobei sich die motorischen Antriebe weiter in elektromotorische, verbrennungsmotorische und hybride Antriebe unterscheiden lassen [Gro-2014, S. 48]. Bei verbrennungsmotorischen Antrieben können u.a. Benzin, Diesel und Gas als Energieträger genutzt werden. Elektromotorische Antriebe können u.a. aus einer Batterie bzw. Akkumulator, direkt über Stromleitungen oder durch Brennstoffzellensysteme versorgt werden. Zu den Hybridantrieben zählen u.a. die Kombination aus verbrennungsmotorischen Antrieben und Batterien.

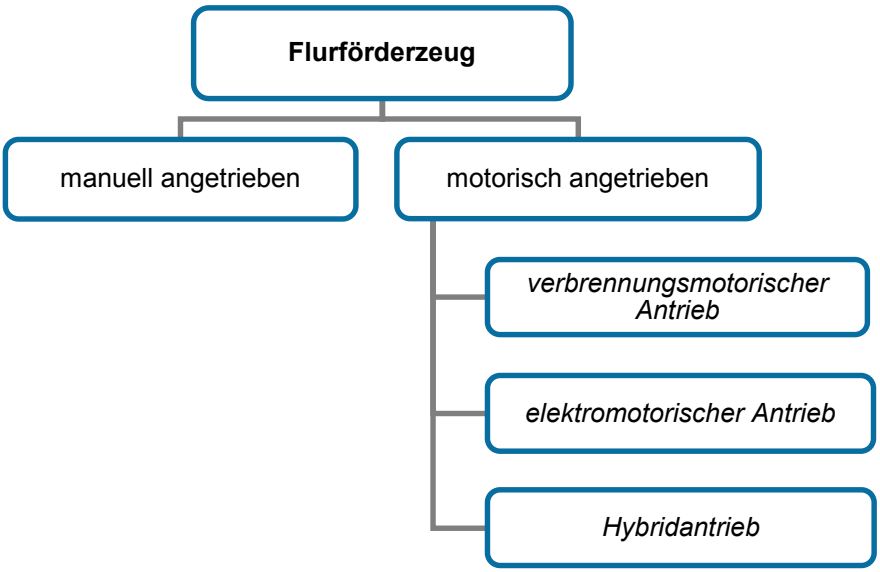

Abbildung 2-1: Einteilung der Flurförderzeuge anhand der Antriebsart, [Mar-2011, S. 228], [Gro-2014, S. 48]

In der „World Industrial Truck Statistics (WITS)“ werden fünf Flurförderzeugklassen unterschieden [Boe-2014]. In der Klasse 1 sind die elektromotorisch angetriebenen Gegengewichtstapler zusammengefasst. Die Klasse 2 umfasst elektromotorisch angetriebene Flurförderzeuge, bei denen der Bediener auf dem Flurförderzeug mitfahren kann, sog. Flurförderzeuge im Mitfahrerbetrieb. Elektromotorisch angetriebene Flurförderzeuge, bei denen der Mitarbeiter gehen muss, sog. Flurförderzeuge im Mitgängerbetrieb, bilden die Klasse 3. Klasse 4 und 5 sind verbrennungsmotorisch angetriebene Gegengewichtstapler.

Eine weitere Einteilung der Flurförderzeuge kann nach der Klassifikation der Industrial Truck Association und der Fédération Européenne de la Manutention erfolgen. Diese ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Flurförderzeug-Klassifizierung nach FEM/ITA nach [Hus-2013, S. 12]

Flurförderzeug-Klassifizierung nach FEM/ITA	
Klasse 1	Elektro-Gegengewichtsstapler
Klasse 2	Fahrersitz-/-standgeräte der Lagertechnik (Schubstapler, Vertikalkommissionierer, Schmalganggeräte, Nieder- und Hochhubwagen)
Klasse 3	Geh-Nieder- und -Hochhubwagen sowie Horizontal(niederhub)kommissionierer und Geh-Schlepper
Klasse 4	Verbrennungsmotor-Stapler mit Bandagereifen, Alle Antriebsarten
Klasse 5	Verbrennungsmotor-Stapler mit Luft- oder CSE- Reifen, alle Antriebsarten
Klasse 6	Fahrersitz-Schlepper
Klasse 7	Geländestapler
Klasse 8	Manuell und semikraftbetriebene Hubwagen

2.1.3 **Bauformen**

Es existieren unterschiedliche Bauformen von Flurförderzeugen, die sich, wie bereits erwähnt, in motorisch angetriebene und nicht motorisch angetriebene unterteilen lassen. Als Beispiel für ein manuell angetriebenes Flurförderzeug wird hier der Handgabelhubwagen vorgestellt. Als Beispiele für motorisch angetriebene Flurförderzeuge werden der Niederhubwagen, der Schlepper und der Gabelstapler erläutert. Schlepper und Gabelstapler entsprechen dabei den im Forschungsprojekt H2IntraDrive eingesetzten Flurförderzeugen.

Handgabelhubwagen

Handgabelhubwagen dienen zum Bewegen einzelner Paletten auf kurzen Distanzen [Gle-2011, S. 121]. Eine Deichsel ermöglicht das Lenken und das Betätigen der Hubvorrichtung [Gro-2014, S. 50]. Die Hubhöhe (ca. 100mm) ist gerade ausreichend, um ein Verfahren der Palette zu ermöglichen; das Stapeln von Gütern ist damit nicht möglich. Martin sieht einen wirtschaftlichen Einsatz bei gelegentlichen Transporten mit Transportwegen unter 25m und ohne Steigung [Mar-2011, S. 232]. Vorteilhaft bei dieser Art von Fördermittel sind die technische Einfachheit, die Robustheit und die Wendigkeit [Gle-2011, S. 121]. Abbildung 2-2 zeigt einen Handgabelhubwagen der Firma Linde MH.

Abbildung 2-2: Handgabelhubwagen, [Lin-2015c]

Niederhubwagen

Niederhubwagen sind motorisch angetriebene Flurförderzeuge. Sie werden wie der Handgabelhubwagen für den horizontalen Transport von Paletten und das Be- und Entladen von LKWs eingesetzt [Gro-2014, S. 50]. Es existieren Varianten im Mitgängerbetrieb und im Mitfahrerbetrieb. Bei Varianten im Mitgängerbetrieb muss der Bediener selbst laufen, wird allerdings durch den elektrischen Antrieb des Niederhubwagens beim Transportieren der Güter unterstützt. Die Fahrgeschwindigkeit ist auf Schrittgeschwindigkeit (6 km/h) begrenzt [Gro-2014, S. 50]. Bei Varianten im Mitfahrerbetrieb ist ein Fahrerstand oder -sitz in das Flurförderzeug integriert. Der Bediener des Niederhubwagens kann mitfahren und somit das FFZ mit höheren Geschwindigkeiten betrieben werden. Abbildung 2-3 zeigt einen solchen Niederhubwagen im Mitfahrerbetrieb der Firma Linde MH.

Abbildung 2-3: Niederhubwagen im Mitfahrerbetrieb, [Lin-2015c]

Schlepper

Ein weiteres motorisch angetriebenes Flurförderzeug ist der Routenzugschlepper bzw. Schlepper. Dieser dient als Zugmittel für den Horizontaltransport von Lasten auf Anhängern [Mar-2011, S. 235]. Schlepper mit angehängten Wagen bilden einen Schleppzug. Diese werden z. B. zur Materialver- und -entsorgung von Montagearbeitsplätzen in der Produktion eingesetzt [Gro-2014, S. 53]. Durch das Abkoppeln der Anhänger zum Be- und Entladen kann der Schlepper zwischenzeitlich genutzt und damit eine höhere Auslastung erzielt werden [Arn-2008, S. 637]. Es existieren sowohl elektromotorisch als auch verbrennungsmotorisch und hybrid angetriebene Varianten [Gro-2014, S. 53]. Abbildung 2-4 zeigt ein elektromotorisch angetriebenes Modell vom Typ P30C des Herstellers Linde MH.

Abbildung 2-4: Elektromotorischer Schlepper, [Lin-2015c]

Gabelstapler

Gabelstapler sind motorisch angetriebene Flurförderzeuge mit einem Hubgerüst, das eine vertikale Lastbewegung ausführen kann [Mar-2011, S. 238]. Arnold et al. sehen sie als „wohl die am universellsten einsetzbaren Fördermittel überhaupt“ [Arn-2008, S. 637]. Sie können Transport- und Stapelaufgaben übernehmen [Mar-2011, S. 238]. Um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden, gibt es zahlreiche Staplertypen, die sich in Antriebsform (Diesel-, Gas- oder Elektromotor), Anbaugerät (z. B. Gabel, Klammer, Dorn), Steuerung (vier oder drei Räder) und in der Bereifung (luftgefüllt, vollgummiert) unterscheiden [Gle-2011, S. 123].

Staplertypen sind u. a. der Gegengewichts- bzw. Frontstapler und der radarmunterstützte Stapler. Bei einem Gegengewichtsstapler befindet sich die Last außerhalb der Radaufstandsfläche, weshalb ein Gegengewicht notwendig ist [Gro-2014, S. 51]. Bei der gebäudeinternen Nutzung sind, bedingt durch die eingeschränkte Wendigkeit, breitere Regalgänge notwendig. Beim radarmunterstützten Stapler wird die Last durch zwei Radarme ausgeglichen. In Form des Schubmaststaplers kommt dieser aufgrund der geringen benötigten Gangbreite häufig für die gebäudeinterne Lagerung von Paletten zum Einsatz [Gle-2011, S. 123]. Abbildung 2-5 zeigt einen elektromotorisch angetriebenen Gegengewichtsstapler der Firma Linde MH vom Typ E35HL.

Abbildung 2-5: Batteriebetriebener Gabelstapler E35HL, [Lin-2015c]

2.1.4 **Flurförderzeugmarkt**

Täglich werden weltweit mehr als 10 Millionen Flurförderzeuge im Ein- oder Mehrschichtbetrieb in der Intralogistik eingesetzt [Jun-2012, S. 5]. Laut der WITS wurden 2013 weltweit erstmals mehr als 1 Mio. FFZ in Auftrag gegeben [Boe-2014]. Gründe sind vor allem die starken Zuwächse in Asien und Amerika im Vergleich zum Vorjahr.

Abbildung 2-6 zeigt die weltweiten Auftragseingänge abhängig von der Region. Asien hat mit 39,7 Prozent den größten Anteil an den Auftragseingängen, gefolgt von Europa mit 31,2 Prozent und Amerika mit 25,1 Prozent .

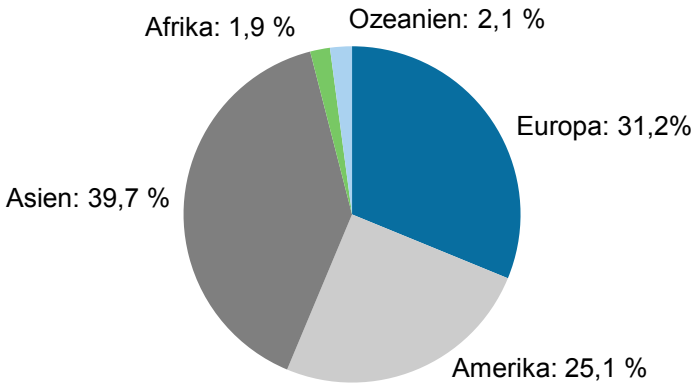

Abbildung 2-6: Weltweite Auftragseingänge Flurförderzeuge, [Boe-2014]

Rund die Hälfte des weltweiten Flurförderzeugmarktanteils wird von 4 Unternehmen bedient. Wie in Tabelle 2-2 ersichtlich zählen dazu Toyota mit 20,7 Prozent, die Kion Group mit 16,4 Prozent, Jungheinrich mit 8,3 Prozent sowie Hyster-Yale mit 7 Prozent. Wobei sich die Kion-Group u.a. aus den beiden Marken Still und Linde MH zusammensetzt.

Tabelle 2-2: Weltrangliste Flurförderzeuge, [War-2014, S. 36]

Rang	Hersteller	Flurföderzeug-Umsatz Mio. EUR	Konzern-Umsatz Mio. EUR	Mitarbeiter Flurförderzeuge	Weltmarktanteil in %
1	Toyota	5.682	14.098	23.453	20,72
2	Kion	4.495	4.495	22.273	16,39
3	Jungheinrich	2.290	2.290	11.840	8,35
4	Hyster-Yale (NACCO)	1.634	1.634	5.100	7,05
5	Crown	1.741	1.741	10.700	6,35
6	Cargotec	1.550	3.181	5.269	5,65
7	Mitsubishi	1.484	24.158	5.409	5,41
8	UniCarriers (Nissan, TCM)	1.230	1.230	5.208	4,48
9	Manitou	934	1.176	1.845	3,41
10	Anhui Heli	790	790	7.075	2,88

Für die Betrachtung der Entwicklung des europäischen bzw. deutschen Flurförderzeugmarktes kann auf Daten des Europäischen Statistikamtes EUROSTAT zurückgegriffen werden. In der sogenannten Prodcom Tabelle werden dabei Produktionsdaten von verschiedensten Gütern festgehalten, u.a. auch Flurförderzeuge bzw. Elektrokraftkarren mit einer Hubhöhe kleiner und größer als einen Meter. In Abbildung 2-7 ist die Stückzahlentwicklung der in Deutschland (DE) bzw. in der Europäischen Union (EU) gefertigten Fahrzeuge in den letzten 20 Jahren dargestellt. Deutlich erkennbar ist die Wirtschaftskrise 2008, in Folge derer der Absatz erheblich eingebrochen ist. In den Folgejahren haben sich die Märkte langsam wieder erholt, jedoch das Vorkrisenniveau noch nicht erreicht und wurden zuletzt durch die Eurokrise erneut an einer positiven Entwicklung gehindert.

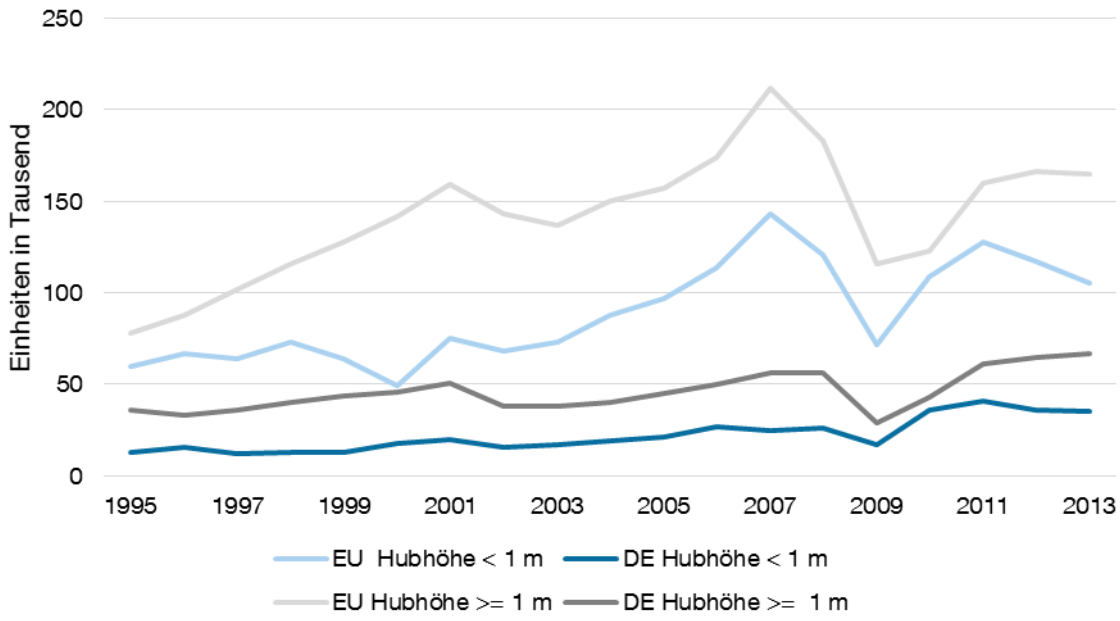

Abbildung 2-7: Stückzahlenentwicklung Elektrokraftkarren mit Hebevorrichtung in Europa bzw. Deutschland, [Eur-2015]

Der Verlauf der in den USA produzierten Flurförderzeuge ist vergleichbar mit der Situation in Europa. In Abbildung 2-8 ist deutlich ersichtlich, dass auch hier die Wirtschaftskrise im Jahr 2008 zu einem Rückgang der Produktionszahlen geführt hat. In den zurückliegenden Jahren hat sich der Absatz jedoch wieder erholt und bei den elektrisch und verbrennungsmotorisch betriebenen Flurförderzeugen das Vorkrisenniveau erreicht. Im Jahr 2014 wurden in den USA 184.979 Flurförderzeuge der Klassen eins bis fünf produziert. Dies teilt sich in 57.543 elektrisch angetriebene und 75.040 verbrennungsmotorische Fahrzeuge sowie 52.396 Hubwagen auf [Ind-2014].

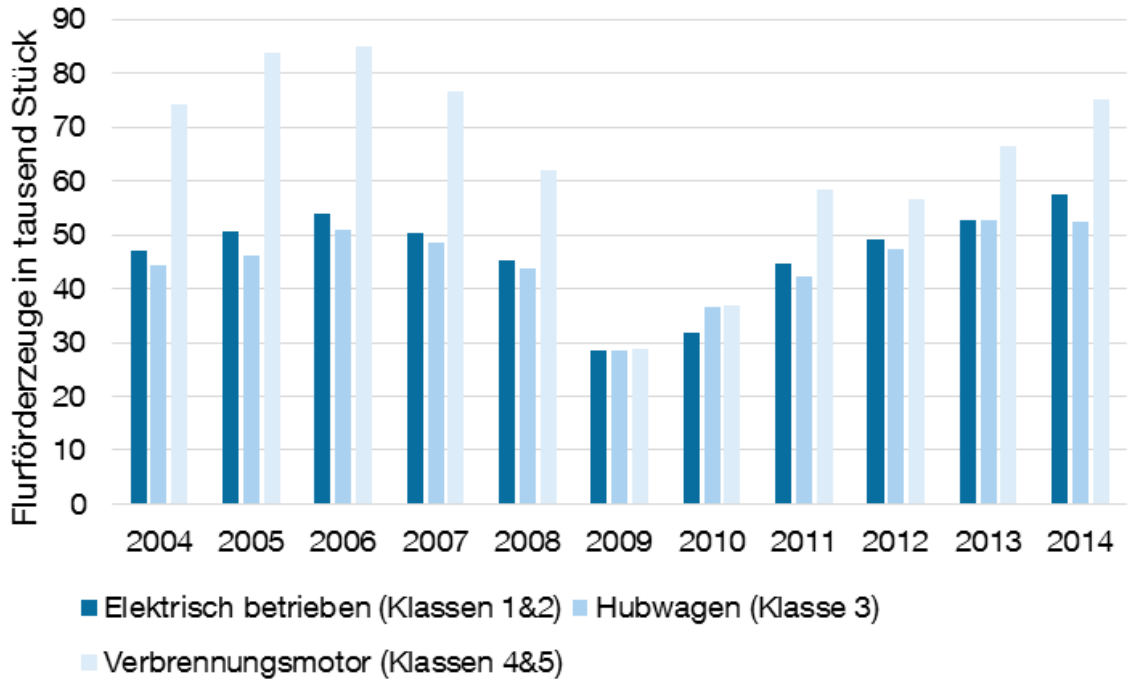

Abbildung 2-8: Stückzahlenentwicklung der in den USA produzierten Flurförderzeuge, [Ind-2014]

2.2 Brennstoffzellensysteme

2.2.1 **Brennstoffzellen**

Brennstoffzellen sind wie Batterien elektrochemische Energiewandler mit ähnlichem Aufbau. Anders als der Name vermuten lässt, verbrennt eine Brennstoffzelle den Brennstoff nicht, sondern wandelt dessen chemische Energie durch elektrochemische Vorgänge direkt in Elektrizität um. Als Brennstoff dient üblicherweise Wasserstoff. Erdgas und andere Kohlenwasserstoffe können ebenfalls umgewandelt werden [Cra-2009, S. 405]. Eine Einzelzelle besteht aus zwei Elektroden, zwischen denen sich der feste oder flüssige Elektrolyt befindet. Dieser dient als Ionenleiter und isoliert die Elektroden voneinander. Die negative Elektrode (Anode) wird von Brennstoff, die positive Elektrode (Kathode) von Luft oder reinem Sauerstoff durchströmt. Der Brennstoff gibt Elektronen an das Anodenmaterial ab, die über den äußeren Stromkreis zur Kathode fließen. Die Ionen werden über den Elektrolyten übertragen. Das Reaktionsprodukt ist Wasser, das je nach Brennstoffzellentyp anoden- oder kathodenseitig abgeführt wird. Die verschiedenen Brennstoffzellen werden nach ihren Elektrolytmaterialien und den daraus resultierenden Operationstemperaturen der Zellen unterschieden und können den Gruppen Nieder-, Mittel- oder Hochtemperatur-Brennstoffzellen zugeordnet werden [Moh-2014, S. 15]. Tabelle 2-3 gibt dazu einen Überblick. Die alkalische Brennstoffzelle (AFC = alkaline fuel cell) und die Membran- Brennstoffzelle (PEFC = polymer electrolyte fuel cell) sowie deren Untergruppe, die Direktmethanol-BZ (DMFC = direct

methanol fuel cell) gehören zu den Niedertemperatur- Brennstoffzellen. Die PEFC wird auch als proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) bezeichnet. Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (phosphoric acid fuel cell) arbeitet im mittleren Temperaturbereich zwischen 160 und 220 °C. Karbonatschmelzen- Brennstoffzelle (MCFC = molten carbonate fuel cell) und Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC = solid oxide fuel cell) sind Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die vor allem in BHKWs Anwendung finden [Hei-2006, S. 8].

Tabelle 2-3: Brennstoffzellentypen, [Hei-2006, S. 9f.]

BZ-Typ	Elektrolyt	Betriebs-temp.	Elektr. Wirkungsgrad	Brenngas & Oxidationsmittel	Anwendung
AFC	Kalilauge	60-80 °C	Zelle: 60-70 %, System bei H_2-Betrieb ca. 60 %	H_2 und O_2 oder Luft	Raumfahrt, Militär
PEFC / PEMFC	protonenleitende Membran	80 °C	Zelle: 50-68 %, System bei Erdgasbetrieb: 43-50 %	H_2 und O_2 oder Luft	Elektroantriebe, BHKW, Batterieersatz, Raumfahrt, Militär
DMFC	protonenleitende Membran	80-130 °C	Zelle: 20-30 %	Methanol und O_2 oder Luft	Elektroantriebe, Batterieersatz, portable Stromerzeuger
PAFC	Phosphorsäure	200 °C	Zelle: 55 %, System bei Erdgasbetrieb: 40-42 %	H_2 und O_2 oder Luft	BHKW
MCFC	Alkalikarbonat-schmelzen	650 °C	Zelle: 65 %, System bei Erdgasbetrieb 45-50 %	H_2/CO_2 und O_2 oder Luft	BHKW
SOFC	Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid	800-1.000 °C	Zelle: 60-65 %, System bei Erdgasbetrieb 45-50 %	H_2, CO, Erd-, Kohle-, Biogas und O_2 oder Luft	BHKW

Von den genannten Brennstoffzellentypen zeichnet sich die PEFC durch einen einfachen Aufbau, ein flexibles Verhalten im Lastwechsel, gute Kaltstarteigenschaften und eine hohe Leistungsdichte aus. Darum sind PEFC besonders für den Einsatz in Kraftfahrzeugen geeignet [Rei-2013, S. 235 f.]. Ferner werden diese in Brennstoffzellensystemen bei Flurförderzeugen eingesetzt, der Aufbau der Brennstoffzelle wird im Folgenden beschrieben.

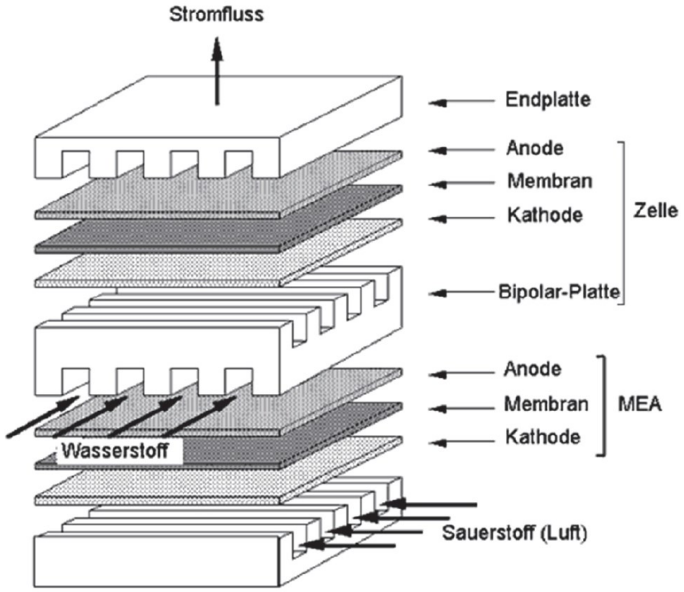

Abbildung 2-9: Aufbau einer Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle, [Tet-2012]

Wie in Abbildung 2-9 dargestellt bildet die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) das Kernstück der Brennstoffzelle. Sie besteht aus einer Polymermembran, die die beiden porösen Elektroden trägt. Über die Membran ist eine Gasdiffusionsschicht aus hochporösem Carbon-Papier oder Kohlefasergewebe gepresst. Sie sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Gases und für das Absaugen des Produktwassers. Membran oder GDL sind mit einem Katalysator (Platin oder Platin-Legierung) beschichtet, um die Reaktion zu unterstützen. Lochnetze aus Polytetrafluorethylen (PTFE) dienen als Abstandshalter in den nur Millimeter dicken Gasräumen. Die einzelnen Zellen werden von Bipolarplatten abgeschlossen, die die Gasräume voneinander trennen. Viele dieser in Serie verschalteten Einzelzellen bilden den Brennstoffzellenstapel (Stack), der an beiden Enden mit Endplatten abgeschlossen wird [Kur-2013, S. 77ff.].

2.2.2 **Aufbau und Funktionsweise Brennstoffzellensystem**

Die bei H_2-Flurförderzeugen anstelle der Blei-Säure-Batterie eingesetzten Brennstoffzellensysteme bestehen neben dem eigentlichen Brennstoffzellen-Stack aus einem Luftversorgungssystem und einem Wasserstoffversorgungsmodul. Das Luftversorgungssystem besteht aus einer Befeuchter-Einheit und einem Luftverdichter, der für den optimalen Arbeitsdruck sorgt. Die Wasserstoffversorgungeinheit enthält den Tank, die Druckregler, den Kondensat-Abscheider, die Wasserstoff-Rezirkulationseinheit und die Ventile. Eine elektronische Steuerung mit Verteilerbox und Steuergerät regelt die Verteilung des Stroms auf die einzelnen Verbraucher und den hochdynamischen Prozess zur Bereitstellung von Wasserstoff und Luft [Kur-2013, S. 6ff., Moh-2014, S. 77ff.]. In Abbildung 2-10 ist der Aufbau eines Brennstoffzellensystems der Firma

HyPulsion zu sehen. Dieses setzt sich aus Wasserstofftank, Steuerungsschrank, Wassertank, Kühlsystem, Fluidmanagement System, Brennstoffzellenstack, Batterie (Li-Ionen Batterie) sowie Luftverdichter zusammen. Zudem wird aufgrund des geringeren Gewichtes der Komponenten gegenüber der ursprünglich im Flurförderzeug verwendeten Blei-Säure Batterie zusätzlicher Ballast in Form von Gusseisen verbaut.

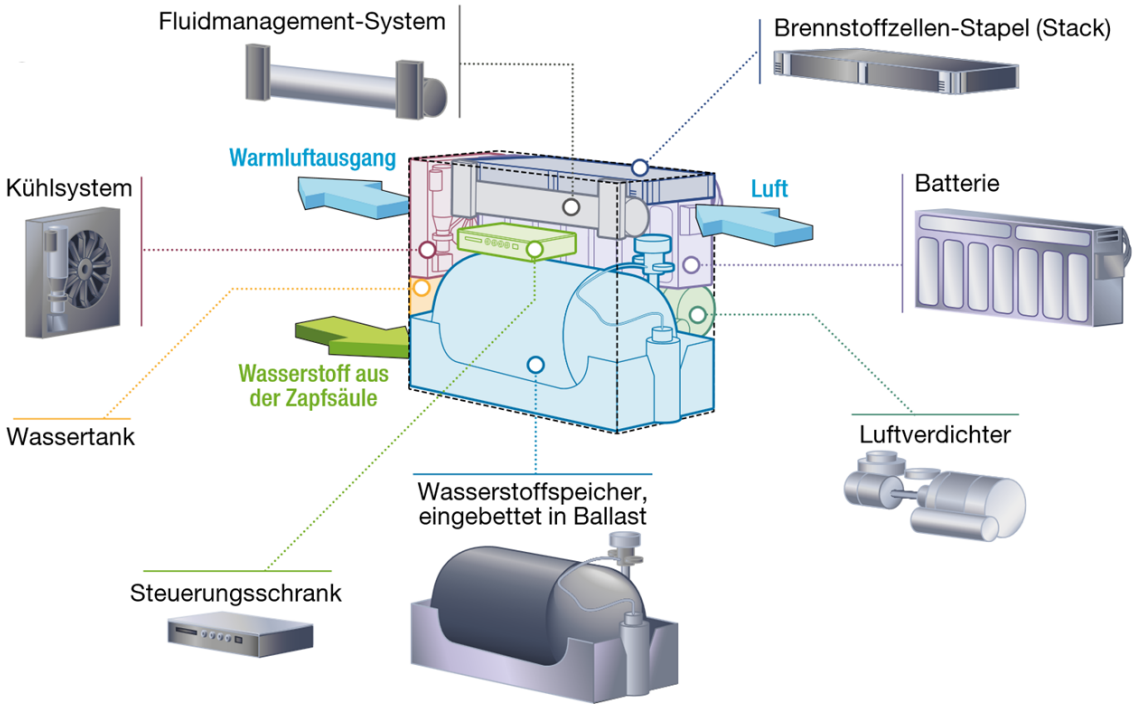

Abbildung 2-10: Aufbau eines Brennstoffzellensystems für Flurförderzeuge, [Air-2014]

Brennstoffzellensysteme für Flurförderzeuge sind Hybrid-Systeme, wobei die Brennstoffzelle die Li-Ionen-Batterie auflädt. Dies hat den Vorteil, dass die Brennstoffzelle nahe an ihrem optimalen Betriebspunkt betrieben werden kann und eventuelle Leistungsspitzen des Flurförderzeuges von der Batterie abgefangen werden können. Ferner kann die durch Rekuperation gewonnene Energie des Flurförderzeuges in der Batterie gespeichert werden. In Abbildung 2-11 ist schematisch die Funktionsweise eines Brennstoffzellensystems für Flurförderzeuge dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass das Flurförderzeug die Energie nur aus der Batterie, nur aus der Brennstoffzelle oder aus Brennstoffzelle und Batterie beziehen kann.

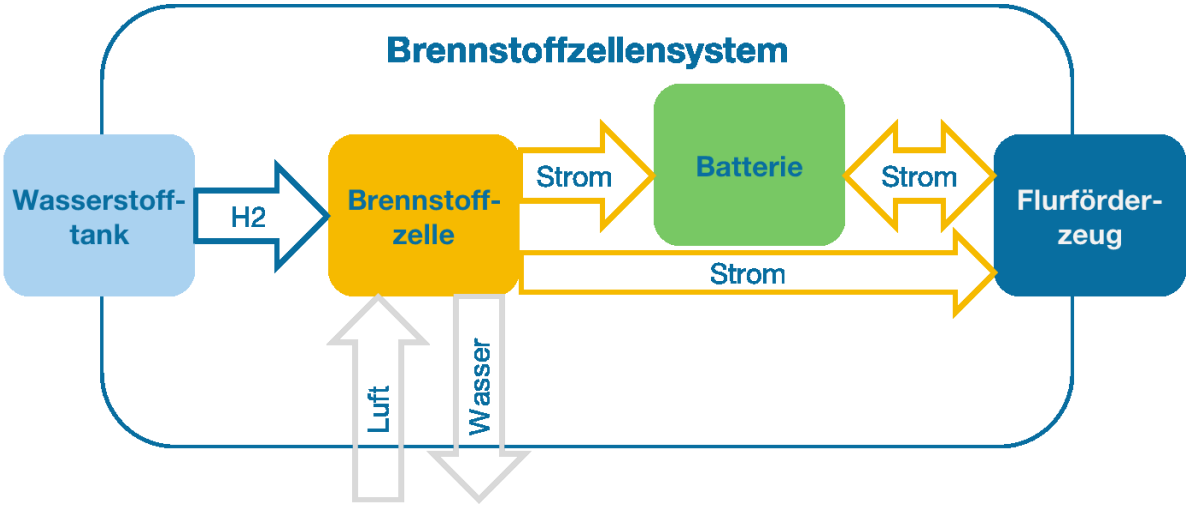

Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Brennstoffzellensystems

2.2.3 **Wasserstoffherstellung**

Da Wasserstoff auf der Erde nur in geringen Mengen elementar vorliegt, muss dieser aus einer wasserstoffhaltigen Verbindung hergestellt werden. Die Herstellung von elementarem Wasserstoff funktioniert dabei nach Formel (2-1). [Gre-2014, S. 56f.]

$$2H_2O + Energie \rightarrow 2H_2 + O_2 \qquad (2\text{-}1)$$

Die dafür notwendige Energie kann in verschiedenen Arten aufgebracht werden, weshalb unterschiedliche Prozesse zur Herstellung von Wasserstoff entstanden sind. In Tabelle 2-4 sind verschiedene Verfahren aufgelistet. Diese sind nach der grundlegenden Methode (thermisch, chemisch und biologisch) geordnet. Des Weiteren ist aufgeführt, aus welchem Molekül oder welcher Verbindung der Wasserstoff erzeugt wird und woher die dafür notwenige Energie kommt. In der letzten Spalte sind die bei der Reaktion entstehenden Emissionen dargestellt.

Tabelle 2-4: Eigenschaften von Wasserstoff Herstellungsverfahren, [Sto-2010, S. 159]

Methode	Verfahren	Einsatzprodukt	Energie	Emissionen
Thermisch	Dampfreformierung	Erdgas	hochtemperierter Dampf	ja
	Thermochemische Wasserspaltung	Wasser	hohe Temperaturen durch erhöhte Sonneneinstrahlung	keine
	Vergasung	Kohle, Biomasse	Dampf und Sauerstoff unter hohen Temperaturen und Drücken	hängt von Einsatzprodukt ab
	Pyrolyse	Biomasse	moderat erhöhte Temperaturen	ja
Elektrochemisch	Elektrolyse	Wasser	Elektrizität aus erneuerbaren Energien und Kernkraft	keine
	Elektrolyse	Wasser	Elektrizität aus Kohle oder Erdgas	ja
	Photoelektrochemisch	Wasser	Direkte Sonneneinstrahlung	keine
Biologisch	Photobiologisch	Wasser und Algenstämme	Direkte Sonneneinstrahlung	keine
	Anaerobe Gärung	Biomasse	hohe Temperaturen	ja
	Microorganismen	Biomasse	hohe Temperaturen	ja

Die zwei wichtigsten Verfahren werden im Folgenden näher erläutert.

Dampfreformierung

Bei diesem Verfahren wird aus Wasser und Methan (z.B. Erdgas) unter hohem Druck (15 bis 25 bar) und bei hohen Temperaturen (750-1.000°C) Wasserstoff erzeugt. Die zur Auftrennung des Wassers benötigte Energie wird über chemische Reaktionen zur Verfügung gestellt. Da als Nebenprodukt das Treibhausgas CO_2 entsteht, ist dieses Verfahren nicht nachhaltig. Insgesamt werden mehr als 90 Prozent des weltweit benötigten Wasserstoffes durch dieses Verfahren aus fossilen Energieträgern erzeugt. Der Wirkungsgrad liegt dabei bei 70 Prozent. [Gre-2014, S. 57, Töp-2014, S. 5f.]

Wasserelektrolyse

Die zur Aufspaltung benötigte Energie wird in Form von Strom aufgebracht. Da keine weiteren Reaktionspartner außer Wasser auftreten entstehen keine Nebenprodukte. Um im großen Maßstab Wasserstoff herzustellen werden bei diesem Verfahren große

Mengen elektrischer Energie benötigt. Wird dafür Strom aus erneuerbaren Energien verwendet, kann auf diese Weise nachhaltig Wasserstoff hergestellt werden. Die technische Apparatur, Elektrolyseur genannt, besteht aus einer Kathode und Anode, sowie einem Separator und Elektrolyten. An der Anode wird das Wasser durch eine Reaktion reduziert, wobei Wasserstoff und OH^- entsteht. An der Kathode oxidiert das OH^- mit Sauerstoff zu Wasser. [Gre-2014, S. 57ff., Töp-2014, S. 8ff.]

Insgesamt gibt es vier verschiedene Elektrolyse-Verfahren, die sich durch den eingesetzten Elektrolyten, den Druck und die Temperatur unterscheiden. Diese sind die alkalische Elektrolyse, die alkalische Druckelektrolyse, die PEM-Elektrolyse und die Hochtemperaturelektrolyse auf Basis von keramischen Feststoffelektrolyten, wobei die alkalischen Elektrolyseverfahren am weitesten verbreitet sind. [Töp-2014, S. 8]

Zertifizierung von grünem Wasserstoff

Aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsverfahren und den damit zusammenhängenden unterschiedlichen Umweltemissionen während der Wasserstoffproduktion kann dieser nicht grundlegend als „grün“ bezeichnet werden. Jedoch können einzelne Herstellungsverfahren bzw. daraus resultierender Wasserstoff auf Basis des *TÜV SÜD Standard CMS 70* als sogenannter GreenHydrogen zertifiziert werden. Hierbei muss der hergestellte Wasserstoff definierte Treibhausgas-Minderungspotenziale gegenüber Referenzemissionen für konventionell hergestellten Wasserstoff (89,7 g CO_2-Äq./MJ) bzw. fossilen Kraftstoffen (83,8g CO_2-Äq./MJ) erreichen. In der Richtlinie wird dabei zwischen den drei Herstellungsverfahren Elektrolyse von Wasser, Dampf-Reforming von Biomethan und Pyrolyse von Glycerin unterschieden. Wasserstoff, der durch Elektrolyse von Wasser hergestellt wird, muss ein Treibhausgas-Minderungspotenzial von mindestens 75 Prozent gegenüber dem Vergleichswert für konventionell hergestellten Wasserstoff bzw. fossiler Kraftstoffe für die Zertifizierung erzielen. Für die Zertifizierung der Herstellungsverfahren Dampf-Reforming von Biomethan und Pyrolyse von Glycerin ist hingegen bis Ende 2016 ein Treibhausgas-Minderungspotenzial von mindestens 35 Prozent zum Vergleichswert fossiler Kraftstoffe notwendig. Im Jahr 2017 steigt die Mindestanforderung auf 50 Prozent und ab Anfang 2018 auf 60 Prozent Treibhausgas-Minderungspotenzial [TÜV-2011, S. 7]. Ein Beispiel für eine Anlage, die TÜV-zertifizierten grünen Wasserstoff mittels Pyroreformierung produziert, wurde von der Linde AG im Jahr 2009 als Pilotanlage in Betrieb genommen [Seg-2011]. Neben der gerade beschriebenen Zertifizierung des TÜV Süd soll im europäischen Forschungsprojekt certifhy u.a. der Begriff GreenHydrogen definiert werden und eine europäische Richtlinie für die Zertifizierung von grünem Wasserstoff entstehen [Van-2015].

2.2.4 **Wasserstoffinfrastruktur**

Eine Infrastruktur für die Betankung von H_2-Flurförderzeugen besteht im Wesentlichen aus den drei in Abbildung 2-12 dargestellten und miteinander verbundenen Komponenten Wasserstoffspeicher, Betankungsanlage und Dispenser (auch Befüllanlage genannt). Der Wasserstoffspeicher wird durch Traileranlieferungen mit Wasserstoff versorgt. Anschließend wird dieser durch die Betankungsanlage verdichtet und in einem Hochdruckspeicher (HD-Speicher) zwischengespeichert. Nachdem ein Flurförderzeug am Dispenser angekoppelt und der Befüllvorgang gestartet wird (z.B. durch Drücken eines Knopfes), strömt der Wasserstoff aus dem HD-Speicher in den Tank des Flurförderzeuges. Infolgedessen findet ein Druckausgleich bis zu einem vorher definierten Zieldruck statt. Parallel zum Befüllen des Flurförderzeuges wird das Kondensatwasser, welches bei der chemischen Reaktion des Wasserstoffes mit dem in der Umgebungsluft enthaltenen Sauerstoff entsteht, durch die Befüllanlage aus dem Flurförderzeug abgesaugt. Werden Flurförderzeuge in Gebäuden befüllt, muss lediglich der Dispenser in der Werkshalle errichtet werden. Wasserstoffspeicher und Betankungsanlage können im Freien bis zu mehreren hundert Metern entfernt aufgebaut werden.

Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der Wasserstoffversorgung bei BMW Group

2.2.5 **Beendete H_2-Flurförderzeuganwendungen in Deutschland**

Ein flächendeckender Einsatz von H_2-Flurförderzeugen findet aktuell in Deutschland nicht statt. Vielmehr gab es eine Reihe von Forschungs- und Demonstrationsprojekten, bei denen der Einsatz der H_2-Flurförderzeuge nach Beendigung nicht weiter verfolgt wurde. Im Folgenden werden diese aufgezeigt. Gemein haben alle Projekte, dass lediglich ein bis zwei Flurförderzeuge je Flurförderzeugtyp im Einsatz waren. Zudem waren alle H_2-Flurförderzeuge nur im Testbetrieb neben konventionellen Flurförderzeugen im Einsatz.

Cargogate Flughafen München GmbH

Im Zeitraum von 2004 bis 2006 kam am Flughafen in München ein STILL R60 Gabelstapler mit einer Proton Motor Brennstoffzelle zum Einsatz. Die PEM-Brennstoffzelle besaß eine Leistung im Dauerbetrieb von 14 kW und zusammen mit einem elektri-

schen Energiespeicher eine Spitzenleistung von 24 kW. Der Tank fasste drei Kilogramm Wasserstoff. Die Betankungsinfrastruktur wurde von Linde Gas errichtet. [Med-2003]

HHLA Hamburg (Hamburger Hafen und Logistik AG)

Während der Jahre zwischen 2008 und 2010 wurde am Hamburger Hafen ebenfalls ein Brennstoffzellen-Gabelstapler vom Typ STILL R60 sowie die dazugehörige Wasserstofftankstelle von Linde einem Praxistest unterzogen. Das Brennstoffzellensystem stammte von Hydrogenics und lieferte eine Dauerleistung von 12 kW und in der Spitze 30 kW. Betankt wurden pro Tankfüllung 1,6 kg Wasserstoff mit einem Druck von 350 bar. Das Projekt wurde durch die Landesinitiative Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hanse-Stadt Hamburg gefördert. [Hus-2013, S. 16]

BASF

Der Einsatz der beiden Flurförderzeuge, ein 80 Volt Gegengewichtsstapler STILL R60-25iL und eine 40 Volt Schubmaststapler STILL FMX20, wurde durch das „Netzwerk Brennstoffzelle und Wasserstoff“ unter dem Projektnamen „Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid für Material Handling (BB-MH)“ gefördert. Die Betankungsinfrastruktur wurde von Linde geliefert und der Systemintegrator der Brennstoffzelle war Hoppecke. [Hus-2013, S. 17, Rie-2015, Lan-2015b]

Linde Gas

Bei Linde Gas waren zwei Linde E30 drei Tonnen Gegengewichtsstapler am Standort in Unterschleißheim im Einsatz. Zur Energieerzeugung wurde ein Brennstoffzellensystem von Hydrogenics genutzt, das aus einem Treibstofftank mit Wasserstoff versorgt wurde, der 1,6 kg bei 350 bar fasste. [Lin-2010]

DMFC Flurförderzeug des Forschungszentrums Jülich

Von 2007 bis 2010 wurde am Forschungszentrum Jülich ein Direkt-Methanol-Brennstoffzellensystem mit einer Leistung von 2 kW entwickelt. Die Brennstoffzelle besaß eine Spitzenleistung von 7 kW und benötigte für eine Betriebszeit von 30 Stunden 20 Liter Methanol. Als Energiespeicher wurde eine Lithium-Ionen-Batterie verwendet. Zum Einsatz kam die Brennstoffzelle in einem Jungheinrich Elektro-Niederhub-Kommissionierer ECE-220 XL. Die Lebensdauer betrug mehr als 3.000 Stunden, jedoch nahm die Leistung ab diesem Punkt um 25 Prozent ab. [Hus-2013, S. 19]

Wasserstoff- und Brennstoffzelleninitiative Hessen

Im Rahmen der Wasserstoff- und Brennstoffzelleninitiative Hessen wurde ein STILL Gabelstapler nacheinander bei den drei Unternehmen LUG aircargo handling am

Frankfurter Flughafen, Hassia Mineralquellen GmbH und Viessmann eingesetzt. Die jeweilige Einsatzdauer betrug drei bis vier Wochen bei jedem Unternehmen. Partner des Projektes waren H2Logic sowie GHR, das die mobile Tankstelle zur Verfügung stellte. [Kip-2013, LUG-2013, Sta-2013]

2.2.6 **Aktuelle H_2-Flurförderzeuganwendungen in Europa**

Neben den bereits beendeten Forschungs- und Demonstrationsprojekten in Deutschland gibt es neben H2IntraDrive aktuell zwei weitere Anwendungen, bei denen H_2-Flurförderzeuge erprobt werden. Ferner sind weitere H_2-Demonstartionsanwendungen in Europa bekannt. In Abbildung 2-13 sind alle aktuell laufenden H_2-Flurförderzeuganwendungen in Europa dargestellt. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

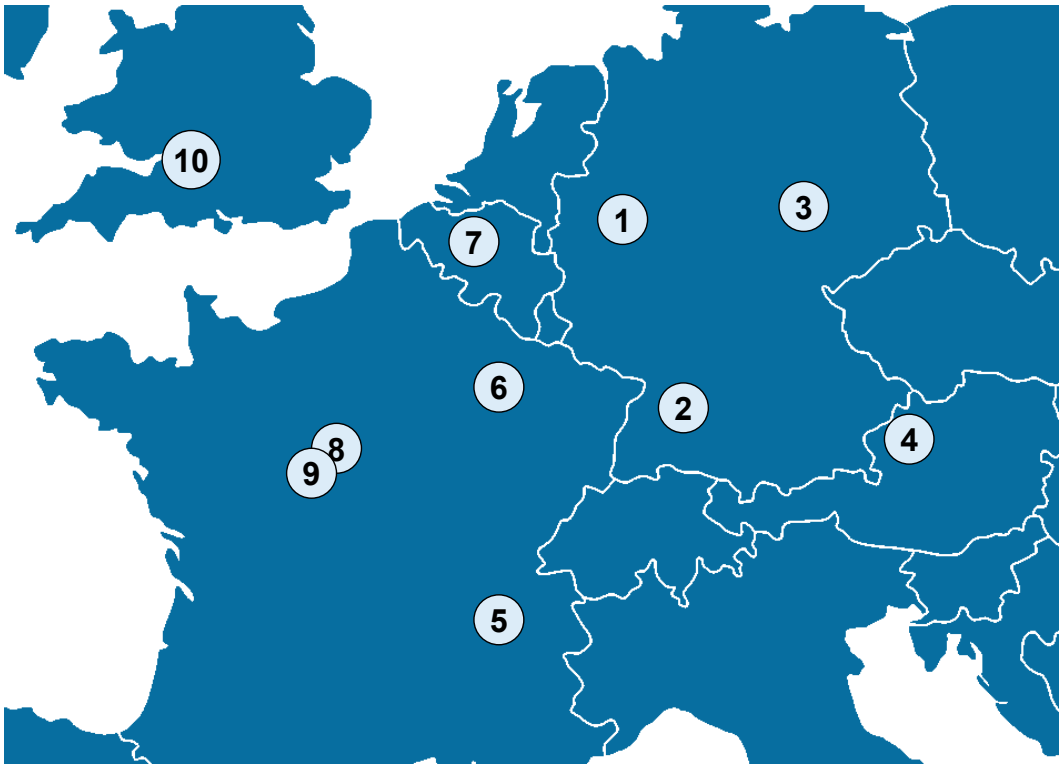

Abbildung 2-13: H_2-Flurförderzeuganwendungen in Europa (1: Mercedes Nutzfahrzeuge; 2: Seifert Logistik, 3: H2IntraDrive; 4: DB Schenker; 5: IKEA; 6: Air Liquide; 7: Colruyt Group; 8: FM Logistic; 9: Prelodis; 10: Honda)

Mercedes Nutzfahrzeuge (Deutschland)

Aktuell befinden sich im Mercedes Werk in Düsseldorf zwei drei Tonnen Gabelstapler des Typs E30/FC-600 HL von Linde MH im Einsatz. Die Brennstoffzelle von HyPulsion versorgt die Flurförderzeuge mit Energie. Die Betankung erfolgt über eine Wasserstoffinfrastruktur von Air Products. Bei einem Erfolg des Projektes soll die Flotte auf zehn wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge vergrößert werden. [Rad-2015]

Seifert Logistics (Deutschland)
Seifert Logistics testet aktuell einen 3,5 Tonnen Gabelstapler von Linde der Baureihe E35/FC auf dem Werksgelände eines Automobilherstellers in Baden-Württemberg. Da bereits eine Wasserstofftankstelle vorhanden ist, kann diese vom Gabelstapler genutzt werden. [Sei-2015]

DB Schenker (E-Log-BioFleet)
Derzeit befinden sich zehn Niederhubwagen von Linde Material Handling bei DB Schenker in Österreich im Praxiseinsatz. Der dafür notwendige Wasserstoff wird On-Site aus Biogas durch das Unternehmen HyGear hergestellt und über eine Wasserstofftankstelle von OMV zur Verfügung gestellt. Das Brennstoffzellensystem stammt von Fronius. Die Flurförderzeuge werden rund um die Uhr an fünf Tagen in der Woche genutzt. [Fue-2013, HYG-2013, Lin-2013]

IKEA
In einem Distributionszentrum des Möbelherstellers IKEA in Frankreich werden derzeit zwei Gabelstapler sowie ein Niederflurkommissionierer mit Brennstoffzellentechnologie getestet. Für die Zukunft ist der Einsatz von zwanzig wasserstoffgetriebenen Flurförderzeugen geplant. Zur Energiegewinnung wird ein Brennstoffzellensystem von HyPulsion verwendet, der dafür notwendige Wasserstoff wird über eine Infrastruktur von Air Liquide zur Verfügung gestellt. [Air-2013, Mic-2015]

Air Liquide
Air Liquide setzt aktuell zehn Flurförderzeuge von Crown in Vatry (Frankreich) ein. Das Projekt läuft seit dem 5. Januar 2012. [Air-2012]

Colruyt Group
Bei Colruyt in Belgien befinden sich seit Ende 2014 zwölf Fahrzeuge im Einsatz. Diese setzen sich aus einem Crown Gabelstapler (HyPulsion Brennstoffzelle), zwei Crown Kommissionierern (HyPulsion), sowie einem Blue Planet Gabelstapler mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor zusammen. Dazu kommen noch ein Schubmaststapler, vier Niederhubwagen und drei Kommissionierer mit Brennstoffzellenantrieb, die aber beim Erscheinen der Quelle noch nicht im Einsatz waren. Im Rahmen des HyLIFT-DEMO Projektes waren zusätzlich zwei Still Gabelstapler (H2Logic) bei Colruyt im Einsatz. Diese wurden allerdings nach dem Auslaufen des Projektes wieder aus der Flotte entfernt. Die stationäre zentrale Tankstelle wird durch Wasserstoff aus einem eigenen Elektrolysesystem gespeist. Der dafür notwendige Strom stammt aus Wind- und Solarenergie. Die Brennstoffzellen wurden von Hydrogenics geliefert. [Win-2014, Lan-2015b]

FM Logistic (HAWL-Projekt)
In der Nähe von Orléans in Frankreich befinden sich aktuell zehn wasserstoffgetriebene Flurförderzeuge im Rahmen des HAWL-Projektes im Einsatz. Die Betankungsinfrastruktur stellt der Projektpartner Air Liquide zur Verfügung. Weitere Partner sind unter anderem Toyota Material Handling, Crown sowie HyPulsion. Für die Zukunft wird darüber nachgedacht, die komplette Flotte von 84 Fahrzeugen auf Brennstoffzellenantrieb umzurüsten. [Air-2015, Elm-2015]

Prelodis
Im Oktober 2015 wurde vom Lebensmittellieferanten Prelodis ein neues Distributionszentrum in der Nähe von Orleans in Frankreich in Betrieb genommen. Die 35 Flurförderzeuge von Jungheinrich werden durch Brennstoffzellensysteme von HyPulsion mit Energie versorgt. Das Besondere bei der Anwendung bei Prelodis ist, dass ausschließlich Flurförderzeuge mit Brennstoffzellenatrieb eingesetzt werden. [Plu-2015]

Honda
Bei Honda in Swindon in Großbritannien befinden sich derzeit zwei Gabelstapler von Yale mit Brennstoffzellensystemen von HyPulsion im Einsatz. [Nin-2014a]

2.2.7 H_2-Flurförderzeuganwendungen außerhalb Europas

Neben den Demonstrationsanwendungen von H_2-Flurförderzeugen in Europa sind in Nordamerika bereits ca. 7.000 H_2-Flurförderzeuge im Serienbetrieb [Fue-2015]. Wie in Tabelle 2-5 ersichtlich sind dies vor allem Unternehmen aus der Lebensmittelbranche, Betreiber von großen Warenhäusern und Unternehmen aus der Automobilbranche.

Tabelle 2-5: Nordamerikanische Unternehmen die H_2-Flurförderzeuge einsetzten, (auf Grundlage von [Fue-2015])

Nordamerikanische Unternehmen	
Ace Hardware	Martin-Brower
Associated Wholesale Grocers	Mercedes Benz
BMW Manifacturing Co.	Michelin
Baldor Specialty Foods	Nestlé Waters
BMW Manufacturing Co.	New United Motor Manufacturing
Bridgestone-Firestone	Nissan North America
Carter´s	Ozburn-Hessey Logistics
Central Grocers	PBR
Coca Cola	Procter & Gamble
CVS Caremark	Stihl Inc.
Defense Logistics Agency	Super Store Industries
East Penn Manufacturing	Sysco
FedEx	Uline
FreezPak Logistics	United Natural foods
Golden State Foods	U.S. Foodservice
H-E-B	Volkswagen
ISOLA Laminates	Wakefern Food Corp.
Kimberley-Clark	Walmart
Kroger Co.	Wegmans
Leigh Fibes	Whole Foods Market
Lowe´s	WinCo Foods
LPC	

Die Standorte der einzelnen Anwendungen in Nordamerika sind in Abbildung 2-14 dargestellt, wobei die Größe und Farbe der Markierungen Auskunft über die H_2-Flurförderzeugflotte geben.

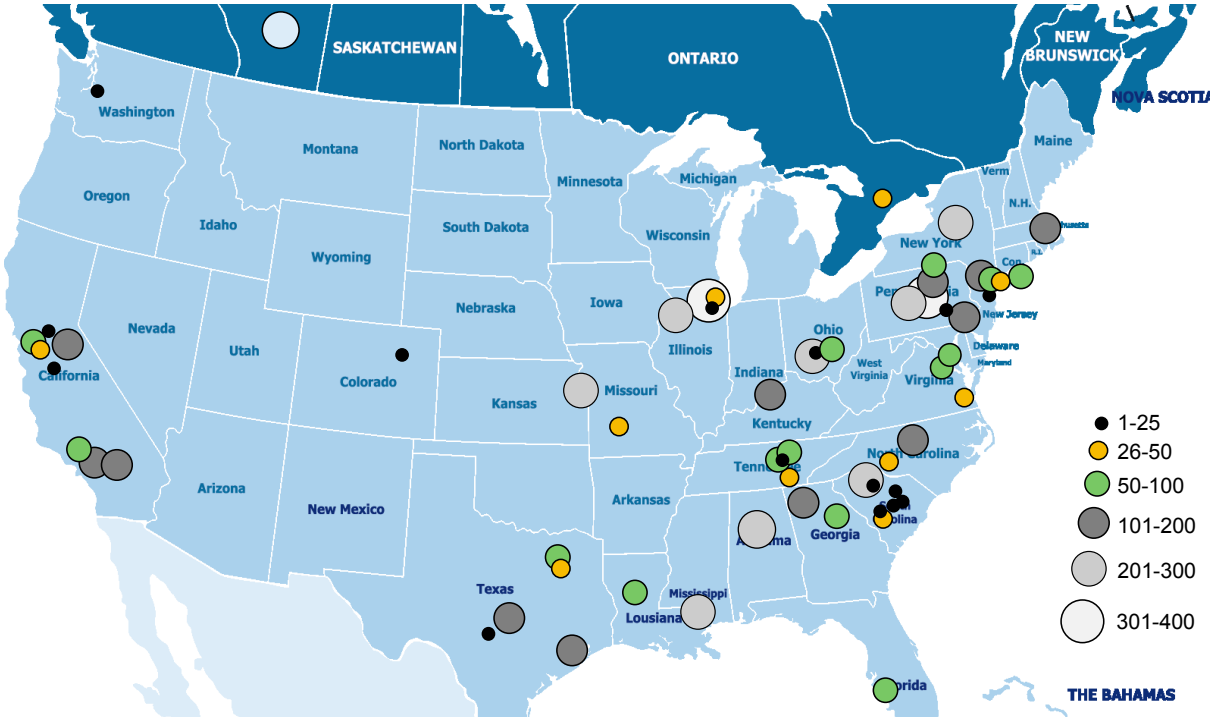

Abbildung 2-14: H_2-Flurförderzeuganwendungen in Nordamerika, (auf Grundlage von [Fue-2015])

Neben den zahlreichen Anwendungen in Nordamerika ist noch eine weitere H_2-Flurförderzeuganwendung in Japan bekannt. Dort ist aktuell ein H_2-Flurförderzeug des Flurförderzeugherstellers Toyota Material Handling auf dem Kansai Airport in der Nähe von Osaka im Einsatz. Bis zum Ende des Demonstrationsprojektes im Jahre 2016 ist eine Flotte von drei wasserstoffgetriebenen Flurförderzeugen geplant. Des Weiteren ist bei einem erfolgreichen Abschluss des Projektes geplant, die gesamte Flurförderzeugflotte von 400 Fahrzeugen auf Brennstoffzellenbetrieb umzurüsten. [fue-2015, THE-2015]

2.2.8 **Brennstoffzellensystemmarkt**

Wie aus Kapitel 2.2.6 und Kapitel 2.2.7 hervorgeht befindet sich aktuell der Hauptabsatzmarkt von Brennstoffzellensystemen in Nordamerika. Bei einer Betrachtung der dort am Markt agierenden Brennstoffzellensystemhersteller sowie deren im Markt befindlichen Systeme in Abbildung 2-15 wird ersichtlich, dass die Firma Plug Power mit großem Abstand die meisten Flurförderzeuge mit Brennstoffzellensystemen ausgerüstet hat. Betrachtet man zudem die Anzahl der Systeme von 2012 und 2015 wird ersichtlich, dass die weiteren Brennstoffzellensystemhersteller wie Oorja Protonics, Hydrogenics, Nuvera und Ballar Power Systems Marktanteile verloren haben.

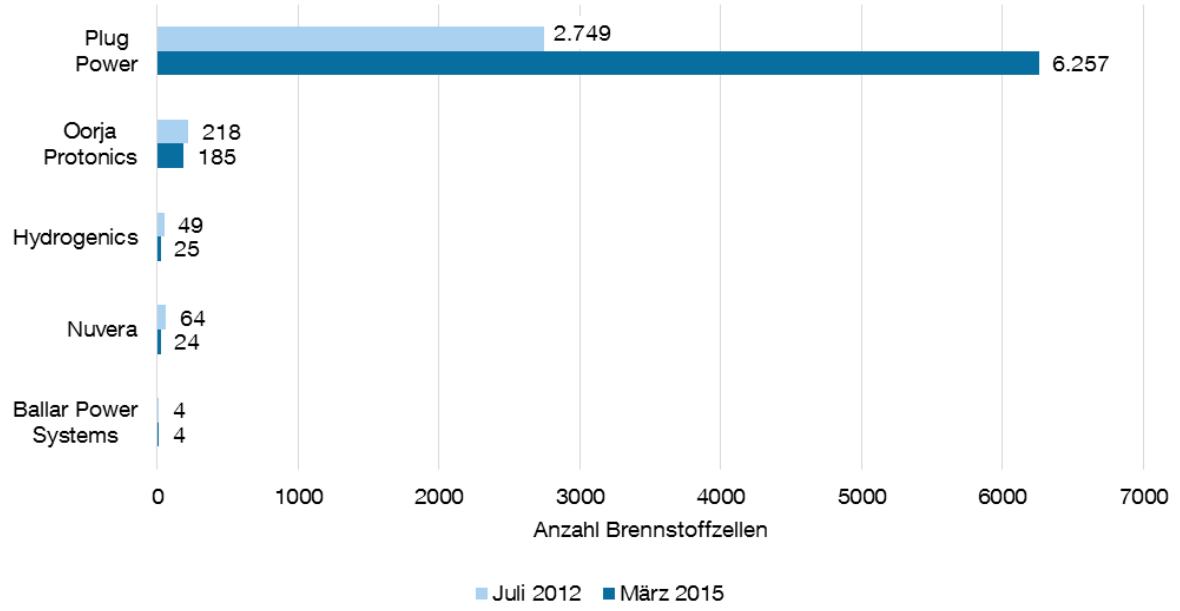

Abbildung 2-15: Brennstoffzellenhersteller und Anzahl Brennstoffzellensysteme in Nordamerika, (auf Grundlage von [Fue-2015])

2.3 Batterien

2.3.1 Blei-Säure Batterien

Die Blei-Säure Batterie, auch Bleiakkumulator genannt, wurde 1854 von dem deutschen Physiker und Mediziner Wilhelm Josef Sinsteden erfunden. Sie ist unter den heute relevanten technischen Systemen die älteste wiederaufladbare Speichertechnologie und war im Jahr 2013 mit über 50 Prozent Marktanteil die am weitesten verbreitete Batterie [Möl-2013, S. 5]. Die Gründe dafür sind vielfältig. Neben dem vergleichsweise niedrigen Preis, der hohen Zuverlässigkeit und der einfachen Herstellung ist vor allem die sehr hohe Recyclingquote ausschlaggebend. Mehr als 97 Prozent des Bleis, das den größten Anteil an der Batterie ausmacht, können recycelt werden [Bat-2012].

Es existieren verschiedenste Größen und Bauformen für zahlreiche Anwendungen. Die bekannteste ist die Starterbatterie bei Kraftfahrzeugen. Darüber hinaus werden Bleiakkumulatoren als Traktionsbatterie für Flurförderzeuge und als stationäre Batterie für Notstromversorgung und Photovoltaikanlagen eingesetzt [Bau-1997, S. 62]. Der prinzipielle Aufbau ist immer derselbe. Das Gehäuse, das die Batteriezellen enthält, besteht in der Regel aus Polypropylen. Wie in Abbildung 2-16 dargestellt, sind die negativen und positiven Elektrodenplatten abwechselnd angeordnet und durch einen Separator getrennt, um einen Kurzschluss zu verhindern. Die gängigsten Separatormaterialien sind poröse Kunststoffe und Glasfaservliese. Teilweise werden Kautschuk

und andere Materialien eingesetzt. Eine Elektrodenplatte besteht aus einem Elektrodengerüst aus einer Hartbleilegierung, das als Ableiter dient und in welches das Aktivmaterial der Elektrode eingefügt wird. Elektrodengerüste unterscheiden sich stark hinsichtlich Bauweise und Zusammensetzung. Meistens werden sie als Gitterplatte, Röhrchenplatte (Panzerplatte) oder Stabplatte mit Legierungsbestandteilen wie Antimon, Arsen, Kupfer und Zinn ausgeführt. Schwammförmiges Blei dient als aktive Masse der negativen Elektrode. Aufgrund der Schwammform besitzt diese eine große Elektrodenoberfläche, wodurch größere Strombelastungen möglich sind. Das Aktivmaterial der positiven Elektrode ist poröses Bleidioxid. Die Aktivmaterialien beider Elektroden sind mit dem Elektrolyten getränkt, womit die erwünschten chemischen Vorgänge ermöglicht werden. Als Elektrolyt kommt mit Wasser verdünnte Schwefelsäure (H_2SO_4) mit einer Säuredichte von 1,20 bis 1,28 kg/l zum Einsatz [DIN-43530-1, S. 1, Bau-1997, S. 59, Ran-1999, S. 4].

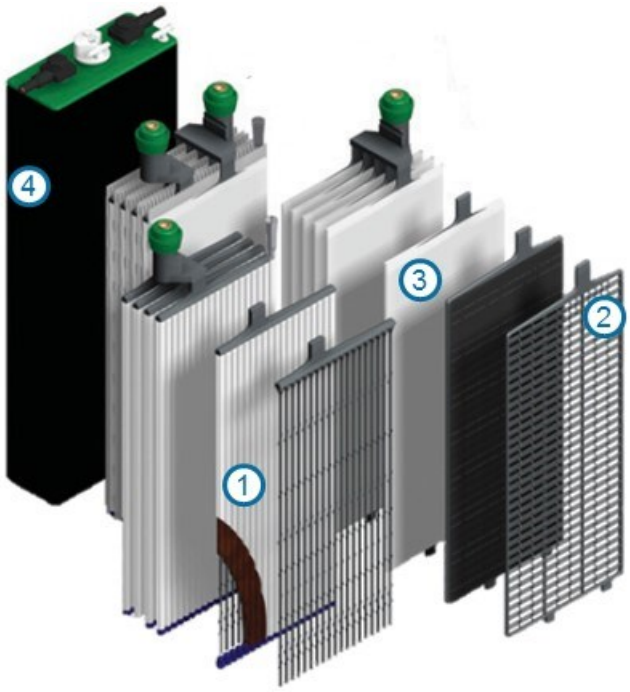

Abbildung 2-16: Aufbau Blei-Säure Batterie (Panzerplatten (1), Gitterplatten (2), Separator (3), Zellengehäuse (4)), [HOP-2015, S. 7]

In Traktionsbatterien werden als positive Elektrode Panzerplatten verwendet, die aus nebeneinanderliegenden, elektrolytdurchlässigen Röhrchen bestehen. Im Inneren der Röhrchen befindet sich ein Bleistab, der von der aktiven Masse umgeben ist [Jak-1993, S. 434]. Traktionsbatterien gibt es in geschlossener (PzS) und in verschlossener Ausführung (PzV). Während bei PzS-Batterien der Elektrolyt in flüssiger Form vorliegt, ist er bei PzV-Batterien in einem Gel gebunden. Dadurch kann bei PzV-Batterien kein Elektrolyt austreten, weshalb sie bevorzugt in der Chemie- und Lebensmittelindustrie

zum Einsatz kommt. Ein weiterer Vorteil ist die Wartungsfreiheit, da kein Wasser nachgefüllt werden muss [AIM-2000, S. 6, Zen-2004, S. 1]. Die Zellreaktion ist bei den verschiedenen Ausführungen immer dieselbe. Bei der Stromentnahme wird an der negativen Elektrode (Minuspol) das metallische Blei zu Bleisulfat oxidiert. Dabei werden Elektronen freigesetzt, was einen Elektronenüberschuss in der negativen Elektrode bewirkt. Gleichzeitig wird an der positiven Elektrode (Pluspol) das Bleidioxid zu Bleisulfat reduziert. Durch die Verbindung der beiden Elektroden über den Ableiter wandern die Elektronen vom Minuspol zum Pluspol und es entsteht ein Stromfluss. Die gesamte Zellreaktion bei der Stromentnahme ist durch Formel (2-2) gegeben.

$$PbO_2 + Pb + 2 \times H_2SO_4 \leftrightarrow 2 \times PbSO_4 + 2 \times H_2O \qquad (2\text{-}2)$$

Die linke Seite stellt den geladenen, die rechte Seite den entladenen Zustand dar. Die Aktivmaterialien der beiden Elektroden reagieren demnach mit Schwefelsäure zu Bleisulfat und Wasser. Dadurch nimmt die Schwefelsäurekonzentration beim Entladevorgang zunehmend ab, bis keine Energie mehr entnommen werden kann. Aufgrund des reversiblen Charakters der elektrochemischen Reaktion kann diese in beide Richtungen erfolgen und die Batterie auch wieder geladen werden [Bau-1997, S. 62]. Beim Laden von geschlossenen Blei-Säure Batterien mit flüssigem Elektrolyt gelangen Säureanteile aus den Elektroden in den Elektrolytfreiraum. Sie weisen ein höheres spezifisches Gewicht als Wasser auf, sinken deswegen und konzentrieren sich am Zellenboden. Dadurch ist die Säurekonzentration nicht mehr gleichmäßig über die Elektroden verteilt (Säureschichtung), der Akku kann nicht mehr vollständig geladen werden und es kommt zur Korrosion der Elektroden. Um dies zu verhindern, wird die Batterie im Anschluss an die Vollladung gezielt überladen. Dabei wird das Wasser im unteren Bereich der Batteriezelle elektrolytisch zersetzt, wodurch Wasserstoff-und Sauerstoffbläschen entstehen, die aufsteigen und den Elektrolyten durchmischen. Die längere Ladezeit und die hohen Temperaturen, die beim Überladen entstehen, führen allerdings zu einem großen Energiebedarf und einer geringeren Lebensdauer der Batterie. Außerdem muss das elektrolytisch zersetzte Wasser nachgefüllt werden [Cas-2014]. Eine weitere Möglichkeit eine gleichmäßige Säurekonzentration zu erreichen und gleichzeitig die eben genannten Nachteile zu minimieren ist die Elektrolytumwälzung (EUW). Bei dieser ist ein Doppelrohrsystem in die Batterie integriert, durch das Luft in den unteren Bereich der Batteriezelle geblasen wird. Die Luftbläschen ziehen die schweren Säureanteile nach oben und bewirken so eine Umwälzung des Elektrolyten [AIM-2000, S. 5f.]. Im Gegensatz dazu ist bei verschlossenen Blei-Säure Batterien der Elektrolyt in einem Gel gebunden und wird von diesem an Ort und Stelle gehalten. Dadurch können die Säureanteile nicht absinken und eine gleichmäßige Säurekonzentration ist gewährleistet.

Eine einzelne Batteriezelle liefert eine Nennspannung von 2,0 V. Wird eine höhere Spannung benötigt, werden mehrere Batteriezellen in Reihe geschaltet. Eine Starterbatterie (12 V) enthält dementsprechend sechs Batteriezellen. Die Lebensdauer von Blei-Säure Batterien ist sehr stark von der Entladetiefe abhängig. Während bei einer Entladetiefe von 20 Prozent ungefähr 1.500 Ladezyklen durchgeführt werden können, ist die Lebensdauer bei einer Entnahme von 80 Prozent der Kapazität mit 500 durchführbaren Ladezyklen deutlich geringer [Jak-1993, S. 46]. Obwohl Blei-Säure Batterien sehr weit verbreitet sind, haben sie eine Reihe von Nachteilen gegenüber anderen Energiespeichern. Die geringe Energiedichte (20 - 45 Wh/kg) macht sie für Anwendungen mit hohen Reichweitenanforderungen, z.B. als Energiespeicher für Elektrofahrzeuge, ungeeignet. Aufgrund der Gefahr des Elektrolytaustritts können geschlossene Blei-Säure Batterien nicht kopfüber eingesetzt werden, wodurch sie für den Einsatz in mobilen Consumer-Geräten nicht infrage kommen. Weitere Nachteile sind die relativ geringe Lebensdauer bei starker Beanspruchung und die starke Selbstentladung. Diese beträgt bei neuen Blei-Säure Batterien beispielsweise ein Prozent pro Tag und steigt mit der Batteriealterung bis auf das fünffache [Sal-2011, S. 3ff.].

2.3.2 **Ladegeräte**

Für das Laden von Batterien kommen spezielle Ladeverfahren und -geräte zum Einsatz. Retzbach bezeichnet ein Ladeverfahren als geeignet, wenn folgende Kriterien erfüllt werden [Ret-2008, S. 56]:

- möglichst rasche Vollladung
- Überladung ausgeschlossen
- keine kritischen, lebensdauer- oder leistungsmindernden Effekte

Da es für jede Akkutechnologie ein eigenes optimiertes Ladeverfahren gibt, werden heute mikroprozessorgesteuerte Ladegeräte verwendet. Ladestrom, -spannung und -zeit werden jeweils an den zu ladenden Akku angepasst.

Herkömmliche Ladegeräte für Blei-Säure Batterien arbeiten bei einer Frequenz von 50Hz. Es sind kostengünstige, robuste Geräte mit einer langen Lebensdauer. Allerdings kann es durch die fehlende Steuerung zu einem nicht vollständig geladenen Akku oder zu einer Überladung des Akkus kommen. Abbildung 2-17 zeigt ein solches Ladegerät der Firma IEB.

Abbildung 2-17: 50Hz-Ladegerät, [IEB-2015]

Neben den 50Hz-Ladegeräten werden heutzutage verstärkt Hochfrequenz(HF)-Ladegeräte eingesetzt. Sie können die geforderten Ladevorgänge umsetzen, sind allerdings kostenintensiver und haben eine geringere Lebensdauer als 50Hz-Ladegeräte. Abbildung 2-18 zeigt ein HF-Ladegerät der Firma Fronius.

Abbildung 2-18: HF--Ladegerät, [Fro-2015]

Batterieladeanlagen umfassen den Raum und die erforderlichen elektrischen Einrichtungen zum Laden der Batterie. Unterschieden werden dabei Einzelladeplätze und Batterieräume bzw. -stationen. Bei erstgenanntem handelt es sich um einen gekennzeichneten und speziell ausgerüsteten Bereich in Arbeits-, Lager- oder Betriebsräumen. Der Akku verbleibt während des Ladevorgangs im Flurförderzeug, welches folglich während dieser Zeit nicht verfügbar ist. Bei Batterieladeräumen bzw. -stationen handelt es sich um gesonderte Räume, in denen die Akkus zum Laden aufgestellt sind. Sie werden dafür aus dem Flurförderzeug ausgebaut. Befinden sich die Ladegeräte im gleichen Raum, handelt es sich um Ladestationen, anderenfalls um Laderäume [Kan-2009, S. 6]. Der Austausch der entladenen Batterie gegen eine geladene ermöglicht es, das Flurförderzeug anschließend sofort wieder einzusetzen.

2.3.3 **Batteriemarkt**

Schlick et al. geben in ihrer Marktstudie „Zukunftsfeld Energiespeicher“ den weltweiten Umsatz von Batterien im Jahr 2011 mit 32,4 Mrd. € an [Sch-2012, S. 5]. Die verkaufte Batteriekapazität für 2011 beziffern sie mit 100,3 GWh. Etwas mehr als die Hälfte (52 Prozent) entfällt dabei auf den Automobilsektor (Traktions- und Starterbatterien). Auf die mobilen Maschinen entfallen 8 Prozent. Hierzu gehören neben den Flurförderzeugen auch Reinigungs-, Bau- und Landmaschinen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die gesamte Batteriekapazität im Flurförderzeug-Segment von 5,6 GWh im Jahr 2011 auf 9,9 GWh im Jahr 2020 erhöht. Dieser Bereich wird momentan von Blei-Säure Batterien dominiert. Die Weiterentwicklung der Li-Ionen-Technologie und die sinkende Kostendifferenz zwischen Blei-Säure und Li-Ionen Batterien lässt jedoch zukünftig einen wachsenden Anteil an Li-Ionen Batterien erwarten.

2.4 Ökologische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen

Die ökologische Nachhaltigkeit kann mit Hilfe der Ökobilanz-Methodik bewertet werden. Hierbei werden Umweltaspekte und -auswirkungen von Produktsystemen, ausgehend von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Beseitigung, systematisch abgeschätzt [DIN-14040, S. 17]. Die ersten Ökobilanzen batteriebetriebener Fahrzeuge wurden bereits in den Neunzigerjahren erstellt. Rantik untersuchte fünf verschiedene Batterien, die für den Einsatz in Elektrofahrzeugen infrage kommen [Ran-1999]. Er verglich Blei-Säure Batterien, Nickel-Cadmium Batterien, Nickel-Metallhydrid Batterien, Natrium-Nickelchlorid Batterien und Zink-Luft Batterien unter verschiedenen Ladebedingungen. Mit der Entwicklung eines steigenden Umweltbewusstseins und dem Wachstum der Elektromobilität, wurde Anfang des 21. Jahrhunderts eine Vielzahl an Ökobilanzen zu Elektro- und Hybridfahrzeugen veröffentlicht. Studien wie die von *Notter et al.*, *Gaines et al.* und *Samaras und Meisterling* befassten sich mit Treibhauspotential und/oder Energiebedarf [Gai-2010, Not-2010, Sam-2008]. *Burnham, Wang und Wu* veröffentlichten im Jahr 2006 eine Untersuchung zu den Umweltwirkungen eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor, Hybridantrieb und Brennstoffzellenantrieb, ohne diese jedoch konkreten Wirkungskategorien zuzuordnen [Bur-2006]. In einer weiteren Studie verglichen *Sullivan und Gaines* das Treibhauspotential von Blei-Säure Batterien, Nickel-Cadmium Batterien, Nickel-Metallhydrid Batterien, Lithium-Ionen Batterien und Natrium-Schwefel Batterien und wiesen darauf hin, dass Daten zu Produktions- und Recyclingprozesse nur lückenhaft verfügbar sind. [Sul-2010, S. 1]

2.4.1 **Ökobilanzierung von Flurförderzeugen**

In der recht jungen Disziplin der Ökobilanzierung gibt es mittlerweile eine Vielzahl an Ökobilanzen. Im Bereich der Flurförderzeuge ist die Anzahl an Publikationen jedoch

überschaubar. Toyota Material Handling erstellte 2001 die weltweit erste Sachbilanz von Gabelstaplern mit Elektro- bzw. Verbrennungsmotor, ordnete die Emissionen aber zunächst keinen Wirkungskategorien zu [Toy-2002, S. 14f.]. Die erste TÜV-zertifizierte Produkt-Ökobilanz der Flurförderzeugbranche in Europa wurde vom Intralogistikunternehmen Jungheinrich durchgeführt. In dem sogenannten Jungheinrich-Umweltprädikat unterteilt der Hersteller seine Produktpalette in verschiedene Produktcluster, für die stellvertretend die meistverkauften Fahrzeuge aus jeder Produktgruppe, von denen mehrere einen Cluster bilden, untersucht werden. Die Ergebnisse werden in CO_2-Äquivalent pro Durchschnittsfahrzeug in den Jahren 2001, 2006 und 2011 angegeben [Jun-2012]. Ferner haben zwei weitere Flurförderzeughersteller, Crown und Linde MH, Ökobilanzen ihrer Produkte durchgeführt. Ergebnisse daraus wurden aber nicht veröffentlicht [Cro-2012, Hel-2014b, S. 54ff.].

Im Teilprojekt Flurförderzeuge des Forschungsvorhabens „Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik“ wird der CO_2-Ausstoß über den Lebensweg von ganzen Flurförderfahrzeugflotten analysiert. Dabei wird das End of Life der Fahrzeuge nicht mit betrachtet, sodass es keine Analyse von der „Wiege bis zur Bahre“ ist bzw. keine ganzheitliche Ökobilanz darstellt. Ferner wird der gesamte Lebensweg eines Elektro-Gegengewichtsstaplers, eines Schubmaststaplers, eines Niederhubwagens und eines Hochhubwagens mit Hilfe des sogenannten EcoReport-Tool, einer Microsoft Excel-Anwendung für Ökobilanzen, betrachtet. Hier liegt für die Vergleiche der Fokus ebenfalls auf den äquivalenten CO_2-Emissionen [Bru-2012, S. 53ff.].

Im Forschungsprojekt „E-Log-BioFleet“ wurden die Umweltauswirkungen des im Projekt entwickelten H_2-Niederflurkommissionierers von der „Wiege bis Bahre“ bewertet. Dabei wurden zudem verschiedene Herstellungspfade von Wasserstoff untersucht und diese mit einem batteriebetriebenen Niederflurkommissionierer inkl. verschiedener Herstellungspfade von Strom verglichen. Ein Auszug aus den Ergebnissen wurde am 25.04.2014 im Rahmen der Ergebnispräsentation in Sattledt vorgestellt. Die gesamten Ergebnisse sind jedoch bis heute nicht öffentlicht zugänglich.

Ökobilanzen zum Thema H_2-Flurförderzeuge wurde bis heute weder von Flurförderzeug- bzw. Brennstoffzellensystemherstellern noch von weiteren Forschungseinrichtungen veröffentlicht.

2.5 Wirtschaftliche Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen

Auf der Grundlage von geschätzten oder mittels Kostenvergleichsverfahren bestimmten Lebenszykluskosten zweier Investitionsalternativen können diese gegenübergestellt und die günstigere ermittelt werden [Gei-2009, S. 18]. Die Lebenszykluskostenrechnung, auch Life Cycle Costing (LCC) genannt, wird u.a. bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit von Produkten und bei der Alternativenauswahl zur Anschaffung von Investitionsgütern durch Beurteilung der anfallenden, kumulierten Kosten über die gesamte Lebensdauer angewandt [Coe-2007, S. 597ff.]. Dabei können die Lebenszykluskosten sowohl aus Kundensicht, als auch aus Produzentensicht ermittelt werden [Fan-2009, S. 428]. Für die Ermittlung der Lebenszykluskosten bzw. Anwendung des LCC wurden verschiedenste Anwendungsleitsätze entwickelt. Diese sollen für eine verbesserte Vergleichbarkeit sowie für eine Zeiteinsparung bei der Anwendung sorgen. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über bestehende Richtlinien und Normen gegeben, die sich mit der Ermittlung von Lebenszykluskosten, deren Beschreibung und Kalkulation beschäftigen.

SAE ARP 4293

Die SAE ARP 4293 „Life Cycle Cost - Techniques and Applications“ aus dem Jahr 1992 zählt zu den ersten entwickelten Anwendungskonzepten zur LCC-Berechnung und stammt aus den USA. Sie wurde ursprünglich für die Luft- und Raumfahrttechnik entwickelt und beschreibt die Methodik des LCC mit dem Fokus auf Techniken und Anwendungen, für die jeweilige Phase im Lebenszyklus. Die Phasen sind Forschung und Entwicklung, Beschaffung und Finanzierung, Betrieb und Instandhaltung sowie Entsorgung. Kostenelemente, Schätztechniken und andere Faktoren, die LCC beeinflussen, werden ferner beschrieben sowie die Benutzung von Kostenprognose- und Kostensimulationstechniken erläutert. [SAE-4293, Sch-2009, S. 40]

VDI 2884

Die VDI 2884 „Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)“ soll aus Sicht des Betreibers die Beschaffungsentscheidung von Produktionsmitteln via wirtschaftlichen Gesichtspunkten unterstützen. Aus Herstellersicht ist die Richtlinie für die wirtschaftliche und kundengerechte Planung von Produktionsmitteln anwendbar. Ziel ist es, die Auswahl von alternativen Produktionsmitteln zu unterstützen und gleichzeitig eine Methodik zur Umsetzung einer LCC-Analyse für Betreiber und Hersteller bereitzustellen [VDI-2884].

VDMA-Einheitsblatt 34160

Das VDMA-Einheitsblatt 34160 „Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen“ wurde vom Verein deutscher Maschinen- und Anlagenbauer

e.V. als Versuch ein Standardisierungsmodell abzubilden entwickelt. Die über den Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen fälligen Kosten werden in die Bereiche Entstehung, Betrieb und Verwertung aufgeteilt und tabellarisch festgehalten. Durch einfaches Kumulieren der Kostenelemente werden die Lebenszykluskosten ermittelt. Dabei wird der Zeitpunkt der Zahlungsströme sowie Erlöse aus dem Betrieb der Maschine oder Anlage außer Acht gelassen [VDM-34160, Sch-2009, S. 40ff.]

DIN EN 60300-3-3

In der DIN EN 60300-3-3 „Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten“ wird die Lebenszykluskostenanalyse als nützlicher Input in der Entwurfsphase eines Produktes hervorgehoben. Fokus des Konzepts ist die Zuverlässigkeit der betrachteten Produkte. Die Norm schlägt eine Dreiteilung der Lebensphasen vor: Kosten für Anschaffungs-, Nutzungs- und Nachnutzungsphase. Neben den Kosten sollen gleichzeitig Leistungs- und Funktionsfähigkeit berücksichtigt werden [DIN-60300-3-3, Sch-2009, S. 40, 55].

2.5.1 Wirtschaftlichkeitsbewertung von Flurförderzeugen

In der VDI-Richtline 2695 „Ermittlung von Betriebskosten von Diesel- und Elektro-Gabelstapler“ wird zwischen festen (Abschreibungen und Zinsen) und betriebsabhängigen (Wartung, Energiekosten und Reifen) Kosten unterschieden [VDI-2695]. Personalkosten werden in der Richtlinie jedoch nicht berücksichtigt. Bei einer Gabelstapleranwendung können diese laut *Helmke* bis zu ca. 80 Prozent der jährlichen Gesamtkosten betragen [Hel-2014a, S. 54 ff.].

Im Forschungsprojekt „HyLift-Demo“ wurden exemplarisch die Total Cost of Ownership (TCO) von Diesel-, Batterie, und Wasserstoff-Gabelstaplern in Ein-, Zwei- und Dreischichtbetrieb gegenüberstellt. Dabei wurde im Ein- und Zweischichtbetrieb ein Gabelstapler als Flottengröße gewählt. Im Dreischichtbetrieb wurden hingegen 50 Gabelstapler angenommen. In allen drei Szenarien lagen die TCO der Wasserstoffanwendung über denen der Batterieanwendung [HyL-2013, S. 22 ff.].

Im österreichischen Forschungsprojekt „E-LOG-BioFleet“ wurden „[…] Daten für die ökonomische, ökologische und technische Analyse gesammelt und ausgewertet.“ [Kle-2013]. Veröffentlichungen zu der genannten ökonomischen Analyse gibt es jedoch nicht.

Im Paper „Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered forklifts” vergleichen *Renquist et al.* vier verschiedene Antriebstechnologien (H_2-Brennstoffzellen, Schnellladung mit 15kW, Schnellladung mit 30kW und konventionelles La-

den inkl. Batteriewechsel) bei einer Flurförderzeugflotte von 50 Gabelstaplern. Zu Beginn wird die Auswirkung eines konstanten Energieverbrauches des Flurförderzeuges über 24 Stunden für die unterschiedlichen Technologien analysiert. Infolgedessen wird das benötigte Equipment (Flurförderzeuge, Wechselbatterien und Ladegerät) für einen Ein-, Zwei- und Dreischichtbetrieb bestimmt. Darauf aufbauend werden für ein fest definiertes Anwendungsszenario die „Net present cost“ für alle vier Technologien bei variierender Einsatzdauer der Gabelstapler (0-3 Schichten) kalkuliert und grafisch dargestellt. H_2-Brennstoffzellen sind hierbei bei allen Szenarien am teuersten [Ren-2012, S. 12054 ff.]. Die der Berechnung zugrunde liegenden Kosten und Rahmenbedingungen beziehen sich auf nordamerikanische Gegebenheiten. Infolgedessen sind die Ergebnisse nicht auf Europa bzw. Deutschland übertragbar.

Ramsden vergleicht in „An Evaluation of the Total Cost of Ownership of Fuel Cell-Powered Material Handling Equipment” die TCO von Klasse 1/2 sowie von Klasse 3 Flurförderzeugen. Hierbei werden 97 batteriebetriebene mit 58 H_2-Flurförderzeugen verglichen, wobei die Anwendungen gegenüberstellt und am Ende die TCO pro Fahrzeug berechnet werden. Ähnlich wie bei *Renquist et al.* wird zu Beginn ein festes Anwendungsszenario anhand amerikanischer Rahmenbedingungen definiert. Dieses ist an eine arbeitsintensive Anwendung in einer Lager- und Distributionshalle mit Mehrschichtbetrieb sowie sechs bis sieben Arbeitstagen pro Woche angelehnt. Die detailliert angeführten Kosten stammen aus nicht dokumentierten Befragungen von Experten. Anschließend werden die jährlichen TCO für ein Flurförderzeug berechnet, wobei diese bei H_2-Flurförderzeugen geringer als bei batteriebetriebenen ausfallen. Abschließend wurde durch eine Sensitivitätsanalyse die Auswirkung einzelner ausgewählter Parameter wie z.B. Wartungskosten, Energiekosten und Arbeitstage pro Jahr untersucht [Ram-2013]. Vergleicht man die beiden definierten Anwendungsszenarien von *Ramsden* und *Renquist et al.* so wird ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen angegeben Kosten, wie z.B. Wartung und Abschreibungen der Batterien bzw. H_2-Brennstoffzellensystemen ersichtlich. Daraus ergibt sich auch das unterschiedliche Ergebnis der H_2-Flurförderzeuge (vgl. [Ren-2012, S. 12054 ff., Ram-2013]).

2.6 Fazit

Der weltweite Flurförderzeugmarkt beläuft sich auf mehr als 10 Millionen Fahrzeuge [Jun-2012, S. 5]. Für eine neue innovative Antriebstechnologie bei Flurförderzeugen, wie z.B. die Brennstoffzellentechnologie, bedeutet dies ein enormes Marktpotenzial. In Nordamerika sind bereits mehr als 7.000 H_2-Flurförderzeuge im Serieneinsatz. In Europa gab es zum Start des Forschungsvorhabens H2IntraDrive lediglich einige Forschungs- und Demonstrationsprojekte, bei denen der Einsatz der H_2-Flurförderzeuge

meist nach Beendigung nicht weiter verfolgt wurde. Ferner waren lediglich ein bis zwei Flurförderzeuge je Flurförderzeugtyp im Testbetrieb neben konventionellen Flurförderzeugen im Einsatz. Eine seriennahe Produktionsversorgung mit ausschließlich H_2-Flurförderzeugen wie bei H2IntraDrive gab es nicht. Ferner waren keine Serien-H_2-Flurförderzeuge am Markt verfügbar.

Während der Projektlaufzeit sind in Deutschland bzw. Europa weitere H_2-Flurförderzeuge in Betrieb genommen worden. Besonders hervorzuheben ist dabei die Anwendung beim Logistikdienstleister Prelodis in der Nähe von Orleans mit 35 H_2-Flurförderzeugen [Plu-2015]. Jedoch wurde bei keiner Anwendung wissenschaftlich die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen untersucht. Infolgedessen fehlen bis heute wissenschaftliche Aussagen zu den Umweltauswirkungen von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von H_2-Flurförderzeugen gibt es in den USA zwei Veröffentlichungen, die jedoch auf nordamerikanische Rahmenbedingungen abzielen. Infolgedessen fehlen auch hier Aussagen für den deutschen bzw. europäischen Raum.

3 H_2-Flurförderzeuganwendung H2IntraDrive

3.1 Anwendungsstandort BMW Group Werk Leipzig

Die Anwendung bzw. Erprobung im Rahmen des Forschungsvorhabens H2IntraDrive findet im Leipziger Werk der BMW Group statt. Neben der 1er-Serie werden im Werk der BMW i3 sowie der BMW i8 gefertigt. Die beiden Fahrzeuge i3 und i8 verfügen dabei über einen Elektroantrieb und CFK-Leichbaukarosserien und werden von BMW als hochinnovative Fahrzeuge bezeichnet. Zur Produktion im Werk Leipzig gehören die Prozessschritte CFK-Fertigung, die Technologie Exterieur-Komponenten für die Herstellung der Kunststoffaußenhaut, der BMW i Karosseriebau und die BMW i Montage. Dabei übernehmen die H_2-Flurförderzeuge die komplette Materialbereitstellung des BMW i Karosseriebaus. In Abbildung 3-1 ist das Leipziger Werk inkl. der Lage der H2IntraDrive Anwendung zu sehen.

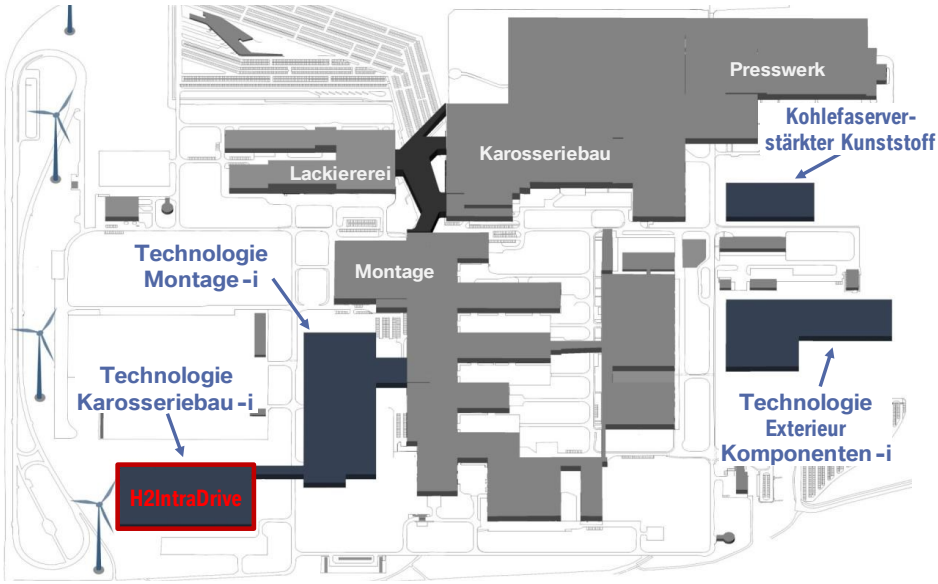

Abbildung 3-1: BMW Group Werk Leipzig inkl. H2IntraDrive Anwendung

Die Werkshalle des BMW i Karosseriebaus bzw. CFK-Karosseriebaus ist dabei grundlegend in die zwei Bereiche Produktion und Lager unterteilt. Während im Produktionsbereich die Versorgung staplerfrei mit Hilfe von Routenzügen erfolgt, werden im Lagerbereich Gabelstapler für das kurzzeitige Puffern der Waren eingesetzt. Ferner werden Gabelstapler für die Be- und Entladung im Wareneingangsbereich verwendet. In Abbildung 3-2 ist das detaillierte Hallenlayout inkl. Routenzugbereich (grün) und Staplerbereich (blau) zu sehen. Die Fertigung im CFK-Karosseriebau erfolgt vorwiegend im Mehrschichtbetrieb von Montag bis Freitag.

Abbildung 3-2: Hallenlayout BMW i Karosseriebau

3.2 H_2-Flurförderzeuge

3.2.1 **Brennstoffzellenbetriebene Gabelstapler**

Im Forschungsvorhaben H2IntraDrive sind insgesamt drei Gegengewichtsstapler des Typs E25/FC mit 2,5 Tonnen Hublast und zwei Gegengewichtsstapler des Typs E35/FC, in Abbildung 3-3 dargestellt, mit 3,5 Tonnen Hublast im Einsatz. Hierfür wurden von Linde MH E-Gabelstapler für den Einsatz mit Brennstoffzellensystemen umgerüstet. Hauptaugenmerkt lag dabei auf der im Brennstoffzellensystem entstehenden Wärme, welche als warme Abluft aus dem System abgeführt werden muss. Seitliche Öffnungen im Chassis der Gabelstapler sind dafür notwendig. Die Realisierung der erforderlichen Lüftungsquerschnitte unter gleichzeitiger Gewährleistung der Festigkeit des Chassis erfolgte durch eine Anpassung der Rahmenstruktur inkl. FEM-Berechnung. Ferner wurden die Verlegung des Hauptkabelsatzes sowie mehrerer Hydraulikleitungen geändert. Weiterhin wurden an den höchsten Punkten des Fahrerschutzdachs Entlüftungsöffnungen eingebracht. Diese gewährleisten im Falle einer Leckage, dass austretender Wasserstoff nach außen abgeleitet werden kann und sich nicht innerhalb des Fahrerschutzdachs sammelt bzw. konzentriert. Ein weiteres neues Ausstattungsmerkmal ist die an der rechten Staplerseite integrierte Tankklappe. Sie ermöglicht schnellen Zugang zum Wasserstofftankstutzen, Kondensatabsaugstutzen sowie zur Diagnoseschnittstelle der Brennstoffzelle. Die Stellung der Tankklappe wird durch einen Sensor überwacht, so dass die Gabelstaplersteuerung verhindern kann, dass der Stapler mit geöffneter Klappe und möglicherweise angekuppeltem Tankstutzen losfährt. So werden Beschädigungen an Brennstoffzelle und Wasserstoffinfrastruktur vermieden. Für den Gabelstapler E35/FC musste aufgrund der geringen Masse des Brennstoffzellensystems, im Vergleich zur eigentlich genutzten Blei-Säure Batterie, ein zusätzliches Gewicht am Stapler angebracht werden. Dies gewährleistet dieselbe Standsicherheit wie beim ursprünglichen batteriebetriebenen Fahrzeug.

Bei den im Forschungsvorhaben eingesetzten Gabelstaplern ist ein Wasserstofftank mit einem Volumen von 74 l verbaut, welcher mit bis zu 350 bar bei 15 °C betankt werden kann. Daraus ergibt sich eine maximale Betankungsmenge von 1,8 kg Wasserstoff.

Abbildung 3-3: Brennstoffzellenbetriebener Gabelstapler E35/FC der Firma Linde MH

3.2.2 **Brennstoffzellenbetriebene Schlepper**

Ähnlich wie beim Gegengewichtsstapler waren Anpassungen für den Brennstoffzellenbetrieb der Schlepper notwendig, wobei aufgrund der seitlich offenen Bauform des batteriebetriebenen Schleppers keine zusätzlichen Lüftungsschlitze realisiert werden mussten. Analog zum Gabelstapler wurde beim Schlepper jedoch eine vergleichbare Tankklappe konstruiert und integriert. Infolgedessen konnte eine einheitliche Sicherheitsstrategie für sämtliche H_2-Flurförderzeuge gewährleistet werden. Insgesamt wurden sechs Routenzugschlepper des Typs P30C/FC der Firma Linde MH für das Forschungsvorhaben entwickelt. Ein Schlepper dieses Typs ist in Abbildung 3-4 zu sehen.

Vier der sechs Schlepper sind mit einem 30,5 l Wasserstofftank ausgerüstet. Die maximale Betankungsmenge liegt bei 0,73 kg Wasserstoff bei 350 bar und 15 °C. Hingegen wurde bei den restlichen zwei Schleppern ein 23 l Wasserstofftank verbaut, welcher mit maximal 200bar bei 15 °C befüllt werden kann. Infolgedessen ist eine maximale Betankungsmenge von 0,36 kg Wasserstoff möglich.

Abbildung 3-4: Brennstoffzellenbetriebener Schlepper P30C/FC von Linde MH

3.3 H_2-Infrastruktur

3.3.1 **Wasserstoffspeicher und Betankungsanlage**

Wie in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-5 ersichtlich, wurde der Wasserstoffspeicher sowie die Betankungsanlage für H2IntraDrive außerhalb, jedoch in direkter Nähe zur Werkshalle, errichtet. Der Wasserstoffspeicher besteht aus 19 Bündeln a 12 GH_2-Flaschen mit 50 l Volumen. Diese sind in Abbildung 3-5 als rote Gasflaschen auf der rechten Seite zu erkennen. Insgesamt können dadurch bis zu ca. 130 kg Wasserstoff gelagert werden. Der Wasserstoff wird dabei aus Leuna angeliefert und ist nach *TÜV SÜD Standard CMS 70* als GreenHydrogen zertifiziert. Die eigentliche Betankungsanlage ist im weißen Container verbaut. Dieser ist aus Explosionsschutzgründen in einen Verdichter- und Elektroraum unterteilt. Im Verdichterraum wird der Wasserstoff mit Hilfe eines Ionischen-Verdichters auf ca. 410 bar komprimiert und im HD-Speicher zwischengelagert. Die Förderleistung des Verdichters beträgt dabei maximal 9,1 kg Wasserstoff pro Stunde. Auf der linken Seite des Containers befinden sich noch zwei graue Stickstoff-Bündel, welche für die Schaltung der pneumatischen Ventile verwendet werden.

Abbildung 3-5: Wasserstoffspeicher und Betankungsanlage im BMW Group Werk Leipzig

3.3.2 **Dispenser**

Aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen im BMW i Karosseriebau dürfen die H_2-Flurförderzeuge nur in der Halle betrieben werden bzw. nicht ins Freie fahren. Für die Betankung der Flurförderzeuge bedeutet dies, dass diese innerhalb der Werkshalle erfolgen muss. Infolgedessen wurde, wie in Abbildung 3-2 ersichtlich, der Dispenser für die Wasserstoffbetankung direkt im Lager- bzw. Logistikbereich errichtet. Dies hat neben der Indoor-Betankung der Flurförderzeuge den wesentlich Vorteil von geringen Anfahrtswegen der Fahrzeuge, da diese prozessbedingt immer wieder am Dispenser vorbeifahren. Insgesamt wurden für den Dispenser sowie für die Stellfläche der Flurförderzeuge, auf der sie während der Betankung stehen, lediglich 15 m² Hallenfläche benötigt. Wie in Abbildung 3-6 ersichtlich befinden sich am Dispenser jeweils ein Zapfpunkt für 200 bar sowie für 350 bar. Zwischen diesen ist ein Touch-Panel zur Identifikation des Fahrzeuges sowie der Betankungsfreigabe installiert. Ferner ist noch ein herausziehbarer Schlauch für die Kondensatabsaugung unterhalb des roten Notausschalters angebracht. Direkt vor dem Dispenser befindet sich die Stellfläche, auf der die Flurförderzeuge während der Betankung stehen. Diese ist zum Teil mit einem Anfahrschutz versehen, welcher in Abbildung 3-6 vor dem Dispenser noch zu sehen ist.

Abbildung 3-6: Wasserstoff Dispenser im BMW Group Werk Leipzig

3.4 Herausforderungen für Anwender bei der Umsetzung von H2IntraDrive

Für den Betrieb von H_2-Flurförderzeugen sind Aufbau, Inbetriebnahme und Betrieb einer H_2-Infrastruktur zwingend erforderlich, womit vor allem folgende Herausforderungen aus Sicht des Anwenders im Projekt H2IntraDrive einhergehen

- Aufbau von umfangreichem Wissen auf Seiten des Flurförderzeug-Anwenders
- Identifikation und Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen
- Erstellung von Gutachten sowie Anträgen für die behördliche Genehmigung

Aufbau von umfangreichem Wissen auf Seiten des Flurförderzeug-Anwenders
Die Wasserstoffinfrastruktur unterscheidet sich in ihrer Funktionsweise fundamental von der Batterieladetechnologie. Infolgedessen müssen neue Anforderungen definiert und Spezifikationen angepasst werden. Als Beispiel hierfür kann die Auslegung des HD-Speichers genannt werden. Bei der aufeinanderfolgenden Betankung zweier Flurförderzeuge in Kombination mit einem unterdimensionierten HD-Speicher liegt der erreichte Druck im Flurförderzeug nach dem Druckausgleich zwischen HD-Speicher und Tank unterhalb des definierten Zieldrucks. Das Fahrzeug wird somit nicht vollständig befüllt oder die Betankungsdauer steigt deutlich an. Notwendiges Wissen zur Identifikation und Abstimmung der neuen Spezifikationen lag aufgrund des Neuheitsgrades

der Wasserstofftechnologie im Bereich der Logistik nicht vor. Dieses musste in enger Abstimmung und Gesprächen mit mehreren Lieferanten gewonnen werden.

Identifikation und Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen
Nur durch eine frühzeitige Identifikation von notwendigen Sicherheitsmaßnahmen im Bereich der Wasserstoffinfrastruktur können diese zeitnah umgesetzt, die notwendigen behördlichen Genehmigungen erteilt und somit eine Verzögerung der Inbetriebnahme verhindert werden. Größte Herausforderungen hierbei waren fehlende Standards bzw. Richtlinien im Bereich der Flurförderzeuge. Infolgedessen hätten von der zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS) bzw. Behörde eventuell nicht berücksichtigte Sicherheitsmaßnahmen gefordert werden können. Dies wurde durch die frühzeitige Integration einer ZÜS mit hoher Expertise im Bereich Wasserstoffbetankung bei Flurförderzeugen unterbunden.

Erstellung von Gutachten sowie Anträgen für die behördliche Genehmigung
Für die nötigen behördlichen Genehmigungen des Aufbaus und Betriebs der Wasserstoffinfrastruktur sowie der H_2-Flurförderzeuge mussten zu Beginn des Vorhabens zunächst die notwendigen Anträge sowie hierfür erforderliche Gutachten identifiziert werden. Hierzu wurde frühzeitig eine Abstimmung mit der zuständigen Behörde auf Basis einer sogenannten „Tischvorlage“ (2-3 Seiten Zusammenfassung des geplanten Vorhabens) durchgeführt. Als weitere Herausforderungen ergaben sich die Erstellung der Gutachten sowie der behördlichen Anträge, da sich diese im Vergleich zu konventionellen Flurförderzeugen anhand der zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen unterschieden. Ferner waren zusätzliche Genehmigungsverfahren (z.B. Erlaubnis nach §13 der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)) notwendig. Bei der Erstellung einiger Anträge und Unterlagen wirkte der Lehrstuhl fml unterstützend mit. Zum Teil wurden zudem Dritte damit beauftragt.

3.5 Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen

Vor den im vorhergehenden Abschnitt aufgezeigten Herausforderungen steht jeder neue Anwender von H_2-Flurförderzeugen. Infolgedessen wurde das im Forschungsvorhaben gewonnene Wissen hinsichtlich H_2-Infrastruktur, H_2-Flurförderzeugen, Sicherheitsmaßnahmen sowie notwendigen behördlichen Genehmigungen in einem „Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen“ gebündelt. Im Rahmen dieses Leitfadens sind alle notwendigen Schritte sowie das notwendige Wissen von der Projektidee bis zur Inbetriebnahme von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen und der hierfür benötigten Infrastruktur beschrieben. Zur Gewährleistung

eines optimalen Projektmanagements sind exemplarische Terminpläne sowie genaue Beschreibungen der einzelnen Arbeitsschritte anhand eines chronologischen Ablaufs und Checklisten aufgeführt. Ferner sind im Leitfaden technisch relevante Themen, wie z.B. die Berechnung des täglichen Wasserstoffverbrauchs der Flurförderzeugflotte und Unterschiede zwischen den infrage kommenden Technologien (z.B. Wasserstoff-Speichermethoden) anschaulich erklärt. Neben dem Projektmanagement und technologiebezogenem Wissen sind im Leitfaden notwendige Genehmigungsverfahren sowie Sicherheitsmaßnahmen für den Betrieb von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen beschrieben. Hierbei wird grundlegend erörtert, welche Genehmigungsverfahren in Deutschland notwendig sind und welche Informationen sowie Gutachten für die Erstellung der entsprechenden Anträge eingeholt werden müssen. Abschließend werden die im Rahmen von H2IntraDrive umgesetzten Sicherheitsmaßnahmen und deren Notwendigkeit aufgezeigt. In Abbildung 3-7 ist die Titelseite des Leitfadens zu sehen. Der komplette Leitfaden steht als freier Download auf der Homepage des Lehrstuhls fml zur Verfügung.

Abbildung 3-7: Cover des Leitfadens für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen

4 Datenerhebung aus Erprobung und Betrieb

4.1 Vorgehensweise

Für die im Rahmen des Forschungsprojektes geplanten wissenschaftlichen Untersuchungen war es notwendig, Daten aus dem realen Betrieb zu ermitteln. Dabei galt es neben antriebstechnologieabhängigen Kennzahlen wie z.B. Energiebedarfe H_2- und Batterieinfrastruktur auch antriebstechnologieunabhängige Kennzahlen wie z.B. der Energiebedarf der Flurförderzeuge bei unterschiedlichen Anwendungen zu bestimmen. Durch die Datenerhebung konnte zudem ein besseres Verständnis bezüglich der Funktionsweise der Wasserstoff- bzw. Batterietechnologie gewonnen werden. Ferner war die Identifikation von weiteren Einflussfaktoren auf die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen möglich. Neben den notwendigen Daten für die wissenschaftlichen Bewertungen galt es projektbezogene Kennzahlen wie z.B. die Betriebsstunden der Fahrzeuge und den Wasserstoffverbrauch zu bestimmen. Das Vorgehen wurde dabei eng mit den Projektpartnern abgestimmt und richtete sich dabei nach folgenden vier Punkten:

- Identifikation von Kenn- und Messwerten
- Identifikation von Messequipment
- Planung und Durchführung von Messungen
- Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

4.1.1 **Identifikation von Kenn- und Messwerten**

Bevor mit der Datenerhebung aus dem Betrieb der Flurförderzeuge begonnen werden konnte, wurde als erstes festgelegt welche Daten für die späteren Untersuchungen benötigt werden. Ferner wurden zusammen mit den Projektpartnern weitere projektbezogene Kennzahlen wie z.B. die Gesamtmenge an verbrauchtem Wasserstoff identifiziert. In einigen Workshops wurden finale Kenn- und Messwerte zu folgenden Bereichen definiert:

- Einsatzzeiten und Betriebsstunden Flurförderzeuge
- Service und Wartungsausfälle Flurförderzeuge
- Energiebedarfe Flurförderzeuge, Wasserstoffinfrastruktur und Ladegeräte
- Wirkungsgrad Brennstoffzellensysteme bzw. Batterietechnologie
- Wasserstoffverbrauch
- Betankungsmengen

4.1.2 **Messequipment**

Nach der Identifikation der Kenn- und Messwerte erfolgte die Auswahl von geeigneten Messinstrumenten für die Erhebung der notwendigen Daten. Hierfür wurde zusammen mit den Projektpartnern u.a. folgendes Messequipment identifiziert:

- Fluke Power Logger 1735
- In H_2-Infrastruktur integrierte Betankungsmengen-Aufzeichnung
- Permanenter Datenlogger je Gabelstapler
- Temporärer Datenlogger für einen Schlepper

Fluke Power Logger 1735

Für die Messungen des Energieverbrauchs der Wasserstoffinfrastruktur und der Batterieladegeräte wird der Power Logger 1735 der Firma Fluke mit einem 4-Phasen-Ministromzangenset (I5A/50A) und einem 4-Phasen-Spannungsmessleitungssatz verwendet. Mit dem Fluke Power Logger 1735 können Messungen an Systemen mit unterschiedlicher Netztopologie, wie z.B. Dreieck-, Stern- oder einphasiger Schaltung, durchgeführt werden. Abbildung 4-1 zeigt das Vorgehen zur Messung der Leistungsaufnahme des Batterieladegerätes des Gabelstaplers am Schaltschrank bei BMW. Der Verbrauch ist dabei in Stern geschaltet. Aufgrund des begrenzten Datenspeichers des Datenloggers von 4.320 Mittelungsintervallen müssen die Messdaten regelmäßig mit Hilfe eines Notebooks ausgelesen und zwischengespeichert werden. [Flu-2006]

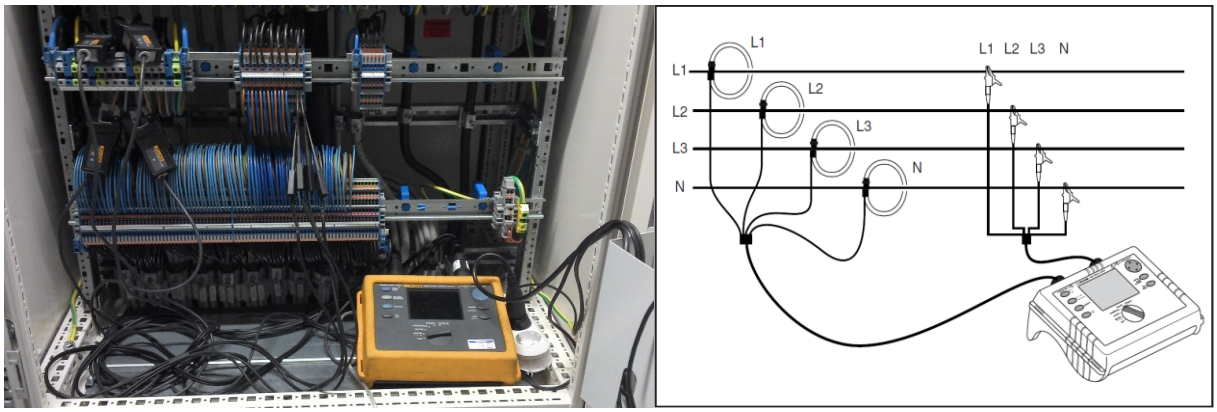

Abbildung 4-1: Installation des Fluke Power Logger am Schaltschrank während der Gabelstaplerladung, (Bildquelle rechts [Flu-2006])

In H_2-Infrastruktur integrierte Betankungsmengen-Aufzeichnung

Für jede Betankung werden durch die Wasserstoffinfrastruktur verschiedene Informationen aufgezeichnet. Dies sind u.a. Uhrzeit, Datum, Flurförderzeug-ID, Startdruck bzw. Enddruck der Betankung sowie Start- und Endtemperatur des Wasserstoffes gemessen am Dispenser. Auf Basis dieser Daten wird vom Hersteller die Betankungsmenge für jeden einzelnen Betankungsvorgang berechnet.

Permanenter Datenlogger je Gabelstapler

Die Aufzeichnung und Übertragung der Messdaten aller Gabelstapler erfolgt über fest installierte Datenlogger. Diese sind mit dem Diagnosestecker des H_2-Gabelstaplers verbunden und es werden u.a. Stromstärke, Stromspannung, Betriebsstunden und Geschwindigkeit des Gabelstaplers über den CAN-Bus ausgelesen. Die eigentliche Messung erfolgt dabei durch standardmäßig installierte Messelektronik im Gabelstapler. Aufgrund der Datenübertragung via GSM werden die Messwerte über 60 Sekunden gemittelt und anschließend übertragen. Der Datenlogger inkl. GSM-Modul ist, wie in Abbildung 4-2 ersichtlich, am Ende des Fahrerdaches angebracht.

Abbildung 4-2: Datenlogger am Gabelstapler

Temporärer Datenlogger für einen Schlepper

Die Aufzeichnung der Messdaten der Schlepper erfolgt hingegen nur durch einen temporär verfügbaren Datenlogger. Grund hierfür ist die fehlende standardmäßig installierte Messelektronik für die Stromstärke im Schlepper. Infolgedessen werden die notwendigen Daten wie Stromspannung, Stromstärke und Geschwindigkeit mit Hilfe eines Notebooks, einer Strommesszange und einem CAN-Interface aufgezeichnet. Das Notebook und Messequipment fährt dabei permanent im Betrieb des Schleppers mit und wird über das Stromnetz des Schleppers mit Energie versorgt. Aufgrund des temporären Einsatzes des Datenloggers werden die Betriebsstunden der Schlepper anhand der Betriebsstundenzähler im Display der Fahrzeuge ermittelt.

4.1.3 Planung und Durchführung von Messungen

Die Planung und Durchführung der Messreihen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Hierbei mussten zum einen die Rahmenbedingungen durch das verwendete Messequipment, dessen Anschlussbedingungen vor Ort sowie das beteiligte Fachpersonal berücksichtigt werden. Infolgedessen wurde der Messzeitraum im ersten Schritt auf 4 Wochen festgelegt. Bei nicht ausreichenden Datenmengen bzw.

Ergebnissen hätte die Messreihe zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden können. Dies war allerdings nicht notwendig. Innerhalb der vier Wochen wurden u.a. folgende Messungen durchgeführt:

- Energiebedarfsmessung H_2-Infrastruktur über zwei Wochen
- Datenaufzeichnung aller H_2-Gabelstapler über drei Wochen
- Datenaufzeichnung von zwei H_2-Schlepper über jeweils eine Woche
- Energiebedarfsmessung Batterieladung Gabelstapler über eine Woche
- Datenaufzeichnung eines batteriebetriebenen Gabelstaplers über eine Woche
- Energiebedarfsmessung Batterieladung Schlepper über eine Woche
- Datenaufzeichnung eines batteriebetriebenen Schleppers über eine Woche

Für die Durchführung der Messungen mit E-Flurförderzeugen wurde jeweils ein H_2-Gabelstapler und ein H_2-Schlepper mit einer Blei-Säure Batterie ausgestattet. Hierfür wurde das Brennstoffzellensystem wie bei einem Batteriewechsel entfernt und die Batterie eingesetzt. Somit wurde das Fahrzeug in seinen ursprünglichen Zustand im Batteriebetrieb zurück versetzt. Hauptgründe hierfür waren zum einen die fehlende Verfügbarkeit von baugleichen batteriebetriebenen Ersatzgeräten im Werk Leipzig sowie eventuell veränderte Fahrzeug- bzw. Performanceparameter bei einem Ersatzgerät.

4.2 Ergebnisse aus dem Bereich Flurförderzeuge

4.2.1 **Betriebsstunden H_2-Flurförderzeuge**

Im Forschungsvorhaben H2IntraDrive waren die H_2-Schlepper von Projektbeginn bis zum 30.10.2015 insgesamt 9.840 Betriebsstunden im Einsatz. Abbildung 4-3 zeigt die Betriebsstunden pro Monat jedes Schleppers sowie den kumulierten Verlauf.

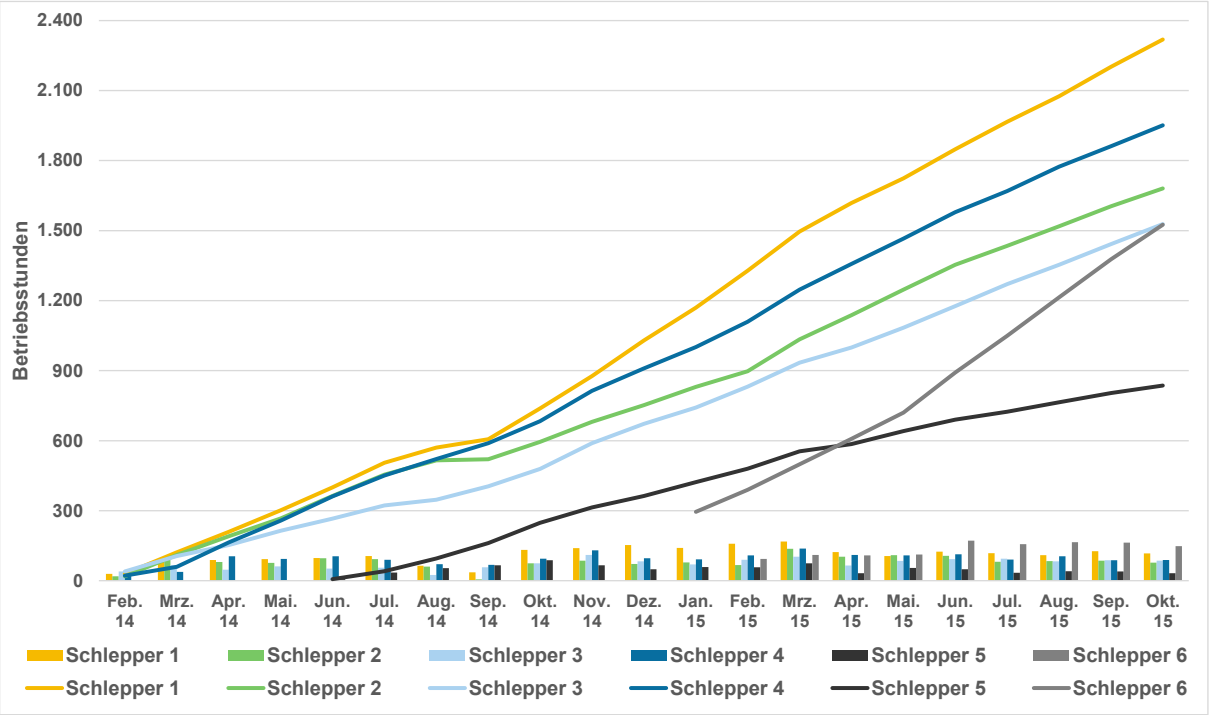

Abbildung 4-3: Kumulierte Betriebsstunden und Verlauf H_2-Schlepper

Die H_2-Gabelstapler waren hingegen 11.690 Stunden im Betrieb. Den detaillierten Verlauf der Stunden zeigt Abbildung 4-4.

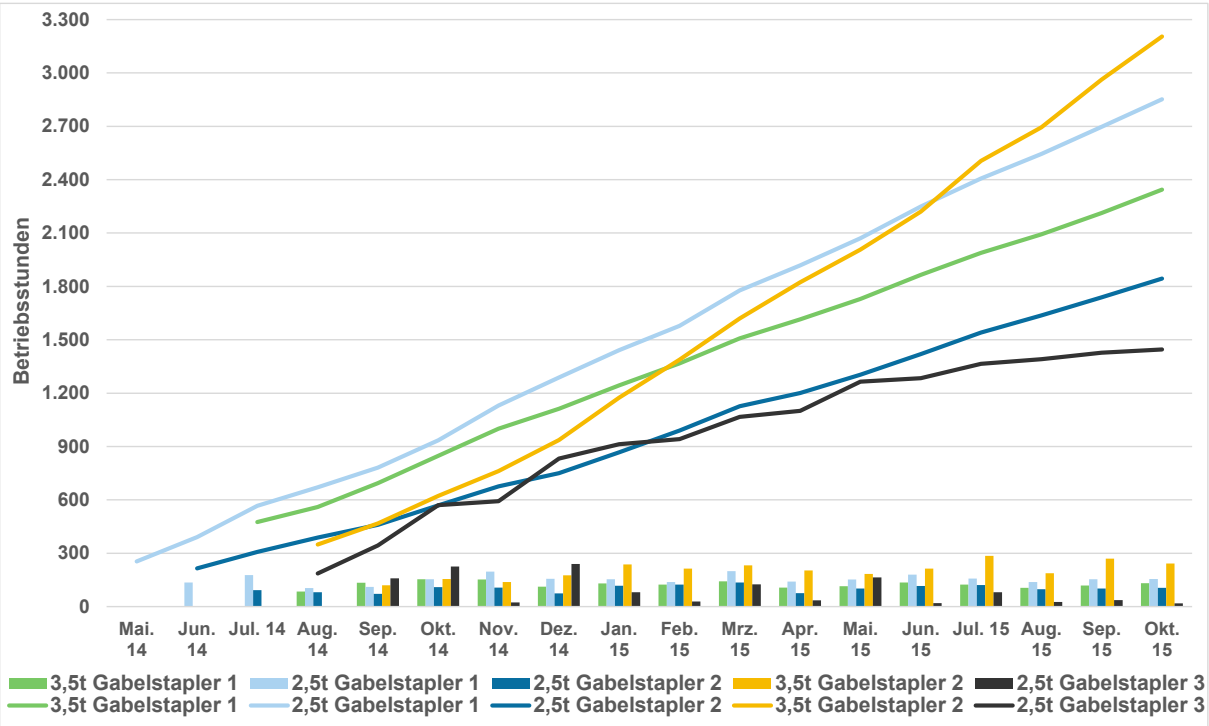

Abbildung 4-4: Kumulierte Betriebsstunden und Verlauf H_2-Gabelstapler

4.2.2 **Service und Wartungsausfälle H_2-Flurförderzeuge**

Die Service- und Wartungsausfälle der H_2-Flurförderzeuge wurden mit Hilfe von Informationen von BMW, dem Fahrzeug-Servicepartner im Werk Leipzig und dem Brennstoffzellenhersteller analysiert. Bis auf zwei fahrzeugseitige Störungen sind alle weiteren vom Brennstoffzellensystem ausgegangen. Abbildung 4-5 zeigt die Anzahl an brennstoffzellenbedingten Störmeldungen der Schlepper. Diese sind in Kalenderwochen (KW) und Fahrzeuge unterteilt. Ferner wird in Störungen, die zu einem Flurförderzeugausfall (Ausfälle FFZ) bzw. zu keinem Flurförderzeugausfall führten, unterschieden. In KW 29 des Jahres 2014 gab es z.B. zwei Störmeldungen des Schleppers 3, wovon lediglich eine zu einem Ausfall des Schleppers führte. Bei der anderen Störung konnte der Schlepper dennoch den Betrieb fortführen. Hauptgründe für die Ausfälle waren Spannungsprobleme, Relaisfehler sowie Steuerungsprobleme. Durch verschiedene Maßnahmen wie z.B. Komponententausch und Softwareupdates konnte die Anzahl an Störungen deutlich reduziert werden. Dies zeigt sich auch bei einer Betrachtung der Mean Time Between Failure (MTBF), die von 233 Betriebsstunden im Jahr 2014 auf 437 Stunden im Jahr 2015 gesteigert werden konnte.

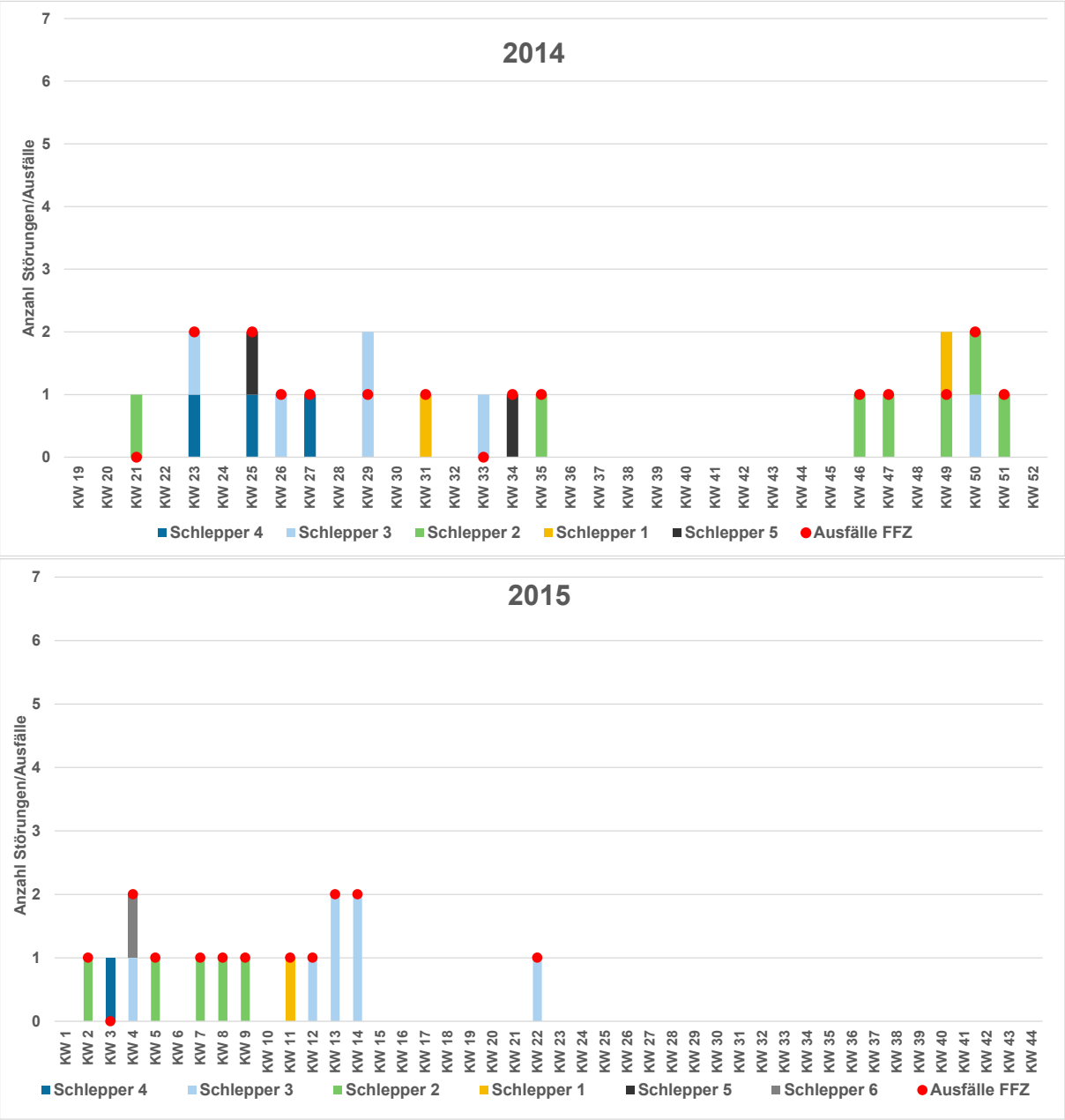

Abbildung 4-5: Anzahl Störmeldungen und Ausfälle Brennstoffzellensysteme H_2-Schlepper

Die Betrachtung der Störungen der Brennstoffzellensysteme der Gabelstapler in Abbildung 4-6 zeigt, dass diese im Vergleich zu den Schleppern deutlich störungsanfälliger sind. Die Systeme der Gabelstapler wurden für die Anwendung in H2IntraDrive komplett neu entwickelt, wohingegen die Schleppersysteme lediglich leicht modifiziert wurden. Die Hauptstörungsursachen der Staplersysteme waren Relaisfehler, kein Luftfluss und Spannungs- sowie Temperaturprobleme. Diese konnten jedoch durch regelmäßige Softwareupdates und Anpassungen von einzelnen Komponenten zum Teil nachhaltig behoben werden. Infolgedessen verbesserte sich die MTBF von 96 Betriebsstunden im Jahr 2014 auf 147 Stunden im Jahr 2015.

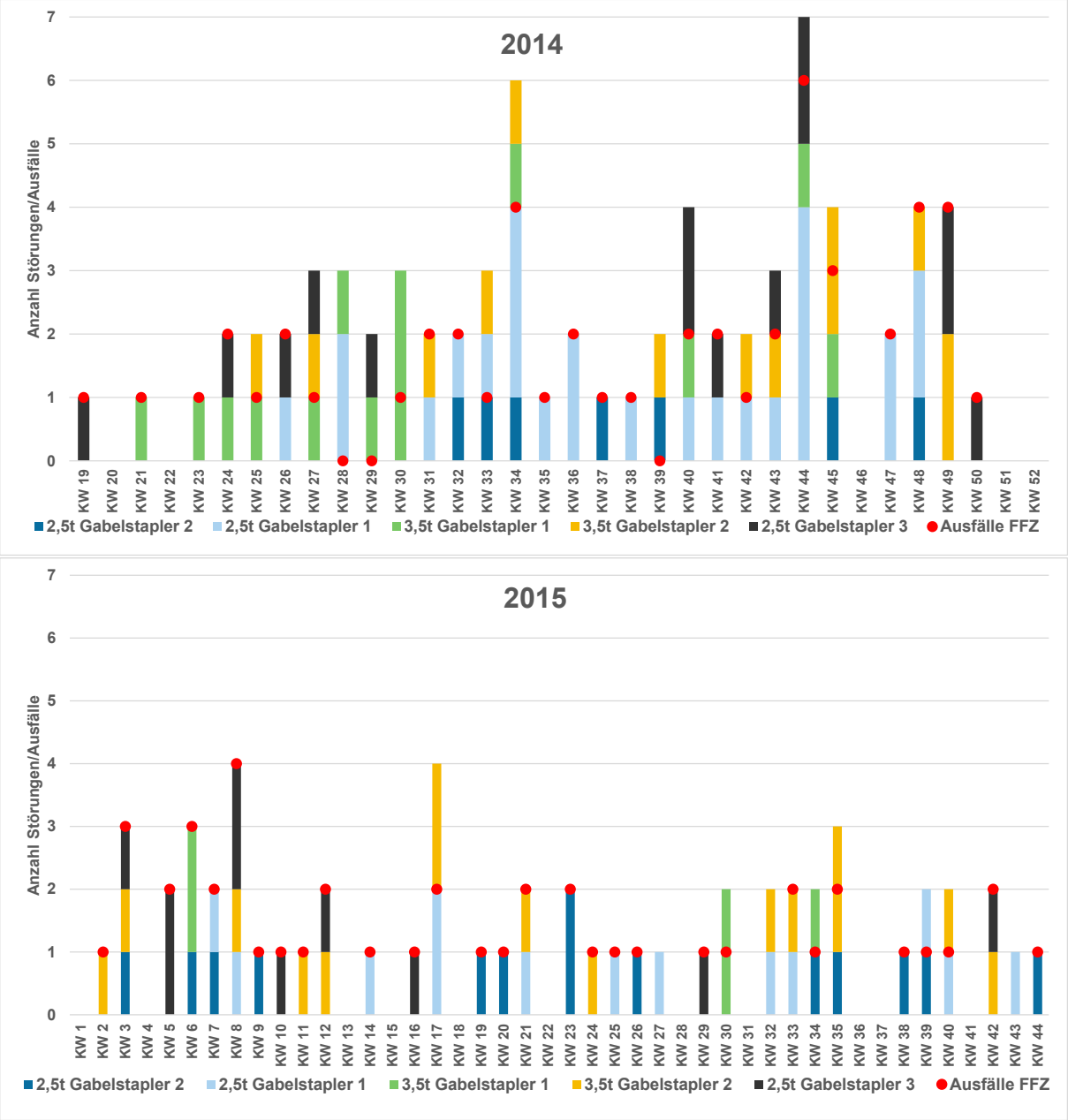

Abbildung 4-6: Anzahl Störmeldungen und Ausfälle Brennstoffzellensysteme H_2-Gabelstapler

4.2.3 Anwendungsspezifische Auswertung und Analyse des Gabelstaplereinsatzes

Für die anwendungsspezifische Auswertung des Gabelstaplereinsatzes wurden drei repräsentative Anwendungen identifiziert. Diese sind der Wareneingang CFK, der Wareneingang Kaufteile und das Blocklager. Im Wareneingang CFK ist ein Gabelstapler vom Typ E35/FC im Einsatz. Zu dessen Aufgaben gehört es, ankommende LKWs zu entladen. Die angelieferte Ware wird für den Waschprozess bereitgestellt und dazu auf den Lagerflächen für ungewaschene CFK-Teile zwischengelagert. Im Wareneingang Kaufteile ist ebenfalls ein Gabelstapler vom Typ E35/FC im Betrieb. Zu dessen

Aufgaben gehört es, ankommende LKWs zu entladen und die Ware eventuell auf Pufferflächen zwischenzulagern sowie die angelieferten Waren auf die Lagerstätten Blocklager und Großmarkt zu verteilen. Im dritten Bereich, dem Blocklager, ist ein Gabelstapler des Typs E25/FC im Einsatz. Zu dessen Aufgaben gehören unter anderem die Beladung der Trolleys mit Halbfertigwaren sowie die Bewirtschaftung des Blocklagers. Ziel der Messungen war u.a. die Analyse des Einflusses von unterschiedlichen Einsatzszenarien auf den energetischen Verbrauch sowie der Einsatzzeiten der Flurförderzeuge.

Analyse der Einsatzzeiten

Bei der Analyse der Einsatzzeiten wird zwischen drei verschiedenen Modi unterschieden. Der Betriebsmodus entspricht dem eigentlichen Betrieb des Gabelstaplers, d.h. das Flurförderzeug fährt oder hebt eine Last. Die Zeit, in der sich das Flurförderzeug im Betriebsmodus befindet, entspricht den effektiven Betriebsstunden und wird durch den Betriebsstundenzähler festgehalten. Der Standbymodus entspricht hingegen der Zeit, in der der Schlüssel des Gabelstaplers an ist und weder das Flurförderzeug selbst noch die Last bewegt wird. Als dritter und letzter Betriebsmodus gilt der Offlinemodus. In dieser Zeit ist das Flurförderzeug komplett ausgeschaltet. Abbildung 4-7 zeigt die Aufteilung der Betriebszeiten auf Betriebs-, Standby- und Offlinemodus während des Messzeitraums bezogen auf die Bruttoarbeitszeit. Die Ergebnisse zeigen, dass der Anteil des Offlinemodus bei den Wareneingangsanwendungen jeweils bei 50 Prozent liegt. Im Lagerbereich ist dieser jedoch mit 59 Prozent leicht höher.

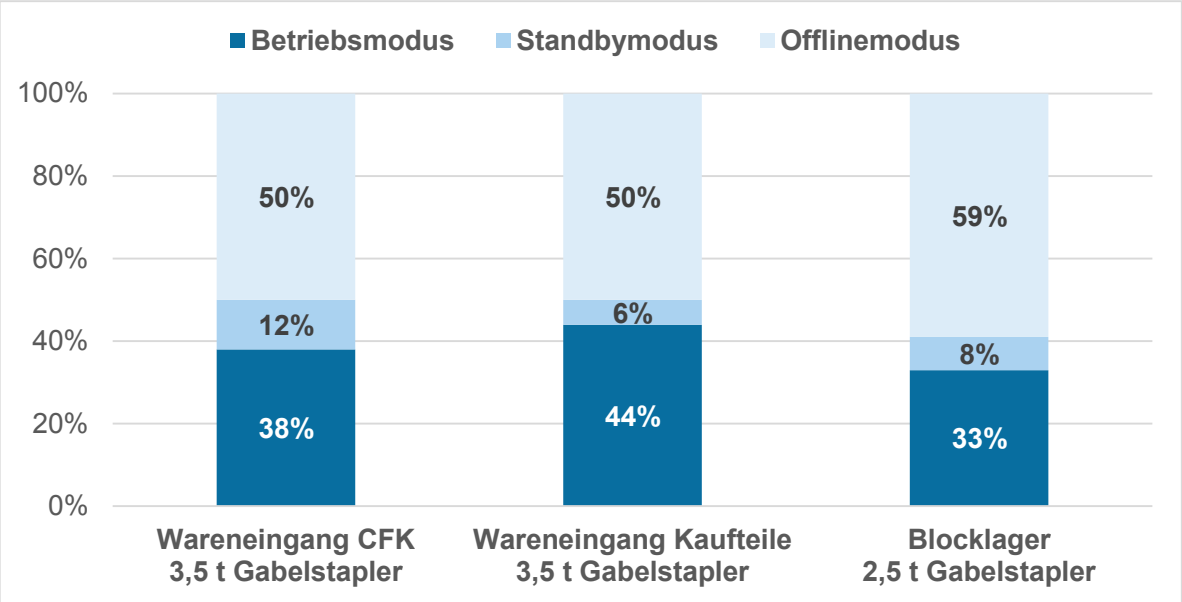

Abbildung 4-7: Aufteilung der Betriebszeiten nach Gabelstapleranwendungen

Eine detaillierte Gegenüberstellung der Betriebs- und Standbyzeiten ist in Abbildung 4-8 zu sehen. Der Vergleich zeigt, dass sich der Gabelstapler bei dem Einsatz im Wareneingang CFK zu 24 Prozent im Standbymodus und zu 76 Prozent im Betriebsmodus befindet. Im Vergleich dazu sind im Blocklager die Standbyzeiten mit 20 Prozent etwas geringer und die Betriebszeiten etwas höher (80 Prozent). Im Wareneingang für Kaufteile befindet sich der Gabelstapler nur zu 12 Prozent im Standbymodus und ist zu 88 Prozent in Benutzung.

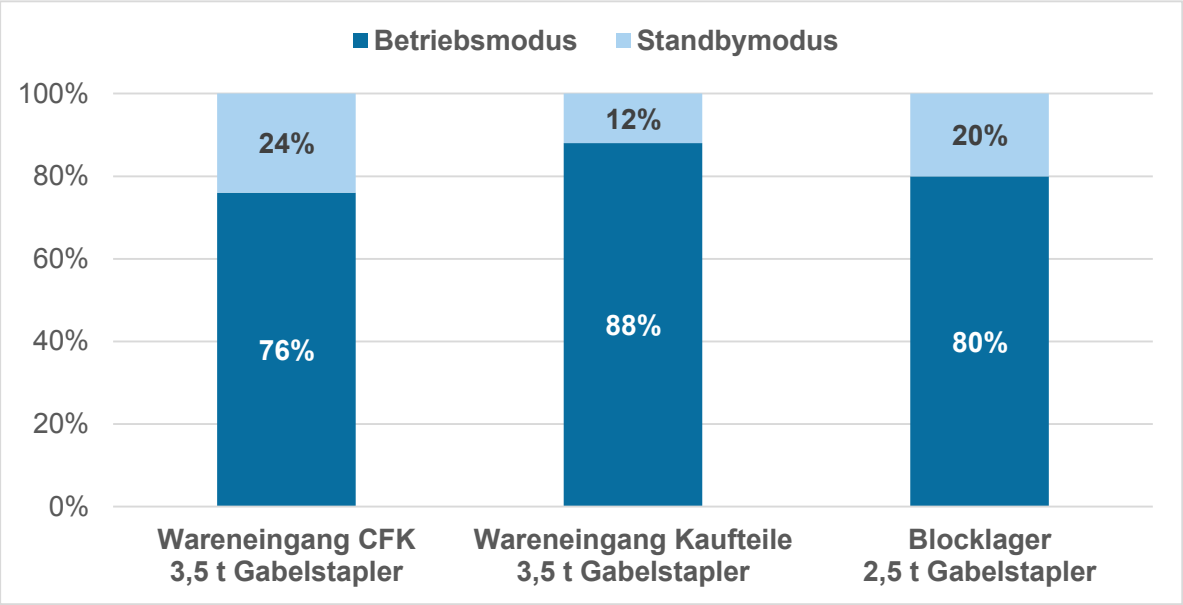

Abbildung 4-8: Verhältnis von Betriebs- zu Standbymodus bei Gabelstapleranwendungen

Analyse der Leistungsverläufe sowie Streckenanteile

Bei der Analyse der Leistungsverläufe und Streckenanteile wird im Folgenden beispielhaft ein Zeitfenster von vier Stunden betrachtet. Dies entspricht ca. einer halben Schicht. Abbildung 4-9 zeigt von oben nach unten den Verlauf der Gesamtleistung der Gabelstapler für die Anwendungen Wareneingang CFK, Wareneingang Kaufteile sowie Blocklager. Die Gesamtleistung ist dabei in Hubleistung und restliche Leistung bzw. Leistung ohne Hubleistung unterteilt. Ein Ausschlag der Leistung ohne Hubleistung in negative Richtung deutet darauf hin, dass innerhalb des Mittelungsintervalls mehr Energie zurückgewonnen als verbraucht wurde. Bei einer näheren Betrachtung wird ersichtlich, dass der Anteil an Hubleistung im Blocklager größer als in den Wareneingangsanwendungen ist. Analog zu den in Abbildung 4-9 dargestellten Verläufen der Gesamtleistung sind in Abbildung 4-10 die Streckenanteile dargestellt. Die Gesamtstrecke je Mittelungsintervall wird dabei in einen gefahrenen Anteil in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung aufgeteilt. Des Weiteren wird die kumulierte Strecke dargestellt, die innerhalb des Zeitfensters insgesamt zurückgelegt worden ist. Hierbei wird ersichtlich, dass der Anteil an Rückwärtsfahren bzw. Strecke im Blocklager am geringsten ist.

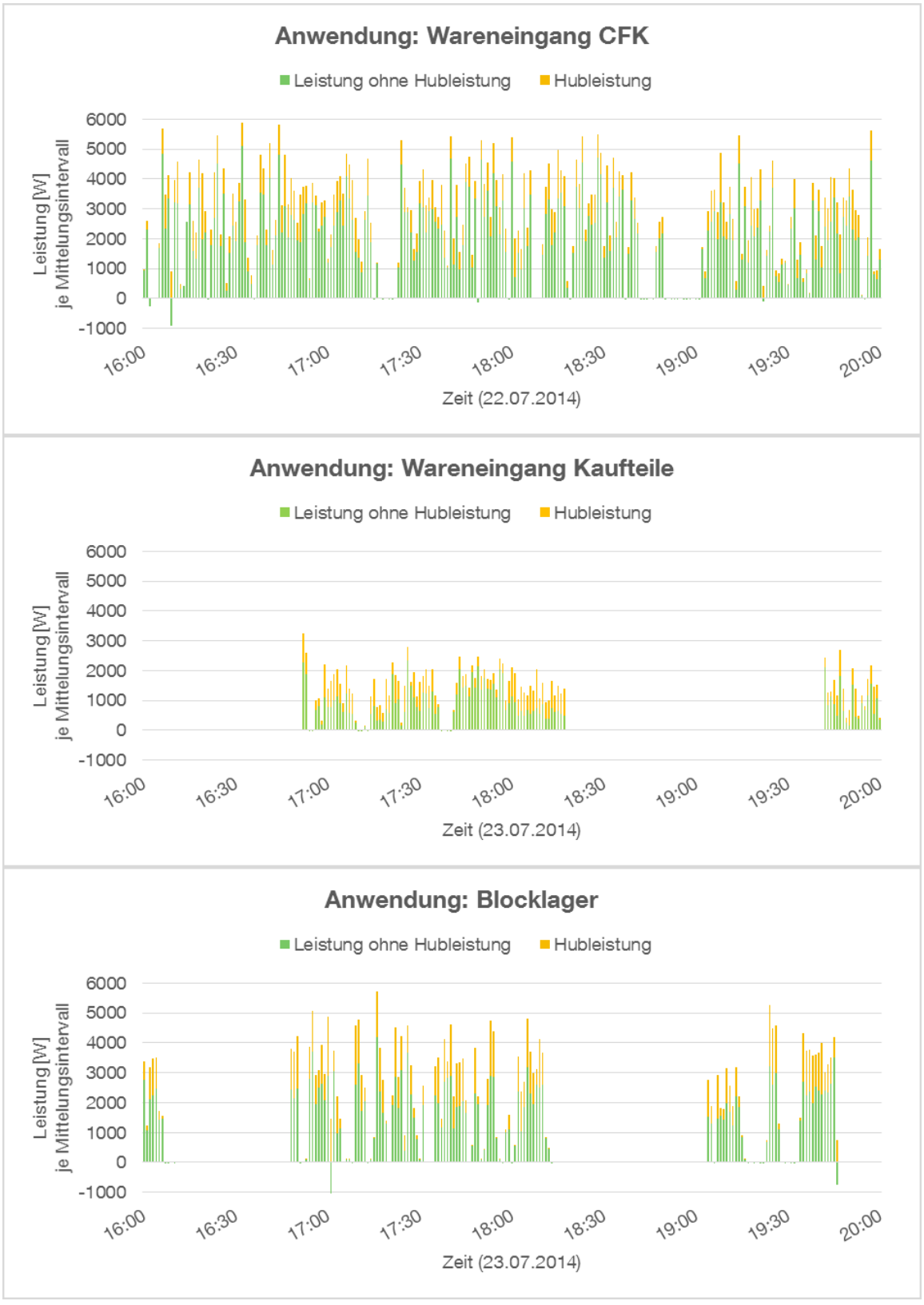

Abbildung 4-9: Verlauf der Leistungsaufnahme nach Gabelstapleranwendung

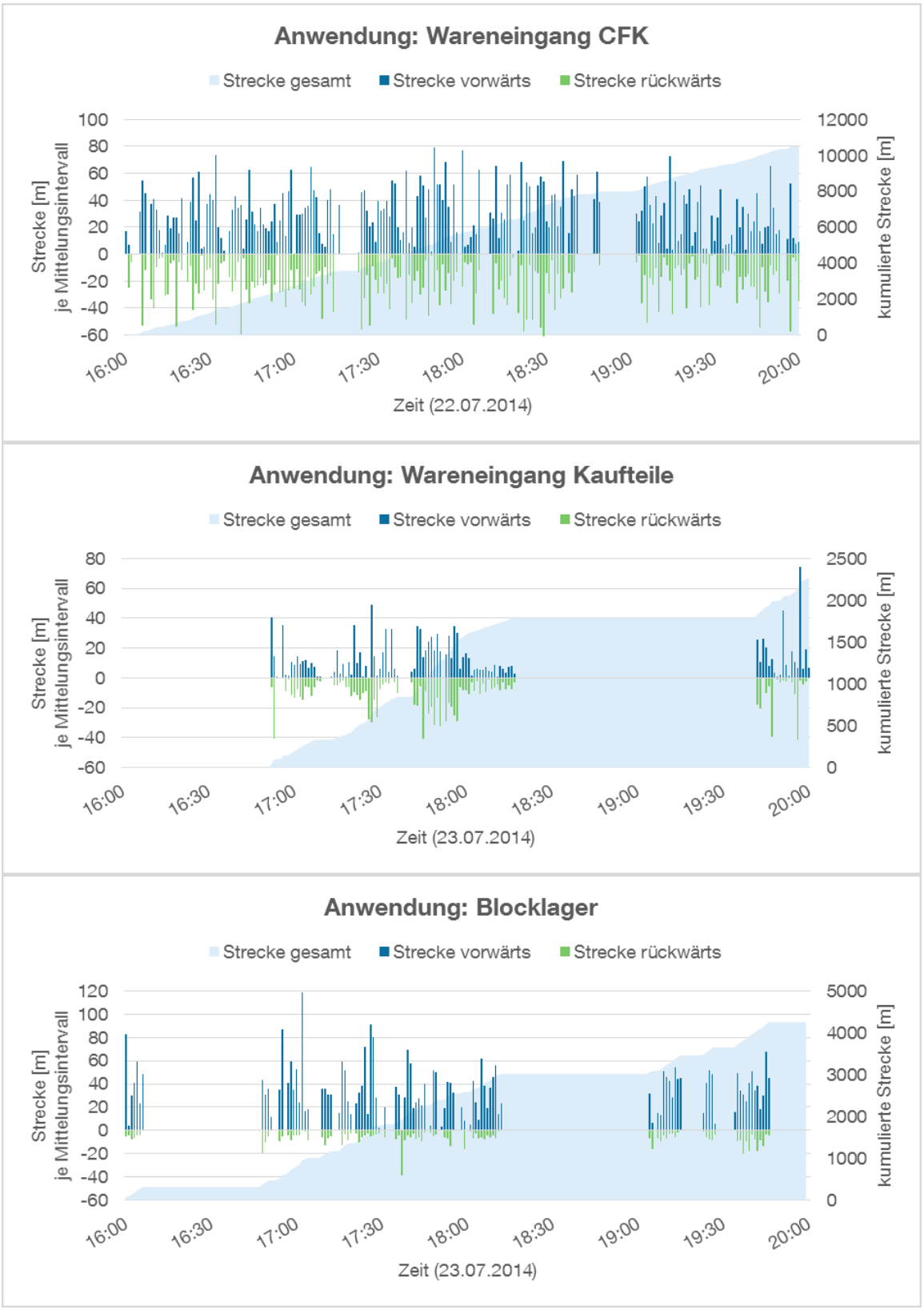

Abbildung 4-10: Streckenanteile nach Gabelstapleranwendung

Anwendungsspezifische Kennwerte

Tabelle 4-1 zeigt anwendungsspezifische Kennwerte der drei Gabelstapleranwendungen. Die Durchschnittswerte der Leistungsaufnahme lassen darauf schließen, dass die Belastung des Gabelstaplers im Wareneingang CFK höher ist als bei den beiden anderen Anwendungen. Die durchschnittliche Hubleistung dagegen zeigt, dass bei einem Einsatz im Blocklager mehr Hubarbeit geleistet wird als es bei einem Einsatz im Wareneingang Kaufteile bzw. CFK der Fall ist. Zu den Faktoren, die einen Einfluss auf den durchschnittlichen Hubleistungswert haben, zählen u.a. die Auslastung je Mittelungsintervall, die zu erreichende Hubhöhe und das Gewicht des Behälters. Des Weiteren ist die durchschnittliche Zugkraft je Mittelungsintervall bei der Anwendung im Blocklager am größten. Auch hier sind die beeinflussenden Faktoren u.a. die Auslastung je Mittelungsintervall, die zurückzulegende Strecke sowie das zu transportierende Gewicht. Die Streckenangaben werden auf die Betriebszeit bezogen. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellensysteme konnte im Messzeitraum nicht valide bestimmt werden. Gründe dafür waren zum einen die im Brennstoffzellensystem verbaute Li-Ionen Batterie bzw. die fehlenden Informationen bzgl. Ladestand zu Beginn und Ende der Messreihe und zum anderen das Betankungsprotokoll. Die darin angewandte Berechnung der Betankungsmengen ist aufgrund fehlender Parameter, wie z.B. die Endtemperatur des Wasserstoffes im Tank nach der Betankung, zu ungenau. Ein weiterer Unterschied, der jedoch antriebstechnologieabhängig ist, liegt in der unterschiedlichen durchschnittlichen Spannung der Batterie und des Brennstoffzellensystems im Betrieb. Die Batterie liegt dabei ein Volt unter dem Brennstoffzellensystem.

Tabelle 4-1: Anwendungsspezifische Kennwerte der Gabelstapler

	Wareneingang CFK 3,5 t Gabelstapler	Wareneingang Kaufteile 3,5 t Gabelstapler	Blocklager 2,5 t Gabelstapler
Min. / Ø / Max. Strom [A]	-3,0 / 35,0 / 75,0	-3,0 / 24,2 / 61,0	-1,0 / 29,7 / 93,0
Ø Spannung Batterie[V]	82,4		
Ø Spannung Brennstoffzellens. [V]	83,4		
Ø / Max. Leistungsaufnahme [W]	2.916 / 6.225	1.991 / 4.979	2.469 / 7.382
Ø / Max. Hubleistung [W]	610 / 2.462	649 / 1.906	725 / 2.278
Min. / Ø / Max. Zugkraft [N]	-2.095 / 105 / 2.285	-1.903 / 244 / 3.296	-1.335 / 417 / 8.149
Ø / Max. Geschwindigkeit [km/h]	2,9 / 7,9	1,6 / 7,4	2,3 / 7,8
Ø Strecke [m]/ Betriebsstunde	2.914	1.620	2.057
Wirkungsgrad Brennstoffzelle	N/A	N/A	N/A

4.2.4 Anwendungsspezifische Auswertung und Analyse des Schleppereinsatzes

Analog zur anwendungsspezifischen Auswertung des Gabelstaplereinsatzes wurden für den Schlepperbetrieb drei verschiedene Routen ausgewählt. Auf der KLT-Route werden Kleinladungsträger (KLT) transportiert. Insgesamt können bis zu 36 Behälter pro Route transportiert werden, die Routenlänge beträgt 1.155 Meter. Auf der 1.014 Meter langen Block-Route werden hingegen bis zu maximal 3 Großladungsträger (GLT) bzw. Trolleys transportiert. Die dritte Route ist die Hybrid-Route. Auf ihr werden sowohl GLTs als auch KLTs transportiert. Die Verteilung ist dabei bedarfsabhängig.

Analyse der Einsatzzeiten

Die Aufteilung der Betriebszeiten auf Betriebs-, Standby- und Offlinemodus während des Messzeitraums ist in Abbildung 4-11 grafisch dargestellt. Mit 35 Prozent Betriebszeit weist der Routenzugschlepper auf der Hybrid-Route die höchste Fahraktivität auf, gefolgt von der Block-Route mit 30 Prozent und der KLT-Route mit 18 Prozent. Die Standzeiten sind bei der KLT-Route mit 60 Prozent am höchsten und auf der Block-Route mit 33 Prozent am geringsten.

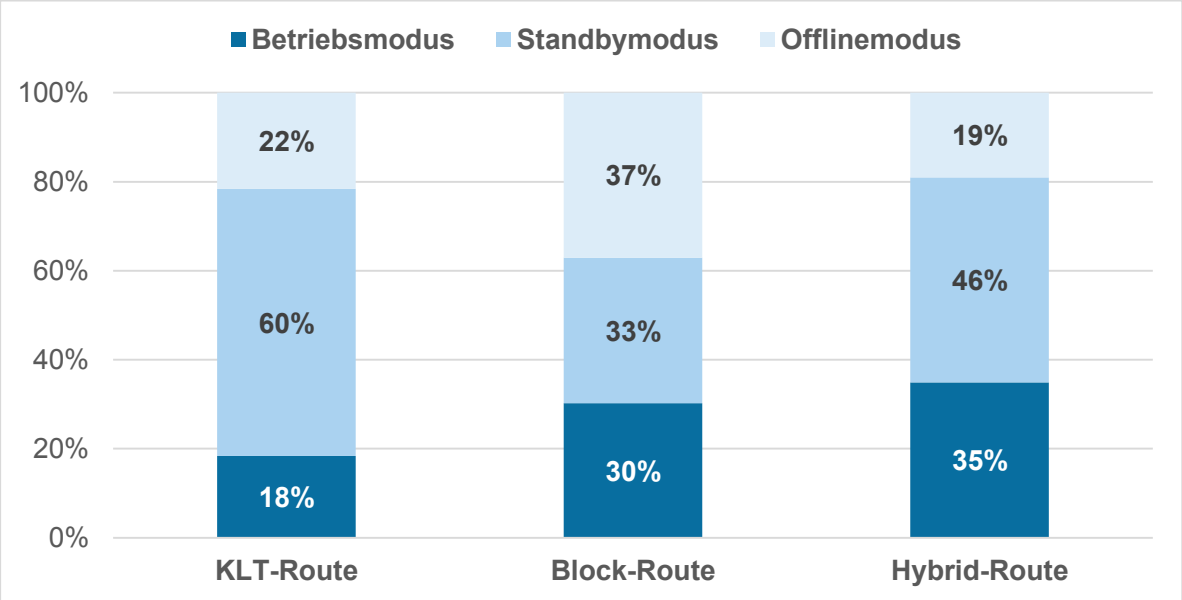

Abbildung 4-11: Aufteilung der Betriebszeiten nach Schlepperanwendungen

Abbildung 4-12 zeigt das relative Verhältnis der Betriebs- zu Standbyzeit für die Routenzugschlepperanwendungen. Bei dem Einsatz auf der KLT-Route befindet sich der Routenzugschlepper zu 24 Prozent im Betriebs- und zu 76 Prozent im Standbymodus. Der hohe Standbyanteil lässt sich durch die hohe Anzahl an ein- und auszulagernden Behältern erklären. Auf der Block-Route ist das Verhältnis von Betriebs- und Standbyzeit nahezu ausgeglichen. Dies lässt sich durch den geringeren Handhabungsaufwand beim Ein- bzw. Auslagern des Transportguts erklären. Auf der Hybrid-Route dagegen

werden sowohl Klein- als auch Großladungsträger transportiert. Somit ist es plausibel, dass das Verhältnis von Betriebs- (43 Prozent) zu Standbyzeit (57 Prozent) zwischen den Verhältniswerten der KLT- und Block-Route liegt.

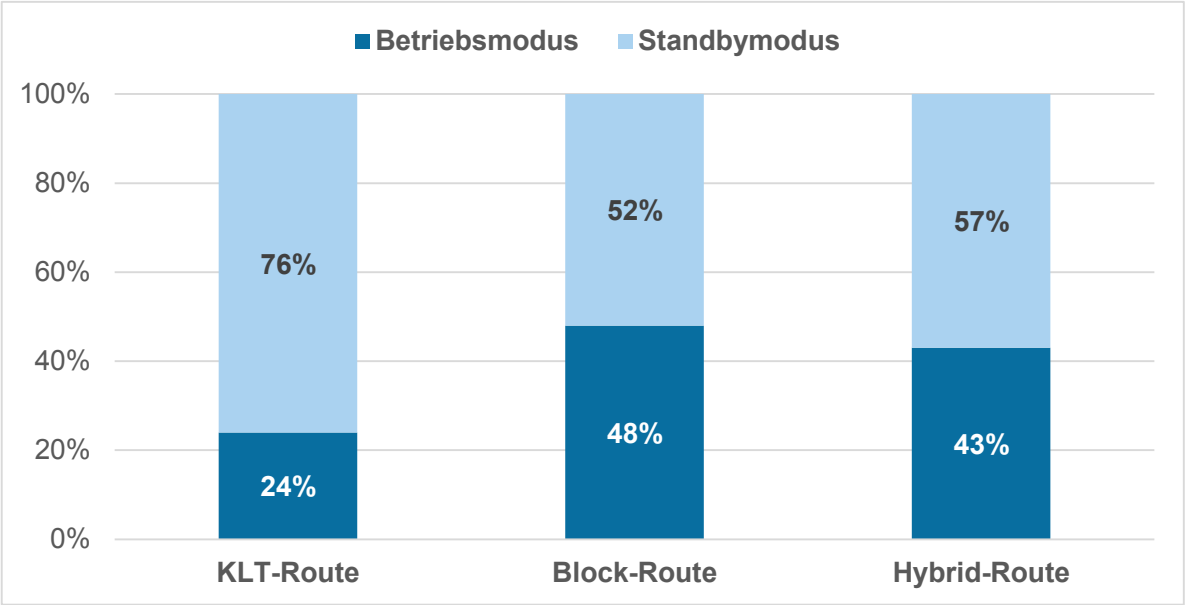

Abbildung 4-12: Verhältnis von Betriebs- zu Standbymodus bei Schlepperanwendungen

Analyse der Leistungsverläufe sowie Streckenanteile

Ein Beispiel für den Verlauf der Leistung, das Geschwindigkeitsprofil und die kumulierte Strecke während des Einsatzes eines Routenzugschleppers auf der Hybrid-Route ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

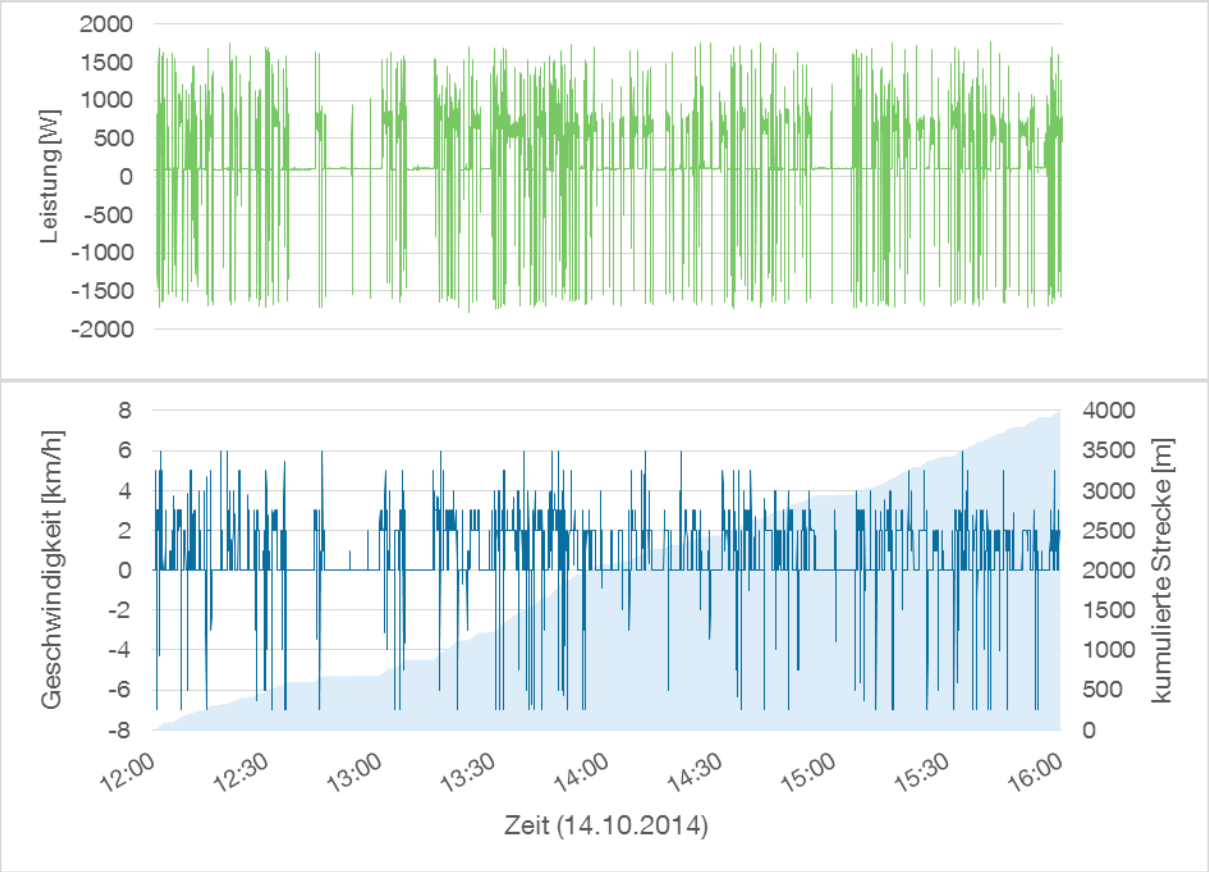

Abbildung 4-13: Leistungsverlauf, Geschwindigkeitsprofile und zurückgelegte Strecke auf der Hybrid-Route

Anwendungsspezifische Kennwerte

Tabelle 4-2 zeigt anwendungsspezifische Kennwerte der drei Schlepperanwendungen. Beim Einsatz des Schleppers auf der KLT-Route ist die Leistungsaufnahme im Betrieb am höchsten, beim Einsatz auf der Hybrid-Route am niedersten. Die minimalen und maximalen Stromwerte haben über alle Anwendungen hinweg jeweils den gleichen Wert. Ein Vergleich der Geschwindigkeiten sowie der Strecke pro Betriebsstunde zeigt, dass auf der Hybrid-Route durchschnittlich am langsamsten gefahren wird. Am meisten Behälter werden hingen auf der KLT-Route bewegt. Ähnlich wie bei den Gabelstaplermessungen konnten für die Brennstoffzellensysteme der Schlepper keine Wirkungsgrade mit Hilfe des verwendeten Messequipments bestimmt werden. Ferner wird auch hier die unterschiedliche Spannung der beiden Antriebstechnologien ersichtlich, wobei die durchschnittliche Spannung des Brennstoffzellensystems 2,5 Volt über der der Batterie liegt.

Tabelle 4-2: Anwendungsspezifische Kennwerte der Schlepper

	KLT-Route	Block-Route	Hybrid-Route
Ø / Max. Leistungsaufnahme [W]	670 / 1.808	607 / 1.797	580 / 1.807
Ø Spannung Batterie[V]	24,2		
Ø Spannung Brennstoffzellens. [V]	26,7		
Min. / Ø / Max. Strom im Betrieb [A]	-65,0 / 27,9 / 65,5	-65,0 / 24,0 / 65,5	-65,0 / 22,2 / 65,5
Ø / Max. Geschwindigkeit [km/h]	5,2 / 6,0	5,1 / 6,0	2,4 / 7,0
Ø Strecke [m] / Betriebsstunde	5.222	5.089	2.304
Ø Bewegte Behälter pro Betriebsstunde	260	62	Keine Daten
Wirkungsgrad Brennstoffzelle	N/A	N/A	N/A

4.2.5 **Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse**

Durch die detaillierten Betrachtungen von verschiedenen Flurförderzeuganwendungen konnte aufgezeigt werden, dass Einsatzzeiten, Leistungsverläufe sowie die Leistungsaufnahme deutlich anwendungsbezogen sind. Ferner kann der Betrieb der Flurförderzeuge im BMW i Karosseriebau aufgrund der ermittelten Einsatzzeiten sowie den Leistungsaufnahmen zu den weniger energieintensiven Anwendungen gezählt werden. Dies zeigt auch der Vergleich mit dem Energieverbrauch, der im Rahmen des VDI-Zyklus ermittelt wird. Beim Schlepper ist dieser mit 1,16 kWh/h fast doppelt so hoch und beim 3,5 Tonnen Gabelstapler mit 9,8 kWh/h sogar drei- bzw. fünfmal so hoch wie im H2IntraDrive-Betrieb [Lin-2015a, Lin-2015b].

Bei der Untersuchung der Störmeldungen konnten hingegen Verbesserungspotenziale identifiziert und zum Teil bereits umgesetzt werden. Reparaturen der Flurförderzeuge erfolgten dabei zeitnah und meist außerhalb der Betriebszeit in den Fertigungspausen. Infolgedessen war die Materialbereitstellung durch H_2-Flurförderzeuge für den CFK-Karosseriebau zu jeder Zeit garantiert.

4.3 Ergebnisse aus dem Bereich Infrastruktur

4.3.1 **Wasserstoffverbrauch**

Der Wasserstoffbedarf bzw. -verbrauch des einzelnen Flurförderzeuges pro Betriebsstunde „$n_{H2,Bh}$“ ist abhängig vom energetischen Bedarf des Flurförderzeuges „$E_{FFZ,Bh}$“ sowie vom auf den Heizwert bzw. Lower Heating Value (LHV) „H_i“ bezogenen Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems „η_{Bz}“. Der LHV von Wasserstoff beträgt 33,33

kWh/kg und der darauf bezogene Wirkungsgrad der eingesetzten Brennstoffzellensysteme laut Herstellerangaben 45 Prozent.

$$n_{H2,Bh} = \frac{E_{FFZ,Bh}}{H_i \times \eta_{Bz}} \qquad (4\text{-}1)$$

Tabelle 4-3 zeigt den durchschnittlichen Wasserstoffbedarf der H_2-Flurförderzeuge je Anwendung in H2IntraDrive sowie den Bedarf, der sich aus dem VDI-Zyklus mathematisch ergibt.

Tabelle 4-3: Ø Wasserstoffbedarfe pro Betriebsstunde H_2-Flurförderzeuge

	Ø Energiebedarf [kWh/Bh]	Ø Wasserstoffbedarf [kg/Bh]
3,5 t Gabelstapler Wareneingang CFK	2,916	0,19
3,5 t Gabelstapler Wareneingang Kaufteile	1,991	0,13
3,5 t Gabelstapler VDI-Zyklus	9,8	0,65
2,5 t Gabelstapler Blocklager	2,469	0,16
2,5 t Gabelstapler VDI-Zyklus	7,3	0,49
Schlepper KLT-Route	0,67	0,045
Schlepper Block-Route	0,607	0,040
Schlepper Hybrid-Route	0,580	0,039
Schlepper VDI-Zyklus	1,16	0,08

Insgesamt wurden im Berichtszeitraum 4.728 kg grün zertifizierter Wasserstoff angeliefert und auch verbraucht. Den zeitlichen Verlauf der Wasserstoffmenge zeigt Abbildung 4-14.

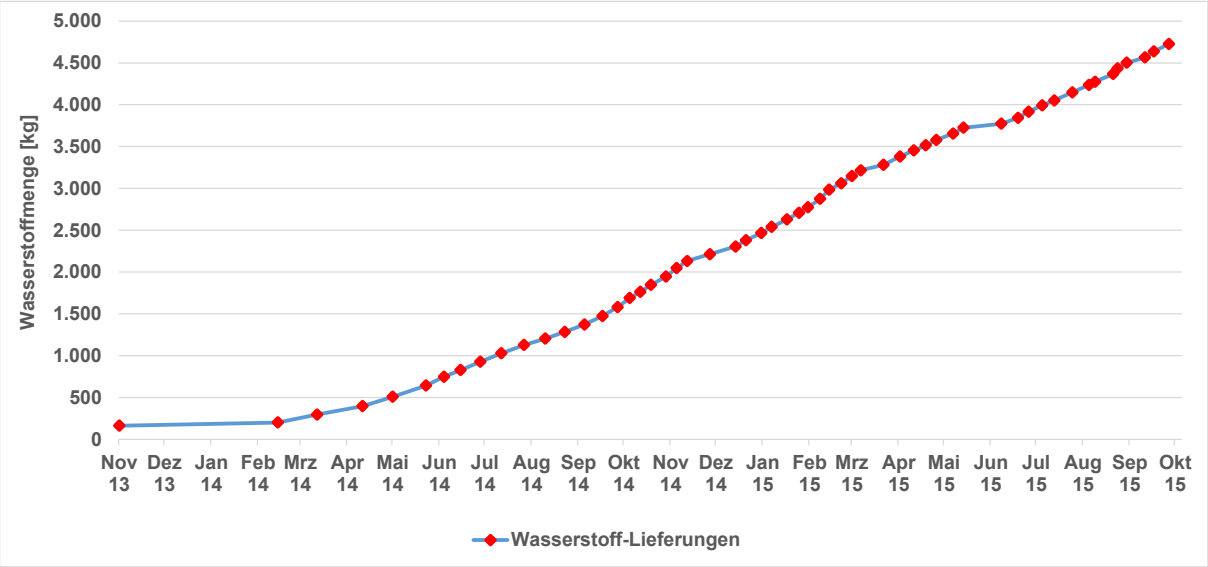

Abbildung 4-14: Verlauf Wasserstoffanlieferungen H2IntraDrive

4.3.2 **Durchschnittliche Betankungsmengen**

Für die Bestimmung der durchschnittlichen Betankungsmenge der Schlepper sowie Gabelstapler wurden jeweils 151 Betankungen ausgewertet. Abbildung 4-15 zeigt den Verlauf der betankten Menge. Die durchschnittliche Betankungsmenge der Schlepper beträgt 0,56 kg und die der Gabelstapler 1,37 kg. Dies entspricht jeweils 76 Prozent des maximalen Tankinhaltes.

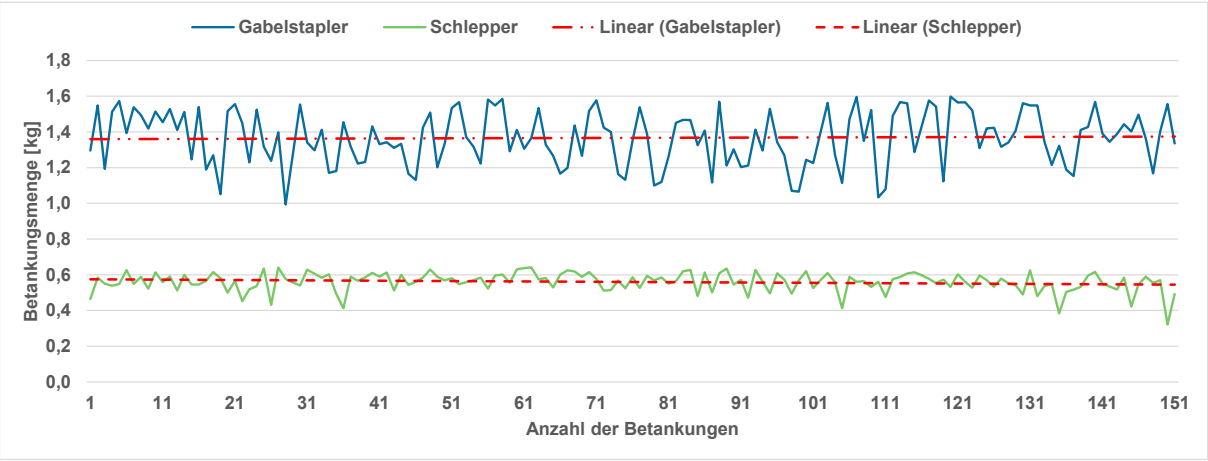

Abbildung 4-15: Durchschnittliche Wasserstoff-Betankungsmengen nach Flurförderzeugtyp

Die durchschnittliche Nutzung von 76 Prozent des maximalen Tankinhaltes hat zwei Ursachen. Aufgrund der kurzen Betankungszeiten nutzen die Fahrer kurze Pausen innerhalb ihrer Prozessabläufe für die Betankung. Infolgedessen wird die Betankung nicht mehr dann durchgeführt, wenn es wie beim Batteriewechsel die Antriebstechnologie vorgibt, sondern wenn gerade Zeit ist. Der zweite Grund ist physikalisch bzw.

aufgrund der Funktionsweise der Wasserstoffinfrastruktur bedingt. Bei der H2IntraDrive-Anwendung wird eine Zieldruckbetankung durchgeführt, d.h. die Betankung erfolgt bis zu einem vorher fest definierten Wasserstoffdruck im Tank des Flurförderzeuges. Durch die innere Reibung bzw. Viskosität des Wasserstoffes steigt jedoch die Wasserstoff- und auch Tanktemperatur während der Betankung. Infolgedessen ergibt sich die eigentliche betankte Menge an Wasserstoff aus dem realen Gasgesetz nach

$$p \times V = Z \times n \times R \times T \tag{4-2}$$

wobei „p“ der Druck, „V“ das Volumen, „Z“ der Kompressionsfaktor, „n“ die Stoffmenge, „R“ die universelle Gaskonstante und „T“ die absolute Temperatur ist [Her-2012, S. 232f.]. Nach Umformung und Auflösen des realen Gasgesetzes lässt sich die Masse „m“ nach

$$m = M \times \frac{p_{273,15K} \times V}{T_{273,15K} \times Z \times R} \tag{4-3}$$

berechnen, wobei „M“ die molare Masse von Wasserstoff, „$p_{273,15\mathrm{K}}$“ der Druck und „$T_{273,15\mathrm{K}}$“ die absolute Temperatur bei 273,15 Kelvin ist. Für die Umrechnung des Ausgangsdrucks auf den äquivalenten Druck bei 273,15 Kelvin „$p_{273,15\mathrm{K}}$“ kann eine isochore Zustandsänderung des Gases angenommen werden. Die Umrechnung ist nach

$$p_{273,15K} = p_A \frac{273,15K}{T_A} \tag{4-4}$$

durchzuführen, wobei „p_{A}“ dem Ausgangsdruck und „T_{A}“ der Ausgangstemperatur entspricht [Wei-2013, S. 70]. Der Kompressionsfaktor kann Tabelle 4-4 entnommen werden.

Tabelle 4-4: Kompressionsfaktor „Z“ von Wasserstoff bei 273,15 K, [Lud-2014]

„p“ [bar]	„Z“
1,013	1
50	1,032
100	1,065
150	1,098
200	1,132
250	1,166
300	1,201
350	1,236
400	1,272
500	1,344
600	1,416
700	1,489
800	1,56
900	1,632
1.000	1,702

Die Auswirkungen des Temperaturanstieges im Wasserstofftank können anhand des Verlaufes von Tankdruck und -temperatur eines Schleppers in Abbildung 4-16 anschaulich aufgezeigt werden. Bei der ersten Betankung (0,173 kg Wasserstoff) ist ein deutlicher Anstieg der Tanktemperatur auf ca. 55 °Celsius zu erkennen. Nach Abschluss des Betankungsvorgangs passt sich die Tank- bzw. Wasserstofftemperatur langsam der Umgebungstemperatur an. Somit fällt allein durch die Temperaturanpassung der Tankdruck von 350 bar auf ca. 330 bar bei ca. 35 °Celsius. Dies entspricht einer Wasserstoffmenge von 0,66 kg. Die maximal mögliche Betankungsmenge bei 350 bar und 15 °Celsius entspricht jedoch 0,73 kg und kann infolgedessen mit einer Zieldruckbetankung auf 350 bar nie erreicht werden. Dies ist nur bei einem gezielten Überfüllen des Wasserstofftanks möglich, wofür wiederum ein Austausch von Informationen über Tankdruck und -temperatur zwischen Brennstoffzellensystem und Infrastruktur benötigt wird. Infolgedessen ist ein sicheres kontrolliertes „Überfüllen“ des Tanks ohne Überschreitung der maximal zulässigen Tanktemperatur möglich.

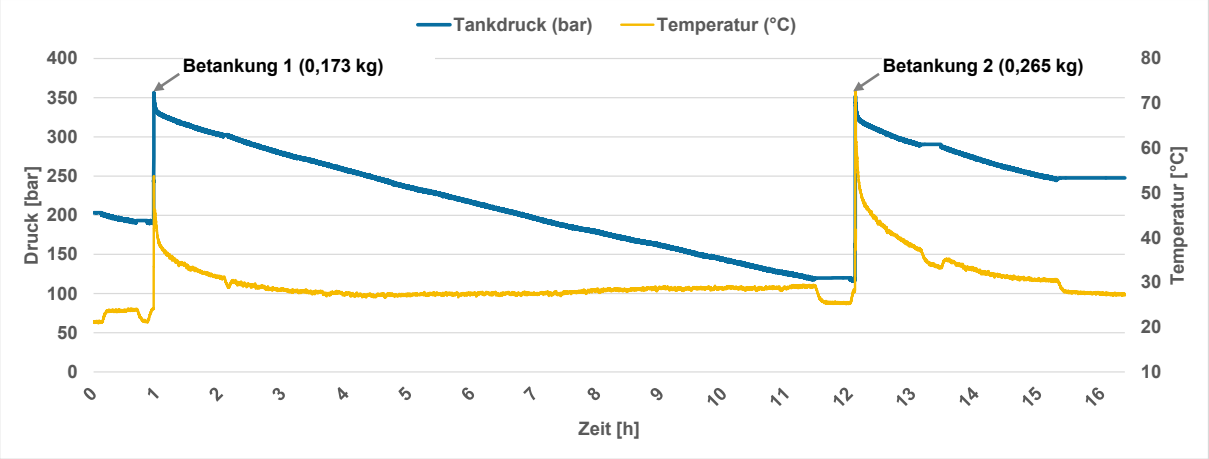

Abbildung 4-16: Verlauf von Tankdruck und Tanktemperatur Schlepper

4.3.3 **Energieverbrauch**

Wasserstoffinfrastruktur

Ziel der Energiebedarfsmessungen bei der H_2-Infrastruktur war die Bestimmung der Leistungsaufnahme, Laufzeiten des Verdichters sowie der notwendigen Energie, um ein Kilogramm Wasserstoff zu verdichten. Die Laufzeit des Verdichters entspricht dabei dem Verdichter-Betrieb. Hierfür wurden neben der Langzeitmessung über zwei Wochen (Mittelungszeit der Messwerte: 30 Sekunden) auch Detailmessungen mit einer deutlich geringeren Mittelungszeit von 0,5 Sekunden durchgeführt. Ein beispielhafter Verlauf der Leistungsaufnahme und des Energieverbrauchs der H_2-Infrastruktur über einen ganzen Tag ist in Abbildung 4-17 dargestellt. In diesem Zeitraum wurden während 9 Betankungen insgesamt 8,5 kg Wasserstoff betankt. Dabei ist der Verdichter 12 Mal angesprungen und war 1,15 Stunden im Betrieb. In diesem Zeitraum wurden 9 Betankungen durchgeführt. Der Energieverbrauch beläuft sich über den Tag verteilt im Verdichter-Betrieb auf 15,82 Kilowattstunden und im Standby-Betrieb auf 15,48 Kilowattstunden.

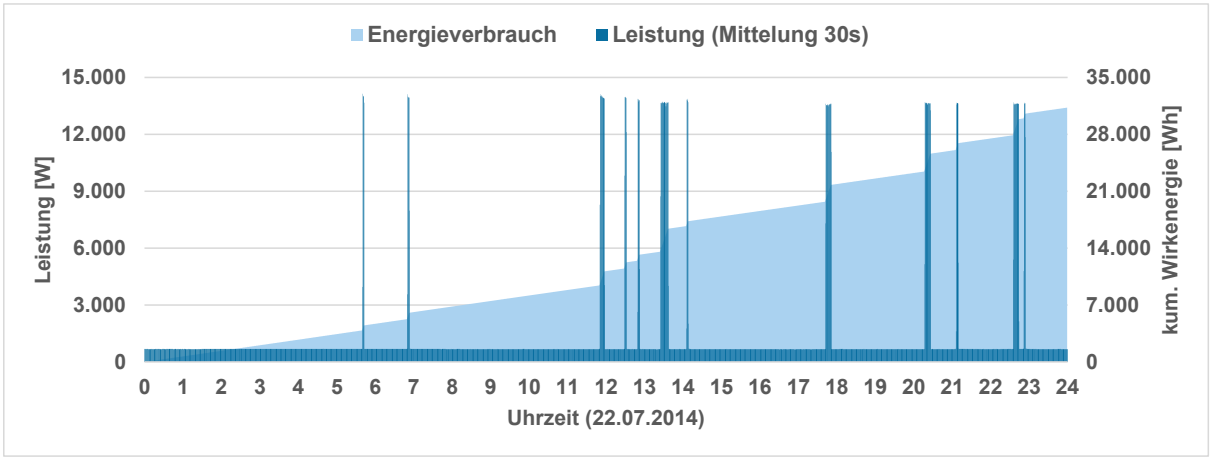

Abbildung 4-17: Verlauf der Leistung und des Energieverbrauchs der H_2-Infrastruktur über einen Tag

Tabelle 4-5 zeigt die wichtigsten ermittelten Kennzahlen aus den Energiebedarfsmessungen der Wasserstoffinfrastruktur. Besonders hervorzuheben ist der durchschnittliche Energieverbrauch für die Kompression eines Kilogramms Wasserstoff von 1,58 kWh.

Tabelle 4-5: Zusammenfassung der Kennzahlen der Wasserstoffinfrastruktur

	Wert
Ø Leistungsaufnahme Standby-Betrieb [kW]	0,691
Ø Leistungsaufnahme Verdichter-Betrieb [kw]	13,142
Maximale Leistungsaufnahme [kw]	18,453
Ø Energieverbrauch pro Kilogramm Wasserstoff [kWh]	1,58
Ø Förderleistung pro Stunde [kg/h]	8,318

Ladetechnologie

Ziel der Messungen war die Bestimmung des Wirkungsgrades der eingesetzten Ladetechnologie. Dieser sollte anschließend mit Literaturangaben verglichen werden und somit die Verwendung von Literaturangaben für die späteren Bewertungen abzusichern. Abbildung 4-18 zeigt den Strom-, Spannungs-, und Leistungsverlauf während der Ladung einer Schlepperbatterie. Hierbei ist eine WaWp-Ladekennlinie anhand des Anstiegs der Spannung und des Absinkens des Stroms bei fortschreitender Ladedauer deutlich zu erkennen. Für die Batterieladung wurde ein Energiebedarf von 7,415 kWh ermittelt. Hingegen belief sich der Energieverbrauch des Schleppers auf 5,087 kWh, daraus resultiert ein Gesamtwirkungsgrad der Ladetechnologie von 68,6 Prozent. Im Vergleich hierzu ist der in der Literatur angegebene Gesamtwirkungsgrad der eingesetzten 50Hz-Ladetechnologie in Kombination mit einer neuen Blei-Säure Batterie um ca. 3 Prozent niedriger und liegt somit bei 65,2 Prozent [VDI-2008].

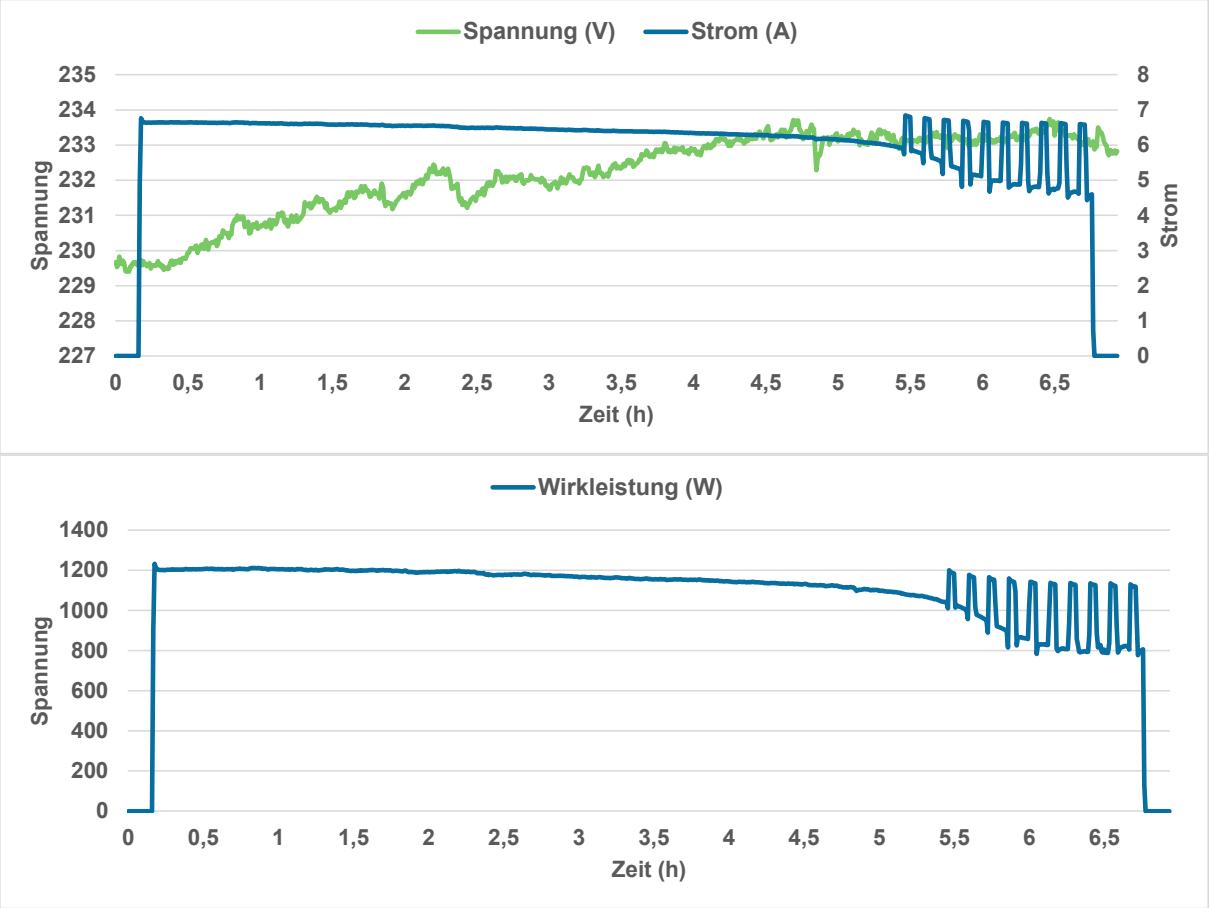

Abbildung 4-18: Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf während Batterieladung Schlepper

4.3.4 **Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse**

Durch die Untersuchung der Betankungsmengen konnte aufgezeigt werden, dass bei einer Zieldruckbetankung die H_2-Flurförderzeuge nicht vollständig befüllt werden können. Ferner werden kürzere prozessbedingte Pausen für die Betankung genutzt. Daraus resultiert eine durchschnittliche Nutzung von 76 Prozent des maximalen Tankinhaltes. Die im Forschungsvorhaben H2IntraDrive eingesetzte H_2-Infrastruktur ist über die aktuellen Anforderungen hinaus ausgelegt. Daraus ergibt sich die geringe Laufzeit des Verdichters von weniger als 1,5 Stunden pro Tag. Dies muss bei einer späteren Kostenbetrachtung mit berücksichtigt werden. Anhand der Energiebedarfsmessungen konnte zudem der Energiebedarf der H_2-Infrastruktur von 1,58 kWh für das Verdichten eines Kilogramms Wasserstoffs bestimmt werden. Abschließend konnte die Verwendung von Literaturdaten von Ladetechnologiewirkungsgraden abgesichert werden.

5 Technologievergleich Brennstoffzellensysteme und Batterien

5.1 Vorgehensweise

Der Technologievergleich zwischen der Brennstoffzellen- und Batterietechnologie bei Flurförderzeugen erfolgt anhand von Kennzahlen. Kennzahlen sind Maßgrößen, die bewusst zu absoluten oder relativen Zahlen verdichtet werden. Sie werden für die zahlenmäßige Berichterstattung über einen Sachverhalt genutzt [Gla-2014, S. 9]. Im Speziellen wurden relevante Kennzahlen für die Bewertung der beiden Antriebskonzepte identifiziert. Anschließend wurden mit Hilfe von Kriterien, wie z.B. Gültigkeit für beide Antriebstechnologien und durch z.B. Regelungstechnik beeinflussbare, einzelne Kennzahlen für den Technologievergleich ausgewählt, um sie abschließend in Ordnungssysteme bzw. Kennzahlenfelder einzuordnen. Im Folgenden werden die beiden Kennzahlenfelder Reichweite und Zuverlässigkeit inkl. der daraus resultierenden wichtigsten Kennzahlen vorgestellt. Ferner werden die manuellen Handhabungsschritte für Batteriewechsel und Wasserstoffbetankung zeitlich und ergonomisch bewertet.

5.2 Kennzahlenfeld Reichweite

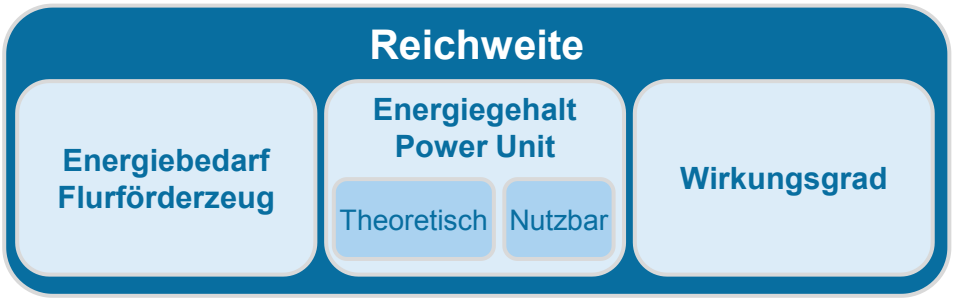

Abbildung 5-1: Kennzahlenfeld Reichweite

5.2.1 Reichweite

Abbildung 5-1 zeigt den Aufbau des Kennzahlenfeldes Reichweite. Als Reichweite wird die maximal mögliche Anzahl an Betriebsstunden des Flurförderzeuges zwischen zwei Energy Refuelings verstanden. Energy Refueling kann dabei die Wasserstoffbetankung, die Batterieladung oder der Batteriewechsel sein. Einflussfaktoren auf die maximale Reichweite „RW_{max}“ sind der Energiebedarf des Flurförderzeuges „$E_{FFZ,Bh}$“, der theoretische „$EG_{PU,theoretisch}$“ bzw. nutzbare Energiegehalt „$EG_{PU,\text{nutzbar}}$“ der Power Unit

sowie der Wirkungsgrad der Power Unit „η“. Die maximale Reichweite eines Flurförderzeuges kann nach

$$RW_{\max} = \frac{EG_{\text{PU,nutzbar}} \times U_{PU}}{E_{FFZ,Bh} \times 1.000} \tag{5-1}$$

bestimmt werden, wobei „U_{PU}“ die Spannung der Power Unit ist. Der nutzbare Energiegehalt einer neuen Blei-Säure Batterie entspricht 80 Prozent des theoretischen Energiegehaltes bzw. der Nennkapazität der Batterie „C_{N}“. Bei einer Tiefenentladung unter 80 Prozent wird die Lebensdauer der Batterie deutlich beeinträchtigt [Rut-2013, S. 28]. Der theoretische Energiegehalt eines Brennstoffzellensystems ergibt sich hingegen aus dem auf den LHV bezogenen Wirkungsgrad des Systems „η_{Bz}“ und dem maximalen Tankinhalt „$m_{H2,Bz,max}$“. Auf Basis der in Kapitel 4.3.2 aufgezeigten Betankungsmengen und unter Berücksichtigung einer optimalen H_2-Infrastruktur wird davon ausgegangen, dass 95 Prozent des Tankinhaltes genutzt werden können. Der nutzbare Energiegehalt eines Brennstoffzellensystems „$EG_{BZ,\text{nutzbar}}$“ kann infolgedessen nach

$$EG_{\text{BZ,nutzbar}} = \left(\frac{m_{H2,Bz,max} \times H_i \times 1.000 \times \eta_{Bz}}{U_{BZ}}\right) \times 0{,}95 \tag{5-2}$$

berechnet werden, wobei „H_i“ der Heizwert bzw. Lower Heating Value von Wasserstoff und „U_{BZ}“ die Nennspannung des Brennstoffzellensystems bzw. des Flurförderzeugs ist.

Tabelle 5-1 zeigt die Reichweitenbestimmung von E- und H_2-Flurförderzeugen im Vergleich. Als Basis für Energiebedarf Flurförderzeuge, Batteriekapazität, Tankinhalt und Wirkungsgrad Brennstoffzellensystem dienen reale Werte aus dem H2IntraDrive-Projekt, wobei für die Gabelstapler ein 3,5 Tonnen Gabelstapler gewählt wird. Im Vergleich der Schlepper wird ersichtlich, dass der H_2-Schlepper 1,1 Betriebsstunden länger im Einsatz sein kann bis eine Betankung zwingend erforderlich ist. Dies liegt vor allem an dem geringen Unterschied zwischen theoretischem und nutzbarem Energiegehalt des Brennstoffzellensystems. Dieser fällt bei der Batterie deutlich höher aus, wodurch der anfängliche Vorteil beim Vergleich der theoretischen Energiegehalte fast verloren geht. Im Vergleich der Gabelstapler kann hingegen der E-Gabelstapler fast doppelt so lange genutzt werden wie der H_2-Gabelstapler bis er zum Energy Refueling muss. Dies liegt vor allem an dem bereits mehr als die Hälfte geringerem theoretischen Energiegehalt des Brennstoffzellensystems im Vergleich zur Batterie.

Tabelle 5-1: Reichweitenbestimmung Flurförderzeuge]

	E-Schlepper	H_2-Schlepper	E-Gabelstapler	H_2-Gabelstapler
Ø Energiebedarf Flurförder-zeug [Wh]	670	670	2.916	2.916
Ø Spannung [V]	24,2	26,7	82,4	83,4
Batteriekapazität [Ah]	500		775	
Tankinhalt [kg]		0,73		1,8
η Brennstoffzellensystem [%]		45		45
Theoretische Energiegehalt [Ah]	500	410	775	324
Nutzbare Energiegehalt [Ah]	400	390	620	308
Maximale Reichweite [Bh]	**14,4**	**15,5**	**17,5**	**8,8**

5.2.2 **Wirkungsgrade**

Im Vergleich der Wirkungsgrade der beiden Antriebstechnologien werden für die Brennstoffzellentechnologie Herstellerangaben für das Brennstoffzellensystem und reale Messwerte für die H_2-Infrastruktur herangezogen. Für die Batterietechnologie wird ein Best Case Szenario mit einer neuen Batterie mit Elektrolytumwälzung (EUW) und HF-Ladung sowie ein Worst Case Szenario mit einer alten Batterie ohne EUW und 50Hz-Ladung definiert. Die Wirkungsgrade bzw. Ladefaktoren stammen dabei aus [VDI-2008].

Abbildung 5-2 zeigt den finalen Wirkungsgradvergleich der Brennstoffzellen- und Batterietechnologie. Dabei wird von 10 kWh Energiebedarf für das Flurförderzeug ausgegangen. Darauf aufbauend werden die Verluste in der Power Unit und Infrastruktur bestimmt und am Ende der Gesamtenergiebedarf berechnet. Für die Brennstoffzellentechnologie sind alle Werte auf den Lower Heating Value von Wasserstoff bezogen. Im Vergleich wird ersichtlich, dass das Brennstoffzellensystem den geringsten Wirkungsgrad der Power Units aufweist. Hingegen arbeitet die H_2-Infrastruktur mit dem höchsten Wirkungsgrad im Vergleich zu den Ladegeräten. Im Gesamtvergleich liegt die Brennstoffzellentechnologie jedoch an letzter Stelle. Grund hierfür sind die hohen Verluste des Brennstoffzellensystems von 55 Prozent.

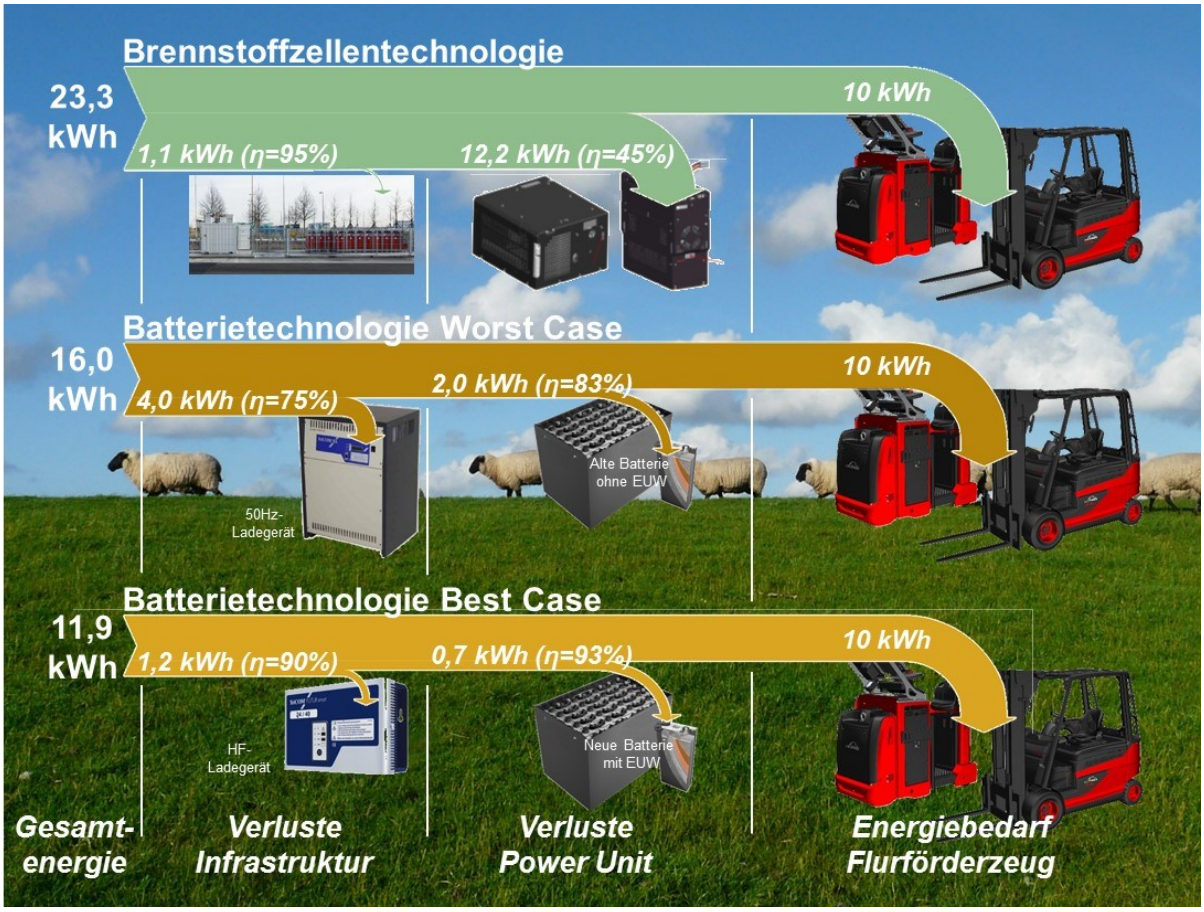

Abbildung 5-2: Wirkungsgradvergleich Brennstoffzellen- und Batterietechnologie

5.3 Kennzahlenfeld Zuverlässigkeit

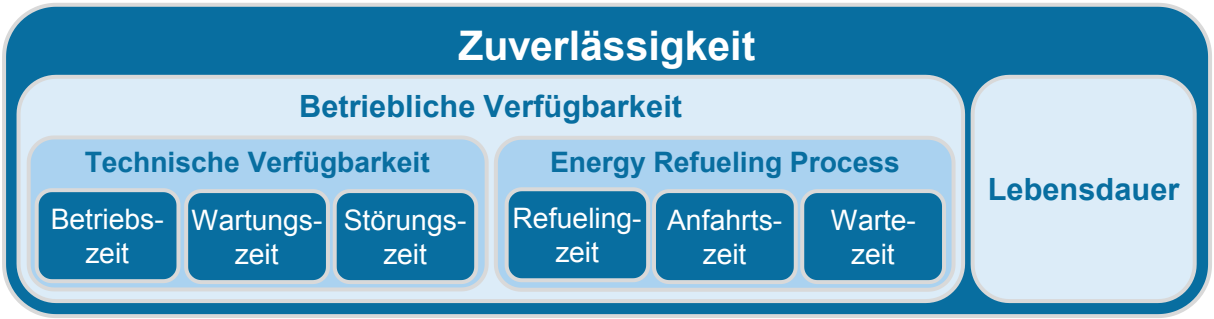

Abbildung 5-3: Kennzahlenfeld Zuverlässigkeit

5.3.1 Betriebliche Verfügbarkeit

Wie in Abbildung 5-3 ersichtlich, besteht das Kennzahlenfeld Zuverlässigkeit aus den beiden Feldern betriebliche Verfügbarkeit sowie Lebensdauer. Die betriebliche Verfügbarkeit wird durch die technische Verfügbarkeit und den Energy Refueling Process beeinflusst und kann mit Hilfe der Formeln (7-4) und (7-5) bestimmt werden.

Wartungs- und Störungszeiten ergeben sich aus den planmäßigen Wartungen und unplanmäßigen Reparaturen am Flurförderzeug und an der Power Unit, wobei Wartungen durch organisatorische Maßnahmen außerhalb der eigentlichen Betriebszeit erfolgen können. So kann bei einem 2-Schichtbetrieb mit zwei Wechselbatterien die Wartung der Batterie dann erfolgen, wenn sie außerhalb des Flurförderzeuges in der Ladestation ist. Die betriebliche Verfügbarkeit des Flurförderzeuges wird infolgedessen durch die Batteriewartung nicht beeinflusst.

Der Energy Refueling Process setzt sich aus der Batteriewechsel- bzw. Betankungszeit (der sogenannten Refuelingzeit), der An- bzw. Rückfahrtszeit zur Betankung bzw. Batteriewechsel sowie eventueller Wartezeit bis z.B. der Batteriewechsel durchgeführt werden kann zusammen. Ferner muss berücksichtigt werden, wie oft der Energy Refueling Process für die jeweilige Antriebstechnologie notwendig ist. Die einzelnen Zeiten sind von der betrachteten Anwendung abhängig. So kann bei einer Anwendung der Batteriewechsel beim Gabelstapler sechs Minuten dauern und bei einer zweiten Anwendung 10 Minuten. Für einen objektiven Vergleich einzelner Batterie- und Betankungszeiten werden in Kapitel 5.4 die dafür notwendigen manuellen Handhabungsschritte zeitlich und ergonomisch bewertet.

5.3.2 **Lebensdauer**

Die Lebensdauer eines Produktes ist abhängig von der Belastungsintensität während der Verwendung. So führt z.B. eine regelmäßige Tiefenentladung unter 80 Prozent bei Blei-Säure Batterien zu einem deutlichen Rückgang der Lebenserwartung [Rut-2013, S. 28]. Infolgedessen werden für die Lebensdauerangaben in Tabelle 5-2 Erfahrungswerte von Herstellern herangezogen. Bei einem Vergleich der einzelnen Werte mit den Werten aus dem Benchmark in Kapitel 8.2 wird ersichtlich, dass diese Werte auch bei realen Anwendungen erzielt werden. Beim Vergleich zwischen Schlepper und Gabelstapler wird ersichtlich, dass die Lebenserwartung des Schleppers halb so hoch wie die des Gabelstaplers ist. Die Lebensdauer der Batterien liegt dabei deutlich unter der der Flurförderzeuge. Die Lebensdauer der Brennstoffzellensysteme ist hingegen gleich groß wie die des jeweiligen Flurförderzeuges. Im Vergleich der Infrastrukturen ist die Lebensdauer der 50Hz-Ladegeräte und der H_2-Infrastruktur mit 15 Jahren identisch. HF-Ladegeräte müssen hingegen bereits nach 10 Jahren ausgetauscht werden.

Tabelle 5-2: Lebensdauervergleich

	E-Schlepper	H_2-Schlepper	E-Gabelstapler	H_2-Gabelstapler
Flurförderzeug [Bh]	10.000	10.000	20.000	20.000
Power Unit [Bh]	6.000	10.000	6.000	20.000
H_2-Infrastruktur [Jahre]		15		15
HF-Ladegeräte [Jahre]	10		10	
50Hz-Ladegeräte [Jahre]	15		15	

5.4 Bewertung manueller Handhabungsprozesse

Bei einer Betrachtung von Expertenaussagen sowie Literaturangaben zu Batteriewechselzeiten und Wasserstoffbetankungszeiten wird ersichtlich, dass sich die angegebenen Zeiten zum Teil deutlich unterscheiden. So stehen für Batteriewechselzeiten Aussagen von fünf bis 15 Minuten und mehr im Raum. Bei der Wasserstoffbetankung sprechen Experten hingegen von einer Betankungsdauer von wenigen Minuten. Als konkreter Wert wird oft drei bis fünf Minuten genannt. Ein objektiver Vergleich zwischen Batteriewechsel und Wasserstoffbetankung gestaltet sich somit schwierig, weswegen im Folgenden verschiedene Batteriewechselmethoden und eine Wasserstoffbetankung am Beispiel eines 3,5 Tonnen Gabelstaplers und eines 3 Tonnen Schleppers untersucht werden. Die zeitliche Bewertung erfolgt zum einen durch Messwerte aus verschiedenen Batteriewechselmethoden bei unterschiedlichen Anwendern (Logistikdienstleister und Automobilbranche) und zum anderen mit Hilfe der Methods-Time Measurement (MTM) Methode. Für die Bewertung durch MTM werden standardisierte Rahmenbedingungen für die unterschiedlichen Batteriewechselmethoden und der Wasserstoffbetankung definiert und anschließend die jeweils anfallenden manuellen Handhabungsschritte mit Hilfe von MTM bewertet. Abschließend wird die physische Belastung des Mitarbeiters während der einzelnen Batteriewechselmethoden und der Wasserstoffbetankung mit Hilfe der Leitmerkmalmethode (LMM) bewertet. Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen wurden bereits in der Ausgabe 10/2015 der Hebezeuge Fördermittel veröffentlicht.

5.4.1 **Batteriewechsel**

Bei einer genaueren Betrachtung der verschiedenen Batteriewechselmethoden können diese grundlegend anhand der räumlichen Aufteilung in zentrale sowie dezentrale Batteriewechsel differenziert werden. Ist für das gesamte Werk oder für die gesamte Werkshalle lediglich eine einzige Batterieladestation bzw. ein einziger Batterieladeraum vorhanden in dem alle Batterien geladen sowie gewechselt werden, wird dies als

zentraler Batteriewechsel bzw. zentrale Batterieladung definiert. Sind hingegen mehrere Einzelladeplätze oder mehrere kleinere Batterieladestationen in der Werkshalle verteilt, kann der Batteriewechsel dezentral an mehreren Stellen durchgeführt werden. Hierbei wird von einem dezentralen Batteriewechsel bzw. einer dezentralen Batterieladung gesprochen. Ausgehend von derselben Anzahl an Batterien innerhalb einer Halle beinhaltet eine zentrale Batterieladestation immer mehr Batterien als eine einzelne dezentrale und ist somit in ihren Abmessungen größer. Dadurch ergeben sich bei einer zentralen Ladestation im Mittel längere Wege, die ein Mitarbeiter für einen Batteriewechsel zurücklegen muss.

Abbildung 5-4: Batteriewechsel mit Kran bei einem E-Gabelstapler

Neben der räumlichen Aufteilung werden Batteriewechselmethoden zudem anhand des verwendeten Wechselequipments unterschieden. Bei E-Gabelstaplern werden Batterien vorwiegend mit einem Hubwagen oder, wie in Abbildung 5-4 ersichtlich, mit einem Brückenkran gewechselt. Für beide Methoden muss vor dem eigentlichen Entfernen der Batterie eventuell eine Fahrerkabine geöffnet, der Fahrersitz nach oben geklappt, die Batterietür geöffnet sowie die Batterie vom Fahrzeug abgeschlossen werden. Anschließend wird beim Batteriewechsel mit Hubwagen dieser unter dem Gabelstapler bzw. der Batterie platziert und die leere Batterie mit Hilfe des Hubwagens aus

dem Fahrzeug gehoben. Nach dem Abstellen auf einem leeren Batterieladeplatz kann eine volle Batterie mit Hilfe des Hubwagens in das Fahrzeug eingesetzt werden. Beim Wechsel mit einem Kran, welcher aufgrund der höheren Investition meist nur in größeren Ladestationen eingesetzt wird, wird je nach Ausführung des Flurförderzeuges die Batterie durch einen seitlichen Batterieausschub aus dem Fahrzeug geschoben. Anschließend wird diese z.B. mit einer pneumatischen Spannvorrichtung, welche am Kran befestigt ist, arretiert und mit Hilfe des Krans aus dem Fahrzeug auf den leeren Ladeplatz gehoben. Die volle Batterie wird auf dieselbe Weise in umgekehrter Reihenfolge in das Fahrzeug bewegt. Anstelle der pneumatischen Spannvorrichtung können hierzu auch Ketten inkl. Hacken verwendet werden. Abschließend wird die volle Batterie am Fahrzeug angesteckt, der Fahrersitz nach unten geklappt und eventuell die Fahrerkabine verschlossen. Bei E-Schleppern ist neben einem Wechsel mit Hubwagen inkl. Wechselgestell oder Kran auch ein Batteriewechsel mit Hilfe eines sogenannten Verschiebewagens möglich. Dabei wird der Schlepper vor dem Verschiebewagen positioniert, die Batterie abgeschlossen und seitlich auf den Verschiebewagen geschoben. Anschließend kann mit Hilfe des Verschiebewagens, der entweder geführt oder frei verfahrbar ist, die leere Batterie auf den Ladeplatz befördert werden. Danach wird eine volle Batterie mit Hilfe des Verschiebewagens an einem anderen Ladeplatz entnommen und in den Schlepper eingeführt.

5.4.2 **Wasserstoffbetankung**

Wasserstoffbetankungen, wie in Abbildung 5-5 dargestellt, können wie Batteriewechsel zentral oder dezentral durchgeführt werden. In beiden Fällen wird ein identischer Dispenser, mit dessen Hilfe das H_2-Flurförderzeug betankt wird, aufgebaut. Die eigentliche H_2-Infrastruktur, bestehend aus Betankungsanlage und Wasserstoffspeicher, steht außerhalb der Halle im Freien. Für eine Betankung des Flurförderzeugs mit Wasserstoff muss eventuell eine kleine Tankklappe am Flurförderzeug geöffnet werden. Dadurch werden die benötigten Anschlüsse für Wasserstoffbefüllung, Kondensatabsaugung sowie Kommunikationsschnittstelle freigelegt. Anschließend kann der Mitarbeiter die Wasserstoff-Füllkupplung, den Schlauch für die Kondensatabsaugung sowie das Kabel für die Kommunikation anschließen. Da bei einigen Brennstoffzellensystemen von Schleppern das Kondensatwasser verdampft, entfällt dort der Anschluss des Schlauches. Der Anschluss des Kommunikationskabels, welches einen Datenaustausch bzgl. Tanktemperatur und Tankdruck im Fahrzeug zwischen Brennstoffzellensystem und Betankungsanlage ermöglicht, ist von der Ausführung der Wasserstoffinfrastruktur abhängig. Eine Kommunikation ist z. B. bei einer sogenannten Zieldruckbetankung, bei der das Fahrzeug mit einer maximal definierten Durchflussrate bis zu einem definierten Druck befüllt wird, nicht nötig. Nachdem alle notwendigen Verbindungen hergestellt sind, muss der Mitarbeiter, z. B. durch eine PIN-Eingabe an einem

Touchpanel, das Fahrzeug am Dispenser anmelden und dadurch die Betankung freischalten. Durch die Betätigung des Start-Knopfes beginnt anschließend die Betankung sowie bei Bedarf die Absaugung des Kondensatwassers. Nach Beendigung beider Prozesse können alle Verbindungen zwischen Flurförderzeug und Dispenser gelöst werden, womit die Betankung abgeschlossen und das Fahrzeug wieder einsatzfähig ist.

Abbildung 5-5: Wasserstoffbetankung bei einem H_2-Gabelstapler

5.4.3 **Zeitliche Bewertung mit Hilfe der MTM-Analyse**

Die MTM-Analyse wird seit rund 60 Jahren für die Planung und Analyse von manuellen Arbeitsabläufen genutzt, wobei diese mit Hilfe von zeitlich und inhaltlich vordefinierten Prozessbausteinen bewertet werden. Eine Bewertung kann anhand der drei MTM-Prozesstypen MEK (Einzelfertigung), UAS (Serienfertigung) und MTM-1 (Mengenfertigung), erfolgen. Für jeden Prozesstyp können speziell auf ihn zugeschnittene Bausteinsysteme verwendet werden, welche sich ausschließlich anhand ihres Detaillierungsgrades unterscheiden [Bok-2006]. Im Folgenden wird die Bewertung mit Hilfe von MTM-UAS, welches für die Bewertung von sich wiederholenden und gleichbleibenden Arbeitsinhalten mit Zykluszeiten von ca. drei Minuten eingesetzt wird, durchgeführt [Ben-2014]. Hierzu werden Arbeitsabläufe in sogenannte Grundvorgänge, wie z.B. Aufnehmen und Platzieren unterteilt. Jedem Grundvorgang ist durch MTM eine feste

Anzahl an sogenannten Time Measurement Units (TMU) hinterlegt. Nachdem alle Arbeitsabläufe bzw. Grundvorgänge analysiert und bewertet sind, kann am Ende die Summe der TMUs mit Hilfe eines Faktors in Sekunden umgerechnet werden, ein TMU entspricht dabei 0,036 Sekunden [Bok-2006].

Für die Bewertung des Batteriewechselprozesses werden zunächst standardisierte Betriebsmittel ausgewählt. Als Flurförderzeuge werden der 3,5 Tonnen Gabelstapler E35 sowie der 3 Tonnen Schlepper P30C der Firma Linde MH herangezogen. Für den Batteriewechsel mit Hubwagen wird ein Elektro-Deichselhubwagen T30 von Linde MH sowie ein Wechselgestell für zwei 24 V-Batterien (für dezentralen Batteriewechsel beim Schlepper) verwendet. Der Batteriewechsel per Kran wird mit Hilfe eines ABUS Deckenlaufkrans DLVM und einer Hebetraverse mit pneumatischer Klemmvorrichtung durchgeführt. Zudem wird beim zentralen Batterietausch des Schleppers mit Verschiebewagen der Hoppecke Wechselwagen trak®Xchange TU angewendet. Anschließend werden standardisierte Batterieladestationen für den zentralen sowie den dezentralen Batteriewechsel ausgewählt und die für den Batteriewechsel notwendigen Arbeitsabläufe und Zeiten analysiert. Hierfür werden unter anderem für jede Batteriewechselmethode die Laufwege des Mitarbeiters mit Hilfe von Spaghettidiagrammen, wie in Abbildung 5-6 zu sehen, bestimmt.

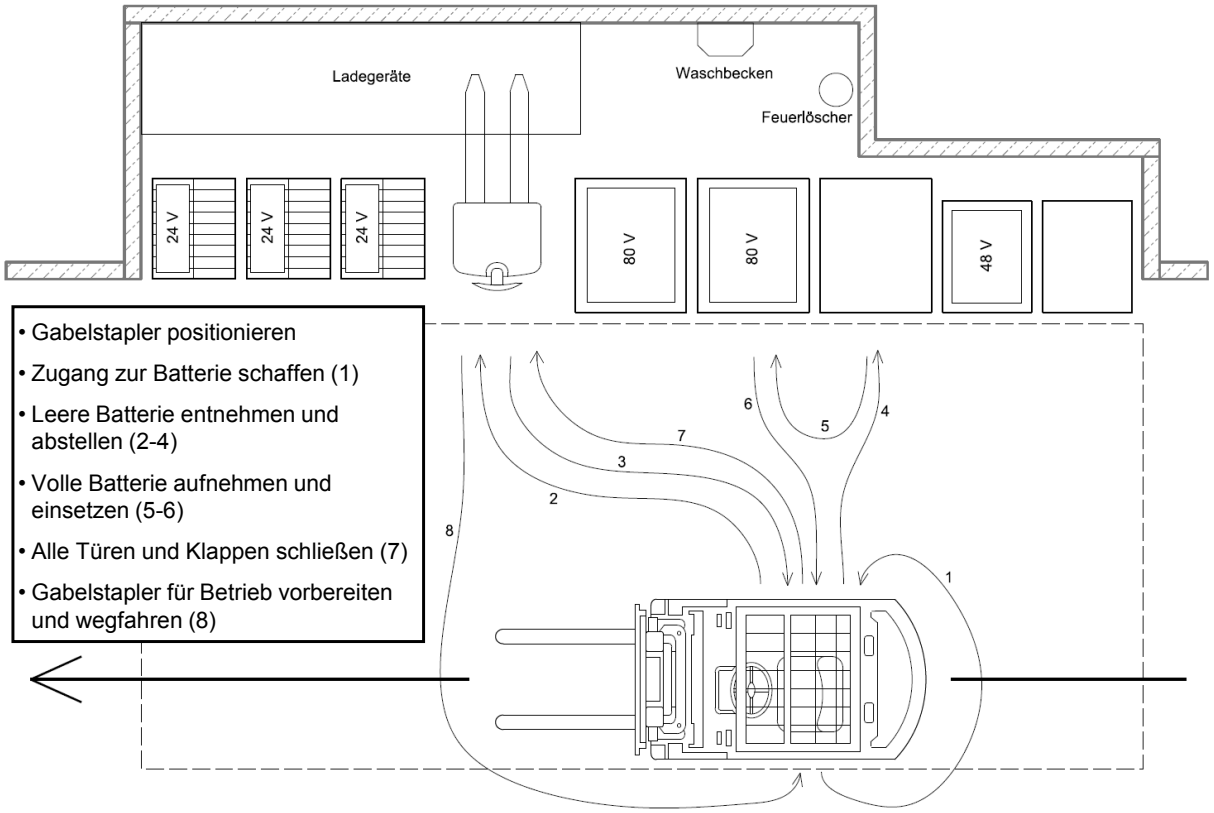

Abbildung 5-6: Ablauf des Batteriewechsels bei einem E-Gabelstapler (dezentralen Ladestation)

Für die Bewertung der Wasserstoffbetankung werden die in H2IntraDrive eingesetzten 3,5 Tonnen Gabelstapler E35/FC mit Kondensatabsaugung sowie der 3 Tonnen Schlepper P30C/FC ohne Kondensatabsaugung von Linde MH herangezogen. Ein zusätzliches Anschließen des Kommunikationskabels wird dabei aufgrund der eingesetzten Wasserstoffinfrastruktur mit Zieldruckbetankung nicht berücksichtigt. Die durchschnittlichen Betankungsmengen liegen, wie in Kapitel 4.3.2 ermittelt, bei 1,37 kg (E35/FC) bzw. 0,56 kg (P30C/FC) Wasserstoff, wobei eine maximale Durchflussrate nach SAE-J2600-Norm von 28 g/sek möglich ist. Eine detaillierte Analyse des Ablaufs der Betankung ist in Abbildung 5-7 zu sehen.

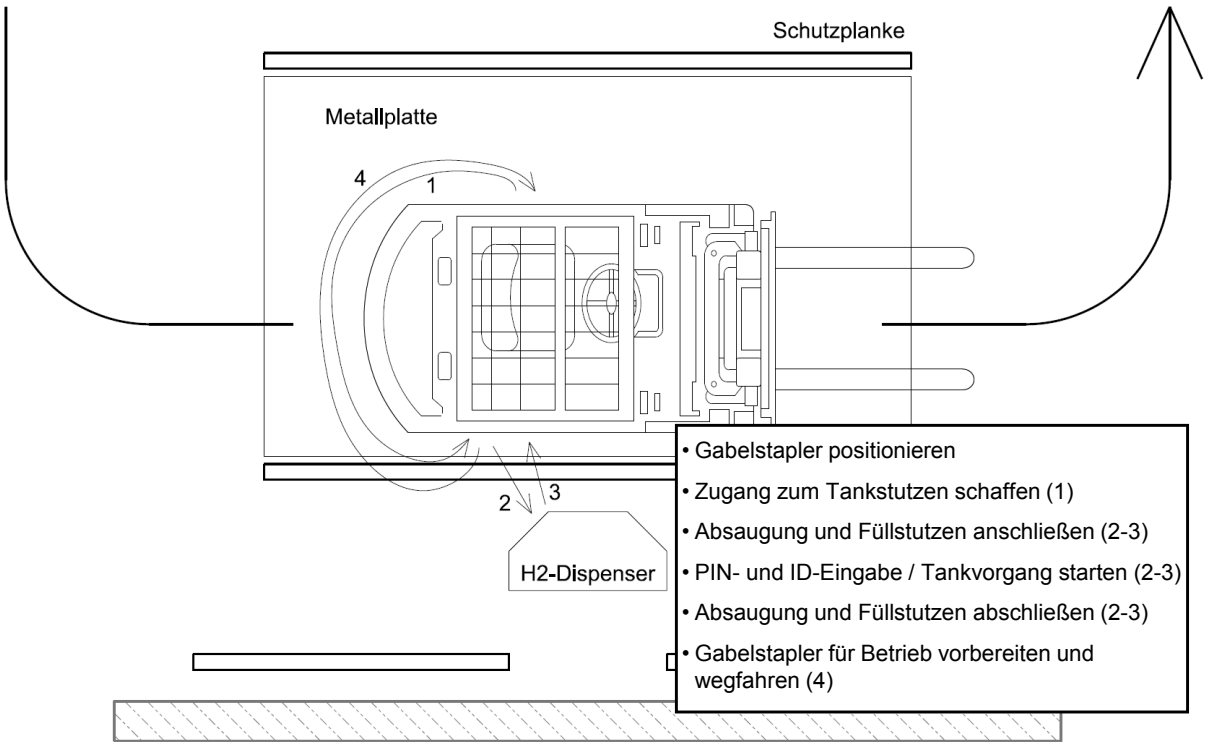

Abbildung 5-7: Ablauf der Wasserstoffbetankung bei einem Gabelstapler

5.4.4 **Ergebnisse der zeitlichen Bewertung**

In der Ergebnisdarstellung werden die Mittelwerte der realen Messwerte sowie die durch MTM ermittelten Zeiten für die verschiedenen Batteriewechselmethoden und die Wasserstoffbetankung gegenübergestellt, wobei von einer funktionierenden Technik ausgegangen wird. Zudem wird bei den gemessenen Werten der minimale und maximale Wert mit angeführt. Die dargestellte Zeit ist als Dauer zwischen dem Zeitpunkt des Anhaltens des Flurförderzeuges an der Ladestation bzw. am Dispenser bis zum wieder Losfahren nach dem durchgeführten Batteriewechsel bzw. der Betankung zu verstehen.

Wie in Abbildung 5-8 ersichtlich, unterscheiden sich die gemessenen realen Zeiten bei den unterschiedlichen Batteriewechselmethoden deutlich. So ist der maximale Wert beim zentralen Batteriewechsel (BW) mit Kran ca. fünfmal höher als der minimale Wert. Gründe hierfür liegen in unterschiedlichen Rahmenbedingungen bzw. in suboptimal geplanten Batteriewechselprozessen. So kann z. B. eine zu geringe Deckenhöhe beim Batteriewechsel mit Kran verhindern, dass eine Batterie über die andere gehoben werden kann oder ruckartig anfahrende und stoppende Krane zu einem unkontrollierten Schwingen der Batterie führen. Ferner benötigen schlecht geschulte Mitarbeiter wesentlich mehr Zeit für den Batteriewechsel als geschulte.

Bei der Wasserstoffbetankung hingegen ist der maximale Messwert nur 1,7-mal höher als der Minimale. Dies ist vor allem den unterschiedlichen Betankungsmengen geschuldet. Demzufolge nimmt der Faktor Mensch einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Betankungsdauer. Bei der Gegenüberstellung der minimalen Messwerte und der durch MTM ermittelten Zeiten wird ersichtlich, dass die Werte annähernd deckungsgleich sind. Somit entsprechen die MTM-Zeiten der Realität und gelten dadurch als validiert. Der Unterschied von 0,6 Minuten zwischen den minimalen Messwerten und der MTM-Zeit bei der Wasserstoffbetankung ergibt sich aufgrund der wesentlich geringeren Betankungsmenge bei der zeitlichen Messung im Vergleich zu den durchschnittlichen 1,37 kg in der Anwendung bei H2IntraDrive, welche für die MTM-Zeitermittlung herangezogen werden.

Für eine objektive Gegenüberstellung zwischen Wasserstoffbetankung und Batteriewechsel können infolgedessen die validierten MTM-Zeiten verwendet werden. So können durch die Wasserstoffbetankung (2,6 Minuten) im Vergleich zum dezentralen Batteriewechsel mit Hubwagen, welcher mit 3,3 Minuten den schnellsten Batteriewechsel ermöglicht, 22 Prozent der Zeit eingespart werden. Vergleicht man für dieses Szenario die mittleren Messwerte, so kann im Mittel 64 Prozent der Zeit (5,1 Minuten) eingespart werden. Bei einer Gegenüberstellung des längsten Batteriewechsels mit der kürzesten Betankung können sogar 92 Prozent der Zeit eingespart werden, was 22,8 Minuten entspricht. Als Schlussfolgerung kann demzufolge abgeleitet werden, dass die Wasserstoffbetankung beim H_2-Gabelstapler eine Zeitersparnis gegenüber dem Batteriewechsel mit sich bringt. Diese ist wesentlich von der Qualität des Batteriewechselprozesses, der Batteriewechselmethode und dem Faktor Mensch, wie z. B. Schulungsgrad, abhängig. Abschließend gilt es noch hinzuzufügen, dass der zeitliche Unterschied bei den MTM-Werten zwischen zentralem und dezentralem Batteriewechsel mit Hubwagen auf die räumlichen Dimensionen der Ladestationen zurückzuführen ist. So sind zentrale Ladestationen aufgrund der deutlich höheren Anzahl an gelagerten Batterien größer als dezentrale. Im Umkehrschluss muss der Mitarbeiter dadurch einen längeren mittleren Weg bewältigen.

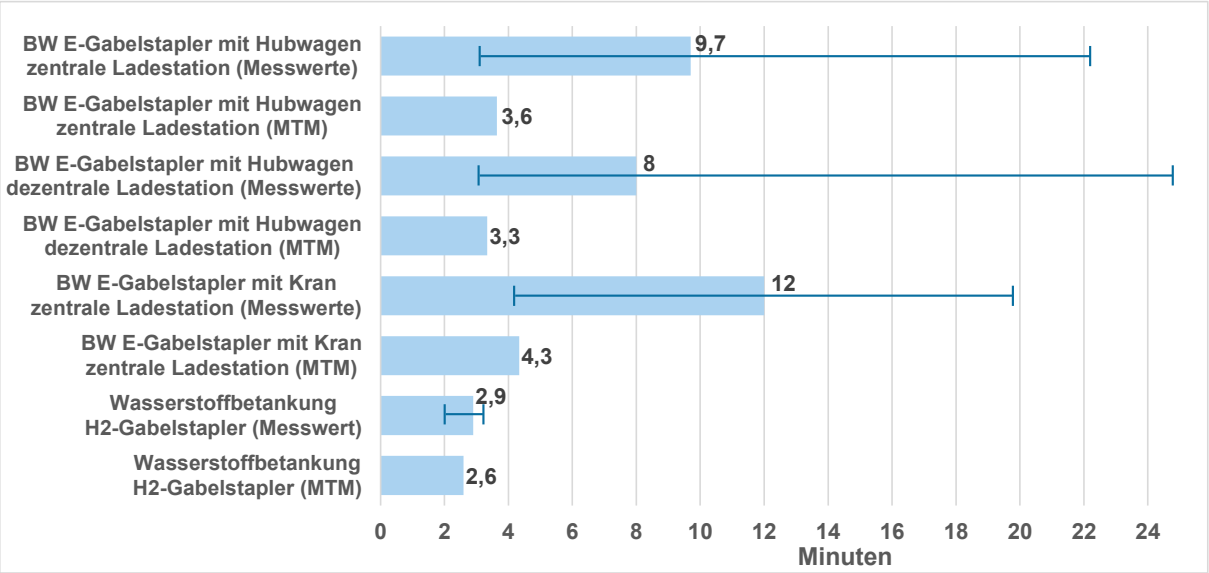

Abbildung 5-8: Zeitwerte Batteriewechsel vs. Wasserstoffbetankung beim Gabelstapler (Mittelwert sowie min. und max. Werte)

Durch den Vergleich des Batteriewechsels mit der Wasserstoffbetankung beim Schlepper in Abbildung 5-9 bestätigen sich die bereits genannten Erkenntnisse. Der Faktor Mensch bzw. eine schlechte Planung der Prozesse können auch hier zu einem deutlichen Anstieg der Batteriewechselzeiten führen, wobei deren Einfluss bei der Wasserstoffbetankung deutlich geringer ausfällt. Ferner können die durch MTM bestimmten Zeiten mit Hilfe der minimalen Messwerte validiert werden. Im direkten Vergleich der MTM-Zeiten kann beim Einsatz von H_2-Schleppern durch die Wasserstoffbetankung im Vergleich zum dezentralen Batteriewechsel mit Hubwagen (schnellster Batteriewechsel) 59 Prozent der Zeit eingespart werden. Bei einer Gegenüberstellung der mittleren Messwerte dieses Szenarios liegt die mittlere Zeitersparnis bei 72 Prozent bzw. 4,3 Minuten. Im Vergleich der schnellsten Wasserstoffbetankung mit dem langsamsten Batteriewechsel können 10 Minuten bzw. 89 Prozent der Zeit eingespart werden.

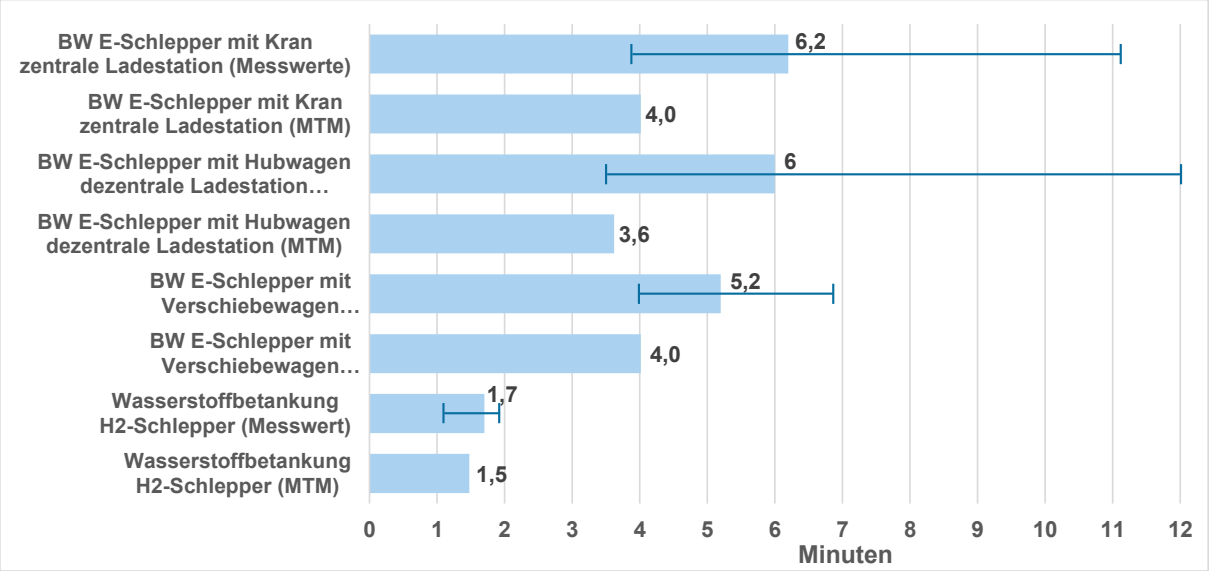

Abbildung 5-9: Zeitwerte Batteriewechsel vs. Wasserstoffbetankung beim Schlepper (Mittelwert sowie min. und max. Werte)

5.4.5 **Physische Belastung des Mitarbeiters**

Die Bewertung der physischen Belastung des Mitarbeiters während eines Batteriewechsels bzw. der Wasserstoffbetankung wird mit Hilfe der Leitmerkmalmethode (LMM) durchgeführt. Sie ist ein „Werkzeug der Arbeitsanalyse, um eine praxisgerechte Untersuchung der objektiv vorhandenen Arbeitsbelastung […] durchzuführen“ [Ben-2014]. Dabei werden Arbeitstätigkeiten mit Hilfe unterschiedlicher Wichtungen für die Bereiche zu bewegende Lasten, Zeitdauer/Häufigkeit, Körperhaltung und Ausführungsbedingungen in Risikobereiche eingeordnet. Diese geben anschließend Auskunft darüber, ob eine Tätigkeit aus ergonomischer Sicht unbedenklich ist oder ob sie langfristig zu einer Überbeanspruchung des Mitarbeiters mit evtl. gesundheitlichen Schäden führen kann. Die Risikobereiche und deren Bedeutung sind in Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 5-3: Risikobereiche bei LMM für Ziehen und Schieben, [Bun-2002]

Risikobereich	Punktwert	Beschreibung
1	< 10	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überlastung ist unwahrscheinlich.
2	10 bis < 25	Erhöhte Belastung, eine körperliche Überlastung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll.
3	25 bis < 50	Wesentlich erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt.
4	≥ 50	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich.

Für die Bewertung der physischen Belastung des Mitarbeiters werden die standardisierten Batteriewechselmethoden sowie die Wasserstoffbetankung herangezogen, wobei von einer Durchführungshäufigkeit von 40-mal pro Schicht ausgegangen wird. Dies entspricht einer durchschnittlichen Auslastung des Mitarbeiters an der zentralen Ladestation von 71 Prozent bei zu Grunde gelegten sieben Nettoarbeitsstunden und einer durchschnittlichen Batteriewechselzeit von 7,5 Minuten. Durch die angenommene Durchführungsanzahl von 40-mal pro Schicht erhält die Arbeitstätigkeit im Bereich Häufigkeit eine Wichtung von vier bzw. Faktor vier. Würde der Fahrer selbst den Batteriewechsel oder die Wasserstoffbetankung durchführen, so würde die Durchführungsanzahl nur noch ein- bis zweimal pro Schicht betragen. Im Rahmen der LMM entspricht dies einer Wichtung von eins bzw. Faktor eins. Dieser Faktor gilt ab einer Häufigkeit von ein- bis maximal neun-mal pro Schicht. Infolgedessen kann für eine Bestimmung der physischen Belastung des Fahrers bei einem selbst durchgeführten Batteriewechsel oder Wasserstoffbetankung der in Tabelle 5-4 angegebene Risikowert durch vier dividiert werden.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der LMM-Analyse in Tabelle 5-4 wird deutlich, dass die Wasserstoffbetankung den geringsten Risikowert bzw. die geringste physische Belastung für den Mitarbeiter aufweist. Hauptgründe hierfür sind das nicht notwendige Handling von schweren Batterielasten sowie kurze zurückzulegende Wege. Eine erhöhte Belastung für den Mitarbeiter ergibt sich beim zentralen Batteriewechsel am E-Schlepper mit Verschiebewagen mit einem Risikowert von 30. Der dezentrale Batteriewechsel mit Hubwagen beim E-Schlepper weist denselben Risikowert auf, wobei sich der Wert auf eine Häufigkeit von 40-mal pro Schicht bezieht. Im realen Betrieb wird ein dezentraler Batteriewechsel mit Hubwagen jedoch durch den Fahrer selbst durchgeführt und fällt infolgedessen deutlich weniger oft als 9-mal pro Schicht an. Somit beläuft sich die reale Belastung des Mitarbeiters auf einen Risikowert von 7,5 und kann als unkritisch angesehen werden. Der Unterschied zwischen dezentralem Batteriewechsel mit Hubwagen beim E-Gabelstapler und E-Schlepper ergibt sich aus dem zusätzlichen Handling des Wechselgestells beim E-Schlepper, welches samt Batterien mehrmals bewegt werden muss.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der LMM für standardisierte Batteriewechsel- und Betankungsprozesse

Flurförderzeug	Arbeitsprozess	Risikowert
E-Gabelstapler	BW mit Hubwagen dezentrale Ladestation	12
E-Gabelstapler	BW mit Kran zentrale Ladestation	8
E-Gabelstapler	BW mit Hubwagen zentrale Ladestation	12
H_2-Gabelstapler	Wasserstoffbetankung	4
E-Schlepper	BW mit Hubwagen dezentrale Ladestation	30
E-Schlepper	BW mit Kran zentrale Ladestation	8
E-Schlepper	BW mit Verschiebewagen zentrale Ladestation	30
H_2-Schlepper	Wasserstoffbetankung	4

5.4.6 **Fazit**

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Wasserstoffbetankung bei H_2-Gabelstaplern im Mittel mit 2,6 Minuten und bei H_2-Schleppern mit 1,5 Minuten deutlich schneller als ein Batteriewechsel durchgeführt werden kann. Dabei ist die effektive Zeitersparnis von der zu vergleichenden Batteriewechselmethode und den am Einsatzort vorherrschenden Rahmenbedingungen abhängig. Diesbezüglich sind die Planungsqualität des Batteriewechselprozesses sowie die Erfahrung des Mitarbeiters, der den Batteriewechsel durchführt, die entscheidenden Einflussfaktoren. Diese können z.B. dazu führen, dass ein Batteriewechsel mit 24,8 Minuten bei einem E-Gabelstapler ca. 10-mal so lange dauert wie eine Wasserstoffbetankung. Verglichen hierzu spielt der Faktor Mensch bei der Wasserstoffbetankung eine untergeordnete Rolle, da der Prozess bis auf das einfache An- und Abschließen von Kupplungen voll automatisiert abläuft.

Im Vergleich der physischen Belastung des Mitarbeiters schneidet die Wasserstoffbetankung aufgrund des nicht mehr notwendigen Handlings mit schweren Batterien sowie kürzeren Laufwegen besser ab als der Batteriewechsel. Eine körperliche Überbeanspruchung für den Mitarbeiter ergibt sich unter allen untersuchten Batteriewechselmethoden und Wasserstoffbetankung lediglich durch den zentralen Batteriewechsel mit Verschiebwagen ab einer Durchführungshäufigkeit von 40-mal pro Schicht.

Abschließend gilt es noch den räumlichen Vorteil der Wasserstoffbetankung gegenüber dem Batteriewechsel zu nennen. Dieser wurde zwar im Rahmen der Untersuchungen nicht im Detail quantitativ analysiert, jedoch sind für die Errichtung und spätere Betankung mit Hilfe eines Dispensers meist 15 m² ausreichend. Diese können zudem zum Teil als Fahrstrecke genutzt werden. Dadurch ergibt sich eine wesentliche

Einsparung gegenüber den für Ladestationen notwendigen Flächen. Vor dem Hintergrund des geringen Platzbedarfs pro Dispenser können bei Bedarf weitere errichtet werden und somit längere Anfahrtswege für die Flurförderzeuge vermieden werden.

5.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Technologievergleichs zwischen Brennstoffzellensystemen und Blei-Säure Batterien bei Flurförderzeugen wurden zunächst Kennzahlfelder entwickelt. Hierfür wurden Kennzahlen identifiziert, entwickelt und in Ordnungssysteme bzw. Kennzahlenfelder eingeordnet. Daraus resultierten die beiden Kennzahlenfelder Reichweite und Zuverlässigkeit. Im Rahmen des Feldes Reichweite wurden der Energiegehalt der unterschiedlichen Power Units sowie die verschiedenen Wirkungsgrade untersucht. Im Feld Zuverlässigkeit wurde hingegen der Energy Refueling Process zeitlich durch Methods-Time Measurement und ergonomisch durch die Leitmerkmalmethode bewertet. Ferner wurden die Lebensdauern von Flurförderzeug, Power Unit und Infrastruktur gegenübergestellt.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Kennzahlenfeld Reichweite sind:

- Die maximale Reichweite zwischen zwei Betankungen bzw. Batteriewechsel liegt beim H_2-Schlepper mit 15,5 Betriebsstunden um ca. 8 Porzent über der des E-Schleppers.
- Hingegen beträgt die maximale Reichweite des H_2-Gabelstaplers mit 8,8 Betriebsstunden ca. die Hälfte des E-Gabelstaplers
- Infolgedessen sollte für eine Erhöhung der Reichweite des H_2-Gabelstaplers z.B. ein größeres Tankvolumen oder ein höherer Druck erstrebt werden.
- Im Vergleich der Gesamtwirkungsgrade (Power Unit und Infrastruktur) liegt die Brennstoffzellentechnologie mit 44,6 Prozent deutlich unter einem möglichen Worst Case Szenario (alte Batterie und 50Hz-Ladegeräte) der Batterietechnologie mit einem Gesamtwirkungsgrad von 62,2 Prozent. Bei der Verwendung einer neuen Batterie mit EUW und HF-Ladegerät (Best Case Szenario) liegt der Gesamtwirkungsgrad der Batterietechnologie bei 83,7 Prozent.
- Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems liegt deutlich unter dem der Batterien.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Kennzahlenfeld Zuverlässigkeit sind:

- Die betriebliche Verfügbarkeit eines Flurförderzeuges hängt deutlich von den örtlichen Rahmenbedingungen, wie z.B. Anfahrtsstrecke zum Energy

Refueling, eventuellen Wartezeiten bis das Energy Refueling durchgeführt werden kann und der Dauer des Energy Refuelings ab.

- Die Wasserstoffbetankung beim Schlepper und Gabelstapler ist mit 1,5 bzw. 2,6 Minuten deutlich schneller als ein Batteriewechsel.
- Planungsqualität und Mitarbeitererfahrung sind wesentliche Einflussfaktoren auf die Dauer des Batteriewechsels. Bei der Wasserstoffbetankung trifft dies nicht zu.
- Die physische Belastung des Mitarbeiters ist bei der Wasserstoffbetankung aufgrund des nicht mehr notwendigen Handlings mit schweren Batterien sowie kürzeren Laufwegen besser als der Batteriewechsel.
- Für die Wasserstoffbetankung bedarf es einer wesentlich geringeren Hallenfläche als für den Energy Refueling Process bei E-Flurförderzeugen.
- Die Lebensdauer der Brennstoffzellensysteme ist mit 10.000 bzw. 20.000 Bh gleich hoch wie die der Flurförderzeuge. Die Lebensdauer der Batterie ist mit 6.000 Bh hingegen deutlich geringer.
- Die Lebensdauer der H_2-Infrastruktur ist gleich hoch wie die von 50Hz-Ladegeräten. Die HF-Ladegeräte können hingegen mit 10 Jahren um ein drittel weniger lang eingesetzt werden.

6 Ökologische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen

Die ökologische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen wird mit Hilfe der Ökobilanz-Methodik bewertet. Hierbei werden Umweltaspekte und -auswirkungen von Produktsystemen, ausgehend von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Beseitigung, systematisch abgeschätzt [DIN-14040, S. 17]. Im Rahmen der durchgeführten Bewertung werden mit der Ökobilanzierungssoftware „thinkstep GaBi“ Ökobilanzen für verschiedene Flurförderzeuge der Firma Linde MH erstellt. Im Speziellen wurde das Treibhauspotential von Flurförderzeugen bewertet, die mit Blei-Säure Batterien oder mit Wasserstoffbrennstoffzellen betrieben werden. Aufgrund des hohen Marktanteils wird hierfür ein 3,5 Tonnen Gabelstapler als Referenzfahrzeug der Klasse eins Flurförderzeuge, siehe Tabelle 2-1, gewählt. Als Referenz für Klasse drei Fahrzeuge dient hingegen ein drei Tonnen Schlepper. Die Ergebnisse aus dem Vergleich der konventionellen Energiepfade wurden bereits im Rahmen der VDI-Berichte 2248 veröffentlicht.

6.1 Grundlagen der Ökobilanz

Potenzielle Umweltbelastungen, die mit der Herstellung und Anwendung von Produkten zusammenhängen, führten in den letzten Jahrzehnten zu einem wachsenden Umweltbewusstsein und Wissensstandard. Aus dieser Entwicklung resultieren Methoden, die Umweltauswirkungen von Produktsystemen berücksichtigen. Eine dafür entwickelte Methode ist die Ökobilanz. Unter dem Begriff Ökobilanz, englisch auch als Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet, versteht man die Analyse und Auswertung der von Produktsystemen verursachten Umweltauswirkungen und der damit verbundenen quantitativen Betrachtung der ökologischen Nachhaltigkeit [Klö-2009, S. 1f.]. Sie hilft Verbesserungsmöglichkeiten von Produkten in den verschiedenen Phasen ihres Lebenszyklus aufzuzeigen und dient zudem als Informations- und Marketinginstrument. Wie in Abbildung 6-1 dargestellt, bezieht sich die Ökobilanz auf Umweltaspekte und -auswirkungen von Emissionen während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes. Diese Cradle-to-Grave-Untersuchung (von der Wiege bis zur Bahre) reicht von der Rohstoffgewinnung, über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung und Recycling bis hin zur endgültigen Entsorgung [DIN-14040, S. 4].

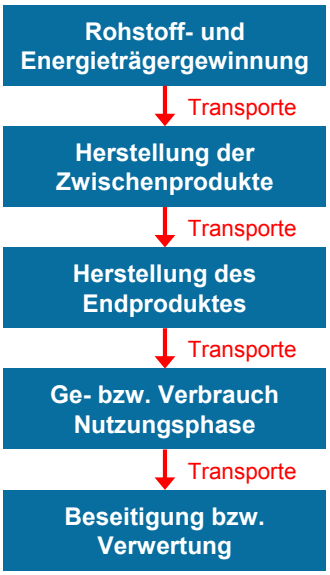

Abbildung 6-1: Vereinfachter Lebenszyklus eines (materiellen) Produktes, [Klö-2009, S. 3]

Die Ökobilanz ist eine über die Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 definierte Methode. Eine normgerechte Ökobilanz-Studie umfasst entsprechend Abbildung 6-2 die vier Phasen Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung.

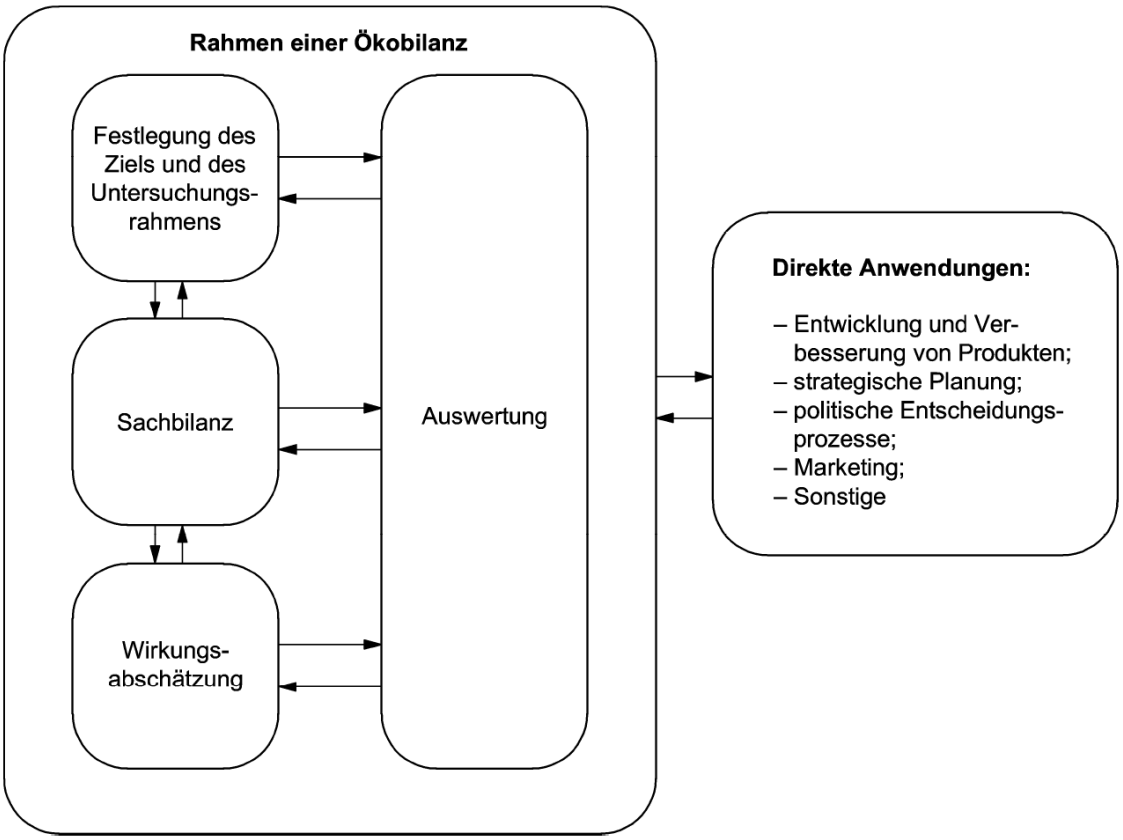

Abbildung 6-2: Komponenten einer Ökobilanz, [DIN-14040, S. 16]

6.1.1 **Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen**

Die erste Phase ist die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen. In dieser werden die Rahmenbedingungen der Studie abgegrenzt. Ziel und Untersuchungsrahmen müssen auf die beabsichtigte Anwendung abgestimmt sein und wegen der iterativen Eigenschaft der Ökobilanz während der Studie angepasst werden. Die Festlegung des Ziels bestimmt neben der beabsichtigten Anwendung die Gründe für die Durchführung der Studie sowie die angesprochene Zielgruppe. Außerdem muss hier definiert werden, ob die Ergebnisse für vergleichende Aussagen veröffentlicht werden sollen. Im Untersuchungsrahmen werden die zu untersuchenden Produktsysteme beschrieben und deren Funktionen aufgezeigt. Diese dienen als Grundlage für die Definition der funktionellen Einheit. Der Hauptzweck der funktionellen Einheit ist die Festlegung einer Bezugsgröße, auf die alle Input- und Outputdaten normiert werden. Mithilfe dieser Bezugsgröße ist es möglich verschiedene Systeme miteinander zu vergleichen. Weiterhin müssen im Untersuchungsrahmen die Systemgrenzen festgelegt werden. Diese bestimmen wie detailliert die Untersuchung durchgeführt wird und welche Prozessmodule in das System einzubinden sind. Im Idealfall sollte das System so modelliert werden, dass seine Inputs und Outputs Elementarflüsse sind. Des Weiteren sind Erläuterungen zur Datenqualität, den untersuchten Wirkungskategorien und des Allokationsverfahrens Bestandteil des Untersuchungsrahmens [DIN-14044, S. 15ff.].

6.1.2 **Sachbilanz**

Die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen liefert das Anfangskonzept für die Erstellung der Sachbilanz. Diese beinhaltet neben der Datenerhebung hauptsächlich die Datenberechnung und die Allokation von Flüssen und Emissionen. Die Datenerhebung ist in der Regel ein sehr aufwendiger Prozess, da sämtliche Input- und Outputdaten für jedes Prozessmodul, das innerhalb der Systemgrenze liegt, gesammelt werden müssen [DIN-14044, S. 23]. Schon bei einfachen Systemen sind zahlreiche Daten erforderlich. Es ist deswegen unvermeidlich auf Datenbanken zurückzugreifen, in denen viele Standardprozesse hinterlegt sind. Zusätzlich benötigte Daten können aus Unternehmensangaben, eigenen Messungen und Berechnungen oder veröffentlichten Quellen stammen. Um einheitliche Ergebnisse zu bekommen und aussagekräftige Schlussfolgerungen zu treffen, müssen die Daten hinsichtlich Datenqualität sowie geografischer und zeitlicher Aspekte der Datenerhebung untersucht werden. Praktische Einschränkungen bei der Datenerhebung sollten bereits im Untersuchungsrahmen berücksichtigt werden [DIN-14040, S. 26].

Datenbanken werden in der Regel in Softwarelösungen für die Ökobilanzierung eingegliedert, mit denen die Berechnungsverfahren durchgeführt werden können, um die gewünschten Ergebnisse für die festgelegte funktionelle Einheit zu erhalten. Die bekanntesten Ökobilanz-Softwares sind thinkstep GaBi, SimaPro, Umberto NXT LCA und die Open Source Software openLCA [Lüd-2014, S. 4]. Bei der Berechnung wird für jedes Prozessmodul ein geeigneter Fluss bestimmt und die quantitativen Input- und Outputdaten mit Bezug auf diesen Fluss berechnet. Die Flüsse aller Prozessmodule werden dann auf den Referenzfluss der funktionellen Einheit bezogen. Die In- und Outputs müssen den verschiedenen Produkten eindeutig zugeordnet werden. Bei Prozessen, die mehrere Produkte erzeugen oder verwerten, ist deshalb die Anwendung von Allokationsverfahren notwendig [DIN-14044, S. 26ff.].

6.1.3 **Wirkungsabschätzung**

Ziel einer Ökobilanz ist es, alle Umwelteinflüsse und Umweltwirkungen eines Produktsystems zu quantifizieren. Die Sachbilanz liefert die Umwelteinflüsse des untersuchten Produktsystems. In der Phase der Wirkungsabschätzung werden die Daten der Sachbilanz mit Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft und dadurch die spezifischen Umweltwirkungen bestimmt. Da in DIN EN ISO 14044 keine feste Liste an Wirkungskategorien vorgegeben ist, obliegt die Auswahl den Erstellern der Ökobilanz [Klö-2009, S. 203]. Es gibt verschiedene Methoden der Wirkungsabschätzung. Einige davon sind wirkungsorientiert und stellen somit ihre Ergebnisse bezüglich einer Reihe von Wirkungsindikatoren dar, die voneinander unabhängig sind (z.B. CO_2-Äquivalent für Wirkungskategorie Treibhauseffekt und PO_4-Äquivalent für Wirkungskategorie Eutrophierung). Schadensorientierte Methoden aggregieren die Umweltwirkungen weiter auf in die Schadenskategorien menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen. Vollaggregierte Methoden gehen noch weiter und aggregieren die Schadenskategorien auf ein eindimensionales Ergebnis. Sie vereinfachen die Entscheidungsfindung, sind jedoch aufgrund der subjektiven Gewichtung der Schadenskategorien umstritten [Jep-2015, S. 11, Hel-2015, S. 84]. Die in DIN EN ISO 14040/14044 geforderte Wirkungsabschätzung entspricht weitgehend der Struktur der international anerkannten wirkungsorientierten CML-Methode, die am Zentrum der Umweltwissenschaften der Universität Leiden entwickelt wurde. In dieser werden die einzelnen Stoffe verschiedenen Umweltauswirkungen zugeordnet und diese in Wirkungskategorien zusammengefasst. Es gilt zu beachten, dass mit der CML-Methode nur potenzielle Umweltauswirkungen untersucht werden und keine tatsächliche Risikoanalyse durchgeführt wird. Grundsätzlich wird zwischen inputbezogenen, outputbezogenen und toxizitätsbezogenen Wirkungskategorien unterschieden. In Tabelle 6-1 sind die verschiedenen Wirkungskategorien der CML-Methode aufgelistet.

Tabelle 6-1: Wirkungskategorien nach der CML-Methode, [Jep-2015]

Wirkungskategorie	Beschreibung	Wirkungsindikator
Abiotischer Ressourcenverbrauch	Verbrauch elementarer Ressourcen (Luft, Wasser, Mineralien, fossile Brennstoffe)	Sb-Äquivalent
Biotischer Ressourcenverbrauch	Verknappung lebender Naturgüter (Pflanzen, Tiere)	Ressourcenverknappungsfaktor
Naturraumbeanspruchung	Flächenbezogene Umweltbelastungen	m²/Jahr
Kumulierter Energieaufwand	Maß für den Primärenergiebedarf	MJ
Treibhauseffekt	Erwärmung der Erdatmosphäre	CO_2-Äquivalent
Eutrophierung	Überdüngung von Böden und Gewässern	PO_4-Äquivalent
Versauerung	Auswirkung versauernder Emissionen auf Boden und Luft	SO_2-Äquivalent
Bildung von Photooxidantien	Bodennahe Ozonbildung durch Photooxidantien (Sommersmog)	Ethen-Äquivalent
Stratosphärischer Ozonabbau	Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	R11-Äquivalent
Humantoxizität	Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit durch toxische Effekte	stoffabhängig
Ökotoxizität	Toxische Beeinflussung von Ökosystemen	stoffabhängig

6.1.4 **Auswertung**

Die letzte Phase der Ökobilanz ist die Auswertung. In dieser werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung zusammengeführt, um daraus Einschränkungen, Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Politik und andere Entscheidungsträger abzuleiten [Klö-2009, S. 355]. Hierzu werden die signifikanten Parameter bezüglich des festgelegten Ziels identifiziert und eine Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung durchgeführt. So lassen sich Unsicherheiten der Ergebnisse herausarbeiten und beurteilen [DIN-14044, S. 45]. Die Auswertung in Ökobilanzen muss kritisch betrachtet werden, da verschiedene Umweltwirkungen miteinander verglichen werden sollen. Es muss abgewogen werden, welche Umweltauswirkungen den stärksten Einfluss auf die Umwelt ausüben, um geeignete Gegenmaßnahmen zu treffen. Diese Vergleiche sind höchst umstritten, da eine subjektive Priorisierung der verschiedenen Umweltbereiche notwendig ist. Das Umweltbundesamt hat deswegen eine Rangbildung erstellt, die die Wirkungskategorien nach bestimmten Kriterien einordnet. Je größer die ökologische Gefährdung der Aspekte menschliche Gesundheit, Struktur und Funktion von Ökosystemen und natürliche Ressourcen ist, desto umweltschädigender ist eine Wirkungskategorie. Das bedeutet, dass globale und irreversible Umweltwirkungen stärker gewichtet werden als lokale und zeitlich begrenzte Umweltwirkungen. Des Weiteren spielt der Handlungsdruck für ein Umweltproblem eine Rolle.

Ist der derzeitige Umweltzustand weit von dem angestrebten Zustand entfernt und bedarf es grundlegender Veränderungen um diesen zu erreichen, muss die Umweltwirkung stärker gewichtet werden. Ist der spezifische Anteil einer Umweltauswirkung an den Gesamtbelastungen in Deutschland hoch, wird diese ebenfalls höher priorisiert [Umw-2000, S. 5f.].

6.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz

6.2.1 **Zieldefinition**

Ziel der im Rahmen von H2IntraDrive durchgeführten Ökobilanz ist der Vergleich von Umweltauswirkungen, die über den Lebenszyklus von batteriebetriebenen Flurförderzeugen und wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen entstehen. Konkret wird hierfür ein drei Tonnen Schlepper mit Blei-Säure-Batterie (E-Schlepper) bzw. Brennstoffzellensystem (H_2-Schlepper) als Referenzfahrzeug der Klasse drei Flurförderzeuge gewählt. Des Weiteren wird ein 3,5 Tonnen Gabelstapler mit Blei-Säure-Batterie (E-Gabelstapler) bzw. Brennstoffzellensystem (H_2-Gabelstapler) als Referenzfahrzeuge der Klasse eins verglichen. Mit Hilfe der Untersuchungen sollen Unterschiede bei den Umweltauswirkungen aufgezeigt werden, die durch die verschiedenen Antriebstechnologien entstehen. Dadurch kann beurteilt werden, wie ökologisch nachhaltig H_2-Flurförderzeuge gegenüber E-Flurförderzeugen sind, welche den heutigen Stand der Technik darstellen. Da die Bewertung auf den direkten Vergleich zweier Antriebstechnologien abzielt, werden vergleichende Aussagen nur innerhalb der Arbeit sowie innerhalb der Flurförderzeugklassen getroffen. Der Bezug zu anderen Ökobilanzen wird nicht hergestellt.

6.2.2 **Produktsysteme**

Entsprechend der Zieldefinition werden Schlepper und Gabelstapler mit den zwei unterschiedlichen Antriebstechnologien Blei-Säure Batterie und Brennstoffzellensystem untersucht. Wie in Abbildung 6-3 dargestellt, bestehen diese Produktsysteme aus den Prozessmodulen Herstellung Flurförderzeug, Herstellung Power Unit, Service und Wartung, Betrieb sowie Recycling und Entsorgung. In dem Prozessmodul Herstellung Flurförderzeug werden sämtliche Prozesse zur Gewinnung und Verarbeitung der Rohstoffe berücksichtigt, die für die Herstellung der Fahrzeuge benötigt werden. Die fertigen Stahl-, Guss-, Leichtmetall- und Kunststoffbauteile werden zusammengebaut und die erforderlichen Betriebsstoffe eingefüllt. Das Vorgehen für die unter dem Begriff Power Unit zusammengefassten Blei-Säure Batterien und Brennstoffzellensysteme erfolgt analog. Die fertige Power Unit wird in den Gabelstapler integriert. Im Prozessmo-

dul Service und Wartung wird die Rohstoffgewinnung und Herstellung der Wartungsprodukte berücksichtigt. Hierzu zählen z.B. beim Gabelstapler die Reifen, Gabelzinken und Betriebsstoffe, die über die Lebensdauer des Flurförderzeuges abgenutzt oder verbraucht werden. Da die Wartung von externen Servicekräften durchgeführt wird, fallen Servicefahrten an. Das Prozessmodul Betrieb beinhaltet die komplette Prozesskette zur Strom- bzw. Wasserstofferzeugung. Es entstehen keine betriebsbedingten Emissionen bei E- bzw. H_2-Flurförderzeugen. Die Fahrzeuge werden nach dem Ende ihrer Haltbarkeit zu Recycling- und Entsorgungsbetrieben transportiert. Dort werden sie zerlegt und die Materialien aufbereitet oder entsorgt. Recycelte Materialien, die nicht in den Produktkreislauf zurückgeführt werden, werden mittels Gutschrift verrechnet. Sämtliche Transportvorgänge zwischen und innerhalb der Prozessmodule werden berücksichtigt und separat zusammengefasst.

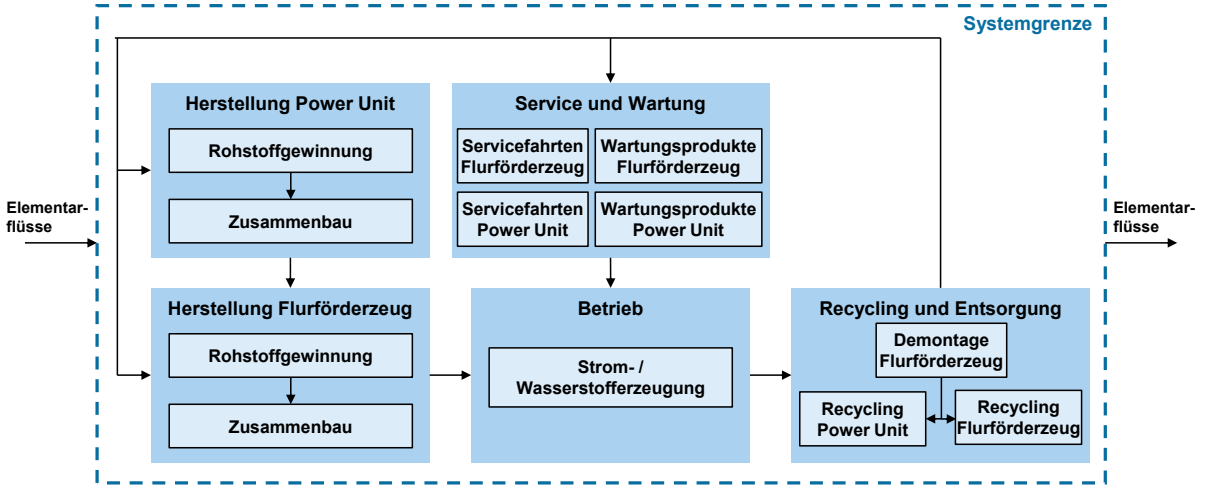

Abbildung 6-3: Systemgrenze inkl. Unterteilung der Produktsysteme

6.2.3 **Systemgrenzen und Allokation**

Die in Abbildung 6-3 dargestellte Systemgrenze schließt die Herstellung, die Nutzung, die Verwertung und den Transport der Flurförderzeuge und Power Units mit ein. Der Bau und die Instandhaltung von Produktionsanlagen, Batterieladestationen und der Wasserstoffinfrastruktur unterscheiden sich deutlich bei unterschiedlichen Anwendeungen und werden infolgedesssen nicht berücksichtigt. Inputmaterialien werden berücksichtigt, wenn sie im jeweiligen Teilprozess des Lebensweges mehr als ein Prozent der Masse des gewünschten Outputs oder mehr als ein Prozent des Energieverbrauchs in dem Prozess umfassen. Gleichzeitig soll die Summe der vernachlässigten Stoffmengen bei einem Prozess nicht mehr als fünf Prozent des Outputs betragen. Der geografische Rahmen dieser Studie ist die Flurförderzeugherstellung, -nutzung und -verwertung in Deutschland. Sind keine auf Deutschland bezogenen Prozessdaten zugänglich, wird auf europäische Prozessdaten zurückgegriffen. Einige der verwendeten Rohmaterialien werden weltweit produziert und durch die deutsche Industrie bezogen.

Die Produktion in den Herkunftsbereichen und der Transport nach Deutschland werden in der Modellierung berücksichtigt. Die Materialzusammensetzung der Gabelstapler wurde zusammen mit Linde Material Handling erhoben. Die Batterien und die Brennstoffzelle sind nach dem aktuellen Stand der Technik modelliert. Für Prozessdaten gilt ein Bezugszeitraum zwischen 2007 und 2016. Das bedeutet, dass die Gültigkeit der verwendeten Daten auf diesen Zeitraum zutrifft bzw. möglichst nahe an diesen heranreicht. Durch die Wahl der Systemgrenze verbleiben alle Produkte im Systemkreislauf, lediglich Elementarflüsse verlassen die Systemgrenze. Ferner werden Koppelprodukte in der Herstellung aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt. Eine Allokation kann dadurch vermieden werden. Ein Teil der Sekundärrohstoffe aus dem Recycling wird in den Kreislauf zurückgeführt und ersetzt einen Teil der Primärrohstoffe in der Herstellung. Die restlichen Sekundärrohstoffe werden durch Gutschriften angerechnet.

6.2.4 **Funktionelle Einheit und Referenzfluss**

Die entsprechend der Zieldefinition untersuchten Flurförderzeuge haben die Primärfunktion Güter zu transportieren, umzuschlagen und zu stapeln (nur Gabelstapler) [Gro-2014, S. 51]. Es wird davon ausgegangen, dass die beiden unterschiedlichen Antriebstechnologien diese Funktion in gleichwertiger Art und Weise erfüllen. Des Weiteren wird eine identische Lebensdauer der einzelnen Flurförderzeugtypen angenommen. Um die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus auf den ersten Blick erfassen zu können, wird die Lebensdauer der Schlepper bzw. Gabelstapler als funktionelle Einheit definiert. Diese beträgt laut Hersteller 10.000 Betriebsstunden beim Schlepper sowie 20.000 Betriebsstunden beim Gabelstapler. Den Referenzfluss bildet die Masse an Batterien, Brennstoffzellen, Wartungsprodukten und Flurförderzeugen, die in diesem Zeitraum benötigt werden.

6.2.5 **Datenerhebung und Datenqualität**

Die meisten Produktsysteme beinhalten zahlreiche Prozesse mit mehreren hundert Emissionen und Ressourcenverbräuchen. Zur Vermeidung von extrem zeitaufwendigen Datenerhebungen werden deshalb Datenbanken verwendet, welche Ökobilanz-Daten zu Basisprozessen enthalten. Im Rahmen dieser Untersuchung werden Datenbanken der Ökobilanzierungssoftware thinkstep GaBi verwendet. In ihnen sind zahlreiche Prozessdaten zu Rohstoffgewinnung, Transport sowie Wasserstoff- und Stromerzeugung enthalten. Diese basieren auf einem belastbaren Durchschnitt des Verbrauchsmix in Deutschland. Einige Rohstoffe sind in den GaBi-Datenbanken nicht enthalten. Beträgt ihr Massenanteil unter einem Prozent werden sie nicht berücksichtigt. Andernfalls werden Angaben zum Energiebedarf der Rohstoffgewinnung aus der recherchierten Literatur entnommen. Das Vordergrundsystem wird spezifisch modelliert.

Die Grundlage zu Produktion und Recycling von Flurförderzeugen, Batterien und Brennstoffzellensystemen bilden diverse Publikationen. Daten zu Service und Wartung beruhen auf Erfahrungswerten der Projektpartner und werden mit Literaturdaten ergänzt. Die Energieverbräuche der Flurförderzeuge entsprechen dem Energieverbrauch nach dem VDI-Zyklus und stammen aus den Produktdatenblättern [Lin-2015a, Lin-2015b]. Angaben zu den Wirkungsgraden der Batterien und Ladegeräte entstammen ebenfalls der Literatur [VDI-2008]. Die Wirkungsgrade der Brennstoffzellensysteme beruhen hingehen auf Herstellerangaben.

6.2.6 **Art der Wirkungsabschätzung**

Im Rahmen der Untersuchungen wird ein wirkungsorientierter Ansatz entsprechend der CML-Methode verwendet. Diese Methode stellt die Ergebnisse in voneinander unabhängigen Wirkungskategorien dar, die nicht weiter zusammengefasst werden. Im Speziellen wird die outputbezogene Wirkungskategorie Treibhauseffekt untersucht. Dieser bezieht sich dabei auf einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP100).

6.3 Modellerstellung und Sachbilanz

Auf Basis des festgelegten Untersuchungsrahmens werden für die Sachbilanz alle Input- und Outputströme innerhalb der definierten Systemgrenzen erfasst und den jeweiligen Lebensphasen zugeordnet. Entsprechend den definierten Produktsystemen werden mit der Ökobilanzierungssoftware thinkstep GaBi die einzelnen Lebensphasen modelliert. Als Beispiel für die Modellierung in GaBi ist in Abbildung 6-4 das Gesamtmodell des E-Gabelstaplers zu sehen.

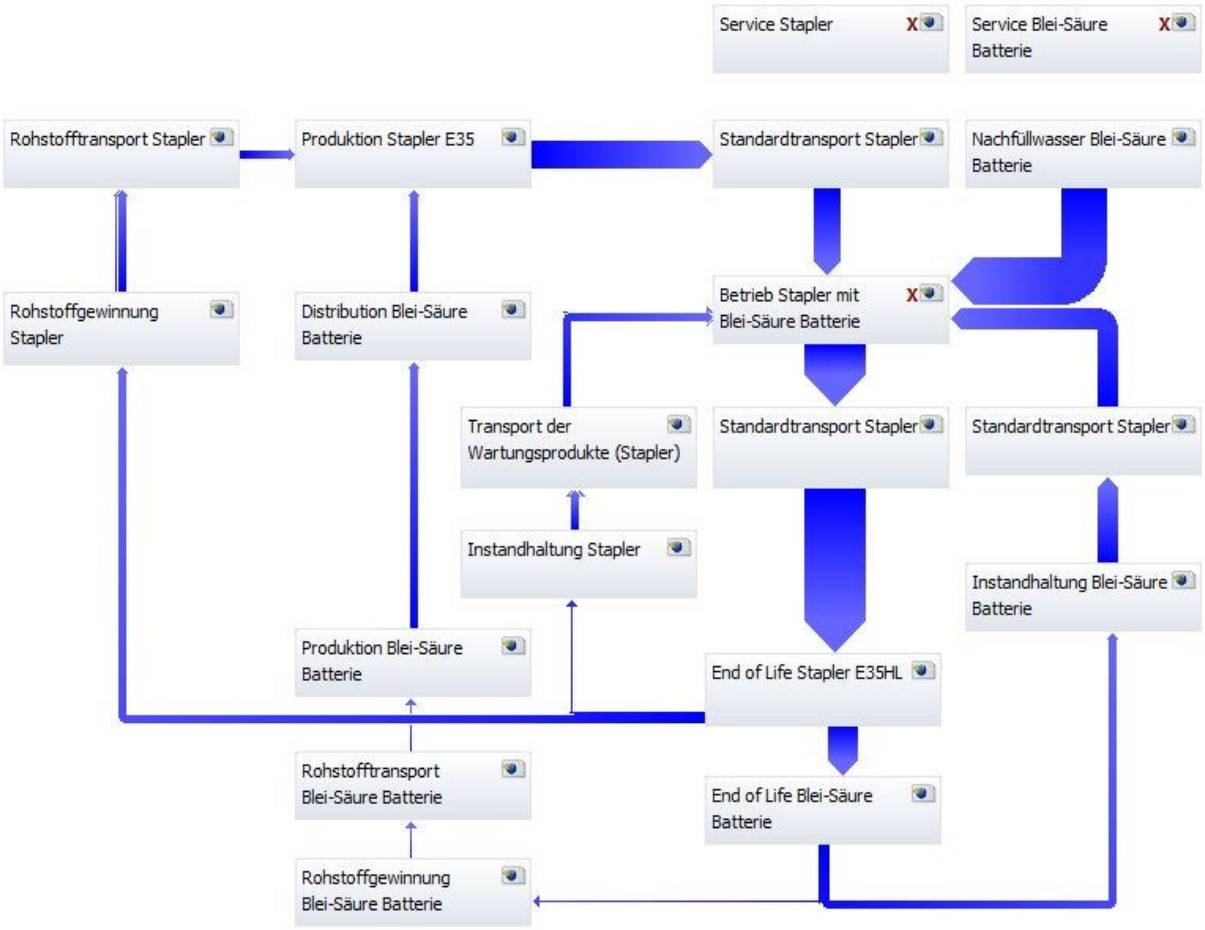

Abbildung 6-4: Gesamtmodell E-Gabelstapler in GaBi

6.3.1 **Herstellungsphase Flurförderzeug**

Die Materialzusammensetzung der verschiedenen Flurförderzeuge wurde von Linde MH erhoben und entspricht den in Tabelle 6-2 aufgelisteten Werten. Die Schlepper bestehen größtenteils aus Stahl. Bei den Gabelstaplern stellen hingegen Stahl- und Gussbauteile den größten Anteil der Masse. Der Anteil der Batterie bzw. des Brennstoffzellensystems beträgt jeweils ca. ein Drittel an der Gesamtmasse, wobei es zwischen der Masse des Brennstoffzellensystems und der der Batterie einen Unterschied gibt. Um dies zu kompensieren wurde beim H_2-Gabelstapler ein Zusatzgewicht aus Stahl- und Gussbauteilen ergänzt. Weitere Fahrzeuganpassungen am Gabelstapler für den Brennstoffzellensystembetrieb bringen einen hohen Konstruktionsaufwand mit sich und haben so gut wie keine Auswirkungen auf die Gesamtmasse des Fahrzeuges. Infolgedessen können diese vernachlässigt werden. Dasselbe gilt auch für den Schlepper.

Tabelle 6-2: Materialdaten der Flurförderzeuge (Quelle: Linde MH)

Material / Komponenten	E-Schlepper	H_2-Schlepper	E-Gabelstapler	H_2-Gabelstapler
Stahl	56%	58%	33%	33%
Guss	6%	6%	28%	29%
Bunt/Leichtmetalle	2%	2%	1%	1%
Kunststoffe	5%	5%	4%	4%
Batterie	31%	0%	33%	0%
Brennstoffzellensystem	0%	29%	0%	28%
Betriebsstoffe	0,3%	0,3%	0,9%	1%
H_2-Fahrzeuganpassung	0%	0%	0%	4%
Summe	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**

Bei der Herstellung der Materialien werden Primär- und Sekundärrohstoffe verwendet. Primärrohstoffe sind natürliche Ressourcen, die direkt gefördert werden. Sekundärrohstoffe werden dagegen in Recyclingprozessen gewonnen. Bei der Stahlherstellung für die Flurförderzeuge beträgt der Anteil an sekundärem Stahl 46 Prozent [Huy-2013, S. 35]. Dieser wird über die Elektrolichtbogenroute hergestellt, die als GaBi-Prozess vorliegt. Primärstahl wird über die Hochofenroute produziert. Es wird der gesamte Weg von der Rohstoffgewinnung bis zur fertigen Bramme (Stahlblock) modelliert. Die Brammen werden in verschiedenen Verfahren (spanende Bearbeitung, Schmieden) zu den benötigten Stahlbauteilen weiterverarbeitet. Hierbei fällt Stahlschrott an, der in die Ausgangsprozesse zurückgeführt wird. Die Herstellung der Gussbauteile erfolgt analog. Der Bunt- und Leichtmetallanteil besteht zu einem Drittel aus Kupfer und zu zwei Dritteln aus Aluminium. Über geeignete Prozesse werden das Rohkupfer zu Kabel und Kupferbauteilen und das Rohaluminium zu Aluminiumbauteilen weiterverarbeitet. Die Kunststoffherstellung erfolgt durch eine Kombination aus Spritzguss- und Extrusionsprozessen in GaBi mit einem Kunststoffgranulatmix als Ausgangsstoff. Als Betriebsstoff wird der in GaBi hinterlegte Prozess Schmierstoffe ab Raffinerie verwendet. Zur Montage des Gabelstaplers sind keine Prozessdaten verfügbar. Bei Annahme eines gleichen Energiebedarfs bei Montage und Demontage werden Literaturdaten herangezogen. Nach *Jochem et al*. beträgt der Energiebedarf bei der vollständigen Demontage eines Kraftfahrzeugs 9 kWh pro Tonne [Joc-2004, S. 56]. Die Batterien und die Brennstoffzelle werden in der Montagephase in die Flurförderzeuge integriert.

6.3.2 **Herstellungsphase Power Unit**

Blei-Säure Batterie

Für die Auswahl der Blei-Säure Batterien stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Aufgrund der deutlich höheren Verbreitung werden PzS Batterien für den Vergleich herangezogen. Ferner kann zwischen Batterien mit und ohne Elektrolytumwälzung unterschieden werden. Hinsichtlich der Definition eines sogenannten Best-Case-Szenarios für die Batterietechnologie mit einer sehr hohen Energieeffizienz werden für den Vergleich Batterien mit Elektrolytumwälzung verwendet. Die Zusammensetzung der Blei-Säure Batterie wird entsprechend den in Tabelle 6-3 aufgelisteten Materialanteilen modelliert. Hierbei handelt es sich nicht um die tatsächliche Zusammensetzung der eingesetzten Batterie, sondern um Richtwerte aus einbezogener Literatur. Die Gesamtmasse besteht zu 61 Prozent aus Blei, das damit den größten Anteil darstellt. Der Elektrolyt aus mit Wasser verdünnter Schwefelsäure stellt etwa 27 Prozent der Masse. Der restliche Anteil setzt sich hauptsächlich aus den Materialien Polypropylen, Sauerstoff und Polyethylen zusammen. Die Legierungsbestandteile Antimon, Glas, Arsen und Kupfer weisen einen Massenanteil von unter ein Prozent auf und werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 6-3: Materialbestandteile der Blei-Säure Batterie, [Ker-1996] zitiert nach [Ran-1999]

Material	Massenanteil
Blei	61,0%
Wasser (entsalzt)	16,9%
Schwefelsäure	10,3%
Polypropylen	6,7%
Sauerstoff	2,3%
Polyethylen	1,8%
Antimon	0,7%
Glas	0,2%
Arsen	0,03%
Kupfer	0,01%
Gesamt	**100%**

In Deutschland kommt die Produktion von Blei zu 70 Prozent aus Sekundärmaterial [Huy-2013, S. 39]. Dieses Sekundärblei wird in der Recyclingphase gewonnen und in den Produktkreislauf zurückgeführt. Die Gewinnung und Herstellung von Primärblei, entsalztem Wasser, Schwefelsäure, Polypropylen und Polyethylen werden durch entsprechende GaBi-Prozesse abgedeckt. Die Herstellung der Elektrodengerüste, des

Bleidioxids und der Aktivmaterialpaste sowie die Trocknung, Aushärtung und Formierung wird aufgrund fehlender Daten nicht explizit modelliert. Stattdessen wird der gesamte Energiebedarf der Herstellung der Batterie berücksichtigt. Dieser beträgt nach *Sullivan und Gaines* 9,6 MJ pro Kilogramm [Sul-2012, S. 139].

Brennstoffzellensystem

Die untersuchten Brennstoffzellensysteme werden auf Basis von Herstellerangaben modelliert. Die einzelnen Komponenten und ihre Massenanteile sind in Tabelle 6-4 dargestellt. Den größten Massenanteil stellen die Gehäuseteile und Aufhängungen aus Stahl und Kunststoff mit 50 Prozent bzw. 69 Prozent. Der Wasserstofftank und die Anlagenperipherie tragen mit 36 Prozent bzw. 13 Prozent und 7 Prozent bzw. 9 Prozent ebenfalls erheblich zum Gewicht bei. Unter Anlagenperipherie werden alle zusätzlich benötigten Komponenten wie das Luftversorgungssystem, die Druckregler, die Ventile etc. zusammengefasst. Der Anteil der für die Energiebereitstellung zuständigen Komponenten (Brennstoffzellen-Stapel und Li-Ionen Batterie) ist mit 6 Prozent bzw. 8 Prozent vergleichsweise gering. Dies ist damit zu begründen, dass im Brennstoffzellen-Stapel keine Energie gespeichert wird, sondern die chemische Energie des extern gespeicherten Wasserstoffs in elektrische Energie umgewandelt wird. Die Brennstoffzelle versorgt die Li-Ionen Batterie und hält sie auf einem optimalen Ladezustand. Leistungsspitzen des Gabelstaplers werden durch die Batterie abgedeckt [Nin-2014b].

Tabelle 6-4: Materialdaten der Brennstoffzellensysteme, (Quelle: Brennstoffzellensystemhersteller)

Material / Komponenten	H_2-Schlepper		H_2-Gabelstapler	
	Masse [kg]	Massen-anteil [%]	Masse [kg]	Massen-anteil [%]
Brennstoffzellen-Stapel (Stack)	8	3%	55	4%
Li-Ionen Batterie	8	3%	55	4%
Wasserstofftank	95	36%	207	13%
Elektronik	4	1%	28	2%
Anlagenperipherie (Balance of Plant)	19	7%	138	9%
Gehäuseteile und Aufhängungen (Stahl)	121	45%	966	62%
Gehäuseteile und Aufhängungen (Kunststoff)	13	5%	107	7%
Summe	**268**	**100%**	**1.558**	**100%**

Die Materialanteile der eingesetzten Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen sind in Tabelle 6-5 aufgeführt. Sie bestehen zu über 50 Prozent aus Stahl, Kupfer und Aluminium. Die Rohstoffgewinnung und Herstellung von Platin, Kohlenstoff, PTFE, Zinn und Polyetheretherketon (PEEK) sind in den verfügbaren GaBi-Datenbanken nicht vorhan-

den und werden nicht berücksichtigt. Ihr Massenanteil beträgt in der Summe 0,5 Prozent der gesamten Brennstoffzelle, wodurch die ein Prozent Abschneideregel nicht verletzt wird. Die restlichen Komponenten bestehen aus einem Mix aus Stahl, Aluminium, Kupfer, Messing und Kunststoffen. Analog zur Blei-Säure Batterie wird bei der Produktion der Brennstoffzelle aufgrund mangelnder Daten nur der Energiebedarf berücksichtigt. Die Herstellung des Brennstoffzellenstacks ist dabei der energieintensivste Aspekt. Dieser beträgt nach Staffell und Ingram 7,68 MJ pro Kilogramm [Sta-2010a, S. 2497f.].

Tabelle 6-5: Materialdaten Brennstoffzellen-Stapel, [Sta-2010b, S. 2497f.]

Material	Massenanteil
Stahl	20,9%
Kupfer	16,4%
Aluminium	15,4%
High-Density Polyethylen (HDPE)	9,2%
Graphit	8,9%
Zinn	8,2%
Kabel	7,5%
Polyetheretherketon (PEEK)	6,0%
Schrauben	4,5%
Polyurethan	3,0%
Kathodenkohlenstoff	0,09%
PTFE	0,01%
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)	0,06%
Platin	0,002%
Gesamt	**100,00%**

6.3.3 **Nutzungsphase**

Die Nutzungsphase beginnt nach der Distribution der fertig produzierten Flurförderzeuge und endet mit dem Transport zu den Verwertungsbetrieben und Abfallentsorgungsanlagen. Sie besteht im Wesentlichen aus drei Bereichen. Zum einen wird die Erzeugung und Bereitstellung des erforderlichen Energieträgers (Strom oder Wasserstoff) betrachtet. Ferner wird der Energie- und Wasserstoffbedarf über die gesamte Lebensdauer der Fahrzeuge ermittelt. Den dritten Bereich bilden der Service und die Wartung der Flurförderzeuge, Batterien und Brennstoffzellensysteme.

Strom und Wasserstofferzeugung

Für das Laden der Batterien wird Strom benötigt. Dieser kann auf unterschiedliche Arten erzeugt werden. Entsprechend Abbildung 6-5 wird fast die Hälfte des deutschen Stroms in Braun- und Steinkohlekraftwerken produziert. Bei der Verbrennung von Kohle zur Stromerzeugung entstehen große Mengen an CO_2, das die globale Erwärmung vorantreibt. Der Anteil von emissionsarmen Atomstrom beträgt 15,9 Prozent. Die Erzeugung in Kernkraftwerken verursacht jedoch radioaktive Abfälle. Mit 25,8 Prozent spielt Strom aus erneuerbaren Energien eine bedeutende Rolle in der deutschen Stromerzeugung. Er stammt aus Windkraftanlagen, Wasserkraftwerken, Biomassekraftwerken und Photovoltaikanlagen [Age-2015, Wag-2007]. Für die Bestimmung der Emissionen aus der Stromerzeugung wird zum einen der deutsche Strommix verwendet, welcher als Gabi-Prozess verfügbar ist. Zum anderen wird Strom aus erneuerbaren Energien (Grüner Strom) verwendet. Die Zusammensetzung wird entsprechend den Anteilen der erneuerbaren Energien in Abbildung 6-5 modelliert.

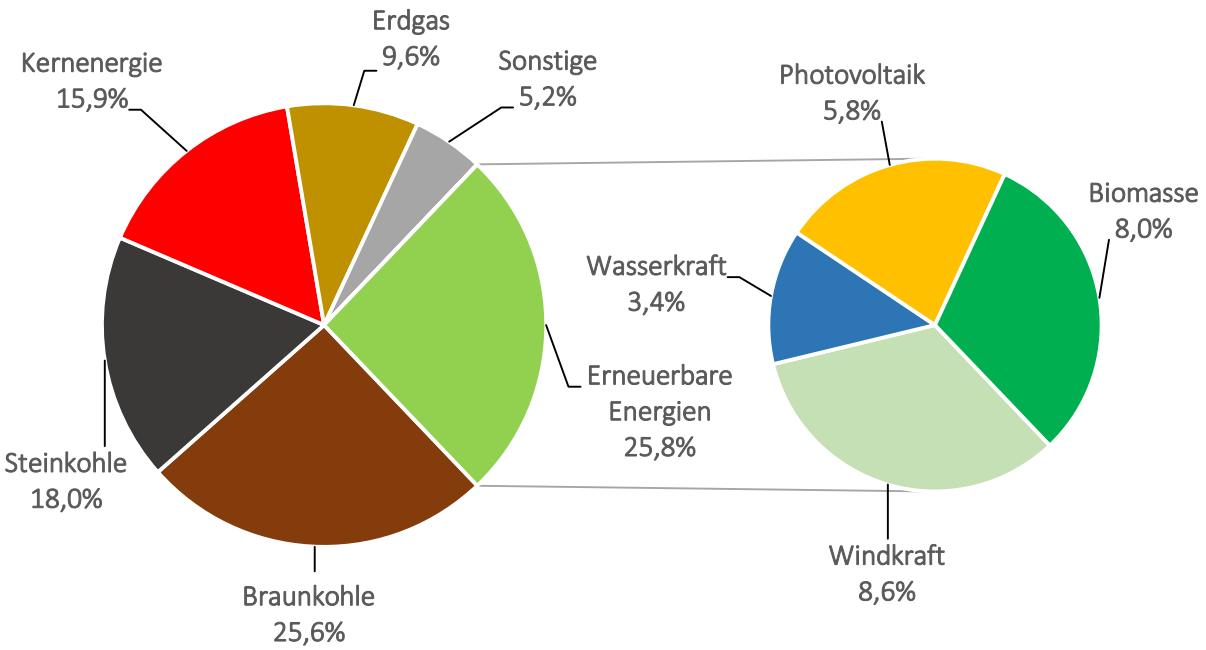

Abbildung 6-5: Deutscher Strommix 2014, [Age-2015]

Der für den Betrieb der H_2-Flurförderzeuge benötigte Wasserstoff kann, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, durch unterschiedliche Verfahren produziert werden. Die Wasserstoffherstellung durch die Dampfreformierung von Erdgas ist in der GaBi-Datenbank hinterlegt und wird für den Vergleich der konventionellen Energiepfade ausgewählt. Zusätzlich wird grün zertifizierter Wasserstoff (GreenHydrogen) aus der Elektrolyse von Wasser untersucht. Für dieses Verfahren sind vom TÜV Süd Treibhausgas-Minderungspotentiale von mindestens 75 Prozent gegenüber dem Vergleichswert für konventionell hergestellten Wasserstoff bzw. fossiler Kraftstoffe vorgegeben. Dieses Minderungspotential entspricht den höchsten Anforderungen laut der TÜV-Zertifizierung

[TÜV-2011, S. 7]. Infolgedessen wird Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser als Best Case Szenario für den Vergleich der grünen Energiepfade gewählt, wobei das Minderungspotential von 75 Prozent eine Mindestanforderung darstellt. Die eigentliche Treibhausgaseinsparung gegenüber dem Vergleichswert kann in der Praxis auch deutlich höher sein. Der Wasserstoff wird vor dem Betanken der Flurförderzeuge auf 350 bar verdichtet. Der dafür erforderliche Energiebedarf beträgt nach Kapitel 4.3.3 1,58 kWh pro Kilogramm Wasserstoff.

Betriebsdaten

Die wichtigsten Betriebsdaten der Flurförderzeuge sind in Tabelle 6-6 zusammengefasst. Um sämtliche Emissionen in der Nutzungsphase zu erfassen, muss der Strom- und Wasserstoffbedarf über die gesamte Lebensdauer der Fahrzeuge ermittelt werden. Der Energieverbrauch der Flurförderzeuge wurde anhand des Verbrauches nach dem VDI-Zyklus gewählt (siehe Kapitel 4.2.5.). Nach Angaben von Linde MH beträgt die Lebensdauer der Schlepper 10.000 und die der Gabelstapler 20.000 Betriebsstunden. Zusätzlich werden 2.500 bzw. 5.000 Standstunden berücksichtigt, in denen die Flurförderzeuge 0,01 kWh pro Stunde verbrauchen. Die Lebensdauerangaben der Batterien und Brennstoffzellensysteme stammen von Herstellern. Die Batterien halten dabei 6.000 und die Brennstoffzellensysteme 10.000 bzw. 20.000 Betriebsstunden. Als Batterien werden PzS-Batterien mit Elektrolytumwälzung verwendet, welche mit Hilfe von energieeffizienten Ladegeräten mit primär getakteter Technik (Hochfrequenzladegeräte) geladen werden. Infolgedessen kann während der Batterieladung von einem „Best-Case-Szenario“ mit den geringsten Energieverlusten gesprochen werden. Der Gesamtwirkungsgrad beläuft sich dabei auf 84 Prozent [VDI-2008]. Der Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems wird von Herstellern hingegen mit 45 Prozent angegeben.

Tabelle 6-6: Betriebsdaten Flurförderzeuge

	E-Schlepper	H_2-Schlepper	E-Gabelstapler	H_2-Gabelstapler
Lebensdauer Flurförderzeug [Bh]	10.000	10.000	20.000	20.000
Standstunden [h]	2.500	2.500	5.000	5.000
Lebensdauer Batterie bzw. Brennstoffzelle [Bh]	6.000	10.000	6.000	20.000
Wirkungsgrad Batterieladung bzw. Brennstoffzelle [%]	84	45	84	45
VDI-Verbrauch [kWh/h]	1,16	1,16	9,8	9,8
Standverbrauch [kWh/h]	0,01	0,01	0,01	0,01

Service und Wartung

Während der Betriebsphase werden einige Komponenten der Flurförderzeuge abgenutzt oder verbraucht. Diese müssen in regelmäßigen Intervallen ersetzt werden. Hierzu zählen insbesondere die Reifen, Betriebsstoffe, Gabelzinken und Ersatzbatterien. Die benötigte Anzahl und Menge ist in Tabelle 6-7 aufgelistet. Die Lebensdauer der Blei-Säure Batterie beträgt 6.000 Betriebsstunden. Daher sind über die Lebensdauer der Flurförderzeuge 0,7 bzw. 2,33 Ersatzbatterien erforderlich. Beim Laden der Blei-Säure Batterien wird je 3 Ah Überladung 1 Gramm Wasser zersetzt, das wieder nachgefüllt werden muss [Sal-2011, S. 76]. Die gesamte Nachfüllmenge berechnet sich bei einer Kapazität von 700 Ah, 40 Zellen und 1.500 Ladezyklen nach

$$m_{W} = \frac{(\boldsymbol{Ladefaktor} - \mathbf{1}) \times \boldsymbol{Kapazität} \times \boldsymbol{AnzahlZellen} \times \boldsymbol{Anzahl\ Ladezyklen})}{(\mathbf{3}\ \frac{\boldsymbol{Ah}}{\boldsymbol{g}}\ \times\ \mathbf{1000}\ \frac{\boldsymbol{g}}{\boldsymbol{kg}})} \quad (6\text{-}1$$

zu 3.267 Kilogramm für Batterien mit EUW. Die Wartung der Flurförderzeuge, Blei-Säure Batterien und Brennstoffzellen wird von externen Servicekräften alle 1.000 Betriebsstunden durchgeführt. Je Wegstrecke werden dabei 35 km zurückgelegt. Insgesamt ergibt sich bei 9 bzw. 19 Wartungen über die Lebensdauer der Flurförderzeuge eine Strecke von 630 bzw. 1.330 km. Die Servicefahrten werden mit einem benzinbetriebenen PKW mit einem Hubraum größer 2 Liter durchgeführt, der die Abgasnorm Euro 5 erfüllt. Die Verteilung der Fahrsituation wird mit 31 Prozent innerorts, 39 Prozent außerorts und 30 Prozent Autobahn angenommen.

Tabelle 6-7: Service- und Wartungsaufwand

	E-Schlepper	H_2-Schlepper	E-Gabelstapler	H_2-Gabelstapler
Vorderreifen [Anzahl]	3	3	12	12
Hinterreifen [Anzahl]	6	6	24	24
Betriebsstoffe [kg]	18	18	64	64
Ersatzbatterien [Anzahl]	0,7	0	2,3	0
Nachfüllwasser [kg]	263	0	3.267	0
Gabelzinken [Anzahl]	0	0	3	3
Servicefahrten [km Gesamt]	630	1.330	1.330	1.330

6.3.4 **Recycling und Entsorgung**

Nach der Nutzungsphase werden die Flurförderzeuge und Wartungsprodukte zu Recyclinganlagen transportiert. In diesen werden die Fahrzeuge teilweise zerlegt und die Power Units entfernt. Der dazu benötigte Energiebedarf beträgt 5 kWh/t [Joc-2004, S. 56]. Die Power Units werden speziellen Verwertungsbetrieben zugeführt. Die teilweise zerlegten Flurförderzeuge werden in einem Schredder zerkleinert, um die Grundmaterialien (Stahl, Aluminium, Kupfer, Kunststoffe) zu erhalten. Die dazu erforderliche Energie ist von den Materialanteilen abhängig und ergibt sich zu 56,4 kWh/t Stahl und 134,9 kWh/t Aluminium [Joc-2004, S. 57]. Ein Teil des Stahlschrotts fließt in die Herstellung der Primärrohstoffe und wird in den Produktkreislauf zurückgeführt. Der restliche Anteil wird ebenso wie der Aluminium- und Kupferschrott mithilfe von Gutschriften aus der GaBi-Datenbank verrechnet. Gutschriften berücksichtigen das Einsparpotential von Sekundärmaterialien im Vergleich zur Herstellung von Primärmaterialien. Der Kunststoff wird in Müllverbrennungsanlagen entsorgt, wobei die entstehende thermische Energie gutgeschrieben wird. Die Modellierung in GaBi ist für den H_2-Gabelstapler beispielhaft in Abbildung 6-6 dargestellt.

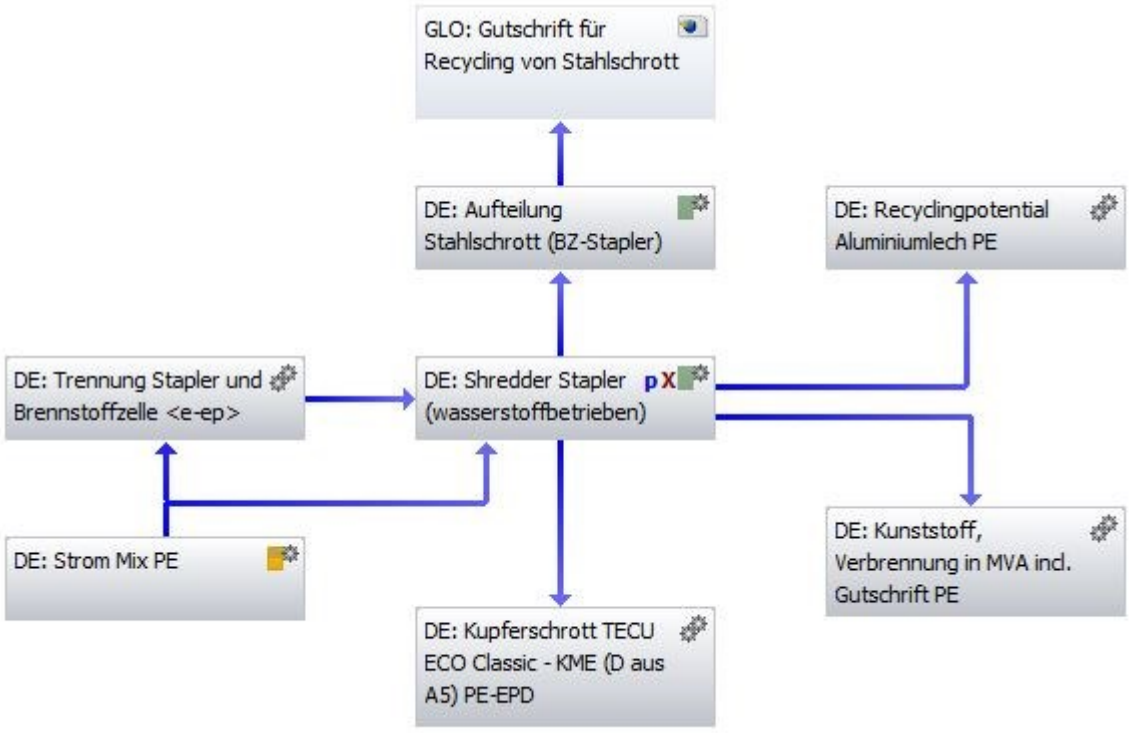

Abbildung 6-6: Recyclingprozess H_2-Gabelstapler

Für das Recycling von Blei-Säure Batterien existieren zwei unterschiedliche Verfahrenswege. Im Schmelzofenverfahren werden die Batterien aufgebrochen und in ihre Bestandteile (Bleigitter, Bleipaste, Kunststoffe, Säure) getrennt. Bleigitter und entschwefelte Bleipaste werden in Kurztrommelöfen weiterverarbeitet und anschließend

in Raffinationsprozessen aufbereitet. Im Schachtofenverfahren wird die von der Säure getrennte Batterie als Ganzes weiterverarbeitet. Dazu wird sie in einen Schachtofen eingeführt, in dem sie unter Zugabe von Zusatzstoffen wie Koks, Kalk, Eisenschrott und rückgeführter Schlacke aufgeschmolzen wird. Das Blei wird am unteren Ende des Ofens abgestochen und in Raffinationsprozessen aufbereitet [Ren-2001, S. 19ff.]. Für die vorliegende Bewertung wird das Batterierecycling mittels Schachtofenverfahren betrachtet. Die Inputs und Outputs für das Recycling von einer Batterie (ohne Elektrolyt) sind in Tabelle 6-8 aufgelistet. Das in der Batterieherstellung benötigte Sekundärblei wird zum Herstellungsprozess zurückgeführt. Der restliche Anteil wird per Gutschrift verrechnet. Die Entsorgung der Batteriesäure wird nicht berücksichtigt.

Tabelle 6-8: Verbrauchs- und Produktionsdaten der Schachtofenanlage, [Ren-2001, S. 222]

Inputs		Outputs	
Altbatterie (ohne Elektrolyt) [kg]	1.356	Sekundärblei [kg]	1.233
Bleischrott [kg]	394	Flugstaub [kg]	39
Kalk [kg]	18	Bleischlacke [kg]	62
Koks [kg]	148		
Eisenschrott [kg]	82		
Sauerstoff [kg]	38		
Erdgas [kg]	15		
Strom [MJ]	473		

Vom Recycling der Brennstoffzellensysteme sind keine genauen Prozessdaten bekannt. Es wird angenommen, dass der in der Primärmaterialherstellung benötigte Stahl- und Kupferschrott zurückgeführt wird. Der restliche Anteil wird zusammen mit dem Aluminiumschrott mittels Gutschrift verrechnet. Der Kunststoff wird analog zum Flurförderzeugrecycling in einer Müllverbrennungsanlage inklusive Gutschrift für die thermische Energie verwertet. Das Recycling der restlichen Materialbestandteile wird nicht berücksichtigt, da zu diesen keine Verwertungsprozesse in GaBi vorliegen.

6.3.5 **Transport**

Der Transport von Rohstoffen und Fertigprodukten wird zwischen jeder modellierten Lebensphase berücksichtigt. Als Transportmittel wird ein LKW der GaBi-Datenbank mit einem Gesamtgewicht von 28 bis 32 Tonnen und einer Nutzlast von 22 Tonnen verwendet, der die Abgasnorm Euro 4 erfüllt. Da die Länge der verschiedenen Transportstrecken nicht eindeutig bestimmt werden kann, wird für alle Transporte eine Strecke von 1.000 km angenommen. Die Auslastung der LKWs beträgt 85 Prozent und die

Fahrsituation wird folgendermaßen aufgeteilt: sieben Prozent innerorts, 23 Prozent außerorts, 70 Prozent Autobahn. Als Kraftstoff wird der europäische Diesel-Mix mit einem Schwefelgehalt von 10 ppm und einem biogenen Kraftstoffanteil von 5 Prozent verwendet.

6.4 Wirkungsabschätzung und Ergebnisse

Im Folgenden werden die Sachbilanzergebnisse den Wirkungskategorien zugeordnet und die Wirkungsindikatorwerte berechnet. Diese stellen die Ergebnisse der Ökobilanz dar. Entsprechend dem Untersuchungsrahmen wird die Wirkungskategorie Treibhauseffekt untersucht. Der Treibhauseffekt steht für die negative Umweltwirkung der anthropogen bedingten Erwärmung der Erdatmosphäre. Dazu zählt unter anderem die Erhöhung des Meeresspiegels, das Abschmelzen der Gletscher, die Zunahme katastrophaler Wetterereignisse und die Zunahme wärmebedingter Krankheiten [Klö-2009, S. 254]. Aus der Menge an Treibhausgasen, die in der Sachbilanz für die funktionelle Einheit ermittelt wurden, werden mithilfe von Charakterisierungsfaktoren die Wirkungsindikatorwerte bestimmt. Als Charakterisierungsfaktoren dienen die Treibhauspotentiale der verschiedenen Treibhausgase bezogen auf den CO_2-Äquivalenzwert für einen Zeithorizont von 100 Jahren (GWP100). Für die Berechnung des Wirkungsindikatorwertes werden die Emissionen mit ihren Charakterisierungsfaktoren multipliziert und aufaddiert. Das Treibhauspotential ergibt sich damit durch folgende Gleichung:

$$GWP = \sum_i (\boldsymbol{m_i \bullet GWP_i}) \tag{6-2}$$

Dabei stellt „m_i" die Masse der am Treibhauseffekt beteiligten Substanz „i" und „$\mathrm{GWP_i}$" das Treibhauspotential dieser Substanz dar.

Die Verknüpfung der Sachbilanzergebnisse mit der ausgewählten Wirkungskategorie und die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte erfolgt auf Basis des modellierten Systems automatisch in GaBi. In der Ergebnisdarstellung wird zwischen fünf Phasen unterschieden. In „Herstellung Flurförderzeug" werden zunächst die Rohstoffgewinnung sowie die Fertigung des Fahrzeuges ohne Batterie bzw. Brennstoffzelle zusammenfassend dargestellt. Zudem werden Emissionen bzw. Emissionsgutschriften aus dem Recyclingprozess berücksichtigt. In der zweiten Phase „Herstellung Power Unit" fließen alle Emissionen für die Herstellung der Batterien sowie eventueller Ersatzbatterien bzw. die Herstellung des Brennstoffzellensystems inkl. Recycling mit ein. Unter „Transport" werden die Emissionen aus allen Material- sowie Fertigprodukttransporten zusammenfassend dargestellt. Im Bereich „Service und Wartung" sind alle Emissionen

im Zusammenhang mit dem Service und der Wartung des Flurförderzeuges sowie der Power Unit (ohne Ersatzbatterien) dargestellt. Abschließend werden in der Phase „Betrieb“ die Emissionen aus der Erzeugung des im Betrieb verbrauchten Stroms und Wasserstoffs dargelegt.

6.4.1 **Schlepper**

In Abbildung 6-7 wird das Treibhauspotenzial (CO_2-Äquivalent) der Schlepper bei einer Betrachtung der konventionellen Energiepfade aufgezeigt, wobei alle Angaben im relativen Verhältnis zu den Gesamtemissionen des E-Schleppers dargestellt sind. Hierbei ist ersichtlich, dass die Emissionen für die Herstellung der Blei-Säure Batterien im Vergleich zum Brennstoffzellensystem mehr als doppelt so hoch sind. Dies ist u.a. auf die höheren Emissionen in der Fertigung und Rohstoffgewinnung sowie die geringere Lebensdauer der Batterie und die damit notwendige Verwendung von 0,7 Ersatzbatterien zurückzuführen. Im Vergleich der Betriebsphasen liegen hingegen die Umweltauswirkungen des brennstoffzellenbetriebenen Schleppers um ca. zwei Prozent über denjenigen des batteriebetriebenen. Diese werden jedoch durch die vorher genannten Emissionen bei der Herstellung der Power Unit kompensiert. Infolgedessen liegen die Gesamtemissionen des H_2-Schleppers um ca. zwei Prozent unter denen des E-Schleppers. Betrachtet man beim E-Schlepper die Verwendung von z.B. gealterten Batterien ohne EUW sowie Ladegeräten in ungeregelter Technik („Worst-Case-Szenario“ mit Wirkungsgrad von 65 Prozent), steigen die Emissionen im Betrieb aufgrund der höheren Energieverluste bei der Batterieladung deutlich an. In diesem Fall beträgt die Differenz der Gesamtemissionen zwischen E-Schlepper und H_2-Schlepper deutlich mehr als zwei Prozent.

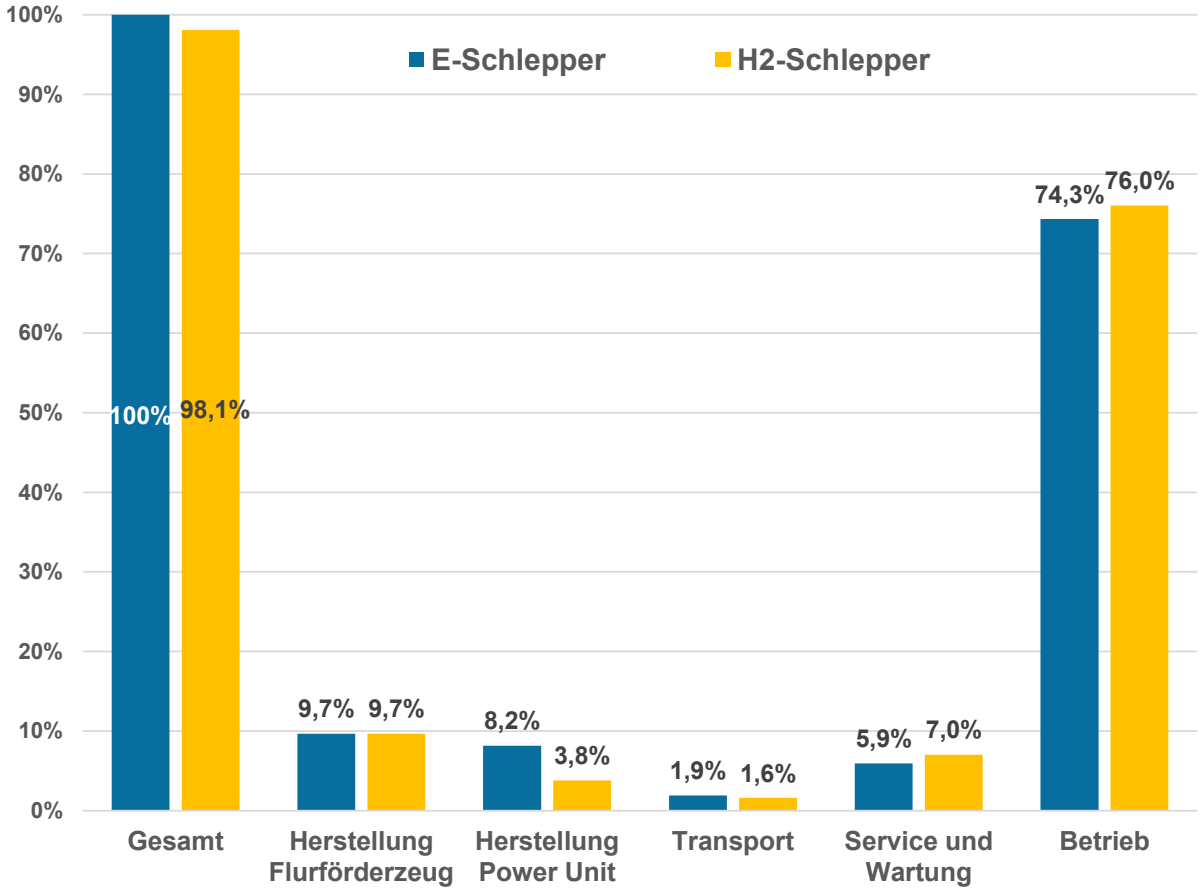

Abbildung 6-7: Treibhauspotenzial (GWP100) Schlepper (konventionelle Energiepfade)

Abbildung 6-8 zeigt hingegen das Treibhauspotenzial (CO_2-Äquivalent) der Schlepper bei einer Betrachtung der grünen Energiepfade. Hierbei sind alle Angaben im relativen Verhältnis zu den Gesamtemissionen des H_2-Schleppers dargestellt. Durch den Einsatz von grünem Strom und GreenHydrogen reduzieren sich die Emissionen im Betrieb der Flurförderzeuge. Der relative Anteil der vier anderen Phasen an den Gesamtemissionen steigt dadurch deutlich. Diese gewinnen folglich beim Einsatz von grünen Energiepfaden an Bedeutung. Bei einem Vergleich der Emissionen im Betrieb liegen die Emissionen aus der Wasserstoffherstellung ca. viermal so hoch wie die aus der Stromerzeugung. Die Emissionen aus der Wasserstoffherstellung stellen die Mindestanforderung an Wasserstoff aus Elektrolyse von Wasser laut der TÜV Süd Zertifizierung dar. Diese liegt bei mindestens 75 Prozent Treibhausgas-Minderungspotential gegenüber dem angegebenen Vergleichswert. Liegt das Treibhausgas-Minderungspotential über 75 Prozent, sinken die Emissionen in der Wasserstoffherstellung und somit auch im Betrieb des Flurförderzeuges. Liegen die CO_2-Einsparungen bei 89 Prozent gegenüber dem Vergleichswert, sind die gesamten Treibhausgasemissionen des H_2-Schleppers und des E-Schleppers identisch.

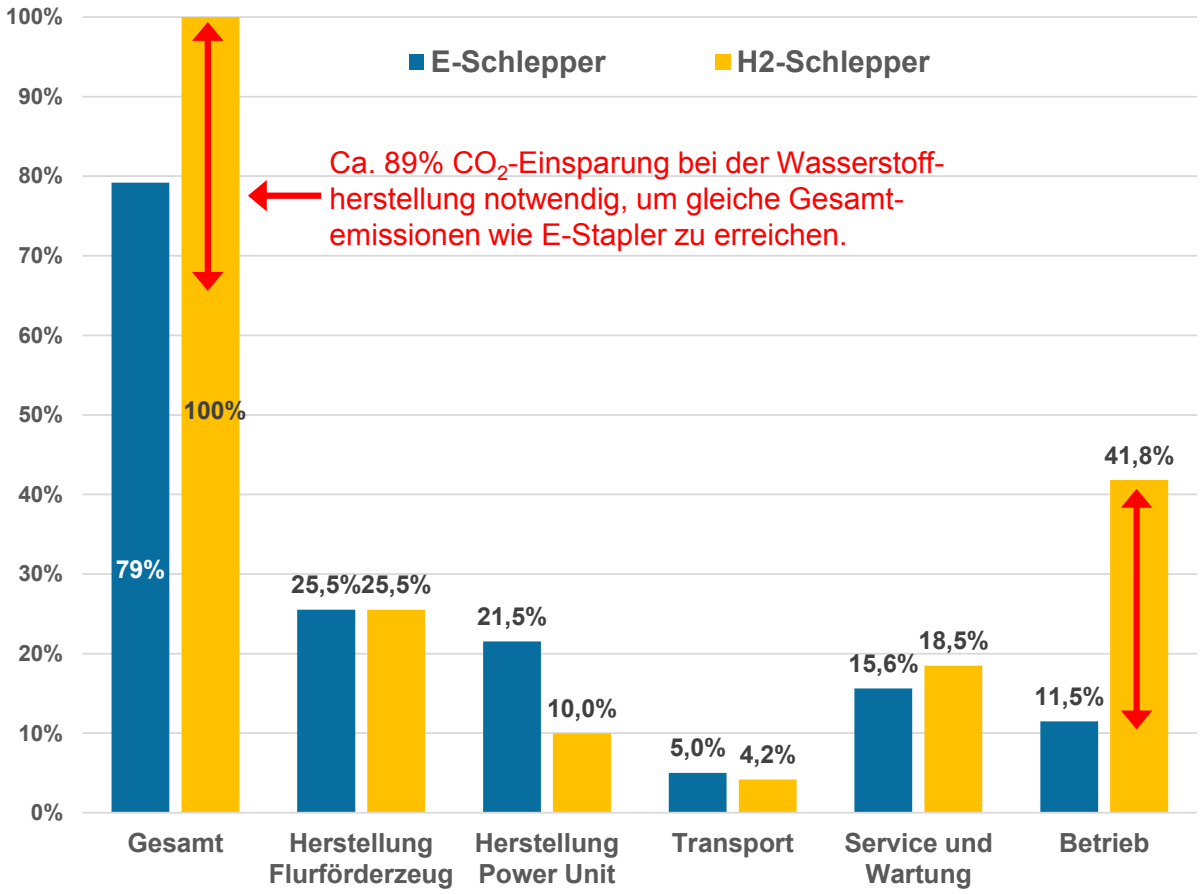

Abbildung 6-8: Treibhauspotenzial (GWP100) Schlepper (grüne Energiepfade)

6.4.2 **Gabelstapler**

Eine Betrachtung des Treibhauspotenzials der Gabelstapler in Abbildung 6-9 zeigt, dass diese analog den Schleppern bewertet werden können. Aufgrund der höheren Lebensdauer sowie des höheren Energiebedarfs des Gabelstaplers steigt jedoch der Einfluss der Betriebsphase auf die Gesamtemissionen. Im Umkehrschluss sinkt die Einflussnahme der Flurförderzeugherstellung im Vergleich zum Schlepper von ca. 10 Prozent auf ca. 5,5 Prozent. Folglich rückt bei einer Lebensdauererhöhung des Flurförderzeuges die Energieeffizienz der Antriebstechnologie in den Fokus. Des Weiteren vergrößert die höhere Lebensdauer des Gabelstaplers die Differenz der Emissionen für die Herstellung der Power Unit. Aufgrund der deutlich höheren Batteriemasse und der notwendigen 3,3 Batterien während der Lebenszyklusphase des E-Gabelstaplers betragen diese nun etwas mehr als das Vierfache der Emissionen des H_2-Gabelstaplers.

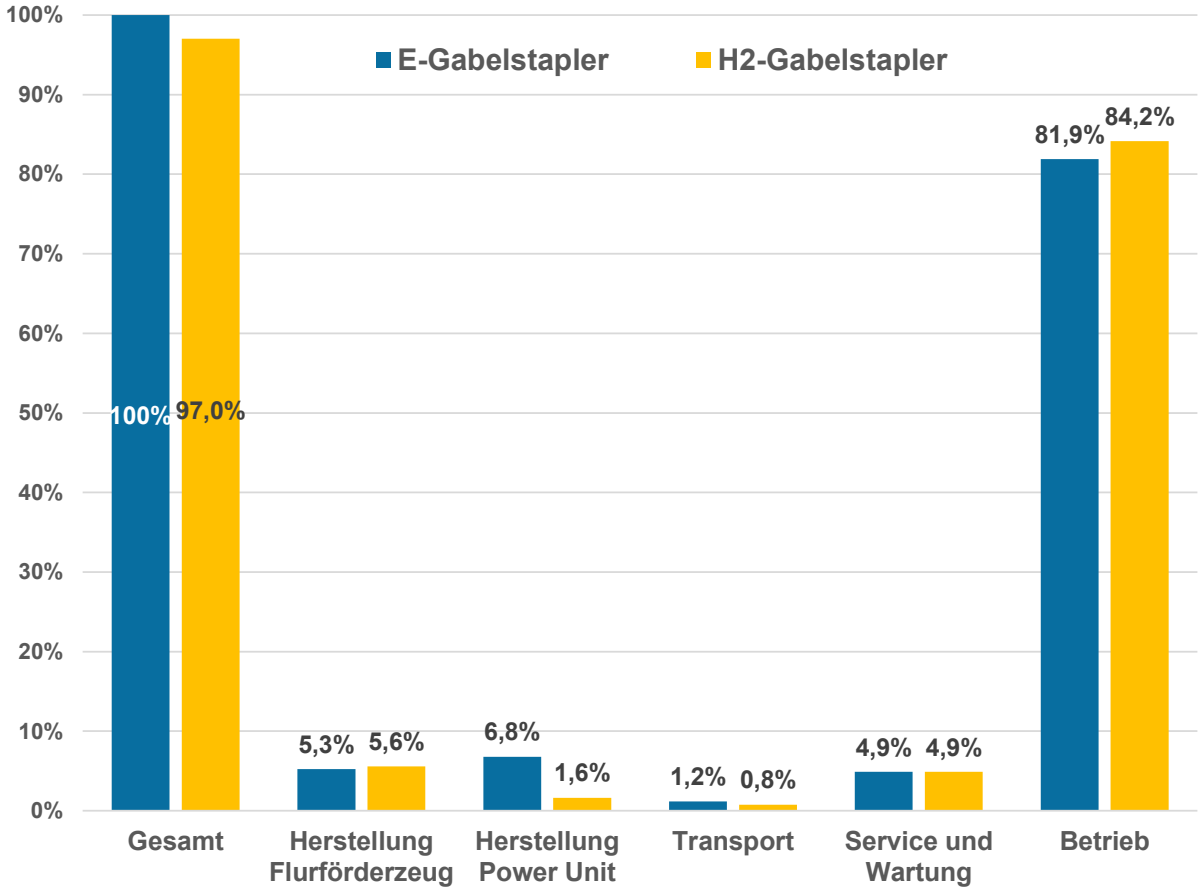

Abbildung 6-9: Treibhauspotenzial (GWP100) Gabelstapler (konventionelle Energiepfade)

Das GWP100 der Gabelstapler unter Verwendung von grünen Energieträgern ist in Abbildung 6-10 dargestellt. Der Anteil an den Emissionen aus dem Betrieb reduziert sich ähnlich wie bei den Schleppern, wodurch die anderen vier Phasen an Bedeutung gewinnen. Folglich verursachen die Emissionen aus der Batterieherstellung mehr als ein Fünftel der Gesamtemissionen des E-Gabelstaplers. Analog zum Vergleich beim Schlepper stellen die Emissionen aus dem Betrieb des H_2-Gabelstaplers die Mindestanforderung an das Treibhausgas-Minderungspotential von Wasserstoff aus Elektrolyse dar. Liegt das Minderungspotenzial bei 87 Prozent anstelle von 75 Prozent resultieren daraus identische Gesamtemissionen für den E-Gabelstapler sowie den H_2-Gabelstapler.

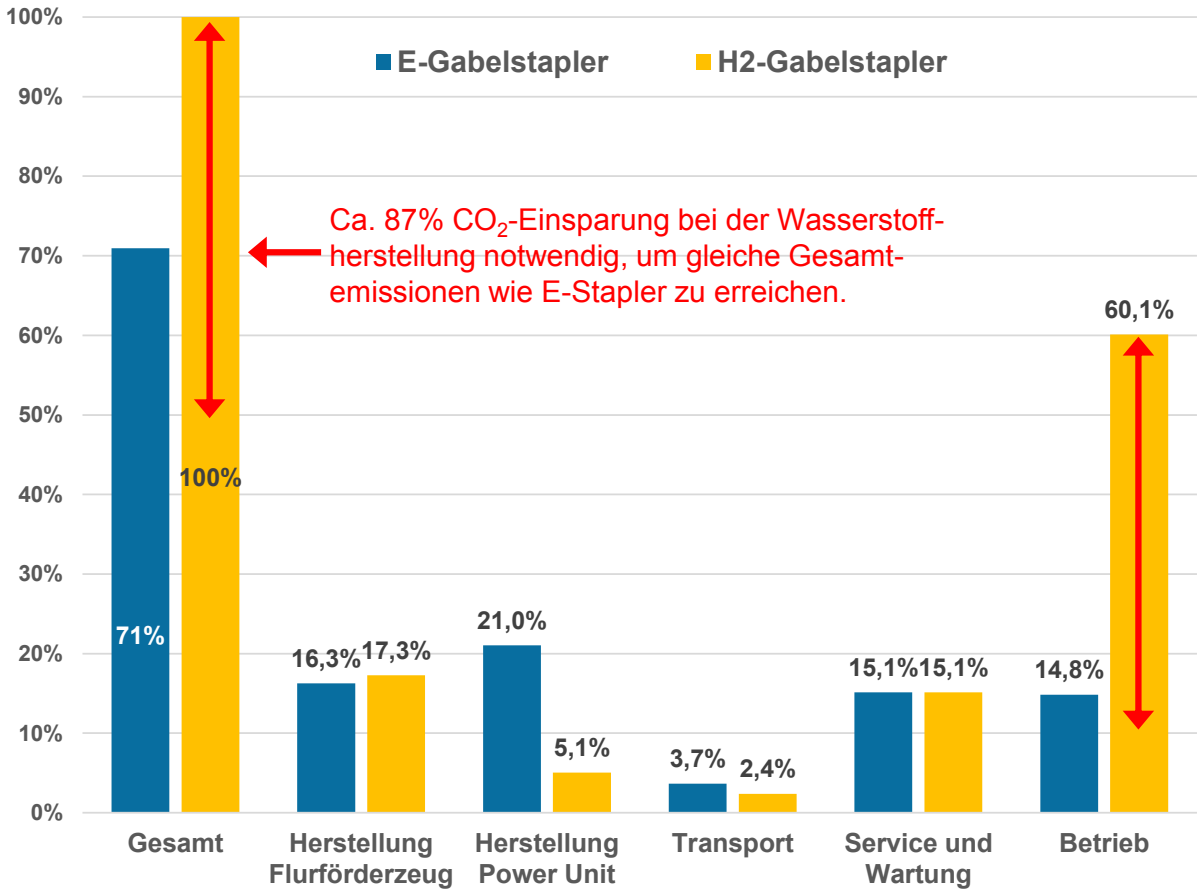

Abbildung 6-10: Treibhauspotenzial (GWP100) Gabelstapler (grüne Energiepfade)

6.5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen wurden die Umweltauswirkungen von wasserstoffbetriebenen und batteriebetriebenen Flurförderzeugen gegenübergestellt. Hierfür wurden im Rahmen einer Ökobilanz die Treibhauspotenziale von Schleppern und Gabelstaplern über den gesamten Lebenszyklus bestimmt. Dabei wurden zum einen konventionelle Energiepfade durch die Verwendung von Strom aus dem deutschen Strommix mit Wasserstoff aus Dampfreformierung von Erdgas verglichen. Zum anderen wurde die Auswirkung der Verwendung von grünen Energiepfaden durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien und grün zertifiziertem Wasserstoff aus Elektrolyse von Wasser bewertet.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Vergleich der konventionellen Energiepfade sind:

- Im Vergleich der konventionellen Energiepfade liegt das Treibhauspotenzial von H_2-Flurförderzeugen unter dem von batteriebetriebenen Flurförderzeugen.

- Höhere Emissionen im Betrieb der H_2-Flurförderzeuge werden durch die geringeren Emissionen in der Herstellung der Power Unit kompensiert.
- Geringe Lebensdauern der Batterien im Vergleich zu den Brennstoffzellensystemen führen zu höheren Emissionen in der Herstellung der Power Unit bei E-Flurförderzeugen.
- Der Großteil der Emissionen fällt im Betrieb der Flurförderzeuge an.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Vergleich der grünen Energiepfade sind:

- Beim Einsatz von grünen Energieträgern reduzieren sich die Emissionen im Betrieb der Flurförderzeuge und die anderen vier Phasen (Herstellung Flurförderzeug, Herstellung Power Unit, Transport und Service und Wartung) gewinnen an Bedeutung.
- Im Vergleich der grünen Energiepfade bedarf es einer genauen Betrachtung des Treibhausgas-Minderungspotentials des eingesetzten Wasserstoffs.
    - Liegt das Treibhausgas-Minderungspotential bei den z.B. minimal geforderten 75 Prozent für Wasserstoff aus Elektrolyse von Wasser, so liegen die Gesamtemissionen der H_2-Flurförderzeuge über denen der E-Flurförderzeuge.
    - Wird durch den eingesetzten Wasserstoff ein höheres Treibhausgas-Minderungspotential erzielt (89 Prozent bei H_2-Schlepper und 87 Prozent bei H_2-Gabelstapler), resultieren daraus identische Gesamtemissionen für die E-Flurförderzeuge sowie die H_2-Flurförderzeuge.

7 Wirtschaftliche Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen

Ziel der Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen ist die Identifikation von Rahmenbedingungen, unter denen ein wirtschaftlicher Einsatz der Fahrzeuge möglich ist. Ferner gilt es technische Einflussparameter mit den größten positiven Kosteneffekten zu identifizieren. Diese können von Brennstoffzellensystemherstellern aufgegriffen und verbessert werden. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung werden H_2-Flurförderzeuge dabei mit E-Flurförderzeugen, dem heutigen Stand der Technik im Bereich der Intralogistik, verglichen. Aufgrund des hohen Marktanteils wird hierfür ein drei Tonnen Schlepper als Referenzfahrzeug der Klasse drei Flurförderzeuge gewählt. Als Referenz für Klasse eins Fahrzeuge dient hingegen ein 3,5 Tonnen Gabelstapler.

7.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Das Maß der Wirtschaftlichkeit beschreibt das Verhältnis zwischen Mitteleinsatz und Ergebnis. Wird dabei mit minimalem Mitteleinsatz ein maximales Ergebnis erzielt, gilt dies als wirtschaftlich [Lie-2012]. „In Zusammenhang mit dem Wirtschaftlichkeitsbegriff […] werden Einnahmen und Ausgaben beziehungsweise näherungsweise Erträge (Leistungen) und Aufwendungen (Kosten) von Verfahren einander gegenübergestellt“ [Wöh-1990]. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse macht es möglich, weniger erfolgsversprechende Produktkonzepte und Produktionsmittel zu identifizieren und zu eliminieren. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Antriebstechnologie bei Flurförderzeugen bedeutet dies, dass diese einer zweiten Referenztechnologie gegenübergestellt werden muss. Für die Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen wird hierfür als Referenztechnologie der heutige Stand der Technik im Bereich der Intralogistik, nämlich Blei-Säure Batterien, gewählt.

7.1.1 **Verfahren der Wirtschaftlichkeitskontrolle**

Das innerbetriebliche Rechnungswesen bietet verschiedene Verfahren für den betrieblichen Informationsaustausch und für eine Wirtschaftlichkeitskontrolle. Abbildung 7-1 zeigt einige Teilgebiete des Rechnungswesens und deren Methoden in der Übersicht.

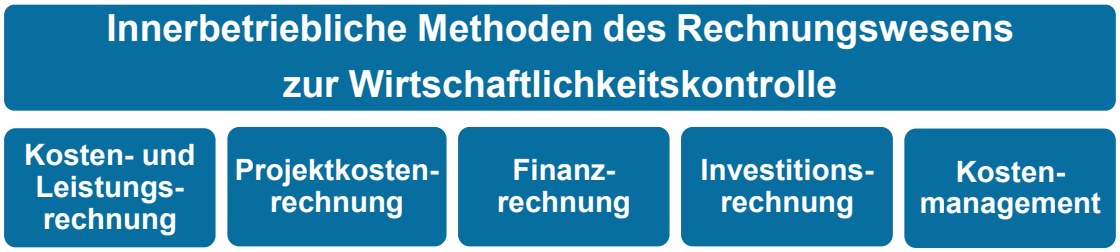

Abbildung 7-1: Verfahren des internen Rechnungswesens zur Wirtschaftlichkeitskontrolle

Kosten- und Leistungsrechnung

Die Aufgabe der Kosten- und Leistungsrechnung, auch Kostenrechnung genannt, besteht aus einer Dokumentations-, Planungs- und Kontrollfunktion [Fra-2002, S. 48]. Zu den Systemen der Kostenrechnung zählen die Vollkostenrechnung, die Plankostenrechnung, die Deckungsbeitragsrechnung und die Prozesskostenrechnung. Die Kosten- und Leistungsrechnung dient zur Kontrolle der wirtschaftlichen Leistungserstellung, indem die Ist-Kosten den geplanten Kosten gegenübergestellt werden und diese nicht überschreiten sollen. Dabei müssen Kostenfunktionen ermittelt werden, was eine Standardisierung der Produktion voraussetzt. [Kem-1999, S. 26ff.]

Projektkostenrechnung

Ein weiteres Verfahren ist die Projektkostenrechnung, die die Kosten eines Projekts erfasst, verfolgt und darstellt. Durch Zerlegung der Gesamtaufgaben innerhalb eines Projekts in Teilaufgaben soll die Transparenz komplexer Projekte verbessert werden. Ein dafür entwickeltes Instrument stellt der Projektstrukturplan dar. So können für alle Phasen des Projekts zu Kosten und Kostenverläufen sowie zu deren Ursachen Angaben gemacht werden [Das-2013]. Die zeitliche Strukturierung richtet sich dabei an die Projektdauer. Ziel ist es die Gestaltung eines Projekts hinsichtlich Zeit, Leistung und Kosten zu überblicken und zu überwachen [Ede-2007, S. 50f.].

Finanzrechnung (Liquiditätsrechnung)

Die Finanzrechnung dient dazu die Liquidität eines Unternehmens zu steuern sowie zur Ermittlung des jeweiligen Kapitalbedarfs vorbehaltlich der Berücksichtigung von Rentabilitäts- und Risikofaktoren. Unter Beachtung zukünftiger Zahlungen soll zu jedem Zeitpunkt die Zahlungsfähigkeit des Unternehmens gewährleistet sein. Dafür sind neben den aus der Bilanz ersichtlichen liquiden Mittel auch Angaben und Informationen über Mittelherkunft und Mittelverwendung sowie deren Planung notwendig. Finanzrechnungen dienen vergangenheitsbezogen als Dokumentationsinstrument oder zur Kontrolle von Planrechnungen. Oftmals wird hierzu ein sog. Finanzplan oder Liquiditätsplan erstellt, mittels dem Prognosen über Ein- und Auszahlungen bei Aufrechterhaltung der finanziellen Balance angestellt werden [Coe-2007, S. 11f.].

Investitionsrechnung

Die Investitionsrechnung als ein weiteres Instrument des Rechnungswesens dient zur Beurteilung von Entscheidungsalternativen. Sie betrachtet dabei einen mittelfristigen Planungshorizont und dient zur strategischen und operativen Planung und Kontrolle [Web-2008]. Eine Investition ist eine Zahlungsreihe, die mit einer Auszahlung beginnt. Die Vorteilhaftigkeit einer Investition hängt dabei von der Zahlungshöhe, dem Zinssatz des Investors und der zeitlichen Verteilung der Zahlungen ab. Betrachtet man den primären Rechnungszweck, so soll die Investitionsrechnung die absolute und relative Vorteilhaftigkeit und gleichzeitig die optimale Nutzungsdauer sowie den optimalen Ersatzzeitpunkt des Investitionsobjekts bestimmen [Däu-2007, S. 16ff.].

Kostenmanagement

Kostenmanagement ist die „[…] Gesamtheit aller Steuerungsmaßnahmen, die der frühzeitigen und antizipativen Beeinflussung von Kostenstruktur und Kostenverhalten sowie der Senkung des Kostenniveaus dienen“ [Göt-2004, S. 261]. Damit ist die zielorientierte Gestaltung der Strukturen und Verläufe von Kosten verbunden [Stö-2005, S. 58ff.]. Das heißt, dass Kostenbeeinflussungsmöglichkeiten (sog. Kostentreiber) im Vordergrund stehen, die Kosten beeinflussen und maßgeblich steuern [Hor-2009, S. 443]. Via Kostenmanagement können die Kosten aus Vorperioden den sie verursachenden Produkten und Leistungen zugerechnet bzw. periodengerecht abgrenzt werden. Damit ist die zielorientierte Gestaltung der Strukturen und Verläufe von Kosten verbunden [Stö-2005, S. 58ff.]. Zu den Methoden des Kostenmanagements gehören beispielsweise die Lebenszykluskostenanalyse, das Target Costing, die Nutzwertanalyse, die Qualitätskostenrechnung und die Anlagenkostenrechnung [Göt-2004, S. 267ff.].

Auswahl eines Analyseverfahrens

Im Folgenden wird ein geeignetes Analyseverfahren für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von wasserstoffbetriebenen gegenüber batteriebetriebenen Flurförderzeugen identifiziert. Hierfür werden die in Tabelle 7-1 aufgeführten Kriterien der Verfahren sowie ihren Ausprägungen hinsichtlich einer Wirtschaftlichkeitsbewertung herangezogen. Die Kriterien sind dabei als „Bezugsobjekt“, „Zeitrahmen“, „Abbildung von Veränderung“, „primärer Rechnungszweck“, „Fristigkeit“ und jeweilig verwendete „Rechnungselemente“ definiert. Das Kriterium „Bezugsobjekt“ bezieht sich auf den Betrachtungsgegenstand, also die Anschaffung von Flurförderzeugen mit jeweils unterschiedlicher Antriebstechnologie. Das Kriterium „Zeitrahmen“ ergibt sich aus der betrieblichen Nutzungsdauer der Flurförderzeuge und den Lebensdauerangaben der Hersteller. Da Ein- und Auszahlungen im Laufe der Nutzungsdauer zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen, soll die „Abbildung von Veränderungen“ innerhalb des Zeitrahmens

dynamisch erfolgen. Als „primärer Rechnungszweck“ steht die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer der beiden Investitionen hinsichtlich des gesamten Lebenszyklus im Vordergrund. Das Kriterium „Fristigkeit“ beschreibt den Zeitrahmen, der betrachtet wird, wobei die Bewertung über die gesamte Lebensdauer des Flurförderzeuges als langfristige Betrachtung über mehrere Perioden eingestuft wird. Als „Rechnungselemente“ fallen Ein- und Auszahlungen, sowie Mengen, Zeiten und nicht monetäre Elemente an.

Die geeignetste Methodik stellt das Kostenmanagement dar. Das Kostenmanagement ergänzt die Kosten- und Leistungsrechnung um den inhaltlich- zeitlichen Horizont, um via ganzheitlichem Bewertungsansatz die Gesamtwirtschaftlichkeit einer Investition zu bewerten und somit eine zukunftsorientierte Entscheidungsgrundlage bzw. -hilfe zu erzielen [Har-2000]. Konkret heißt das, dass alle Kosten, die über den gesamten Lebenszyklus der Flurförderzeuge anfallen, periodenübergreifend in die Analyse mit einbezogen werden. Das Kostenmanagement bietet eine Vielzahl an Verfahren, die die Dimensionen Kostenverlauf, Kostenstruktur und Kostenmanagement beschreiben. Hierzu zählen z.B. das Fixkostenmanagement, Lebenszykluskostenrechnung, Cost Benchmarking, Target Costing, Zero-Based-Budgeting oder auch die Prozesskostenrechnung [Win-2011].

Für die ergebnisorientierte Absicherung von ressourcenbezogenen Entscheidungen bietet sich die Lebenszykluskostenrechnung an [Hor-2009, S. 473]. Ein elementarer Vorteil der Lebenszykluskostenrechnung gegenüber den anderen Verfahren des Kostenmanagements ist die ganzheitliche Perspektive. Alle Zahlungsvorgänge können Lebenszyklusphasen zugerechnet, prognostiziert und analysiert werden [Coe-2007, S. 605]. Bei Flurförderzeugen als Betriebsmittel bietet sich zudem eine LCC-Analyse an. Es handelt sich dabei um komplexe Systeme, die über eine relativ lange Nutzungsdauer im Unternehmen verbleiben. Verschiedene Antriebstechnologien verursachen dabei unterschiedlich hohe Kosten in verschiedenen Lebenszyklusphasen. Gemäß der VDI-Richtlinie 2884 eignet sich die Lebenszykluskostenrechnung für eine Kostenberechnung über die Nutzungsdauer von Investitionsobjekten, wobei einmalige Beschaffungskosten hohen wiederkehrenden Folgekosten gegenüber stehen [VDI-2884].

Tabelle 7-1: Auswahl eines Verfahrens zur Wirtschaftlichkeitsanalyse

	Bezugsobjekt	Zeitrahmen	Abbildung von Veränderung	Primärer Rechnungszweck	Fristigkeit	Rechnungs-elemente
Wirtschaftlichkeit H2-Flurföerzeuge	Zwei Investitions-objekte	Lebensdauer Flurförderzeug	Dynamisch	Beurteilung der Vorteilhaftigkeit über den gesamten Lebenszyklus	Langfristig	Ein- Auszahlungen, nicht monetäre Elemente
Kosten- und Leistungs-rechnung	Vielzahl von Projekten	Perioden-orientiert	Statisch	Fundierung kurzfristiger Entscheidungen, Produktbezogen	Kurzfristig	Betriebliche Leistungen und Kosten
Projektkosten-rechnung	Einzelnes Projekt	Projektdauer	Je nach Projekt-dauer (kurz: statisch, lang: dynamisch)	Projektgestaltung über gesamte Laufzeit	Langfristig	Leistungen und Kosten
Finanz-rechnung	Geldbe-wegungen	Bestimmter Zeitraum	Statisch	Ermittlung der Liquidität	Kurzfristig	Ein- und Auszahlungen
Investitions-rechnung	Einzelnes Investitions-objekt	Gesamte Nutzungsdauer	Dynamisch oder statisch	Bestimmung der absoluten Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Investition	Langfristig	Ein- und Aus-zahlungen; Kosten und Erlöse
Kosten-management	Umfassendes Projekt, mehrere Investitions-objekte	Lebenszyklus-orientiert, Periodenüber-greifend	Dynamisch oder statisch	Gestaltung eines Produktprojektes über seinen Lebenszyklus	Kurz-, Mittel- und Langfristig	Ein- Auszahlungen, Zeiten, nicht monetäre Elemente

7.1.2 **Lebenszykluskostenrechnung**

Für die lebenszyklusorientierte Kostenrechnung ergeben sich drei grundlegende Berechnungsansätze [Stö-2005, S. 71]. Erstens der deckungsbeitragsorientierte Ansatz via Amortisationsrechnung, der vor allem bei der Produktlebenszykluskostenrechnung sinnvoll ist. Zweitens ein investitionsorientierter Ansatz, der auf Basis (diskontierter) Ein- und Auszahlungen funktioniert, wobei anfallende Zahlungen periodengerecht zugeordnet werden. Die dritte mögliche Ausgestaltung beruht auf der Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung, wobei lediglich Ein- und Auszahlungen als Rechengrößen Verwendung finden und periodenbezogene Gemeinkosten nicht berücksichtigt werden [Stö-2005, S. 71f.]. Ein deckungsbeitragsorientierter Berechnungsansatz der Gesamtkosten kommt im Fall der beiden zu bewertenden Antriebstechnologien nicht in Frage, da die Flurförderzeuge keine produktbezogenen Gewinne erzielen. Zur methodischen Unterstützung bzw. Berechnung innerhalb des LCC eignen sich vor allem die Verfahren der Investitionsrechnung, um auch Zins- und Zinseszinseffekte berücksichtigen zu können [Göt-2004, S. 262]. Mittels Methoden der Investitionsrechnung können so Kennzahlen wie Kapitalwert, Amortisationsdauer oder interner Zinsfuß helfen, verschiedene Alternativen vergleichbar zu machen [Fan-2009, S. 428]. Im Folgenden werden statische wie auch dynamische Berechnungsverfahren hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für einen Antriebstechnologievergleich bei Flurförderzeugen bewertet.

Statische Berechnungsverfahren

Bei statischen Berechnungsverfahren werden unterschiedliche Zahlungszeitpunkte nicht berücksichtigt. Alle anfallenden Kosten der unterschiedlichen Alternativen werden aufsummiert [Däu-1998, S. 155ff.]. Zahlungsströme können nicht periodengerecht abgebildet werden. Eine Darstellung von unterschiedlichen Lebensdauern zwischen z.B. Batterien und Flurförderzeugen ist somit nur bedingt möglich.

Dynamisches Berechnungsverfahren

Die dynamische Investitionsrechnung ist für Lebenszyklusbetrachtungen besser geeignet als die Methoden der statischen Investitionsrechnung, da zeitliche Verteilungen der Zahlungen berücksichtigt werden. Außerdem erfolgt die Berechnung für die gesamte Nutzungsdauer eines Projektes auf Basis von Einnahmen und Ausgaben [Hor-2009, S. 474]. Zu den dynamischen Verfahren zählt die dynamische Amortisationsrechnung, die interne Zinsfußmethode sowie die Kapitalwertmethode [Kru-2000, S. 41]. Die dynamische Amortisationsrechnung wird zur Ermittlung der Amortisationszeit einer Investition, die interne Zinsfußmethode zur Bestimmung der tatsächlichen Rentabilität einer Investition und die Kapitalwertmethode zur Berechnung des Gesamtüberschusses bzw. Kapitalwertes einer Investition verwendet [Gün-2015, S. 80 f.]. Ähnlich wie der deckungsbeitragsorientierte Berechnungsansatz der Gesamtkosten kommt die dynamische Amortisationsrechnung aufgrund der fehlenden produktbezogenen Gewinne nicht in Frage. Bei einer Verwendung der internen Zinsfußmethode können direkte Aussagen bezüglich der Rendite bzw. Verzinsung einer Antriebstechnologie getroffen werden. Z.B. ergibt die Investition in H_2-Flurflörderzeuge eine Verzinsung von fünf Prozent. Eine Diskussion oder ein Vergleich einzelner Kostentreiber wie z.B. Energiekosten ist dabei nur erschwert möglich. Dies ermöglicht jedoch die Kapitalwertmethode. Die Bestimmung des Kapitalwertes „C_0“ erfolgt dabei unter Berücksichtigung des Kalkulationszinssatzes „i“, der Anzahl der Perioden „N“ sowie der Zahlungsströme der einzelnen Perioden „Z“ nach Formel (7-1) [Däu-2007, S. 52].

$$Kapitalwert\ C_0(i) = \sum_{n=0}^{N} \frac{Z_n}{(1+i)^n} \qquad (7\text{-}1)$$

7.2 Life Cycle Cost-Modell

7.2.1 **Kostenanalyse bei Flurförderzeugen**

Die Basis bzw. Grundlage des Kostenmanagements und damit auch der erste Schritt einer Lebenszykluskostenrechnung bildet eine umfassende Kostenanalyse sowie die Kostenfrühaufklärung, welche die Identifikation von kostenbeeinflussenden Maßnahmen beinhaltet [Fra-2002, S. 14ff.]. Dadurch können Kostensenkungspotenziale, z.B. bei neuen Technologien wie der Brennstoffzellentechnologie, aufgezeigt werden und bei einer negativen Kostenentwicklung frühzeitig entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Um die Kostensituation der beiden Antriebstechnologien vollständig zu erfassen, müssen alle relevanten Daten und Kosten bzgl. Kosteneinflussfaktoren bzw. Kostentreiber zusammengetragen sowie deren Abhängigkeiten bestimmt werden. Hierfür wurden Hersteller- bzw. Lieferantenangaben, die in Kapitel 4 durchgeführten Messungen, die Erkenntnisse aus Kapitel 3 und 5, Expertenschätzungen sowie die in Kapitel 2.5 aufgezeigte Literatur herangezogen.

7.2.2 **Bestimmung von Kostentreibern sowie Kosteneinflussfaktoren**

Kostentreiber oder auch Kostenantriebskräfte genannt, bilden die Bezugsgrößen für die Verrechnung von allgemein anfallenden Gemeinkosten. Sie haben als Prozessgrößen die Aufgabe die Maßgröße zur Quantifizierung des Outputs eines Prozesses zu sein. Dabei sollten die Kostentreiber aus den zur Verfügung stehenden Informationsressourcen einfach ableitbar, zusammenhängend zur Beanspruchung der Ressourcen und Kosten sowie durchsichtig und verständlich sein [Coe-2007, S. 165f.]. Die Festlegung geeigneter Kostentreiber sorgt für eine aussagefähige Wirtschaftlichkeitskontrolle durch Kennzahlenbildung und ermöglicht zielgerichtete Maßnahmen zur Kostenbeeinflussung. Bei der Analyse der kostentreibenden Faktoren werden die Kosten bezüglich ihres Verlaufs, ihrer Struktur und ihres Niveaus untersucht [Fra-2002, S. 15f.].

Kostentreiber werden von Kosteneinflussfaktoren beeinflusst, wobei die Faktoren eine Messgröße für die Kostenverursacher sind [Hor-2009, S. 492]. Die Faktoren stellen somit „Stellgrößen“ für verschiedene Kostenniveaus dar und machen die Abhängigkeit der Kostentreiber von bestimmten Faktoren deutlich. Sind die Kosteneinflussfaktoren bestimmt, können verschiedene Szenarien via Sensitivitätsanalyse dargestellt und entscheidende Einflussgrößen identifiziert werden. Zur Bestimmung der Kostentreiber und Kosteneinflussfaktoren von wasserstoff- und batteriebetriebenen Flurförderzeugen wurde wie folgt vorgegangen:

- Recherche und Sammlung aller relevanten Daten, Informationen und Kosten
- Identifikation von Kostentreibern sowie deren Kostenniveaus

- Auswahl und Zuordnung von Kostentreibern zu den Lebenszyklusphasen Anschaffung, Betrieb und Entsorgung
- Kategorisierung einzelner Kostentreiber zu Hauptkostentreibern
- Identifikation von Kosteneinflussfaktoren der Hauptkostentreiber
- Zuordnung von Kosteneinflussfaktoren zu den Kostentreibern

Abbildung 7-2 zeigt die Zuordnung von Kostentreibern von H_2-Flurförderzeugen über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeuges, einzelne Kostentreiber sind dabei bereits zu Überbegriffen zusammengefasst. Als Beispiel hierfür kann die Anschaffung der H_2-Infrastruktur genannt werden, die sich u.a. aus den Kostentreibern H_2-Speicher, Betankungsanlage und Dispenser zusammensetzt. Durch die Zuordnung der Kostentreiber konnte sichergestellt werden, dass alle Lebensphasen der Flurförderzeuge mit Kosten bewertbar sind.

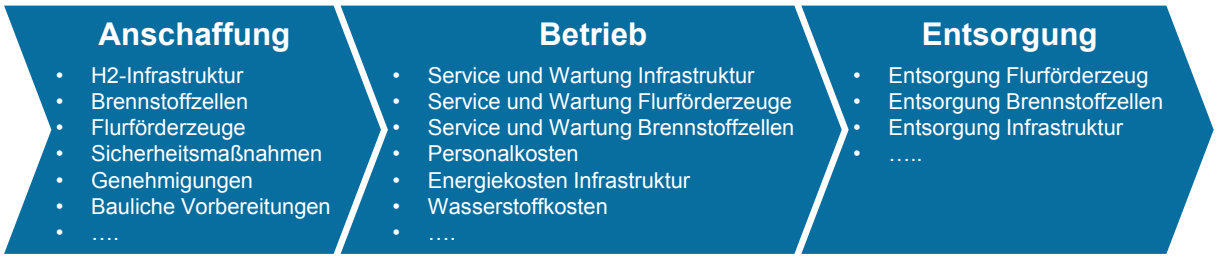

Abbildung 7-2: Kostentreiber von H_2-Flurförderzeugen über den Lebenszyklus

Die anschließende Kategorisierung zu Hauptkostentreiber zeigte, dass eine Beibehaltung der Lebenszyklusphasenunterteilung zu einer hohen Komplexität sowie Unüberschaubarkeit führt. Die Integration von Entsorgungskosten in Anschaffungskosten analog zur Darstellung bei der Ökobilanzierung war die Folge. Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3 zeigen die finale Kategorisierung der einzelnen Kostentreiber von H_2-Flurförderzeugen bzw. Blei-Säure Flurförderzeugen zu den sogenannten Hauptkostentreibern sowie deren Einflussfaktoren.

Tabelle 7-2: Kategorisierung der Kostentreiber von H2-Flurförderzeugen sowie deren Einflussfaktoren

Hauptkosten-treiber	Kostentreiber H_2-Flurförderzeuge	Einflussfaktoren auf Kostentreiber
Investition Infrastruktur	• H_2-Speicher • Betankungsanlage • Dispenser • Fläche H_2-Infrastruktur • Fläche Dispenser • Planung & Genehmigungen • Sicherheitsmaßnahmen • Verkauf • Entsorgung	• Wasserstoffbedarf • Anzahl Betankungen • Betankungsdauer • Anzahl Dispenser • Lebensdauer • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Investition Flurförderzeug	• Flurförderzeuge • Ausstattung Flurförderzeug • Umbaukosten zu H_2-Flurförderzeug • Verkauf • Entsorgung	• Anzahl Flurförderzeuge • Lebensdauer • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Investition Power Unit	• Brennstoffzellensysteme • Ersatzgerät • Verkauf • Entsorgung	• Anzahl Brennstoffzellensysteme • Betriebsstunden Flurförderzeuge • Lebensdauer • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Wartungskosten Infrastruktur	• Service und Wartung	• Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Wartungskosten Flurförderzeug	• Service und Wartung	• Anzahl Flurförderzeuge • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Wartungskosten Power Unit	• Service und Wartung	• Anzahl Brennstoffzellensysteme • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Personalkosten	• Flurförderzeugfahrer	• Arbeitsstunden • Anzahl Flurförderzeugfahrer • Anzahl Personal an Infrastruktur • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Energiekosten	• Wasserstoff	• Energiebedarf Infrastruktur • Energiebedarf Flurförderzeug • Betriebsstunden Flurförderzeug • Wirkungsgrad Brennstoffzellen • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Zinsen auf Anlagevermögen	• Investition	• Finanzierungsgrad • Finanzierungszinssatz • Betrachtungszeitraum

Tabelle 7-3: Kategorisierung der Kostentreiber von E-Flurförderzeugen sowie deren Einflussfaktoren

Hauptkosten-treiber	Kostentreiber Blei-Säure Flurförderzeuge	Einflussfaktoren auf Kostentreiber
Investition Infrastruktur	• Ladegeräte • Batteriewechselequipment • Batteriestellplätze • Fläche Batterieladung • Planung & Genehmigungen • Sicherheitsmaßnahmen • Verkauf • Entsorgung	• Anzahl Batterien • Anzahl Batteriewechsel • Dauer Batteriewechsel • Batterietyp • Batteriewechselmetthode • Lebensdauer • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Investition Flurförderzeug	• Flurförderzeuge • Ausstattung Flurförderzeug • Batteriewechselequipment • Verkauf • Entsorgung	• Anzahl Flurförderzeuge • Batteriewechselmethode • Lebensdauer • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Investition Power Unit	• Batterien • Ersatzgerät • Verkauf • Entsorgung	• Anzahl Batterien • Betriebsstunden Flurförderzeuge • Lebensdauer • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Wartungskosten Infrastruktur	• Service und Wartung	• Kostenhöhe • Betrachtungsdauer
Wartungskosten Flurförderzeug	• Service und Wartung	• Anzahl Flurförderzeuge • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Wartungskosten Power Unit	• Service und Wartung	• Anzahl Batterien • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Personalkosten	• Flurförderzeugfahrer • Personal für Batteriewechsel	• Batteriewechselmethode • Arbeitsstunden • Anzahl Flurförderzeugfahrer • Anzahl Personal an Infrastruktur • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Energiekosten	• Strom	• Energiebedarf Flurförderzeug • Betriebsstunden Flurförderzeug • Wirkungsgrad Batterieladung • Kostenhöhe • Betrachtungszeitraum
Zinsen auf Anlagevermögen	• Investition	• Finanzierungsgrad • Finanzierungszinssatz • Betrachtungszeitraum

7.2.3 **Berechnungsmethodik**

Auf Basis der in den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse wurde für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von H_2-Flurförderzeugen eine Berechnungsmethodik entwickelt. Hauptziel war die Berücksichtigung aller in Kapitel 7.2.2 identifizierten Kostentreiber sowie deren Einflussfaktoren. Ferner galt es eine unabhängige Kostenberechnung für H_2- bzw. E-Flurförderzeuge auf Basis eines gemeinsamen Ausgangswertes zu entwickeln. Als gemeinsamer Ausgangswert wurde die Anzahl an Flurförderzeugstunden pro Schicht „$FFZh_{Schicht}$“ gewählt. Bei einer realen Logistikplanung werden diese anhand einer zeitlichen Bewertung von Ein- und Auslagerungen bzw. Arbeitsaufgaben vom Logistikplaner mit Hilfe von z.B. MTM berechnet. Anschließend wird auf deren Basis die Anzahl an benötigten Flurförderzeugen bestimmt. Diese kann aufgrund verschiedener antriebstechnologischer Einflussfaktoren bei H_2-Flurförderzeugen und E- Flurförderzeugen unterschiedlich ausfallen. Grundlegend gilt jedoch, dass die Anzahl an Flurförderstunden pro Schicht für H_2-Flurförderzeuge „$FFZh_{Schicht,H2}$“ gleich der Anzahl an Flurförderstunden pro Schicht für E-Flurförderzeuge „$FFZh_{Schicht,Batterie}$“ ist.

$$FFZh_{Schicht,H2} = FFZh_{Schicht,Batterie} \tag{7-2}$$

Hinsichtlich einer besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und einem besseren Verständnis bzgl. der Berechnungsabläufe innerhalb des LCC-Modells werden im Folgenden die wichtigsten Berechnungsschritte im Detail aufgezeigt.

Bestimmung der Anzahl der Flurförderzeuge

Wie vorhin beschrieben, kann auf Basis der Anzahl an Flurförderstunden pro Schicht „$FFZh_{Schicht}$“ die Anzahl der Flurförderzeuge „n_{FFZ}“ bestimmt werden. Hierfür müssen lediglich die betriebliche Verfügbarkeit „η^{Ver}“, welche sich jeweils bei wasserstoff- und batteriebetriebenen Flurförderzeugen unterscheidet, sowie die Nettoarbeitsstunden pro Schicht „$t_{Netto,Schicht}$“ berücksichtigt werden. Die Anzahl an Flurförderzeugen wird im Gegensatz zur realen Logistikplanung nicht aufgerundet sondern als Dezimalzahl für alle weiteren Berechnungen herangezogen.

$$n_{FFZ} = \frac{FFZh_{Schicht}}{t_{Netto,Schicht} \times \eta^{Ver}} \tag{7-3}$$

Die betriebliche Verfügbarkeit „η^{Ver}“ ergibt sich aus den Nettoarbeitsstunden pro Schicht „$t_{Netto,Schicht}$“ sowie der Ausfallzeit pro Schicht „$t_{Ausfall,Schicht}$“.

$$\eta^{Ver} = \frac{t_{Netto,Schicht} - t_{Ausfall,Schicht}}{t_{Netto,Schicht}} \tag{7-4}$$

Wobei „ $t_{Ausfall,Schicht}$ “ aus der durchschnittlichen Wartungszeit pro Schicht „$t_{Wartung,Schicht}$“, der durchschnittlichen Störungszeit pro Schicht „$t_{Störung,Schicht}$", der Anzahl der Betankungen bzw. Batteriewechsel (Refuelings genannt) „$n_{Refuel,Schicht}$“, der Dauer für die Anfahrt zum Refueling „$t_{Anfahrt}$“, einer eventuellen Wartezeit für das Refueling „t_{Warten}“ sowie der eigentlichen Betankungs- oder Batteriewechsel- bzw. Refuelingzeit „t_{Refuel}“ berechnet wird.

$$t_{Ausfall,Schicht} = t_{Wartung,Schicht} + t_{Störung,Schicht} + n_{Refuel,Schicht} \times \left(2 \times t_{Anfahrt} + t_{Warten} + t_{Refuel}\right) \tag{7-5}$$

Bestimmung des Betrachtungszeitraums

Bei einer Lebenszykluskostenrechnung werden alle Kosten innerhalb des Lebenszyklus eines Produktes bewertet. Der Betrachtungszeitraum der Kapitalwertmethode innerhalb des LCC-Modells ergibt sich folglich aus der Lebensdauer des Flurförderzeuges „LD_{FFZ}“, welche in Betriebsstunden angegeben wird. Die Anzahl der zu betrachtenden Perioden „N“, innerhalb der Kapitalwertmethode wird nach

$$N = \frac{LD_{FFZ}}{n_{Schichten,Tag} \times n_{Arbeitstage,Jahr} \times t_{Netto,Schicht} \times \eta_{FFZ,Auslastung}} \tag{7-6}$$

Berechnet, wobei eine Periode einem Jahr entspricht. Dabei ist „$n_{Schichten,Tag}$“ die Anzahl der Schichten pro Trag, „$n_{Arbeitstage,Jahr}$“ die Anzahl der Arbeitstage pro Jahr, „$t_{Netto,Schicht}$“ die Nettoarbeitsstunden pro Schicht und „„$\eta_{FFZ,Auslastung}$“ die Auslastung des Flurförderzeugs. Am Ende des Betrachtungszeitraums wird für sämtliche Hardware, wie z.B. Ladegeräte und H_2-Infrastruktur, der Restwert auf Basis einer linearen Abschreibung über die Lebensdauer sowie der eigentlichen Nutzungsdauer bestimmt. Der Restwert wird anschließend unter der Annahme, dass ein vollständiger Verkauf möglich ist, als positiver Geldfluss gewertet. Bereits erstellte Hallenflächen bzw. Fundamente sowie durchgeführte Genehmigungen werden hiervon ausgeschlossen.

Bestimmung der Personalkosten

Die Personalkosten „PK_{Gesamt}“, die mit einer Flurförderzeuganwendung in Verbindung stehen, setzen sich aus den Personalkosten der Flurförderzeugfahrer „PK_{FFZ}“ sowie den Personalkosten der Personen, die für den Betrieb der Infrastruktur „PK_{Infra}“ (z.B. Batteriewechsel) notwendig sind, zusammen.

$$PK_{Gesamt} = PK_{FFZ} + PK_{Infra} \tag{7-7}$$

Die Personalkosten der Flurförderzeugfahrer „PK_{FFZ}“ werden nach

$$PK_{FFZ} = n_{FFZ} \times t_{Brutto,Schicht} \times n_{Schichten,Tag} \times n_{Arbeitstage,Jahr} \times PK_h \tag{7-8}$$

berechnet. Wobei „n_{FFZ}“ die Anzahl der Flurförderzeuge, „$t_{Brutto,Schicht}$“ die Bruttoarbeitsstunden pro Schicht, „$n_{Schichten,Tag}$“ die Anzahl der Schichten, „$\mathrm{n_{Arbeitstage,Jahr}}$“ die Anzahl an Arbeitstagen pro Jahr und „$\mathrm{PK_h}$“ die Personalkosten pro Stunde darstellen. Die Personalkosten für die Mitarbeiter der Infrastruktur „PK_{Infra}“ werden hingegen nach

$$PK_{Infra} = n_{Personal,Infra} \times t_{Brutto,Schicht} \times n_{Schichten,Tag} \times n_{Arbeitstage,Jahr} \times PK_h \tag{7-9}$$

bestimmt. „$n_{Personal,Infra}$“ ist dabei die Anzahl der Mitarbeiter der Infrastruktur. Des Weiteren können nach

$$PK_{FFZh} = \left[\left(\frac{t_{Brutto,Schicht} - t_{Netto,Schicht}}{t_{Netto,Schicht}} + 1\right) \times FFZh_{Schicht}\right] \times n_{Schichten,Tag} \times n_{Arbeitstage,Jahr} \times PK_h \tag{7-10}$$

die Personalkosten für die Flurförderzeugstunden pro Schicht „PK_{FFZh}“ ermittelt werden, wobei „$t_{Netto,Schicht}$“ den Nettoarbeitsstunden pro Schicht und „$FFZh_{Schicht}$“ der Anzahl an Flurförderstunden pro Schicht entsprechen. Aufgrund der in Formel (7-2) festgelegten Bedingung entsprechen bei identischem Schichtmodell und Personalkosten die Personalkosten für die Flurförderzeugstunden pro Schicht der H_2-Flurförderzeuge „$PK_{FFZh,H2}$“ den Personalkosten für die Flurförderzeugstunden pro Schicht der E-Flurförderzeuge „$PK_{FFZh,Batterie}$“.

$$PK_{FFZh,H2} = PK_{FFZh,Batterie} \tag{7-11}$$

Auf Basis der „PK_{FFZh}“ können abschließend die Personalkosten für weitere Tätigkeiten „$PK_{weitere\ Tätigkeiten}$“ berechnet werden.

$$PK_{weitere\ Tätigkeiten} = PK_{Gesamt} - PK_{FFZh} \tag{7-12}$$

Unter die Personalkosten für weitere Tätigkeiten fallen somit alle Tätigkeiten, die nicht zu den „$FFZh_{Schicht}$“ zählen. Dies sind neben den Kosten für das Personal an der Infrastruktur auch die Personalkosten der Flurförderzeugfahrer während des Betankungsprozesses bzw. Batteriewechselprozesses sowie Service und Wartung. Infolgedessen sind dies die gesamten Personalkosten, welche durch die Antriebstechnologie „exklusiv“ verursacht werden. In der Ergebnisdarstellung in Kapitel 7.4 und 7.5 werden alle Kosten ohne die „PK_{FFZh}“ betrachtet.

7.3 Definition von Rahmenbedingungen für das Basisszenario

Für die Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen werden im Folgenden Werte für die einzelnen Kosteneinflussfaktoren definiert. Die Festlegung von realitätsnahen Werten steht dabei an oberster Stelle. Demzufolge wurden Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln und reale Kostenwerte herangezogen. Diese stammen aus offiziellen nicht verhandelten Angeboten von Herstellern sowie aus tatsächlich angefallenen Kosten im Forschungsvorhaben H2IntraDrive. Alle Kosten verstehen sich dabei ohne Förderung. Standen für einen Einflussfaktor mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, wie z.B. beim Wirkungsgrad der Ladetechnologie bei Batterien, wurde der mittlere Wert gewählt. Der obere bzw. untere Wert wird anschließend in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt. Hinsichtlich einer höheren Transparenz wird in der Darstellung der Ursprung des einzelnen Werts als Quelle mit angegeben.

7.3.1 **Basisszenario Schlepper**

Bei den in Tabelle 7-4 dargestellten allgemeinen Rahmenbedingungen wurde die Anzahl an Flurförderzeugstunden pro Schicht so festgelegt, dass insgesamt ca. 50 Schlepper im Einsatz sind. Das gewählte Schichtmodell sowie die Anzahl an Arbeitstagen pro Jahr entsprechen einem typischen 2-Schichtbetrieb im produktiven Umfeld. Das Kapital für die zu tätigenden Investitionen wird im Basisszenario mit einem Finanzierungszinssatz von 10 Prozent zu 100 Prozent fremdfinanziert. Auf Förderungen jeglicher Art wird dabei verzichtet.

Tabelle 7-4: Definition Einflussfaktoren Allgemeine Rahmenbedingungen für Basisszenario Schlepper

Allgemeine Rahmenbedingungen		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Flurförderzeugstunden pro Schicht [h]	350	Eigene Festlegung
Arbeitstage pro Jahr [d]	220	H2IntraDrive
Schichten pro Tag [d]	2	H2IntraDrive
Bruttoarbeitsstunden pro Schicht [h]	8	H2IntraDrive
Nettoarbeitsstunden pro Schicht [h]	7,25	H2IntraDrive
Abzinsungsfaktor [%]	10	Eigene Festlegung
Finanzierungszinssatz [%]	10	Eigene Festlegung
Anteil Fremdfinanzierung [%]	100	Eigene Festlegung
Förderung	Nein	Eigene Festlegung

Die Festlegung der Werte für die Kosteneinflussfaktoren aus dem Bereich H_2-Infrastruktur in Tabelle 7-5 richten sich nach den Werten aus H2IntraDrive. Die Wasserstoffkosten entsprechen konventionellem durch Dampfreformierung hergestelltem Wasserstoff. Die durchschnittliche Anfahrtsstrecke zum Dispenser ist aufgrund des geringen Flächenbedarfes und der daraus resultierenden einfachen Integrierbarkeit in der Nähe des Logistikbereiches relativ gering, ähnlich wie bei H2IntraDrive. Die Kosten aller Komponenten der Infrastruktur sowie die Flächenkosten für H_2-Speicher und Betankungsanlage sind in Anlehnung an H2IntraDrive gewählt und beinhalten bereits alle notwendigen Sicherheitsmaßnahmen. Die H_2-Infrastruktur im BMW Group Werk Leipzig ist jedoch mit einer Verdichterleistung von 70 kg Wasserstoff pro Schicht über die aktuellen Anforderungen hinaus ausgelegt. Infolgedessen wird die Annahme getroffen, dass sich die Kosten bei der Hälfte der notwendigen Verdichterleistung auch halbieren. Infolgedessen kann eine kleinere Skalierung der Infrastrukturkosten innerhalb des Berechnungsmodells erreicht und der Effekt einer eventuell zu großen Infrastruktur vermindert werden. Die Flächenkosten innerhalb der Fertigungshalle bzw. für den Dispenser wurden auf Basis unterschiedlicher Aussagen aus dem Bereich Automobilproduktion gewählt. Die Anzahl an Dispensern wird anhand von Betankungszeiten sowie der Betankungen pro Schicht innerhalb des Modells berechnet. Für den Betrieb der Infrastruktur ist kein zusätzliches Personal notwendig.

Tabelle 7-5: Definition Einflussfaktoren Wasserstoffinfrastruktur für Basisszenario Schlepper

Wasserstoffinfrastruktur		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Wasserstoffkosten [€/kg]	7,15	Hersteller
Lebensdauer [Jahre]	15	Hersteller
Energiebedarf Verdichtung H_2 [kWh/kg]	1,58	H2IntraDrive
Ø Betankungsdauer [min]	1,6	H2IntraDrive
Ø Anfahrstrecke für Betankung [m]	20	H2IntraDrive
Kaufpreis Betankungsanlage und H_2-Speicher [€ je 35 kg H_2/Schicht]	185.000	H2IntraDrive
Kaufpreis Dispenser [€/Stück]	40.000	H2IntraDrive
Wartungskosten [€/Jahr]	[redacted]	Hersteller
Flächenkosten Betankungsanlage und H_2-Speicher [€ je 35 kg H_2/Schicht]	65.000	H2IntraDrive
Fläche Dispenser [m²/Dispenser]	15	H2IntraDrive
Flächenkosten Dispenser [€/m²]	1.000	Eigene Festlegung
Planung & Genehmigungskosten [€]	15.000	H2IntraDrive

Hinsichtlich der im Basisszenario gewählten Rahmenbedingungen für die Batterieinfrastruktur in Tabelle 7-6 wurde eine zentrale Batterieladestation innerhalb einer Fertigungshalle gewählt. Den Batteriewechsel führt dabei eigenständiges Personal der Ladestation mit Hilfe eines Verschiebewagens durch. Die Anzahl wird dabei anhand der Batteriewechsel pro Schicht, Batteriewechselzeiten und unter Berücksichtigung des wöchentlichen Nachfüllens des Batteriewassers errechnet. Als Ladetechnologie werden 50Hz-Ladegeräte sowie Batterien ohne Elektrolytumwälzung (EUW) verwendet. Die für die Ladestation notwendige Fläche richtet sich an Erfahrungswerten aus dem BMW Group Werk Leipzig. Flächenkosten sowie Planungs- und Genehmigungskosten werden identisch wie bei der H_2-Infrastruktur gewählt.

Tabelle 7-6: Definition Einflussfaktoren Batterieinfrastruktur für Basisszenario Schlepper

Batterieinfrastruktur		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Stromkosten [€/kWh]	0,12	H2IntraDrive
Lebensdauer HF-Ladegeräte [Jahre]	10	Hersteller
Lebensdauer 50Hz-Ladegeräte [Jahre]	15	Hersteller
Lebensdauer Wechselequipment [Jahre]	15	Hersteller
Lebensdauer Batteriestellplätze [Jahre]	15	Hersteller
Batteriewechsel	zentral	Eigene Festlegung
Personalkosten Ladestation [€/h]	18	Eigene Festlegung
Ø Batteriewechseldauer [min]	6	Eigene Festlegung
Ø Wartezeit für Batteriewechsel [min]	0	Eigene Festlegung
Batteriewasser auffüllen [min/Stück/Woche]	5	Eigene Festlegung
Ø Anfahrstrecke für Batteriewechsel [m]	200	Eigene Festlegung
Wirkungsgrad Ladegerät (50Hz) [%]	75	[VDI-2008]
Kaufpreis Ladegerät (50Hz) [€/Stück]		Hersteller
Kaufpreis Ladegerät (HF) [€/Stück]		Hersteller
Kaufpreis Verschiebewagen [€/Stück]	7.500	Hersteller
Kaufpreis Batteriestellplatz [€/Batterie]	1.000	Hersteller
Wartungskosten Ladegeräte [€/Jahr]		Hersteller
Wartungskosten Verschiebewagen [€/Jahr]		Hersteller
Flächenkosten Ladestation [€/m²]	1.000	Wie bei Dispenser
Ladestationsfläche pro Wechselbatterie [m²]	4	BMW
Planung & Genehmigungskosten [€]	15.000	Wie bei H_2

Tabelle 7-7 zeigt die definierten Einflussfaktoren aus dem Bereich Flurförderzeug. Der Energiebedarf des Schleppers wurde auf Basis des in H2IntraDrive gemessenen Verbrauchs in Abstimmung mit Linde MH erhöht. Hauptgrund hierfür liegt im Transport von leichten CFK-Teilen in der H2IntraDrive-Anwendung und dem damit zusammenhängenden geringeren Energieverbrauch des Schleppers. Für jedes Flurförderzeug werden insgesamt zwei Batterien vorgehalten, wobei sich eine im Fahrzeug befindet und die andere in der Batterieladestation geladen wird bzw. nach der Ladung abkühlt. Die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit zum Batteriewechsel bzw. der H_2-Betankung stellt die maximal zulässige Geschwindigkeit von Flurförderzeugen im Werk Leipzig dar. Die Personalkosten entsprechen einem Mitarbeiter eines Logistikdienstleisters. Eventuelle Wartungen und Reparaturen werden organisatorisch durch Ersatzfahrzeuge kompensiert bzw. außerhalb der eigentlichen Betriebszeit durchgeführt. Dies gilt auch für Batterien und Brennstoffzellensysteme.

Tabelle 7-7: Definition Einflussfaktoren Flurförderzeug für Basisszenario Schlepper

Flurförderzeug		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Energiebedarf Flurförderzeug [kWh/Bh]	0,89	Anlehnung an H2IntraDrive
Auslastung [%]	65	[VDI-2695]
Anzahl Batterien [Stück/FFZ]	2	Eigene Festlegung
Ø Fahrgeschwindigkeit [km/h]	10	BMW
Gewicht [kg]	950	Hersteller
Lebensdauer [Bh]	10.000	Hersteller
Personalkosten Fahrer [€/h]	20	Eigene Festlegung
Kaufpreis [€/Stück]		Hersteller
Kaufpreis Batteriewechseldevice [€/FFZ]		Hersteller
Umbaukosten zu H_2-Flurförderzeug [€/FFZ]		Eigene Festlegung
Wartungskosten [€/Stück/Jahr]		Hersteller
Schrottwert [€/Tonne]	170	Hersteller
Wartungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Störungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung

Die in Tabelle 7-8 definierten Werte für die verwendeten Brennstoffzellensysteme stammen vorwiegend von den jeweiligen Herstellern. Ferner wird eine Reduzierung des Brennstoffzellenwirkungsgrads über die Lebensdauer mit berücksichtigt. Beim nutzbaren Tankinhalt wird davon ausgegangen, dass die Flurförderzeuge durch Überfüllen (siehe Kapitel 4.3.2) nahezu vollbetankt werden und der Fahrer fast die gesamte Tankkapazität nutzt.

Tabelle 7-8: Definition Einflussfaktoren Brennstoffzellensystem für Basisszenario Schlepper

Brennstoffzellensystem		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Gewicht [kg]	256	Hersteller
Lebensdauer [Bh]	10.000	Hersteller
Kaufpreis [€/Stück]		Hersteller
Wartungskosten [€/Stück/Jahr]		Hersteller
Schrottwert [€/Tonne]	170	Hersteller
Wartungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Störungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Wirkungsgrad Brennstoffzellensystem [%]	45	Hersteller
Wirkungsgradreduzierung über Lebensdauer [%]	14	Hersteller
Maximaler Tankinhalt [kg]	0,73	Hersteller
Nutzbarer Tankinhalt [%]	95	Eigene Festlegung

Tabelle 7-9 zeigt die Kosteneinflussfaktoren, die aus den verwendeten Blei-Säure-Batterien hervorgehen. Es werden neue Batterien ohne Elektrolytumwälzung eingesetzt. Der Fahrer nutzt 80 Prozent der zur Verfügung stehenden Batteriekapazität um eine lebensdauerreduzierende Tiefenentladung der Batterie zu verhindern. Im Laufe des Batterielebenszyklus findet, wie bei einer realen Batterie eine Reduzierung der nutzbaren Batteriekapazität sowie des Batteriewirkungsgrades statt.

Tabelle 7-9: Definition Einflussfaktoren Blei-Säure Batterie für Basisszenario Schlepper

Blei-Säure Batterie		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Gewicht [kg]	295	Hersteller
Lebensdauer [Bh]	6.000	Hersteller
Kaufpreis [€/Stück]		Hersteller
Wartungskosten [€/Stück/Jahr]		Hersteller
Schrottwert [€/Tonne]	648	Hersteller
Wartungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Störungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Wirkungsgrad Batterie ohne EUW [%]	87	[VDI-2008]
Wirkungsgradreduzierung über Lebensdauer [%]	20	Hersteller
Batteriekapazität [Ah]	500	Hersteller
Batteriespannung [V]	24	Hersteller
Nutzbare Batteriekapazität [%]	80	Eigene Festlegung
Kapazitätsreduzierung über Lebensdauer [%]	20	Hersteller

7.3.2 **Basisszenario Gabelstapler**

Entsprechend der Festlegung des Basisszenarios Schlepper werden die Rahmenbedingungen der Gabelstaplerbewertung definiert. Folgend wird auf die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Szenarien eingegangen.

Die allgemeinen Rahmenbedingungen der Gabelstapleranwendung in Tabelle 7-10 ändern sich im Vergleich zur Schlepperanwendung nicht. Die Anzahl an Flurförderzeugstunden pro Schicht ist weiterhin so festgelegt, dass insgesamt ca. 50 Gabelstapler im Einsatz sind. Schichtmodell sowie Anzahl an Arbeitstagen pro Jahr entsprechen wieder einem typischen 2-Schichtbetrieb.

Tabelle 7-10: Definition Einflussfaktoren Allgemeine Rahmenbedingungen für Basisszenario Gabelstapler

Allgemeine Rahmenbedingungen		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Flurförderzeugstunden pro Schicht [h]	350	Eigene Festlegung
Arbeitstage pro Jahr [d]	220	H2IntraDrive
Schichten pro Tag [d]	2	H2IntraDrive
Bruttoarbeitsstunden pro Schicht [h]	8	H2IntraDrive
Nettoarbeitsstunden pro Schicht [h]	7,25	H2IntraDrive
Abzinsungsfaktor [%]	10	Eigene Festlegung
Finanzierungszinssatz [%]	10	Eigene Festlegung
Anteil Fremdfinanzierung [%]	100	Eigene Festlegung
Förderung	Nein	Eigene Festlegung

Die Rahmenbedingungen für die Wasserstoffinfrastruktur in Tabelle 7-11 sind identisch der des Schleppers. Lediglich die Betankungszeit hat sich aufgrund des höheren Tankinhaltes von 1,6 Minuten auf 2,2 Minuten erhöht.

Tabelle 7-11: Definition Einflussfaktoren Wasserstoffinfrastruktur für Basisszenario Gabelstapler

Wasserstoffinfrastruktur		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Wasserstoffkosten [€/kg]	7,15	Hersteller
Lebensdauer [Jahre]	15	Hersteller
Energiebedarf Verdichtung H_2 [kWh/kg]	1,58	H2IntraDrive
Ø Betankungsdauer [min]	2,2	H2IntraDrive
Ø Anfahrstrecke für Betankung [m]	20	H2IntraDrive
Kaufpreis Betankungsanlage und H_2-Speicher [€ je 35 kg H_2/Schicht]	185.000	H2IntraDrive
Kaufpreis Dispenser [€/Stück]	40.000	H2IntraDrive
Wartungskosten [€/Jahr]		Hersteller
Flächenkosten Betankungsanlage und H_2-Speicher [€ je 35 kg H_2/Schicht]	65.000	H2IntraDrive
Fläche Dispenser [m²/Dispenser]	15	H2IntraDrive
Flächenkosten Dispenser [€/m²]	1.000	Eigene Festlegung
Planung & Genehmigungskosten [€]	15.000	H2IntraDrive

Ähnlich wie bei der H_2-Infrastruktur, gibt es bei der Batterieinfrastruktur in Tabelle 7-12 eine Änderung in der Dauer des Energy Refuelings. Ferner wird dieses mit Hilfe eines

Krans durchgeführt. Der Batteriewechsel erfolgt dabei immer noch in einer zentralen Batterieladestation. Zudem sind die Kosten der Ladegeräte angestiegen.

Tabelle 7-12: Definition Einflussfaktoren Batterieinfrastruktur für Basisszenario Gabelstapler

Batterieinfrastruktur		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Stromkosten [€/kWh]	0,12	H2IntraDrive
Lebensdauer HF-Ladegeräte [Jahre]	10	Hersteller
Lebensdauer 50Hz-Ladegeräte [Jahre]	15	Hersteller
Lebensdauer Wechselequipment [Jahre]	15	Hersteller
Lebensdauer Batteriestellplätze [Jahre]	15	Hersteller
Batteriewechsel	zentral	Eigene Festlegung
Personalkosten Ladestation [€/h]	18	Eigene Festlegung
Ø Batteriewechseldauer [min]	15	Eigene Festlegung
Ø Wartezeit für Batteriewechsel [min]	0	Eigene Festlegung
Batteriewasser auffüllen [min/Stück/Woche]	5	Eigene Festlegung
Ø Anfahrstrecke für Batteriewechsel [m]	200	Eigene Festlegung
Wirkungsgrad Ladegerät (50Hz) [%]	75	[VDI-2008]
Kaufpreis Ladegerät (50Hz) [€/Stück]		Hersteller
Kaufpreis Ladegerät (HF) [€/Stück]		Hersteller
Kaufpreis Kran [€/Stück]	25.000	Hersteller
Kaufpreis Batteriestellplatz [€/Batterie]	1.000	Hersteller
Wartungskosten Ladegeräte [€/Jahr]		Hersteller
Wartungskosten Verschiebewagen [€/Jahr]		Hersteller
Flächenkosten Ladestation [€/m²]	1.000	Wie bei Dispenser
Ladestationsfläche pro Wechselbatterie [m²]	4	BMW
Planung & Genehmigungskosten [€]	15.000	Wie bei H_2

Tabelle 7-13 zeigt die definierten Kosteneinflussfaktoren, die vom Gabelstapler ausgehen. Der Energiebedarf ist dabei deutlich höher als der des Schleppers und wurde in Abstimmung mit Linde MH festgelegt. Aufgrund seiner Bauform haben sich zudem das Gewicht sowie die Lebensdauer des Flurförderzeuges erhöht. Ferner sind Kaufpreis sowie Wartungskosten deutlich angestiegen. Für den Batteriewechsel wird im Basisszenario ein seitlicher Batterieausschub bzw. Batteriewechseldevice eingesetzt.

Tabelle 7-13: Definition Einflussfaktoren Flurförderzeug für Basisszenario Gabelstapler

Flurförderzeug		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Energiebedarf Flurförderzeug [kWh/Bh]	6,35	Anlehnung an H2IntraDrive
Auslastung [%]	65	[VDI-2695]
Anzahl Batterien [Stück/FFZ]	2	Eigene Festlegung
Ø Fahrgeschwindigkeit [km/h]	10	BMW
Gewicht [kg]	5.701	Hersteller
Lebensdauer [Bh]	20.000	Hersteller
Personalkosten Fahrer [€/h]	20	Eigene Festlegung
Kaufpreis [€/Stück]	[redacted]	Hersteller
Kaufpreis Batteriewechseldevice [€/FFZ]		Hersteller
Umbaukosten zu H_2-Flurförderzeug [€/FFZ]		Eigene Festlegung
Wartungskosten [€/Stück/Jahr]		Hersteller
Schrottwert [€/Tonne]	170	Hersteller
Wartungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Störungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung

Ähnlich wie im Bereich des Flurförderzeuges gibt es für das Brennstoffzellensystem in Tabelle 7-14 neue Rahmenbedingungen. Gewicht, Lebensdauer, Kaufpreis, Wartungskosten sowie Tankinhalt sind im Vergleich zum Schlepper deutlich angestiegen.

Tabelle 7-14: Definition Einflussfaktoren Brennstoffzellensystem für Basisszenario Gabelstapler

Brennstoffzellensystem		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Gewicht [kg]	1.558	Hersteller
Lebensdauer [Bh]	20.000	Hersteller
Kaufpreis [€/Stück]	[redacted]	Hersteller
Wartungskosten [€/Stück/Jahr]		Hersteller
Schrottwert [€/Tonne]	170	Hersteller
Wartungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Störungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Wirkungsgrad Brennstoffzellensystem [%]	45	Hersteller
Wirkungsgradreduzierung über Lebensdauer [%]	14	Hersteller
Maximaler Tankinhalt [kg]	1,8	Hersteller
Nutzbarer Tankinhalt [%]	95	Eigene Festlegung

Tabelle 7-15 zeigt die Kosteneinflussfaktoren, die aus der Verwendung der Blei-Säure Batterie beim Gabelstapler hervorgehen. Batteriegewicht, Anschaffungs- und Wartungskosten sowie Batteriekapazität und -spannung sind im Hinblick auf die Schlepperanwendung unterschiedlich.

Tabelle 7-15: Definition Einflussfaktoren Blei-Säure Batterie für Basisszenario Gabelstapler

Blei-Säure Batterie		
Einflussfaktor	**Wert**	**Quelle**
Gewicht [kg]	1.863	Hersteller
Lebensdauer [Bh]	6.000	Hersteller
Kaufpreis [€/Stück]		Hersteller
Wartungskosten [€/Stück/Jahr]		Hersteller
Schrottwert [€/Tonne]	648	Hersteller
Wartungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Störungszeit pro Schicht [h]	0	Eigene Festlegung
Wirkungsgrad Batterie ohne EUW [%]	87	[VDI-2008]
Wirkungsgradreduzierung über Lebensdauer [%]	20	Hersteller
Batteriekapazität [Ah]	775	Hersteller
Batteriespannung [V]	80	Hersteller
Nutzbare Batteriekapazität [%]	80	Eigene Festlegung
Kapazitätsreduzierung über Lebensdauer [%]	20	Hersteller

7.4 Ergebnisse Basisszenarien

7.4.1 **Schlepper**

Auf Basis der vorgegebenen 350 Flurförderzeugstunden pro Schicht werden 48,9 batteriebetriebene Schlepper (E-Schlepper) pro Schicht benötigt. Hingegen bedarf es lediglich 48,4 wasserstoffbetriebener Schlepper (H_2-Schlepper). Die Einsparung von 0,5 Schlepper sowie Flurförderzeugfahrer ergeben sich aufgrund der höheren betrieblichen Verfügbarkeit des H_2-Schleppers. Zur Durchführung der anfallenden Batteriewechsel wird ein Mitarbeiter pro Schicht an der Ladestation benötigt. Auf Basis dieser Werte werden alle weiteren Kosten berechnet.

Abbildung 7-3 zeigt alle anfallenden Kosten im relativen Verhältnis zu den Gesamtkosten des H_2-Schleppers. Diese sind anhand der vorher definierten Hauptkostentreiber aufgegliedert. Da die Personalkosten der 350 Flurförderzeugstunden pro Schicht für Batterie und Wasserstoff identisch sind, wurden diese vernachlässigt. Auffällig sind dabei die höheren Gesamtkosten des H_2-Schleppers. Diese ergeben sich vorwiegend

aus der deutlich höheren Investition in die Power Unit, den höheren Wartungskosten der Power Unit sowie den höheren Energiekosten. Die höhere Investition in die Power Unit ist im Vergleich zur Batterie dem deutlich höheren Anschaffungspreis bei nur leichter Erhöhung der Lebensdauer geschuldet. Die höheren Energiekosten ergeben sich zum einen aus dem schlechteren Gesamtwirkungskrad der Wasserstofftechnologie im Vergleich zur Batterietechnologie und zum anderen aus dem effektiv teureren Energiepreis. Bei einem Vergleich des Strompreises (0,12 €/kWh) und Wasserstoffpreises (0,21 €/kWh; auf Heizwert bezogen), jeweils in der Einheit Kilowattstunde umgerechnet, wird dies deutlich ersichtlich. Geringere Kosten ergeben sich beim H_2-Schlepper hingegen bei den Personalkosten für weitere Tätigkeiten sowie bei der Investition in die Infrastruktur. Die geringeren Personalkosten ergeben sich aus der Mitarbeitereinsparung von 0,5 Flurförderzeugfahrer sowie dem Mitarbeiter an der Ladestation. Hingegen ist die geringere Investition in die Infrastruktur der Festlegungen des „nicht Verkaufs“ der errichteten Flächen am Ende des Betrachtungszeitraums sowie dem kurzen Betrachtungszeitraum aufgrund der niedrigen Lebensdauer des Schleppers geschuldet. Dabei stehen 196 m² der Batterieladefläche den 15 m² für die Dispenserfläche gegenüber.

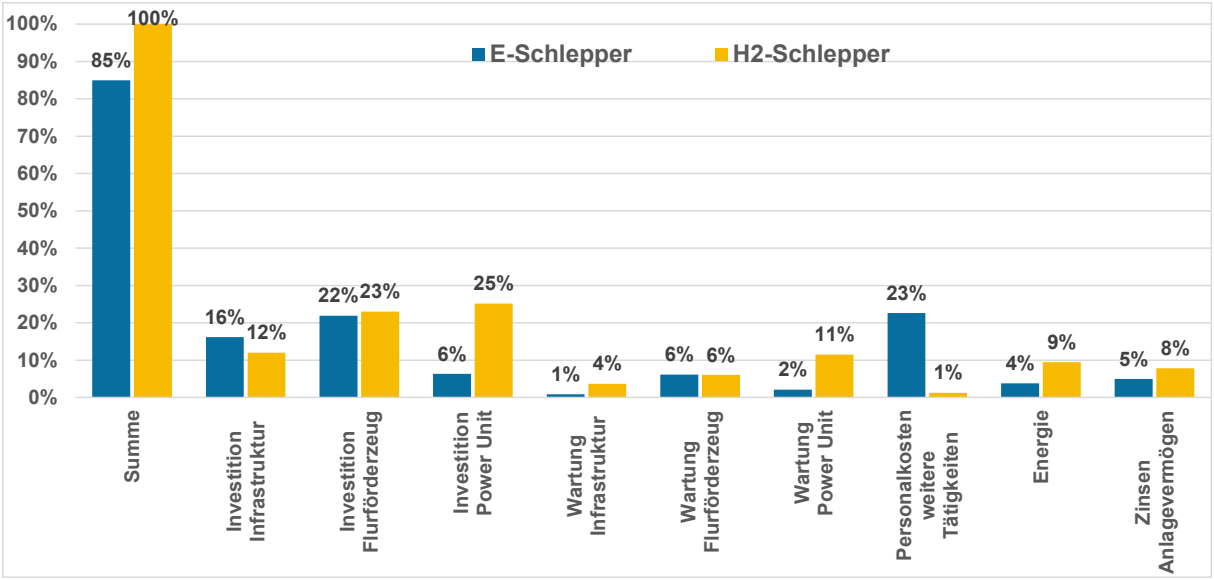

Abbildung 7-3: Kostenvergleich Basisszenario Schlepper

7.4.2 **Gabelstapler**

Aus den vorgegeben Rahmenbedingungen des Basisszenarios Gabelstapler ergeben sich 50,1 batteriebetriebene Gabelstapler (E-Gabelstapler) sowie 48,6 wasserstoffbetriebene Gabelstapler (H_2-Gabelstapler). Dies ist wieder auf die höhere betriebliche Verfügbarkeit des H_2-Gabelstaplers zurückzuführen. Neben den zusätzlichen 1,5 Gabelstaplerfahrern bei der Batterieanwendung werden zudem zwei Mitarbeiter an der Ladestation für die notwendigen Batteriewechsel benötigt.

Eine Betrachtung des Kostenvergleichs der Gabelstapleranwendung in Abbildung 7-4 zeigt, dass diese fast analog zur Schlepperanwendung bewertet werden kann. Lediglich die H_2-Infrastruktur ist aufgrund des höheren Wasserstoffverbrauchs teurer als die Batterieinfrastruktur geworden. Der deutlich höhere Energieverbrauch führt auch dazu, dass die Energiekosten einen deutlich höheren Anteil an den Gesamtkosten aufweisen. Ein weiterer Unterschied zur Schlepperanwendung liegt im geringeren relativen Unterschied der Investition Power Unit. Dies liegt an dem geringeren Unterschied beim Anschaffungspreis der Power Unit sowie der deutlich längeren Lebensdauer des Brennstoffzellensystems im Vergleich zur Batterie sowie zum Brennstoffzellensystem des Schleppers.

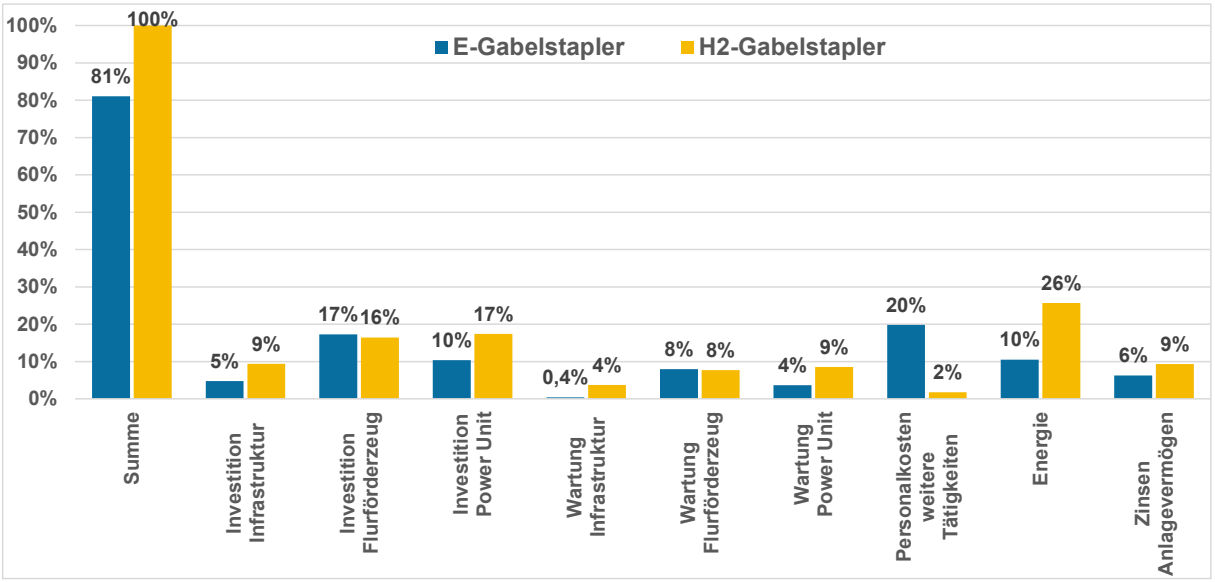

Abbildung 7-4: Kostenvergleich Basisszenario Gabelstapler

7.5 Sensitivitätsanalysen

7.5.1 Definition Eingangsparameter der Sensitivitätsanalysen

Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen können die Auswirkungen von Veränderungen der in Kapitel 7.3 definierten Rahmenbedingungen untersucht werden. Infolgedessen können für H_2-Flurförderzeuge wirtschaftliche Szenarien bzw. Rahmenbedingungen identifiziert und zukünftige Entwicklungsziele im Bereich Brennstoffzellentechnologie abgeleitet werden. Tabelle 7-16 und Tabelle 7-17 zeigen die gewählten Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalysen. Diese sind anhand der in Kapitel 7.3 eingeführten Kategorien der einzelnen Einflussfaktoren unterteilt, wobei nur für ausgewählte Faktoren eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird. Der Basiswert ist der ursprünglich gewählte Wert im Basisszenario. Die unteren sowie oberen Werte sind hingegen die neuen Eingangswerte für die Sensitivität, wobei für jeden Wert einzeln der Kapitalwert errechnet wird. Die Varianz der einzelnen Parameter erfolgt beim Schlepper und Gabelstapler anhand desselben prozentualen Anteils, d.h. der untere Wert der Batteriewechselzeit beträgt beim Schlepper und Gabelstapler 66 Prozent des eigentlichen Wertes aus dem Basisszenario, der obere hingegen 250 Prozent.

Tabelle 7-16: Eingangsparameter für Sensitivitätsanalyse Schlepper

Schlepper			
Einflussfaktor	**Basiswert**	**Untere Wert**	**Obere Wert**
Allgemeine Rahmenbedingungen			
Flurförderzeugstunden pro Schicht [h]	350	50	700
Schichten pro Tag [d]	2	1	3
Abzinsungsfaktor [%]	10	0	20
Flächenkosten [€/m²]	1.000	200	5.000
Wasserstoffinfrastruktur			
Investition Infrastruktur [%]	100	70	130
Wasserstoffkosten [€/kg]	7,15	4	10
Ø Betankungsdauer [min]	1,6	1	5
Ø Anfahrstrecke für Betankung [m]	20	20	200
Batterieinfrastruktur			
Investition Infrastruktur [%]	100	70	130
Stromkosten [€/kWh]	0,12	0,09	0,15
Ø Batteriewechseldauer [min]	6	4	15
Ø Wartezeit für Batteriewechsel [min]	0	0	20
Ø Anfahrstrecke für Batteriewechsel [m]	200	20	500
Personal Ladestation [MA/Schicht]	1	0	3
Wirkungsgrad Ladetechnologie [%]	65	55	84
Flurförderzeug			
Energiebedarf Flurförderzeug [kWh/Bh]	0,89	0,45	1,34
Auslastung [%]	65	40	80
Personalkosten [€/h]	20	10	40
Umbaukosten zu H_2-Flurförderzeug [%]	100	0	200
Brennstoffzellensystem			
Lebensdauer Brennstoffzelle [Bh]	10.000	5.000	15.000
Kaufpreis Brennstoffzellensystem [%]	100	70	130
Wartungskosten Brennstoffzellen [%]	100	70	130
Wirkungsgrad Brennstoffzellensystem [%]	45	35	55
Tankkapazität [kg]	0,73	0,5	1
Wirkungsgradreduzierung Brennstoffzelle [%]	14	3,5	24,5
Blei-Säure Batterie			
Lebensdauer Batterie [Bh]	6.000	3.000	9.000
Kaufpreis Batterie [%]	100	70	130
Wartungskosten Batterien [€]	100	70	130
Batteriekapazität [Ah]	500	375	625
Wirkungsgradreduzierung Batterie [%]	20	5	35

Tabelle 7-17: Eingangsparameter für Sensitivitätsanalyse Gabelstapler

Gabelstapler			
Einflussfaktor	**Basiswert**	**Untere Wert**	**Obere Wert**
Allgemeine Rahmenbedingungen			
Flurförderzeugstunden pro Schicht [h]	350	50	700
Schichten pro Tag [d]	2	1	3
Abzinsungsfaktor [%]	10	0	20
Flächenkosten [€/m²]	1.000	200	5.000
Wasserstoffinfrastruktur			
Investition Infrastruktur [%]	100	70	130
Wasserstoffkosten [€/kg]	7,15	4	10
Ø Betankungsdauer [min]	2,2	1,4	6,9
Ø Anfahrstrecke für Betankung [m]	20	20	200
Batterieinfrastruktur			
Investition Infrastruktur [%]	100	70	130
Stromkosten [€/kWh]	0,12	0,09	0,15
Ø Batteriewechseldauer [min]	15	10	38
Ø Wartezeit für Batteriewechsel [min]	0	0	20
Ø Anfahrstrecke für Batteriewechsel [m]	200	20	500
Personal Ladestation [MA/Schicht]	2	0	4
Wirkungsgrad Ladetechnologie [%]	65	55	84
Flurförderzeug			
Energiebedarf Flurförderzeug [kWh/Bh]	6,35	3,1	9,5
Auslastung [%]	65	40	80
Personalkosten [€/h]	20	10	40
Umbaukosten zu H_2-Flurförderzeug [%]	100	0	200
Brennstoffzellensystem			
Lebensdauer Brennstoffzelle [Bh]	20.000	10.000	30.000
Kaufpreis Brennstoffzellensystem [%]	100	70	130
Wartungskosten Brennstoffzellen [%]	100	70	130
Wirkungsgrad Brennstoffzellensystem [%]	45	35	55
Tankkapazität [kg]	1,8	1,2	2,4
Wirkungsgradreduzierung Brennstoffzelle [%]	14	3,5	24,5
Blei-Säure Batterie			
Lebensdauer Batterie [Bh]	6.000	3.000	9.000
Kaufpreis Batterie [%]	100	70	130
Wartungskosten Batterien [%]	100	70	130
Batteriekapazität [Ah]	775	580	968
Wirkungsgradreduzierung Batterie [%]	20	5	35

7.5.2 **Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Schlepper**

Abbildung 7-5 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Basisszenarios Schlepper. In der Darstellung ist jeweils die Spanne des Kapitalwertes zwischen dem unteren und oberen Wert des jeweiligen veränderten Einflussfaktors zu sehen, wobei der Kapitalwert als absoluter Betrag angezeigt wird und die Personalkosten für die Flurförderzeugstunden pro Schicht analog zu den vorherigen Ergebnisdarstellungen ausgegrenzt sind. Liegt der Kapitalwert des H_2-Schleppers links vom Kapitalwert des E-Schleppers ist die H_2-Anwendung folglich wirtschaftlicher als die E-Anwendung.

Bei der Betrachtung der Sensitivität der allgemeinen Rahmenbedingungen wird ersichtlich, dass die Anzahl der Flurförderzeuge bzw. Flurförderzeugstunden pro Schicht im LCC-Modell keinen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit nehmen. Hingegen sind die Kosten im 3-Schicht Betrieb für H_2-Schlepper und E-Schlepper fast identisch. Dies liegt am weiteren Personalbedarf an der Batterieladestation in der dritten Schicht. Des Weiteren beeinflussen die Flächenkosten wesentlich die Wirtschaftlichkeit der H_2-Schlepper im Basisszenario.

Im Bereich der Infrastruktur beeinflusst eine Veränderung der Investition in die H_2-Infrastruktur und des Wasserstoffpreises zwar deutlich den Kapitalwert, führt jedoch nicht zu einem wirtschaftlichen Betrieb der H_2-Schlepper. Die Investition in die Batterieinfrastruktur und Stromkosten verhalten sich analog dazu. Eine Veränderung der Batteriewechseldauer, Wartezeit für Batteriewechsel und auch Personalbedarf an der Ladestation führen hingegen zu einem wirtschaftlichen Einsatz der H_2-Schlepper im Basisszenario. Diese drei Einflussfaktoren sind ein deutliches Indiz für einen suboptimalen Batteriewechsel.

Im Blick auf den Bereich Flurförderzeug beeinflusst der Energiebedarf und die Auslastung der Flurförderzeuge den Kapitalwert der E-Schlepper und H_2-Schlepper auf fast identische Weise. Hingegen führt ein Anstieg der Personalkosten beim E-Schlepper zu einem deutlichen Anstieg der Kosten und somit zu einem wirtschaftlichen Basisszenario aus Sicht der H_2-Schlepper.

Im Bereich der Brennstoffzellensysteme und Blei-Säure-Batterien sind besonders die Lebensdauer und der Kaufpreis des Brennstoffzellensystems hervorzuheben. Die Varianz in den Eingangswerten führt hierbei zu einer deutlichen Auswirkung auf den Kapitalwert der H_2-Schlepper, wenngleich diese für eine wirtschaftliche H_2-Anwendung nicht ausreicht.

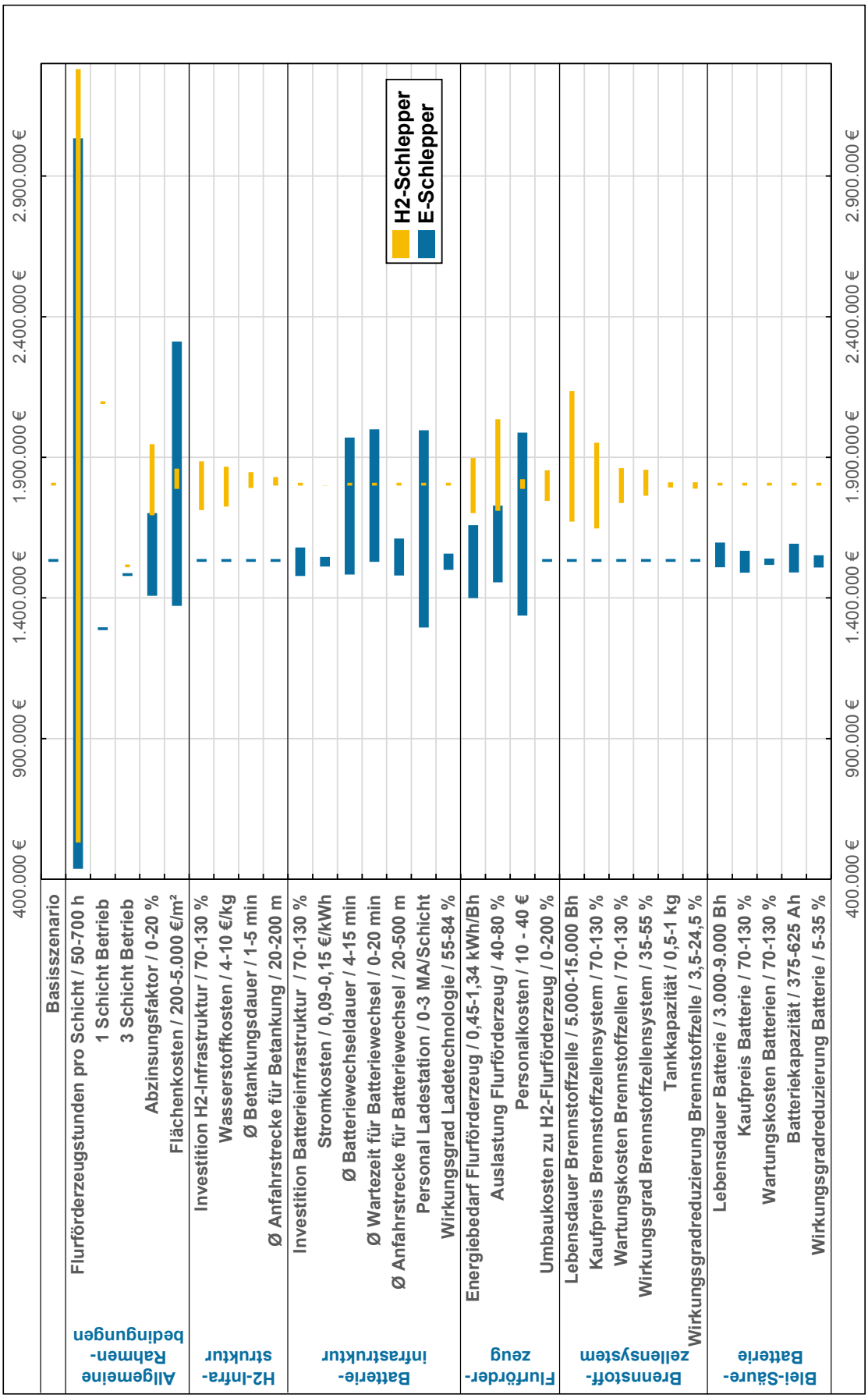

Abbildung 7-5: Sensitivität Basisszenario Schlepper (absoluter Betrag des Kapitalwerts)

7.5.3 **Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Gabelstapler**

Analog zu den Ergebnissen aus der Sensitivität der Schlepperanwendung in Abbildung 7-5 sind in Abbildung 7-6 die Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse des Basisszenarios Gabelstapler zu sehen. Ähnlich wie bei der Schlepperanwendung führt auch hier eine Veränderung der Anzahl der Flurförderzeuge bzw. Flurförderzeugstunden pro Schicht zu keinem wirtschaftlichen Ergebnis des H_2-Gabelstaplers. Die Erweiterung um eine dritte Schicht wirkt sich hier zwar positiv für den H_2-Gabelstapler aus, führt jedoch zur etwas größeren Differenz der beiden Kapitalwerte als beim Schlepper. Ferner führt ein Anstieg der Flächenkosten nicht mehr zu einem wirtschaftlichen Basisszenario des H_2-Gabelstaplers. Dies kann mit dem geringeren relativen Anteil der Flächenkosten am Gesamtkapital begründet werden.

Im Bereich der Infrastruktur beeinflussen die Wasserstoffkosten aufgrund der höheren Gesamtenergiekosten den Kapitalwert der H_2-Gabelstapler im Vergleich zum Schlepper stärker. Die Veränderungen der Wartezeit für Batteriewechsel und der Anzahl an Personal an der Ladestation wirken sich zwar noch deutlich auf den Kapitalwert des E-Gabelstaplers aus, führen jedoch nicht mehr zu einem wirtschaftlichen Basisszenario des H_2-Gabelstaplers. Der Anstieg der Batteriewechseldauer führt hingegen zu einem wirtschaftlichen Einsatz des H_2-Gabelstaplers.

Des Weiteren führen hohe Personalkosten im Bereich Flurförderzeug zu einem Kapitalwert des E-Gabelstaplers, der über dem des H_2-Gabelstaplers liegt. Die Änderung des Energiebedarfes wirkt sich wiederum auf beide Antriebstechnologien recht ähnlich aus.

Im Hinblick auf die Entwicklung zukünftiger Brennstoffzellensysteme wird ersichtlich, dass Lebensdauer, Kaufpreis, Wartungskosten und Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems einen deutlichen Einfluss auf den Kapitalwert des Basisszenarios nehmen. Eine Erhöhung der Tankkapazität wirkt sich hingegen nur geringfügig auf die Gesamtkosten aus.

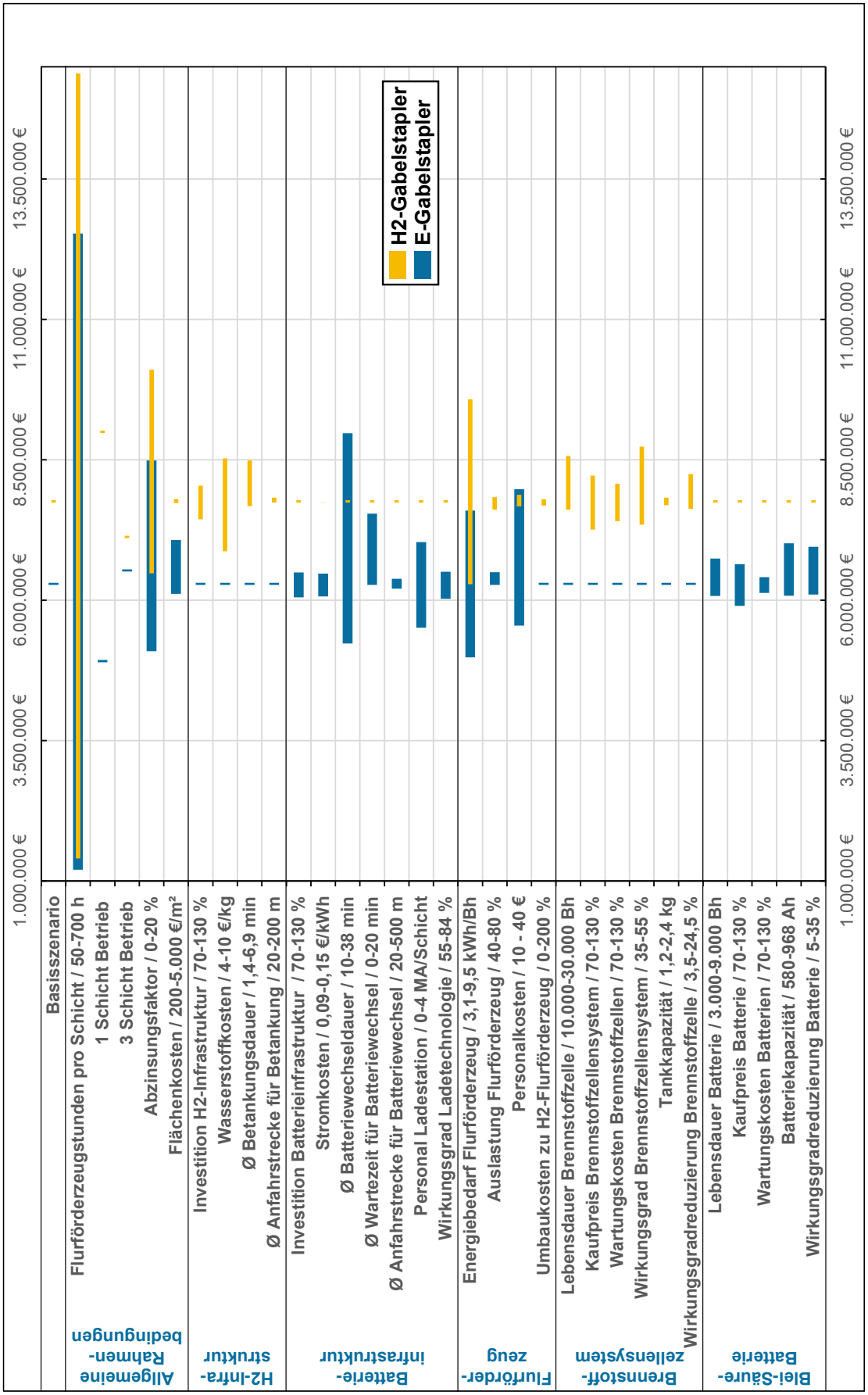

Abbildung 7-6: Sensitivität Basisszenario Gabelstapler (absoluter Betrag des Kapitalwerts)

7.6 Zusammenfassung

Ziel der Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen war die Identifikation von Rahmenbedingungen, unter denen ein wirtschaftlicher Einsatz der Fahrzeuge möglich ist. Ferner galt es technische Einflussfaktoren mit den größten positiven Kosteneffekten zu identifizieren. Hierfür wurden zunächst Kostentreiber und -einflussfaktoren identifiziert und kategorisiert. Darauf aufbauend wurde ein LCC-Modell erstellt, welches eine unabhängige Kostenberechnung für H_2-Flurförderzeuge bzw. E-Flurförderzeuge auf Basis des gemeinsamen Ausgangswertes „Anzahl an Flurförderzeugstunden pro Schicht“ ermöglichte. Anschließend wurde ein Basisszenario für eine Schlepper- bzw. Gabelstapleranwendung mit jeweils ca. 50 Flurförderzeugen definiert. Hierbei wurden reale Kosten von verschiedenen Lieferanten bzw. Herstellern ohne Förderung verwendet. Anschließend wurden die Gesamtkosten der H_2- sowie E-Anwendungen mit Hilfe der Kapitalwertmethode über den Lebenszyklus der Flurförderzeuge bestimmt. Ferner wurde durch Sensitivitätsanalysen der Einfluss verschiedenster Kosteneinflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von H_2-Flurförderzeugen analysiert. Dadurch können wesentliche Kostentreiber identifiziert werden. Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus der Bewertung der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen im Vergleich zu E-Flurförderzeugen dargestellt.

- H_2-Flurförderzeuge können bereits heute ohne Förderung wirtschaftlicher als E-Flurförderzeuge sein. Wichtige Einflussfaktoren hierfür sind
    - hohe Lohnkosten,
    - hohe Arbeitsintensität bzw. Mehrschichtbetrieb,
    - hohe Flächenkosten
    - geringer Energiebedarf des Flurförderzeuges und ein
    - suboptimaler Batteriewechselprozess mit z.B. langen Batteriewechselzeiten, langen Anfahrtswegen oder hohem Personalaufwand.
- Grundlegend muss jedoch jede einzelne Anwendung im Detail einer Wirtschaftlichkeitsbewertung unterzogen werden.
- Wesentliche Kostenvorteile von H_2-Flurförderzeugen sind
    - die höhere betriebliche Verfügbarkeit und die daraus resultierende
    - geringere Investition in Flurförderzeuge sowie
    - geringere Personalkosten für weitere Tätigkeiten wie z.B. Batteriewechsel.
    - Aufgrund der geringen benötigten Fläche ergeben sich zudem geringere Flächenkosten.
- Wesentliche Kostennachteile von H_2-Flurförderzeugen sind
    - die höheren Energiekosten,
    - die höhere Investition in Power Unit und Infrastruktur sowie

  - die höheren Wartungskosten der Power Unit und Infrastruktur.
- Wesentliche technische Einflussfaktoren der Brennstoffzellensysteme auf eine positive Wirtschaftlichkeit von H_2-Flurförderzeugen sind
  - die Erhöhung der Lebensdauer und
  - die Steigerung des Wirkungsgrades.

8 Benchmark H_2-Anwendungen Deutschland und USA

In Nordamerika sind bereits mehr als 7.000 H_2-Flurförderzeuge im Serieneinsatz. In Deutschland hingegen 14 im Demobetrieb. In Bezug auf diese Tatsache stellt sich die Frage, wie sich die Rahmenbedingungen für den Einsatz von H_2-Flurförderzeugen in Deutschland und Nordamerika unterscheiden? Bzw. unterscheiden sich diese überhaupt? Im Rahmen des im Forschungsvorhaben H2IntraDrive durchgeführten Benchmarks sollte dies herausgefunden werden. Dabei wurden die H2IntraDrive-Anwendung mit der Anwendung im BMW Group Werk Spartanburg im Rahmen eines internen Benchmarkings sowie die Anwendungen bei Mercedes in Düsseldorf und VW in Chattanooga im Rahmen eines externen Benchmarkings untersucht. Auf dieser Basis konnten anschließend wesentliche Unterschiede zischen den Rahmenbedingungen in Deutschland und USA identifiziert werden.

8.1 Benchmarkingmethode

Benchmarking ist laut Mertins „ein kontinuierlicher, systematischer Prozess des Messens und Bewertens eigener Produkte, Dienstleistungen, Methoden und Arbeitsprozesse im Vergleich zu denen von Organisationen, deren Praktiken als beste (Best Practices) anerkannt werden, mit dem Ziel der Verbesserung“ [Mer-2004, S. 73]. Benchmarking stellt nicht nur einen Unternehmensvergleich dar, sondern unterstützt die Ideenfindung und Entwicklung von Lösungskonzepten für Methoden, Verfahren, Prozesse etc. durch die Suche auch außerhalb des eigenen Unternehmens und der Branche. Die daraus resultierenden Erkenntnisse werden anschließend angepasst und auf das eigene Unternehmen übertragen. Im Laufe des Prozesses werden Unterschiede bei den eigenen Produkten, Prozessen, Methoden etc. sowie zu anderen Unternehmen dargestellt. Der Schwerpunkt der Methode ist allerdings nicht das Aufzeigen von Unterschieden, sondern die Identifikation von „Best Practices“, mit deren Adaption und Implementierung in das eigene Unternehmen Wettbewerbsvorteile generiert werden können. Daher ist es notwendig für den Vergleich ein Unternehmen heranzuziehen, welches die beste Praktik beim zu untersuchenden Objekt anwendet [Cam-1989, S. 12ff., Mer-2004, S. 17ff.]. Wie in Abbildung 8-1 ersichtlich können diese Vergleichspartner, je nach Stellung der Unternehmen zueinander, in fünf Gruppen eingeteilt werden.

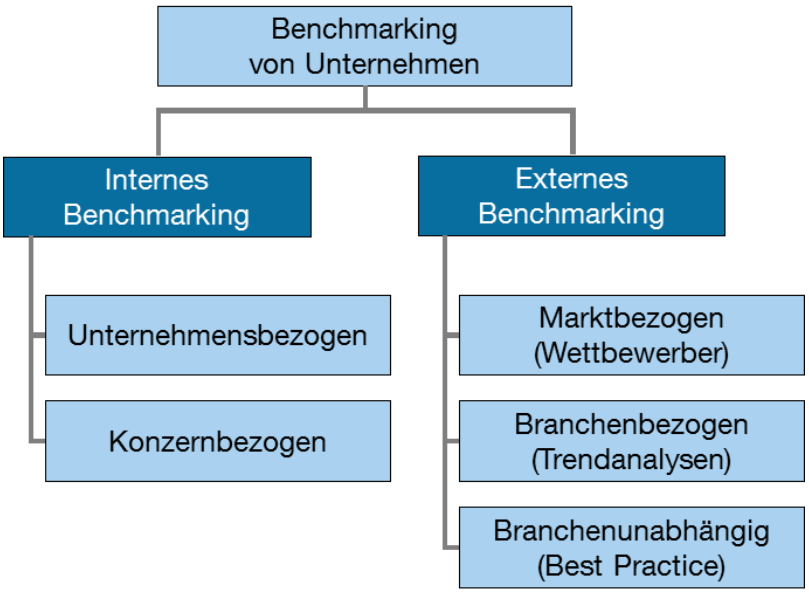

Abbildung 8-1: Formen des internen und externen Benchmarkings, [Mer-2004, S. 28]

Das interne Benchmarking dient zum innerbetrieblichen Vergleich und zur Identifikation von Schwachstellen und „Best Practices“ im eigenen Unternehmen. Darüber hinaus kann diese Form als Vorbereitung auf das externe Benchmarking genutzt werden. Das Benchmarking-Team wird mit der Methode vertraut und generiert Wissen, das für den Vergleich mit anderen Unternehmen eingesetzt werden kann [Mer-2004, S. 28ff.]. Aus diesem Grund wurde zunächst ein konzernbezogenes Benchmarking mit der Anwendung von H_2-Flurförderzeugen am Standort in Spartanburg durchgeführt. Im Vergleich zum externen Benchmarking sind die leistungs- und wettbewerbssteigernden Veränderungen beim internen Benchmarking relativ gering, da nicht „Weltklasse-Leistungen“ zum Vergleich herangezogen werden [Sie-2008, S. 33ff.]. Aus diesem Grund wird darüber hinaus in einem Benchmarking-Prozess meistens eine externe Betrachtung durchgeführt. Die Partner können dabei im jeweils gleichen Markt, meistens ein Konkurrent, in der gleichen Branche oder in einer anderen Branche identifiziert werden. Beim marktbezogenen Benchmarking wird ein Unternehmen als Vergleichspartner herangezogen, welches im gleichen Marktsegment angesiedelt ist. Zum einen können damit die Stärken und Schwächen der Konkurrenten identifiziert und die zukünftigen Aktivitäten analysiert werden, zum anderen wird der Blick nur auf die Mitbewerber gerichtet und die „Best Practice“ Lösung möglicherweise nicht gefunden. Das Hauptaugenmerk beim branchenbezogenen Benchmarking beruht auf der Suche nach Trends zur Leistungsanalyse von Subsystemen und Prozessen, wobei nach besonders innovativen Lösungen gesucht wird. Die Vorteile bestehen darin, dass sich die Unternehmen nicht mehr in einer direkten Konkurrenz zueinander befinden und sich somit der Informationsaustausch leichter gestaltet und darüber hinaus mehr potenzielle Vergleichspartner zur Verfügung stehen. Das größte Verbesserungspotenzial findet sich beim branchenunabhängigen Benchmarking, allerdings ist es auch mit dem

größten Aufwand verbunden. [Mer-2004, S. 33ff., Sie-2008, S. 38ff.]. Aus den genannten Gründen wurde daher im Rahmen des Forschungsprojektes ein externes Benchmarking bei den beiden Unternehmen Mercedes (Düsseldorf) und VW (Chattanooga, USA) durchgeführt. Trotz des laut Literatur geringen zu erwartenden Informationspotenzials wurde das marktbezogene Benchmarking gewählt, da zum einen in Deutschland hauptsächlich Automobilhersteller H_2-Flurförderzeuge einsetzten und zum anderen sich der Besuch bei Volkswagen in Chattanooga aufgrund der Nähe zu Spartanburg anbot.

Das Ziel der Benchmarking Untersuchung im Rahmen des Forschungsvorhabens H2IntraDrive besteht darin, die Unterschiede bei der Anwendung von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen zwischen Deutschland und den USA zu identifizieren. Dafür wurde im Laufe des Projektes anhand verschiedener Benchmarking-Prozesse aus der Literatur sowie der bestehenden Fragestellung eine geeignete Methode entwickelt und auf ausgewählte Einsätze von H_2-Flurförderzeuge angewendet. Exemplarisch werden hierfür die Anwendungen im BMW Group Werk Leipzig und Mercedes in Düsseldorf für den Standort Deutschland gewählt. Als H_2-Anwendungen in den USA werden BMW Group Werk Spartanburg und VW in Chattanooga analysiert.

8.2 Datenerhebung

Die für den Benchmark notwendigen Daten wurden durch Besuche vor Ort erhoben. Hierfür wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine 6-tätgige Reise in die USA zu BMW Group Werk Spartanburg und VW in Chattanooga durchgeführt. Die Anwendung in Düsseldorf wurde hingegen im Rahmen eines Erfahrungsaustauschs in Düsseldorf besichtigt. Die wichtigsten Daten aus den einzelnen Benchmarking-Analysen sind in Tabelle 8-1 anschaulich gegenübergestellt. Infolgedessen können Unterschiede und Gemeinsamkeiten der einzelnen Anwendungen einfach erkannt werden.

Tabelle 8-1: Vergleich der Anwendungen H2IntraDrive, Mercedes, BMW in USA und VW in USA

	H2IntraDrive	Mercedes Düsseldorf	BMW in USA	VW in USA (H_2-Anwendung)
Arbeitszeitmodelle und Schichtbetrieb				
Anzahl Schichten	2	3	2	2
Bruttoarbeitszeit pro Schicht [h]	8	7,25	10	10
Arbeitstage [pro Jahr] / [pro Woche]	220 / 5	240 / 5	315 / 6,5	190 / 4
Wasserstoffinfrastruktur				
Eigentumsverhältnisse	geleast	geleast	geleast	geleast
Wasserstofflagerung	gasförmig	gasförmig	flüssig	flüssig
Wasserstoffverdichtung	gasförmig	gasförmig	gasförmig / flüssig	flüssig
Max. Lagermenge Wasserstoff [kg]	130	204	8.000	4.800
Anzahl Verdichter	1 Ionen	2 Kolben	6 Ionen 2 Kryo	2 Kryo 1 Kolben (Boil-off)
HD-Leitungen zu Werkshallen	1 unterirdisch	gibt es nicht	5 auf Dach	6 auf Dach
Anzahl Dispenser	1 Indoor	1 Outdoor	16 In- & Outdoor	2 Indoor
Betankung				
Fahrzeugidentifikation erforderlich	ja	ja	nein	nein
Kommunikation Brennstoffzelle - Infra	nein	nein	teilweise	ja
Überfüllung über 350 bar	nein	nein	nein	nein
Betankungsprotokoll	ja	nein	nein	nein
Flurförderzeuge				
Anzahl H_2-Flurförderzeuge	11	2	359	45
Typen	24V & 80V	80V	24V / 36V / 48V	36V /48V
Hersteller	Linde MH	Linde MH	Crown / Raymond	Yale / Clark
Lebensdauer Flurförderzeuge [Bh]	24V: 10.000 80V: 20.000	80V: 25.000 - 30.000	>= 21.000	
Anschaffung Fahrzeug & Brennstoffz.	zusammen	zusammen	getrennt	getrennt
H_2-Verbrauch pro Tag [kg]	11	8,5	722	180
Indoor- / Outdoor- Einsatz	Indoor	Indoor & Outdoor	Indoor & Outdoor	Indoor
Leistungsabnahme Fahrzeug mit zunehmender Entladung der Batterie	nein	nein	ja	ja
Brennstoffzellensysteme				
Anzahl Brennstoffzellensysteme	14	2	378	46
davon Back-up Systeme	3	1	19	1
Eigentumsverhältnisse	gekauft	gekauft	geleast	geleast
Lebensdauer Brennstoffzelle [Bh] (LH = Laut Hersteller)	24V: 10.000 (LH) 80V: 20.000 (LH)	80V: 20.000 (LH)	ca. 25.000 (realer Wert)	20.000 (LH)
Geräuschemissionen	80V: deutlich hörbar	80V: deutlich hörbar	48V: deutlich hörbar	48V: deutlich hörbar
Genehmigungen / Zertifizierungen				
Zertifizierung Flurförderzeug	CE	CE	ja	ja
Zertifizierung Brennstoffzellensystem	CE	CE	ja	ja
Zertifizierung Fahrzeug & Brennstoff.	notwendig	notwendig	nein	nein
Baugenehmigungen Infrastruktur	ja	ja	nein	nein
Genehmigung nach §16 BimSchG	ja	nein	nein	nein
Wirtschaftlichkeit				
Förderung	BMVI	BMVI	30% Tax Credit: Kauf & Wartung	30% Tax Credit: Kauf & Wartung
Wasserstoffpreis (konventionell) [€/kg]	7 - 8	7 - 8	4,5 - 5	3,6 - 4,6
Stromkosten [€/kWh]	0,12	0,12	0,03 – 0,05	?
Personalkosten [€/h]	ca. 20	ca. 35-40, Fahrer	ca. 20	?
Einsparungen durch H_2-Umstelllung	keine Mitarbeiter keine Fahrzeuge	keine Mitarbeiter keine Fahrzeuge	Mitarbeiter & Fahrzeuge	Mitarbeiter & Fahrzeuge
Batterieprozess				
Batterietyp	Blei-Säure	Blei-Säure	Gel	Blei-Säure
Batterien pro Fahrzeug (inkl. Wechselb.)	1,7	1,5	3	1
Lebensdauer [Bh]	6.000	8.500	5.000	4.000
Batterielademethode	konventionell	konventionell	konventionell	zwischenladen
Anzahl Ladestationen	1 pro Halle	1 pro Werk	1 pro Werk	1 pro Halle
Batteriewechselmethode	Verschiebewagen & Kran	Kran	2 Krane	kein Tausch
Dauer Batteriewechsel / Ladedauer bei Zwischenladen	24V: 5 Minuten 80V: 12 Minuten	4 Minuten / 15-30 Minuten	Ca. 5 Minuten	12 Minuten pro Schicht
Fahrzeiten für Batteriewechsel	kurz	z.T. lange	sehr lange	kurz
Wartezeiten für Batteriewechsel	nein	teilweise	ca. 15-20 Min.	nein
Größe Batterieladestation [m²]		ca. 500	ca. 500	ca. 500
Wer führt Batteriewechsel/Ladung durch	MA Ladestation	MA extern	MA Ladestation	Fahrer
Personalbedarf Ladestation	1-2	1	2	0
Wirkungsgrad Ladetechnologie	68%	92%	70%	?

8.3 Diskussion der Daten

Die Diskussion der Daten erfolgt anhand der in Tabelle 8-1 dargestellten Ergebnisse aus dem Benchmark, wobei auf die signifikantesten Punkte eingegangen wird.

Bei der Betrachtung der Arbeitszeitmodelle und Schichtbetriebe wird ersichtlich, dass bei den beiden Anwendungen in den USA vier Stunden am Tag länger gearbeitet wird als bei den deutschen Anwendungen. Ferner wird bei BMW in USA an 6,5 Tagen die Woche gearbeitet. Bei einer näheren Betrachtung der nordamerikanischen Unternehmen in Tabelle 2-5, die H_2-Flurförderzeuge im Einsatz haben, wird ersichtlich, dass viele Unternehmen aus dem Handel sowie der Lebensmittelbranche gelistet sind. Diese arbeiten in den USA häufig im 3-Schichtbetrieb und zum Teil sogar an sieben Tagen in der Woche. Der Einsatz von H_2-Flurförderzeugen in einem arbeitsintensiven Umfeld ist auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, wie in Kapitel 7.5 aufgezeigt wurde.

Im Vergleich der Wasserstoffinfrastrukturen ist der wesentlichste Unterschied zwischen den Anwendungen in den USA und Deutschland der Aggregatzustand des gelagerten Wasserstoffes. Dieser wird in Nordamerika vorwiegend flüssig gelagert, mit Hilfe von Kyropumpen flüssig verdichtet und anschließend verdampft. Grund hierfür können zum einen der deutlich höhere Verbrauch an Wasserstoff sowie die höhere Verfügbarkeit von flüssigem Wasserstoff sein. Des Weiteren wird ersichtlich, dass auch in den USA H_2-Flurförderzeuge Indoor betankt werden.

Für die Betankung ist jedoch keine Fahrzeugidentifikation notwendig. Dies führt wiederum dazu, dass kein automatisiert erstelltes Betankungsprotokoll bereitgestellt werden kann. Ferner werden die Flurförderzeuge bei der Betankung nicht über 350 bar befüllt, obwohl eine Kommunikation zwischen Brennstoffzellensystem und Dispenser während des Betankens stattfindet. Laut einem Vertreter der Brennstoffzellensysteme, welcher bei der Besichtigung bei VW mit anwesend war, werden bei anderen Anwendungen in den USA die Brennstoffzellensysteme auf über 350 bar befüllt.

Im Bereich der Flurförderzeuge wird ersichtlich, dass bei den Anwendungen in den USA keine 80 Volt-betriebenen Fahrzeuge im Einsatz sind. Dies ist jedoch nicht auf eine unterschiedliche Zusammensetzung der Flurförderzeugflotte zurückzuführen, sondern der Tatsache geschuldet, dass es in den USA schlichtweg keine 80 Volt-betriebenen Flurförderzeuge gibt. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist die Anschaffungsweise der Brennstoffzellensysteme. Diese können in den USA unabhängig vom Flurförderzeug beschafft werden, bzw. können batteriebetriebene Fahrzeuge ohne weiteres auf Brennstoffzellenbetrieb umgerüstet werden. In Deutschland ist dies aufgrund der Maschinenrichtlinie nicht möglich. Auf deren Grundlage müssen nicht nur

das Flurförderzeug und das Brennstoffzellensystem als einzelne Systeme zertifiziert werden, sondern auch die Kombination aus beiden Systemen als sogenannte Baugruppe. Dies geht auch aus dem Vergleich der Genehmigungen bzw. Zertifizierungen hervor. Ein weiterer Unterschied zwischen den Anwendungen in Deutschland und den USA ist die Leistungsabnahme des Flurförderzeuges mit zunehmender Entladung bzw. Spannungsabnahme der Batterie. In den USA fahren und heben die Gabelstapler dadurch langsamer [Bal-2015, Lan-2015a]. Beim Einsatz von Brennstoffzellensystemen wird dies verhindert. Deutsche Flurförderzeuge werden hingegen mit Hilfe von integrierter Regelungstechnik, auch bei abfallender Batteriespannung, auf demselben Leistungsniveau gehalten.

Beim Vergleich der Brennstoffzellensysteme wird ersichtlich, dass bei Anwendungen Ersatzgeräte vorgehalten werden. Bei den Anwendungen in den USA war zudem mindestens ein Servicemitarbeiter des Brennstoffzellenherstellers permanent vor Ort. Die hohe Lebensdauer der Systeme konnte durch den realen Erfahrungswert bei BMW in USA bestätigt werden. Ähnlich wie die 80 Volt-Systeme der Gabelstapler in Deutschland, sind die 48 Volt-Systeme in den USA deutlich hörbar. Hinsichtlich Lärmschutz sind jedoch alle Systeme unbedenklich.

Wie bereits unter dem Punkt Flurförderzeug beschrieben, müssen in den USA und Deutschland sowohl das Flurförderzeug als auch das Brennstoffzellensystem durch einen Sachverständigen zertifiziert werden. Jedoch ist nur in Deutschland eine zusätzliche Freigabe durch den Flurförderzeughersteller bzw. Zertifizierung des Brennstoffzellensystems in Kombination mit dem Flurförderzeug als sogenannte Baugruppe erforderlich. Dies erschwert in Deutschland eine unabhängige Anschaffung von Brennstoffzellensystem und Flurförderzeug, wie es bei einem Umrüsten einer bestehenden Blei-Säure-Flurförderzeugflotte notwendig ist. Die Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetzt §16 bei der Anwendung H2IntraDrive war eine Forderung der Behörde. Grund hierfür war das bereits nach Bundes-Immissionsschutzgesetzt genehmigte BMW Group Werk Leipzig.

Im Bereich der wirtschaftlichen Faktoren ist der Punkt der Förderung besonders hervorzuheben. Die beiden Anwendungen in Deutschland werden im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert. Dafür müssen Forschungsanträge gestellt werden, welche nach anschließenden Prüfung bewilligt oder auch abgelehnt werden können. In den USA wurde hingegen eine flächendeckende Subvention von Brennstoffzellen im Rahmen des *Investment Tax Credit for fuel cell technology* bis 2016 beschlossen, worunter auch die Brennstoffzellensysteme der Flurförderzeuge fallen. Durch den Tax Credit können bis 30 Prozent der Investition, bis maximal 3.000 US Dollar pro kW bei

Brennstoffzellen und bis 200.000 Dollar bei der Tankstelle, erlassen werden [Zwe-2010, S. 82, Man-2012]. Darüber hinaus wurden vom Department of Energy (DoE) im Rahmen des *American Recovery and Reinvestment Actes* bisher 9,7 Mio. Euro für den Einsatz von Brennstoffzellen in Flurförderzeugen bereitgestellt. Laut der aktuellen Erhebung wurden bisher insgesamt 713 Brennstoffzellensysteme durch das DoE subventioniert [Sat-2015]. Ein weiterer wichtiger Unterschied liegt bei den Energiekosten in den USA. Wasserstoff und auch Strom sind dort wesentlich billiger als in Deutschland. Die Personalkosten der Mitarbeiter liegen hingegen bei BMW in Deutschland und USA auf demselben Niveau. Jedoch konnten bei den beiden Anwendungen in den USA aufgrund der Umstellung auf H_2-Flurförderzeuge Mitarbeiter und Flurförderzeuge eingespart werden.

In Kapitel 7.5 wurde u.a. der vorherrschende Batterieprozess als einer der ausschlaggebenden Faktoren für einen wirtschaftlichen Einsatz von H_2-Flurförderzeugen identifiziert. Infolgedessen wurde dieser mit in die Benchmark-Analyse aufgenommen, wobei bei den beiden Anwendungen in den USA der ehemals vorherrschende Batterieprozess angeführt ist. Ziel dabei war herauszufinden, inwiefern es Unterschiede in der Effizienz des Batteriewechsels gibt. Für die Anwendung H2IntraDrive ist hierfür der Batterieprozess aus der Nachbarhalle, der BMW i Montage, angeführt. Dort werden insgesamt 1,7 Blei-Säure-Batterien je Flurförderzeug in einer Ladestation pro Halle vorgehalten. Daraus ergeben sich kurze Anfahrtszeiten zum Batteriewechsel. Dieser erfolgt bei Schleppern in fünf Minuten mit Hilfe eines Verschiebewagens und bei Gabelstaplern in 12 Minuten mit einem Kran und wird von einem eigens dafür eingesetzten Mitarbeiter an der Ladestation durchgeführt. Der Batterieprozess bei der Anwendung Mercedes unterscheidet sich nicht wesentlich von dem im Werk Leipzig, jedoch ist dort lediglich eine zentrale Ladestation für das gesamte Werk vorzufinden. Dadurch ergeben sich zum Teil längere Anfahrtszeiten. Bei BMW in USA wurden hingegen wartungsfreie geschlossene Batterien mit gelförmigen Elektrolyt, sogenannte Gel-Batterien, verwendet. Die Lebensdauer der Batterien lag bereits deutlich unter der im Werk Leipzig. Der Batteriewechsel erfolgte in schnellen fünf Minuten, jedoch gab es lange Wartezeiten aufgrund von gleichzeitig ankommenden Flurförderzeugen in Kombination mit der Verwendung von lediglich zwei Kranen. Die Batteriewechsel für das gesamte weitläufige Werk wurden in einer einzigen zentralen Ladestation durchgeführt. Dadurch kam es zu sehr langen Anfahrtszeiten. Der Batterieprozess bei VW unterscheidet sich hingegen wesentlich zu den bereits vorgestellten. Dort wurden Batterien nicht gewechselt, sondern zwischengeladen, wobei die Batterie in den Pausen durch den Einsatz von hohen Stromstärken geladen wird. Infolgedessen erwärmt sich diese mehr als beim konventionellen Laden, was wiederum zu einer Reduzierung der Batterielebensdauer führt. Für das Zwischenladen müssen die Fahrzeuge an fest definierten

Orten abgestellt werden. Dies führt zu einem hohen Flächenbedarf in Relation zu den eingesetzten Flurförderzeugen.

8.4 Zusammenfassung

Ziel der Benchmark-Analyse war die Identifikation von unterschiedlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von H_2-Flurförderzeugen. Hierfür wurde die H2IntraDrive-Anwendung mit einer weiteren Anwendung in Deutschland (Mercedes Düsseldorf) und zwei Anwendungen in den USA (BMW Group Werk Spartanburg und VW Chattanooga) verglichen. Die wichtigsten Erkenntnisse bzw. Beobachtungen sind:

- Arbeitsintensität mit 20 Stunden pro Tag in USA höher als in Deutschland
- Flottengröße bei Anwendungen in USA größer als in Deutschland
- Umrüsten von batteriebetriebenen Flurförderzeuge auf Wasserstoffbetrieb in USA ohne weiteren Genehmigungsaufwand möglich, in Deutschland verhindert dies die Maschinenrichtlinie
- In USA Leistungsabnahme des Flurförderzeuges mit zunehmender Entladung bzw. Spannungsabnahme der Batterie, bei deutschen Flurförderzeugen ist dies nur bedingt der Fall
- In USA flächendeckende Förderung (30 Prozent der Investition) von Brennstoffzellensystemen, in Deutschland vereinzelte Förderprojekte
- In USA Einsparung an Mitarbeitern durch Umstellung auf H_2-Flurförderzeuge
- In USA Batterieprozess nicht immer optimal
- In USA geringere Kosten für Wasserstoff als in Deutschland
- In USA Einsatz von flüssigem Wasserstoff, in Deutschland gasförmiger Wasserstoff

Hinsichtlich einer Verbreitung der Brennstoffzellentechnologie bei Flurförderzeugen in Deutschlang gilt es demzufolge arbeitsintensive Flurförderzeuganwendungen mit einer größeren Anzahl an Flurförderzeugen zu identifizieren. Ferner müssen Konzepte entwickelt werden, die eine kostengünstige Umrüstung bzw. Substitution einer bestehenden E-Flurförderzeugflotte zu H_2-Flurförderzeugen ermöglichen. Zudem muss gewährleistet werden, dass das gesamte Spektrum an verschiedenen Flurförderzeugtypen mit Brennstoffzellensystemen zur Verfügung steht. Des Weiteren gilt es die Wasserstoffkosten zu reduzieren. Dies kann z.B. durch größere Abnahmemengen oder Skaleneffekte in der Herstellung erfolgen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem letzten Abschnitt werden die aus dem Projekt erlangten Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt und ein Ausblick über mögliche weitere Schritte gegeben.

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der Ressourcenaufwand von H_2-Routenzugschleppern und H_2-Gabelstaplern an einem innovativen Produktionsstandort bei einer Greenfield-Planung untersucht. Dabei wurde u.a. die energetische Effizienz, Zuverlässigkeit, Lebensdauer sowie die ökologische und wirtschaftliche Nachhaltigkeit der Flurförderzeuge bewertet. Ferner wurde ein Benchmark zwischen den deutschen und amerikanischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von H_2-Flurförderzeugen durchgeführt.

Zu Beginn wurde von BMW die erste deutsche Wasserstoffinfrastruktur für H_2-Flurförderzeuge mit Indoor-Betankung im BMW i-Karosseriebau des BMW Group Werks Leipzig aufgebaut und in Betrieb genommen. Ferner wurden durch Linde MH insgesamt sechs E-Schlepper und fünf Gabelstapler für den Einsatz mit Brennstoffzellensystemen umgerüstet und bei BMW im realen Produktionsbetrieb erprobt. Die Materialversorgung im CFK-Karosseriebau erfolgt dabei ausschließlich durch H_2-Flurförderzeuge, wobei innerhalb des Berichtzeitraums insgesamt 21.530 Betriebsstunden erzielt und 4.728 Kilogramm Wasserstoff verbraucht wurden. Die Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Anschaffung, Genehmigung und Inbetriebnahme der H_2-Infrastruktur sowie der H_2-Flurförderzeuge wurden in einem Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen zusammengefasst und veröffentlicht.

Während der Erprobung wurden Daten aus dem realen Betrieb der Flurförderzeuge erhoben und anschließend die Brennstoffzellentechnologie und der heutige Stand der Technik, die Blei-Säure-Batterietechnologie, im Rahmen eines Technologievergleichs gegenübergestellt. Die Zuverlässigkeit der H_2-Flurförderzeuge konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens durch Maßnahmen von Linde MH und der Brennstoffzellenhersteller deutlich erhöht werden. Dadurch verbesserte sich z.B. die MTBF der Schlepper vom Jahr 2014 zum Folgejahr um ca. das doppelte. Ferner wurde aufgezeigt, dass die Reichweite der H_2-Schlepper über und die der H_2-Gabelstapler unter der Reichweite der E-Flurförderzeuge liegt. Die Laufzeit des Gabelstaplers kann in zukünftigen Produktgenerationen durch z.B. ein größeres Tankvolumen oder einen höheren Druck

verbessert werden. Im Vergleich der Gesamtwirkungsgrade (Power Unit und Infrastruktur) liegt dieser bei der Brennstoffzellentechnologie unter dem der Batterietechnologie. Grund hierfür ist der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems. Abschließend wurde mit Hilfe von Methods-Time Measurement (MTM) aufgezeigt, dass eine Wasserstoffbetankung deutlich schneller als ein Batteriewechsel ist. Ferner beeinflussen die Planungsqualität und Mitarbeitererfahrung deutlich die Dauer des Batteriewechsels, was bei der Wasserstoffbetankung nicht zutrifft.

Die ökologische Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen wurde mit Hilfe der Ökobilanzierung untersucht. Dabei wurden die Treibhausgaspotenziale von wasserstoff- und batteriebetriebenen Schleppern und Gabelstaplern über den gesamten Lebenszyklus bestimmt und verglichen. Im Vergleich der konventionellen Energiepfade mit Strom aus dem deutschen Strommix und Wasserstoff aus Dampfreformierung von Erdgas liegen die Emissionen der H_2-Flurföderzeuge leicht unter denen der E-Flurförderzeuge. Dabei werden die leicht höheren Emissionen im Betrieb der H_2-Flurförderzeuge durch die deutlich geringeren Emissionen bei der Herstellung der Power Unit kompensiert. Im Vergleich mit grünem Strom aus erneuerbaren Energien und den Mindestanforderungen an zertifizierten GreenHydrogen aus Elektrolyse von Wasser reduzieren sich die Emissionen im Betrieb deutlich. Emissionen aus der Herstellung sowie bei Service und Wartung gewinnen infolgedessen an Gewicht. Die Emissionen der H_2-Flurförderzeuge liegen in diesem Vergleich über denen der E-Flurförderzeuge. Wird jedoch die Mindestanforderung des Treibhausgas-Minderungspotenzials von GreenHydrogen aus Elektrolyse von Wasser deutlich überschritten, so führt dies zu geringeren Treibhausgasemissionen der H_2-Flurförderzeuge im Vergleich zu den E-Flurförderzeugen. Folglich muss für die Betrachtung von grünen Energiepfaden der jeweils vorliegende Anwendungsfall im Detail bewertet werden.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung von H_2-Flurförderzeugen wurden zunächst Kostentreiber und -einflussfaktoren identifiziert und kategorisiert. Darauf aufbauend wurde ein LCC-Modell erstellt und ein Basisszenario für eine Schlepper- bzw. Gabelstapleranwendung mit jeweils ca. 50 Flurförderzeugen bewertet. Hierbei wurden reale Kosten von verschiedenen Lieferanten bzw. Herstellern ohne Förderung verwendet. Anschließend wurde durch Sensitivitätsanalysen der Einfluss verschiedenster Kosteneinflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von H_2-Flurförderzeugen analysiert. Dadurch wurde aufgezeigt, dass ein wirtschaftlicher Einsatz der Flurförderzeuge bereits heute ohne Förderung möglich ist. Wesentliche Voraussetzungen hierfür sind hohe Lohnkosten, hohe Arbeitsintensität bzw. Mehrschichtbetrieb, hohe Flächenkosten, geringer Energiebedarf des Flurförderzeuges und ein suboptimaler Batteriewechselprozess mit z.B. langen Batteriewechselzeiten, langen Anfahrtswegen oder hohem Personalaufwand. Für eine finale Aussage für den einzelnen Anwendungsfall muss

dieser jedoch im Detail bewertet werden. Die wesentlichen Kostenvorteile von H_2-Flurflörderzeugen sind eine höhere betriebliche Verfügbarkeit und daraus resultierende geringere Investitionen sowie geringere Personalkosten. Ferner wird für die Durchführung der Wasserstoffbetankung deutlich weniger Fläche als für den Batteriewechsel sowie das Vorhalten von Wechselbatterien benötigt. Infolgedessen ergeben sich geringere Flächenkosten. Als Kostennachteile konnten hingegen die höheren Energiekosten sowie die höheren Investitionen und Wartungskosten der Power Unit und Infrastruktur identifiziert werden. Abschließend konnten durch Sensitivitätsanalysen die technischen Eigenschaften der Brennstoffzellensysteme mit erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Flurförderzeuge identifiziert werden. Diese können von Brennstoffzellensystemherstellern aufgegriffen und hinsichtlich einer Kostenreduktion der Brennstoffzellentechnologie verbessert werden. Dazu zählen die Erhöhung der Lebensdauer und des Wirkungsgrads des Brennstoffzellensystems.

Abschließend wurde im Forschungsvorhaben der Frage nachgegangen, worin die Gründe für die stark unterschiedlichen Zahlen von Brennstoffzellensystemen im Serieneinsatz in Nordamerika (ca. 7.000) und Deutschland (14 im Demobetrieb) liegen. Hierfür wurde mit Hilfe einer Benchmark-Analyse deutsche und nordamerikanische H_2-Flurförderzeug-Anwendungen verglichen sowie unterschiedliche Rahmenbedingungen identifiziert. Einer der wesentlichen Unterschiede ist dabei, dass in den USA ein Umrüsten von E-Flurförderzeugen auf Brennstoffzellensysteme ohne weiteren Genehmigungs- und Zertifizierungsaufwand möglich ist. In Deutschland wird dies durch die Maschinenrichtlinie verhindert. Infolgedessen ist ein Umrüsten einer bestehenden Flotte auf den H_2-Betrieb aktuell nur bedingt möglich bzw. erfordert eine Freigabe der Fahrzeuge durch den Flurförderzeughersteller. Des Weiteren ist die Arbeitsintensität der H_2-Flurförderzeuganwendungen in den USA höher und der Batteriewechsel- bzw. Batterieladeprozess war nicht immer optimal. Zudem gibt es Kostenunterschiede, da in den USA Investitionen in Brennstoffzellensysteme flächendeckend mit 30 Prozent vom Staat gefördert werden und die Wasserstoffkosten geringer als in Deutschland sind.

Mit dem Forschungsvorhaben H2IntraDrive wurde somit aufgezeigt, dass eine Produktionsversorgung ausschließlich mit H_2-Flurförderzeugen bereits heute in Deutschland möglich ist. Ferner wurden Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Einsatz der H_2-Flurförderzeuge im Vergleich zu E-Flurförderzeugen identifiziert sowie aufgezeigt, dass eine wirtschaftliche Anwendung bereits heute möglich ist. Infolgedessen kann das Projekt als Grundsteinlegung für das weitere Roll-Out der neuen Antriebstechnologie in Deutschland gesehen werden.

9.2 Ausblick

Auf Basis der erzielten Erkenntnisse dieses Forschungsvorhabens ist es möglich potenzielle wirtschaftliche Anwendungen von H_2-Flurförderzeugen zu identifizieren. Eine Validierung der identifizierten Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Einsatz muss jedoch in zukünftigen Forschungsprojekten durchgeführt werden. Als sinnvolle Fortführung könnte eine bestehende E-Flurförderzeugflotte für den Betrieb mit Brennstoffzellensystemen umgerüstet werden. Dadurch können reale Ist-Kosten aus dem laufenden Betrieb der E-Flurförderzeuge erhoben und diese anschließend mit den realen Kosten der H_2-Flurförderzeugflotte verglichen werden. In diesem Zusammenhang könnten zudem Konzepte und Ansätze erarbeitet werden, mit deren Hilfe eine bestehende E-Flurförderzeugflotte kosteneffizient und ohne Substitution der gesamten E-Flotte umgerüstet werden kann. Ferner gilt es hinsichtlich einer ganzheitlichen H_2-Flurförderzeugflotte weitere Flurförderzeugtypen, wie z.B. einen Gabelstapler mit geringerer Traglast und 48 Volt-Energieversorgung, für den Betrieb mit Brennstoffzellen zu entwickeln.

Als weiterer Ansatz für die technische Weiterentwicklung von H_2-Flurförderzeugen wurde die Erhöhung der Lebensdauer der Brennstoffzellensysteme identifiziert. Diese wirkt sich positiv auf die ökologische und wirtschaftliche Nachhaltigkeit der Flurförderzeuge aus. Zudem gilt es die Reichweite des H_2-Gabelstaplers durch z.B. eine Erweiterung des Tankvolumens oder eine Erhöhung des Tankdrucks zu verbessern.

Die im Forschungsvorhaben eingesetzte H_2-Infrastruktur war mit einer Verdichterlaufzeit von knapp über einer Stunde über die aktuellen Anforderungen hinaus ausgelegt. Kleinere, kostengünstigere und modular skalierbare H_2-Infrastrukturen könnten hier einen Optimierungsansatz darstellen.

10 Publikationen

10.1 H2IntraDrive-Homepage

Für die Berichterstattung über das Forschungsvorhaben sowie den aktuellen Stand von H2IntraDrive wurde vom Lehrstuhl fml eine projekteigene Homepage erstellt. Diese wurde mittlerweile ca. 3.700 mal besucht. www.h2intradrive.de

Ferner wurde für H2IntraDrive eine eigene Projektseite auf der Homepage des Lehrstuhls fml eingerichtet. http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=1009

10.2 Presseveranstaltungen H2IntraDrive

Offizieller Erprobungsstart/Übergabe der H_2-Flurförderzeuge, Leipzig, 3.12.2013.

Zwischenfazit H_2-Flurförderzeuge, Aschaffenburg, 7.11.2014.

Ergebnispräsentation H2IntraDrive, Leipzig, 23.11.2015.

10.3 Vorträge

Micheli, R.; Schöbel, H.: *H2IntraDrive – Fuel Cell Powered Industrial Truck Application in the BMW Plant Leipzig. A new Benchmark? Analysis and Reporting*. World of Energy Solution, Stuttgart, 6.10.2014.

Micheli, R.: *Leitlinien für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen*. NOW-Workshop, Berlin, 29.10.2014.

Micheli, R.: *H2IntraDrive – Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen in der Intralogistik unter Produktionsbedingungen*. BMW FFZ-Kreis, Regensburg, 31.7.2015.

Micheli, R.; Hanke, M.: *H2IntraDrive – Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen: Herausforderungen, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit*. 18. VDI-Flurförderzeugtagung 2015, Baden-Baden, 22.9.2015.

10.4 Veröffentlichungen

Micheli, R.; Günthner, W.: *Handhabungsprozesse auf dem Prüfstand – Bewertung von Batteriewechselmethoden sowie Wasserstoffbetankungen bei Flurförderzeugen*. Hebezeuge Fördermittel 10/2015, Berlin, 2015.

Micheli, R.: *Checklisten, Abläufe und Technologien*. LOGISTIK HEUTE 9/2015, München, 2015.

Micheli, R.; Hanke, M.: *H2IntraDrive – Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen: Herausforderungen, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit*. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Berichte 2248. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2015.

Micheli, R.; Mörike, C.; Günthner, W.: *Onlineumfrage zum Thema wasserstoffbetriebene Flurförderzeuge*. Powerpoint-Folien, Lehrstuhl fml, 2015. (nicht Inhalt von H2IntraDrive)

Günthner, W.; Micheli, R.: *Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen*. Lehrstuhl fml, München, 2015.

Günthner, W.; Micheli, R.: *H2IntraDrive: Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen*. Forschungskatalog Flurförderzeuge 2014, Berlin, 2014.

10.5 Geplante Publikationen

Wissenschaftliches Paper mit Ergebnissen aus Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von H_2-Flurförderzeugen.

Wissenschaftliches Paper mit Ergebnissen aus LCC-Bewertung.

Ergebnisse aus Benchmark H_2-Flurförderzeuganwendungen Deutschland und USA.

10.6 Weitere Berichterstattung über H2IntraDrive

10.6.1 **Projektstart**

- pressebox.de
- ptext.de
- now-gmbh.de
- leipzig.de
- flurfoerderzeuge.de
- logistik-fuer-unternehmen.de
- forkliftaction.com
- forkliftnet.com
- shdlogistics.com
- fuelcellsworks.com
- electrive.net
- stefanschroeter.com
- springerprofessional.de
- globallogisticsmedia.com
- car-it.com
- tandlnews.com.au
- logisticsbusiness.com
- linde-mh.de

10.6.2 **Übergabe Flurförderzeuge**

- pressebox.com
- prcenter.de
- 88news.de
- leipzig.de
- noodls.com
- emobilitaetonline.de
- dpp.de
- hzwei.info
- oekonews.at
- plugpower.com
- mm-logistik.vogel.de
- lifepr.de
- ptext.de
- handling.de
- logistik-heute.de
- maschinenmarkt.vogel.de
- hebezeuge-foerdermittel.de
- mittelbayerische.de
- forkliftaction.com
- fuelcellinsider.org
- greencarcongress.com
- bimmertoday.de
- alternativ-fahren.de

- linde-mh.de
- press.bmwgroup.com

10.6.3 **Zwischenfazit Brennstoffzellen-Gabelstapler**

- fuelcellworks.com (en)
- shdlogistics.com (en)
- linde-mh.de
- logistra.de
- logistik-heute.de
- gebrauchtestapler.at
- verkehrsrundschau.de
- staplerhandel.de
- energiespektrum.de
- scope-online.de
- Stapler-gebrauchte.de
- fruchtnews.de

Literaturverzeichnis

[Age-2015] Agentur für erneuerbare Energien: Strommix in Deutschland 2014. https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/geu_dateien/FB4-Internetseiten/CO2-Emissionen%20der%20Stromerzeugung_01.pdf, Aufruf am 30.8.2015.

[AIM-2000] AIM Accumulatoren (Nürnberg): Werkstatt- und Servicehandbuch für Traktionsbatterien. http://www.aim-nuernberg.de/dienstleistungen-service-kundendienst, Aufruf am 8.7.2015.

[Air-2012] Air Liquide: France: first supply chain platform equipped with hydrogen power lift trucks is rolled out. http://www.airliquideadvancedtechnologies.com/en/france-first-supply-chain-platform-equipped-with-hydrogen-powerlift-trucks-is-rolled-out.html, Aufruf am 14.7.2015.

[Air-2013] Air Liquide: First hydrogen filling station for forklift trucks in France, for IKEA. http://www.jp.airliquide.com/en/news/hydrogen-filling-station-ikea.html, Aufruf am 14.7.2015.

[Air-2014] Air Liquide: Wasserstofflösungen für Flurförderzeuge. http://www.airliquide.de/inc/dokument.php/standard/1525/wasserstoffloesungen-flurförderzeuge.pdf, Aufruf am 4.9.2014.

[Air-2015] Air Liquide: Hydrogen Energy: Air Liquide supplies an FM Logistic hub. http://www.airliquideadvancedbusiness.com/en/hydrogen-energy-air-liquide-supplies-an-fm-logistic-hub.html, Aufruf am 14.7.2015.

[Arn-2008] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.: Handbuch Logistik. Springer, Berlin, 2008.

[Bal-2015] Ballard Power Systems: Material Handling Case Study. http://www.ballard.com/files/PDF/Material_Handling/GENCO_Case_Study_for_Web.pdf, Aufruf am 1.7.2015.

[Bat-2012] Battery Council International: Lead Acid Batteries. http://batterycouncil.org/?page=Lead_Acid_Batteries, Aufruf am 13.8.2015.

[Bau-1997] Baumann, W.; Muth, A.: Batterien - Daten und Fakten zum Umweltschutz. Springer, Berlin, 1997.

[Ben-2014] Bengler, K.; Senner, V.; Rausch, H.; Bortot, D.: Produktionsergonomie. Vorlesungsskript. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching, 2014.

[Boe-2014] Boekhoff, H.: World Industrial Truck Statistics (WITS) - Information Sheet 2014. Fédération Européene de la Manutention, Frankfurt am Main, 2014.

[Bok-2006] Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen - MTM-Handbuch. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2006.

[Bru-2012] Bruns, R.; Günthner, W.; Amberger, M.; Furmans, K.; Schilling, T.: Umweltauswirkungen Intralogistik - Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik. Abschlussbericht. MTL fml IFL, HSU TUM KIT, Hamburg Garching Karlsruhe, 2012.

[Bun-2002] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Ziehen, Schieben. http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/pdf/LMM-Ziehen-Schieben.pdf?__blob=publicationFile&v=3, Aufruf am 20.6.2014.

[Bur-2006] Burnham, A.; Wang, M.; Wu, Y.: Development and Applications of GREET 2.7 - The Transportation Vehicle-Cycle Model. http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/378.PDF, Aufruf am 1.10.2015.

[Cam-1989] Camp, R. C.: Benchmarking - The search for industry best practices that lead to superior performance. Quality Press Quality Resources, Milwaukee Wisconsin, 1989.

[Cas-2014] Caspari, C.: Bleiakkumulatoren. http://www.elektronikinfo.de/strom/bleiakkus.htm, Aufruf am 17.8.2015.

[Coe-2007] Coenenberg, G.: Kostenrechnung und Kostenanalyse. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2007.

[Cra-2009] Crastan, V.: Elektrische Energieversorgung 2 - Energie- und Elektrizitätswirtschaft, Kraftwerkstechnik, alternative Stromversorgung, Dynamik, Regelung und Stabilität, Betriebsplanung und -führung. Springer, Berlin, 2009.

[Cro-2012] Crown: 2012 Global ecologic Report. http://passthrough.fw-notify.net/download/534745/http://www.crown.com/usa/about/ecologic_report_sf18494_us.pdf, Aufruf am 7.10.2015.

[Das-2013] Das Wirtschaftslexikon: Projektkostenrechnung. http://www.daswirtschaftslexikon.com/d/projektkostenrechnung/projektkostenrechnung.htm, Aufruf am 1.12.2014.

[Däu-1998] Däumler, K.-D.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung - Mit Fragen und Aufgaben, Antworten und Lösungen, Tests und Tabellen. Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, Herne, 1998.

[Däu-2007] Däumler, K.-D.; Grabe, J.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung - Aufgaben und Lösungen, Testklausur, Checklisten, Tabellen für die finanzmathematischen Faktoren. Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, Herne, 2007.

[DIN-14040] Deutsches Institut für Normung e.V.: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. DIN EN ISO 14040, 2006.

[DIN-14044] Deutsches Institut für Normung e.V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. DIN EN ISO 14044, 2009.

[DIN-43530-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Elektrolyt und Nachfüllwasser - Allgemeines. DIN , 43530-1, 1987.

[DIN-60300-3-3] Deutsches Institut für Normung e.V.: Zuverlässigkeitsmanagement-Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten. DIN EN , 60300-3-3, 2005.

[Ede-2007] Ederer, F.: Life Cycle Costing. Weka Media, Kissing, 2007.

[Elm-2015] Elmwall, A.: French company FM Logistic pilots fuel cell trucks with Toyota Material Handling. http://www.toyota-forklifts.eu/en/News/news/Pages/fm-logistics-pilots-fuel-cell-trucks-with-tmh.aspx, Aufruf am 14.7.2015.

[Eur-2015] Eurostat: Jährliche Prodcom-Daten. http://ec.europa.eu/eurostat/de/web/prodcom/data/excel-files-nace-rev.2, Aufruf am 14.4.2015.

[Fan-2009] Fandel, G.; Fey, A.: Kostenrechnung. Springer, Berlin, 2009.

[Flu-2006] Fluke Corporation: Fluke Power Logger 1735 - Bedienungshandbuch. http://assets.fluke.com/manuals/1735____umger0200.pdf, Aufruf am 9.7.2014.

[Fra-2002] Franz, K.-P.: Kostenmanagement - Wertsteigerung durch systematische Kostensteuerung. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2002.

[Fro-2015] Fronius International GmbH: Homepage. http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-C9240E1B-15E66896/fronius_international/hs.xsl/17_28656_ENG_HTML.htm#.VO8uPi5i-Qc, Aufruf am 26.2.2015.

[Fue-2013] FuelCellToday: HyGear Delivers Hydrogen System for Fuel Cell Based Forklift Trucks. http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2013/october/hygear-delivers-hydrogen-system-for-fuel-cell-based-forklift-trucks, Aufruf am 14.7.2015.

[fue-2015] fuelcellworks: Toyota, Iwatani to Experiment with Fuel Cell Forklifts. http://fuelcellsworks.com/news/2015/02/12/toyota-iwatani-to-experiment-with-fuel-cell-forklifts/, Aufruf am 14.7.2015.

[Fue-2015] Fuel Cells 2000: Fuel Cell Powerded Forklifts in North America: Deployed or On Order. https://docs.google.com/spreadsheets/d/128eaCVybwMhhGiaDF5zVYW5Qib8cthM1_5n8zoeLz2g/pub?output=html, Aufruf am 2.4.2015.

[Gai-2010] Gaines, L.; Sullivan, J.; Burnham, A.; Bellharouak, I.: Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling. http://www.transportation.anl.gov/pdfs/B/855.PDF, Aufruf am 5.10.2015.

[Gei-2009] Geißdörfer, K.: Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC) - Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA. LIT, Münster, 2009.

[Gla-2014] Gladen, W.: Performance Measurement - Controlling mit Kennzahlen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014.

[Gle-2011] Gleißner, H.; Femerling, C.: Logistik - Grundlagen - Übungen - Fallbeispiele. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden, 2011.

[Göt-2004] Götze, U.: Kostenrechnung und Kostenmanagement. Springer, Berlin, 2004.

[Gre-2014] Greitmann, S.; Altmann, S.: Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie für eine nachhaltige Zukunft - Kompendium zum 25-jährigen Jubiläum der Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2014.

[Gro-2014] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Vieweg, Berlin, 2014.

[Gün-2015] Günthner, W.: Planung technischer Logistiksysteme. Praktikumsskript. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.

[Har-2000] Hartmann, A.: Lebenszykluskostenrechnung als strategisches oder operatives Bewertungs- und Planungsinstrument für die Technologie der Faser-Kunststoff-Verbunde. IVW, Kaiserslautern, 2000.

[Hei-2006] Heinzel, A.; Mahlendorf, F.; Roes, J.: Brennstoffzellen - Entwicklung, Technologie, Anwendung. Müller, Heidelberg, 2006.

[Hel-2014a] Helmke, B.: Bei den Staplerkosten nicht verheben. In: Verkehrsrundschau, Jg. 68 (2014), Nr. 36, S. 54–56.

[Hel-2014b] Held DM: Umweltanalyse von Flurförderzeugen. http://www.ibp.de-fraunhofer.de/de/Presse_und_Medien/Presseinformationen/pm-06-05-2014-oekobilanz-linde.html, Aufruf am 6.5.2014.

[Hel-2015] Hellweg, S.; Juraske, R.; Rubli, S.: Ökologische Systemanalyse - Materialflüsse - Risikoanalyse - Ökobilanz. Vorlesungsskript. ETH Zürich, Zürich, 2015.

[Her-2012] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. Springer, Berlin, 2012.

[HOP-2015] HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG: trak systems. http://www.hoppecke.de/content/download/brochures/mp/trakSystems_de.pdf, Aufruf am 7.10.2015.

[Hor-2009] Horváth, P.: Controlling. Vahlen, München, 2009.

[Hus-2013] Huss, A.; Corneille, M.: Flurförderzeuge mit Brennstoffzellen. http://www.h2bz-hessen.de/mm/Flurfoerderzeuge_web.pdf, Aufruf am 30.6.2015.

[Huy-2013] Huy, D.; Andruleit, H.; Babies, H.-G.; Homberg-Heumann, D.; Meßner, J.; Neumann, W.; Röhling, S.; Schauer, Michael, Schmidt, Sandro; Schmitz, M.; Sievers, H.: Deutschland - Rohstoffsituation 2012. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2012.pdf;jsessionid=7E148A8F3215F0AB53B8270E0EEDDD00.1_cid292?__blob=publicationFile&v=11, Aufruf am 19.20.2015.

[HYG-2013] HYGEAR: Hydrogen system for forklift trucks installed. http://www.hygear.nl/news/hygear-delivers-hydrogen-system-for-fuel-cell-based-forklift-trucks/, Aufruf am 14.7.2015.

[HyL-2013] HyLift-Demo: Final Report, 2013. http://www.hylift-demo.eu/docs/publications/D7-1_Deployment-supp-mechanisms_V04.pdf, Aufruf am 15.1.2015.

[IEB-2015] IEB Industrie Elektronik Brilon GmbH: Datenblatt Filon Classic XL. http://www.ieb.de/de/produkte/filon-classic/filon-classic-xl.html, Aufruf am 1.7.2015.

[Ind-2014] Industrial Truck Association: United-States-Factory-Shipments. http://www.indtrk.org/market-intelligence, Aufruf am 11.6.2015.

[Jak-1993] Jaksch, H.-D.: Batterie-Lexikon - Primär- und Sekundärsysteme, Ladetechnik, Fertigung, Meßtechnik. Pflaum, München, 1993.

[Jep-2015] Jepsen, D.; Volz, S.; Reihlen, A.; Wirth, O.; Vollmer, A.; Spengler, L.; Eberle, U.; Reintjes, N.: Die Ökobilanz - Methode und Wirkungskategorien. http://ipp-netzwerk.hamburg.de/netzwerk/upload/public/media/1415780861_A_2.1_Oekobilanz.pdf, Aufruf am 20.9.2015.

[Joc-2004] Jochem, Eberhard: Schön, Michael; Angerer, G.; Ball, M.; Bradke, H.; Celik, B.; Eichhammer, W.; Mannsbart, W.; Marscheider-Weidemann, F.; Nathani, C.; Walz, R.; Wietschel, M.: Werkstoffeffizienz-Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/IRB-Werkstoffeffizienz.pdf, Aufruf am 19.10.2015.

[Jun-2012] Jungheinrich AG: Das Jungheinrich Umwelt-Prädikat - Eine Untersuchung zur Ermittlung der Ökobilanz der Jungheinrich-Flurförderzeug-

flotte auf Basis von ISO 14040. http://www.jungheinrich.de/fileadmin/Redaktion/Wir_ueber_uns/PDF/4750_14_BRO_Produkt_Oekobilanz_DE.pdf, Aufruf am 22.10.2015.

[Kan-2009] Kany, H. P.: Einsatz von Flurförderzeugen - Batterieladeanlagen für Flurförderzeuge. Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution, Bonn, 2009.

[Kem-1999] Kemminer, J.: Lebenszyklusorientiertes Kosten- und Erlösmanagement. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, Wiesbaden, 1999.

[Ker-1996] Kertes, A.: Life Cycle Assessment of Three Available Battery Technologies for Electric Vehicles in a Swedish Perspective. Department of Environmental Technology and Work Science, Royal Institute of Technology Stockholm, 1996.

[Kip-2013] Kippels, A.-K.: Informationskampagne für Logistik-Unternehmen zeigt Vorteile von Brennstoffzellen-Gabelstaplern. http://www.hessen-agen-tur.de/dynasite.cfm?dsmid=16148&newsid=10044&dsnocache=1, Aufruf am 17.7.20145.

[Kle-2013] Klell, M.: E-LOG-BioFleet. https://www.klimafonds.gv.at/unsere-themen/e-mobilitaet/leuchttuerme/e-log-biofleet/, Aufruf am 12.10.2013.

[Klö-2009] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA) - Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH, Weinheim, 2009.

[Kru-2000] Kruschwitz, L.: Investitionsrechnung. Oldenbourg, München, 2000.

[Kur-2013] Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Springer, Wiesbaden, 2013.

[Lan-2015a] Landinger, H.: Internationale Perspektiven für Brennstoffzellen in der Intralogistik - Per Brennstoffzelle durchs Lager - Ergebnisveranstaltung E-Log-BioFleet. http://www.hylift-europe.eu/public/Presentations/Landinger_E-Log-BioFleet-Konferenz_Linz_V06-fuer-Teilnehmer.pdf, Aufruf am 1.7.2015.

[Lan-2015b] Landinger, H.: Ludwig Bülkow Systemtechnik GmbH. München. Besprechungsprotokoll von gemeinsamen Austausch, 2015.

[Lie-2012] Lier, P.: Erstellung eines eBooks zum Thema "Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung". http://winfwiki.wi-fom.de/index.php/Erstellung_eines_eBooks_zum_Thema_%E2%80%9EMethoden_der_Wirtschaftlichkeitsrechnung%E2%80%9C, Aufruf am 6.10.2014.

[Lin-2010] Linde Material Handling: Mit zehn Kilowatt emissionslos in Richtung Zukunft-Linde Material Handling stellt ersten alltagstauglichen Brennstoffzellengabelstapler vor. http://www.linde-mh.de/de/countrysite/news_infoservice_1/newsinfos.html, Aufruf am 14.7.2015.

[Lin-2013] Linde Material Handling: Startschuss für Feldversuch der E-LOG-Biofleet. http://www.linde-mh.de/de/countrysite/news_infoservice_1/newspressedetails_5440.html, Aufruf am 21.7.2015.

[Lin-2015a] Linde Material Handling: Produktblatt Elektro-Fahrerstandschlepper P30C, P50C. http://linde-brandmaster.1000grad.com/linde/admin/working_folder/cropped/p_p30c_p50c_de_si.pdf, Aufruf am 22.10.2015.

[Lin-2015b] Linde Material Handling: Produktblatt Elektro-Stapler E20, E25, E30, E35. http://linde-brandmaster.1000grad.com/linde/admin/working_folder/cropped/p_e20-35hl_387-01_de_si.pdf, Aufruf am 22.10.2015.

[Lin-2015c] Linde Material Handling: Übersicht. http://www.linde-world.de/mh-products/start.view?dealer=3, Aufruf am 7.10.2015.

[Lud-2014] Ludwig-Bülkow-Systemtechnik GmbH: Datentabelle Wasserstoff. http://www.hylights.org/publications/reports/hyLights_final_results/H2data_german.pdf, Aufruf am 7.8.2014.

[Lüd-2014] Lüdemann, L.; Feig, K.: Vergleich von Software Lösungen für die Ökobilanzierung - eine softwareergonomische Analyse. In: Logistics Journal: nicht referierte Veröffentlichungen, Jg. 2014 (2014), Nr. 9, S. 1–17.

[LUG-2013] LUG aircargo handling: LUG gibt Gas bei der Produktivität mit Wasserstoff- Brennstoffzellen. http://www.lug-muc.de/fra/news/pdf/1_Wasserstoff-Brennstoffzellen_de.pdf, Aufruf am 17.7.2015.

[Man-2012] Mansouri, I.; Calay R. K.: Materials handling vehicles; an early market sector for hydrogen fuel cells within Europe. In: o.V. (Hrsg.): Sustainable vehicle technologies. driving the green agenda. Woodhead Publishing, Gaydon, 2012, S.99-110.

[Mar-2011] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2011.

[Med-2003] Medienforum Deutscher Wasserstofftag: Gabelstapler mit Brennstoffzelle. http://www.pangas.ch/internet.lg.lg.che/de/images/Wasserstofftag-03_Exponat_Stapler553_115970.pdf, Aufruf am 15.7.2015.

[Mer-2004] Mertens, K.; Bauer, W.: Benchmarking - Leitfaden für den Vergleich mit den Besten. Symposion, Düsseldorf, 2004.

[Mic-2015] Micheli, R.: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Besprechungsportokoll von Besichtigung vor Ort, 2015.

[Moh-2014] Mohrdieck, C.; Venturi, M.; Breitrück, K.; Schulze, H.: Mobile Anwendungen. In: Töpler, J.; Lehmann, J. (Hrsg): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Berlin, Springer, 2014, S. 59-111.

[Möl-2013] Möller, K.-C.: Übersicht über die Speichersysteme/Batteriesysteme-Korthauer, R (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer, Berlin, 2013, S. 3–9.

[Nin-2014a] Nindel, M.: Market-ready fuel cells for material handling. Vortrag. Hannover Messe, Hannover, 7.4.2014.

[Nin-2014b] Nindel, M.: Staplerworld - Hypulsion Presentation. http://www.staplerworld.com/fileadmin/Downloads/Technologie/Hypulsion-STAPLER-WORLD_oba.pdf, Aufruf am 2.9.2015.

[Not-2010] Notter, D. A.; Gauch, M.; Widmer, R.; Wäger, P.; Stamp, A.; Zah, R.; Althaus, H.-J.: Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehiclesEnvironmental science & technology, Jg. 44 (2010) Nr. 17, S. 6550–6556.

[Plu-2015] Plug Power: Hydrogen-Powered Forklifts at Prelodis, a first in Europe: Supply Chain Magazine. http://www.plug-power.com/2015/10/hydrogen-powered-forklifts-at-prelodis-a-first-in-europe-supply-chain-magazine/, Aufruf am 5.11.2015.

[Rad-2015] Radtke, W.: Demonstrationsbetrieb BZ-Flurförderzeuge Mercedes-Benz Werk Düsseldorf. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin, 2.6.2015.

[Ram-2013] Ramsden, T.: An Evaluation of the Total Cost of Ownership of Fuel Cell-Powered Material Handling Equipment. NREL, Denver, 2013.

[Ran-1999] Rantik, M.: Life cycle assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes. Swedish Transport and Communications Research Board, Stockholm, 1999.

[Rei-2013] Reich, G.; Reppich, M.: Regenerative Energietechnik - Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.

[Ren-2001] Rentz, O.; Engels, B.; Schultmann, F.: Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und -anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des Cadmiumproblems - Forschungs-projekt 29935330. Dt.-Franz. Inst. für Umweltforschung Univ, Karlsruhe, 2001.

[Ren-2012] Renquist, J.; Dickman, B.; Bradley, T.: Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered forklifts. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 37 (2012), Nr. 17, S. 12054–12059.

[Ret-2008] Retzbach, L.: Akkus und Ladetechniken. Franzis-Verlag, Poing, 2008.

[Rie-2015] Riegel, B.: Brennstoffzellen-Batterie-Hybrid für Material Handling (BBH-MH). http://www.brennstoffzelle-nrw.de/fileadmin/daten/Projekt/laufend/PI_82_Hoppecke_BBH-MH_H2HyWay_deutsch.pdf, Aufruf am 14.7.2015.

[Rut-2013] Ruth, K.: Höchstleistung und Effizienz - Die neue Generation Blei-Säure TraktionsbatterienVDI Wissensforum (Hrsg.): 17. Flurförderzeugtagung, VDI-Verlag GmbH, 2013.

[SAE-4293] SAE Aerospace Recommended Practice (ARP) Standards: Life Cycle Cost – Techniques and Applications. SAE ARP 4293, 1992.

[Sal-2011] Salkind, A.; Zguris, G.: Lead-Acid BatteriesReddy, T. B.; Linden, D (Hrsg): Linden´s Handbook of Batteries. McGraw-Hill, New York, 2011, S.16.1-16.7

[Sam-2008] Samaras, C.; Meisterling, K.: Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles - Implications for Policy-Environmental science & technology, Jg. 42 (2008) Nr. 9, S. 3170–3176.

[Sat-2015] Satyapal, S.; Farmer, R.: DOE Hydrogen and Fuel Cell Program Record. http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/15003_industry_lift_truck_deployments.pdf, Aufruf am 24.6.2015.

[Sch-2009] Schweiger, S.: Lebenszykluskosten optimieren - Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. Gabler, Wiesbaden, 2009.

[Sch-2012] Schlick, T.; Hagemann, B.; Kramer, M.; Garrelfs, J.; Rassmann, A.: Zukunftsfeld Energiespeicher - Marktpotenziale standardisierter Lithium-Ionen-Batteriesysteme. http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Zukunftsfeld_Energiespeicher_20120912.pdf, Aufruf am 22.10.2015.

[Seg-2011] Segatz, J.: Produktion von grünem Wasserstoff mit dem erneuerbaren Rohstoff Glyzerin. http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE_Inhalte_Mediathek_NEU_2013/Praesentationen_Spezielle_Maerkte/Segatz_Jan_Glyzerin-Pyroreforming.pdf, Aufruf am 9.11.2014.

[Sei-2015] Seifert Logistics: Umweltschonend stapeln mit Wasserstoff. http://www.seifert-logis-tics.com/unternehmensgruppe/news/details/archive/2015/january/article/umweltschonend-stapeln-mit-wasser-stoff.html?tx_ttnews[day]=26&cHash=5ccdaab0dfec57553a6614ad9f9bbbec, Aufruf am 1.7.2015.

[Sie-2008] Siebert, G.; Kempf, S.: Benchmarking - Leitfaden für die Praxis. Hanser, München, 2008.

[Sta-2010a] Staffell, I.; Ingram, A.: Life cycle assessment of an alkaline fuel cell CHP systemInternational Journal of Hydrogen Energy, Jg. 35 (2010) Nr. 6, S. 2491–2505.

[Sta-2010b] Staffell, I.; Ingram, A.: Life cycle assessment of an alkaline fuel cell CHP system. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 35 (2010), Nr. 6, S. 2491–2505.

[Sta-2013] Stahlschmidt, A.: Hessen ist Vorreiter beim Einsatz der Brennstoffzellen-Technologie im Logistikbereich. http://www.h2bz-hessen.de/dynasite.cfm?dsmid=14456&newsid=13993&dsnocache=1, Aufruf am 17.7.2015.

[Stö-2005] Stölzle, W.; Hofmann, E.; Hofer, F.: Supply Chain Costing. Konzeptionelle Grundlagen und ausgewählte InstrumenteBrecht, U. (Hrsg.): Neue Entwicklungen im Rechnungswesen - Prozesse optimieren, Berichtswesen anpassen, Kosten senken. Gabler, Wiesbaden, 2005, S.51-85.

[Sto-2010] Stolten, D.: Hydrogen energy. Wiley-VCH, Weinheim, 2010.

[Sul-2010] Sullivan, J. L.; Gaines: A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs. Argonne National Laboratory, Argonne, 2010.

[Sul-2012] Sullivan, J. L.; Gaines, L.: Status of life cycle inventories for batteries. In: Energy Conversion and Management, Jg. 58 (2012), Nr. 6, S. 134–148.

[Tet-2012] Tetzlaff, K.-H.: Brennstoffzellen in einer Wasserstoffwelt. http://www.biowasserstoff.de/h2/Brennstoffzellen/Stack_expl.gif, Aufruf am 14.11.2014.

[THE-2015] THE ASAHI SHIMBUN: ansai airport moving to become hydrogen hub with `green` forklifts. http://ajw.asahi.com/article/sci_tech/environment/AJ201502120045, Aufruf am 22.6.2015.

[Töp-2014] Töpler, J.; Lehmann, J.: Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.

[Toy-2002] Toyota Industries Corporation: Environmental Report 2002. http://www.toyota-industries.com/csr/library/2002.html, Aufruf am 20.10.2015.

[TÜV-2011] TÜV SÜD Industrie Service GmbH: TÜV SÜD Standard CMS 70 - Erzeugung von grünem Wasserstoff (GreenHydrogen). http://www.tuev-sued.de/uploads/images/1334844036663025700024/erzeugungh.pdf, Aufruf am 30.10.2014.

[Umw-2000] Umweltbundesamt: HANDREICHUNG BEWERTUNG IN ÖKOBILANZEN. http://www.probas.umweltbundesamt.de/download/uba_bewertungsmethode.pdf, Aufruf am 22.10.2015.

[Van-2015] Vanhoudt, W.: CertifHy - Project overview. http://www.certifhy.eu/images/CertifhyProject.pdf, Aufruf am 7.7.2015.

[VDI-2008] VDI Verband Deutscher Ingenieure: Überschlägige Kostenermittlung einer Batterieladung. VDI Infoblatt B2, 2008.

[VDI-2695] VDI Verband Deutscher Ingenieure: Ermittlung der Betriebskosten für Diesel- und Elektro-Gabelstapler. VDI Richtlinie Nr. 2695, 2010.

[VDI-2884] VDI Verband Deutscher Ingenieure: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). VDI Richtlinie Nr. 2884, 2005.

[VDI-3586] VDI Verband Deutscher Ingenieure: Flurförderzeuge - Begriffe, Kurzzeichen, Beispiele. VDI-Richtlinie Nr. 3586, 2012.

[VDM-34160] VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. VDMA-Richtlinie Nr. 34160, 2006.

[Wag-2007] Wagner, H.-J.; Koch, M. K.; Burkhardt, J.; Große Böckmann, T.; Feck, N.; Kruse, P.: CO2-Emissionen der Stromerzeugung - Ein ganzheitlicher Vergleich verschiedener Techniken. In: BWK, Jg. 59 (2007), Nr. 10, S. 44–52.

[War-2014] Warmbold, J.: World Ranking Forklift Trucks. In: dhf Intralogistik, Jg. 41 (2014), Nr. 12, S. 16–42.

[Web-2008] Weber, J.; Schäffer, U.: Einführung in das Controlling. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2008.

[Wei-2013] Weigand, B.: Thermodynamik kompakt. Springer, Berlin, 2013.

[Win-2011] Windolph, M.; Möller, K.: Kostenmanagement. http://www.controlling-wiki.com/de/index.php/Kostenmanagement, Aufruf am 1.12.2014.

[Win-2014] Windels, S.: Hydrogen @ Colruyt Group. http://economie.fgov.be/nl/binaries/1_6_COLRUYT_NEW_tcm325-244829.pdf, Aufruf am 17.7.2015.

[Wöh-1990] Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. F. Vahlen, München, 1990.

[Zen-2004] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI): Merkblatt - Ladegerätezuordnung für Antriebsbatterien in geschlossener (PzS) und verschlossener (PzV) Ausführung. http://www.zvei.org/Verband/Fachverbaende/Batterien/Documents/Merkblaetter/11%20Ladegeraetezuordnung%20fuer%20Antriebsbatterien%202004-04.pdf, Aufruf am 15.10.2015.

[Zwe-2010] Zweck, A.: Studie zur Entwicklung eines Markteinführungsprogramms für Brennstoffzellen in Speziellen Märkten. VDI Technologiezentrum, Düsseldorf, 2010.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Konsortialpartner des Forschungsvorhabens H2IntraDrive 3

Abbildung 1-2: Struktur des Schlussberichtes 7

Abbildung 2-1: Einteilung der Flurförderzeuge anhand der Antriebsart, [Mar-2011, S. 228], [Gro-2014, S. 48] 9

Abbildung 2-2: Handgabelhubwagen, [Lin-2015c] 11

Abbildung 2-3: Niederhubwagen im Mitfahrerbetrieb, [Lin-2015c] 12

Abbildung 2-4: Elektromotorischer Schlepper, [Lin-2015c] 12

Abbildung 2-5: Batteriebetriebener Gabelstapler E35HL, [Lin-2015c] 13

Abbildung 2-6: Weltweite Auftragseingänge Flurförderzeuge, [Boe-2014] 14

Abbildung 2-7: Stückzahlenentwicklung Elektrokraftkarren mit Hebevorrichtung in Europa bzw. Deutschland, [Eur-2015] 15

Abbildung 2-8: Stückzahlenentwicklung der in den USA produzierten Flurförderzeuge, [Ind-2014] 16

Abbildung 2-9: Aufbau einer Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle, [Tet-2012] 18

Abbildung 2-10: Aufbau eines Brennstoffzellensystems für Flurförderzeuge, [Air-2014] 19

Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Brennstoffzellensystems 20

Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der Wasserstoffversorgung bei BMW Group 23

Abbildung 2-13: H_2-Flurförderzeuganwendungen in Europa (1: Mercedes Nutzfahrzeuge; 2: Seifert Logistik, 3: H2IntraDrive; 4: DB Schenker; 5: IKEA; 6: Air Liquide; 7: Colruyt Group; 8: FM Logistic; 9: Prelodis; 10: Honda) 25

Abbildung 2-14: H_2-Flurförderzeuganwendungen in Nordamerika, (auf Grundlage von [Fue-2015]) 29

Abbildung 2-15: Brennstoffzellenhersteller und Anzahl Brennstoffzellensysteme in Nordamerika, (auf Grundlage von [Fue-2015]) 30

Abbildung 2-16: Aufbau Blei-Säure Batterie (Panzerplatten (1), Gitterplatten (2), Separator (3), Zellengehäuse (4)), [HOP-2015, S. 7] 31

Abbildung 2-17: 50Hz-Ladegerät, [IEB-2015] 34

Abbildung 2-18: HF--Ladegerät, [Fro-2015] 34

Abbildung 3-1: BMW Group Werk Leipzig inkl. H2IntraDrive Anwendung 41

Abbildung 3-2: Hallenlayout BMW i Karosseriebau 42

Abbildung 3-3: Brennstoffzellenbetriebener Gabelstapler E35/FC der Firma Linde MH 43

Abbildung 3-4: Brennstoffzellenbetriebener Schlepper P30C/FC von Linde MH 44

Abbildung 3-5: Wasserstoffspeicher und Betankungsanlage im BMW Group Werk Leipzig 45

Abbildung 3-6: Wasserstoff Dispenser im BMW Group Werk Leipzig 46

Abbildung 3-7: Cover des Leitfadens für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen 48

Abbildung 4-1: Installation des Fluke Power Logger am Schaltschrank während der Gabelstaplerladung, (Bildquelle rechts [Flu-2006]) 50

Abbildung 4-2: Datenlogger am Gabelstapler 51

Abbildung 4-3: Kumulierte Betriebsstunden und Verlauf H_2-Schlepper 53

Abbildung 4-4: Kumulierte Betriebsstunden und Verlauf H_2-Gabelstapler 53

Abbildung 4-5: Anzahl Störmeldungen und Ausfälle Brennstoffzellensysteme H_2-Schlepper 55

Abbildung 4-6: Anzahl Störmeldungen und Ausfälle Brennstoffzellensysteme H_2-Gabelstapler 56

Abbildung 4-7: Aufteilung der Betriebszeiten nach Gabelstapleranwendungen 57

Abbildung 4-8: Verhältnis von Betriebs- zu Standbymodus bei Gabelstapleranwendungen 58

Abbildung 4-9: Verlauf der Leistungsaufnahme nach Gabelstapleranwendung 59

Abbildung 4-10: Streckenanteile nach Gabelstapleranwendung 60

Abbildung 4-11: Aufteilung der Betriebszeiten nach Schlepperanwendungen 62

Abbildung 4-12: Verhältnis von Betriebs- zu Standbymodus bei Schlepperanwendungen 63

Abbildung 4-13: Leistungsverlauf, Geschwindigkeitsprofile und zurückgelegte Strecke auf der Hybrid-Route 64

Abbildung 4-14: Verlauf Wasserstoffanlieferungen H2IntraDrive 67

Abbildung 4-15: Durchschnittliche Wasserstoff-Betankungsmengen nach Flurförderzeugtyp 67

Abbildung 4-16: Verlauf von Tankdruck und Tanktemperatur Schlepper 70

Abbildung 4-17: Verlauf der Leistung und des Energieverbrauchs der H_2-Infrastruktur über einen Tag 70

Abbildung 4-18: Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf während Batterieladung Schlepper 72

Abbildung 5-1: Kennzahlenfeld Reichweite 73

Abbildung 5-2: Wirkungsgradvergleich Brennstoffzellen- und Batterietechnologie 76

Abbildung 5-3: Kennzahlenfeld Zuverlässigkeit 76

Abbildung 5-4: Batteriewechsel mit Kran bei einem E-Gabelstapler 79
Abbildung 5-5: Wasserstoffbetankung bei einem H_2-Gabelstapler 81
Abbildung 5-6: Ablauf des Batteriewechsels bei einem E-Gabelstapler (dezentralen Ladestation) 82
Abbildung 5-7: Ablauf der Wasserstoffbetankung bei einem Gabelstapler 83
Abbildung 5-8: Zeitwerte Batteriewechsel vs. Wasserstoffbetankung beim Gabelstapler (Mittelwert sowie min. und max. Werte) 85
Abbildung 5-9: Zeitwerte Batteriewechsel vs. Wasserstoffbetankung beim Schlepper (Mittelwert sowie min. und max. Werte) 86
Abbildung 6-1: Vereinfachter Lebenszyklus eines (materiellen) Produktes, [Klö-2009, S. 3] 92
Abbildung 6-2: Komponenten einer Ökobilanz, [DIN-14040, S. 16] 92
Abbildung 6-3: Systemgrenze inkl. Unterteilung der Produktsysteme 97
Abbildung 6-4: Gesamtmodell E-Gabelstapler in GaBi 100
Abbildung 6-5: Deutscher Strommix 2014, [Age-2015] 105
Abbildung 6-6: Recyclingprozess H_2-Gabelstapler 108
Abbildung 6-7: Treibhauspotenzial (GWP100) Schlepper (konventionelle Energiepfade) 112
Abbildung 6-8: Treibhauspotenzial (GWP100) Schlepper (grüne Energiepfade) 113
Abbildung 6-9: Treibhauspotenzial (GWP100) Gabelstapler (konventionelle Energiepfade) 114
Abbildung 6-10: Treibhauspotenzial (GWP100) Gabelstapler (grüne Energiepfade) 115
Abbildung 7-1: Verfahren des internen Rechnungswesens zur Wirtschaftlichkeitskontrolle 118
Abbildung 7-2: Kostentreiber von H_2-Flurförderzeugen über den Lebenszyklus 124
Abbildung 7-3: Kostenvergleich Basisszenario Schlepper 140
Abbildung 7-4: Kostenvergleich Basisszenario Gabelstapler 141
Abbildung 7-5: Sensitivität Basisszenario Schlepper (absoluter Betrag des Kapitalwerts) 146
Abbildung 7-6: Sensitivität Basisszenario Gabelstapler (absoluter Betrag des Kapitalwerts) 148
Abbildung 8-1: Formen des internen und externen Benchmarkings, [Mer-2004, S. 28] 152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Flurförderzeug-Klassifizierung nach FEM/ITA nach [Hus-2013, S. 12] 10

Tabelle 2-2: Weltrangliste Flurförderzeuge, [War-2014, S. 36] 14

Tabelle 2-3: Brennstoffzellentypen, [Hei-2006, S. 9f.] 17

Tabelle 2-4: Eigenschaften von Wasserstoff Herstellungsverfahren, [Sto-2010, S. 159] 21

Tabelle 2-5: Nordamerikanische Unternehmen die H_2-Flurförderzeuge einsetzten, (auf Grundlage von [Fue-2015]) 28

Tabelle 4-1: Anwendungsspezifische Kennwerte der Gabelstapler 61

Tabelle 4-2: Anwendungsspezifische Kennwerte der Schlepper 65

Tabelle 4-3: Ø Wasserstoffbedarfe pro Betriebsstunde H_2-Flurförderzeuge 66

Tabelle 4-4: Kompressionsfaktor „Z“ von Wasserstoff bei 273,15 K, [Lud-2014] 69

Tabelle 4-5: Zusammenfassung der Kennzahlen der Wasserstoffinfrastruktur 71

Tabelle 5-1: Reichweitenbestimmung Flurförderzeuge] 75

Tabelle 5-2: Lebensdauervergleich 78

Tabelle 5-3: Risikobereiche bei LMM für Ziehen und Schieben, [Bun-2002] 86

Tabelle 5-4: Ergebnisse der LMM für standardisierte Batteriewechsel- und Betankungsprozesse 88

Tabelle 6-1: Wirkungskategorien nach der CML-Methode, [Jep-2015] 95

Tabelle 6-2: Materialdaten der Flurförderzeuge (Quelle: Linde MH) 101

Tabelle 6-3: Materialbestandteile der Blei-Säure Batterie, [Ker-1996] zitiert nach [Ran-1999] 102

Tabelle 6-4: Materialdaten der Brennstoffzellensysteme, (Quelle: Brennstoffzellensystemhersteller) 103

Tabelle 6-5: Materialdaten Brennstoffzellen-Stapel, [Sta-2010b, S. 2497f.] 104

Tabelle 6-6: Betriebsdaten Flurförderzeuge 106

Tabelle 6-7: Service- und Wartungsaufwand 107

Tabelle 6-8: Verbrauchs- und Produktionsdaten der Schachtofenanlage, [Ren-2001, S. 222] 109

Tabelle 7-1: Auswahl eines Verfahrens zur Wirtschaftlichkeitsanalyse 121

Tabelle 7-2: Kategorisierung der Kostentreiber von H2-Flurförderzeugen sowie deren Einflussfaktoren 125

Tabelle 7-3: Kategorisierung der Kostentreiber von E-Flurförderzeugen sowie deren Einflussfaktoren 126

Tabelle 7-4: Definition Einflussfaktoren Allgemeine Rahmenbedingungen für Basisszenario Schlepper 131

Tabelle 7-5: Definition Einflussfaktoren Wasserstoffinfrastruktur für Basisszenario Schlepper 132

Tabelle 7-6: Definition Einflussfaktoren Batterieinfrastruktur für Basisszenario Schlepper 133

Tabelle 7-7: Definition Einflussfaktoren Flurförderzeug für Basisszenario Schlepper 134

Tabelle 7-8: Definition Einflussfaktoren Brennstoffzellensystem für Basisszenario Schlepper 134

Tabelle 7-9: Definition Einflussfaktoren Blei-Säure Batterie für Basisszenario Schlepper 135

Tabelle 7-10: Definition Einflussfaktoren Allgemeine Rahmenbedingungen für Basisszenario Gabelstapler 136

Tabelle 7-11: Definition Einflussfaktoren Wasserstoffinfrastruktur für Basisszenario Gabelstapler 136

Tabelle 7-12: Definition Einflussfaktoren Batterieinfrastruktur für Basisszenario Gabelstapler 137

Tabelle 7-13: Definition Einflussfaktoren Flurförderzeug für Basisszenario Gabelstapler 138

Tabelle 7-14: Definition Einflussfaktoren Brennstoffzellensystem für Basisszenario Gabelstapler 138

Tabelle 7-15: Definition Einflussfaktoren Blei-Säure Batterie für Basisszenario Gabelstapler 139

Tabelle 7-16: Eingangsparameter für Sensitivitätsanalyse Schlepper 143

Tabelle 7-17: Eingangsparameter für Sensitivitätsanalyse Gabelstapler 144

Tabelle 8-1: Vergleich der Anwendungen H2IntraDrive, Mercedes, BMW in USA und VW in USA 154