



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

Multikriterielles Vorgehensmodell zur Auswahl des Energiespeichersystems für Flurförderzeuge

Miriam Delphine Wagner

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design

der Technischen Universität München

zur Erlangung einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

2. Prof. Dr.-Ing. Harald Klein

Die Dissertation wurde am 11.01.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 27.08.2024 angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2024

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

Layout und Satz: Miriam Wagner

Copyright © Miriam Wagner, 2024

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Zuge meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, für sein entgegengebrachtes Vertrauen, sein wertvolles Feedback sowie die hilfreichen Diskussionen. Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Klein für die Übernahme des Korreferats mit dem damit verbundenen Interesse an meiner Themenstellung. Herrn Prof. Dr. phil. Klaus Bengler danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die Grundlage dieser Dissertation bildet das Forschungsprojekt *FFZ70 - Einsatz von 70 wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen innerhalb des BMW Werks Leipzig*. Während der wissenschaftlichen Begleitung des Projektes wurde ich häufig gefragt, wann sich der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen lohne. Das hat mich motiviert, mich in der vorliegenden Arbeit ausführlich mit dieser Fragestellung auseinanderzusetzen. Ich möchte mich daher ebenfalls herzlich bei meinen Konsortialpartnern für die Zusammenarbeit und die vielen wertvollen Einblicke bedanken. Besonders danke ich Thomas, der mit seiner Expertise, seinem Engagement sowie unzähligen spannenden Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ein großer Dank gilt zudem meinen Korrekturlesern, die mich beim Feinschliff unterstützt haben. Vielen Dank für das sorgfältige Lesen und die hilfreichen Anmerkungen.

Zuletzt möchte ich meinen Eltern und meinem Partner von ganzem Herzen danken. Sie haben mich mit ihrer Unterstützung und ihrer Ermutigung stets begleitet und waren immer eine verlässliche Stütze für mich. Sie haben wesentlich dazu beigetragen, dass ich diesen Weg erfolgreich beschreiten konnte.

München, im November 2024

Kurzzusammenfassung

Multikriterielles Vorgehensmodell zur Auswahl des Energiespeichersystems für Flurförderzeuge

Elektromotorisch-betriebene Flurförderzeuge finden bereits seit einigen Jahrzehnten im innerbetrieblichen Transport Einsatz. Technische Weiterentwicklungen der vergangenen Jahre sorgen für ein wachsendes Portfolio an Energiespeichersystemen für die Energieversorgung des Antriebs: neben konventionellen Blei-Säure-Batterien gewinnen effizientere Lithium-Ionen-Batterien sowie Brennstoffzellensysteme an Bedeutung. Betreiber logistischer Flotten stehen damit vor der Herausforderung, die richtige Technologie für ihren individuellen Anwendungsfall zu identifizieren.

Das in dieser Arbeit entwickelte multikriterielle Vorgehensmodell setzt genau dort an. Als Werkzeug für die Planungsphase liefert es eine umfassende Entscheidungsunterstützung. Es hilft dem Planer beim strukturierten Vergleich und einer transparenten Bewertung der drei genannten Energiespeichersysteme für den Planungsfall unter Berücksichtigung von energetischen, prozessualen und ökonomischen Gesichtspunkten.

Nach der Definition des Forschungsziels – ausgehend vom aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik sowie der Forschungslücke – konkretisiert die Arbeit die Anforderungen an das Modell. Diese bilden die Grundlage für die anschließende Konzipierung der Modellbestandteile: der energetischen Bewertung, der prozessualen Bewertung und der ökonomischen Bewertung. Die Verknüpfung der Bewertungsmodule im analytischen Modell stellt das Herzstück des zusammenhängenden Gesamtkonzeptes dar, das die Wechselbeziehungen zwischen den Modulen berücksichtigt. Der individuelle Planungsfall fließt über die identifizierten Eingangsdaten in das Modell mit ein. Beim Durchlaufen der Vorgehensschritte erfolgt die quantitative Bewertung und der Vergleich der Energiespeichersysteme. Eine Entscheidungsmatrix generiert sich aus den Ergebnisgrößen im unternehmensindividuell gewichteten Zielsystem und macht die Alternativen vergleichbar. Daraus leitet sich die für den Planungsfall geeignete Technologie ab, womit das individuelle Entscheidungsproblem gelöst ist.

Eine Evaluation begleitet die beschriebenen Schritte und zeigt zum Abschluss der Arbeit die Anwendbarkeit und den Mehrwert ebenso wie die Grenzen des entwickelten Vorgehensmodells als Planungswerkzeug für die Bestimmung des für den spezifischen Anwendungsfall geeigneten Energiespeichersystems.

Abstract

Multi-criteria procedure model for the selection of an energy storage system for industrial trucks

Deploying electrically powered industrial trucks for in-plant transportation has already been state of the art for several decades. Further technical advances in recent years have increased the portfolio of energy storage systems for powering the drive: in addition to conventional lead-acid accumulators, more efficient lithium-ion accumulators and fuel cell systems are conquering the market. Operators of logistical fleets face the challenge of identifying the right technology for their individual use case.

This thesis develops a multi-criteria procedure model that applies for this problem. As a tool for the planning phase, it provides comprehensive decision guidance. It evaluates and compares the three mentioned energy storage systems regarding energetic, process-related and economical aspects in a structured and transparent manner, taking into account the planning case via the input data.

After defining the research objective - based on the current state of scientific and technical knowledge as well as the research gap - the work specifies the model requirements. These provide the basis for the following design of the model components: the energetic evaluation, the process evaluation and the economical evaluation. This integration of the evaluation modules in one analytical model is the core of the overall concept, considering the interdependencies between the modules. The individual planning situation is taken into account through the model's identified input data. A quantitative evaluation and comparison of the energy storage systems is carried out when going through the procedural steps. The decision matrix originates from the result variables in the company's individually weighted target system and makes the planning alternatives comparable. The suitable technology for the planning case derives from this, which solves the individual decision problem.

An evaluation accompanies the described steps and, to conclude the work, shows the applicability and benefit as well as the limits of the developed multi-criteria procedure model as a planning tool for the identification of the suitable energy storage system for the specific use case.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzzusammenfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formelzeichenverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Technische Grundlagen	7
2.1 Flurförderzeuge	7
2.1.1 Einordnung als Fördermittel im Fördersystem	7
2.1.2 Klassifizierung der Fahrzeugtypen	8
2.1.3 Übersicht der Antriebskonzepte für FFZ	8
2.2 Energieversorgung des elektromotorischen Antriebs	10
2.2.1 Energiespeichersysteme	10
2.2.2 Verwendung von Batterien	11
2.2.3 Ladeinfrastruktur zur Energiebereitstellung	15
2.2.4 Einsatz von Brennstoffzellensystemen	17
2.2.5 Wasserstoffinfrastruktur zur Energiebereitstellung	21
2.2.6 Unterschiede in der Energiekette und Kostenstruktur	24
2.3 Planung der Fördermittel in logistischen Systemen	26
2.3.1 Grundlagen der logistischen Planung	26
2.3.2 Einordnung des Planungsproblems	27
2.3.3 Bewertung der Planungsalternativen mit Entscheidungsmodell	28
2.3.4 Methoden zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit	32

3	Stand der Wissenschaft und Technik	37
3.1	Vergleich der FFZ-Energiespeicher im Fokus der Forschung	37
3.1.1	Energetischer und ökologischer Vergleich	37
3.1.2	Monetärer Vergleich	41
3.1.3	Prozessualer Vergleich	44
3.1.4	Vergleich der ESS in anderen Anwendungsfeldern	46
3.1.5	Fazit zum Stand der Forschung	48
3.2	Vergleich und Auswahl der FFZ-Energiespeicher im industriellen Umfeld	53
3.2.1	Vorgehen der Hersteller von Flurförderzeugen	53
3.2.2	Vorgehen der Hersteller von Energiespeichern und Infrastruktur	57
3.2.3	Informationen übergeordneter Stellen	60
3.2.4	Fazit zur industriellen Entscheidungsfindung	63
4	Forschungsbedarf und wissenschaftliche Fragestellung	67
4.1	Definition der Forschungslücke	67
4.2	Formulierung der Forschungsfragen und Forschungsziele	71
4.3	Vorgehensweise zur Zielerreichung	73
5	Anforderungsermittlung und Konzeptionierung	75
5.1	Identifikation der Anforderungen an das Modell	75
5.2	Spezifikation des Untersuchungsraums	79
5.3	Konzeptentwurf	81
6	Bestandteile des Modells	83
6.1	Energetische Bewertung	83
6.1.1	Analyse der Unterschiede der Energiekette	83
6.1.2	Identifikation der relevanten Aspekte	85
6.1.3	Bewertung der Lastprofile der FFZ	87
6.1.4	Ermittlung des Energiebedarfs der FFZ	90
6.1.5	Energieeffizienz des Energiespeichersystems mit Infrastruktur	91
6.1.6	Strom- und Wasserstoffbedarf in Betriebsphase	93
6.2	Prozessuale Bewertung	97
6.2.1	Analyse der prozessualen Unterschiede	97
6.2.2	Identifikation der relevanten Aspekte	101
6.2.3	Bewertung von Nutzungszeit, Nutzungsgrad und Nutzungsdauer	103
6.2.4	Berechnung von Fahrzeug- und Personaleinsatz	109

6.2.5	Dimensionierung der Infrastruktur beim Einsatz von BzS	111
6.2.6	Auslegung der Infrastruktur beim Einsatz von Batterien	114
6.3	Monetäre Bewertung	117
6.3.1	Identifikation der Kostenarten und relevanten Faktoren	117
6.3.2	Ermittlung der Personal- und Sozialkosten	120
6.3.3	Berechnung der Sachkosten	122
6.3.4	Ermittlung der Energiekosten	128
6.3.5	Berücksichtigung der Kapitalkosten	130
6.3.6	Betrachtung der Dienstleistungskosten	130
6.3.7	Öffentliche Abgaben und Versicherungskosten	133
7	Multikriterielles Vorgehensmodell	135
7.1	Konzept und Vorgehensschritte	135
7.2	Ermittlung und Erhebung der Eingangsdaten	138
7.2.1	Betriebliche Rahmenbedingungen	138
7.2.2	Einflussgrößen für die energetische Bewertung	139
7.2.3	Einflussgrößen für die prozessuale Bewertung	140
7.2.4	Einflussgrößen für die monetäre Bewertung	141
7.2.5	Datenaufnahme und -beschaffung	143
7.3	Bewertung im analytischen Modell	145
7.3.1	Vorgehen zur energetischen Bewertung	145
7.3.2	Vorgehen zur prozessualen Bewertung	147
7.3.3	Vorgehen zur monetären Bewertung	148
7.4	Zielgrößen und Entscheidung	150
7.5	Rahmenbedingungen zur Nutzung des Modells	155
7.5.1	Festlegung von Ausschlusskriterien	155
7.5.2	Softwarebasierte Umsetzung und Nutzung im Anwendungsfall	156
7.5.3	Auswirkungen strategischer Entscheidungen auf Ergebnisgrößen	158
8	Evaluation des entwickelten Vorgehensmodells	163
8.1	Zielsetzung und Vorgehen der Evaluation	163
8.2	Szenarioanalyse	165
8.2.1	Verifikation und Validierung der Modellbestandteile	165
8.2.2	Eingangsdaten und Annahmen für Szenarioanalyse	166
8.2.3	Analyse der Ergebnisse des Fallbeispiels	169
8.2.4	Ergebnisse und Fazit zum Fallbeispiel	173

8.3 Überprüfung der Anforderungserfüllung	176
8.4 Diskussion und Beantwortung der Forschungsfragen	180
9 Zusammenfassung und Ausblick	183
9.1 Zusammenfassung	183
9.2 Ausblick	185
Literaturverzeichnis	187
Abbildungsverzeichnis	205
Tabellenverzeichnis	207
Anhang A Einflussgrößen für Ausgangsszenario	A-1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AfA	Abschreibungstabellen für die Absetzung für Abnutzung
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMS	Batteriemanagementsystem
BzS	Brennstoffzellensystem
CIN	Clean Intralogistics Net
DOD	Entladungsgrad der Batterie (<i>EN: Depth Of Discharge</i>)
EM	Elektromotor (Batterie, Brennstoffzellensystem)
ESS	Energiespeichersystem
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
FFZ	Flurförderzeug
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
H ₂	Wasserstoff
HF	Hochfrequenz
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LPG	Liquefied Petroleum Gas / Autogas
LZK	Lebenszykluskosten
MTBF	Mean Time Between Failures
MTM	Methods-Time Measurement
MTTR	Mean Time To Repair
PbB	Blei-Säure-Batterie
PEMFC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (<i>EN: Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>)
TCO	Total Cost of Ownership
VM	Verbrennungsmotor (Diesel, Gas)

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A_{Arbeitsbereich}$	m ²	Grundfläche des Arbeitsbereichs für PbB-Wechsel
$A_{Bereitstellung}$	m ²	Grundfläche H ₂ -Bereitstellung/Erzeugung
$A_{Dispenser}$	m ²	Grundfläche Dispenser
A_{ESS}	m ²	Grundfläche des Energiespeichersystems
A_{FFZ}	m ²	Grundfläche FFZ
$A_{Hochdruck}$	m ²	Grundfläche Hochdruckspeicher
$A_{Infrastruktur}$	m ²	Gesamtfläche der Infrastruktur
$A_{Ladegerät}$	m ²	Grundfläche des Ladegeräts
$A_{Niederdruck}$	m ²	Grundfläche Niederdruckspeicher
$A_{Sicherheit}$	m ²	Flächenbedarf Sicherheitsvorkehrungen (Abstand)
$A_{Verdichter}$	m ²	Grundfläche Verdichter
A_{Wasser}	m ²	Grundfläche für Nachfüllen von Wasser bei PbB
$A_{Wechseltechnik}$	m ²	Grundfläche der Wechseltechnik bei PbB
E_5	kWh	Energiemenge der 5-Stunden-Kapazität
E_{aus}	kWh	ausspeicherbare Energie aus Energiespeicher
$E_{Batteriebetrieb}$	kWh	Energieverbrauch Flotte bei PbB
$E_{Batterieladung}$	kWh	Energieverbrauch der Batterieladung
$E_{Dispenser}$	kWh	Energiebedarf des Dispenser
E_{ein}	kWh	einzuspeichernde Energie bei Energiespeicher
$E_{Erzeugung}$	kWh	Energiebedarf für die H ₂ -Erzeugung
E_{FFZ}	kWh	Energiebedarf je FFZ-Typ
$E_{FFZ,Testzyklus}$	kWh	Energiebedarf des FFZ anhand des Testzyklus
E_{Laden}	kWh	Energieverbrauch der Batterieladung
$E_{Standby}$	kWh	Standby-Energiebedarf der Infrastruktur
$E_{Stromnetz}$	kWh	Energiebedarf aus Stromnetz (kostenwirksam)
$E_{Verdichter}$	kWh	Energiebedarf des Verdichters
η_{aus}	1	Ausspeicherwirkungsgrad bei Energiespeicher
η_{BzS}	1	Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems
η_{ein}	1	Einspeicherwirkungsgrad bei Energiespeicher
$\eta_{Ladetechnologie}$	1	Wirkungsgrad der Ladetechnik
η_{sp}	1	Speicherwirkungsgrad bei Energiespeicher
η_{ver} auch N_G	1	Gesamtverfügbarkeit, Nutzungsgrad
$H_{i,Wasserstoff}$	kWh/kg	spezifischer Heizwert von Wasserstoff
I_{Laden}	A	Ladestrom
i	1	Kalkulationszinssatz

k_{DOD}	1	Entladegrad
$k_{Füllstand}$	1	Füllkoeffizient (für nachzutankende Menge H ₂)
$k_{Gleichzeitigkeit}$	1	Gleichzeitigkeitsfaktor bei Batterieladung
$k_{Grundpreis,FFZ}$	1	Anteil der FFZ an kundenabhängigem Grundpreis
k_{Laden}	1	Ladefaktor
$k_{Ladestrategie}$	1	Faktor für die Berücksichtigung der Ladestrategie
k_{Risiko}	1	Risikofaktor für Einbezug von Schwankungen
$k_{Sicherheit,ESS}$	1	Faktor für Ermittlung der Anzahl der Ersatz-ESS
$k_{Sicherheit,Ladegerät}$	1	Sicherheitsfaktor für Auslegung Ladeinfrastruktur
$k_{Sicherheit,ND}$	1	Sicherheitsfaktor für Auslegung ND-Speicher
$k_{Tagesverbrauch}$	1	Faktor (Anteil am Tagesverbrauch)
$k_{Wirkung}$	1	Wirkungsgradreduktion je 1000 Bh beim ESS
$k_{Abwesenheit}$	1	Ausfallfaktor für Abwesenheiten (Krankheit/Urlaub)
K_{Nenn}	Ah	Nennkapazität
K_0	€	Kapitalwert einer Investition
$K_{Abschreibung}$	€	jährlicher Abschreibungswert über Nutzungsdauer
$K_{Anlieferung,H2}$	€	Kosten für die Anlieferung von Wasserstoff
$K_{Auszahlung}$	€	Auszahlungen
K_{Bau}	€	Baukosten
$K_{Betankungsanlage}$	€	Kosten für die Betankungsanlage
$K_{Betriebsmittel}$	€	Kosten für erforderliche Betriebsmittel
$K_{CO2-Abgabe}$	€	Kosten für CO ₂ -Zertifikate sowie CO ₂ -Steuern
$K_{Dispenser}$	€	Kosten für Dispenser
$K_{Einzahlung}$	€	Einzahlungen
$K_{Energie}$ auch K_E	€	Energiekosten
$K_{E,arbeitsabh}$	€	arbeitsabhängige Energiekosten
$K_{E,arbeit/kWh}$	€	Arbeitspreis
$K_{E,kundenabh}$	€	kundenabhängiger Grundpreis für Energie
$K_{E,leistungsabh}$	€	leistungsabhängige Energiekosten
$K_{E,leist/kW}$	€	Leistungspreis
$K_{Entsorgung,Infra}$	€	Kosten der Anbindung an die Entsorgung
$K_{Erzeugung}$	€	Kosten für Erzeugungsanlage Wasserstoff
K_{ESS}	€	Kosten für ESS
K_{FFZ}	€	Kosten für FFZ
$K_{Gutachten}$	€	Kosten für Gutachten
$K_{Genehmigung}$	€	Kosten für Genehmigungen
$K_{Hochdruck}$	€	Kosten für Hochdruckspeicher
K_{Inbetr}	€	Inbetriebnahmekosten
K_{Infra}	€	Kosten für Infrastruktur
$K_{Instand}$	€	Instandsetzungskosten

K_{Invest}	€	Anschaffungskosten, Investition
$K_{Ladegerät}$	€	Kosten für Ladegerät
$K_{Material}$	€	Materialkosten
K_{Miete}	€	Mietkosten für Werksflächen
K_{m^2}	€	Kostensatz je m ² Flächennutzung
$K_{Netzinfrastuktur}$	€	Kosten für Aufbau von Ver-/Entsorgungsnetzwerk
$K_{Niederdruck}$	€	Kosten für Niederdruckspeicher
$K_{Personal}$	€	Personalkosten
$K_{Planung}$	€	Planungskosten
K_{Reise}	€	Reisekosten
$K_{Restwert}$	€	Restwert des Anlagevermögens
K_{RHB}	€	Kosten für Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe
$K_{Rückbau}$	€	Rückbaukosten
$K_{Schulung}$	€	Kosten für Schulungsmaßnahme
$K_{Sonstige,Verwertung}$	€	sonstige Kosten/Erlöse der Verwertung
$K_{Versicherung}$	€	Kosten für Versicherungen/Wagnisse
$K_{Versorgung,Infra}$	€	Kosten der Anbindung an die Versorgung
$K_{Verwertung}$	€	Verwertungskosten
$K_{Wartung}$	€	Wartungskosten
$K_{Wasserstoff/kg}$	€	Preis je kg Wasserstoff
$K_{Wechseltechnik}$	€	Kosten für Wechseltechnik
$K_{Werkzeug}$	€	Kosten für Werkzeug
l_{FFZ}	1	Lastkoeffizient (i. V. m. Lastprofil Testzyklus)
m_{BzS}	kg	Tankinhalt Brennstoffzellensystem
$m_{Hochdruck}$	kg	Wasserstoffmenge im Hochdruckspeicher
$m_{Niederdruck}$	kg	Wasserstoffmenge im Niederdruckspeicher
$m_{Trailer}$	kg	Wasserstoffmenge im Trailer
$m_{Verdichter}$	kg	Liefermenge des Verdichters
$\dot{m}_{Verdichter}$	kg/s	Massenstrom des Verdichters
$m_{Wasserstoff,FFZ}$	kg	Wasserstoffbedarf verschiedener FFZ-Typen
$m_{Wasserstoff,ges}$	kg	gesamter Wasserstoffbedarf der Flotte
$n_{Arbeitstage,Jahr}$	1	Anzahl Arbeitstage je Jahr
$n_{Befüllungen/Dispenser}$	1	Anzahl Befüllungen je Dispenser
$n_{Bh/Tag}$	1	Anzahl täglicher Betriebsstunden
$n_{Dispenser}$	1	Anzahl der Dispenser
n_{FFZ}	1	Anzahl Fahrzeuge
$n_{FFZ,Plan,initial}$	1	Initial geplante Anzahl FFZ (ohne Ausfallzeiten)
$n_{FFZ,Soll}$	1	Soll-Anzahl der FFZ für Leistungserbringung
$n_{FFZh,Schicht}$	1	Anzahl der Flurförderzeugstunden pro Schicht
n_{FTF}	1	Anzahl autonomer Fahrzeuge

$n_{Ladegerät}$	1	Anzahl Ladegeräte
$n_{Tankvorgang}$	1	Anzahl Tankvorgänge für Flotte
n_{MA}	1	Anzahl Mitarbeiter
$n_{Schichten,Tag}$	1	Anzahl der Schichten je Arbeitstag
n_{WLT}	1	Anzahl des Eintretens von Wechsel/Laden/Tanken
$P_{Ladegerät}$	kW	Leistung des Ladegerätes
$P_{Stromnetz,max}$	kW	Leistungsspitze aus Stromnetz
ρ_{FFZ}	1	Auslastung der FFZ
$\rho_{Verdichter}$	1	Auslastung des Verdichters
r_{EK}	1	Eigenkapitalkosten
r_f	1	risikofreie Rate auf Kapitalmarkt
r_p	1	Risiko-/Geduldsprämie
RW_{ESS}	s	maximale Reichweite der ESS-Technologie
s_{WLT}	m	Strecke zum Wechsel/Laden/Tanken
$t_{Anfahrt}$	s	An-/Rückfahrtzeit zu WLT
$t_{Ausfall,FFZ,ges}$	s	Ausfallzeit der Flotte je Schicht in s
$t_{Ausfall,org}$ auch T_O	s	Organisatorische Ausfallzeit
$t_{Ausfall,techn}$ auch T_T	s	Technische Ausfallzeit
$t_{Belegung}$ auch T_B	s	Belegungszeit
$t_{Einfahrt}$	s	Ein-/Ausfahrtszeit für Wechsel in Raum
$t_{Instandhaltung}$	s	Instandhaltungszeit
t_{Laden}	s	Ladezeit
$t_{Messung}$	s	definierter Messzeitraum
$t_{Nachbereitung}$	s	Nachbereitungszeit für Wechsel/Laden/Tanken
$t_{Nutzung}$ auch T_N	s	Nutzungszeit
$t_{Nutzungsdauer}$	s	Nutzungsdauer für den Lebenszyklus
t_{Pausen}	s	Dauer vorgesehene Pausen je Schicht
$t_{Schicht}$	s	Dauer einer Schicht
$t_{Starten}$	s	Startverzögerung der FFZ zu Schichtbeginn
$t_{Sichtprüfung}$	s	Zeit für Sichtprüfung zu Fahrtbeginn
$t_{Störung}$	s	Ausfallzeit durch Schäden oder Störung
t_{Tanken}	s	Betankungszeit
$t_{Vorbereitung}$	s	Vorbereitungszeit für Wechsel/Laden/Tanken
t_{Warten}	s	Wartezeit für Wechsel/Laden/Tanken
$t_{Wartung}$ auch T_W	s	Wartungszeit
$t_{Wasserstand}$	s	Prüfen, Nachfüllen Wasserstand bei Wechsel
$t_{Wechsel}$	s	Wechselzeit
U_{Laden}	V	Ladespannung
U_{Nenn}	V	Batteriespannung
v_{FFZ}	m/s	maximale Geschwindigkeit des FFZ

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Auswahl der richtigen Antriebsart für Fahrzeuge hatte selten so große Auswirkungen wie heutzutage. Die steigenden Energie- und Rohstoffpreise haben enormen Einfluss auf die Industrie wie auch auf Privatpersonen. Die abnehmende Verfügbarkeit der endlichen Rohstoffe verschärft die Situation weiter. Der Klimawandel und die damit verbundene Erderwärmung machen den Umstieg auf erneuerbare Energiequellen unumgänglich. Dies fordert ebenfalls die Bundesregierung durch politische Vorgaben aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz zur Dekarbonisierung und Reduktion der Treibhausgase der unterschiedlichen Sektoren, wie Industrie, Energiewirtschaft, Verkehr oder Gebäude. Das 2021 festgelegte Minderungsziel für Treibhausgase sieht vor, dass diese bis 2030 um 65 % im Vergleich zu 1990 gesenkt werden müssen, um schrittweise bis 2045 eine CO₂-Neutralität zu erreichen. [BMWK-2021a]

Diese Forderung stellt die Sektoren wiederum vor Herausforderungen. Die Industrie konnte ihre Emissionen bis 2020 im Vergleich zu 1990 um 16,5 % senken, wohingegen im Verkehrssektor bereits eine Reduktion um 40,8 % realisiert wurde [BMWK-2021b]. Es besteht noch großes Reduktionspotenzial – Hand in Hand mit diesen Forderungen geht daher derzeit die Förderung von Wasserstofftechnologien durch die nationale Wasserstoffstrategie. Diese wurde im Juni 2020 durch das – damals noch – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) erstmals veröffentlicht und deren Fortschreibung im Juli 2023 durch das Bundeskabinett beschlossen. Der Einsatz von Wasserstoff (H₂) als Energieträger und -speicher ist vielseitig und kann aktiv zur Reduktion der Emissionen beitragen – sofern dieser grün ist, also unter Verwendung erneuerbarer Energien erzeugt wurde. [BMWi-2020, S. 1f.; BMWK-2023]

In der Mobilität verfolgen die Hersteller aktiv die Elektrifizierung ihrer Fahrzeuge mit dem Einsatz von Batterien wie auch Brennstoffzellensystemen. Wesentlicher Treiber dieser Aktivitäten ist, dass die Bundesregierung sich bereits, nach Beschluss im EU-Umweltrat im Juni 2022, dazu bekannt hat, ab 2035 nur verbrennungsmotorisch-betriebene Fahrzeuge neu zuzulassen, die beim Fahren keine klimaschädlichen CO₂-Emissionen ausstoßen. Dies resultiert in einer Zunahme elektromotorisch-betriebener Fahrzeuge sowie in der Verwendung klimaneutraler Kraftstoffe, sogenannter E-Fuels, anstelle der konventionellen Kraftstoffe. [Bun-2022]

Während die Durchdringung des Personen- und Güterverkehrs mit emissionsarmen und -freien Antriebstechnologien noch am Anfang steht, werden Flurförderzeuge (FFZ) in der Intralogistik bereits seit langem in bedeutendem Umfang elektromotorisch und damit lokal nahezu emissionsfrei betrieben [FEM-2022]. Ein wesentlicher Grund sind die bei verbrennungsmotorisch-betriebenen FFZ entstehenden Abgase, die den Einsatz in geschlossenen Produktionsräumen behindern [Ber-2015a; TRGS-554]. Darüber hinaus ergeben sich hieraus heutzutage positive Effekte hinsichtlich der Erreichung der zuvor erwähnten Klimaziele der Unternehmen [BMW-2020].

Mit einem Marktanteil von 87,2 % im Jahr 2021 [FEM-2019; FEM-2022] ist bereits jetzt der Großteil aller in Europa verkauften FFZ mit elektrischen Antrieben betrieben. Das gängigste Energiespeichersystem (ESS) stellt dabei die Blei-Säure-Batterie (PbB) dar. Die Technologie hat allerdings einige Nachteile: lange Batterielade- und Abkühlzeiten, Zeit- und Arbeitsaufwand beim Wechseln oder Laden der Batterie und damit vermeidbare Prozesszeitverluste, notwendige Laderäume für die Batterieladung aufgrund des Ausgasens sowie relativ kurze Lebenszeiten. [Gün-2015a, S. 30ff.]

Nicht zuletzt deswegen ist das Portfolio an verfügbaren ESS-Technologien für den elektromotorischen Antrieb in den vergangenen Jahren gewachsen. Einige der genannten negativen Effekte erübrigen sich beim Einsatz von Brennstoffzellensystemen (BzS). In mehreren Forschungsprojekten wurde deren Eignung, auch für größere Flotten, untersucht. Mit diesen Arbeiten kann nach Aussage von *Fottner* „eine weitere Technologie, die bei bestimmten Randbedingungen klare Vorteile bietet, industriell eingesetzt werden. Sie erweitert das bereits bestehende Portfolio und kann einen Beitrag zur optimalen Systemgestaltung leisten.“ [BMW-2018] Auch die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) wirkt den Nachteilen entgegen, da der Ladeprozess durch eine mögliche Schnellladung in Pausenzeiten optimiert ist, einen Batteriewechsel obsolet macht und die Technologie eine längere Lebensdauer aufweist. Diese neuen Technologien bringen wiederum andere Herausforderungen mit sich, wie infrastrukturelle Besonderheiten oder eine geringere Technologiereife [Wag-2020, S. 719].

Jedes der verfügbaren ESS eignet sich für den individuellen Anwendungsfall besser oder schlechter. Innerhalb dieses Portfolios der emissionsfreien Energieversorgung der elektromotorischen FFZ stellt sich daher für den Planer¹ der Flotten die Frage, welche Technologie für den individuellen Anwendungsfall die richtige ist, sowohl aus

¹ Beim Planer kann es sich sowohl um den Anwender, also den Betreiber der Flotte, handeln als auch um die Mitarbeiter des FFZ-Herstellers oder unabhängiger (Logistik-)Planungsbüros. Für eine bessere Lesbarkeit findet in dieser Dissertation das generische Maskulinum Verwendung. Verwendete Personen- oder Berufsbezeichnungen beziehen sich auf alle Geschlechter.

technologischer als auch aus ökonomischer und ökologischer Sicht. Diese Entscheidung und die Auswahl des richtigen ESS bedarf detaillierter Analysen des Planungsfalls und einer breiten Informationsbasis, um die prozessualen Unterschiede, die mit den Technologien einhergehen, zu erfassen und zu bewerten.

1.2 Zielsetzung

Die Literatur liefert wenig Hilfestellungen und Antworten für den Planer, um eine fundierte Entscheidung zu treffen. Bestehende Quellen beantworten die Frage nach der Eignung der Technologien für den Anwendungsfall nur oberflächlich. Aus Sicht der industriellen Praxis fehlt eine detaillierte, neutrale Informationsbasis zu den Unterschieden der ESS. Eine Bewertung und ein Vergleich der Technologien ist für den Planer dadurch erschwert möglich. Somit existiert keine objektive Vergleichsmöglichkeit der ESS. Fehlende Informationsquellen erschweren zudem die Bewertung des Technologieeinsatzes für den individuellen Anwendungsfall, da keine Methode zur Bestimmung der geeigneten Lösung für den spezifischen Anwendungsfall existiert. Die Entscheidung der Planer basiert daher häufig auf persönlichen Erfahrungen und einer subjektiven Einschätzung oder auf der Beratung durch die Hersteller der Systeme. Die Arbeit zielt aus diesem Grund darauf ab, dem Planer eine herstellerunabhängige Hilfestellung zu liefern, um systematisch und unter Einbezug der Unternehmens- und Projektanforderungen die verschiedenen ESS einander gegenüberzustellen und die geeignete Lösung für den Anwendungsfall identifizieren zu können. Dabei sollen insbesondere die prozessualen Unterschiede Berücksichtigung finden, die sowohl Auswirkungen auf Energiebedarfe als auch auf die Kostenbetrachtung haben.

Die daraus abgeleitete, übergeordnete Zielsetzung ist die Entwicklung eines multikriteriellen Vorgehensmodells zur systematischen Bestimmung des geeigneten ESS für elektromotorisch-betriebene FFZ für den spezifischen Anwendungsfall unter Einbeziehung von energetischen, prozessualen und ökonomischen Kriterien.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zur Erreichung dieser Zielsetzung untergliedert sich die vorliegende Arbeit in neun Kapitel. Nach der Hinführung zum Thema in diesem Kapitel mit einer Zielstellung für die Arbeit, liefert das zweite Kapitel die relevanten Definitionen sowie technische Grundlagen zu FFZ, den ESS und Planungsmethoden für die weitere Ausarbeitung.

Darauf aufbauend widmet sich Kapitel 3 dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik. Es beleuchtet bisherige Arbeiten im Forschungsfeld zum Vergleich der ESS hinsichtlich energetischer, prozessualer und ökonomischer Gesichtspunkte sowie das aktuelle Vorgehen im industriellen Umfeld.

Anschließend an diese Analyse kann der Forschungsbedarf konkretisiert werden, womit sich Kapitel 4 beschäftigt. Nach der Definition der Forschungslücke folgt die Formulierung der Forschungsfragen und -ziele und die Ableitung einer geeigneten Vorgehensweise zur Erreichung der Forschungsziele.

Die Identifikation der Anforderungen in Kapitel 5 zeigt die Erwartungen an das Modell auf. Die darauffolgende Spezifikation des Untersuchungsraums definiert den Einsatzbereich für das Modell. Daraus kann ein erster Modellierungsansatz abgeleitet werden. Diese Vorarbeiten münden in einem Grobkonzept des Vorgehensmodells.

In Kapitel 6 werden die einzelnen Modellbestandteile, also die drei Module zur energetischen, prozessualen und ökonomischen Bewertung, im Detail entwickelt und beschrieben. Nach einer Systemanalyse zur Darstellung der Unterschiede der Technologien und der wesentlichen Inhalte des jeweiligen Moduls folgt die Identifikation der relevanten Aspekte für das Vorgehensmodell. Die formalen Beschreibungen dienen der Implementierung dieser Aspekte im Bewertungsmodul des analytischen Vorgehensmodells.

Kapitel 7 widmet sich anschließend der Überführung dieser Ergebnisse in das zusammenhängende Gesamtmodell zur quantitativen Bewertung der ESS. Nach der Erläuterung des Konzeptes mit den Vorgehensschritten folgt die Beschreibung der Ermittlung und Erhebung der erforderlichen Eingangsdaten für die drei Bewertungsmodule mit den Schritten zur Bewertung im zusammenhängenden analytischen Modell. Zur Auswertung der Ergebnisse folgt die Detaillierung der Zielgrößen und deren Einbindung im Zielsystem für die Entscheidungsfindung. Hinweise zur Implementierung und Anwendung des Modells runden das Kapitel ab.

Als letzter Schritt erfolgt in Kapitel 8 die Evaluation des entwickelten multikriteriellen Vorgehensmodells. Der Fokus liegt hierbei auf der Durchführung einer Szenarioanalyse. Das Modell wird an einem Fallbeispiel angewandt, um die Anwendbarkeit und Nutzbarkeit zu bewerten. Die Bestandteile werden dabei verifiziert und validiert. Die folgende Überprüfung der Anforderungserfüllung hilft bei der Bewertung der Ergebnisse und der Nutzbarkeit des Konzeptes. Eine abschließende Diskussion mit Rückbezug zu den Forschungsfragen rundet das Vorgehen ab.

Das Fazit in Kapitel 9 fasst die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammen und liefert im Ausblick Ansatzpunkte für weitere Forschung.

Der beschriebene Aufbau der Arbeit ist in der folgenden Abbildung 1-1 dargestellt:



Abbildung 1-1: *Aufbau der Arbeit*

2 Technische Grundlagen

Als Grundlage der weiteren Arbeit liefert dieser Abschnitt Definitionen wichtiger Begrifflichkeiten sowie einen Überblick über die für die Arbeit notwendigen technischen Grundlagen zu FFZ, deren Antriebskonzepten mit den zugehörigen ESS sowie der logistischen Planung von Fördermitteln.

2.1 Flurförderzeuge

2.1.1 Einordnung als Fördermittel im Fördersystem

Bei Fördermitteln handelt es sich um Arbeitsmittel im innerbetrieblichen Materialfluss. Sie werden dynamisch für verschiedene Aufgaben, wie Verteilen, Sortieren oder Puffern, eingesetzt. Abhängig von der Fortbewegung des zu transportierenden Gutes erfolgt eine Unterscheidung zwischen Stetigförderern – mit kontinuierlichem Fördergutstrom bei Schüttgut oder einem diskret kontinuierlichen Fördergutstrom bei Stückgut – und Unstetigförderern – mit einem unterbrochenen diskreten Fördergutstrom bei Schütt- oder Stückgut. Letztere, zu denen die FFZ zählen, agieren in Arbeitsspielen. Diese bestehen aus verschiedenen sich abwechselnden Prozesszeitanteilen, wie Lastfahrt, Leerfahrt oder Stillstand. [Hom-2018, S. 126ff.] Abbildung 2-1 zeigt in blau die Einordnung der FFZ innerhalb der Unstetigförderer.

UNSTETIGFÖRDERER					
flurgebunden		aufgeständert		flurfrei	
geführt verfahrbar	frei verfahrbar	ortsfest	geführt verfahrbar	geführt verfahrbar	
Einzelantrieb	Einzelantrieb	Einzelantrieb	Einzelantrieb	Muskelkraft	Einzelantrieb
Umsetzer	Schlepper	Aufzug/ Senkrechtförderer	Kanalfahrzeug	Trolleybahn	Brückenkran
Verschiebewagen	Wagen		Verteilsfahrzeug	Rohrbahn	Portalkran
Elektrotragbahn	Hubwagen				Kabelkran
Regalbediengerät	Stapler				Ausleger-/Drehkran
automat. Flurförderzeug	automat. Flurförderzeug				Elektrohängebahn
	Kommissionier- fahrzeug				

Abbildung 2-1: Einordnung der FFZ in die Systematik der Fördermittel für die Stückgutförderung in Anlehnung an [Hom-2018, S. 129]

Bei FFZ handelt es sich um frei auf dem Boden verfahrbare, nicht schienengebundene Fahrzeuge, die zum innerbetrieblichen Transport von Gütern eingesetzt werden [VDI-3586, S. 3]. Sie bilden dabei die logistische Funktion des Transportierens innerhalb des Materialflusses ab [Mar-2016, S. 99]. FFZ sind flexibel im Einsatz, da sie diverse Quellen und Senken bedienen und verschiedene Transportaufgaben erfüllen können [Hom-2018, S. 130].

2.1.2 Klassifizierung der Fahrzeugtypen

FFZ lassen sich auf mehrere Arten nach ihren Ausprägungen klassifizieren. Die Fahrzeugtypen zeichnen sich bspw. durch Unterschiede in Bauweise, Bedienart, Antriebsart, Rädern, Hubhöhen oder Fahrbewegungen aus. [ISO-5053-1, S. 35ff.] Bei Gliederung nach Bauart wird zwischen den folgenden Fahrzeugtypen unterschieden: Schlepper, Wagen, Gabelhubwagen, Stapler und Hochregalstapler. [Weh-2020, S. 587] Eine andere Klassifizierung erfolgt anhand des Bedienerstatus – es wird zwischen fahrer-gesteuert, mitgängergeführt und fahrerlos unterschieden. [VDI-3586, S. 4] Die Richtlinie *VDI 3586* unterscheidet hinsichtlich der Antriebsart in manuellen Antrieb, also Handbetrieb, und motorischen Antrieb, dem Kraftbetrieb; letzterer unterteilt sich weiter in Verbrennungsmotor (VM), Elektromotor (EM) und Hybridantrieb. [VDI-3586, S. 3]

2.1.3 Übersicht der Antriebskonzepte für FFZ

Antriebssysteme bestehen aus Energiespeicher, wie Batterie, Energieüberträger, wie Kabel, und Energiewandler, wie Motor, und dienen der „Umwandlung einer Eingangsgröße in eine andere Ausgangsgröße, so dass kinetische oder potentielle Energie zur Verrichtung der Arbeitsaufgabe bereitgestellt werden kann“ [Fot-2022a, S. 1:11f.]. Das Antriebskonzept des FFZ stellt die Art der Energiewandlung zur Erzeugung der kinetischen Energie dar. Hierbei berücksichtigt der Begriff Antrieb neben dem Motor ebenfalls zugehörige Baugruppen, wie Getriebe oder Steuerung. [Mar-2016, S. 101]

Die nachfolgende Abbildung 2-2 zeigt die den FFZ-Antriebskonzepten zugehörigen Motortypen mit der Energieversorgung, also dem zugehörigen ESS. Bei Verbrennungsmotoren kann zwischen Benzin-, Diesel- oder Gasmotor unterschieden werden, deren Energieversorgung über einen Kraftstofftank als chemischem Energiespeicher erfolgt. [Mar-2016, S. 102f.; Fot-2022a, S. 1:12] In diesem Tank wird über die Lagerung des Energieträgers chemische Energie gespeichert [Ste-2017, S. 28].

Bei Elektromotoren existieren sowohl Drehstrom- als auch Gleichstrommotoren. Diese werden durch ein ESS für elektrische Energie, wie wiederaufladbare Batterien, den

sogenannten Akkumulatoren, versorgt. Für den Hybridantrieb existieren mehrere Kombinationsmöglichkeiten der zuvor genannten VM und EM. [Mar-2016, S. 102ff.]

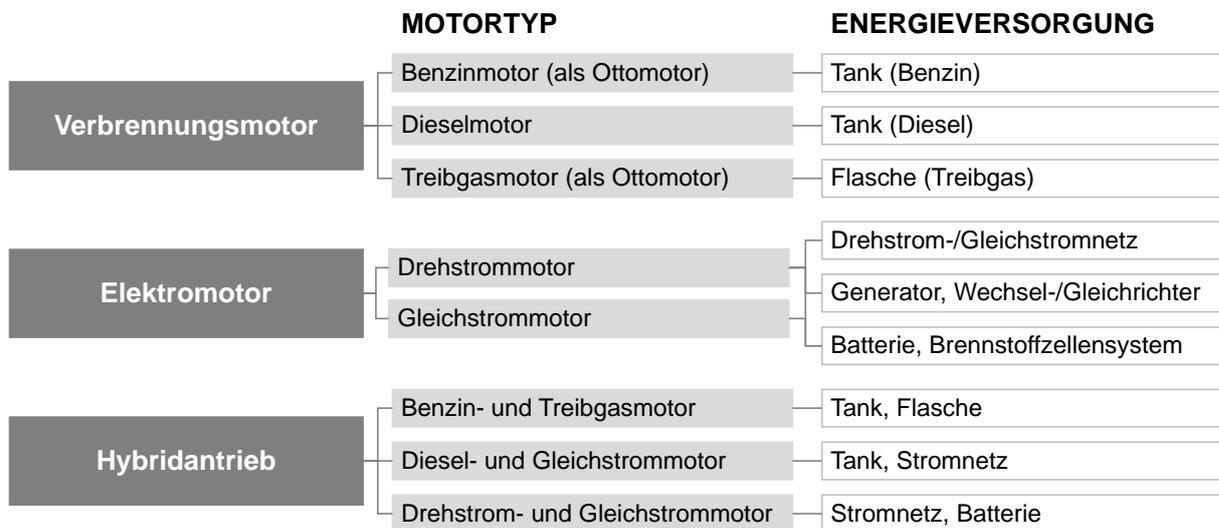


Abbildung 2-2: Strukturierung der Antriebsarten von Fördermitteln in Anlehnung an [Mar-2016, S. 102]

Elektromotorisch angetriebene FFZ bewegen sich größtenteils innerhalb der Werkshallen. Gasangetriebene Stapler werden im kombinierten Indoor- und Outdoor-Betrieb eingesetzt, wohingegen FFZ mit VM aufgrund der entstehenden Abgase vorrangig außerhalb von Gebäuden verwendet werden. [Weh-2020, S. 586f.; Ber-2015a; TRGS-554] Nicht zuletzt deswegen stellen elektromotorisch-betriebene FFZ bei wachsendem Marktanteil seit 2016 den Großteil der Bestellungen der FFZ in Europa dar; im Jahr 2021 lag der Anteil der elektromotorisch-betriebenen FFZ bei 87,2 % [FEM-2019; FEM-2022]. Die Berufsgenossenschaft empfiehlt den Einsatz von Gabelstaplern mit VM in geschlossenen Räumen nur für intensive Anwendungen – mit hoher erforderlicher Tragkraft, bei häufigen Höhenunterschieden, bei weiten zurückzulegenden Strecken oder bei hohem Batterieverschleiß – sowie unter Einsatz von Rußfiltern bei Dieselfahrzeugen oder Katalysatoren bei Benzinfahrzeugen, so dass für den Arbeitnehmer keine gesundheitliche Gefährdung durch Abgasbestandteile besteht. [BGHM-2018, S. 11] Der Anteil der VM wird wegen der Abgasproblematik perspektivisch weiter zurückgehen. Die künftig, mit der Überarbeitung der Technischen Regel für Gefahrstoffe für Abgase von Dieselmotoren, der TRGS-554, geforderte Dokumentation, welche die Auswahl des am besten geeigneten Gerätes für den Indoor-Betrieb belegt, erschwert den Einsatz weiter. [Pol-2019]

Im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen aufgrund des hohen und weiterhin wachsenden Marktanteils die elektromotorisch angetriebenen FFZ sowie deren Energieversorgung über ESS für elektrische Energie: Batterien (PbB und LIB) und BzS.

2.2 Energieversorgung des elektromotorischen Antriebs

2.2.1 Energiespeichersysteme

Der *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW)* hat die folgende Definition für ‚Energiespeicher‘ erarbeitet²: Energiespeicher sind Systeme oder Anlagen, welche „Energie mit dem Ziel der elektrischen, chemischen, elektrochemischen, mechanischen oder thermischen Speicherung aufnehmen und einer zeitlich verzögerten Nutzung wieder zur Verfügung stellen.“ [BDEW-2014]

Abbildung 2-3 zeigt schematisch die Definition des ESS mit den Prozessen der Einspeicherung (Laden), der Speicherung (Halten) und der Ausspeicherung (Entladen). Für die Durchführung dieser Prozesse sind neben der Speichereinheit noch Energiewandler, wie Leistungselektronik zur Ein-/Ausspeicherung, und Hilfsaggregate, wie Batteriemanagementsysteme (BMS), integriert. Deshalb wird ebenfalls der Begriff ‚Energiespeichersystem‘ verwendet. [Ste-2017, S. 26f.] Die einzuspeichernde Energie E_{ein} ist durch diese Prozesse und deren Effizienz größer als die ausspeicherbare Energie E_{aus} . Grund hierfür sind die vorrangig thermischen Verluste, dargestellt als die Wirkungsgrade mit η_{ein} als Einspeicherwirkungsgrad, η_{sp} als Speicherwirkungsgrad und η_{aus} als Ausspeicherwirkungsgrad. Das Produkt der drei prozessualen Wirkungsgrade liefert den Gesamtwirkungsgrad des ESS und stellt das Verhältnis von E_{aus} zu E_{ein} dar. [Ste-2017, S. 38ff.]

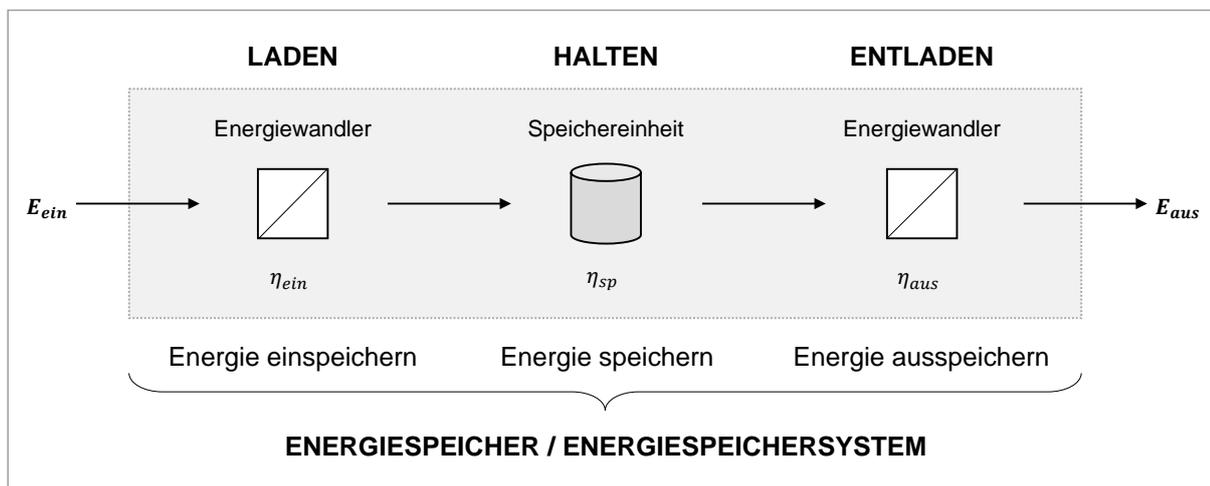


Abbildung 2-3: Definition Energiespeichersystem [Ste-2017, S. 27]

² Der Begriff ‚Stromspeicher‘ stellt eine Unterkategorie dar und wird vorrangig für den Einsatz von Energiespeichern im Stromversorgungssystem, mit Anbindung an das öffentliche Stromnetz, verwendet. Diese gewinnen insbesondere durch erneuerbare Energien an Wichtigkeit, sind für diese Arbeit aber nicht relevant. [BDEW-2014].

Primäre Energiespeicher können im Gegensatz zu sekundären Energiespeichern nur einmalig verwendet und nicht erneut geladen werden. Bei primären Energiespeichern handelt es sich vorrangig um Energieträger, welche die Energie speichern, wie bspw. Wasserstoff oder auch Primärbatterien. Der Energieträger ist in der Speichereinheit des Energiespeichers enthalten. Sekundäre Energiespeicher sind wiederaufladbare Energiespeicher, wie Sekundärbatterien oder Kraftstofftanks. [Ste-2017, S. 27]

Die Sekundärbatterien weisen als elektrochemische Speichertechnologie bei FFZ den größten Marktanteil zur Energieversorgung bei elektrischen Antrieben auf [Hus-2013, S. 14]. Beim Einsatz in FFZ liegen die üblichen Batteriespannungen bei 24 V, 48 V und 80 V mit einer Kapazität bis 1000 Ah [Mar-2016, S. 106]. Für den EM umfasst das ESS-Angebot der meisten FFZ-Hersteller PbB, LIB und BzS [Bru-2020, S. 396]. BzS sind dabei eine Kombination aus Energiewandler und elektrochemischem Energiespeicher, da Wasserstoff als chemischer Energiespeicher dient und die zusätzlich im System integrierte Batterie den Antriebsstrang mit elektrischer Energie versorgt. Die elektrische Energie wird dann mithilfe der elektrischen Maschine in mechanische Energie gewandelt [Kam-2018, S. 310]. Dieses Prinzip der Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie für den Antrieb der FFZ lässt sich beim Bremsvorgang umkehren: die Bremsenergie bei der elektrischen Bremsung wird in elektrische Energie umgewandelt (Rekuperation) und in die Batterie zurückgespeist, womit deren Einsatzzeit erhöht wird. [Bru-2020, S. 396; Kam-2018, S. 310]

In dieser Dissertation werden die Begriffe Energiespeichersystem, Energiesystem, Energiespeichertechnologie und Energiespeicher als Synonyme für die Stromversorgungseinheit des Elektromotors im FFZ verwendet. Der Begriff Batterie wird als übergeordneter Begriff für die einsetzbaren Sekundärbatterien verwendet.

2.2.2 Verwendung von Batterien

Batterien zählen zu den elektrochemischen Speichern. Die wiederaufladbaren Sekundärbatterien bestehen aus elektrochemischen Zellen, in denen reversible Reaktionen stattfinden. Jede Einzelzelle enthält zwei Elektroden, Kathode und Anode, einen leitfähigen Elektrolyten für den Transport der elektrischen Ladung und einen Separator. Die Elektroden dienen als Energiespeicher und Energiewandler. Beim Laden wandelt die Zelle die elektrische Energie in chemisches Potenzial um und die Energie wird in chemischen Verbindungen der Elektroden gespeichert. Dies kann beim Entladen, wiederum nach Umwandlung, als Entladestrom abgegeben werden. Abbildung 2-4 zeigt das Prinzip der Batteriezelle. Die in FFZ eingesetzten Batteriesysteme bestehen aus Batteriepacks, also mehreren geschalteten Einzelzellen, mechanischen sowie elektronischen Komponenten. [Wie-2015, S. 157f.; Ste-2017, S. 37]

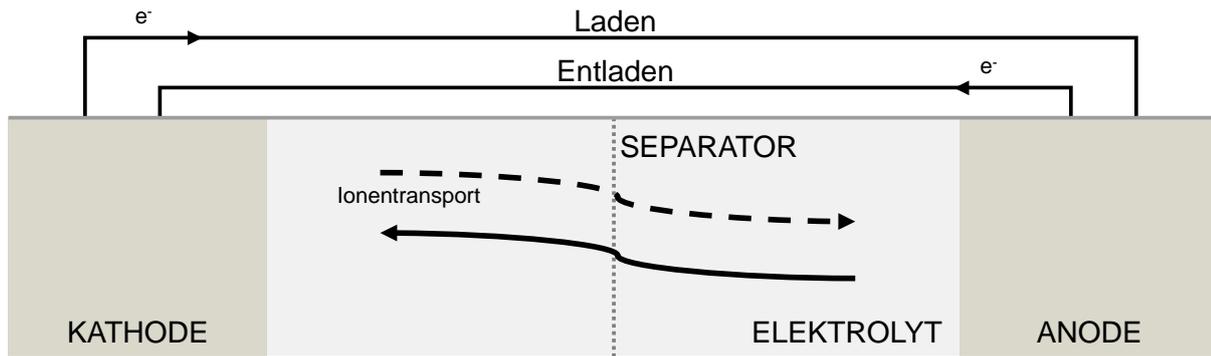


Abbildung 2-4: Prinzip der Sekundärbatteriezellen in Anlehnung an [Wie-2015, S. 159ff.]

Die Speicherung in den einzelnen Batteriezellen erfolgt chemisch in Form von Elektronen, welche bei den Reaktionen zwischen Anode und Kathode fließen. Die Anzahl der Zellen und genutzten Elemente liefert daher Informationen über den Energiegehalt und die Energiedichte. Eine Erhöhung der Kapazität ist durch Erhöhung der Zellanzahl in Batteriepacks möglich. Dies geht gleichzeitig mit einer höheren Masse einher, die das FFZ befördern muss. Hierdurch ist die Energiedichte der Batteriesysteme geringer als die der BzS oder der ESS bei VM. [Ber-2015b, S. 61ff.; Adl-2019, S. 53] Als relative Kenngröße bezeichnet die Energiedichte den Bezug der gespeicherten Energiemenge auf Volumen (volumetrische Energiedichte) oder Masse (gravimetrische Energiedichte) des Energiespeichers. Die volumetrische Energiedichte beträgt bei den elektrochemischen Speichern bis zu 70 kWh/m^3 für PbB und 300 kWh/m^3 für LIB. [Ste-2017, S. 41] Hinsichtlich der gravimetrischen Energiedichte erreichen LIB in mobilen Anwendungen 200 Wh/kg , bei PbB liegt der Wert bei 40 Wh/kg , wobei der Wert auf Modulebene geringer ausfällt. [Bra-2013, S. 383; Thi-2020, S. 16]

Abhängig von der Verschaltung im Batteriepack wird je nach Batterietyp ein komplexes System zum Zellmanagement benötigt. Dieses BMS sorgt durch eine kontinuierliche Überwachung und Regulierung für einen zuverlässigen, korrekten und sicheren Einsatz; es steuert u. a. den Entladungsgrad (DOD, auf Englisch ‚Depth Of Discharge‘) der einzelnen Zellen und beugt so einer Tiefenentladung vor. Bei LIB ist für den zuverlässigen Betrieb stets ein BMS erforderlich; bei PbB wird dies nicht oder lediglich vereinfacht eingesetzt. Verschiedene Ladungszustände der Zellen können dort durch Ausgleichsladen beseitigt werden; durch Nebenreaktionen sind bei PbB außerdem sehr hohe Spannungswerte durch Überladen, wie sie bei LIB auftreten können, ausgeschlossen. [Köh-2013, S. 96ff.; VDMA-2019, S. 6; Wip-2019, S. 31]

Das am weitesten verbreitete und langjährig eingesetzte ESS für den elektromotorischen Antrieb von FFZ sind PbB, wobei sich LIB seit mehreren Jahren ebenfalls auf dem Markt etablieren. PbB sind trotz stetiger Weiterentwicklungen den jüngeren LIB

in wesentlichen Kriterien, wie Leistungsfähigkeit, Wirkungsgrad und Lebensdauer, unterlegen. [Eic-2019; VDMA-2019, S. 5]

PbB sind unter den heute noch verwendeten Systemen die am längsten am Markt angebotenen Sekundärbatterien; durch geringe Herstellkosten, eine für den Anwender akzeptable Energiedichte, langjährige Erfahrungen im Betrieb sowie eine gute Wiederverwertbarkeit der Materialien bilden die Batterien einen wesentlichen Anteil des Batteriemarktes ab [Möl-2013, S. 5; Wie-2015, S. 159]. Sie sind sicher im Betrieb und wartungsarm; sie sind allerdings nicht wartungsfrei und weisen einige Herausforderungen auf. Die Zellen sind temperaturempfindlich und haben eine geringe Verträglichkeit für Tiefentladung [Wie-2015, S. 159f.]. Beim Ladevorgang entstehen Gase, die bei mangelnder Luftwechselrate eine explosive Mischung erzeugen können und daher besondere Sicherheitsanforderungen an die Lüftung der Räume stellen [DIN EN-50272-3, S. 10]. Außerdem verlieren die Zellen beim Laden Wasser, weshalb für die Erhaltung der Batterie und deren Lebensdauer regelmäßig zum Ausgleich gereinigtes Wasser nachgefüllt werden muss. Darüber hinaus empfiehlt es sich, alterungsfördernde Zustände zu reduzieren bspw. durch die Überwachung des Säurestands, die Vermeidung von Tiefentladung, die Vermeidung von Standzeiten bei niedrigem Ladezustand, das Anpassen der Ladespannung an die Temperatur und das Vorbeugen falscher Entladung. [Mar-2016, S. 108f.; Ste-2017, S. 264] Fällt die Zellspannung unter einen Mindestwert bei hohem DOD, so wird die Korrosion und Ablösung von Material an den Elektroden der Zelle verstärkt, was zu einer geringeren Lebensdauer führt. Diese ist bei diesen Zelltypen sehr begrenzt und liegt bei 500 bis 2000 Ladezyklen. Bei der Lebensdauer der Batterie spielt somit der Zeitfaktor, also die Lebensdauer unter Einfluss der Umgebungstemperatur, eine untergeordnete Rolle, höheren Einfluss haben die Belastung und der Betrieb, also die Zyklenfestigkeit. Die Alterung der Batterie wird über die entnehmbare Ladung ausgedrückt. Die Lebensdauer ist nach *DIN 43539-4* bzw. *DIN EN 60896-11* erreicht, sobald die Speicherfähigkeit der Zellen unter einen Wert von 80 % der Nennkapazität fällt. Der Wirkungsgrad der Zellen, also der Anteil der ausgespeicherten Energie an der eingespeicherten Energie, ist mit Werten zwischen 75 und 80 % mit denen anderer ESS vergleichbar. [Kom-2021, S. 162; Ste-2017, S. 262]

LIB haben in den vergangenen Jahren an Wichtigkeit gewonnen und konnten sich in vielen Anwendungen durchsetzen [Kom-2021, S. 159]. Das Preisniveau der Technologie liegt aufgrund der komplexeren Komponenten über den PbB, es besteht aber ein Trend in der Preisentwicklung, der sich kontinuierlich dem Preis der PbB annähert [Hor-2020; Thi-2020, S. 15]. Die Zellen selbst unterscheiden sich wesentlich von den PbB: sie sind leistungsfähiger und weisen höhere Energiedichten sowie zusätzliche Schnell- und Zwischenladefähigkeit auf [VDMA-2019, S. 8]. Beim Laden werden keine

Gase frei, weshalb keine Anforderungen an Luftwechsel in Laderäumen bestehen [VDMA-2019, S. 16]. Neben den Zellen besteht das Batteriesystem aus weiteren mechanischen, elektrischen und elektronischen Komponenten, wie dem BMS, das außerdem über ein Bus-Systeme mit dem Fahrzeug kommuniziert. Durch das integrierte BMS kann auf alterungsfördernde Zustände reagiert werden und ein sicherer und zuverlässiger Betrieb der Zellen gesteuert werden. Dadurch ist der Wartungsaufwand sehr gering. Auch LIB sind temperaturempfindlich, weshalb das BMS neben dem elektrischen Management insbesondere auch das thermische Management als Aufgabe hat. Die Alterung wird, wie bei PbB, durch die Temperatur beeinflusst, weshalb ein festgelegter Temperaturbereich zu halten ist. Weiterhin haben der Betrieb, Lade-/Entladerate sowie DOD-Auswirkungen auf die Lebensdauer. Das Lebensende ist bei 80 % der Anfangskapazität erreicht. Der Wirkungsgrad liegt momentan bereits zwischen 80 und 95 % und damit über dem der PbB; bei einer Lebensdauer von ca. 5000 Zyklen. In den kommenden Jahren wird mit einer weiteren Verbesserung der Werte gerechnet. [Köh-2013, S. 95ff.; Wie-2015, S. 301; Kom-2021, S. 162; BVES-2016]

Die erwähnte höhere Masse der PbB kann beim Einsatz in manchen FFZ vorteilhaft sein; bei Staplern dient die Masse als Gegengewicht. [Mar-2016, S. 103ff.] Unabhängig davon ist der Einsatz als Antriebsbatterien mit den zugehörigen Maßnahmen umfassend normativ geregelt, bspw. die Abmessungen des Batterietrags, die Spannungsbereiche, die Fixierung im FFZ, Schock-/Vibrationsanforderungen oder die Lastzyklen [DIN EN ISO-3691-1; DIN-43535; DIN-43531; DIN-43536; ISO-5053-1; VDI-3586; VDI-2198]. Diese Regulierungen haben sich etabliert und in der Anwendung gefestigt, da PbB bereits seit vielen Jahren in FFZ eingesetzt werden. Viele der Vorgaben können auf die Verwendung von LIB übertragen werden. Durch die Fortschritte bei LIB in den vergangenen Jahren und deren höherer Energiedichte kann im gleichen Trog eine Batterie mit höherer Kapazität integriert werden. Außerdem können durch den sauberen Betrieb und die Verfügbarkeit neue, hochsensible Bereiche in der Lebensmittel- oder Pharmaindustrie bedient werden. [Thi-2020, S. 17f.; Lin-2022c] PbB sind bereits für den Einsatzbereich im FFZ optimiert und werden in Serienfertigung hergestellt. Dadurch sind die Beschaffungskosten geringer als bei neueren Technologien, jedoch sind keine weiteren Innovationssprünge und Preisreduktionen zu erwarten. Bei LIB findet hingegen weiterhin viel Forschung für die Anwendung in Fahrzeugen, vorrangig Automobilen, statt und es besteht ein erhebliches Innovationspotenzial in Bezug auf Energiedichten und den Ersatz kritischer Rohstoffe. [Sau-2009, S. 2; Deu-2020, S. 5f.; Hor-2020]

2.2.3 Ladeinfrastruktur zur Energiebereitstellung

Die Versorgung der Batterien erfolgt über elektrische Energie, die über das Stromnetz bezogen werden kann. Wegen geringer Transportverluste und der einfachen Handhabbarkeit ist Strom anderen Energieträgern überlegen [Blu-2020, S. 96]. Den Übergabepunkt der elektrischen Energie an die Batterien stellen Ladegeräte dar. Für die Einspeisung in die Batteriezellen sollten diese ideal auf die Batterien abgestimmt sein. Bei PbB wie auch LIB ist die Auswahl der Ladegeräte entscheidend für die Lebensdauer der Systeme, die Ladezeiten sowie für die Energie- und somit Betriebskosten eines FFZ. [Mar-2016, S. 109; Fro-2011, S. 4] Bei PbB können unterschiedliche Ladetechnologien eingesetzt werden: die herkömmliche und robuste 50 Hertz-Transformorteknik ohne Regelung der Ladekennlinie anhand des Ladezustands, neuere Hochfrequenz (HF)-Ladegeräte mit höherer Lebensdauer und Energieeffizienz, also höherem Wirkungsgrad, durch Regelung der Ladekennlinie oder die Kombination der beiden Technologien in der Active Inverter Technologie [Fro-2011, S. 10]. Für das Laden der LIB können HF-Ladegeräte mit einer Schnittstelle zum BMS für die Überwachung und Steuerung des Ladevorgangs eingesetzt werden [VDMA-2019, S. 8].

Beim Ladevorgang selbst gibt es Energieverluste, die Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad (s. 2.2.1) haben. Bei PbB wird aufgrund auftretender Spannungsabfälle mit höherer Spannung geladen als entladen werden kann. Die geladene Energiemenge muss zudem für die chemischen Reaktionen größer als die entnommene Menge sein, was in einem höheren vorzusehenden Ladefaktor resultiert, also dem erforderlichen Ladestrom für die Entnahme einer festgelegten Energiemenge. Durch diese Effekte verringert sich der Gesamtwirkungsgrad. [Ste-2017, S. 250-258] PbB erreichen einen deutlich geringeren Systemwirkungsgrad von 60 % in der Kombination von Ladetechnik und ESS. [Pro-2018, S. 47] Das Laden von LIB gestaltet sich durch deren Zellchemie, dafür festgelegte Spannungsbereiche sowie intelligente Ladetechnologie mit kontinuierlichem Datenaustausch effizienter [Ste-2017, S. 299; VDMA-2019, S. 16f.]. Diese können mit einem Systemwirkungsgrad von bis zu 87 % einen höheren Anteil der zugeführten Energie verwenden. [Pro-2018, S. 47]

Die Schnittstelle zwischen Ladegerät und Batterie sind entweder Ladkontakte mit Kabelverbindungen oder induktive Ladetechnologien ohne manuelles Eingreifen, was insbesondere für automatisierte FFZ, sogenannte fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF), und deren Verfügbarkeiten vorteilhaft ist [Pol-2021, S. 6].

Je nach Einsatz und Auslastung der FFZ sowie Schichtbetrieb kann zwischen den Ladeformen Ladebetrieb und Wechselbetrieb gewählt werden. Der Ladebetrieb findet in einer Ladestation statt, wobei das ESS stets im FFZ verbleibt. Die Batterie wird lediglich an das Ladegerät angesteckt. Dies bietet sich besonders im Einschichtbetrieb an

oder im Mehrschichtbetrieb bei geringer Belastung. Das Laden außerhalb des FFZ empfiehlt sich im intensiven Mehrschichtbetrieb. Beim Wechselbetrieb, der vor allem bei PbB Anwendung findet, stehen geladene Austauschbatterien in einer Wechselstation bereit. Der im FFZ eingesetzte ESS wird an der Wechselstation entnommen und durch einen vollgeladenen ausgetauscht. Für den Wechsel der Batteriesysteme ist – neben ausreichend Platz – Technik, Zeitverlust und Personal einzuplanen. In den Wechselbereichen werden für die großen Batterien (80 V bzw. 48 V) Hebezeuge benötigt; für die kleineren 24 V-Systeme Verschiebewagen. Die Handhabung der schweren Batteriesysteme gestaltet sich durch die physische Belastung und den möglichen Kontakt mit Gefahrstoffen aus ergonomischer Sicht nachteilig. [Ger-2005, S. 8; Mar-2016, S. 109]

Sofern im Ladebetrieb gearbeitet wird, ist die Ladedauer ausschlaggebend. Während des Ladeprozesses ist einerseits das FFZ nicht verfügbar und andererseits die Ladestation belegt. [Ste-2017, S. 257] Die Auswirkungen sind insbesondere bei PbB relevant, da ein Ladezyklus bis zu zwölf Stunden dauern kann. Schnelles Laden ist aufgrund der Zellchemie nicht möglich; Zwischenladungen von einer Mindestdauer von 30 Minuten können bei Batterien mit Elektrolytumwälzung durchgeführt werden. [Mar-2016, S. 107ff.] LIB können durch Zwischenladungen mit höheren Strömen in Pausenzeiten lange Ausfallzeiten überbrücken. Durch dieses Vorgehen sind die Ladezeiten insgesamt kürzer. [VDMA-2019, S. 16]

Abhängig von der Handhabung der Batterieladung, mit Ladebetrieb oder Wechselbetrieb, sind die Ladeplätze zu gestalten. Bei der Wahl des Ortes sind die grundlegenden Sicherheitsanforderungen zu beachten. Eine Gefährdungsbeurteilung hilft bei der Entscheidung für die Positionierung der Ladeplätze und die Aufteilung in zentrale und dezentrale Ladestationen. Batterieladeräume sind separate, zentrale Räume, in denen die Batterien zum Laden aufgestellt werden und in denen der Wechsel mit der erforderlichen Technik durch eingewiesenes Personal erfolgt. Kleinere Batterieladestationen können dezentral zum Laden in Prozessnähe eingerichtet werden, ebenso wie Einzelladeplätze. [Gru-2022] Wie zuvor erwähnt, entstehen beim Laden der PbB Gase. Der Ladevorgang darf daher nur in abgetrennten Räumen erfolgen. Innerhalb der Räume sind einerseits Mindestabstände der Ladestationen mit der Peripherie vorgegeben und andererseits die Anforderung an die Luftwechselrate. [DIN EN-50272-3, S. 10] Aus Gründen des Brandschutzes gelten die Bestimmungen hinsichtlich der Mindestabstände ebenfalls für Ladegeräte von LIB. [VDMA-2019, S. 16] Flexible Erweiterungen der Flotten sind durch die räumlich begrenzte Anzahl von Ladeplätzen im Raum bei PbB mit hohem Aufwand möglich, wobei für LIB zusätzliche Ladestationen, auch in Prozessnähe, aufgebaut werden können. [Kom-2021, S. 162; Lin-2022c]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beim Einsatz der Batterien in FFZ die wesentlichen Vorteile des batteriebetriebenen Elektroantriebs im abgasfreien Einsatz liegen. Während des aktiven Betriebs sind die FFZ unabhängig von Stromnetz, da diese die Energie aus den eingebauten Speichern beziehen, lediglich beim Ladevorgang ist eine Abhängigkeit durch das Ladegerät am Stromnetz vorhanden. Beide ESS sind verschleißarm und benötigen wenig bis kaum Wartung. Außerdem weisen sie eine hohe Lebensdauer auf und sind aufgrund der Technologiereife und den damit verbundenen Herstellungskosten wirtschaftlich einsetzbar, speziell bei Batterieladung mit kostengünstigerem Nachtstrom [Mar-2016, S. 109]. Die hohe Masse der Batterie dient bei Staplern darüber hinaus als Gegengewicht. Als Herausforderungen zeigen sich, neben den Ladevorschriften und Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der Laderäume, die begrenzte Kapazität der Zellen, die Gefahr der Tiefentladung mit abfallendem Leistungsvermögen über die Nutzungsdauer, der im Vergleich zu ESS der VM geringe Systemwirkungsgrad und der damit verbundene hohe Strombedarf sowie die prozessualen Verlustzeiten durch Batterieladung/-wechsel.

2.2.4 Einsatz von Brennstoffzellensystemen

BzS sind aktuell die am wenigsten verbreitete Technologie der betrachteten ESS. In Europa sind weniger als 1000 FFZ mit BzS im Einsatz; die meisten hiervon finden in staatlich geförderten Projekten Anwendung. Die Technologie weist viele Vorteile auf, die an der Stelle ansetzen, an der Batterien sich als nachteilig erweisen. Die Bundesregierung förderte daher im Rahmen des ‚Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie‘ Projekte zur Forschung und Entwicklung sowie die Marktaktivierung. [BMDV-2020; Man-2022, S. 24f.]

Die Brennstoffzelle im BzS ist kein Energiespeicher, sondern ein Energiewandler, der chemische Reaktionsenergie des Brennstoffes in elektrische Energie umwandelt. Für die Umwandlung werden kontinuierlich Reaktionskomponenten zugeführt und das Endprodukt abgeführt. Mögliche Reaktionsmittel sind – abhängig vom Brennstoffzellentyp – Wasserstoff, Methanol oder Erdgas³. Als Oxidationsmittel wird Sauerstoff, meist aus der Umgebungsluft, verwendet. Im Gegensatz zur Batterie werden die Reaktanten von außerhalb der Zelle zugeführt. [Nor-2013, S. 326ff.; Ste-2017, S. 242; Kle-2018, S. 141f.] Abbildung 2-5 zeigt das Funktionsprinzip einer Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle am Beispiel der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC, auf Englisch ‚Proton Exchange Membrane Fuel Cell‘). Der Wasserstoff wird über den Strömungskanal zugeführt. Er diffundiert über die Gasdiffusionsschicht zur

³ Für mobile Anwendungen in FFZ kommen grundsätzlich die Brennstoffe Wasserstoff und Methanol in Frage. Wegen der Giftigkeit von Methanol und damit verbundenen möglichen Umweltschäden bei unsachgemäßer Verwendung findet dieses jedoch weniger Anwendung. [Rei-2011, S. 115].

Anode, dem Minuspol. An der Anode wird er mithilfe des Katalysators mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft oxidiert. Es werden zwei Elektronen (e^-) abgegeben, die – aufgrund der für Elektronen isolierenden Membran über den Stromkreis und den angeschlossenen Verbraucher, an dem dadurch elektrische Arbeit verrichtet wird – zur Kathode fließen. Der Elektrolyt ist allerdings leitfähig für Protonen (H^+). Der Sauerstoff wird über Strömungskanal und Gasdiffusionsschicht an die Kathode geführt. Dort erfolgt die Reduktion durch Aufnahme der Elektronen und die Verbindung mit zwei Protonen zu einem Wassermolekül, dem Reaktionswasser. [Kle-2018, S. 145f.]

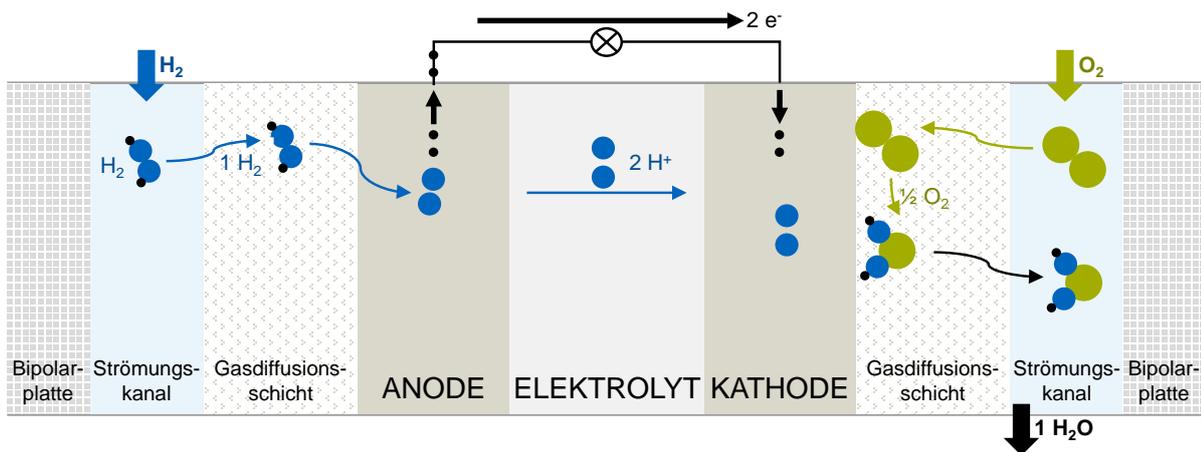


Abbildung 2-5: Funktionsprinzip der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle in Anlehnung an [Kle-2018, S. 145]

Die existierenden Brennstoffzellentypen finden anhand ihrer Merkmale unterschiedliche Anwendung. Für den Brennstoff Wasserstoff und den Einsatz in mobilen Anwendungen, wie dem FFZ oder Kraftfahrzeugen, eignet sich die bereits in Abbildung 2-5 dargestellte PEMFC. Sie zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau, ein flexibles Verhalten im Lastwechsel, mit geringeren Temperaturempfindlichkeiten verbundene gute Kaltstarteigenschaften und eine hohe Leistungsdichte aus [Rei-2013, S. 235f.]. Da jede Einzelzelle nur eine geringe Spannung erzeugen kann, werden bei BzS, ähnlich den Batterien, mehrere Zellen zusammengeschaltet, um hinreichend Spannung für den Antrieb zu erzeugen. Diese Verknüpfung wird als Brennstoffzellenstack bezeichnet. [Leh-2014, S. 32] Die in FFZ eingesetzten BzS sind Hybrid-Systeme, bei denen die energieerzeugende Einheit, der Stack, die integrierte Batterie lädt. Der Antriebsstrang erhält die erforderliche elektrische Energie aus der Batterie. Hierdurch arbeiten die Brennstoffzellen im Stack in einem optimierten Betriebspunkt und Leistungsspitzen werden durch die Batterie abgefangen. [Gün-2015a, S. 19] Diese dient als Pufferbatterie und speichert zusätzlich die rekuperierte Bremsenergie [Alt-2014, S. 46].

Abbildung 2-6 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen hybriden H₂-BzS für die Anwendung im FFZ. Die gestrichelte Linie stellt das Brennstoffzellen-ESS einschließlich der Subsysteme dar, die in Kästchen mit durchgezogener Linie eingezeichnet sind. Die wesentlichen Komponenten des Systems sind der Wasserstofftank zur Brennstofflagerung, der Brennstoffzellen-Stack, das Steuerungssystem und die Batterie zur Energiespeicherung. Neben der Brennstoffversorgungseinheit mit Tank, Druckregler, Wasseraufbereitung und -rückhaltung, Rezirkulationseinheit und Ventilen gibt es mit der Belüftungsanlage eine Luftversorgungseinheit mit einer Befeuchtereinheit und einem Luftverdichter. [Kur-2016, S. 6ff.; Töp-2017, S. 77ff.; DIN EN-62282-4-102]

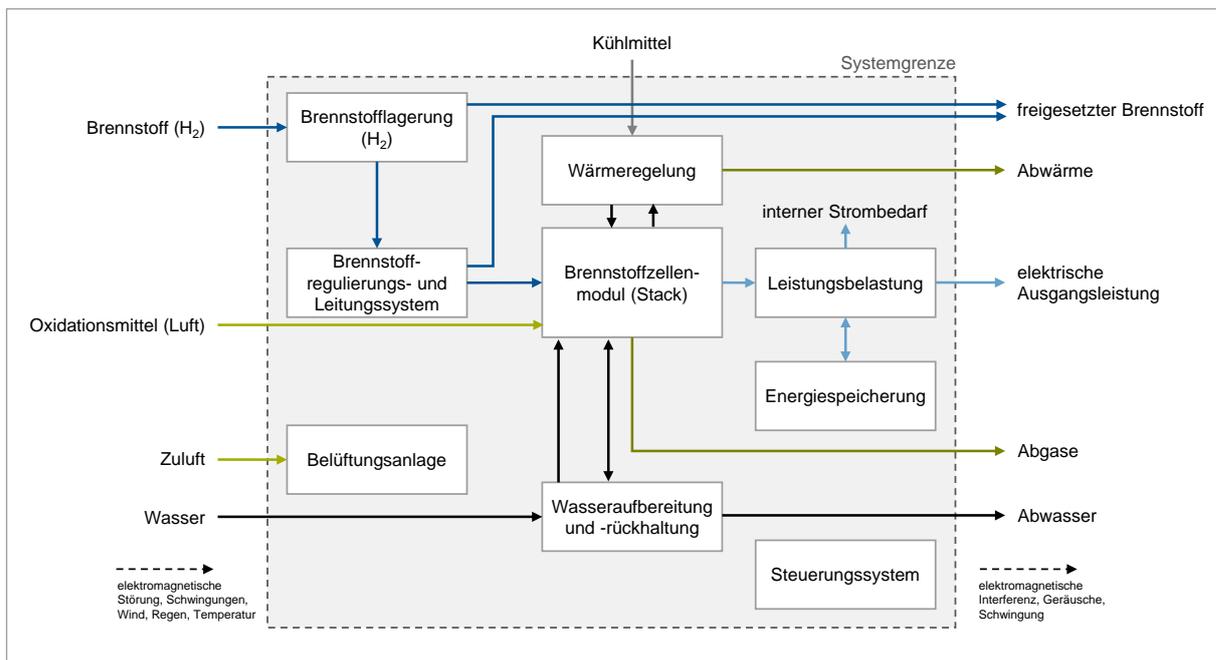


Abbildung 2-6: Brennstoffzellen-Energiesystem für Flurförderzeuge [DIN EN-62282-4-102]

Die Lebensdauer der Brennstoffzellen in der FFZ-Anwendung konnte bisher noch nicht validiert werden [Man-2022, S. 45]. Generell ist die Alterung der Zellen, die sogenannte Degradation, von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Es kann zwischen herstellerbedingten, wie die Abstimmung der Komponenten aufeinander, und anwenderbedingten Faktoren, wie dem zu fahrenden Lastprofil, unterschieden werden. Als einer der wesentlichen Faktoren der Alterung wird die korrosionsbedingte Elektrodendegradation gesehen. [Kle-2018, S. 153; Man-2022, S. 46f.] Die integrierte Batterie mit BMS kann zu einer Verlängerung der Lebensdauer beitragen, da der Betriebspunkt und somit der Systemwirkungsgrad der Brennstoffzellen dadurch verbessert werden kann. [Her-2010, S. 23]

Die Leistung des BzS ist über die Anzahl und Bauweise der Zellen im Stack definiert, die Kapazität über die Größe des Wasserstofftanks. Hierdurch können höhere Energiedichten als bei Batterien erreicht werden. Die gravimetrische Energiedichte von Wasserstoff als Betriebsmittel kann über den spezifischen Heizwert $H_{i,Wasserstoff}$ definiert werden. Der Heizwert stellt die bei vollständiger Verbrennung maximal freiwerdende Wärmeenergie eines Stoffes bezogen auf die Masse des Brennstoffs dar, bei der der im Abgas enthaltene Wasserdampf noch nicht kondensiert [Wat-2019, S. 182]. Dieser liegt im gasförmigen Zustand bei 33,33 kWh/kg. Während dieser Wert im Vergleich zu anderen Brennstoffen bei Wasserstoff hoch ist, liegt der volumetrische Energiedichte mit 3 kWh/m³ deutlich darunter. Dem kann durch Speicherung unter Druck entgegengesteuert werden. Die Erhöhung des Drucks fordert allerdings gleichzeitig die Verwendung von stabileren und somit schwereren Tanks. Für FFZ mit einem Druck von 350 bar können Tanktypen des Typs III aus Metall mit zusätzlichem Verbundmaterial oder des Typs IV aus verstärktem Kunststoff eingesetzt werden. Dies macht deutlich, dass in der Entwicklung von BzS sowohl gravimetrische als auch volumetrische Energiedichte zu berücksichtigen sind. [Töp-2017, S. 5/88f.; Leh-2014, S. 34]

Der elektrische Wirkungsgrad von PEMFC kann Werte von 50 % bis zu 70 % erreichen. Allerdings wird in hybriden Systemen die Energie mehrfach gewandelt und gespeichert, wobei jeder Prozessschritt Wirkungsgradverluste bedeutet. Zusätzlich reduziert die für die Systemkomponenten erforderliche elektrische Leistung den Wirkungsgrad weiter. Nichtsdestotrotz können Wirkungsgrade von bis zu 50 % im BzS-Elektroantrieb erreicht werden. [Win-2019, S. 102ff.; Leh-2014, S. 36f.; Hus-2013, S. 8]

Bei leerem Tank werden BzS an der Tankstelle mit Wasserstoff betankt, hierbei wird bei vielen Zelltypen gleichzeitig das entstehende Reaktionswasser abgepumpt. [Gün-2015a, S. 23] Der Vorgang ist einfach, sicher, ergonomisch und mit geringer physischer Belastung [Gün-2015a, S. 80ff.]. Die Dauer des Betankungsvorgangs ist abhängig vom BzS und dem gewählten Tankprotokoll, also dem Druck- und Temperaturverlauf während des Tankvorgangs, der Vorgang dauert aber nur wenige Minuten [Gün-2015c, S. 20]. Durch das schnelle Wiedererlangen der Leistungsfähigkeit können BzS bei sehr arbeitsintensiven Anwendungen und im Mehrschichtbetrieb eingesetzt werden. Da sie weder beim Betrieb noch beim Tanken ausgasen, können sie in vielen Einsatzbereichen eingesetzt werden. Beim Aufbau der Tankstelle sind allerdings aufgrund des vergleichsweise großen Zündbereichs bei Wasserstoff Sicherheitsvorkehrungen hinsichtlich des Explosionsschutzes zu treffen. [Lin-2022d; Gün-2015a, S. 149]

Beim Einbau des Systems in das FFZ sind die Anforderungen des Anwendungsfalls zu berücksichtigen. Falls die schwerere Batterie bspw. als Gegengewicht dient, müssen eventuelle Zusatzgewichte verbaut werden [Gün-2015a, S. 162]. Für den Einsatz

in FFZ profitiert das BzS von den bestehenden Regelungen zu Batterien; speziell für FFZ wurden bereits erste Normen für BzS veröffentlicht. [DIN EN-62282-4-101; DIN EN-62282-4-102] Insgesamt fehlt es bei der Technologie an weiterer Detaillierung sowie Standardisierung, insbesondere der hardware- und softwareseitigen Schnittstellen [Man-2022]. Für die Systeme besteht weiteres Forschungspotenzial; die Komplexität in der Abstimmung der Komponenten und des Energiemanagements auf den spezifischen Anwendungsfall weist Möglichkeiten zur Optimierung auf. Dies hat Einfluss auf die Lebensdauer der Zellen. [Man-2022, S. 43f.] Derzeit forschen viele Institute und Unternehmen an wasserstoffführenden Komponenten, Brennstoffzellen und BzS als zukunftsweisender Technologie. Dies wird sich positiv auf die Anwendung von FFZ auswirken sowie auf die Preisentwicklung bei zunehmender Technologiereife und aufkommender Serienfertigung. [Kle-2018, S. 142]

2.2.5 Wasserstoffinfrastruktur zur Energiebereitstellung

Da Wasserstoff nur in chemisch gebundener Form in der Natur vorkommt, wird er für die energetische Nutzung erzeugt. Bekannte Verfahren hierfür sind die Dampfreformierung aus fossilen Energieträgern oder die Elektrolyse mit Wasser aus Strom [Ado-2017]. Eine Bereitstellungsart für die Verwendung in FFZ-Anwendungen ist die Einspeisung des Wasserstoffes in die lokale Infrastruktur am Bedarfsort durch den Gaslieferanten. Möglichkeiten für die Anlieferung sind LKW oder ein Pipelineanschluss; alternativ kann ein Elektrolyseur für die Wasserstoffproduktion vor Ort installiert werden [Ado-2017].

Die nachfolgende Abbildung 2-7 stellt schematisch den Pfad des erzeugten Wasserstoffes von der Bereitstellung über die Betankungsanlage bis zur Energieumwandlung im BzS dar. Es handelt sich um ein Mehr-Bank-System oder Kaskadensystem, bei dem der Wasserstoff innerhalb der Komponenten der Anlage in verschiedenen Druckniveaus gelagert wird [Alt-2014, S. 36]. Dies ist die gängigste Lösung für den Aufbau der Infrastruktur für Logistikanwendungen.

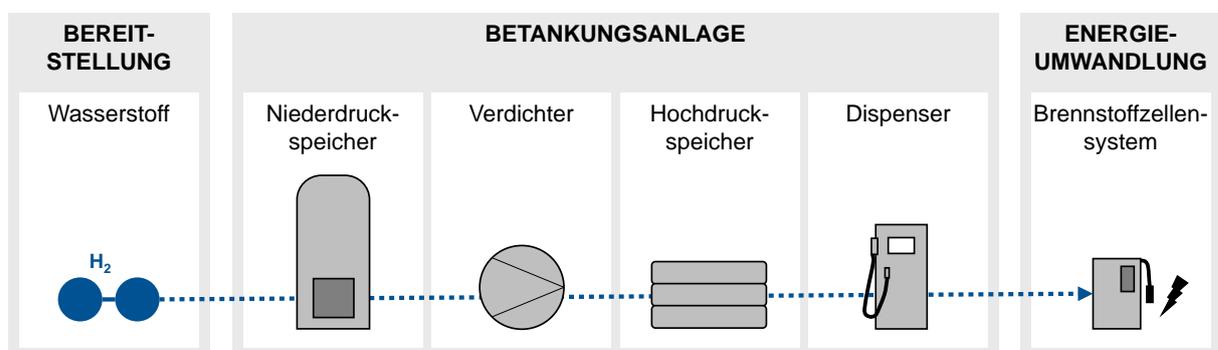


Abbildung 2-7:

Pfad des Wasserstoffes durch die Infrastruktur bei FFZ-Anwendungen
[Wag-2020, S. 719]

Die abgebildete Betankungsanlage besteht aus vier Komponenten. Nach Anlieferung am Bedarfsort wird der Wasserstoff durch Überströmen in den Niederdruckspeicher eingespeist. Dieser dient der Bevorratung und Zwischenlagerung auf dem Gelände. Die Speicherung erfolgt bspw. in 45-bar-Standtanks, horizontalen 200-bar-Flaschen oder Flaschenbündeln bei 300 bar [Lin-2018, S. 7]. Anschließend folgt der Verdichter. Da die Betankung am Dispenser eine Druckdifferenz zwischen Betankungsanlage und Wasserstofftank des BzS erfordert, ist der Verdichter für die Versorgung der BzS von zentraler Bedeutung. Bei den einsetzbaren Technologien handelt es sich um Kolbenkompressoren, Membrankompressoren, ionische oder hydraulische Kompressoren für gasförmigen Wasserstoff, der in FFZ Anwendung findet. [Lin-2018, S. 9; Alt-2014, S. 36; Gün-2015a, S. 39]

Die darauffolgende Zwischenlagerung findet in einem Hochdruckspeicher statt. Dieser speichert den komprimierten Wasserstoff (z. B. bei 400-450 bar) für die Betankung (z. B. mit 350 bar). Dieser kann beispielsweise als Bündel von standardisierten Druckflaschen in einen Container integriert werden [Alt-2014, S. 34]. Der Hochdruckspeicher kann wiederum als Kaskaden-System aufgebaut sein, wobei beim Tanken stets das Bündel mit dem nächst höheren Druckniveau aus dem Speicher verwendet wird [Alt-2014, S. 36].

Vom Hochdruckspeicher wird der Wasserstoff über Rohre zu den Tankstellen verteilt. Bisher umgesetzte Dispenser in der Logistik sind individuelle Lösungsansätze mit einer Füllkupplung zur Wasserstoffbetankung und einer Kupplung zur Absaugung des entstehenden Abwassers. Weitere integrierbare Sensorik oder Datenschnittstellen ermöglichen die Kommunikation mit anderen Komponenten oder die Überwachung und Optimierung der Tankvorgänge. Am Dispenser erfolgt die Betankung des im BzS integrierten Wasserstofftanks. Die Systeme wandeln die chemische Energie in elektrische Energie um; es entstehen Strom, Abwasser und Wärme. [Alt-2014, S. 36; Gün-2015a, S. 20ff.] Im Vergleich zur Batterieanwendung ist der Aufbau der Infrastruktur komplex und aufgrund der vielen Komponenten teuer. [Wag-2020, S. 722]

Der Tankvorgang am Dispenser dauert nur wenige Minuten, weshalb ein einzelner Dispenser ganze Flottenanwendungen versorgen kann. Durch geschickte Anordnung der Betankung auf den prozessual vorgesehenen Wegen erhöht sich die Verfügbarkeit der FFZ weiter. [Wag-2020, S. 719ff.] Der Platzbedarf der Infrastruktur innerhalb der Hallen ist sehr gering; neben der Tankstelle wird lediglich der Abstellplatz während des Tankprozesses durch das FFZ belegt. Durch das Verlagern von Komponenten auf das Hallendach kann der benötigte Platz weiter verringert werden: die Indoor-Komponenten können hängend an einer Säule installiert und über Rohrleitungen mit den Kompo-

nennten auf dem Dach verbunden werden. Durch die verbesserte Sicherheit mit geringerer Brandlast innerhalb der Halle⁴ bestehen keine Anforderungen an die Luftwechselrate. [Man-2022, S. 69f.] Darüber hinaus gelten die regulären sicherheitstechnischen Vorgaben für den Umgang mit brennbaren Gasen [Tüv-2022].

Beim Neuaufbau ist zudem die behördliche Genehmigung einzuholen; dies gilt ebenfalls für den Einsatz von PbB und LIB. Abbildung 2-8 liefert einen Überblick über die Schritte im Genehmigungsprozess für die H₂-Infrastruktur. Grundsätzlich bedarf es einer Baugenehmigung, einer Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) sowie einer Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). Für die Zusage sind weitere Dokumente notwendig, wie Brandschutzgutachten, Schallschutzgutachten, Explosionsschutz-Dokument, Gefährdungsbeurteilung und Gefahrenabwehrplan. Hinzu können interne Anforderungen kommen, bspw. von der Werksfeuerwehr, der Versicherung oder dem Betriebsrat. [Gün-2015c, S. 35ff.]

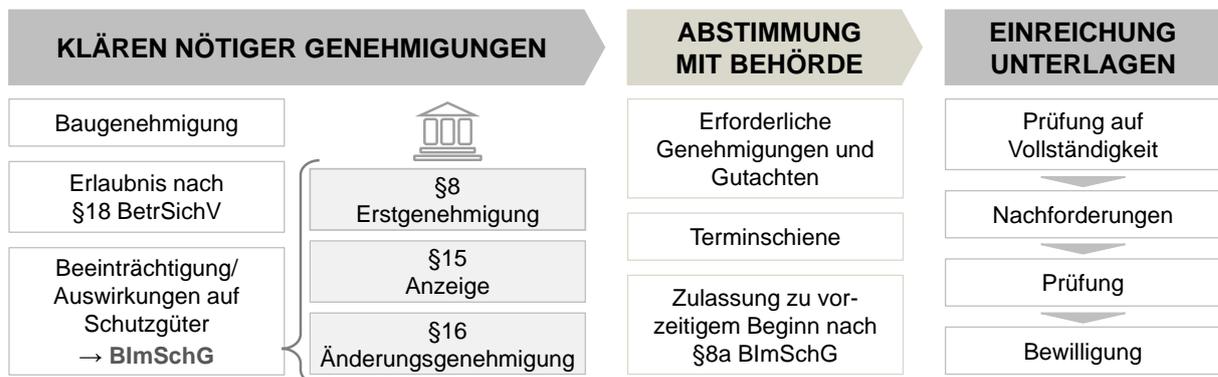


Abbildung 2-8: Vorgehen für die Genehmigung der Infrastruktur [Wag-2021; Gün-2015c]

Es zeigt sich, dass mit BzS einigen Nachteilen von PbB oder LIB begegnet werden kann: höhere Verfügbarkeit der FFZ durch geringere Prozesszeitverluste, ausbleibender Leistungsabfall und längere prognostizierte Lebensdauer, geringer Platzbedarf innerhalb der Werkshallen, sichere Handhabung und sauberer Betrieb sowie hohes Potenzial für weitere Optimierungen und Preisreduktionen. Da die Technologie in der FFZ-Anwendung allerdings relativ jung ist, gibt es einige Herausforderungen im Betrieb. Neben den hohen Herstell- und Installationskosten für die Infrastruktur ist die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der BzS im Einsatz nicht final validiert. Für eine höhere Technologiereife sind Standardisierungen und weitere Normierung erforderlich, um Preise zu reduzieren, Prozesse zu optimieren und bestehende Hürden abzubauen.

⁴ Wasserstoff befindet sich nur während des Betankungsvorgangs in Rohrleitungen innerhalb des Gebäudes; die Explosionsgefahr ist somit reduziert.

2.2.6 Unterschiede in der Energiekette und Kostenstruktur

Für die Erzeugung des Energieträgers, in dem Anwendungsfall der PbB und LIB Strom oder der BzS Wasserstoff, werden unterschiedliche Primärenergiequellen eingesetzt, siehe Abbildung 2-9. Bei der Primärenergie handelt es sich um Stoffe sowie natürliche Energiequellen, die technisch nicht in elektrische Energie umgewandelt wurden. Eine Unterscheidung hinsichtlich der Energiepfade ist die in endliche, konventionelle Primärenergiequellen, wie Erdöl, Erdgas, Kohle oder Uran, und erneuerbare, grüne Quellen, wie Biomasse, Wind, Wasser oder Sonne. Aus den Primärenergiequellen können über verschiedene Umwandlungsschritte mit entsprechenden Verlusten Energieträger erzeugt werden, wie die Kraftstoffe Benzin, Diesel und Gase für den VM oder Strom für den EM. Der Energiegehalt der Energieträger wird als Sekundärenergie bezeichnet. Diese wiederum stehen dem Endverbraucher bspw. für die Erzeugung von mechanischer Energie, der Endenergie, für den Antriebsstrang bereit. Durch den vermehrten Einsatz regenerativer Primärenergien kann einerseits die Abhängigkeit von endlichen Rohstoffen verringert werden und andererseits durch grüne Energiepfade eine Reduzierung der CO₂-Emissionen erfolgen. [Dop-2020, S. 318f.; Sau-2016, S. 3f.]

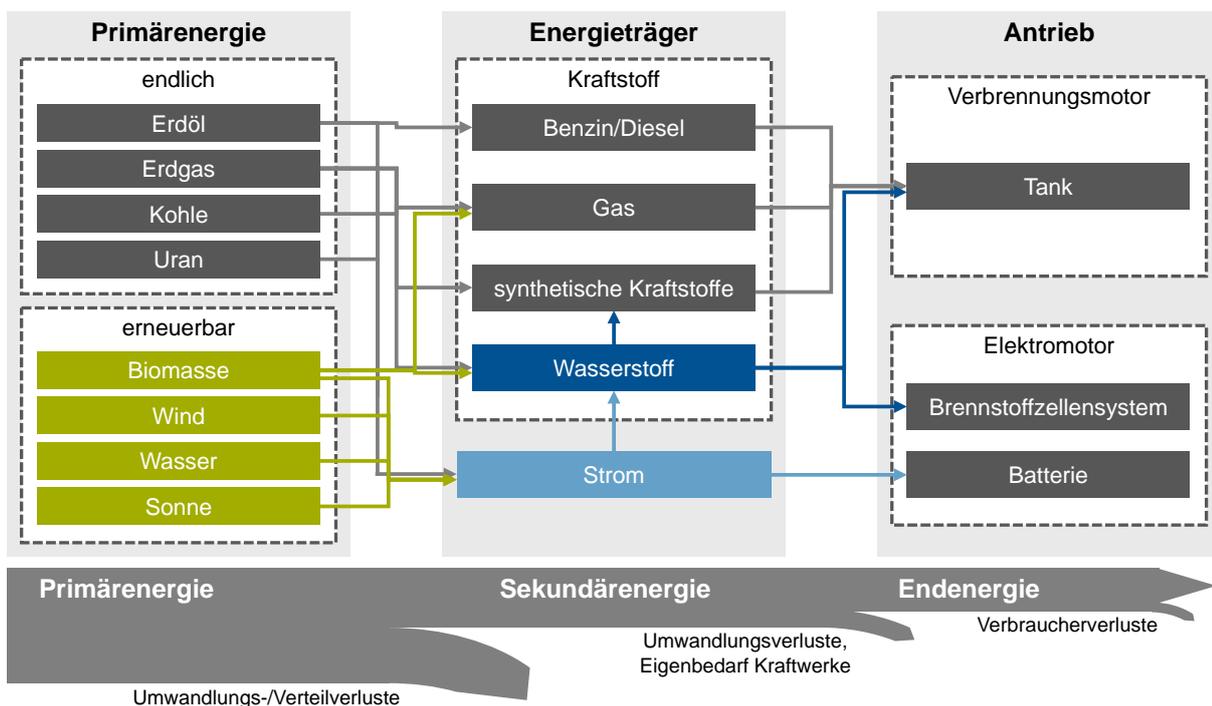


Abbildung 2-9: Energiekette von Primärenergie zu Endenergie in Anlehnung an [Dop-2020, S. 319; AGE-2021; Fac-2000]

Die Prozesskette von der Gewinnung der Primärenergie bis zur Bereitstellung des Energieträgers für die Umwandlung im Fahrzeug zur Erzeugung mechanischer Energie zum Antrieb wird bei Fahrzeugen als Well-to-Wheel-Energiekette bezeichnet, die

aus den Anteilen Well-to-Tank (Bereitstellung Energieträger) und Tank-to-Wheel (Nutzung Energieträger) besteht. [Dop-2020, S. 366] Entlang der Energiekette entstehen verschiedene Verluste und Emissionen, bspw. durch die Umwandlung, den Transport, den Energiebedarf der Kraftwerke oder Verluste durch den Verbraucher. Hybridfahrzeuge mit sowohl VM als auch EM sind in Abbildung 2-9 nicht separat ausgewiesen, da deren jeweilige Pfade bereits einzeln für die beiden Antriebe abgebildet sind.

Für die Pfade fallen unterschiedliche Kosten an. Während die BzS über den Energieträger Wasserstoff versorgt werden, der je kg Verbrauch zu einem vereinbarten Preis abgerechnet wird, erfolgt die Versorgung der Flotte bei PbB/LIB über das Stromnetz. Die Struktur der Energiekosten in Deutschland sieht mehrere Kostenbestandteile vor. Neben fixen, einmalig anfallenden Kosten für Netzanschluss und unternehmensinterne energietechnische Infrastruktur mit der Auslegung des Transformators nach der Scheinleistung entstehen periodische Kosten. Dabei handelt es sich um leistungsabhängige Kosten, also fixe Kosten in der Elektrizitätswirtschaft, arbeitsabhängige Energiekosten, also verbrauchsgebundene Kosten für die eingespeiste Energiemenge, sowie den kundenabhängigen Grundpreis, bspw. für Messungen. Bei Großkunden mit jährlich mehr als 100.000 kWh ist eine Leistungsmessung vorgeschrieben, die der Ermittlung des Lastprofils mithilfe viertelstündlich erhobener Zählerstände dient. Anhand der Werte für das Lastprofil und dem höchsten gemessenen Wert der Leistung werden die leistungsabhängigen Kosten festgelegt. Lastspitzen haben somit Auswirkungen hierauf und sollten vermieden werden. [Heu-2013, S. 664ff.; Hab-2018, S. 44; VDI-2067, S. 15] Eine Methode, Lastspitzen entgegenzuwirken ist das Peak Shaving; ein Lastmanagement, das hohe Strompreise an der Energiebörse bei hohen Netzauslastungen vermeiden soll [Zap-2017, S. 127]. Zudem kann ein Energie- und Lademanagement helfen, bspw. die Ladung der Batterien versetzt anzustoßen oder günstige Stromzeiten zu nutzen. Ein weiteres Werkzeug ist die H₂-Erzeugung vor Ort: durch die Nutzung überschüssigen Stroms kann Energie in Form von Wasserstoff gespeichert und als Energieträger eingesetzt oder rückverstromt werden [Töp-2017, S. 26].

2.3 Planung der Fördermittel in logistischen Systemen

2.3.1 Grundlagen der logistischen Planung

Nach *Klein und Scholl* stellt die Planung „Kernelement menschlichen Wirtschaftens“ [Kle-2011, S. 1] dar, mit wesentlicher Bedeutung im betriebswirtschaftlichen Arbeiten. Die Planung geht einher mit dem Vorhandensein verbesserungswürdiger oder inakzeptabler Zustände im Vergleich zu bestehenden Alternativen. Diese Abweichung vom aktuellen Zustand zum angestrebten Ziel wird als Problem bezeichnet. Da zur Lösung wesentliche Entscheidungen notwendig sind, handelt es sich um ein Entscheidungsproblem. Ziel der Planung ist es, durch die Identifikation geeigneter Methoden und die Verwendung von Modellen die Problemstellung zu lösen. [Kle-2011, S. 1]

Auch in der Logistik stellt die Planung ein zentrales Element dar. Die Ursachen für eine logistische Planung sind hierbei vielfältig, ebenso wie Umfang und Komplexität. Neben Neubauten oder Erweiterungen des Betriebes können auch unternehmensinterne oder -externe Gründe, wie Umweltauflagen, in einen Planungsfall resultieren. [VDI-5200-1, S. 4f.] Der Planungsprozess für die Fabrikplanung lässt sich nach *VDI 5200* in sieben Phasen einteilen: Zielfestlegung, Grundlagenermittlung, Konzeptplanung, Detailplanung, Realisierungsvorbereitung, Realisierungsüberwachung und Hochlaufbetreuung. [VDI-5200-1, S. 8ff.] Bei Anwendung auf die Logistik lassen sich diese in vier relevante Phasen zusammenfassen. Die erste Phase stellt die Grundlagenermittlung dar. Dabei steht die Untersuchung und Analyse des Materialflusses mit der Ermittlung der Planungsdaten für den Soll-Zustand im Vordergrund. Auf diese Phase folgt die Konzeptplanung, die sich wiederum in Strukturplanung und Systemplanung gliedert. In der Strukturplanung wird zunächst, unabhängig von der Technologie, festgelegt, wie Abläufe und Funktionseinheiten angeordnet werden und der Materialfluss aufgebaut ist. Die Systemplanung dient dann der Auswahl der geeigneten Materialflussmittel und der Dimensionierung der Materialflusssysteme. Neben einer Bewertung der technologischen Alternativen erfolgt außerdem noch die Erstellung eines Groblayouts. Die folgende dritte Phase – die Detailplanung – dient der weiteren Detaillierung der Struktur- und Systemplanung, um den Ausschreibungsprozess anzustoßen. Die Realisierung des Projektes stellt die vierte Planungsphase dar. [Fot-2022b, S. 1:8]

Innerhalb der vier Phasen kommt es regelmäßig zu Entscheidungen, die das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Bei der Grundlagenermittlung hilft die detaillierte, kritische Analyse bei der Entscheidung, ob die Planung weitergeführt werden sollte. Die Erarbeitung mehrerer Alternativen in der Konzeptplanung mit der Prüfung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit dient der Entscheidung für die geeignete Lösung. Diese wird in der Detailplanung ausgearbeitet, die dabei eintreffenden Angebotspreise

liefern die Grundlage für die Investitionsentscheidung und die potenziell folgende Realisierung. [Fot-2022b, S. 1:9]

2.3.2 Einordnung des Planungsproblems

Die Entscheidung hinsichtlich der Auswahl der geeigneten Antriebskonzepte und der Energieversorgung für Fördermittel findet in der Konzeptplanungsphase statt; die Unterphase zur Systemplanung widmet sich dieser Aufgabe. Hier steht der Planer vor dem Planungsproblem, die Lösung für den Anwendungsfall zu finden, bei dem die Zielgrößen für den angestrebten Soll-Zustand möglichst gut erfüllt werden. Die Untersuchung der möglichen Systemvarianten und deren Dimensionierung mithilfe der zuvor erlangten Erkenntnisse hilft bei der folgenden technischen und wirtschaftlichen Bewertung und der schlussendlichen Entscheidung für eine Variante [Fot-2022b, S. 1:10]. Abbildung 2-10 ordnet die Teilaufgaben den beiden Phasen zu und stellt sie in den Gesamtzusammenhang der logistischen Planung. Es wird ersichtlich, dass die Phasen sukzessive erarbeitet, aber nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Es empfiehlt sich ein iteratives Vorgehen mit Rückbezug auf vorhergehende Phasen.

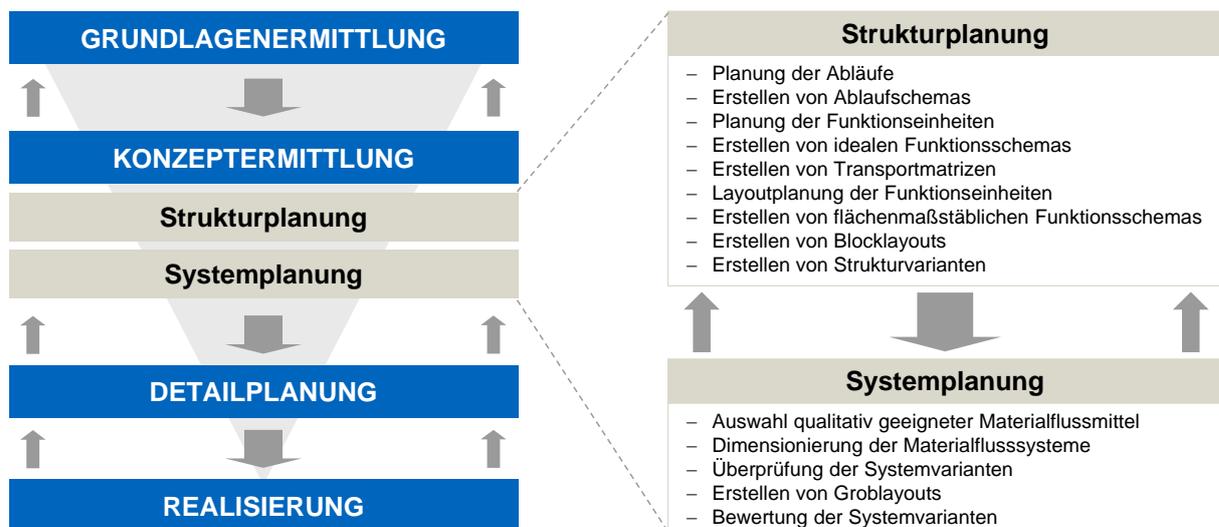


Abbildung 2-10: Teilphasen in der Konzeptplanung [Fot-2022b, S. 1:10]

Die Entscheidung für eine Planungsalternative in der Systemplanung hat Einfluss auf die Strukturplanung. Bei der Entscheidung für die ESS der FFZ-Flotte bestehen die nötigen strukturellen Anpassungen vorrangig in der Infrastruktur, dem prozessualen Ablauf und den Wegen der FFZ dorthin. Wie in den vorhergehenden Unterabschnitten 2.2.2 und 2.2.4 beschrieben, bedeutet dies für Batterien, dass bspw. innerhalb der Hallen entsprechende zentrale und/oder dezentrale Ladestationen bzw. -räume mit ausreichender Anbindung an das Stromnetz vorzusehen sind und die Zusatzwege in den Abläufen einzuplanen sind. Für den Einsatz von BzS sind einerseits die Indoor-

Einrichtungen der Dispenser an geeigneten Punkten auf den Fahrwegen der FFZ vorzusehen und einzuplanen. Gleichzeitig erfordert der Einsatz das Vorsehen der Outdoor-Einrichtungen zur Speicherung, Verdichtung und Versorgung der Tankstelle. Die Verknüpfung der beiden Systeme, in Form von Rohrleitungen mit Kupplungen, haben weiteren Einfluss auf die Positionierung der Elemente.

2.3.3 Bewertung der Planungsalternativen mit Entscheidungsmodell

Für die Auswahl der geeigneten Lösung aus den betrachteten Planungsalternativen werden im Zuge der Systemplanung zunächst die gesammelten Informationen systematisch verglichen und bewertet. Hierfür stehen dem Planer verschiedene betriebswirtschaftliche Techniken zur Verfügung. Deren Einsatz bedingt häufig die Darstellung des komplexen realen Systems in einem Modell, welches das reale Problem und dessen Zusammenhänge abbildet. Bei Modellen handelt es sich hierbei um vereinfachende Abbildungen des realen Systems, die trotz der Abstraktion dem realen System strukturgleich bzw. -ähnlich sind [Bam-2019, S. 13]. Bei strukturähnlichen Modellen werden also nur die wichtigsten, für den Zweck relevanten Elemente und Beziehungen berücksichtigt, bei gleichbleibender Grundstruktur des Systems. Die Erzeugung eines realitätsgetreuen Abbilds ist aufgrund der Komplexität kaum möglich; der Planer hat die Aufgabe, abhängig von der Zielsetzung den erforderlichen und umsetzbaren Detaillierungsgrad des Modells zu wählen. Die erzeugten Modelle dienen dem Planer dann als Instrumente des Planungsprozesses, um die Planungsalternativen zu vergleichen und eine Entscheidung herbeizuführen. [Kle-2011, S. 31ff.; Ada-1992, S. 45]

In der Logistikplanung können verschiedene Arten der Darstellung und Modellierung genutzt werden. Die berücksichtigte Art der Informationen ermöglicht eine Unterscheidung zwischen quantitativen und qualitativen Modellen. Quantitative Modelle, oder mathematische Modelle, bilden das Problem durch messbare Daten und Variablen ab, die zur Strukturierung und Darstellung der Wirkzusammenhänge in Gleichungen überführt werden. Qualitative Modelle beziehen neben messbaren Größen zusätzlich verbale Problemstellungen aus Informationen ein, die nicht messbar sind und für den Zweck häufig quantifiziert werden. [Arn-2008, S. 36f.]

Nach Einsatzzweck kann zusätzlich zwischen Beschreibungs-, Kausal- und Prognosemodellen unterschieden werden. Die reine Darstellung von Elementen in den realen Systemen ohne die Berücksichtigung von Wirkzusammenhängen erfolgt in Beschreibungsmodellen; zusätzliche Ursache- und Wirkzusammenhänge werden in Erklärungs- bzw. Kausalmodellen näher betrachtet, idealerweise quantitativ abgebildet in Gleichungssystemen. Prognosemodelle dienen bspw. der Abschätzung der Auswir-

kungen der Planungsalternativen. Diese teilen sich weiter in statische Entscheidungsmodelle, bedientheoretische Modelle und Simulationsmodelle auf. [VDI-4465, S. 3ff.; Arn-2008, S. 36; Kle-2011, S. 12]

Entscheidungsmodelle heben sich hiervon ab, da sie ergänzend zu den Wirkzusammenhängen die Zielfunktionen für die Auswahl der am besten geeigneten Planungsalternative beinhalten. Je nach Anzahl der Zielfunktionen handelt es sich um ein einkriterielles oder multikriterielles Modell. [Kle-2011, S. 33f.; Bam-2019, S. 14f.] Zur Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit soll ein multikriterielles Modell erarbeitet werden, das sowohl energetische und prozessuale als auch ökonomische Zielgrößen in die Entscheidung für das ESS einbezieht.

Entscheidungsmodelle werden wiederum in Optimierungsmodelle und Auswahlmodelle unterschieden. Bei Optimierungsmodellen ist die Anzahl der Planungsalternativen nicht festgelegt, sondern implizit durch Restriktionen und Nebenbedingungen vorgegeben. Methoden des Operations Research helfen bei der Lösung des Optimierungsproblems dabei, innerhalb des vorgegebenen Handlungsspielraums die vorteilhafteste Alternative zu ermitteln. Sofern die Anzahl der Planungsalternativen zuvor festgelegt ist, handelt es sich um ein Auswahlmodell, das der Bewertung dieser und der Auswahl dient. Bei der Lösung des Problems kann die präskriptive Entscheidungstheorie helfen, welche Regeln für das Treffen rationaler und objektiver Entscheidungen vorgibt. [Kle-2011, S. 40f.; Bam-2019, S. 3f.]

Statische Modelle sind durch die Abbildung des realen Systems mithilfe eines formalen Systems charakterisiert. Durch die Verwendung mathematischer Größen und die Abbildung der mathematischen Beziehungen können Modelle klar, nachvollziehbar und überprüfbar dargestellt werden. Es handelt sich hierbei um Modelle, bei denen der Zeitablauf nicht berücksichtigt wird. Sie dienen der Errechnung von Werten, die unter den getroffenen Annahmen und unter der Verwendung von Mittelwerten der Systemkennzahlen exakt sind. [Ada-1992, S. 70ff.; Mar-2004, S. 15ff.] Simulationsmodelle dienen dem Abbilden komplexen Verhaltens für Systeme, deren Zusammenhänge analytisch schwer oder nicht abbildbar sind; sie berücksichtigen dynamisches und stochastisches Verhalten der Elemente des Materialflusssystemes. Auch bedientheoretische Modelle verfolgen einen ähnlichen Zweck wie Simulationen. [Arn-2008, S. 36]

Entscheidungs- bzw. Auswahlmodelle bestehen nach *Klein und Scholl* im Grundmodell aus zwei Hauptkomponenten. Abbildung 2-11 zeigt die Komponenten und deren Zusammenhänge sowie das Vorgehen zum Finden der optimalen Lösung.

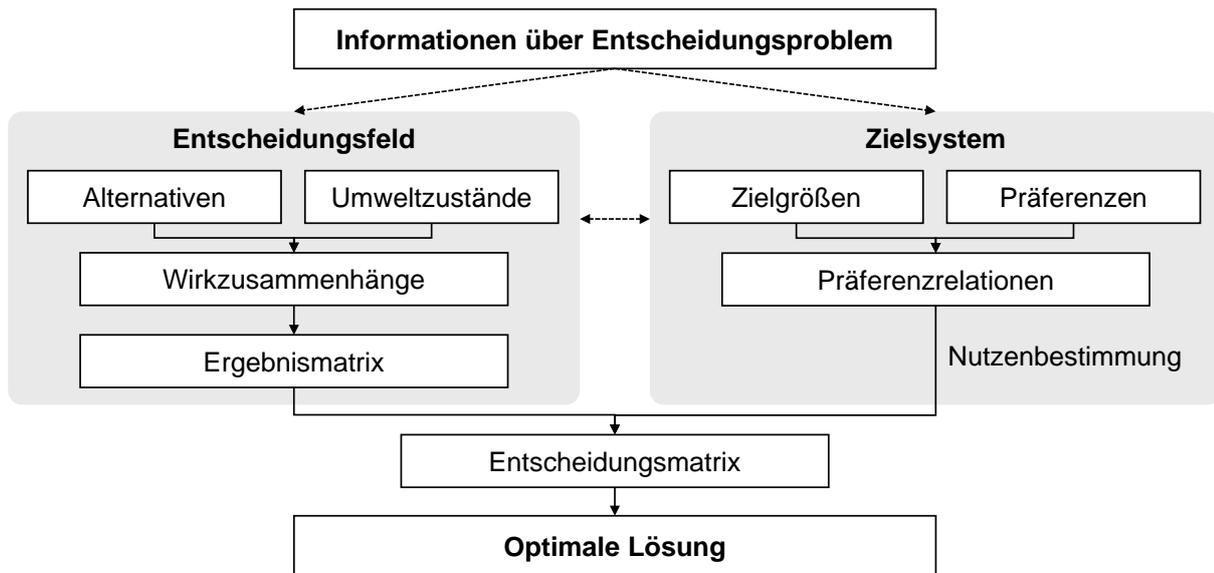


Abbildung 2-11: Komponenten eines Entscheidungsmodells in Anlehnung an [Kle-2011, S. 43]

Auf der einen Seite steht die Hauptkomponente Entscheidungsfeld, dessen Inhalte vom Planer beeinflusst werden können. Darin eingeordnet sind die – sich gegenseitig ausschließenden – Planungsalternativen, von denen die Auswahl für eine getroffen wird. Dem gegenüber stehen die Umweltzustände, die nicht vom Entscheider beeinflusst werden können. Sie bilden die künftige Entwicklung ab, welche die Entscheidung verändern kann. Aus den Planungsalternativen sowie den Umweltzuständen leiten sich Wirkzusammenhänge ab; diese stellen die Handlungskonsequenzen dar. Die dabei ermittelten Werte werden in einer Ergebnismatrix zusammengefasst. Auf der anderen Seite existiert als zweite Hauptkomponente das Zielsystem. Die Kombination aus Zielgrößen und Präferenzrelationen, also der Einstellung des Planers zu Ergebnissen der Planungsalternativen, ergibt den Zielzustand im Zielsystem. Insbesondere bei multikriteriellen Modellen kann erforderlich sein, die Ergebnisse vor Weiterverarbeitung in Nutzenwerte zu überführen, um sie für die Entscheidungsfindung verwenden zu können. Die Zusammenführung von Entscheidungsfeld und Zielsystem mündet in der Entscheidungsmatrix, welche Erkenntnisse über die optimale Lösung liefert. [Kle-2011, S. 41ff.]

Es existieren verschiedene Verfahren zum Modellbildungsprozess, bspw. nach *Adam, Klein und Scholl* oder *VDI 4465*, die sich alle im Vorgehen ähneln. Die *VDI 4465* liefert eine systematische Vorgehensweise speziell für die Modellierung von Logistik-, Materialfluss- oder Produktionssystemen. Als Systeme sind miteinander in Beziehung stehende Mengen von Elementen definiert, die von ihrer Umwelt abgegrenzt sind. Die Methoden des beschriebenen Modellbildungsprozesses sind unter anderem für analytische Untersuchungen ausgelegt, die ein System mithilfe mathematischer Gleichun-

gen und der Lösung hiervon zur Erkenntnisgewinnung beschreiben. Der Modellbildungsprozess strukturiert sich in mehrere Schritte, die im Modellbildungszyklus in Abbildung 2-12 dargestellt sind. Der Prozess charakterisiert sich durch parallele und iterative Bearbeitung, wobei Phasen mehrfach durchgeführt werden und sich somit ein Zyklus ergibt. Die Verifikation und Validierung begleitet alle Phasen. [VDI-4465]

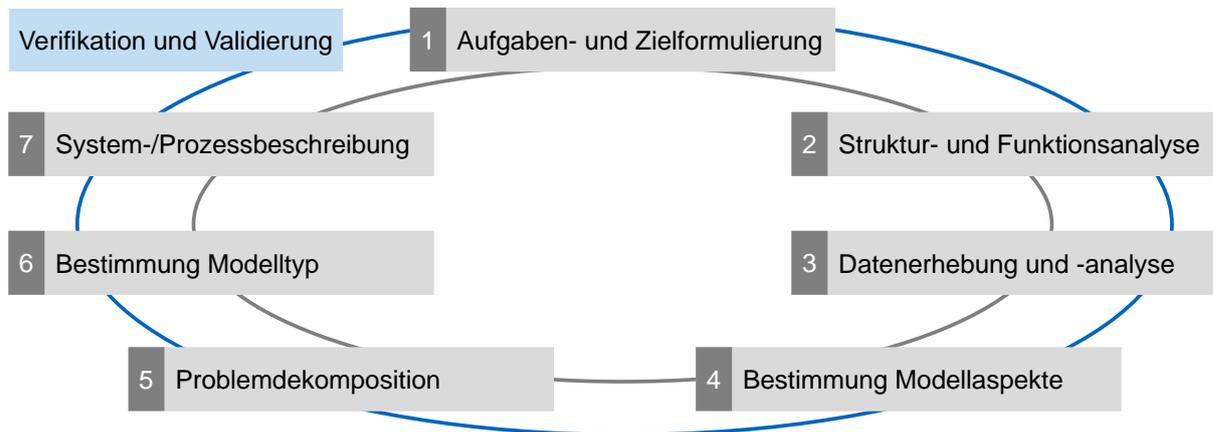


Abbildung 2-12: Phasen der Modellbildung im Modellbildungszyklus [VDI-4465]

Die dargestellten sieben Phasen sind in die folgenden Abschnitte zusammengefasst:

- Aufgaben- und Zielformulierung (Schritt 1),
- Systemanalyse und Konkretisierung der Zielstellung (Schritte 2, 3, 4, 5),
- Formale Modellbeschreibung und -implementierung (Schritte 6, 7).

Die Aufgaben- und Zielformulierung (1) dient dazu, die Zielrichtung und die Aufgaben der Modellierung zu definieren und somit das Entscheidungsproblem zu konkretisieren. Die Analyse der Ursachen hierfür liefert erste Ansatzpunkte für die Strukturierung der Modellbildung und die Anforderungen an das Modell. [VDI-4465, S. 9ff.]

Die Systemanalyse und Konkretisierung der Zielstellung stellt den darauffolgenden Schritt dar. Die untergeordnete Struktur- und Funktionsanalyse (2) dient der Analyse aller Elemente, Merkmale und zugehöriger Parameter sowie der Aufdeckung der relevanten Ursachen-Wirkungsbeziehungen. Durch die Datenerhebung und -analyse (3) wird dies weiter konkretisiert. Bei der Bestimmung der Modellaspekte (4) können die relevanten Systemaspekte festgelegt werden, also Elemente, Eigenschaften, Parameter und Zustandsgrößen. Die Problemdekomposition (5) hilft bei der Detaillierung und ggf. Erweiterung der Zielsetzung nach intensiver Auseinandersetzung mit dem System. [VDI-4465, S. 11ff.]

Die formale Modellbeschreibung und -implementierung widmet sich zuerst der Bestimmung des Modelltyps (6). In dieser Phase wird das Modell anhand der zuvor geschaffenen Grundlagen formal beschrieben und es wird festgelegt, welche der identifizierten Eigenschaften in welchem Umfang berücksichtigt werden und welche Aussagen getroffen werden sollen. Die anschließende System- und Prozessbeschreibung (7) dient der Erstellung und Zusammensetzung des Modells zur quantitativen Bewertung; hierbei müssen verschiedene Parametrierungen möglich sein. Bei analytischen Lösungen ist meistens die Implementierung in einer ausführbaren Software erforderlich. [VDI-4465, S. 18ff.]

Die Verifikation und Validierung begleiten alle Phasen des Modellbildungsprozesses. Dies gilt auch für die Dokumentation und Kommunikation, die Voraussetzung für eine systematische Verifikation und Validierung sind. Diese sind erforderlich, da in der Modellerstellung durch den Ersteller Abstraktionen durchgeführt werden. Eine Prüfung der Stimmigkeit der Ergebnisse wie auch des Beitrags zur Lösung des Problems ist daher erforderlich. Die beschriebenen Phasen lassen sich nicht immer eindeutig voneinander trennen und die Reihenfolge kann während der Erarbeitung abweichen, insbesondere durch Rückkopplungen zwischen den Phasen. [VDI-4465, S. 9ff.; Ada-1992, S. 50f.]

2.3.4 Methoden zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Wesentlich für logistische Entscheidungen im unternehmerischen Kontext ist die detaillierte Betrachtung einer Investition. Hierbei handelt es sich einerseits um die Anschaffungskosten und andererseits um weitere, entlang des Lebenszyklus anfallende Kosten beim Einsatz der Technologien [VDI-2884, S. 2]. Auch der Einsatz von ESS in FFZ verursacht verschiedene Kosten. Je nach Technologie sind spezifische initiale Anschaffungen erforderlich und in der Betriebsphase fallen zusätzlich betriebsabhängige Kosten an.

Ein entscheidendes Kriterium im Vergleich von Planungsalternativen stellt somit die Kostenbetrachtung und Wirtschaftlichkeitsanalyse dar. Hinsichtlich der Kostenbetrachtung liefert die Kosten- und Leistungsrechnung verschiedene Werkzeuge zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Alternativen und den zugehörigen Investitionen. Planungsrechnungen bilden eine Grundlage für Entscheidungsfindung, indem sie die finanziellen Auswirkungen der Entscheidungen in Bezug auf die Unternehmensziele bewerten. [Coe-2016b, S. 23] Bei strategischen Entscheidungen über Investitionen liefert die strategieorientierte Kostenrechnung wesentliche Ansatzpunkte für Planungsprojekte und hilft bei der internen „Planung und Überwachung der Nachhaltigkeit als we-

sentliche Zielgröße der strategischen Unternehmensführung“ [Coe-2016b, S. 30], insbesondere im Hinblick auf die beiden Unternehmensziele Liquidität und Erfolg. Die Auswirkungen hierauf sind für die strategischen Planungsalternativen und die finale Entscheidung zu berücksichtigen, da die kurzfristig anfallenden hohen Kosten das Erfolgsziel beeinflussen können. Die strategische Kostenrechnung als strategieorientierte Kosten- und Leistungsrechnung liefert unter der Bezeichnung ‚Strategic Management Accounting‘ mehrere Methoden, welche die klassischen Berechnungsmethoden auf den strategischen Fokus ausweiten. Hierzu zählen Methoden wie das Target Costing zur Ermittlung der Gesamtkosten bei der Produktentwicklung oder das Life Cycle Costing (LCC), das zusätzlich die beim Kunden anfallenden Kosten entlang des gesamten Lebenszyklus der Produkte berücksichtigt. Wesentliche Erweiterung ist die gezielte Berücksichtigung interner wie auch externer Informationen. Bei langfristigen Projekten können diese für den Vergleich und der Bewertung von Investitionsentscheidungen, wie der Entscheidung für den wirtschaftlichsten ESS, verwendet werden. Je nach Verfahren werden unterschiedliche Aspekte beleuchtet und Kostenarten berücksichtigt. [Coe-2016b, S. 30ff.]

Mit der Ermittlung der Lebenszykluskosten über die Methode des LCC bietet die Kostenrechnung in der Planungsphase eine geeignete Methode für die Entscheidung für ein Produkt oder eine Investition – die Norm *DIN EN 60300-3-3* liefert einen grundsätzlichen Anwendungsleitfaden für die Methode [DIN EN-60300-3-3]. Die *VDI-Richtlinie 2884* spezifiziert in einem methodischen Rahmen das Vorgehen für Produktionsmittel, die Verwendung von LCC für die Entscheidung über Logistikkonzepte ist ein beispielhaftes Anwendungsgebiet. Die relevanten Phasen unterscheiden sich in vor der Nutzung (Initiierung, Planung, Realisierung), während der Nutzung (Betrieb, Instandsetzung) und nach der Nutzung (Entsorgung). Der Einbezug aller anfallenden Kosten bei der Lebenszykluskostenrechnung bewertet die Wirtschaftlichkeit entlang des gesamten Zyklus und zeigt, welche Alternative über die Nutzungszeit am wirtschaftlichsten für den Anwendungsfall ist. [VDI-2884, S. 2ff.] Das Konzept hilft bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit von Produkten sowie bei der Auswahl einer Planungsalternative bei großen Investitionsgütern [Coe-2016b, S. 612]. Der Begriff Total Cost of Ownership (TCO) wird häufig als Synonym für Lebenszykluskosten verwendet, für die Betrachtung der Investitionsgüter ist der Begriff LCC gebräuchlicher und wird daher in dieser Arbeit ebenfalls verwendet [VDI-2884, S. 3]. Die Betrachtungen berücksichtigen die während des Lebenszyklus anfallenden Kosten von Gütern mit langer Nutzungsdauer, sowohl die Anschaffungs- als auch die Nutzungskosten. Auf dieser Grundlage können Entscheidungen für die Beschaffung einer Alternative aus Sicht des Anwenders getroffen werden. Die detaillierte Aufarbeitung der Kostenstruktur von Investitionsobjekten bietet eine verbesserte Entscheidungsgrundlage im Vergleich zu anderen Berechnungsverfahren. Insbesondere da es die impliziten Abhängigkeiten für

eine Entscheidung darstellt. Den ersten Schritt einer Analyse stellt somit das Schaffen eines Verständnisses über die Zusammensetzung der Kosten dar, die entlang des Lebenszyklus entstehen. [Coe-2016b, S. 619ff.]

Das *VDMA-Einheitsblatt 34160* stellt ein Prognosemodell für die Lebenszykluskosten vor. Hierin beschreibt es die drei Nutzungsphasen, wie bereits *VDI 2884*, und deren Bestandteile für Maschinen und Anlagen. Die Entstehungsphase besteht aus Kosten für Anschaffung, Inbetriebnahme und Infrastruktur vor der Nutzung. Die Betriebsphase beinhaltet alle Kosten, die während der Nutzung anfallen, wie Material-, Energie-, Instandhaltungs- oder auch Personalkosten. Die Verwertungsphase beinhaltet die Kosten des Verkaufs und der Entsorgung, die nach der Nutzung anfallen. [VDMA-34160]

Auch für die Bewertung der ESS von FFZ als Investitionsobjekte ist diese Unterteilung in die Phasen anwendbar. Diverse Richtlinien liefern Anhaltspunkte für die Berechnungen. Für die Ermittlung der Betriebskosten von Gabelstaplern liefert die *VDI 2695* Informationen. Die Kosten werden hierbei für den Anwendungsfall abhängig von der Beanspruchungskategorie im Einsatz anhand *VDI 4461* ermittelt. Die Richtlinie unterscheidet in der beispielhaften Kostenrechnung zwischen festen Kosten basierend auf den Anschaffungskosten, wie Abschreibungen und Zinsen, und betriebsabhängigen Kosten, wie Instandsetzung, Kraftstoffe oder Reifen. Kosten für Tankinfrastruktur bei Staplern mit VM, Installationskosten für Infrastruktur sowie Personalkosten finden im Vorgehen keine Berücksichtigung. [VDI-2695, S. 5ff.]

Die empfohlenen Vorgehensschritte aus *VDI 2884* beinhalten nach der Entscheidung für das Verfahren, die Identifikation der Alternativen, die Festlegung der Instandhaltungsstrategie, die Erfassung der spezifischen Einsatzbedingungen und der Nutzungsdauer, die Identifikation der relevanten LCC-Faktoren, die Ermittlung der Kosten und Erlöse, die Bewertung und schließlich die Entscheidung und Umsetzung. Insbesondere die Erfassung der spezifischen Einsatzbedingungen, neben den technischen Spezifikationen und Leistungsdaten, bei der Auswahl wird hervorgehoben. [VDI-2884]

Für die quantitative Bewertung können verschiedene Rechnungsverfahren – statisch oder dynamisch – verwendet werden [VDI-2884]. Bei statischen Verfahren wird ein einziger Zeitraum berücksichtigt, der für die gesamte Betriebsdauer repräsentativ ist oder einen hypothetischen Durchschnittszeitraum darstellt. Der Einfluss der Zeit wird bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Als einfaches Vergleichsverfahren dient die Kostenvergleichsrechnung, bei der die Durchschnittskosten mehrerer Alternativen verglichen werden, um die günstigere Alternative zu bestimmen. [Dro-2014, S. 233f.]

Bei dynamischen Verfahren erfolgt die Berücksichtigung von mehreren Perioden, wie der gesamten Nutzungsdauer, indem Einzahlungen und Auszahlungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Lebenszyklus anfallen⁵ in die Kalkulation einfließen. Diese Ein- und Auszahlungen setzen sich aus den fixen und variablen Kostenarten über die drei Lebenszyklusphasen zusammen. Der zeitliche Ablauf wird über Auf- und Abzinsung, der Diskontierung, berücksichtigt. Um die Nachteile der statischen Verfahren auszugleichen werden Zins- und Zinseszinsseffekte über den intern festgelegten Zinssatz berücksichtigt. [Hee-2021, S. 16ff.; Dro-2014, S. 247ff.] Die Kapitalwertmethode⁶ hilft dabei, den Kapitalwert zum Zeitpunkt $t = 0$ für eine Investition zu ermitteln, um diese mit Alternativinvestitionen zu vergleichen. Die Diskontierung der Kosten zum Kapitalwert K_0 , der zu Beginn aufgewendet werden muss, erfolgt über die Anfangsinvestition $K_{Invest,0}$ addiert um den auf den Bezugszeitpunkt $t = 0$ diskontierten Cash Flow, also Einzahlungen $K_{Einzahlung,t}$ abzüglich Auszahlungen $K_{Auszahlung,t}$, für alle einbezogenen Perioden t . Die Diskontierung erfolgt über den Kalkulationszinssatz i , der aus den ermittelten Eigenkapitalkosten und den mit dem Kreditinstitut vereinbarten Fremdkapitalkosten resultiert. [Dro-2014, S. 250ff.; Hee-2021, S. 22ff.]

$$K_0 = -K_{Invest,0} + \sum_{t=1}^n \frac{K_{Einzahlung,t} - K_{Auszahlung,t}}{(i + 1)^t} \quad (2-1)$$

Die Gesamtkosten ergeben sich aus der Summe aller Kostenarten für einen festgelegten Betrachtungszeitraum. Die Strukturierung der Kostenarten kann anhand verschiedener Kriterien erfolgen und bildet die Basis für die Kostenerfassung und -rechnung. Eine Möglichkeit der Differenzierung der Kostenarten für den Kostenartenplan – als strukturiertem Katalog der Kostenarten [Coe-2016b, S. 108] – ist nach Art der verbrauchten Güter. *Coenenberg et al.* unterscheiden die Kostenhauptgruppen: [Coe-2016b, S. 74f.]

- Personal- und Sozialkosten (Löhne, Gehälter, Provisionen, soziale Abgaben, kalkulatorischer Unternehmerlohn),
- Sachkosten (Betriebsmittel, Ausstattung, Werkzeuge; Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe; Energiekosten),
- Kapitalkosten (kalkulatorische Zinsen, kalkulatorische Abschreibungen),
- Kosten für bezogene Dienstleistungen (wie Instandsetzung, Prüfung, Beratung),
- Kosten für Fremdrechte (wie Lizenzen, Patente),

⁵ Hier sind Annahmewerte für die anfallenden Kosten in den einzelnen Perioden festzulegen.

⁶ Häufig auch unter dem englischen Namen ‚Net Present Value Methode‘ verwendet.

- Öffentliche Abgaben und Steuern (Kostensteuern; Abgaben, Gebühren, Beiträge) sowie
- Versicherungskosten und kalkulatorische Wagniskosten.

Die einzelnen Kosten und Kostenarten lassen sich hierbei in fixe und variable Kosten einteilen. Fixkosten fallen beschäftigungsunabhängig in konstanter Höhe an und sind kapazitätsabhängig oder zeitproportional, wie z. B. Gehälter, Zeitabschreibungen, Miete. „Fixe Kosten werden zunehmend auch als Strukturkosten bezeichnet, da sie im Zusammenhang mit dem Aufbau und der Veränderung der Betriebsstruktur (Kapazität) entstehen“ [Ebe-2020, S. 30]. Variable Kosten hingegen sind veränderlich und betriebs- und beschäftigungsabhängig, wie z. B. Akkordlohn, Energiekosten, Materialkosten, Dienstleistungskosten. Fixe Kosten können daher im Gegensatz zu den variablen Kosten nicht nach dem Verursacherprinzip den Stückkosten zugerechnet werden. Eine Einteilung der Kosten kann nicht immer eindeutig erfolgen, da dies durch den Betrachtungszeitraum wie auch unternehmensinterne Faktoren beeinflusst wird. Die Summe aus fixen und variablen Kosten ergibt die Gesamtkosten. [Coe-2016b, S. 77ff.; Ebe-2020, S. 30] Beispiele für fixe Kosten bei FFZ-Anwendungen sind Abschreibungen und Zinsen für die Investition oder Gemeinkosten für Ladetechnik/Tankstelle, Flächen oder Verwaltung. Variable Kosten stellen Energiekosten, in Form von Kraftstoff-/Stromkosten, oder Instandhaltungskosten dar. [VDI-2497, S. 2]

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Ausgehend von den geschaffenen Grundlagen liefert dieses Kapitel eine Übersicht über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik, basierend auf einer strukturierten Literaturanalyse sowie einer Marktanalyse. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem Einsatz der drei ESS in der mobilen Anwendung in FFZ: PbB, LIB und BzS. Dieses Kapitel zeigt die bestehenden Möglichkeiten zum Vergleich, die bei der schlussendlichen Auswahl einer Technologie für den Anwendungsfall helfen. Es wird betrachtet, welche Kriterien bisherige Vergleiche einbeziehen und damit, ob bereits multikriterielle Ansätze bestehen. Dazu werden zunächst Vergleiche und Methoden aus der Forschung beleuchtet (Abschnitt 3.1). Anschließend werden Vorgehensweisen für die Entscheidung im industriellen Umfeld vorgestellt (Abschnitt 3.2).

3.1 Vergleich der FFZ-Energiespeicher im Fokus der Forschung

Die Wissenschaft beschäftigte sich in den vergangenen Jahren vermehrt mit der Elektrifizierung und dem Brennstoffzelleneinsatz in Fahrzeuganwendungen. In der Intralogistik, im FFZ-Einsatz, wird der Einsatz neuer Technologien für den elektromotorischen Antrieb ebenfalls erforscht. Der Einsatz von LIB und BzS wird in zahlreichen Untersuchungen fokussiert. Dieser Unterabschnitt stellt die wesentlichen Erkenntnisse aus Forschung und Technik zur Verwendung der Technologien und deren Gegenüberstellung dar. Im Folgenden wird zwischen Methoden und Vorgehensweisen zum energetischen, ökonomischen und prozessualen Vergleich unterschieden.

3.1.1 Energetischer und ökologischer Vergleich

Das Forschungsprojekt ‚H2IntraDrive‘ beschäftigte sich mit einer Pilotanwendung von BzS-FFZ im Produktionsumfeld bei BMW in Leipzig. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung durch die Technische Universität München untersuchten *Günthner und Micheli* verschiedene Aspekte der Anwendung. Im Forschungsbericht zum Projekt beschreiben *Günthner und Micheli* den im Rahmen des Projektes durchgeführten Technologievergleich. Darin untersuchten sie das definierte Kennzahlenfeld Reichweite, das die Anzahl an möglichen Betriebsstunden des FFZ zwischen zwei Energy Refuelings⁷ angibt. Es besteht aus den Kriterien zu Energiebedarf FFZ, Energiegehalt

⁷ Energy Refueling dient als Überbegriff für die Wasserstoffbetankung, den Wechsel oder das Laden der Batterie.

Power Unit und dem Wirkungsgrad. Im Rahmen der Analyse werden FFZ mit BzS und PbB verglichen. Für FFZ und Power Unit werden Formeln zur Berechnung vorgestellt. Für den Wirkungsgrad zeigt sich, dass die Wasserstoffinfrastruktur mit einem höheren Wirkungsgrad als die Ladeinfrastruktur arbeitet, jedoch innerhalb der BzS sehr hohe Verluste von 55 % verzeichnet werden. [Gün-2015a, S. 73ff.]

Freis bewertete in ihrer Dissertation die Bereiche Gebäudetechnik, Gebäudehülle und Intralogistik und deren Auswirkungen auf die Gesamtenergiebilanz. FFZ werden in der Analyse der Intralogistik im Bereich ‚Fördern‘ ebenfalls näher betrachtet. Für verschiedene Hubwagen-Typen erfolgte ein Vergleich von Planungsalternativen, dabei wurde neben PbB ebenfalls die LIB als effizientere Technologie untersucht. Es wurden Stellhebel zur Steigerung der Energieeffizienz für den Einsatz identifiziert. Diese sind energieeffiziente Ladetechnik und Betriebsmodus. Die Berechnungen basierten auf Herstellerangaben zum Energieverbrauch der FFZ nach dem VDI-Zyklus aus VDI 2198 sowie dem Wirkungsgrad der Ladetechnik. Die Planungsalternativen führen zu geringerem Gesamtenergiebedarf, der aus dem Stromnetz bezogen werden muss. Insbesondere der Einsatz der LIB zeigt für das Anwendungsbeispiel Einsparpotenziale von bis zu 60 %. Diese haben wiederum positiven Einfluss auf die im Betrieb entstehenden CO₂-Emissionen. Die Wirtschaftlichkeit der Planungsalternativen ist allerdings noch nachzuweisen, da die Kosten für die Energieeinsparungen geringer ausfallen als die Zusatzkosten, die für die jeweilige Planungsalternative zu tragen sind. [Fre-2017, S. 152ff.] Da die größten Stellhebel in der Planungsphase liegen, lieferte *Freis* als Zusammenfassung eine Wissensbasis als Entscheidungshilfe für Planer. Darin werden bei den Planungsalternativen für FFZ die qualitativen Vor- und Nachteile der alternativen Speichertechnologien LIB und BzS aufgelistet und grundlegende Empfehlungen zum Einsatz genannt. [Fre-2017, S. 265ff.]

Pacheco et al. veröffentlichten eine Studie über den Energieverbrauch eines elektromotorisch-betriebenen Gabelstaplers. Für die Untersuchungen maßen sie das Profil des Energieverbrauchs eines PbB-Staplers unter realen Einsatzbedingungen und analysierten das Energiesystem. Die Autoren empfehlen den Austausch der herkömmlichen PbB durch ein hybrides Energiesystem, bestehend aus einer Wasser-Brennstoffzelle und einem Superkondensator. Diese Alternative stellt einen umweltfreundlichen Energiespeicher dar, der den im dynamischen Betrieb erforderlichen schnellen Austausch von Energie unterstützt und eine längere Lebensdauer ermöglicht. [Pac-2019]

Für die Berechnung des Energieverbrauchs von Gabelstaplern führten *Zajac und Rozic* Analysen durch. Nach einer Untersuchung bestehender Wege zur Berechnung des Energieverbrauchs von FFZ-Flotten – unter Berücksichtigung von VDI 2198,

ISO 50001, Methods-Time Measurement (MTM) und dem eigenen Testzyklus – verglichen die Autoren die Messergebnisse für verschiedene Parameter der Staplerfahrt, wie Kurvenfahrt oder Geschwindigkeit. Basierend hierauf liefert die Veröffentlichung eine Grundlage für die Analyse der Energiebedarfe von Gabelstaplern im individuellen Anwendungsfall. Die genaue Bestimmung des Energieverbrauchs bietet die Chance, Emissionen und Betriebskosten deutlich zu senken. [Zaj-2021]

Da der Energiebedarf zumeist in direktem Zusammenhang mit den CO₂-Emissionen betrachtet wird, gibt es weitere Publikationen, die sich dem Feld der Ökobilanz oder dem sogenannten Life Cycle Assessment (LCA) widmen, um potenzielle Umweltauswirkungen zu bewerten. Ein Teil hiervon sind die Klimaauswirkungen der CO₂-Bilanz. Diese ist die Summe der CO₂-Emissionen und Treibhausgasemissionen als CO₂-Äquivalente. Wenn diese die Phasen des Lebenszyklus und die gesamte Wirkungskette vom Rohstoff in der Herstellung der Komponenten bis zur Verwertung mit einbezieht, wird von einer Cradle-to-Cradle-Analyse gesprochen. [Wüh-2020, S. 145ff.]

Gaines et al. untersuchten in einer Studie des *U.S. Department of Energy* verschiedene FFZ-Antriebsarten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen entlang des Lebenszyklus. Sie verglichen elektromotorisch-betriebene Stapler mit PbB, BzS und verbrennungsmotorische Stapler mit Diesel und Gas. Nach Berechnung des Energiebedarfs der Stapler lag der Fokus der Analyse auf den potenziellen Energie- und Umweltauswirkungen des BzS-Einsatzes als Ersatz für bestehende Technologien mit den folgenden Ergebnissen. Die Auswirkungen von elektromotorisch-betriebenen Gabelstaplern sind geringer als die von Staplern mit VM und technische Verbesserungen können diese weiter verringern. Daher können der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen durch den Ersatz von fossilen Brennstoffen reduziert werden. Die Vorteile, die sich aus dem Einsatz von BzS ergeben, hängen von den Quellen für Strom und Wasserstoff ab. BzS-Gabelstapler, die mit Wasserstoff aus der Reformierung von Erdgas betrieben werden, haben geringere Auswirkungen als solche, die Wasserstoff aus der Elektrolyse mit US-Strommix verwenden. [Gai-2008] Die Erkenntnisse der Studie fassten *Elgowainy et al.* in einem Paper zusammen. [Elg-2009]

Im Forschungsprojekt ‚Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln der Intralogistik‘ berechneten *Schilling et al.* in einer Ökobilanzierung mithilfe einer Software die CO₂-Ausstöße über die Lebensphasen von FFZ. Die Nutzungsphase war hierbei für den Großteil der Emissionen verantwortlich. In mehreren Anwendungsbeispielen wurden Ökobilanzen für PbB-FFZ erstellt. Der Vergleich des PbB-Staplers mit Diesel- und LPG-Stapler zeigte, dass bei einem PbB-Stapler, trotz Energieverbrauch für das Laden, ein Viertel der Emissionen des Diesel-Staplers und die Hälfte des LPG-Staplers entsteht. Die Substitution der Kraftstoffe hätte somit neben

der Optimierung der Antriebe hinsichtlich Energiebedarf oder Steigerung des Recyclinganteils große Auswirkungen auf die Reduktion der schädlichen Emissionen. [Sch-2013, S. 53ff.]

Auch *Günthner und Micheli* bewerteten die ökologische Nachhaltigkeit von BzS-FFZ und präsentierten die wesentlichen Erkenntnisse im Vergleich zu PbB. Die Bewertung erfolgte mithilfe einer Ökobilanz, in der das Treibhauspotenzial der eingesetzten FFZ⁸ mit BzS und PbB umfassend bewertet wurde. Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zur Verwertung. Die Autoren verglichen hierbei konventionelle Energiepfade, also Strom aus dem deutschen Strommix und Wasserstoff aus Dampfreformierung, mit grünen Energiepfaden, also Strom aus erneuerbaren Energien und grün zertifizierter Wasserstoff aus Wasserelektrolyse. Die Untersuchungen zeigten, dass die PbB in der Herstellung mehr Emissionen als das BzS verursacht. In Summe liegt der Wert der BzS in der Analyse bei den konventionellen Pfaden leicht unter dem der PbB, bei den grünen Energiepfaden liegt der der BzS über dem der PbB. Der Großteil der Emissionen entsteht im Betrieb der FFZ und kann durch die Reduktion der Emissionen in der Strom- bzw. Wasserstoffherstellung positiv beeinflusst werden. [Gün-2015a, S. 91ff.]

Fuc et al. führten eine ähnliche Untersuchung und Bewertung zu LCA von FFZ mit EM und VM (Diesel und Gas) im polnischen Markt durch. Grundlage der Analyse bildeten Messungen an verschiedenen Verbrennungstaplern und Berechnungen anhand der Herstellerdaten für Elektrostapler. Die Elektrostapler sind beim polnischen Strommix, das größtenteils auf fossilen Brennstoffen basiert, ökologisch nachhaltiger als die Verbrennungstapler. [Fuc-2016]

Kriwall et al. bewerteten den Austausch von bestehenden FFZ mit VM (Diesel) durch VM (Gas) und EM hinsichtlich der CO₂-Emissionen. Sie stellten hierbei fest, dass die Emissionen bei einem Wechsel auf den EM beim deutschen Strommix halbiert, bei Verwendung von grünem Strom auf ein Viertel reduziert werden können. [Kri-2019]

Der energetischen Optimierung näherten sich *Hosseinzadeh et al.*; die Autoren testeten simulativ verschiedene mögliche Zusammensetzungen des hybriden BzS. Sie prüften hierbei die Auswirkungen auf Wasserstoffverbrauch und Ladezustand der Batterie. Darüber hinaus stellten sie fest, dass der Wasserstoffverbrauch bei Reduktion der

⁸ Die FFZ waren vom Hersteller *Linde Material Handling*. Es wurde ein 3,5 Tonnen Gabelstapler und ein 3 Tonnen Schlepper als Referenzfahrzeuge gewählt.

Höchstgeschwindigkeit von 4,5 auf 3 m/s um etwa 24 % sinkt. Bei einer Verringerung der Last von 2,5 auf 1,5 Tonnen sank der Verbrauch um 20 %. [Hos-2013]

3.1.2 Monetärer Vergleich

Die *VDI-Richtlinie 2695* liefert mit einer beispielhaften Rechnung eine Unterstützung bei der Berechnung der Betriebskosten von Diesel- und Elektro-Gabelstaplern. Für den elektromotorischen Antrieb werden ESS und Ladegerät⁹ als Einheit betrachtet. Hierbei erfolgt eine Unterscheidung zwischen festen und betriebsabhängigen Kosten. Bei den festen Kosten handelt es sich um Abschreibungen und Zinsen auf Basis der Anschaffungskosten. Zu den betriebsabhängigen Kosten zählen Wartungs- und Instandsetzungsaufwände, Energiekosten und Reifen. Personalkosten für die Fahrer finden keine Berücksichtigung. Ebenso werden die unterschiedlichen Prozesse der Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit der ESS für Elektro-Gabelstapler nicht berücksichtigt. Für die Beanspruchung der Stapler werden die Beanspruchungskategorien I, II und III aus *VDI 4461* herangezogen, wobei I für eine leichte und III für eine schwere Beanspruchung stehen [VDI-4461]. [VDI-2695]

Die *VDI 2497* stellt zur Beurteilung der wirtschaftlichen Betriebshaltung von FFZ mit verbrennungsmotorischem und elektromotorischem Antrieb durch Kostenanalyse Einflussgrößen in Beziehung zueinander. Sie dient der Ermittlung, wann die bestehenden FFZ im Vergleich zur Neuanschaffung nicht mehr wirtschaftlich sind. Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls und Einbeziehung der Einflussgrößen kann die optimale Einsatzdauer ermittelt werden. [Zöl-2005; VDI-2497]

McConnel veröffentlichte zwei Paper für den Vergleich von PbB und BzS. Das erste liefert generelle Informationen zu den Technologien und eine Marktanalyse für den amerikanischen BzS-Markt. [McC-2010a] Die zweite Publikation widmete sich dem Kostenvergleich sowie einer Übersicht des weltweiten Marktes. Für den Kostenvergleich bezog sie sich auf eine Studie des *Battelle Memorial Institutes*. Die Ergebnisse zeigten, dass PEMFC in Mehrschichtbetrieben mit kontinuierlich eingesetzten Gabelstaplern bei einer Kostenbetrachtung mit Batterien konkurrieren können. Die prognostizierte Amortisationszeit betrug drei bis vier Jahre für BzS, Gabelstapler und Infrastruktur. [McC-2010b]

Renquist et al. verglichen brennstoffzellenbetriebene Gabelstapler mit verschiedenen Typen von batteriebetriebenen Gabelstaplern. Es wurde der Einsatz von konventionelle Batterien (PbB), Schnellladebatterien mit 15 kW und mit 30 kW berücksichtigt.

⁹ Ohne Berücksichtigung der Installationskosten für Ladegeräte oder eine Ladestation.

Es erfolgte eine Berechnung des Kapitalwertes für die vier Technologien unter Berücksichtigung der Kosten für Anschaffung, Infrastruktur, Betrieb/Instandhaltung sowie Laden. Die Analyse orientierte sich an einem Anwendungsbeispiel mit 50 Gabelstaplern. Für die Kosten wurde zudem der Energiebedarf betrachtet und der Ladezustand der Batteriesysteme mit verschiedenen Arbeitslasten modelliert. Die Ergebnisse zeigten, dass Stapler mit BzS bei den betrachteten Arbeitslasten in der Anschaffung und im Betrieb teurer sind als batteriebetriebene Stapler. Bei geringen Arbeitslasten erreichten PbB-Gabelstapler mit Batteriewechsel den besten Kapitalwert. Bei höherem Arbeitsaufkommen waren Schnellladestapler vorteilhafter, da sie weniger Infrastruktur und Platz für den Ladevorgang benötigen. [Ren-2012]

Larriba et al. führten eine wirtschaftliche Bewertung von BzS als Alternative zu PbB bei Gabelstaplern durch. Sie verwendeten die dynamische Kapitalwertmethode und berechneten den Kapitalwert für den Bewertungszeitpunkt t_0 als abgezinste Kostenunterschied zwischen den beiden Technologien. Hierbei wurden die Anschaffungskosten, Betriebs- und Instandhaltungskosten, Kosten für Ersatz und Produktivitätskosten einbezogen. Für das Referenzszenario wurden verschiedene Eingangsgrößen festgelegt und Annahmen zur Vereinfachung getroffen. Hinsichtlich der Wasserstoffinfrastruktur wurde bspw. angenommen, dass diese im Wasserstoffpreis des zugekauften Wasserstoffs berücksichtigt ist. Es wurde von einer Greenfield-Entscheidung, also von einer neu anzuschaffenden Flotte bestehend aus 40 FFZ verschiedener Gewichtsklassen ausgegangen, die im Dreischichtbetrieb eingesetzt werden. Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass der Einsatz der BzS wirtschaftlicher als PbB sein kann, vor allem wegen der niedrigeren Produktivitätskosten. Ausgehend von diesem Szenario wurden weitere Szenarien erstellt, anhand derer der Einfluss der Flottengröße und der Wasserstoffherkunft (Kauf, Vor-Ort-Biogasreformierung, Vor-Ort-Elektrolyseur) untersucht wurden. Es zeigte sich, dass eine größere Flotte die positiven finanziellen Effekte der BzS gegenüber den PbB weiter vergrößert. Für den Wasserstoffbezug war die wirtschaftlichste Alternative der Bezug vom Markt. Bei der anschließenden Sensitivitätsanalyse erkannten die Autoren, dass die Ergebnisse stark von den folgenden fünf Faktoren abhängig sind: Schichtbetrieb, Batteriewechseldauer, Anschaffungspreis des BzS, Wasserstoffpreis und Strompreis. Es wurde eine individuelle Fall-Analyse empfohlen, da die Wahl der Parameterwerte einen großen Einfluss auf die Finanzergebnisse hat. [Lar-2013]

In einem technischen Bericht des *U.S. Department of Energy* verglich *Ramsden* die TCO von BzS mit konventionellen batteriebetriebenen FFZ¹⁰. Die folgenden Kosten

¹⁰ Aufgrund der Prozessbeschreibung wird angenommen, dass es sich um PbB handelt.

wurden berücksichtigt: FFZ-Kosten, ESS-Kosten, Infrastrukturkosten, Personalkosten für Laden, Energiekosten, Flächenkosten Infrastruktur, Instandhaltungskosten FFZ und Instandhaltungskosten ESS. Die TCO-Betrachtung erfolgte anhand eines Referenzszenarios aus Durchschnittswerten bestehender amerikanischer Anwendungen mit 58 BzS-FFZ bzw. 97-PbB-FFZ¹¹. Die FFZ wurden hierbei im Zwei- bzw. Dreischichtbetrieb eingesetzt. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen der Studie waren die TCO der BzS-FFZ für alle untersuchten Gewichtsklassen geringer als die der PbB-FFZ. Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass auf die TCO von BzS-FFZ die Kriterien Förderquote, Instandhaltungskosten, Infrastrukturkosten, BzS-Lebensdauer und Flottengröße den stärksten Einfluss haben. Bei PbB-Einsatz waren es Instandhaltungskosten, Anzahl der Batteriewechsel, Wechselzeit und Anzahl der Schichten. [Ram-2013]

Günthner und Micheli erläuterten im Forschungsbericht die im Rahmen des Projektes ‚H2IntraDrive‘ durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Anwendung von elf verschiedenen BzS-FFZ unter Produktionsbedingungen. Die Untersuchungen zielten darauf ab, die Rahmenbedingungen zu identifizieren, unter denen der Einsatz von BzS ohne Förderung wirtschaftlich möglich ist. Hierfür entwickelten sie ein Lebenszykluskostenmodell mit Rahmenbedingungen für ein Basisszenario mit etwa 50 FFZ, welches die Berechnung der Kosten für BzS und PbB ermöglicht. Das Modell basiert auf der dynamischen Kapitalwertmethode. Es wurden die folgenden Kosten berücksichtigt und verglichen: Anschaffungskosten Infrastruktur, Anschaffungskosten FFZ, Anschaffungskosten Power Unit, Wartungskosten Infrastruktur, Wartungskosten FFZ, Wartungskosten Power Unit, Personalkosten, Energiekosten und Zinsen/Anlagevermögen. Die anschließende Sensitivitätsanalyse half bei der Identifikation der wesentlichen Kostentreiber. Die wesentlichen Einflussgrößen waren Personalkosten, Arbeitsintensität, Flächenkosten, Energiebedarf und Batteriewechselprozess. Die Kostenvorteile der BzS stellten die höhere betriebliche Verfügbarkeit und damit die geringere FFZ-Anzahl, geringere Personalkosten sowie geringere Flächenkosten dar. Demgegenüber standen höhere Energiekosten sowie höhere Anschaffungskosten und Wartungskosten für BzS und Infrastruktur. Das Ergebnis war, dass BzS bereits wirtschaftlicher als PbB sein können bei hohen Lohnkosten, hoher Arbeitsintensität, hohen Flächenkosten, geringem Energiebedarf des FFZ und einem suboptimalen Batteriewechselprozess. Abschließend wurde empfohlen, für die individuelle Anwendung eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchzuführen. [Gün-2015a, S. 123ff.]

¹¹ Der Unterschied in der Flottengröße stellt die durchschnittliche Flottengröße bei PbB-FFZ und BzS-FFZ in existierenden Lagerhäusern dar, in denen beide Flotten betrieben werden. Das bedeutet, dass die betrachteten Unternehmen im Durchschnitt mehr PbB-FFZ einsetzen.

Müller führte in seinem Beitrag in einem Sammelwerk zu Brennstoffzellen eine Analyse der TCO brennstoffzellenbetriebener FFZ anhand von zwei gewählten Szenarien mit je 200 FFZ in unterschiedlichen Gewichtsklassen (bis zu 2 Tonnen und 2,5-4,5 Tonnen) durch. In den Berechnungen waren PbB wirtschaftlicher als BzS und LIB in der leichten Gewichtsklasse und als BzS und Diesel in der schwereren Klasse. Details zur Berechnungsmethode wurden nicht genannt, lediglich die Rahmendaten sind tabellarisch aufgeführt. Es ist nicht bekannt, ob statisch oder dynamisch gerechnet wurde. [Mül-2016, S. 328ff.]

Jiao et al. untersuchten die TCO von LIB im Vergleich zu PbB. In die dynamische Kostenrechnung flossen Anschaffungskosten (Ladegerät, FFZ, ESS, Ersatz), Betriebskosten (Energiekosten, Wartungskosten, Nutzungssteuer) und Wiederverkaufswert ein. Die Hintergründe und Formeln für die Berechnung der Kostenarten wurden beschrieben. Für den Anwendungsfall wurden zwei identische 2-Tonnen-Gabelstapler mit PbB bzw. LIB ausgestattet. Für die FFZ wurden durchschnittliche Verbrauchswerte angenommen. Für dieses Beispiel waren LIB die wirtschaftliche Option, hauptsächlich begründet durch die kürzere Lebensdauer der PbB und deren höhere Wartungskosten. [Jia-2021]

3.1.3 Prozessualer Vergleich

Prozessspezifische technische Daten stellen wichtige Eingangsgrößen für die Rahmenbedingungen des energetischen und wirtschaftlichen Vergleiches dar. Im Zuge der genannten Veröffentlichungen erfolgten grundlegende Prozessvergleiche, die mit Annahmen zu den technischen Daten arbeiteten. Die folgenden Publikationen beschäftigen sich detaillierter mit den Unterschieden der Prozesse beim Einsatz von PbB, LIB und BzS. Hierbei werden die Technologien selbst, deren Prozessschritte und die dafür nötigen Zeiten (und dadurch indirekt Verfügbarkeiten) beleuchtet, basierend auf Messungen, die im spezifischen Anwendungsfall durchgeführt wurden.

Sauer präsentierte in einem Beitrag seine Erkenntnisse zu Batteriesystemen für FFZ. Er liefert eine Übersicht über die existierenden ESS und deren Einsatzmöglichkeiten und Potenziale. Für LIB führte er qualitative Vergleiche zu PbB an hinsichtlich elektrischer Leistungsfähigkeit, Marktverfügbarkeit, Kosten und Leistung. [Sau-2009]

Zhang et al. erläuterten ihre Ergebnisse zum Einsatz eines hybriden BzS im Gabelstapler. In diesem elektromechanischen Antriebssystem mit hybriden Energie-/Leistungsquellen lieferten die BzS die mittlere Leistung, während die Batterien die gesamte Lastdynamik übernahmen. Die Autoren zeigten detaillierte Ergebnisse ihrer Analyse des elektrischen Antriebssystems und des Leistungsverhaltens des BzS im Einsatz bei

verschiedenen Steuerungsstrategien – der Spannungsüberwachung der Batterie und der Ladezustandsüberwachung. Die Spannungsüberwachung zeigte sich als schonendere und damit effizientere Betriebsstrategie. [Zha-2013]

Dominguez et al. untersuchten das dynamische Verhalten einer in Spanien eingesetzten BzS-FFZ-Flotte mit 38 Fahrzeugen verschiedener Typen. Sie führten Analysen des Anwendungsfalls durch, um den Energiebedarf der Flotte zu ermitteln und die Fahrzyklen der FFZ zu untersuchen. Die Daten zur Fahrzeuganzahl, deren Energiebedarf und den Fahrzyklen dienten als Eingangsdaten für ein Simulationsmodell zur Ermittlung der Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur. Diese besteht im Anwendungsfall aus einem Elektrolyseur, einem Verdichter und einem Speicher. [Dom-2015]

Lototsky et al. erforschten das Leistungsverhalten eines Versuchsstaplers mit BzS. Es wurde festgestellt, dass der Gabelstapler bei einer sechsminütigen Betankung 83 % der maximalen Wasserstoffspeicherkapazität erreichen kann und dass der Schwerlastbetrieb einen um 25 % höheren Energieverbrauch bedeutet. [Lot-2016]

Aufgrund des Mangels an wissenschaftlichen Betrachtungen analysierten *Günthner und Micheli* im zuvor erwähnten Forschungsbericht des Projektes ‚H2IntraDrive‘ weitere prozessuale Aspekte des spezifischen Anwendungsfalls. Nach vorangehenden Untersuchungen des Anwendungsfalls der BzS hinsichtlich Betriebsstunden, Service- und Wartungsausfällen, Einsatzzeiten, Leistungsverläufen und Fahrzyklen sowie Messungen zu Energiebedarfen wurde – neben der zuvor dargestellten Betrachtung der Reichweite – die Zuverlässigkeit der Systeme bewertet. Hierbei wurde neben der Lebensdauer einerseits die technische Verfügbarkeit mit Betriebs-, Wartungs- und Störungszeit berücksichtigt und andererseits die Prozesszeit von Betankung/Wechsel mit Anfahrts-, Warte- und Refuelingzeit. [Gün-2015a, S. 76ff.]

Außerdem bewerteten die Autoren die manuellen Handhabungsprozesse für die Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit. Als Grund für die Veröffentlichung nannten sie das Fehlen wissenschaftlicher Untersuchungen zum prozessualen Vergleich. Es erfolgte eine zeitliche Bewertung mithilfe der MTM-Analyse sowie eine Betrachtung der physischen Belastung des Mitarbeitenden mittels der Leitmerkmalermethode. Es zeigte sich, dass der Betankungsvorgang bei Staplern und Schleppern im betrachteten Anwendungsfall deutlich schneller durchgeführt werden kann als der Batteriewechselvorgang – ohne Berücksichtigung der Wege sowie der vor- und nachgelagerten Prozessschritte. Hinsichtlich der physischen Belastung war die BzS-Anwendung ebenfalls vorteilhaft, da die Mitarbeitenden beim Betanken kürzere Wege zurücklegen müssen und das Handling der schweren Batterien obsolet wird. [Gün-2015a, S. 78ff.; Mic-2015]

In einem durchgeführten Benchmark zwischen je zwei deutschen und amerikanischen Anwendungen identifizierten *Günthner und Micheli* die unterschiedlichen Rahmenbedingungen für den BzS-Einsatz. Die wesentlichen Unterschiede waren die Arbeitsintensität (in USA mit 20 Stunden am Tag höher), die Flottengröße (in USA größere FFZ-Flotten), der Genehmigungsaufwand bei Umrüstung (in USA einfach möglich, in Deutschland eingeschränkt durch Maschinenrichtlinie), die Förderung (in USA 30 % der Investition¹²), der Batterieladeprozess (in USA nicht optimal) sowie der Wasserstoffpreis (in den USA günstiger). [Gün-2015a, S. 151ff.]

Auch im Folgeprojekt ‚FFZ70‘ beschäftigten sich *Manke et al.* mit den Prozessunterschieden. Neben verschiedenen Empfehlungen zur Optimierung der Betankung und zur Integration der BzS in die FFZ wurde eine Empfehlung für das Service- und Betreiberkonzept erarbeitet und vorgestellt. Hierfür wurde die Zusammenarbeit der Partner und deren Verantwortlichkeiten beim Einsatz von PbB betrachtet und die Unterschiede zu BzS ausgearbeitet. Bei BzS stellt sich das Konzept aufgrund der Anzahl der beteiligten Partner und der geringeren Verbreitung auf dem Markt als komplexer dar. Es folgten Empfehlungen für die Inhalte des BzS-Servicekonzeptes unter Einbezug strategischer Erfolgsfaktoren. [Man-2022, S. 98ff.] Es erfolgte zudem eine Bewertung des Batteriebetriebs und hierbei im speziellen des Batteriewechselprozesses. Hierfür wurden Messungen der tatsächlichen Wechselzeit und der einzelnen Prozessschritte sowie Messungen der Wechselhäufigkeiten durchgeführt. Durch die Kombination der beiden Analysen konnten mögliche Prozesszeiteinsparungen aufgedeckt werden, die direkte Auswirkungen auf die TCO der FFZ haben und relevant für die Entscheidung zwischen den Energiesystemen sind. [Man-2022, S. 105ff.]

3.1.4 Vergleich der ESS in anderen Anwendungsfeldern

Elektrifizierung und Diskussionen zum Einsatz von BzS finden in weiteren mobilen Anwendungen zunehmend Beachtung, womit sich die Frage stellt, ob bereits Vorgehensmodelle für die Entscheidungsunterstützung existieren. Dieser Unterabschnitt liefert einen Überblick über bestehende Publikationen, die sich mit dem Vergleich und Einsatzpotenzialen der ESS beschäftigen.

Für die Automobilindustrie ist Elektromobilität der Schlüssel zur Erreichung der Klimaziele. Batterien und Brennstoffzellen stehen in dieser Anwendung oft konkurrierend zueinander. Die Technologien haben spezifische Vor- und Nachteile und unterscheiden sich vor allem in Bezug auf Betankungs-/Ladezeiten, Masse, Reichweite und Recyclingquote. Sie haben aber die Gemeinsamkeit, dass sie eine ausgebaute öffentliche

¹² Die Förderung bestand von 2009 bis 2016 und wurde 2018 reaktiviert. [DOE-2018; Upr-2016].

Infrastruktur benötigen. Aktuell ist das verfügbare Angebot an Batterie-Fahrzeugen größer und die Fahrzeuge sind günstiger. Über den Erfolg der BzS in der Automobilindustrie entscheidet die Preisentwicklung von Fahrzeug und Wasserstoff. [Afs-2020]

In der Nutzfahrzeugindustrie gilt die selbe Anforderung hinsichtlich Infrastruktur. Allerdings stehen Batterie und BzS dort nicht in direkter Konkurrenz zueinander. Bedingt durch den Transport schwerer Güter sowie höhere geforderte Reichweiten sind Batterien weniger geeignet als BzS. Batterien stellen sich aufgrund der geringeren Energiedichte und folglich höheren Masse als nachteilig dar. BzS gewinnen hierdurch an Bedeutung. Dies gilt ebenfalls für Stadtbusse im ÖPNV: zur Reduktion der Emissionen stellen BzS eine gute Alternative dar. [Thi-2020, S. 4ff.; Ehr-2018, S. 12] Neben elektromotorischem Betrieb mit BzS ist für Nutzfahrzeuge ebenfalls der Einsatz von Wasserstoff-VM denkbar. [May-2021]

Die erwähnte Masseproblematik der Batterien stellt diese auch in der Luftfahrtindustrie vor Herausforderungen. Der Einsatz von BzS oder das Konzept der direkten Wasserstoffverbrennung gestalten sich bei diesen Anforderungen als wirtschaftlichere und technisch umsetzbare Alternativen. [Deu-2020, S. 7; Töp-2014, S. 132f.] In der Schifffahrtsbranche gelten BzS ebenfalls als interessante Alternative, deren Einsatz in Forschungsprojekten untersucht und in Pilotanwendungen erprobt wird. [Ehr-2018, S. 12]

Im Gegensatz zur Luftfahrt spielt die Masse in der Eisenbahnindustrie eine untergeordnete Rolle. Durch die fehlende Elektrifizierung großer Streckenanteile¹³ stellen BzS-Fahrzeuge, Batteriefahrzeuge oder Oberleitungs-Hybridfahrzeuge eine geeignete Alternative für die bisher eingesetzten Dieselschienenfahrzeuge dar. Laut einer VDI/VDE-Studie kann der Einsatz von Batterien oder Brennstoffzellen wirtschaftlich oder technisch vorteilhaft gegenüber einer Elektrifizierung durch Oberleitungsausbau sein. [VDI-2022, S. 28] Insbesondere für Streckenabschnitte mit höherem Energiebedarf, z. B. wegen Steigungen, ist der Einsatz von BzS wegen höherer Energiereserven interessanter, obwohl die Kosten deutlich über denen der Batterien liegen. [Ehr-2018, S. 13f.; Kle-2020, S. 60ff.]

Innerhalb der beschriebenen Anwendungsfelder der ESS zeigt sich, wie stark der Einsatz vom jeweiligen Feld und dessen spezifischen Anforderungen abhängt, ähnlich wie in der Intralogistik. Den beschriebenen Anwendungen fehlt allerdings die Vergleichbarkeit mit der Intralogistik. Zunächst stellt meist die Diesel-Verbrenner-Technologie die Ausgangssituation dar, mit der verglichen wird, und nicht PbB. Der Einsatz von

¹³ In Deutschland handelt es sich um rund 61 % des Streckennetzes [All-2021], bis 2030 sollen 75 % des Netzes mit Oberleitungen elektrifiziert werden [VDI-2022, S. 9].

PbB ist in den anderen Anwendungen nicht relevant; die Intralogistik war den anderen Branchen voraus, da sie durch den Indoor-Einsatz gezwungen war, früh von VM auf EM umzusteigen als LIB noch nicht kommerziell verfügbar war. Die Anforderungen an das ESS unterscheiden sich stark in den einzelnen Branchen, weshalb keine einheitliche und allgemeingültige Empfehlung für oder gegen die Technologien gegeben werden kann. Darüber hinaus unterscheidet sich der Prozess der Intralogistik von dem der anderen Einsatzbereiche. Die meisten vorgestellten Anwendungen sind davon abhängig, dass ein umfassendes Infrastruktur- oder Ladenetzwerk aufgebaut wird, wohingegen die Intralogistik innerhalb des Werkes als eigenes Ökosystem betrachtet werden kann. Nicht zuletzt deswegen sind die Technologievergleiche und Empfehlungen für die Entscheidung je nach Branche sehr unterschiedlich. Es existieren bisher keine multikriteriellen Vergleiche oder Modelle.

3.1.5 Fazit zum Stand der Forschung

Diverse Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Verwendung der Technologien PbB, LIB und BzS sowie deren Gegenüberstellung. Für die Betrachtung des Energiebedarfes von FFZ wurden mehrere Untersuchungen und Berechnungen durchgeführt. Die existierenden Vergleiche berücksichtigen PbB und BzS oder PbB und LIB. Bei den vorgestellten Veröffentlichungen wurden vorrangig die FFZ als Technologie betrachtet und bei weiteren separat deren ESS. Die Infrastruktur und bspw. deren Wirkungsgradverluste, der Sekundärenergiebedarf oder der Energiebedarf der Lade-/Betankungs-Komponenten wurde wissenschaftlich nur oberflächlich beleuchtet. Die Bedarfe wurden bei allen Methoden anhand eines gewählten Beispiels berechnet und beschrieben, also unter Berücksichtigung tatsächlicher Messdaten sowie Einbezug des Lastzyklus der *VDI 2198* und Herstellerangaben. Der errechnete Bedarf war somit meistens für einen spezifischen FFZ-Typ.

In engem Zusammenhang mit der Berechnung und Analyse des Energiebedarfs steht das Treibhauspotenzial der FFZ in Form der CO₂-Emissionen. Dies kann bspw. mithilfe der Ökobilanz bestimmt werden; hierzu gab es eine Reihe an Publikationen mit verschiedenen Methoden. Die Erstellung bedarf in der Regel der Verwendung einer Software für Ökobilanzierung, welche die Verknüpfung zwischen den Lebensphasen herstellt und im Hintergrund eine umfassende Datenbank für die verschiedenen Rohstoffe, Produktionsverfahren und Anwendungsfälle hat. Grundsätzlich ist für die Erstellung zunächst die Berechnung des Energiebedarfs erforderlich. Es zeigte sich, dass verbrennungsmotorisch-betriebene FFZ mit Diesel oder Gas mindestens doppelt so hohe Emissionen haben wie FFZ mit EM. In mehreren Untersuchungen war das Ergebnis, dass die meisten Emissionen in der Betriebsphase entstehen und diese durch den Einsatz grüner Energiepfade deutlich reduziert werden können. Je nach Land unterschieden sich die Ergebnisse aufgrund der Zusammensetzung des jeweiligen

Strommixes. Forscher in den USA beschäftigten sich bereits früher mit dem Vergleich, vor allem bedingt durch die Vielzahl an existierenden BzS-Anwendungen, an denen Messungen durchgeführt werden konnten. Grundsätzlich ist das Erstellen einer Ökobilanz aufwändig und auf einen bestimmten Anwendungsfall ausgelegt und daher sehr individuell. Die durchgeführten Vergleiche haben unterschiedliche Technologien einbezogen, wobei LIB insgesamt nur wenig Berücksichtigung fanden und oft gemeinsam mit PbB für den elektromotorischen Antrieb betrachtet wurden. Tabelle 3-1 stellt diese Ergebnisse zum Energievergleich einander gegenüber und zeigt die qualitative Bewertung der einzelnen Publikationen. Es zeigt sich, dass die Autoren alle den Energiebedarf der FFZ errechnen oder kennen; bei den ESS wird aber vorrangig PbB analysiert, wobei auch BzS vermehrt untersucht wurde; LIB fand wenig Beachtung. Den Energiebedarf der Infrastruktur und deren Effizienz berücksichtigen nur wenige der Veröffentlichungen. Die Emissionen wurden hingegen ausführlicher betrachtet als die zuvor genannten Kriterien. Allerdings handelt es sich bei den meisten veröffentlichten Untersuchungen um Messungen oder Analysen eines realen Anwendungsfalls ohne Erläuterungen zum schrittweisen Vorgehen oder der Veröffentlichung hiervon als eine allgemeingültige Methode.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung und Bewertung Stand der Forschung Energievergleich

		Gün-2015a	Fre-2017	Pac-2019	Zaj-2021	Gai-2008	Sch-2013	Fuc-2016	Kri-2019
Energie	Energiebedarf Flurförderzeug	●	●	●	●	●	●	●	●
	PbB	●	●	●	○	●	●	●	○
	Energiebedarf Energiespeicher	○	●	○	○	○	○	○	○
	LIB	○	●	○	○	○	○	○	○
	BzS	●	○	●	○	●	○	○	○
	Energiebedarf Infrastruktur	●	●	○	○	○	●	○	○
	PbB	●	●	○	○	●	●	●	●
	LIB	○	●	○	○	○	○	○	○
	CO ₂ -Emissionen	●	○	○	○	●	○	○	○
	BzS	●	○	○	○	●	○	○	○
	VM	○	○	○	○	●	●	●	●
	gesamt	●	●	○	○	○	●	○	○
	Planungs-/Berechnungsmethode	●	●	○	●	○	●	●	○
Allgemeingültigkeit	○	○	○	●	○	●	○	○	

umfänglich betrachtet

 teilweise betrachtet

 nicht betrachtet

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterscheiden sich die vorgestellten Veröffentlichungen stark in ihrem Detaillierungsgrad und den Informationen zur Berechnungsmethodik. Die Anzahl und Art der verwendeten Kennzahlen ist je nach gewähltem Anwendungsfall verschieden. Für die Berechnungen fanden stellenweise Vereinfachun-

gen statt. Die gezeigten Methoden rechnen anhand eines Anwendungsbeispiels, wobei die Eingangsgrößen und Berechnungen nicht durchgängig verfügbar gemacht werden. Die Skalierbarkeit und Erweiterbarkeit der Modelle ist daher erschwert möglich. Die verwendeten Kostenarten sind ebenfalls unterschiedlich, was zusätzliche Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Dies ist insbesondere bei den Veröffentlichungen aus den USA der Fall, da die Gegebenheiten dort hinsichtlich Kosten und Rahmenbedingungen von den europäischen Konditionen abweichen. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse stark vom Anwendungsfall und dem gewählten Szenario der Autoren abhängig sind.

Hinsichtlich der Gegenüberstellung der ESS berücksichtigen lediglich *Renquist et al.* BzS, PbB und LIB. Die übrigen Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit dem Vergleich von PbB mit BzS oder PbB mit LIB. Eine Methode zum wirtschaftlichen Vergleich von LIB und BzS wurde nicht veröffentlicht. Die umfangreichste Betrachtung der Kosten mit Erläuterung der Methode für BzS im Vergleich zu PbB liefern *Günthner und Micheli*.

Tabelle 3-2 zeigt die Gegenüberstellung dieser Ergebnisse und die qualitative Bewertung der Veröffentlichungen. Es wird deutlich, dass nur wenige Publikationen eine Vielzahl an Kostenarten berücksichtigen. Insbesondere in Bezug auf die Prozesskosten, also die unterschiedlichen Kosten, die vor allem durch Betankung/Laden sowie die vor- und nachgelagerten Prozessschritte und Wege entstehen, werden häufig Vereinfachungen getroffen. Die berücksichtigten Prozesszeiten spiegeln daher nur anteilig die tatsächlichen Kosten, die beim Einsatz entstehen, wider. Dies wiederum hat Auswirkungen auf die Personalkosten. Bei Energiekosten beziehen sich die Autoren häufig lediglich auf den Energiebedarf der FFZ mit Energiespeicher, die Infrastruktur und deren Wirkungsgrad wird ausgeklammert, Nebenverbraucher auf den FFZ, wie Bedien terminals, werden nicht berücksichtigt. Die Rahmenbedingungen für die Anwendungsbeispiele wurden als feste Annahmen aufgelistet ohne den Datenursprung näher zu erläutern. Ebenso beschrieben nur wenige die Berechnungsmethodik, sondern fokussierten die Ergebnisdarstellung. Da die meisten TCO-Berechnungen anhand eines festgelegten Beispiels durchgeführt wurden, ist die Allgemeingültigkeit kaum gegeben.

Tabelle 3-2: Gegenüberstellung und Bewertung Stand der Forschung Kostenvergleich

		Gün-2015a	VDI-2695	VDI-2497	McC-2010	Ren-2012	Lar-2013	Ram-2013	Mül-2016	Jia-2021	
Kosten	Dynamisches Verfahren	●	●	○	●	●	●	●	○	●	
	Antriebsart	EM	PbB	●		○	○	●	○	○	●
			LIB	○	○	○	○	○	○	○	○
		BzS	●			○	○	●	○	○	○
		VM	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Kostenarten (FFZ, Energiespeicher, Infrastruktur)	Anschaffung	●	●	○	●	●	○	○	○	○
		Betrieb/Wartung	●	○	○	○	○	○	○	○	○
		Energie	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Personal	●	○	○	○	○	○	○	○	○
		Prozess	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Entsorgung	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Rahmenbedingungen	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Planungs-/Berechnungsmethode	●	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Allgemeingültigkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

● umfänglich betrachtet ○ teilweise betrachtet ○ nicht betrachtet

Hinsichtlich der Prozessbetrachtung gab es bisher wenige Forschungstätigkeiten. In den genannten Veröffentlichungen zu energetischem und monetärem Vergleich erfolgten grundlegende Prozessvergleiche anhand verfügbarer technischer Daten oder Annahmen. Es gibt nur vereinzelte Veröffentlichungen zu Prozessanalysen, in denen die BzS-Technologie eingesetzt wurde und Messungen zu Leistungsverhalten, Energiebedarf oder Fahrzyklen durchgeführt wurden. Günthner und Micheli versuchten deswegen für weitere Klarheit hinsichtlich der Prozesse der BzS, meistens im Vergleich zu PbB, zu sorgen. Sie untersuchten im Anwendungsfall des Forschungsprojektes die Zuverlässigkeit der Systeme sowie die Dauer und physische Belastung der Handhabungsprozesse. Im Folgeprojekt gab es weitere Untersuchungen hinsichtlich der Prozesszeiten. Neben diesen Publikationen gibt es kaum wissenschaftlich verwertbare Erkenntnisse. Tabelle 3-3 stellt die Erkenntnisse dar und bewertet den Umfang der Inhalte qualitativ. Die meisten Forscher fokussierten BzS und führten gelegentlich als Vergleich PbB an, hierzu wurden jedoch meistens keine Messungen durchgeführt, womit kein Vergleich möglich war. LIB fanden außerdem in den Untersuchungen kaum Berücksichtigung. Es fällt auf, dass insbesondere die Detailbetrachtung der Prozesse, vor allem in Bezug auf die Prozesszeiten und deren Einfluss auf die Verfügbarkeiten, bisher wenig bis gar nicht fokussiert wurden. Alle Autoren bewerteten anhand eines speziellen Anwendungsfalls und haben für diesen die Ergebnisse veröffentlicht. Es handelt sich nicht um allgemeingültige Erkenntnisse. Zudem lag der Fokus stark auf Messungen und weniger auf einer Vorgehensweise oder Rechenmethodik.

Tabelle 3-3: Gegenüberstellung und Bewertung Stand der Forschung Prozessvergleich

		Gün-2015a	Sau-2009	Zha-2013	Dom-2015	Lot-2016	Man-2022	
Prozess	Energiespeicher	PbB	●	◐	○	○	○	●
		LIB	○	◐	○	○	○	○
		BzS	●	○	●	●	●	○
	Leistungsverhalten, Fahrzyklen		◐	○	●	●	●	○
	Verfügbarkeit		●	○	○	○	○	○
	Prozesszeit Betankung/Wechsel		◐	○	○	◐	◐	◐
	Gesamtprozesszeit		○	○	○	○	○	○
	Planungs-/Berechnungsmethode		◐	○	○	◐	○	◐
	Allgemeingültigkeit		○	○	○	○	○	○

● umfänglich betrachtet ◐ teilweise betrachtet ○ nicht betrachtet

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass bereits in mehreren Ländern Forscher zum Einsatz alternativer ESS in FFZ tätig sind, allerdings lag der Fokus stets auf einem spezifischen Anwendungsfall. Allgemeingültige Methoden, umfassende Vergleiche wie auch schrittweise Planungsvorgehen für die Bewertung von energetischen, monetären und prozessualen Kriterien konnten nicht identifiziert werden.

Erkenntnisse aus anderen Bereichen, in denen die Elektrifizierung sowie der Einsatz von Wasserstoff relevant sind, wie PKW, LKW, Flugzeuge, Schiffe oder Züge, können nur sehr eingeschränkt auf die Intralogistik übertragen werden, da sich die Anforderungen stark unterscheiden. Die Vergleiche basieren oft auf der Verbrennungstechnologie als Ausgangssituation und betrachten LIB und BzS als Alternativen. Die Anforderungen an den ESS unterscheiden sich stark in den einzelnen Branchen. Die vorgestellten Anwendungen sind von einer umfassenden (öffentlichen) Infrastruktur abhängig, während die Intralogistik innerhalb eines eigenen Ökosystems agiert.

3.2 Vergleich und Auswahl der FFZ-Energiespeicher im industriellen Umfeld

Wenn ein Unternehmen vor der Entscheidung für eine neue FFZ-Flotte bzw. deren ESS steht, gibt es für Planer und Entscheider diverse Möglichkeiten, um eigenständig an Informationen zu gelangen, die Technologien zu vergleichen und die Lösung des Problems anzugehen. Bei den Informationsquellen handelt es sich – neben wissenschaftlichen Publikationen – einerseits um die Hersteller mit deren Vertrieb (FFZ, ESS, Infrastruktur) und andererseits um übergeordnete Stellen, wie Organisationen, Verbände oder Fachzeitschriften. Da der Einsatz der Technologien und die Entscheidung für eine Alternative im industriellen Umfeld verankert ist, wird der dortige Umgang damit – neben den aufgezeigten Forschungstätigkeiten – ausführlich erläutert. Das Modell soll durch den Planer angewendet werden, wodurch die Verwendbarkeit in der Praxis diese Betrachtungen industrieller Vorgehensweisen erfordert. Die Ergebnisse einer Literaturrecherche und Marktanalyse für den europäischen Markt zu den öffentlich verfügbaren Informationen werden im Folgenden vorgestellt. Der Beratungsprozess der Unternehmen bei Kontaktaufnahme wird in der Marktanalyse nicht berücksichtigt, da dieser individuell und subjektiv ist und die Expertise der Gesprächspartner voneinander abweichen kann.

3.2.1 Vorgehen der Hersteller von Flurförderzeugen

Eine der wichtigsten Informationsquellen stellen die FFZ-Hersteller und deren Vertrieb dar. Der größte FFZ-Hersteller nach weltweitem Marktanteil in 2020/2021 ist *Toyota Industries*. Anschließend folgen *Kion*, *Jungheinrich*, *Misubishi Logisnext*, *Crown Equipment* und *Hyster-Yale Materials Handling* [War-2021]. Die folgenden Absätze widmen sich einer Marktanalyse mit der Betrachtung dieser sechs dominierenden FFZ-Hersteller und deren Umgang mit dem Vergleich und der Entscheidung für ein ESS.

Toyota Industries verkauft auf dem europäischen Markt als *Toyota Material Handling* FFZ mit PbB, LIB und BzS [Toy-2022a]. *Raymond* hat in Europa lediglich PbB und LIB im Angebot; in den USA bietet das Unternehmen ebenfalls BzS an. [Ray-2022] *Toyota Material Handling* hat sich innerhalb der Energierichtlinien bis 2030 verpflichtet, eine vollständige CO₂-neutrale Produktpalette anbieten zu können [Toy-2022a]. Im Zuge dessen treibt das Unternehmen neben LIB vor allem den Einsatz von BzS in FFZ weltweit voran, auch in kleinen europäischen Flottenanwendungen. Mittlerweile sind alle Baureihen mit BzS erhältlich. [Hes-2021a] Auf der Homepage liefert *Toyota Material Handling* detaillierte Informationen zu LIB und BzS. [Toy-2022a; Toy-2022c]

Hesse vergleicht zudem in einem Artikel auf der *Toyota*-Website die ESS und gibt Hinweise, wann sich die Umrüstung von PbB auf LIB oder von PbB auf BzS lohnen kann. Neben den Stärken und Schwächen der Technologien mit vorwiegend technischen Daten, wie Lebensdauer, Energieverbrauch, CO₂-Emissionen oder Prozessvereinfachungen, spricht er über die Kostenstruktur und hierbei die Betriebskosten. Zur Bewertung der Einsparpotenziale empfiehlt er die Bewertung von: Instandhaltung (Kosten, Arbeitszeit, Verschleiß, Lebensdauer), Nachhaltigkeit (Energiebilanz mit CO₂-Emissionen, Energiemenge für Betrieb des Logistikstandortes, Energiekosten), Staplerflotte (gesamter Energieverbrauch, Auslastung), Infrastruktur (Gegebenheiten vor Ort, ggf. Neubau, Baukosten, Verfügbarkeit örtliche Energieversorger), Fördermittel (Initiativen zur Förderung der Optimierung der Energieeffizienz) und Prozesse (Prozesseffizienz, finanzielle Bewertung Geräteverfügbarkeit). [Hes-2021b] *Adomat* vergleicht in einem ähnlich aufgebauten Artikel den VM mit dem EM. Seine Vergleichskriterien sind: Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit, Betriebskosten und Lärmbelästigung. [Ado-2023]

Toyota Material Handling wirbt damit, bei Kontaktaufnahme über verschiedene interne Beratungstools, bspw. einen Kostenrechner zu verfügen, der bei der Berechnung viele Basisinformationen einbezieht. Das Tool berücksichtigt unter anderem die Anschaffungskosten für FFZ sowie Infrastruktur, die jährlichen Instandhaltungskosten für FFZ und Infrastruktur, die zusätzlichen jährlichen Betriebskosten sowie die Förderung. Mit der Verwendung der Tools zielt das Unternehmen darauf ab, eine fundierte Empfehlung für den spezifischen Anwendungsfall liefern zu können. Die Tools sind nicht öffentlich zugänglich. [Hes-2021b]

Innerhalb der *Kion Group* bieten sowohl *Linde Material Handling* als auch *Still* die drei vorgestellten Technologien an. Insbesondere in der BzS-Technologie sind die beiden Unternehmen stark vertreten. [Kio-2020]

Still bietet alle drei ESS an; es gibt ausführliche Informationsseiten zu den ESS. Hinsichtlich der LIB wird im direkten Vergleich mit der PbB informiert; es werden Vorteile und technische Unterschiede aufgezeigt [STI-2022e; STI-2022d]. Es gibt eine zusätzliche tabellarische Gegenüberstellung von Elektro-¹⁴ und Dieselstapler anhand zwölf festgelegter Kriterien mit Bewertungen von ‚+‘ bis ‚+++‘. Wesentliche Aussage des Artikels ist die Abhängigkeit vom Einsatzprofil bei der Entscheidung für eine der beiden Antriebsformen für den Stapler. [STI-2022b]

¹⁴ ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen ESS

Zusätzlich hat *Still* ebenfalls seit mehreren Jahren FFZ mit BzS im Angebot und begleitet bspw. die größte europäische Flotte mit 137 FFZ. Seit Herbst 2023 stellt Still 24V-Ausgewählte Fahrzeuge können mit der Option ‚Fuel Cell ready‘ bestellt werden, sodass eine Integration des BzS – auch später – erfolgen kann. Eine nachträgliche Umrüstung in Bestandsfahrzeugen ist nicht möglich. [STI-2022a]

Auf der Unternehmenswebsite liefert *Still* einen ausführlichen Vergleich der drei ESS für den elektromotorischen Antrieb. Neben einer Auflistung der Vor- und Nachteile auf den einzelnen Seiten zu den Technologien bewertet der Vergleich noch anhand von fünf Kriterien die Eignung der Energiesysteme. Die gewählten Kriterien sind: Fahrzeugverfügbarkeit, Infrastruktur, Anschaffungskosten, Betriebskosten und Zukunftssicherheit. [STI-2022c] Im Webinar ‚Energiesysteme für eine wirtschaftlich nachhaltige Intralogistik‘ stellen *Grünke und Draenkow* diese Bewertung detailliert und mit vielen Zusatzinformationen vor. Da das Webinar live erfolgt ist, gibt es zusätzlich ein ausführliches Dokument mit weiteren Fragen und Antworten. Darüber hinaus wird grundsätzlich die Kontaktaufnahme für eine kompetente Beratung empfohlen. [Grü-2021]

Linde Material Handling liefert auf der Website ebenfalls detaillierte Informationen und Videos mit Vor- und Nachteilen zu den drei ESS, insbesondere zu LIB und BzS [Lin-2022b; Lin-2022e]. Speziell im Einsatz von BzS ist das Unternehmen als eines der ersten in den Markt eingestiegen. Mittlerweile sind über 80 % der Elektrofahrzeuge serienmäßig mit BzS bzw. der ‚h2ready‘-Option bestellbar. Die Erprobung der Technologie im Flotteneinsatz bei BMW ist seit mehreren Jahren erfolgreich. [BMW-2018; Lin-2022e]

Linde Material Handling bietet darüber hinaus mit dem ‚Energy Quick Check‘ ein Online-Tool, das mittels der Beantwortung von zehn Fragen eine Empfehlung für die Auswahl des ESS ausgibt. Die Fragen beschäftigen sich mit: derzeit eingesetztem Energiesystem (VM Erdgas/Diesel, PbB, LIB, BzS); Flottengröße; Schichtmodell; Möglichkeit für Pausen zum Nachladen/Tanken; Fahrzeugeinsatz Indoor/Outdoor; Beanspruchung (gering, mittel, stark); Auslastung der Fahrzeuge in Betriebsstunden; Bereitschaft für Nachhaltigkeit höhere Kosten zu akzeptieren; kaufentscheidendes Kriterium (niedrige Anschaffungskosten, niedrige Energiekosten, technisch optimale Lösung für individuelle Anforderungen). Das Ergebnis zeigt die Eignung der vier berücksichtigten Energiesysteme für den Anwendungsfall jeweils in Prozent. Die Kontaktaufnahme mit den eigenen Energieexperten wird neben weiteren Informationen zu den Technologien angeboten. Für die Analyse des individuellen Anwendungsfalls verwendet *Linde Material Handling* ein internes Kostentool, das nicht öffentlich zugänglich ist. Dabei liegen die Gesamtbetriebskosten in Form der TCO im Fokus. Diese spielen beim FFZ-Kauf

eine entscheidende Rolle – neben Anschaffungskosten haben vor allem die Betriebskosten mit den steigenden Energiekosten an Bedeutung gewonnen. [Lin-2022a]

Jungheinrich zeigt auf der Internet-Präsenz lediglich wenige Informationen zu BzS, informiert aber detailliert über das Angebot an PbB und LIB und deren Vor- und Nachteile für den jeweiligen Anwendungsfall [Jun-2022c; Pro-2020a; Pro-2020b]. *Jungheinrich* treibt insbesondere die Entwicklung von LIB seit Jahren stark voran und sieht darin die Zukunft der Batterien [Jun-2021b]. Dies liegt an erwarteter Kostensenkung durch industrielle Fertigung sowie durch den geringeren Platzbedarf der Zellen, der neue und ergonomischere Fahrzeugkonzepte ermöglicht. Bei BzS sind die Komplexität der Technologie sowie fehlende flächendeckende Infrastruktur für die Wasserstoffversorgung ein großes Hindernis. [Jun-2022a] *Jungheinrich* begleitet bereits mehrere europäische Projekte mit größeren Flotten mit BzS; auf Kundenwunsch bietet das Unternehmen dies an; die ‚Fuel-Cell Ready‘-Option ist für mehrere Fahrzeugtypen mit kleinen Fahrzeuganpassungen verfügbar [For-2018; ver-2022]. In einem Sonderbauwerk besteht die Möglichkeit der Umrüstung von Neufahrzeugen, die für PbB mit 24 V, 48 V oder 80 V ausgelegt sind. [Mai-2016, S. 3; War-2017] Ein Artikel zum Kostenvergleich weist auf die positiven wie auch negativen Effekte der LIB und BzS hin, wie reduzierte Personalkosten oder höhere Anschaffungskosten. [Jun-2022b] Für die Beratung und Entscheidung für ein ESS existiert ein mehrstufiges Beratungsmodell bestehend aus Bedarfserkennung, Analyse des Anwendungsfalls, Konzept mit Kosten- und Maßnahmenplan und Energiekonzept (inkl. Wirtschaftlichkeit und CO₂-Bilanz), Implementierung der Lösung/des Ökosystems sowie Optimierung. [Jun-2021a]

Mitsubishi Forklift Trucks bietet aktuell für den europäischen Markt als *Mitsubishi Logistics Europe* keine FFZ mit BzS an [mat-2019]. Der Hersteller zeigt auf der Internetpräsenz, auch denen der Untermarken, lediglich PbB und LIB und Informationen zu den beiden Batterien. [Mit-2022]

Die FFZ von *Crown Equipment* sind seit mehreren Jahren mit allen drei ESS für den elektromotorischen Antrieb erhältlich. Insbesondere bei BzS ist *Crown* bereits früh in die Forschung und Entwicklung eingestiegen und hat diese in den USA mithilfe eines eigenen Forschungszentrums stark vorangetrieben. [Cro-2008; Cro-2011] Die weltweit rund 4000 wasserstoffbetriebenen FFZ sind vorrangig in den USA im Einsatz. *Crown* unterstützt Kunden in enger Zusammenarbeit bei dem Vergleich der Technologie mit PbB [Mai-2016, S. 3]. Für den europäischen Markt umfasst das Angebot PbB und LIB [Cro-2022], auf Kundenwunsch werden ebenso BzS geliefert, eine Anpassung der Neufahrzeuge ist möglich. [Irr-2019, S. 3]

Hyster-Yale Materials Handling ist vor allem auf dem amerikanischen Markt vertreten; in den USA bietet das Unternehmen die drei ESS an. Auf der Homepage für den europäischen Markt gibt das Unternehmen und dessen Marken sowie Händler lediglich Auskunft über den Einsatz von Batterien. Für den Einsatz von BzS hat *Hyster-Yale* 2014 das Unternehmen *Nuvera Fuel Cells LLC* übernommen [Hys-2022b]. Durch die weite Verbreitung im amerikanischen Markt und die zunehmende Verwendung von BzS ist zu erwarten, dass diese bei Kundenwunsch ebenfalls auf dem europäischen Markt angeboten werden [Jör-2017; Kau-2018].

Auf der englischsprachigen Homepage für den US-Markt bietet *Hyster* zudem einen ‚Payback Calculator‘ an, der in zwei Schritten mit elf Fragen eine mögliche Amortisationszeit für FFZ mit BzS berechnet. Im ersten Schritt fragt das Tool die Informationen zum Anwendungsfall ab: Branche, Schichtbetrieb, Arbeitsstunden, Arbeitstage, Arbeitskosten und Anzahl FFZ-Fahrer. Der zweite Schritt widmet sich der Flotte mit Fragen zu: Anzahl eingesetzter Verbrennungs-FFZ, Anzahl FFZ, Anzahl Batterien je FFZ, Dauer Batteriewechsel/-ladung und Anzahl Wechsel je Schicht. Nach Eingabe der Informationen gibt das Tool, sofern der Anwendungsfall wirtschaftlich ist, eine Amortisationsdauer aus. Bei Anwendung mit zu hoher Amortisationszeit folgt der Hinweis, dass BzS für den eingegebenen Fall nicht die richtige Lösung darstellen. Details zur Berechnung liefert das Tool nicht; für weitere Fragen wird die Rücksprache mit einem Mitarbeiter empfohlen. [Hys-2022a]

3.2.2 Vorgehen der Hersteller von Energiespeichern und Infrastruktur

Laut einer Entscheidungshilfe des Ladegeräteherstellers *Fronius* sehen die Anwender häufig FFZ, ESS und Ladegerät als eine Einheit, weshalb die FFZ-Hersteller den wichtigsten Ansprechpartner darstellen. Diesen wird viel Vertrauen entgegengebracht, dass die optimale Lösung für die speziellen Anforderungen des Anwendungsfalls angeboten wird, gleichzeitig wird das Angebot dieser Gesamtlösung gefordert. Ladesysteme werden hierbei nur am Rande betrachtet, in der Regel liefert der Batteriehersteller des FFZ-Herstellers das passende Ladegerät. Um selbst mehr Transparenz und Vergleichbarkeit über den Beratungsprozess zu erhalten, können Unternehmen die Komponenten getrennt voneinander betrachten und die Preise separat verhandeln. Dies erhöht allerdings die Komplexität in der Angebotsphase. Durch die zusätzliche Anzahl an einbezogenen Unternehmen können allerdings zusätzliche Kompetenzen und das Know-how der anbietenden Betriebe berücksichtigt werden, die den Anwendungsfall ebenfalls analysieren und die optimale Lösung suchen. Dieses Vorgehen wird insbesondere dann interessant, wenn eine gesamtwirtschaftliche, transparente Betrachtung der Neuanschaffung der FFZ über den Lebenszyklus gefordert ist, mit besonderem Fokus auf die Betriebsphase. [Fro-2011, S. 5ff.]

Da die Kunden vom FFZ-Vertrieb die Bereitstellung der ESS und der Infrastruktur mit dem passenden Service erwarten, stellen diese für PbB und LIB auf ihren Homepages auch Informationen hierzu zur Verfügung und beraten hinsichtlich der auf ihre FFZ abgestimmten und zertifizierten Batterien¹⁵ mit passenden Ladegeräten. Insbesondere hinsichtlich LIB haben FFZ-Anbieter, wie *Jungheinrich* oder *Kion* begonnen, ihre eigene Forschung und Entwicklung aufzubauen oder Kooperationen einzugehen, um passende Ladesysteme anbieten zu können. [Mai-2016; Bat-2022, S. 25]

Die genannte Entscheidungshilfe von *Fronius* ist als Whitepaper für die Unterstützung bei der Beschaffung der Batterieladesysteme für FFZ mit PbB und LIB formuliert. Es beschreibt den Einfluss des Batterieladesystems auf die Gesamtkosten des FFZ. Einerseits fallen bei der Beschaffung zusätzlich zu FFZ und Batterie Kosten an und andererseits hat das Ladesystem Auswirkungen auf die Betriebskosten, in Form der Energiekosten, der Kosten für Ersatzbatterien oder den Batteriewartungskosten. Darüber hinaus beeinflusst die Ladeinheit die Auslegung der technischen Infrastruktur, z. B. deren Platzbedarf, Belüftungskonzepte und Stromanschlüsse¹⁶. Im Whitepaper vergleicht *Fronius* qualitativ ihre Batterielade-Lösungen mit grundlegenden Informationen zu den Technologien. Batterieladesysteme werden oft vom Batteriehersteller bzw. dem Stapleranbieter in einem abgestimmten Gesamtpaket verkauft. Für die Entscheidung hinsichtlich der Batterie beim FFZ liefert das Whitepaper keine Informationen. *Fronius* bietet ebenfalls bei Kontaktaufnahme einen Batterie-Betriebskosten-Check an. [Fro-2011, S. 4ff.] Weitere Batterieladesystemhersteller liefern keine Informationen für die Entscheidung zwischen LIB und PbB.

Beim Wasserstoffeinsatz bieten die FFZ-Hersteller in Europa bisher keine Gesamtlösung mit passenden BzS und Infrastruktur an, es wird stattdessen an Kooperationspartner vermittelt. *Hyster-Yale* hat mit der Eingliederung des Herstellers *Nuvera Fuel Cells LLC* als einziger bisher die Möglichkeit, eine eigene Gesamtlösung anzubieten [Nuv-2014]. *Nuvera* stellt sowohl BzS für die Stapler her als auch die passende Infrastruktur. Dadurch kann *Hyster-Yale* seinen amerikanischen Kunden ein ähnliches Angebot wie beim Batterieeinsatz bieten, auch mit dem zugehörigen Service für die Komplettlösung. [Nuv-2022; Nuv-2016]

Kion verfolgt eine ähnliche Strategie: *Linde Material Handling* entwickelte im Förderprojekt ‚KION HyPower-24V‘ seit 2020 ein 24 V-BzS für Lagertechnikgeräte. [NOW-

¹⁵ FFZ inkl. ESS bedarf als Gesamtsystem einer CE-Freigabe.

¹⁶ 230 V oder 400 V bzw. 16 A oder 32 A

2020] Die Produktionslinie für das 24-Volt-Brennstoffzellen-Hybridsystem wurde im Herbst 2023 in Betrieb genommen. [STI-2023]

Darüber hinaus hat die *FES GmbH Fahrzeug-Entwicklung Sachsen* mit dem ‚H2 E-Pack‘ ein hybrides BzS für FFZ entwickelt. Die *FES GmbH* entwickelt die BzS kundenspezifisch anhand der gestellten Anforderungen. [FES-2022] Die *GLOBE Fuel Cell Systems GmbH* entwickelte mit dem XLP80 ein Produkt für die Anwendung im 80 V-Gabelstapler, dessen Markteinführung 2023 erfolgte. Der Fokus liegt auf Zuverlässigkeit und Vernetzung der Systeme. [GLO-2022]

Da die Entwicklungen auf dem FFZ-BzS-Markt erst seit Kurzem voranschreiten, verwenden die FFZ-Hersteller bisher vorrangig die Produkte des amerikanischen Herstellers für BzS, *Plug Power*. Das Unternehmen ist seit über 20 Jahren mit mehr als 50.000 eingesetzten Systemen im Markt etabliert [Sch-2018; Plu-2022b]. Neben mobilen BzS werden auch stationäre Systeme hergestellt. Für FFZ-BzS ist *Plug Power* der größte Hersteller, seit 2022 ist das Unternehmen mit einem Sitz in Deutschland vertreten, von dem der europäische Markt bedient wird [Sch-2021]. Zusätzlich wird ein Service-Paket für die BzS ‚GenCare‘ angeboten, welches das Risiko auf *Plug Power* überträgt und die Gewährleistung auf die gesamte Laufzeit ausweitet. [Plu-2018a] Das Angebot von *Plug Power* wird durch die passende Wasserstoffinfrastruktur ‚GenFuel‘ ergänzt, die sowohl Speicher als auch Dispenser beinhaltet. [Plu-2018b] Auf der Homepage stellt *Plug Power* detaillierte Informationen und Spezifikationen zu den drei BzS-Typen ‚GenDrive‘ zur Verfügung, die in den Batterietrog eingebaut werden können. [Plu-2022a]

Neben *Plug Power* bieten noch weitere Hersteller, vor allem Industriegasunternehmen, Infrastruktur für BzS-FFZ-Anwendungen an. *Linde* hat bereits mehrere europäische Projekte umgesetzt; das Unternehmen bietet Lösungskonzepte entlang der kompletten Wertschöpfungskette von der Wasserstoffherstellung, über die Lieferung und den kompletten Infrastrukturaufbau mit Service an [Zör-2021; Lin-2017]. In einer Broschüre liefert *Linde Gas* Details zum Aufbau der Infrastruktur mit Vorteilen der Technologie bei FFZ im Vergleich zu Batterie oder VM. Die Vergleichskriterien sind: FFZ-Klassen, Einsatzbereich, Leistungsabgabe, Einsatzzeit und Betankungszeit. [Lin-2017]

Air Liquide bietet ebenfalls ein Versorgungskonzept für Wasserstoff in FFZ-Anwendungen an. [Air-2016]. Die *Propan Rheingas* vermietet mit der ‚H2easy‘ Lösung eine Wasserstofftankstelle mit angeschlossenen Flaschenbündeln [Möl-2021]. Auch *Heraeus* bietet Gaslieferung und Infrastrukturlösungen an [Geb-2021]. Die genannten Gaslieferanten stellen Informationen zu ihren Speicher- und Betankungsanlagen bereit, allerdings keine weiterführenden Vergleiche zur Ladeinfrastruktur. Darüber hinaus gibt

es Unternehmen, wie *Wystrach* oder *Hydrogen Refueling Solutions HRS*, die Wasserstoffinfrastruktur und Betankungsanlagen für die Anwendung verkaufen, allerdings keinen Wasserstoff liefern. [ver-2022; Wys-2022]

3.2.3 Informationen übergeordneter Stellen

Der Innovationscluster *Clean Intralogistics Net (CIN)*, in dem sich einige der genannten Unternehmen zusammengeschlossen haben, liefert auf der Homepage Informationen zu bestehenden Anwendungen mit BzS-FFZ, der Technologie generell sowie Neuigkeiten und Entwicklungen in der Branche. [CIN-2023; NOW-2017] Dort stellt es außerdem einen 2022 entwickelten CO₂-Emissionsrechner für Intralogistikanwendungen zur Verfügung. Dieser unterstützt Logistikplaner bei der Berechnung der Emissionen ihrer Flotte, abhängig vom eingesetzten ESS. Es stehen die acht gängigsten Gerätetypen mit PbB, LIB, BzS, Gas und Diesel zur Berechnung zur Verfügung. Neben der Fahrzeuganzahl wird die Anzahl der Schichten und das Einsatzszenario vereinfacht berücksichtigt. Als Energiedaten fließen die CO₂-Emissionen von Strommix sowie Wasserstoff ein. [CIN-2022]

Der *VDMA* ist darüber hinaus selbst aktiv in den Themenfeldern Brennstoffzelle und FFZ. In letzterem wurde in Kooperation mit dem *Verband der Elektro- und Digitalindustrie (ZVEI)*, ein Leitfaden für LIB veröffentlicht. Dieser zielt darauf ab, den Betreibern von FFZ-Flotten eine Hilfestellung zu sein und setzt dort an, wo der Verantwortungsbereich des FFZ- und des Batteriesystemherstellers endet. Neben Informationen und Hinweisen zur Technologie und der Dimensionierung der Infrastruktur vergleicht der LIB-Leitfaden an mehreren Stellen die Technologie mit PbB. Er stellt die Grundidee der unterschiedlichen Energieladezyklen bei verbrennungsmotorischem Stapler mit Diesel, bei elektromotorischem Stapler mit PbB und mit LIB vor. [VDMA-2019, S. 5ff.]

In einer Studie zur Marktentwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen sieht der *VDMA* unter nichtstraßengebundenen Anwendungen vor allem bei Gabelstaplern weiteres Wachstumspotenzial. Experten erwarten bis 2030 einen weiteren Anstieg von BzS in der Intralogistik. In niedrigen Leistungsklassen bis 19 kW erwarten die Experten 2030 bei Erreichen einer Elektrifizierung von 100 % bereits, dass 20 % der Stapler mit BzS versorgt sein werden mit einem Anstieg auf 40 % bis 2040. Auch in schwereren Leistungsklassen von über 19 kW, die derzeit kaum bedient werden, wird bis 2040 ein Anstieg der BzS auf bis zu 20 % erwartet, wobei dort weiterhin VM eingesetzt werden. Der Anteil dieser soll sich von 50 % im Jahr 2030 auf 30 % in 2040 reduzieren. [VDMA-2020, S. 188ff.]

Als regionaler Verein erarbeitete das hessische Kompetenznetzwerk *Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen e.V. (H2BZ-Initiative Hessen)* eine Broschüre zum Einsatz von BzS in FFZ. *Huss und Corneille* haben im Auftrag der Initiative Informationen zu BzS in der FFZ-Anwendung zusammengefasst und Impulse formuliert. Für die TCO-Betrachtung werden die relevanten Kostenarten genannt, die sich für BzS, Batterien und Diesel/Gas unterscheiden. Es handelt sich um: Anschaffungskosten Fahrzeug, Anschaffungskosten Infrastruktur, Kraftstoff-/Energiekosten, Betriebsdauer, Lebensdauer, Standzeiten durch Umrüstung und Umweltverträglichkeit. [Hus-2013]

Auf europäischer Ebene agiert das *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)* als öffentlich-private Partnerschaft zur Beschleunigung der Entwicklung und des Einsatzes von Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie [Fue-2022]. Eine vom *FCH JU* durchgeführte Studie lieferte Informationen zum Einsatz und Anwendungsbeispiele der BzS in FFZ. Darüber hinaus erfolgte ein kostenbasierter Vergleich zwischen BzS und PbB an folgendem Anwendungsbeispiel: Lageranwendung (30.000-40.000 m²), 330 Arbeitstage, Zweischichtbetrieb, 7 Arbeitsstunden je Schicht, keine Förderung. Wesentliche Erkenntnisse waren, dass – durch die höheren Verfügbarkeiten und höherer Fahrzeugproduktivität der BzS¹⁷ – der Einsatz der Systeme in 5-10 % niedrigeren TCO resultiert als batteriebetriebene Flotten. Zudem wies die BzS-FFZ-Anwendung mit einem Wert von neun einen hohen Technologiereifegrad auf und ist durch die hohe Anzahl eingesetzter Systeme eine der fortschrittlichsten BzS-Anwendungen. Die Entwicklungen unter Berücksichtigung der erwarteten Preisreduktionen¹⁸ zeigten, dass die Differenz sich auf 10-20 % erhöhen kann. [Fue-2017, S. 11ff.]

Die weltweite, von CEOs geführte Initiative *Hydrogen Council* widmete sich in einer Studie der Kostenperspektive und den erwarteten Entwicklungen für Wasserstoffanwendungen. Innerhalb der Transportbranche wurden Stapler ebenfalls berücksichtigt. In einer Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit von Gabelstaplern mit BzS im Vergleich zu konventionellen Alternativen kamen sie zu dem Ergebnis, dass Wasserstoff im Jahr 2030 einerseits wettbewerbsfähig im Vergleich zu konventionellen Optionen, dem VM, sein wird und andererseits die wettbewerbsfähigste kohlenstoffarme Lösung im Vergleich zu anderen Batteriesystemen darstellen wird. Wasserstofftechnologien sollten im Stapler-Einsatz demnach bereits vor 2030 unabhängig von lokalen Einflussfaktoren

¹⁷ Die BzS-Flotte besteht aus 100 FFZ (bei einer angenommenen Tankzeit von 2,5 Minuten), wohingegen die Batterieflotte 6 FFZ mehr erfordert (bei einer angenommenen Wechselzeit von 25 Minuten).

¹⁸ Die Industrieexperten erwarten geringere Kosten durch Optimierung des Wasserstoffbedarfs des BzS, durch geringere Wasserstoffkosten und durch Umstellung auf Dreischichtbetrieb.

und der Region wettbewerbsfähig sein. Mit der Zunahme von Anwendungen und infolgedessen Produktionszahlen werden zudem starke Preisreduktionen der BzS, der Infrastruktur wie auch des Wasserstoffs erwartet. [Hyd-2020, S. 9ff.] Zudem wurden Stapler in einem Anwendungsfall (Zweischichtbetrieb, Schichtdauer von acht Stunden, eine Betankung am Tag, Wasserstoffkosten von 6-7 USD¹⁹ je kg) bereits als wettbewerbsfähig betrachtet. Der Vergleich erfolgte mit 10 kW-Staplern mit EM und eingesetzter Batterie (ohne Angabe ob PbB oder LIB) als kohlenstoffarme Lösung und Stapler mit Diesel-VM als konventionelle Alternative. Abbildung 3-1 zeigt die erwartete Entwicklung der TCO für die drei Antriebsmöglichkeiten. Demnach haben BzS bereits 2023 ihre Gewinnschwelle gegenüber Batterien erreicht, gegenüber Diesel sind sie zum aktuellen Zeitpunkt die kostengünstigere Alternative. Der Trend bei BzS spiegelt die erwarteten Preisreduktionen für Technologie und Brennstoff wider, was ebenfalls die TCO reduziert. Zu den genannten Ergebnissen werden keine Berechnungen aufgeführt. [Hyd-2020, S. 45f.]

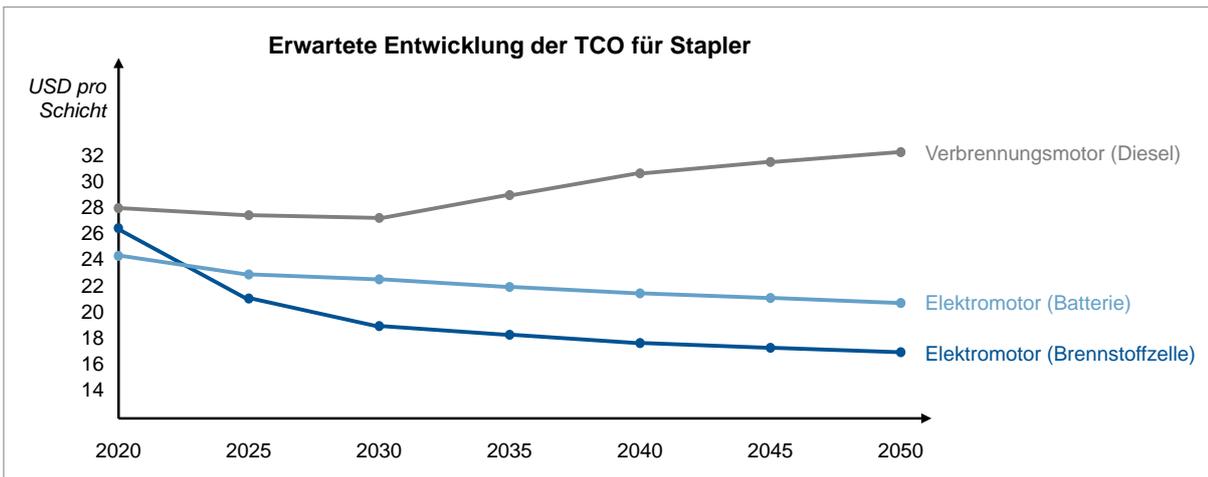


Abbildung 3-1: Erwartete TCO-Entwicklung für Stapler in USD je Schicht [Hyd-2020, S. 45]

Neben den vorgestellten Organisationen berichten Fachzeitschriften der Logistik- und Intralogistikbranche zunehmend über nachhaltige Antriebsarten und widmen sich hierbei teilweise dem Vergleich der ESS. Pauschale Empfehlungen werden als unmöglich betrachtet und die Beratung und Bewertung durch den Experten als unabdingbar. Insbesondere der Wasserstoffeinsatz in der Intralogistik ist in den vergangenen Jahren in den Medien präsent geworden. Anlass der Artikel ist vorrangig die Verbesserung der Nachhaltigkeit, die Optimierung der Energienutzung und die Erhöhung der Verfügbarkeiten.

¹⁹ 1 US-Dollar entsprach im Jahr 2020 im Jahresdurchschnitt 0,88 Euro. [UNE-2021].

3.2.4 Fazit zur industriellen Entscheidungsfindung

Die Entscheidung für einen ESS aus dem zur Verfügung stehenden Angebot stellt die Planer vor einige Herausforderungen. Es zeigt sich, dass die FFZ-Hersteller mit dem größten Marktanteil PbB, LIB und BzS zum Antrieb des Elektromotors anbieten und einsetzen, jedoch den Vertrieb von BzS unterschiedlich stark verfolgen. Beim Einsatz von Batterietechnologien ist es üblich, dass der FFZ-Anbieter umfassend berät und Batterie sowie Ladegerät mit anbieten kann. Bei BzS sind die Prozesse nicht integriert, es wird mit zusätzlichen Unternehmen für die BzS und die Infrastruktur kooperiert, was die Angebotsphase komplexer macht. Durch diese Trennung erhält der Kunde allerdings eine höhere Transparenz sowie weitere beratende Experten für die Umsetzung.

Aufgrund der Vielzahl an zu berücksichtigenden Kriterien empfehlen bei der Entscheidung für eine der Technologien alle Hersteller neben den Informationen auf den Internetseiten eine Kontaktaufnahme. Dadurch können die Energieexperten der Unternehmen eine detaillierte Bewertung des Anwendungsfalls (mit internen, nicht öffentlich verfügbaren Tools) durchführen und eine umfassende Beratung anbieten. Hier steht zumeist die Kostenbetrachtung im Fokus. Bei der Kostenoptimierung, insbesondere in der Betriebsphase, spielt das gewählte ESS eine wesentliche Rolle; je nach Unternehmensart kann die Intralogistik einen beachtlichen Anteil des Gesamtenergiebedarfs darstellen, bspw. in Logistikzentren [Fre-2017, S. 275f.; Fro-2011, S. 4]. Die online zur Verfügung gestellten Informationen liefern größtenteils Auskunft zu den Technologien und deren wesentlichen Stärken und Schwächen – bei unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Manche Hersteller bieten Vergleiche an, in Form von Artikeln mit qualitativen Vergleichen anhand der für das Unternehmen wichtigsten Kriterien oder kleine Bewertungs-Tools. Bei den Gegenüberstellungen wählen die Hersteller teilweise ähnliche Kriterien, jedoch priorisieren die Hersteller die Kriterien unterschiedlich und intransparent, was die Komplexität des Planungsproblems zeigt.

Tabelle 3-4 fasst die Erkenntnisse der Marktanalyse für FFZ-Hersteller hinsichtlich des Vergleichs der Technologien und der Entscheidungsunterstützung zusammen. Die Tabelle zeigt, inwiefern die Technologien PbB, LIB, BzS in FFZ des Herstellers in Europa bereits eingesetzt werden, ob diese als Serienprodukt (z. B. ‚h2-ready‘) bestellt werden können oder ob ein Sonderbau (insb. für BzS) nötig ist, ob online Informationen zu den ESS bereitgestellt sind, inwieweit ein Vergleich veröffentlicht wurde und ob ein interaktives Vergleichstool existiert.

Tabelle 3-4: Zusammenfassung Marktanalyse FFZ-Hersteller

		Toyota Material Handling	Linde Material Handling	STILL	Jungheinrich	Mitsubishi Logisnext	Crown Equipment Corp.	Hyster-Yale Materials Handling
Einsatz in Europa	PbB	●	●	●	●	●	●	●
	LIB	●	●	●	●	●	●	●
	BzS	●	●	●	●	-	-	-
Bestellung Serienprodukt	PbB	●	●	●	●	●	●	●
	LIB	●	●	●	●	●	●	●
	BzS	●	●	●	-	-	-	-
Bestellung auf Anfrage (Sonderbau)	PbB	-	-	-	-	-	-	-
	LIB	-	-	-	-	-	-	-
	BzS	-	-	-	●	-	●	●
Informationen zu Technologien	PbB	●	●	●	●	●	●	●
	LIB	●	●	●	●	●	●	●
	BzS	●	●	●	-	-	-	●
Online-Vergleich	PbB	●	-	●	-	●	-	●
	LIB	●	-	●	-	●	-	●
	BzS	●	-	●	-	-	-	●
	VM	●	-	●	-	-	-	●
Interaktives Vergleichstool	PbB	-	●	-	-	-	-	●
	LIB	-	●	-	-	-	-	●
	BzS	●	-	-	-	-	-	-
	VM	●	-	-	-	-	-	●

Die Hersteller haben in Europa vermehrt FFZ mit BzS im Einsatz, wobei sich die Technologie noch in einer frühen Marktphase befindet. Aufgrund des hohen Marktpotenzials beschäftigen sich in Europa Unternehmen zunehmend mit der Herstellung von BzS für FFZ. Dadurch haben diese unterschiedlich viel Erfahrung mit der Technologie, was sich auf die Beratung wie auch die Bewertung der Lösungen auswirken kann. Es ist nicht bekannt, ob die internen Tools bereits umfassend den Einsatz von BzS bewerten können und mit welcher Vorgehensweise diese arbeiten. Grundsätzlich bestehen aufgrund der fehlenden Transparenz diesbezüglich Unsicherheiten, bspw. hinsichtlich der Auslegung der Infrastruktur oder der Lebensdauer der Komponenten. Weiterhin kann nicht bewertet werden, inwieweit strategische Entscheidungen der Hersteller oder subjektive Einschätzungen der Experten die Beratung beeinflussen.

Durch die Arbeit der Innovationscluster, Verbände, Forschungseinrichtungen, Initiativen und Partnerschaften wird einerseits die Marktreife der BzS in FFZ erhöht und andererseits versucht mehr Transparenz über die Technologie und deren Unterschiede zu PbB und LIB zu schaffen. Die relevanten Veröffentlichungen fokussieren stark die Wasserstofftechnologie. Die Analysen zeigen oftmals, dass BzS bereits heute wirt-

schaftlich eingesetzt werden können und in vielen Anwendungsfällen die wettbewerbsfähigste Lösung darstellen. Das wesentlichste Kriterium stellen die TCO dar, da diese als wichtigster Entscheidungsfaktor für oder gegen eine Technologie gesehen werden. Allerdings hemmen fehlende Erfahrungen im Einsatz sowie der zeitliche Aufwand in der Beschaffung und mangelnde Informationsverfügbarkeit für Anwender den Einsatz der BzS. Die Aussagen der Berichte in Fachzeitschriften der Logistik- und Intralogistikbranche decken sich mit den zuvor genannten Punkten. Anhand der vermehrten Berichte zeigt sich die zunehmende Relevanz von LIB und BzS im FFZ-Markt, vor dem Hintergrund der Erhöhung von Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Verfügbarkeit. Es wird deutlich, dass BzS, ebenso LIB als weitere Technologie im Portfolio betrachtet werden und diese sich nicht substituieren.

Mithilfe der bereitgestellten Informationen können Planer sich somit einen guten Überblick über die ESS verschaffen und die grundsätzliche Eignung der jeweiligen Technologie für ihren individuellen Anwendungsfall evaluieren. Sie sehen die Vielfältigkeit der Kriterien, die in eine Entscheidung einfließen. Allerdings liefert die Recherche und Marktanalyse wenige quantitative, technische Daten und Hintergründe zu durchgeführten Berechnungen, wodurch eine nachvollziehbare und fundierte Bewertung sowie eine Messbarkeit der Ergebnisse erschwert ist. Die bereitgestellten Informationen und Vergleichswerkzeuge genügen nicht, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können. Die Kontaktaufnahme mit den Herstellern ist daher erforderlich für die Entscheidung und Auswahl eines ESS.

4 Forschungsbedarf und wissenschaftliche Fragestellung

Dieses Kapitel umfasst die Formulierung des Forschungsbedarfs und der wissenschaftlichen Fragestellung für diese Dissertation. Die Erkenntnisse des in Kapitel 3 dargestellten Stands der Wissenschaft und Technik dienen der Spezifizierung der resultierenden Forschungslücke (Abschnitt 4.1). Daraus lassen sich die Forschungsfragen und Forschungsziele ableiten (Abschnitt 4.2). Abschließend folgt die Erläuterung des Vorgehens zur Zielerreichung (Abschnitt 4.3).

4.1 Definition der Forschungslücke

Elektromotorische Antriebe haben sich bei FFZ bereits mit einem hohen Marktanteil durchgesetzt. PbB werden seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Technische Weiterentwicklungen haben das Portfolio an einsetzbaren ESS darüber hinaus erweitert, wodurch bspw. die Energieeffizienz und Verfügbarkeit erhöht und die Betriebskosten gesenkt werden können. Die Planung der FFZ-Flotten mit den eingesetzten ESS hat somit an Wichtigkeit gewonnen. Während LIB häufig eingesetzt werden, hemmt bei BzS die fehlende Erfahrung, mangelnde Informationsverfügbarkeit sowie der Mehraufwand für die Planung den Einsatz. Es wurde festgestellt, dass die Entscheidungsfindung aktuell umfangreiche Erfahrung erfordert und pauschale Empfehlungen nicht getroffen werden können.

FFZ-Anbieter unterstützen die Planer bei der detaillierten Analyse des Anwendungsfalls und bei der Lösungsfindung. Dies geschieht vorrangig in der Beratung mit Energieexperten. Die FFZ-Hersteller liefern auf ihren Internetseiten Informationen zu PbB, LIB und größtenteils zu BzS. Einige stellen einen qualitativen Vergleich zur Verfügung mit weiteren Informationen oder haben kleine Online-Tools für eine erste grobe Einschätzung. Es sind allerdings keine umfangreichen, multikriteriellen Tools oder Bewertungsmethoden mit Vorgehensschritten und dem Einbezug technischer Daten verfügbar. Die Anbieter mit dem größten Marktanteil haben unterschiedlich viel Erfahrung im Einsatz der ESS, insbesondere in BzS-Projekten. Die Expertise hinsichtlich der drei Technologien PbB, LIB und BzS kann somit voneinander abweichen. Außerdem verfolgen sie die Vermarktung der ESS unterschiedlich stark. Hierdurch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Unternehmensinteressen und strategische Ziele in die Beratung einfließen. Da die Hersteller gewinnorientiert handeln, kann die Beratung und Bewertung und Preiszusammensetzung für die Planer nicht vollumfänglich zugänglich

und transparent gemacht werden, wie bspw. die Vereinbarungen mit Batterie- oder Ladegerätlieferanten. Die Planer müssen dem Berater großes Vertrauen entgegenbringen. Die Hersteller fokussieren bei der Bewertung vorrangig die Kosten in Form der TCO und auf Wunsch die Energiebilanz. Diese bezieht sich vorrangig auf FFZ inkl. ESS. Sobald mehrere Lieferanten eingebunden sind, wie aktuell beim Einsatz von BzS, hat der Planer die Aufgabe, die Informationen zusammenzuführen und für sich zu bewerten. Dies stellt insbesondere für den Aufbau der H₂-Infrastruktur eine große Herausforderung dar.

In der Wissenschaft widmeten sich mehrere Autoren dem Einsatz und Vergleich der alternativen ESS zur klassischen PbB – mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Einige Arbeiten beschäftigten sich mit dem Energiebedarf der FFZ und teilweise zusätzlich deren ESS PbB oder BzS, allerdings ohne umfassende Berücksichtigung der Infrastruktur. In engem Zusammenhang damit gab es im Hinblick auf die Ökobilanz und die Emissionen der Technologien mehrere Untersuchungen. Hier fällt vor allem der Unterschied zum klassischen VM ins Gewicht. Die Analysen zeigten, dass insbesondere in der Nutzungsphase die meisten Emissionen entstehen, die durch grüne Energiequellen bei elektromotorischem Antrieb reduziert werden können. Eine wichtige Information für Planer wäre somit, Transparenz über den gesamten Energiebedarf der Flotte in der Nutzungsphase zu haben. Dieser wirkt sich einerseits auf die Emissionen und andererseits auf die Energiekosten aus. Hinsichtlich wirtschaftlicher Bewertungen gab es Untersuchungen für festgelegte Anwendungsfälle, die sich stark im Detaillierungsgrad unterscheiden. Insbesondere in Bezug auf Prozesskosten, die direkten Einfluss auf Personalkosten haben, werden häufig Vereinfachungen und Annahmen getroffen ohne tiefere Berücksichtigung der Prozessunterschiede. Es fällt auf, dass sich die Betrachtungen aus Wissenschaft und industriellem Umfeld unterscheiden. In der Forschung werden häufiger PbB oder LIB als die wirtschaftlichere Option betrachtet, wohingegen bei den verfügbaren Informationen aus der Industrie BzS einen Vorteil hatten. Die Eingangsgrößen der Berechnungen wurden nur selten transparent gemacht; es handelte sich vorrangig um Messdaten aus realen Projekten, welche in der Planungsphase nicht verfügbar sind. Der Grund für die Unterschiede in den Ergebnissen der Vergleiche resultiert aus der Verwendung verschiedener Berechnungsmethoden, einer individuellen Anzahl an einbezogenen Kennzahlen und Kostenarten sowie den tatsächlichen Werten für die Kosten. Wie angedeutet, bleiben die Prozessunterschiede und -zeiten, die die Verfügbarkeit der FFZ beeinflussen, weitestgehend unberücksichtigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Forschungsfeld wenig publiziert wurde. Es gab vereinzelte Bewertungen des Leistungsverhaltens oder der Fahrzyklen beim Einsatz eines ESS.

Abbildung 4-1 dient der Verdeutlichung der Prozessunterschiede zwischen den Technologien. Während bei BzS – ähnlich wie auch VM – Betankungsvorgänge zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit durchzuführen sind, werden die Batterien beim Einsatz von PbB aufgrund der langen Ladezeiten zumeist gewechselt und bei LIB über den Tag verteilt zwischengeladen. Diese unterschiedlichen Formen haben starke Auswirkungen auf den Betrieb und insbesondere die Verfügbarkeiten der FFZ und sollten bereits bei der Planung berücksichtigt werden.

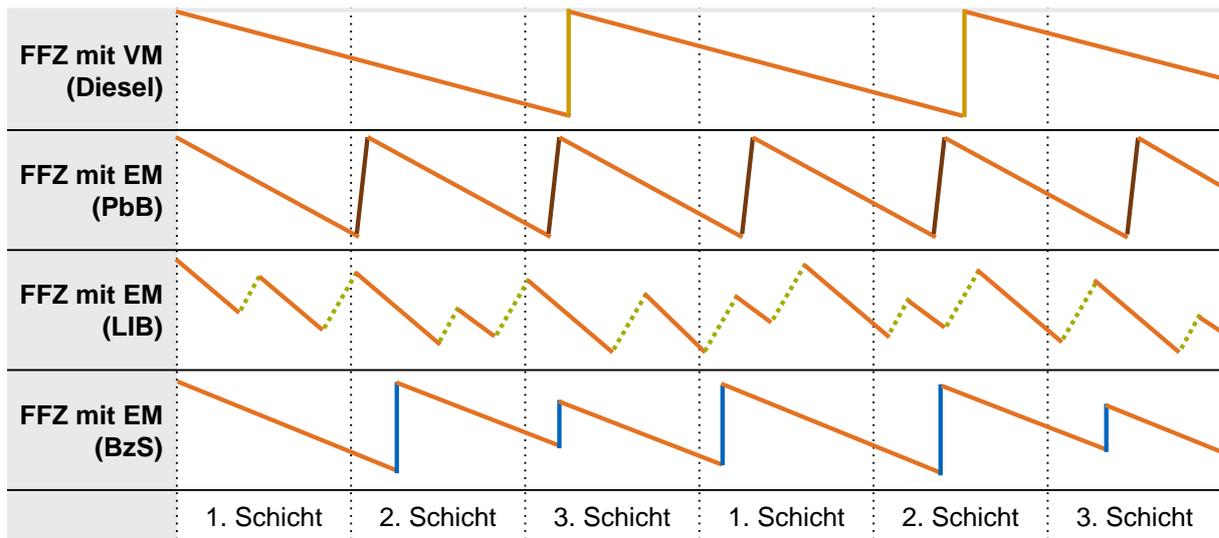


Abbildung 4-1: Grundidee zum Vergleich der Energieladezyklen, eigene Darstellung in Anlehnung an Linde Material Handling in [VDMA-2019, S. 16]

Ausführlichere Informationen lieferten erst *Günthner und Micheli*. Ausgangssituation im Forschungsprojekt ‚H2IntraDrive‘ war die Frage, wie die Prozesse beim Einsatz von BzS gestaltet und ob BzS wirtschaftlich eingesetzt werden können. Die Autoren betrachten einzelne Teilbereiche und bewerten diese. Dies erfolgte aber nicht vollumfänglich und nicht als ein Modell mit Berücksichtigung der Wirkzusammenhänge. Sie führten Analysen und Messungen an der Pilotflotte mit BzS und an PbB-FFZ durch, um grundsätzliche Empfehlungen für die Wasserstofftechnologie geben zu können, was bspw. im veröffentlichten Leitfaden resultierte. Der Bericht zeigte hierdurch auch weiteren Forschungsbedarf auf.

Trotz der veröffentlichten Analysen in den Themenbereichen bleiben mehrere offene Fragestellungen. Zusammenfassend kann die Forschungslücke wie folgt charakterisiert werden:

- Für die genannten Herausforderungen existieren verschiedene Lösungsansätze. Diese betrachten jedoch nur die Lösung von Teilbereichen, wie der Be-

trachtung der TCO eines realen Falls, und können nur bedingt zu einem Gesamtkonzept kombiniert werden. Es gibt keine **umfassende, multikriterielle Methode** mit Verknüpfung der verschiedenen Kriterien und Berücksichtigung der Wirkzusammenhänge für eine fundierte Entscheidung.

- Es fehlen **allgemeingültige Konzepte** für Gegenüberstellung und Bewertung der ESS bei FFZ ohne Einbezug von Messdaten aus realen Anwendungen für die Identifikation des geeigneten Systems für den individuellen Anwendungsfall. Bisherige Veröffentlichungen verwenden für den Vergleich bereits umgesetzte Projekte und führten dafür Messungen sowie Analysen durch. Diese Daten stehen dem Planer bei der Entscheidung für ein ESS in der Planungsphase nicht zur Verfügung.
- Es existiert kein multikriterielles Modell für das Gegenüberstellen der ESS in der **Planungsphase**. Erfolgte Bewertungen widmeten sich vorrangig der nachträglichen Analyse eines umgesetzten Projektes; die Hilfestellungen der Hersteller liefern lediglich grobe Orientierungen.
- Planer benötigen eine **herstellerunabhängige Hilfestellung**, um die verschiedenen ESS systematisch und transparent miteinander vergleichen und die geeignete Lösung für ihren individuellen Anwendungsfall identifizieren zu können.
- Für die Bestimmung des am besten geeigneten ESS kann eine **Vielzahl an Kriterien** berücksichtigt werden. Bisher durchgeführte Vergleiche verwendeten eine unterschiedliche Anzahl und insgesamt unterschiedliche Kennzahlen – oft ohne Begründung der subjektiven Auswahl. Es fehlt eine Übersicht zu den zu berücksichtigenden Daten und zur Erfassung der notwendigen Informationen für den objektiven Vergleich von energetischen, ökonomischen wie auch prozessualen Kennzahlen in der Planungsphase.
- Es gibt für die Entscheidung für den geeigneten ESS eine Vielzahl an möglichen **Zielgrößen**, die optimiert werden können. Die Unternehmen müssen für ihre Entscheidung eine Balance finden zwischen Kostenminimierung in der Anschaffung, Kostenminimierung in der Nutzung, Reduktion der Energiebedarfe in der Nutzungsphase sowie Erhöhen der Verfügbarkeiten durch Prozesszeiteinsparungen.

4.2 Formulierung der Forschungsfragen und Forschungsziele

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Schließen der Forschungslücke hinsichtlich des Fehlens eines umfassenden Konzeptes zur Entscheidung für den geeigneten ESS in FFZ im individuellen Anwendungsfall. Eine multikriterielle und objektive Bewertung des Flotteneinsatzes mit PbB, LIB oder BzS unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Infrastruktur ist ausschlaggebend für die Auswahl der am besten für den Anwendungsfall geeigneten Technologie und damit für die Realisierung der Optimierungspotenziale. Die folgende Forschungsfrage soll dabei helfen, die Forschungslücke zu schließen:

Wie gestaltet sich ein allgemeingültiges, multikriterielles Vorgehensmodell zum Vergleich und zur systematischen Bewertung des Einsatzes der verfügbaren Energiespeichersysteme in FFZ-Flotten für den spezifischen Anwendungsfall?

Neben dieser leitenden Forschungsfrage ist die Erarbeitung zur besseren Strukturierung in mehrere Teilforschungsfragen untergliedert:

- 1) Wie ist ein multikriterielles Modell mit mehreren Bewertungsbestandteilen aufzubauen und welche Aspekte sowie Parameter müssen berücksichtigt werden, damit die Unterschiede der Technologien hinreichend abgebildet werden?
- 2) Wie können die Planungsalternativen hinsichtlich energetischer, monetärer und prozessualer Ergebnisgrößen analytisch bewertet werden und wie kann ein Gesamtkonzept unter Einbeziehung der identifizierten Parameter und der Wirkzusammenhänge aussehen?
- 3) Wie kann das Vorgehensmodell in der Planungsphase bei der Entscheidungsfindung im individuellen Anwendungsfall unterstützen – unter Berücksichtigung der besonderen Unternehmensanforderungen?

Mithilfe dieser Forschungsfragen soll die identifizierte Forschungslücke geschlossen werden. Im ersten Kapitel dieser Arbeit wurde bereits die Zielsetzung aus praktischer Sichtweise und den dort existierenden Problemstellungen beschrieben. Diese Dissertation zielt darüber hinaus darauf ab, einen Beitrag zum aktuellen Stand der Wissenschaft zu liefern.

Die übergeordnete Zielsetzung hierfür ist die methodische Aufarbeitung und Entwicklung eines allgemeingültigen, multikriteriellen Vorgehensmodells zum Vergleich und

zur Bewertung des Einsatzes der ESS in FFZ-Flotten für den spezifischen Anwendungsfall.

Das Vorgehensmodell soll einerseits Forschern und andererseits Planern von FFZ-Flotten, sowohl auf Anwenderseite als auch auf Herstellerseite, als neutrales Werkzeug für die Entscheidungsfindung dienen und Handlungsempfehlungen hierfür aufzeigen. Es soll helfen, für den individuellen Anwendungsfall und anhand der Unternehmensanforderungen die am besten geeignete Lösung zu identifizieren. Gleichzeitig soll es Transparenz im Vergleich der einsetzbaren Technologien hinsichtlich monetärer, energetischer und prozessualer Optimierungspotenziale liefern. Das Modell dient vorrangig dem Einsatz in der Planungsphase für die Systembewertung, den -vergleich und als Entscheidungsunterstützung für die geeignete Technologie.

4.3 Vorgehensweise zur Zielerreichung

Das gewählte Vorgehen zur Bearbeitung der beschriebenen Zielstellung und der Modellentwicklung orientiert sich am vorgestellten Modellbildungsprozess bzw. -zyklus nach *VDI-Richtlinie 4465* (Unterabschnitt 2.3.3), der in Abbildung 2-12 dargestellt ist. Tabelle 4-1 ordnet die Kapitel dieser Dissertation den Abschnitten im Modellbildungsprozess zu und listet die Erarbeitung der Inhalte der Phasen auf.

Tabelle 4-1: Zuordnung der Vorgehensweise dieser Arbeit zu Abschnitten im Modellbildungsprozess

Abschnitt im Modellbildungsprozess	Erarbeitungsinhalte der Phasen im Modellbildungsprozess	Kapitel in Dissertation
Aufgaben- und Zielformulierung	<ul style="list-style-type: none"> – Anforderungsermittlung – Aufgaben und Ziele des Modells – Festlegung des Untersuchungsraums 	4 / 5
Systemanalyse und Konkretisierung Zielstellung	<ul style="list-style-type: none"> – Konzeptentwurf – Systemanalyse zu Elementen, Merkmalen, Parametern, Ursache-Wirkungsbeziehungen – Festlegung der relevanten Systemaspekte 	2 / 3 / 5 / 6
Formale Modellbeschreibung und -implementierung	<ul style="list-style-type: none"> – Formale Beschreibung des Modells – Modellentwicklung zur quantitativen Bewertung 	6 / 7
Verifikation und Validierung	<ul style="list-style-type: none"> – Prüfung Stimmigkeit der Ergebnisse – Prüfung Anforderungserfüllung – Bewertung Nutzen und Übertragbarkeit 	6 / 7 / 8

Die Identifikation der Forschungslücke in diesem Kapitel liefert bereits erste Hinweise auf die Anforderungen, die im folgenden Kapitel weiter detailliert werden, was in der Anforderungsermittlung zur Konkretisierung der Aufgaben und Ziele des Modells resultiert. Nach weiterer Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands wird basierend auf der Systemanalyse ein erster grober Entwurf für den Aufbau des Modells vorgestellt. Die erarbeiteten Inhalte zu den technischen Grundlagen der ESS wie auch zum Stand der Wissenschaft und Technik liefern eine wesentliche Basis für die in Kapitel 6 folgende Systemanalyse mit der Identifikation und Definition der einzelnen Elemente, Parameter und Methoden des Vorgehensmodells. Dies fließt in die formale Beschreibung der Bestandteile des Modells ein. Die gesammelten Erkenntnisse werden in Kapitel 7 in die Entwicklung des Gesamtmodells zur quantitativen Bewertung überführt. Die Verifikation und Validierung begleitet die genannten Prozessschritte und wird in Kapitel 8 behandelt.

5 Anforderungsermittlung und Konzeptionierung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines multikriteriellen Vorgehensmodells für den Vergleich und die Bewertung verschiedener ESS für FFZ-Flotten in Form eines analytischen Modells. Für die Modellbildung ist zunächst eine Anforderungsdefinition erforderlich, Abschnitt 5.1 stellt diese vor. Ausgehend davon beschäftigt sich Abschnitt 5.2 mit der Festlegung des Untersuchungsraums dieser Arbeit. Abschnitt 5.3 zeigt einen darauf aufbauenden ersten Konzeptentwurf.

5.1 Identifikation der Anforderungen an das Modell

Die Anforderungsermittlung zur Konkretisierung der Aufgaben und Ziele des Modells erfolgt anhand des identifizierten Handlungsbedarfs. Dieser basiert einerseits auf der Grundlagenanalyse in Kapitel 2. Andererseits fließen die weiteren Erkenntnisse aus Stand der Wissenschaft und Technik in Kapitel 3 ein – unter Berücksichtigung existierender Vergleichsmethoden in der Forschung sowie dem Vorgehen zur Entscheidungsfindung im industriellen Umfeld. Darüber hinaus greift die Anforderungsermittlung auf Erkenntnisse der wissenschaftlichen Begleitforschung im Forschungsprojekt ‚FFZ70: Einsatz von 70 wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen innerhalb des BMW Werks Leipzig‘ [Man-2022] durch den *Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik* zurück. Hierin wurde der Einsatz der BzS in einer FFZ-Flotte detailliert untersucht.

Im Rahmen von Expertengesprächen wurden Ziele und Anforderungen verschiedener Anspruchsgruppen identifiziert. Die unstrukturierten Interviews ohne festen Frageleitfaden erfolgten mit Fachexperten aus dem ‚FFZ70‘-Projektkonsortium sowie aus dem *CIN*. Diese Form des Interviews wurde gewählt, damit die Gesprächspartner die Möglichkeit hatten, ihre Erfahrungen und Erkenntnisse und die für sie wichtigsten Aspekte der Themenstellung frei zu kommunizieren [Dör-2016, S. 369]. Der Gesprächsschwerpunkt war die häufigsten Fragen und Unklarheiten zu BzS-FFZ aus der jeweiligen Sichtweise zusammenzutragen. Die Gesprächspartner waren drei Energieexperten der beiden marktführenden FFZ-Hersteller, ein Servicemitarbeiter für BzS-FFZ-Flotten, ein FFZ-Vertriebsmitarbeiter, ein Logistikplaner der Anwenderseite sowie zwei operative Teamleiter, die eine BzS-Flotte betreuen und deren Implementierung begleiteten. Die Auswahl der Befragten setzte eine mehrjährige Erfahrung und aktive Tätigkeit im Umgang mit den drei betrachteten ESS voraus. In den Gesprächen zeigte sich, dass insbesondere in großen Unternehmen der Einsatz von BzS-FFZ viel Aufmerk-

samkeit bei Vorstand und Werkleiter hat, allerdings stehen dort strategischere Forderungen im Fokus, die sich von denen der operativen Ebene unterscheiden. Die Planer bekommen deren Anforderungen und die Machbarkeitsprüfung vorgegeben, bei der Überprüfung und tiefergehenden Analyse dieser gliedern sie sich weiter in messbare Größen auf. Die Anforderungen unterscheiden sich je nach Anspruchsgruppe und hierarchischer Position im Unternehmen. Die Erkenntnisse sind in Abbildung 5-1 dargestellt. Die hierarchischen Stufen sind darin aufgezeigt, wie sie in großen Unternehmen vorherrschen; für kleinere Unternehmen lassen sich diese zusammenführen. Für die Identifikation der Anforderungen konnten die genannten Aspekte wie folgt kategorisiert werden: Energie/Ökologie, Ökonomie, Prozess/Technologie, Außenwirkung und Sicherheit. Die Wechselwirkungen wurden hierbei nicht berücksichtigt, z. B. die Auswirkungen des Energiebedarfs in Form der Energiekosten auf die Ökonomie.

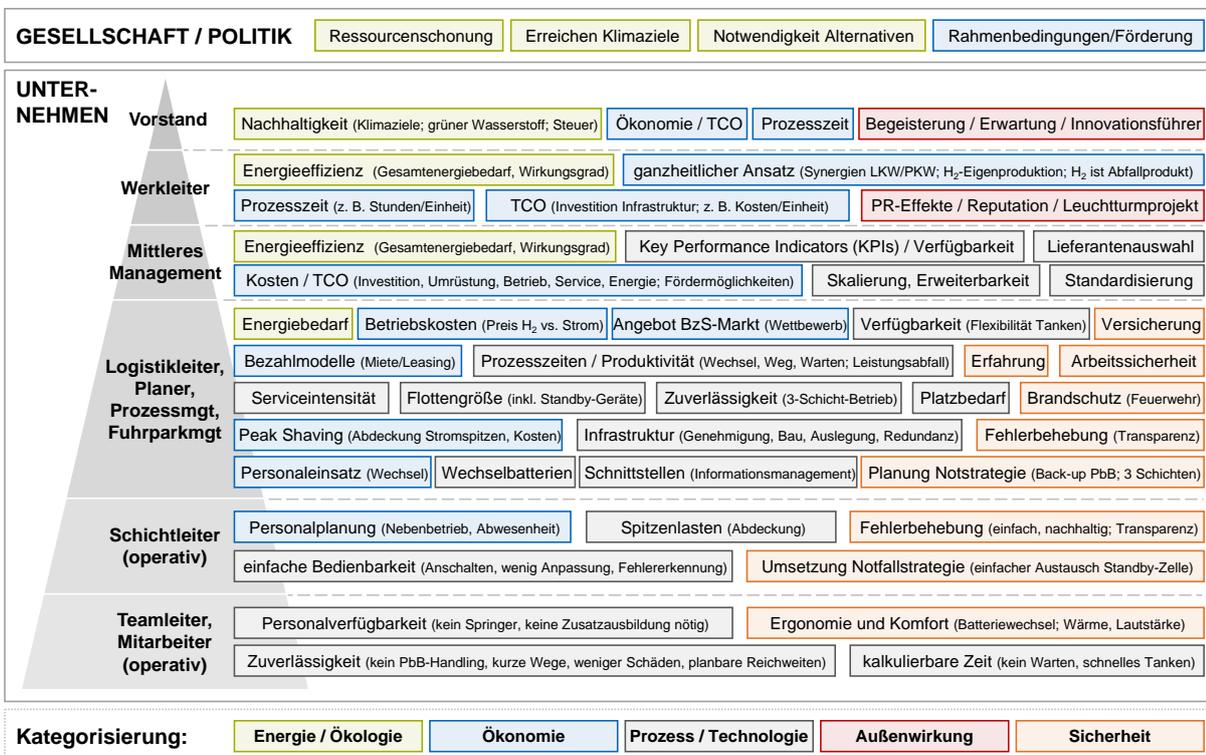


Abbildung 5-1: Ziele und Anforderungen an den Einsatz von BzS-FFZ

Aus der Summe der Erkenntnisse der bisherigen Ausführungen lassen sich die folgenden Anforderungen an das Vorgehensmodell ableiten:

Anforderung 1: Multikriterieller Aufbau des Modells

Bisherige Lösungsansätze beschäftigen sich lediglich mit Teilbereichen und helfen bei der Bewertung und Analyse eines Bestandteils des Systems oder nur weniger Aspekte hiervon. In dieser Arbeit sollen eine methodische Aufarbeitung und die Entwicklung eines umfassenden Konzeptes zum multikriteriellen Vergleich und zur Bewertung des

Einsatzes der ESS in FFZ-Flotten erfolgen. Es sollen die einzelnen Elemente miteinander verknüpft und Wirkzusammenhänge berücksichtigt werden, sodass eine fundierte Entscheidung getroffen werden kann.

Anforderung 2: Anwendbarkeit in der Planungsphase

Darüber hinaus soll das Modell das Gegenüberstellen der ESS in der Planungsphase erlauben und dem Planer als Werkzeug dienen. Dies soll bei der Systembewertung, dem -vergleich und der Entscheidung für die geeignete Technologie unterstützen. Die Eingangsdaten des Modells sollen hierfür nicht auf zu messenden Daten bestehen, sondern analytisch errechnet bzw. angenähert werden können, damit die Anwendung in der Planungsphase unabhängig von Messdaten erfolgen kann.

Anforderung 3: Transparenz über Kennzahlen und Informationsbeschaffung

Für die Bestimmung des richtigen ESS ist eine Vielzahl an Kriterien und Eingangsparametern zu berücksichtigen. Bisher durchgeführte Vergleiche verwendeten eine unterschiedliche Anzahl und insgesamt unterschiedliche Kriterien. Die Anforderung ist daher, mithilfe einer Analyse und einer systematischen Aufarbeitung die relevanten Kennzahlen zu identifizieren, um Transparenz zu erlangen. Außerdem soll die Vorgehensweise zur Beschaffung und Erfassung der notwendigen Informationen für den objektiven Vergleich von Energie, Kosten und Prozess aufgezeigt werden.

Anforderung 4: Allgemeingültigkeit und Anwendbarkeit für spezifischen Anwendungsfall

Das Modell soll als neutrales Werkzeug bei der Entscheidungsfindung dienen und Handlungsempfehlungen hierfür aufzeigen. Durch einen allgemeingültigen Aufbau soll es Planern helfen, für konkrete Anwendungsfälle und unter Einbezug individueller Unternehmensanforderungen die am besten geeignete Lösung zu identifizieren. Projektbezogene Daten soll das Planungswerkzeug als Eingangsdaten berücksichtigen können. Hierzu zählen: Arbeitszeit- und Schichtmodelle; Details zur FFZ-Flotte hinsichtlich Typen, Routen und Lasten; Wege und Entfernungen im Layout; Kostensätze. Als herstellerunabhängige Hilfestellung, soll es objektiv und systematisch die verschiedenen ESS miteinander vergleichen und die geeignete Lösung für den Anwendungsfall aus den Planungsalternativen identifizieren können.

Anforderung 5: Abbildbarkeit der Energiespeichersysteme mit Infrastruktur

In Bezug auf die ESS soll das Modell so gestaltet werden, dass die drei Planungsalternativen PbB, LIB und BzS verglichen und bewertet werden können. Neben der oft betrachteten ESS soll die häufig vernachlässigte Infrastruktur mit den spezifischen Anforderungen ebenfalls umfassend einbezogen werden. Dies schließt ein allgemeingültiges Vorgehen für die Dimensionierung dieser ebenfalls mit ein. Ebenso sind hierzu

die Prozessunterschiede für die Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit der Systeme durch Laden, Wechseln oder Tanken einzubeziehen.

Anforderung 6: Berücksichtigung prozessualer, energetischer und monetärer Zielgrößen

Der Einsatz der drei ESS hat Einfluss auf den gesamten Prozess der FFZ, insbesondere auf die erwähnten Aspekte zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit. Der Batteriewechselprozess bei PbB, der Ladeprozess bei LIB und der Betankungsprozess bei BzS haben unterschiedlich starke Auswirkungen auf die auszulegende und aufzubauenende Infrastruktur, auf den Mitarbeiterereinsatz, auf die zurückzulegenden Wege und auf die Flottengröße. Durch höhere Verfügbarkeiten der FFZ können bspw. durch geringere Prozesszeitverluste weniger FFZ eingesetzt werden. Im Zuge der Dekarbonisierung ist der Gesamtenergiebedarf eine weitere zu berücksichtigende Zielgröße. Hierbei ist wichtig, dass nicht nur FFZ, sondern auch ESS und Infrastruktur einbezogen werden. Hinsichtlich der Energiepfade steht die ökologische Nachhaltigkeit im Vordergrund, weshalb Energieketten mit Primärenergie aus erneuerbaren Quellen fokussiert werden. Da die meisten CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase entstehen, ist besonderes Augenmerk auf den Energiebedarf und die Energieeffizienz der ESS zu legen. Dieser hat zudem Auswirkungen auf die Berechnung der Wirtschaftlichkeit im Sinne von kostenwirksamem Strom- bzw. Wasserstoffbedarf. Die Kenntnis über Stromverbräuche hilft Unternehmen weiterhin bei der Transparenz über den Energiekonsum, ihre Ökobilanzierung und den CO₂-Emissionen. Die detaillierten Erkenntnisse aus prozessualer sowie energetischer Betrachtung sollen wiederum in die ökonomische Bewertung einfließen. In der Kostenbetrachtung sollen die Kosten entlang des gesamten Lebenszyklus im Modell berücksichtigt werden. Die Unterscheidung zwischen Anschaffungs- und Betriebskosten soll klar erkennbar sein. Zudem sollen Reduktionspotenziale bspw. durch den Vergleich der verschiedenen Finanzierungsmodelle für die Flotte und die Infrastruktur berücksichtigt werden.

Anforderung 7: Lösungsansatz für den Umgang mit mehreren Zielgrößen

In der Entscheidungsfindung für den geeigneten ESS besteht eine Herausforderung durch die Vielzahl an Zielgrößen. Die Aspekte Kostenminimierung in der Anschaffung, Kostenminimierung in der Nutzung, Reduktion der Energiebedarfe und/oder Emissionen in der Nutzungsphase sowie Erhöhung der Verfügbarkeit durch Prozesszeiteinsparungen müssen miteinander abgewogen werden. Es soll ein Lösungsansatz für die Entscheidungsfindung erarbeitet werden, der Empfehlungen für den Umgang mit einem multikriteriellen Zielsystem liefert.

5.2 Spezifikation des Untersuchungsraums

Anhand der festgelegten Anforderungen kann der Untersuchungsraum genauer spezifiziert und die Aufgaben- und Zielformulierung für den Modellierungsansatz konkretisiert werden. Das in dieser Arbeit betrachtete System bilden die Fördermittel in der Intralogistik. Zu den Fördermitteln zählt ebenfalls die nötige Infrastruktur zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit. Innerhalb der motorisch betriebenen Fördermittel wird zudem der Fokus auf elektromotorisch-betriebene Fahrzeuge gelegt. Strenge Regulierungen zum Einsatz des VM, insbesondere innerhalb der Hallen, lassen die Technologie zunehmend in den Hintergrund rücken. Fokus dieser Arbeit sind alternative, emissionsärmere, elektromotorische Antriebe und deren ESS. Hierbei handelt es sich bei FFZ um PbB, LIB und BzS. Durch die Entwicklungen hinsichtlich LIB und BzS – und dem damit erweiterten Portfolio an verfügbaren Technologien – stehen die Anwender vor der Herausforderung, das für den Anwendungsfall mit bereits festgelegtem FFZ-Einsatz geeignete ESS zu identifizieren. Mittlerweile sind die drei ESS bei den meisten Herstellern als Serienprodukt ohne größeren Umrüstaufwand erhältlich, weshalb die Arbeit von den Technologien als etablierte Produkte mit hoher Technologiereife ausgeht.

Aus der Zielsetzung wird deutlich, dass es sich in dieser Arbeit um ein statisches Entscheidungsmodell, also ein Prognosemodell zur Bewertung der Auswirkungen von Planungsalternativen handelt. Zur Erfüllung des geforderten Zwecks anhand der Anforderungen, insbesondere der multikriteriellen Ausarbeitung des Modells, ist zunächst weder die Berücksichtigung dynamischen Zeitverhaltens noch die detaillierte Abbildung des Systemverhaltens erforderlich, weshalb ein statisches mathematisches Modell für die Entscheidungsunterstützung als zweckmäßig erscheint. Die geforderte Objektivität kann durch die Umsetzung in einem quantitativen Modell gegeben werden.

Die Entscheidung für den Technologieeinsatz geschieht in der Planungsphase bei der Neuanschaffung von FFZ-Flotten. Da für eine neue Technologie, wie beim Einsatz von BzS, umfangreiche Investitionen in die Infrastruktur nötig sind, lohnt sich die Betrachtung häufig erst bei größeren FFZ-Flotten, also Mischflotten, bzw. dem Einsatz im gesamten Werk. Die genaue Zusammensetzung der Flotte durch die zuvor definierten Aufgaben und die Abwägung der Anforderungen z. B. unter Zuhilfenahme der Auswahlkriterien aus *VDI-Richtlinie 3589* [VDI-3589], wird als bereits bekannt angenommen. Das Modell soll zunächst nicht berücksichtigen, welcher ESS bereits im Einsatz ist, sondern unabhängig hiervon bewerten, welches die am besten geeignete Lösung ist. Die Ausgangssituation stellt somit eine Neuplanung dar, also ein sogenanntes Greenfield-Projekt. Sofern es sich um ein Brownfield-Projekt handelt und bereits eine

Flotte existiert, die auf ein anderes ESS umgerüstet werden soll, kann in nachgelagerten Bewertungen betrachtet werden, wie die individuelle Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Einbezug von Restbuchwerten, Umrüstungsaufwand oder Opportunitätskosten aussieht. Das Modell zeigt somit die beste Lösung auf unter der Annahme, dass weder Flotte noch Infrastruktur vorhanden sind.

Für die Identifikation des geeigneten ESS sollen prozessuale, energetische und monetäre Zielgrößen einbezogen werden. Die in Abbildung 5-1 identifizierten Anforderungen zur Außenwirkung werden aufgrund der fehlenden Messbarkeit nicht zusätzlich berücksichtigt. Die Kriterien zur Sicherheit fließen, sofern diese quantifiziert werden können, in die Prozessbewertung ein. Die Prozessunterschiede der drei Technologien sollen vorrangig als Prozesszeiteinsparungen dargestellt werden, welche die Verfügbarkeit der FFZ beeinflussen und dadurch wiederum Auswirkungen auf die Anzahl nötiger FFZ wie auch den Mitarbeiterereinsatz haben. Die Bewertung des Energiebedarfs soll FFZ, ESS und Infrastruktur berücksichtigen. Dabei wird der Energiebedarf und die Energieeffizienz in der Betriebsphase fokussiert, da dort die größten CO₂-Emissionen entstehen, die bei elektromotorischen FFZ aus dem Gesamtenergiebedarf inklusive Sekundärenergiebedarf resultieren. Die Unterscheidung der Energiepfade hat starken Einfluss auf die Emissionen. Der Arbeit werden – aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Nachhaltigkeit und Dekarbonisierung in der Industrie – grüne Energiepfade aus erneuerbaren Energiequellen zugrunde gelegt, also Strom aus erneuerbaren Energien oder sogenannter grüner Wasserstoff, der aus regenerativen Energiequellen hergestellt wurde. Da bei diesen die Emissionen geringen Einfluss auf die Entscheidung haben, wird die Betrachtung der Emissionen im Modell nicht berücksichtigt.

Die Erkenntnisse aus prozessualer und energetischer Betrachtung sollen in der monetären Betrachtung in einen Kostenvergleich einfließen. Hierfür werden die Kosten entlang des Lebenszyklus der Investitionen im Modell abgebildet. Der Schwerpunkt liegt auf der Unterscheidung zwischen Anschaffungskosten und Betriebskosten, da diese den größten Einfluss auf die Entscheidung für eine Technologie haben. Die Entscheidung für Finanzierungsmodelle, wie Kauf, Leasing oder Miete, wird im Modell zu Beginn festgelegt. Bei den Berechnungsmethoden sollen soweit nötig Abstraktionen umgesetzt werden, sodass die Werte analytisch ermittelt werden können.

5.3 Konzeptentwurf

Ausgehend von den identifizierten Anforderungen und der angestrebten Zielsetzung wurde ein erster Konzeptentwurf abgeleitet. Dieser ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

Die Eingangsgrößen für das analytische Modell stellen einerseits unternehmensinterne, projektbezogene Daten und andererseits projektübergreifende, technische Daten dar. Zu den projektbezogenen Daten zählen die wesentlichen Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls, wie Arbeitszeit- und Schichtmodelle, FFZ-Einsatz mit Routen und Lasten, Abbildbarkeit der Infrastruktur mit Wegen im Layout oder die internen Kostensätze. Bei den projektübergreifenden Daten handelt es sich bspw. um Werte zu Energiebedarf oder Lebensdauer der Technologien.

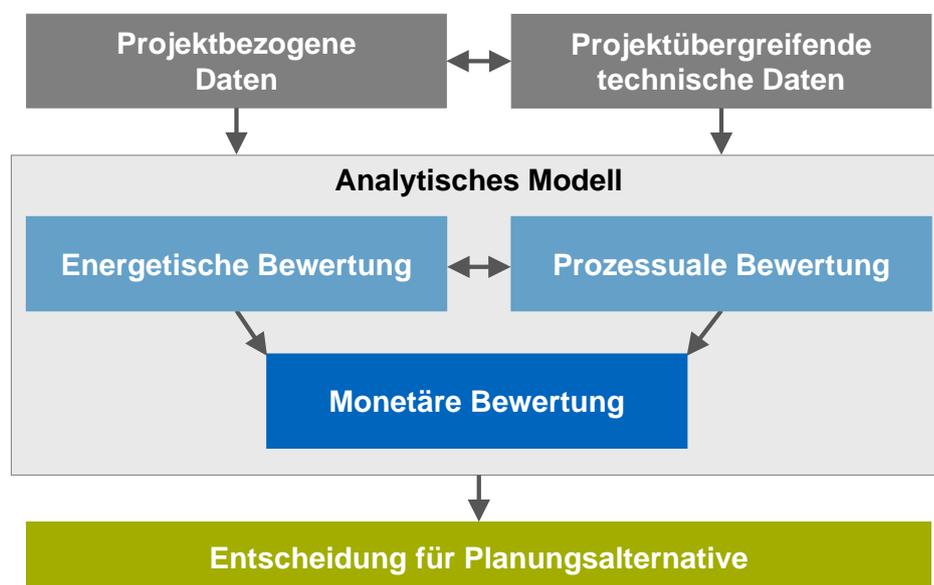


Abbildung 5-2: Konzeptentwurf für Gesamtmodell anhand der Anforderungen

Die beiden genannten Kategorien dienen als Eingangsdaten für die drei Module des Modells: energetische, prozessuale und monetäre Bewertung. Bei der energetischen Bewertung stehen Parameter zu den Unterschieden im Gesamtenergiebedarf in der Nutzungsphase und Energieeffizienz im Fokus. Die Bewertung des Prozesses zielt darauf ab, Kennzahlen für die Ausfallzeiten und damit Verfügbarkeit, die Flottengröße und den Mitarbeiterereinsatz zu liefern. Diese aus den beiden Modulen resultierenden Produktivitätskennzahlen dienen als ergänzende Metriken und Eingangsgrößen für die monetäre Betrachtung, welche die Entscheider in der Auswahl einbeziehen, sie erlauben alleinstehend allerdings keinen Vergleich und keine Bewertung der Vorteilhaftigkeit der Alternativen [Tas-2017, S. 112].

Die wichtigste Komponente für die Entscheidung, in welche die Kennzahlen aus prozessualer und energetischer Bewertung einfließen, stellt die monetäre und damit Wirtschaftlichkeitsbewertung dar. Zwischen den Modulen existieren Wechselwirkungen und Wirkzusammenhänge, diese werden im Fortlauf der Arbeit bei Auftreten innerhalb der formalen Darstellung und Vorgehensweise beschrieben und ihre Effekte aufgezeigt. Ergebnis des Modells ist die Handlungsempfehlung für die am besten geeignete Technologie aus den drei Planungsalternativen mithilfe einer Ergebnismatrix, die das unternehmensinterne Zielsystem abbildet.

Dieser Konzeptentwurf dient als Grundlage für die Gliederung des folgenden Kapitels zur Systemanalyse mit der formalen Darstellung für das analytische Modell.

6 Bestandteile des Modells

Nachdem das vorangehende Kapitel die Anforderungen an das Modell sowie die Zielsetzung konkretisiert, dient dieses Kapitel der detaillierten Analyse des Systems sowie der formalen Beschreibung. Ausgehend vom vorgestellten Konzeptentwurf sollen für die Bestandteile des Modells in diesem Kapitel die Elemente, Parameter und Wirkzusammenhänge in Form der Berechnungsverfahren dargestellt werden und dabei die relevanten Aspekte für die Bewertung festgelegt werden. Unter Berücksichtigung der Daten zum Planungsprojekt und der übergeordneten technischen Daten der ESS können erste prozessuale Rahmenbedingungen definiert und dadurch die Voraussetzung für die Bewertung von Prozess, Energiebedarf und Wirtschaftlichkeit geschaffen werden. Hierzu erfolgt in diesem Kapitel die ausführliche Systemanalyse und formale Beschreibung für das analytische Modell für die drei Module: zur Bewertung von Energie (Abschnitt 6.1), Prozess (Abschnitt 6.2) und Kosten (Abschnitt 6.3).

6.1 Energetische Bewertung

Für das erste Modul, der Bewertung hinsichtlich energetischer Parameter, werden zunächst die Unterschiede mit Bezug hierauf für die drei ESS analysiert und beschrieben. Daraus resultiert die Definition der relevanten Aspekte, Bestandteile und Parameter für die Betrachtung und den Umfang des Moduls. Die folgende Detaillierung dieser resultiert in der formalen Beschreibung der festgelegten Elemente zur Bewertung und zum Vergleich der ESS wie auch der zugehörigen Infrastruktur. Die Erkenntnisse aus diesem Modul stellen eine weitere Voraussetzung für die darauffolgenden Schritte zur prozessualen und monetären Bewertung dar. Insbesondere mit der prozessualen Bewertung bestehen Wechselwirkungen.

6.1.1 Analyse der Unterschiede der Energiekette

Bei FFZ haben die Energiebedarfe und die eingesetzten Energieträger wesentlichen Einfluss auf die Treibhausgase, insbesondere CO₂-Emissionen. Je mehr Umwandlungsschritte in der Energiekette vorgesehen sind, desto größer sind die potenziellen Verluste und desto kleiner ist der nutzbare Endenergiegehalt. Dies wiederum erhöht den erforderliche Primär- und Sekundärenergiebedarf für das Betreiben der Flotte. Ein FFZ benötigt, unabhängig vom eingesetzten ESS, eine konstante Energiezufuhr. Dies beinhaltet Energie für die Antriebseinheit, Nebenverbraucher, aber auch systembe-

dingte Verluste. Abhängig von der Energiedichte, Wirkungsgradverlusten sowie Energiebedarf der ESS unterscheidet sich die Reichweite je Betankung bzw. Ladung. Abbildung 6-1 zeigt die Stufen der Energiekette für elektromotorische FFZ.

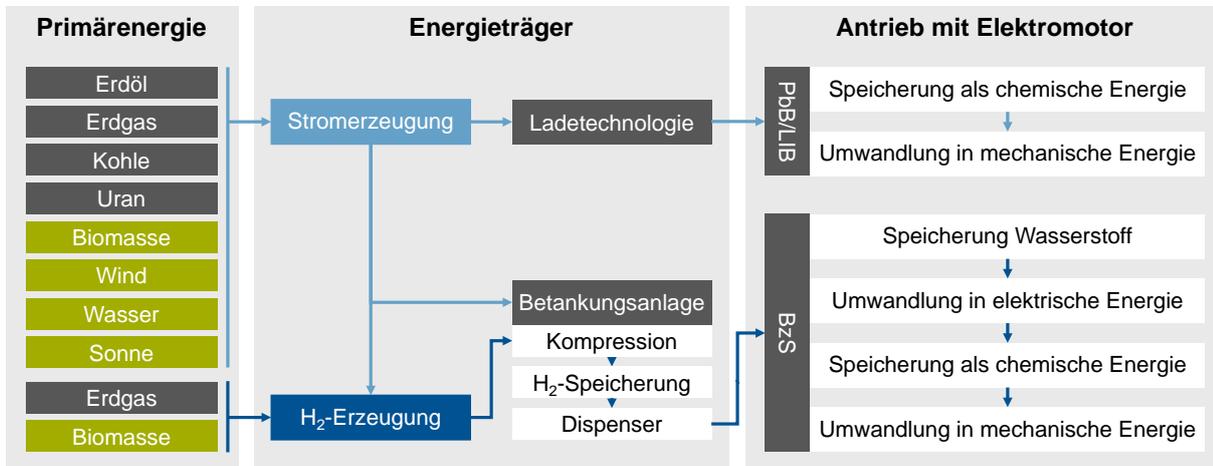


Abbildung 6-1: Darstellung der Energiekette für elektromotorische FFZ

Es wird ersichtlich, dass beim Einsatz von BzS deutlich mehr Umwandlungsschritte in der Prozesskette enthalten sind, was in diesem Falle ebenfalls für höhere Wirkungsgradverluste steht. Diese sorgen dafür, dass der Endenergiegehalt bei Wasserstoff deutlich geringer ist als bei anderen Pfaden und somit der Einsatz der nötigen Primärenergie zur Erzeugung derselben nutzbaren Endenergie höher ist. Die Energieeffizienz ist mit Blick auf die Wirkungsgradverluste zunächst geringer als bei Batterien. Dafür werden im Betrieb geringere Energiebedarfe aus dem Stromnetz benötigt, da lediglich die Infrastruktur versorgt werden muss, nicht aber die BzS. Dies hat insbesondere Auswirkung auf die Stromkosten und die Lasten innerhalb des Unternehmens.

Bei LIB und PbB hingegen erfolgt die gesamte Versorgung der Flotte aus dem Stromnetz und der daran angeschlossenen Ladeinfrastruktur. Hierbei entstehen ebenfalls Verluste, die aufgrund der geringeren Anzahl an Energieprozessschritten geringer ausfallen als bei Wasserstoffnutzung. Durch die fortschrittlichere Technologie und die technischen Weiterentwicklungen ist die Energieeffizienz bei LIB höher als bei PbB – LIB können den Energieverbrauch im FFZ bspw. um bis zu 30 % reduzieren [Grü-2021]. Hierdurch können die aus dem Netz entnommene Energie und damit die Energiekosten gesenkt werden. Allerdings erzeugt das Schnellladen Lastspitzen, welche die Kosten stark ansteigen lassen können. Dies geschieht ebenfalls durch die gleichzeitige Ladung, am Schichtende oder in Pausen, sowohl bei LIB als auch bei PbB. Solche Leistungsspitzen haben aufgrund der Struktur der Energiekosten in Deutschland starke Auswirkungen auf die zu zahlenden Energiekosten.

6.1.2 Identifikation der relevanten Aspekte

Die durchgeführte Systemanalyse liefert einen Überblick über die zu berücksichtigenden Aspekte in der Bewertung. Die ESS unterscheiden sich vor allem im Gesamtenergiebedarf sowie dem Strombezug in der Nutzungsphase. Eine Abschätzung der folgenden energetischen Aspekte ist in den Vergleich und insbesondere in die folgende Kostenbetrachtung einzubeziehen.

Der Gesamtenergiebedarf setzt sich in der Anwendung aus mehreren Bestandteilen zusammen. Als maßgeblicher Verbraucher steht das elektromotorisch angetriebene FFZ mit der erforderlichen Energiezufuhr, die unabhängig vom eingesetzten ESS ist. In den **Energiebedarf des FFZ** fließen neben Antriebsstrang und Hubvorrichtung auch Nebenverbraucher ein, ebenso wie Systemverluste und -gewinne (z. B. durch Rekuperation beim Bremsen). Die Beanspruchung und das durchschnittliche Arbeitsspiel, also das **Lastprofil der FFZ**, haben Einfluss auf den Energiebedarf und spielen eine wichtige Rolle bei der Entscheidung für das ESS [VDI-3589, S. 13]. Die Einordnung und Bewertungsmöglichkeit des Lastprofils ist für alle folgenden Betrachtungen von großer Bedeutung. Die Beanspruchung und das durchschnittliche Arbeitsspiel haben nicht nur Auswirkungen auf den folgenden Prozess und die Häufigkeit der Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit, sondern ebenfalls auf den Energiebedarf der Flotte und somit auf die Entscheidung für ein ESS. Die durchschnittlichen Verbrauchswerte für den Energiebedarf der FFZ können unter Zuhilfenahme der gemessenen Werte aus den Typenblättern der FFZ-Hersteller ermittelt werden.

Für den Antrieb des elektromotorisch-betriebenen FFZ ist der Einsatz eines ESS erforderlich. Abhängig von der Energieeffizienz, also dem Wirkungsgrad, und dem **Energiebedarf der ESS** unterscheidet sich die Reichweite, wodurch sich die reichweitenbedingte Häufigkeit des Prozesses zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit ergibt. Die Wirkungsgradverluste sowie nutzbarer Energiegehalt der Systeme spielen hierbei eine wesentliche Rolle, ebenso wie die Ladezeit. Die ESS erhalten die Energie über die zugehörige Infrastruktur, in der ebenfalls Wirkungsgradverluste auftreten. Die Infrastruktur, sowohl für Laden als auch für Tanken, benötigt zusätzlich Energie für die Weitergabe des Energieträgers an die ESS. Der **Energiebedarf der Infrastruktur** ist daher für den Gesamtenergiebedarf ebenfalls zu berücksichtigen. Zusätzlich zur bezogenen Energie während des Lade-/Tankvorgangs sind Standby-Verbräuche hinzuzurechnen. Die Dimensionierung der Infrastruktur ist dabei abhängig von dem Energiebedarf der FFZ, allerdings auch von prozessualen Gegebenheiten. Diese wird daher im Rahmen der prozessualen Bewertung in den Unterabschnitten 6.2.5 und 6.2.6 beleuchtet.

Aus den genannten Bedarfen resultieren Kosten, die für den Bezug der Energieträger anfallen. Der Strom muss von den Abnehmern verbrauchsgerecht bezahlt werden abhängig von der tatsächlichen Nutzung. Insbesondere Lastspitzen haben bei Großkunden Auswirkungen auf die tatsächlichen Kosten. Nicht zuletzt deswegen ist der kostenwirksame **Strombedarf in der Betriebsphase** von großer Bedeutung. Hierbei handelt es sich um die Kosten für die Menge an Energie, die für die verschiedenen ESS mit deren Infrastruktur aus dem Stromnetz bezogen wird. Durch die Kostenstruktur für Energie aus dem Stromnetz stellt sich insbesondere der Unterschied zwischen der Verwendung von Wasserstoff als Energieträger im Vergleich zu Strom und deren Auswirkungen auf die Lastprofile mit möglichen Lastspitzen als interessant dar. Die Möglichkeit des Lade- und Energiemanagements ist als Optimierungspotenzial zu berücksichtigen. Da in der monetären Betrachtung neben dem Strombezug aus dem Netz für BzS ebenfalls die Kosten für den Energieträger Wasserstoff einfließen, ist die Ermittlung des **Wasserstoffbedarfs in der Betriebsphase** abzuschätzen.

Aus dem Gesamtenergiebedarf kann grundsätzlich der notwendige Primär- und Sekundärenergiebedarf in der Betriebsphase für die verschiedenen Energiepfade und die Erzeugung der Energieträger Strom und Wasserstoff hergeleitet werden. Mithilfe der Wirkungsgradverluste entlang der Energiekette oder dem Energiebedarf der H₂-Erzeugung je kg lässt sich vom FFZ-Energiebedarf ausgehend abschätzen, wie hoch der Sekundärenergiebedarf der Energieträger ist. Damit können schließlich auch entlang der Energiekette anhand der benötigten kWh die CO₂-Emissionen ermittelt werden. Diese sind allerdings stark abhängig von den innerhalb des Energieprozesses verwendeten Methoden, Erzeugungsarten und den Details zu allen Umwandlungsschritten. Da es sich bei den im Untersuchungsraum festgelegten Technologien um – im Vergleich zu VM – emissionsarme ESS handelt, fallen der Großteil der Emissionen in der Betriebsphase für den tatsächlichen Energiebedarf der ESS an und sind hierbei stark abhängig von den verwendeten Energiepfaden, z. B. dem verwendeten Strommix. Aus diesem Grund liefert das Modell keine detaillierten Informationen zur Berechnung der Emissionen.

Die formale Beschreibung für die quantitative Bewertung der identifizierten Aspekte des Modells hinsichtlich energetischer Zielgrößen erfolgt in den weiteren Unterabschnitten. Als Bezugsgröße wird für die Energiegrößen die physikalische Stunde ($1/h$) herangezogen, wobei diese im produktiven Umfeld für die aktive Betriebszeit, also die Betriebsstunden ($1/Bh$), steht. Für die weiteren Schritte des Vorgehensmodells sind die Einheiten anhand der täglichen Nutzungszeit und der jährlichen Arbeitstage auf ein Jahr hochzurechnen.

6.1.3 Bewertung der Lastprofile der FFZ

Die Lastprofile der FFZ haben im individuellen Anwendungsfall starken Einfluss auf die drei Vergleichskategorien. Für die energetische Bewertung liefern die Lasten wesentliche Anhaltspunkte für den Energiebedarf der Flotte, was ebenfalls in die Infrastrukturauslegung einfließt. Hinsichtlich des Prozesses geben sie an, wie häufig der Prozess zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit zu erfolgen hat, was Auswirkungen auf die Ausfallzeiten, den nötigen Personaleinsatz und die Auslegung der Infrastruktur hat. Diese Punkte wiederum beeinflussen die entstehenden Kosten, sowohl in der Anschaffungs- als auch in der Betriebsphase. Das Lastprofil stellt somit eine wichtige Rahmenbedingung für die weiteren Bewertungen dar, die aus dem individuellen Anwendungsfall resultieren. Dieser Unterabschnitt liefert daher ein Vorgehen, das bei der individuellen Bewertung und der Einordnung der Beanspruchung der FFZ sowie der Bestimmung der Lastkoeffizienten für die FFZ-Typen unterstützt.

Grundlage für die individuelle Bewertung liefern Richtlinien und Normen. Die *VDI-Richtlinie 2198* beschäftigt sich mit den Inhalten der Typenblätter der FFZ. Ein Bestandteil davon stellt die Ermittlung des Energieverbrauchs anhand eines Zyklus dar. Dieser ist im Rahmen der Richtlinie vorgegeben: für den VDI-Zyklus müssen die FFZ in Standardausführung in einer vorgegebenen Zeit eine gegebene Spielzahl fahren mit Nennlast, also maximaler Zuladung, auf einer definierten Strecke. Die Arbeitsspiele unterscheiden sich je nach FFZ-Typ. Die Hersteller müssen die Information zum Verbrauch der FFZ bei VDI-Zyklus auf ihren Typenblättern angeben. [VDI-2198, S. 15ff.]

Im Jahr 2017 wurde die Richtlinie zur Bewertung mithilfe des VDI-Zyklus durch die europaweite Norm *DIN EN 16796* erweitert und die Berechnung des Energieverbrauchs, die auf den Typenblättern anzugeben ist, neu geregelt. Neben Teil 1 mit allgemeinen Informationen zu den Testmethoden liefern die weiteren Teile Informationen für die einzelnen FFZ-Typen. Für dieses Modell ist insbesondere Teil 2 zu bedienergeführten, selbstangetriebenen FFZ, Schleppern und Lastentransportfahrzeugen interessant. Die Testmethoden erweitern die Abläufe – neben der im VDI-Zyklus betrachteten Gesamteffizienz des FFZ – um die Berücksichtigung der Effizienz der Batterie und der des Ladegerätes mit Wirkungsgradverlusten. Zudem wurde die Prüflast auf 70 % der Nennlast festgelegt. Darüber hinaus liefert die Norm eine Information zur Berechnung des Kohlenstoffdioxidäquivalents. [DIN EN-16796-1] *DIN EN 16796-2* liefert die relevanten Informationen für den Testzyklus für die unterschiedlichen FFZ-Typen, diese stellt eine Detaillierung des VDI-Zyklus hinsichtlich der Testbedingungen dar. [DIN EN-16796-2]

Die Belastung, die anhand der normativen Testzyklen gefahren und gemessen wird entspricht häufig nicht dem tatsächlichen Lastprofil des individuellen Anwendungsfalls.

Diese ist zusätzlich anhand verschiedener Kriterien zu bewerten. Ergebnis dieser Bewertung kann der Lastkoeffizient l_{FFZ} sein, der mit dem Verbrauchswert des Typenblattes des jeweiligen FFZ multipliziert wird, um den individuellen Energieverbrauch zu erhalten. Für das Festlegen des Lastkoeffizienten sind die FFZ-Typen separat zu betrachten und die Lastprofile je nach Einsatzbereich und Anwendung zu bestimmen. Bei der Bewertung für das Modell handelt es sich um eine gemittelte Abschätzung anhand der Belastung; individuelles Fahrverhalten des FFZ-Fahrers wird bspw. nicht berücksichtigt.

Für Gabelstapler liefert die *VDI 4461* Ansatzpunkte für die Bewertung der Beanspruchungskategorien. Die acht genannten Kategorien sind in drei Gruppen A, B und C eingeteilt und in Tabelle 6-1 ersichtlich. Da die Veröffentlichung der Richtlinie vor der *DIN EN 16796* erfolgt ist, wird auf den VDI-Zyklus Bezug genommen. Bei Einstufung des Anwendungsfalls wird empfohlen, dass die Kategorie mit den meisten Nennungen heranzuziehen ist, sofern die Einflussgrößen in unterschiedliche Kategorien fallen. [VDI-4461, S. 3]

Tabelle 6-1: Zuordnung der Belastungen bei Gabelstaplern zu Kategorien [VDI-4461, S. 4]

		Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III
A	Lastschwerpunkt- abstand	innerhalb Nennlastschwer- punktabstand	bis 1,5-faches des Nenn- lastschwerpunktabstands	über 1,5-faches des Nenn- lastschwerpunktabstands
		mittig	Außermittigkeiten kleiner gleich 10 % der Lastbreite	Außermittigkeiten größer 10 % der Lastbreite pendelnde Last
	Anbaugeräte	ohne oder mit Seitenschie- ber	zeitweise mit Anbaugeräten wie Klammern, Drehgeräte usw.	überwiegend mit Schaufeln, Klammern, Drehgeräten usw.
B	Fahrwege	glatt, eben	Kleinpflaster Schienenübergänge	schlecht, querrillig unebene Schienenüber- gänge
	Steigungen	keine (bis 3 %)	3 % bis 6 %	über 6 %
	Umgebung	weitgehend trocken	Innen-/Außeneinsatz	betriebsbedingte Feuchtig- keit
		sauber	übliche Verschmutzung	starke Verschmutzung Temperaturwechsel aggressive Umgebung
C	Kraftstoff- oder Bat- teriestromverbrauch	mindestens 15 % niedriger als nach VDI 2198	nach VDI 2198	mindestens 25 % höher als nach VDI 2198
	Einsatzintensität	überwiegend < 75 % der zu- lässigen Tragfähigkeit	75 % bis 100 % der zulässi- gen Tragfähigkeit	überwiegend volle Auslas- tung
	Schichtbetrieb	eine Schicht	zwei Schichten	drei Schichten

Anhand der *VDI 4461* kann zur Vereinfachung für die Gabelstapler anhand der Kate-
gorien mit den Lastkoeffizienten 0,85 für leichte Beanspruchung in Kategorie I, 1 für
normale Beanspruchung der Kategorie II und 1,25 für schwere Beanspruchung in Ka-
tegorie III gerechnet werden. Um genauere Werte zu erhalten, sollten die acht Kriterien

einzelnen bewertet und in die drei Kategorien eingeordnet werden. Anschließend kann jedes Kriterium mit den genannten Werten für den Lastkoeffizienten bewertet werden. Der Mittelwert dieser acht Koeffizienten stellt dann den möglichen einzubeziehenden Lastkoeffizienten dar.

Für weitere FFZ-Typen, wie Routenzugschlepper, existiert keine Richtlinie oder Empfehlung zur Bewertung der Beanspruchung. Allerdings können die Kategorien der Gabelstapler zur groben Einordnung auf die Routenzüge übertragen werden, da in der Anwendung viele Parallelen bestehen. Tabelle 6-2 zeigt eine für diese Arbeit abgeleitete, mögliche Darstellung für Routenzugschlepper, ausgehend von den Informationen aus VDI 4461 sowie DIN EN 16796. Diese soll als Hilfestellung für die Einordnung der Belastungskategorien dienen. Das Kriterium Lastschwerpunktstand findet bei Routenzügen keine Anwendung, da die Lasten dort auf Anhängern gezogen werden, was in die Bewertung der Einsatzintensität einfließt.

Tabelle 6-2: Mögliche Darstellung der Beanspruchungskategorien für Routenzugschlepper in Anlehnung an [VDI-4461; DIN EN-16796-1; DIN EN-16796-2]

		Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III
A	Anbaugeräte, Nebenverbraucher	keine oder kleine Nebenverbraucher, wie Terminal, Handscanner	zeitweise mit Anbaugeräten, wie Kompressor, Automatisierung und kleinen Nebenverbrauchern, wie Terminal, Handscanner	überwiegend mit Anbaugeräten, wie Kompressor, Automatisierung und kleinen Nebenverbrauchern, wie Terminal, Handscanner
	Fahrwege	glatt, eben	Kleinpflaster Schienenübergänge	schlecht, querrillig unebene Schienenübergänge
B	Steigungen	keine (bis 3 %)	3 % bis 6 %	über 6 %
	Umgebung	weitgehend trocken	Innen-/Außeneinsatz	betriebsbedingte Feuchtigkeit
		sauber	übliche Verschmutzung	starke Verschmutzung Temperaturwechsel aggressive Umgebung
C	Kraftstoff- oder Batteriestromverbrauch	Mindestens 15 % niedriger als nach DIN EN 16796-2	nach DIN EN 16796-2	mindestens 25 % höher als nach DIN EN 16796-2
	Einsatzintensität	unter 60 % der Nennlast	60 % bis 80 % der Nennlast	über 80 % der Nennlast
	Schichtbetrieb	eine Schicht	zwei Schichten	drei Schichten

Mit diesem Vorschlag kann die Belastung für Routenzugschlepper analog derer für Gabelstapler erfolgen. Nach Zuordnung der Kriterien zu einer der drei Kategorien kann für die sieben Kriterien der Mittelwert gebildet werden, wodurch ein Durchschnittswert für die Belastung in Form des Lastkoeffizienten der eingesetzten Routenzugschlepper berechnet wird. Sofern für weitere Berechnungen genaue Werte zum Schichtbetrieb sowie zum Kraftstoff- oder Batteriestromverbrauch verfügbar sind und herangezogen werden können, sind diese Kriterien für den Lastkoeffizienten nicht zu berücksichtigen.

Die gezeigten Vorgehensschritte liefern eine Handlungsempfehlung und Unterstützung bei der Bewertung der individuellen Beanspruchung der FFZ, am Beispiel von Gabelstaplern und Routenzugschleppern, die auf die weiteren FFZ-Typen übertragen werden kann. Je detaillierter die Analyse des Anwendungsfalls und damit die Berechnung des Lastkoeffizienten und Lastprofils für die einzelnen FFZ-Typen ist, desto genauer sind die daraus folgenden Bewertungen und Vergleiche der ESS.

6.1.4 Ermittlung des Energiebedarfs der FFZ

Die Bewertung des Energiebedarfs eines FFZ für den Betrieb kann über verschiedene Ansätze erfolgen. Neben einer Schätzung kann für den individuellen Fall eine detaillierte analytische Berechnung oder dynamische Simulation erfolgen. Durch eine tatsächliche Messung können die genauesten Ergebnisse für den spezifischen Anwendungsfall erzielt werden. Da dies in der Planungsphase einer nichtexistierenden Flotte nur unter Einbeziehung einer bestehenden Vergleichsflotte mit annähernd identischen Arbeitsspielen möglich ist, bieten die Hersteller der FFZ in ihren Typenblättern einen Verbrauchswert als Orientierung. Dieser basiert auf Messungen anhand des genormten Testzyklus aus *DIN EN 16796-1*. Durch die realen Messungen berücksichtigt der aus dem gefahrenen Zyklus resultierende Wert bereits den Energiebedarf der Antriebseinheit, die Hubbewegungen, Systemverluste und Rekuperation.

Die Bewertung des Lastprofils des individuellen Anwendungsfalls in Bezug auf diesen Testzyklus erfolgt anhand der Vorgehensschritte des vorherigen Unterabschnittes 6.1.3. Mithilfe des ermittelten Lastkoeffizienten können die Energiebedarfe der eingesetzten FFZ für den Anwendungsfall bewertet werden. Dabei werden die besonderen Bedingungen wie auch zusätzliche Nebenverbraucher berücksichtigt.

Das Produkt aus ermitteltem Lastkoeffizienten l_{FFZ} und gegebenem Energiebedarf aus dem Testzyklus $E_{FFZ,Testzyklus}$ mit der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge für den FFZ-Typen n_{FFZ} ergibt den Energiebedarf E_{FFZ} in kWh. Sollten außerhalb der produktiven Betriebsstunden weitere Standby-Verbräuche anfallen, wenn bspw. in der Pause oder nachts die Nebenverbraucher weiterhin Energie benötigen, sind die Verbrauchswerte der Formel für die jeweiligen FFZ als durchschnittlicher Standby-Bedarf je Stunde $E_{Standby,FFZ}$ hinzuzuaddieren.

$$E_{FFZ,ges} = n_{FFZ} \cdot (l_{FFZ} \cdot E_{FFZ,Testzyklus} + E_{Standby,FFZ}) \quad (6-1)$$

Durch weitere Multiplikation des ersten Summanden mit der Anzahl der produktiven Betriebsstunden und des zweiten Summanden mit der Anzahl an Standby-Stunden

kann der Energiebedarf bspw. je Schicht, errechnet werden. Die Anwendung des Vorgehens für die verschiedenen FFZ-Typen und die Bildung der Summe für alle FFZ erzeugt die Abschätzung des Energiebedarfs der gesamten Flotte.

6.1.5 Energieeffizienz des Energiespeichersystems mit Infrastruktur

Der aus dem zuvor aufgezeigten Vorgehen resultierende Energiebedarf für das FFZ ist stark abhängig vom individuellen Anwendungsfall, aber unabhängig vom eingesetzten ESS. Das ESS muss somit so dimensioniert sein, dass es der Leistungsanforderung gerecht wird. Dieser Unterabschnitt widmet sich der formalen Darstellung der identifizierten Aspekte zur Energieeffizienz der ESS mit der zugehörigen Infrastruktur.

Wie in den technischen Grundlagen zum Aufbau der ESS erläutert (Unterabschnitt 2.2.1) und in Abbildung 2-3 dargestellt, ist die einzuspeichernde Energie im ESS aufgrund des Gesamtwirkungsgrades und der Verluste beim Laden und Entladen höher als die ausspeicherbare Energie, die vom FFZ aufgenommen werden kann. Aus den Wirkungsgradverlusten des jeweiligen ESS und der auszuspeichernden Energie kann die einzuspeichernde Energie errechnet werden. Da sich Kapazität und Leistung von ESS über die Lebensdauer verändern, empfiehlt es sich zudem, die Wirkungsgradreduzierung je 1000 Bh $k_{Wirkung}$ für die ESS einzubeziehen. Es lassen sich die folgenden Zusammenhänge formalisieren [Ste-2017, S. 27]:

$$\eta_{ESS,ges} = \eta_{ein} \cdot \eta_{sp} \cdot \eta_{aus} \cdot k_{Wirkung} \quad (6-2)$$

$$E_{FFZ} = E_{aus} = \eta_{ESS,ges} \cdot E_{ein} \quad (6-3)$$

$$E_{ein} = \frac{E_{FFZ}}{\eta_{ESS,ges}}$$

Für die weiteren Berechnungen gilt darüber hinaus für die Leistung der FFZ P_{FFZ} für einen Betrachtungszeitraum von einer Stunde der Zusammenhang:

$$P_{FFZ} = \frac{E_{FFZ}}{1 \text{ h}} \quad (6-4)$$

Für PbB liefert die *DIN EN 16796-1* erste Ausgangswerte hinsichtlich des Wirkungsgrades. Die Batterieeffizienz von PbB η_{PbB} hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie Zellkonstruktion, Entladeströmen, Temperaturen, Lademethoden oder Ladefaktor. Auch innerhalb der Ladetechnologie bestehen vorrangig thermische Verluste. *DIN EN 16796-1* liefert Daten zur Effizienz der Batterie, sofern keine Messmöglichkeit besteht. Die Werte sind in Tabelle 6-3 aufgelistet. [DIN EN-16796-1, S. 22f.]

Tabelle 6-3: Gesamteffizienz von PbB aus Batterie und Lademethode
[DIN EN-16796-1, S. 23]

Batterietyp	Lademethode	η_{PbB}
Batterie mit flüssigem Elektrolyt	Laderegime mit Stromimpulsen zur Elektrolytmischung	0,60
Batterie mit flüssigem Elektrolyt	Laderegime mit Elektrolytmischung durch Luftpumpe	0,63
Ventilgesteuerte Bleisäurebatterie mit immobilisierten Elektrolyten	Reguliertes IU1a-Laderegime basierend auf DIN 41773-1	0,67

Die Rekuperation und damit verbundene Rückspeisung der elektrischen Energie bei einem elektromotorischen FFZ spart Ladeenergie bzw. verlängert die Betriebszeit um bis zu 15 %; diese ist bereits im Energiebedarf der FFZ über das Lastprofil berücksichtigt [VDI-2695, S. 10].

Hinsichtlich der Effizienz des Ladegeräts lässt sich eine Unterscheidung anhand der verwendeten Technologie treffen. Es existieren bspw. Hochfrequenz-Ladegeräte mit Richtwerten für den Wirkungsgrad von $\eta_{Ladetechnologie, HF} = 0,88$ sowie 50-Hz-Ladegeräte, die bei regulierter Technologie eine Effizienz von $\eta_{Ladetechnologie, 50Hz, reg} = 0,78$ aufweisen. [DIN EN-16796-1, S. 22f.]

Die Effizienz der Ladetechnologie $\eta_{Ladetechnologie}$ wird in *DIN EN-16796-1* als das Verhältnis der einzuspeichernden Energie in die Batterie E_{ein} zu der aus dem Stromnetz entnommenen Energie $E_{Stromnetz}$ definiert. Der Wirkungsgrad variiert je nach Lademethode und verwendeter Technologie.

$$\eta_{Ladetechnologie} = \frac{E_{ein}}{E_{Stromnetz}} \quad (6-5)$$

Auch bei Einsatz der Wasserstofftechnologie entstehen Wirkungsgradverluste. Die eingesetzten Komponenten benötigen für die Wasserstoffversorgung zusätzliche Energie aus dem Stromnetz, die als Verlust zu betrachten ist. Dieser Energiebedarf hat Auswirkungen auf die Gesamteffizienz der Technologie und die Energiekosten, dies wird im folgenden Unterabschnitt 6.1.6 detailliert.

Darüber hinaus liefert die *VDI 2695* – im Hinblick auf die Berechnung der Energiekosten – eine Formel zur Energiebedarfsermittlung. Der Energiebedarf für die einmalige Ladung der Batterie E_{Laden} setzt sich zusammen aus der Batteriespannung U_{Nenn} , der Nennkapazität der Batterie K_{Nenn} , dem Entladegrad der Batterie k_{DOD} (z. B. 0,8 bei geforderter Restkapazität von 20 % bei PbB) sowie dem Ladefaktor k_{Laden} , der sich aus den Wirkungsgradverlusten in Ladegerät und Batterie zusammensetzt (abhängig von

Batterietyp und Art der Ladetechnologie, bspw. 1,8 bei PbB ohne Elektrolytumwälzung). Der Ladefaktor ergibt sich durch die Division des spezifischen Ladefaktors aus Batterietyp und Art der Ladetechnologie mit dem Wirkungsgrad aus Batterie und Ladegerät [VDI-2695, S. 7]:

$$E_{Laden} = U_{Nenn} \cdot K_{Nenn} \cdot k_{DOD} \cdot k_{Laden} \quad (6-6)$$

Die Nennkapazität einer Batterie in Amperestunden stellt den nutzbaren Energiegehalt dar, also die maximal mögliche Entnahmemenge aus der Batterie.

Für BzS kann die folgende Formel von *Günthner und Micheli* zur Berechnung der Nennkapazität verwendet werden. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung des maximalen Tankinhalts m_{BzS} , des unteren bzw. spezifischen Heizwerts H_i von Wasserstoff ($H_{i,Wasserstoff} = 33,33 \text{ kWh/kg}$), dem Wirkungsgrad des BzS η_{BzS} sowie der Nennspannung des BzS $U_{Nenn,BzS}$. Die Multiplikation mit dem Faktor 0,95 liegt der Annahme zugrunde, dass der Tankinhalt zu 95 % genutzt werden kann. [Gün-2015a, S. 74]

$$K_{Nenn,BzS} = \frac{m_{BzS} \cdot H_{i,Wasserstoff} \cdot 1000 \cdot \eta_{BzS}}{U_{Nenn,BzS}} \cdot 0,95 \quad (6-7)$$

Aus den Werten zu Energiebedarf FFZ, Wirkungsgraden und nutzbarer Energie der ESS kann die maximale Reichweite der Technologien RW in Betriebsstunden ermittelt werden [Gün-2015a, S. 74]. Die Reichweite errechnet sich aus der Division der nutzbaren Energie, also der Nennkapazität, und der Spannung des ESS mit der Leistung des FFZ:

$$RW_{ESS} = \frac{K_{Nenn,ESS} \cdot U_{Nenn,ESS}}{P_{FFZ} \cdot 1000} \quad (6-8)$$

Für eine allgemeine Bewertung der Effektivität der ESS kann die Reichweite der drei Technologien ebenfalls ins Verhältnis zum Lastzyklus gesetzt werden, indem der Energiebedarfswert des FFZ durch den FFZ-Messwert aus dem Typenblatt der Hersteller $E_{FFZ,Testzyklus}$ ersetzt wird.

6.1.6 Strom- und Wasserstoffbedarf in Betriebsphase

Zur späteren monetären Bewertung des Energieträgereinsatzes in der Betriebsphase soll dieser Unterabschnitt mit Vorgehen zur Abschätzung des Strom- und Wasserstoffbedarfs bei dem Einsatz der Batterien bzw. BzS unterstützen.

Zunächst wird der kostenwirksame Strombedarf im Betrieb der Batterien aufgezeigt. Da Strom abhängig von der tatsächlichen Leistungsentnahme verbrauchsgerecht bezahlt werden muss und da durch das Laden kostenrelevante Lastspitzen entstehen können, ist die Betrachtung der Betriebsphase von besonderer Bedeutung. Der für den Betrieb erforderliche Energiebedarf aus dem Stromnetz für die Ladung der Batterien ergibt sich aus den Formeln (6-3) und (6-5) unter Einbezug des Energiebedarfs des FFZ und der Wirkungsgrade für Ladetechnologie und ESS. Hinzu kommen Standby-Verbrauche der Infrastruktur $E_{Standby}$:

$$E_{Stromnetz,Laden} = \frac{E_{ein}}{\eta_{Ladetechnologie}} = \frac{E_{FFZ,ges}}{\eta_{Ladetechnologie} \cdot \eta_{ESS,ges}} + E_{Standby,Laden} \quad (6-9)$$

Der resultierende Wert gibt den durchschnittlichen Bezugswert je FFZ und produktive Betriebsstunde an unter der Annahme, dass eine konstante Menge aus dem Netz bezogen wird. In der Realität entstehen durch das zeitgleiche Laden in Pausen bei LIB und zu Schichtende bei LIB und PbB allerdings Lastspitzen und erhöhte Strombedarfe zu gewissen Tageszeiten, die starke Auswirkungen auf die tatsächlichen Kosten haben. Die Leistungsspitze $P_{Stromnetz,max,Laden}$ kann über die folgenden Formeln abgeschätzt werden. Durch die Multiplikation der durchschnittlichen Leistung der FFZ P_{FFZ} , die bei einem Betrachtungszeitraum von einer Stunde E_{FFZ} entspricht und der Anzahl der eingesetzten Ladegeräte bei PbB und bei LIB²⁰, kann die maximale Last überschlagen werden. Alternativ kann, wenn bekannt, mit der maximalen Leistung der Ladegeräte $P_{Ladegerät}$ kalkuliert werden. Die zusätzliche Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors $k_{Gleichzeitigkeit}$ erlaubt die Berücksichtigung eines Lade- und Energiemanagements in der Berechnung mit $0 < k_{Gleichzeitigkeit} \leq 1$. Über diesen Faktor ist geregelt, welcher Anteil der Ladegeräte simultan lädt.

$$P_{Stromnetz,max,Laden} = n_{Ladegerät} \cdot \frac{P_{FFZ}}{\eta_{Ladetechnologie} \cdot \eta_{ESS,ges}} \cdot k_{Gleichzeitigkeit} \quad (6-10)$$

$$P_{Stromnetz,max,Laden} = n_{Ladegerät} \cdot P_{Ladegerät} \cdot k_{Gleichzeitigkeit}$$

Beim Einsatz von BzS erfordert der Betrieb neben dem Wasserstoffbedarf ebenfalls den Bezug elektrischer Energie aus dem Stromnetz. Dieser Energiebedarf entsteht durch das Betreiben der Infrastruktur. Der tatsächliche Energiebedarf ist dabei abhängig von den am Bedarfsort installierten Komponenten. Insbesondere der Verdichter

²⁰ Wenn bei LIB $n_{Ladegerät} < n_{FFZ}$, dann ist $n_{Ladegerät}$ zu verwenden. Wenn $n_{Ladegerät} \geq n_{FFZ}$, dann ist n_{FFZ} für die maximal belegbaren Ladegeräte heranzuziehen.

hat regelmäßig einen hohen Strombedarf $E_{Verdichter}$, allerdings fallen auch für den Betrieb und Steuerung der Dispenser $E_{Dispenser}$ Bedarfe an. Zusätzlich bestehen Standby-Bedarfe der Komponenten $E_{Standby}$. Die Summe dieser Bedarfe ergibt den Energiebedarf der Wasserstoffinfrastruktur aus dem Stromnetz:

$$E_{Stromnetz,H2} = E_{Verdichter} + E_{Dispenser} + E_{Standby,H2} + E_{Erzeugung,H2} \quad (6-11)$$

Auch beim Verdichter können durch den energieintensiven Prozess Peak-Leistungen entstehen, die als maximale Werte für die Kostenbetrachtung der leistungsabhängigen Energiekosten berücksichtigt werden sollten. Bei zusätzlicher eigener Wasserstoffherzeugung, bspw. über einen Elektrolyseur, müssen die dafür anfallenden Bedarfe als $E_{Erzeugung,H2}$ ebenfalls einbezogen werden.

Ermittlung des Wasserstoffbedarfs

Beim Einsatz von BzS fallen neben den Stromkosten für den Energiebedarf der Infrastruktur ebenfalls Energiekosten für Wasserstoff und dessen Bereitstellung am Bedarfsort an.

Unter Einbezug der Kenntnis über den logistischen Anwendungsfall aus den projektbezogenen Daten sowie Vorgehensweisen aus der folgenden prozessualen Bewertung – wie der Anzahl der FFZ pro Typ, deren Auslastung und Lastprofil – kann die Menge an nötigem Wasserstoff errechnet werden. In der Berechnung des Wasserstoffbedarfs sind geplante, bekannte Erweiterungen der Flotte wie auch ein Sicherheitsfaktor zum Abdecken von Lastspitzen zu berücksichtigen. Die Durchführung einer nachgelagerten Sensitivitätsanalyse hilft bei der qualitativen Validierung des Sicherheitsfaktors. Die Abschätzung des Wasserstoffbedarfs kann über die zwei folgenden Wege erfolgen – diese wurden bereits durch die Autorin in der *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* veröffentlicht. [Wag-2020, S. 720ff.]

Für die erste Berechnungsmöglichkeit werden Erfahrungen aus früheren Projekten zum Wasserstoffverbrauch verschiedener FFZ-Typen $m_{Wasserstoff,FFZ}$ herangezogen. So benötigt ein 3,5 t-Gabelstapler mit dem VDI-Lastzyklus bspw. durchschnittlich 0,65 kg Wasserstoff pro Betriebsstunde [Gün-2015b, S. 66]. Zur Ermittlung eines Orientierungswertes für den Gesamtbedarf wird der Wert $m_{Wasserstoff,FFZ}$ für den Anwendungsfall berechnet, unter Einbeziehung der Verfügbarkeit der FFZ-Typen $\eta_{ver,FFZ}$ (wird in Unterabschnitt 6.2.3 detailliert beschrieben) und dem Lastprofil der FFZ im Verhältnis zum Testzyklus über den Lastkoeffizienten l_{FFZ} , für die Bewertung (s. Unterabschnitt 6.1.3). Die Bedarfe werden für alle Fahrzeugtypen i mit bekannter Fahrzeuganzahl $n_{FFZ,i}$ errechnet. Die Summe der Bedarfe der einzelnen FFZ-Typen bildet dann den Gesamtbedarf in kg pro Betriebsstunde:

$$m_{Wasserstoff,ges} = \sum_{i=1}^n n_{FFZ,i} \cdot \eta_{ver,FFZ,i} \cdot l_{FFZ,i} \cdot m_{Wasserstoff,FFZ,i} \quad (6-12)$$

Die zweite Berechnungsmöglichkeit stellt die Herleitung des Wertes über den Energieverbrauch der Flotte und einer (fiktiven) PbB-oder LIB-Vergleichsflotte dar, die für Messungen zur Verfügungen steht. Zur Berechnung des Energieverbrauchs der Flotte $E_{FFZ,ges}$ in kWh muss der Energieverbrauch der Batterieladung für die relevanten FFZ über einen definierten Messzeitraum erfasst werden. Der Wasserstoffbedarf errechnet sich unter Berücksichtigung des Gesamtwirkungsgrades der Ladetechnik $\eta_{Ladetechnik}$ und dem BzS-Wirkungsgrad η_{BzS} , der auf den spezifischen Heizwert H_i von Wasserstoff bezogen ist:

$$m_{Wasserstoff,ges} = \frac{E_{FFZ,ges}}{\eta_{Ladetechnologie} \cdot \eta_{BzS} \cdot H_{i,Wasserstoff}} \quad (6-13)$$

Aus dem Wasserstoffbedarf können in der monetären Betrachtung die Kosten je kg (inkl. Bereitstellung) in der Summe der Energiekosten kalkuliert werden und zu den Strombedarfen addiert werden.

6.2 Prozessuale Bewertung

Neben der energetischen Bewertung stellt ein weiteres Modul für das multikriterielle Modell die Bewertung des Prozesses und der technologiebedingten Unterschiede der ESS dar. Hieraus resultieren, wie schon aus der energetischen Bewertung, wichtige Kenngrößen für das dritte, monetäre Modul. Nach einer Beschreibung der prozessualen Unterschiede hilft eine Systemanalyse bei der Identifikation der relevanten Aspekte, Bestandteile und Bewertungsparameter des Moduls. Diese fließen in die formale Beschreibung der erkannten Elemente ein.

6.2.1 Analyse der prozessualen Unterschiede

Eine wesentliche Kenngröße bei der Bewertung bilden die Prozesszeiten und die Verluste an produktiver Zeit, die aus den Prozessunterschieden der Technologien resultieren. Die Unterschiede haben Auswirkungen auf die Verfügbarkeiten der FFZ und durch die produktiv verfügbare und tatsächliche Einsatzzeit der FFZ ebenfalls auf die Anzahl der notwendigen FFZ für die Erfüllung der Transport-/Handhabungsaufgaben. Dies wiederum hat Einfluss auf die Anzahl eingesetzter Mitarbeiter als FFZ-Fahrer – darüber hinaus erfordern technologiebedingte Prozessschritte in Form des Batteriewechsels den Einsatz weiterer Mitarbeiter. Zusätzlich sind für die Prozessschritte zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit infrastrukturelle Einrichtungen in Form von Ladestation, Wechselraum oder Tankstelle nötig, deren Positionierung und Entfernung zum produktiven Einsatzbereich der FFZ ebenfalls die Verfügbarkeit reduziert.

Die FFZ erfüllen je nach ihrer Bauart unterschiedliche Aufgaben. Routenzüge mit Anhängern dienen bspw. der Materialversorgung in der Produktion mit fest getakteten, produktionssynchronen Routen zum Aufnehmen und Abgeben der Materialien. Gabelstapler hingegen finden durch die charakteristischen Hubbewegungen Anwendung in Verladearbeiten, Ein- und Auslagerung im Lager oder in der Beförderung schwerer Güter in einem vorgegebenen Einsatzbereich. Da die drei Energiespeicher PbB, LIB und BzS zur Ausführung der selben Aufgabe in den selben FFZ eingesetzt werden, liegen die wesentlichen Unterschiede in den abweichenden Handhabungsprozessen zum Wiedererlangen der Leistungsfähigkeit. Ausgangspunkt für die Unterschiede ist die Anzeige des geringen Ladezustandes der PbB, des niedrigen Tankfüllstandes des BzS oder das Eintreten der Pause für Zwischenladung von LIB während das Fahrzeug sich im vorgegebenen Einsatzbereich befindet und produktiven Tätigkeiten ausführt. In allen drei Fällen ist vom Fahrer oder im Falle eines automatisierten Fahrzeuges durch die Steuerung je nach eingesetztem ESS eine unterschiedliche Aktion durchzuführen. Bei BzS ist der Tank des BzS am Dispenser der Wasserstoffinfrastruktur zu

betanken, s. Unterabschnitt 2.2.5. Bei Batterien kann, wie in Unterabschnitt 2.2.3 beschrieben, je nach Einsatz und Auslastung der FFZ zwischen Ladebetrieb (Verbleib der Batterie im FFZ) und Wechselbetrieb (Tausch der Batterie durch eine geladene) gewählt werden.

Wechselbetrieb (vorrangig bei PbB)

Der Wechsel der Batterien stellt im intensiven Mehrschichtbetrieb und bei PbB eine gute Alternative zum Laden dar, da die langen Ladezeiten die Verfügbarkeit der FFZ andernfalls stark reduzieren würden. Für den Wechsel sind separate, meist zentral gelegene Räume mit Ladeplätzen und -geräten erforderlich, die wegen der während der Ladung entstehenden Gase abgetrennt werden müssen. Die Fläche der Räume kann nicht für wertschöpfende Tätigkeiten genutzt werden, was in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt werden muss. Neben dem notwendigen Platz benötigt der Wechsel zusätzlich Technik. Der Batteriewechsel erfolgt abhängig vom Fahrzeugtyp entweder seitlich oder von oben. Bei seitlicher Entnahme wird bei kleineren 24 V-Batterien mit einem Verschiebewagen auf einer Rollenbahn und für größere Batterien mit einem hydraulischem Ausschub und Entnahme durch Hubwagen gearbeitet. Für den Wechsel muss die Batterieverriegelung gelöst werden. Bei Entnahme von oben sind für den Zugriff beim Stapler bspw. der Sitz umzuklappen und mehrere Klappen zu öffnen. Für das Wechseln ist die Verwendung eines Hebezeuges erforderlich. Automatisierte Lösungen dieses Prozesses sind bisher sehr selten, weshalb geschultes Personal erforderlich ist, das den Wechsel durchführen kann. Grundsätzlich kann der Wechsel bei nicht automatisierten FFZ durch den Fahrer durchgeführt werden. Allerdings resultiert dies aufgrund der fehlenden Erfahrung und Routine im Umgang mit der Technik in deutlich längeren Wechselzeiten und dadurch wiederum Warteschlangen, die vor dem Raum entstehen können. Es wird daher in der Praxis häufig ein Batteriewart für die Flotten zur Betreuung der zentralen Wechselräume eingestellt, der die Wechsel deutlich schneller, sicherer und effizienter durchführen kann. Neben dem Wechsel muss zudem bei PbB der Wasserstand des Elektrolyten überprüft werden und bei Bedarf in den vollständig geladenen Batterien aufgefüllt werden.

Wie bereits aufgezeigt, benötigt der Wechsel zusätzliche Zeit, in der das FFZ keine produktiven Tätigkeiten ausführen kann. Neben der eigentlichen Wechselzeit für den Austausch der Batterie existieren weitere vor- und nachgelagerte Prozessschritte, die Einfluss auf die Wechselzeit haben. Hierzu zählen die Anfahrt aus dem Einsatzbereich zum Wechselraum, bei Routenzügen ggf. das Abkoppeln der Anhänger, je nach Auslastung das Warten auf den Batteriewart/der Abschluss des vorherigen Wechsels, die Einfahrt in den Wechselraum, Ausfahrt, ggf. Ankoppeln der Anhänger und Rückfahrt

in den Einsatzbereich. Auswertungen im Forschungsprojekt ‚FFZ70‘ zeigten, dass insbesondere die An- und Rückfahrt sowie die Wartezeit stark ins Gewicht fallen können, aber auch die reine Wechseldauer sehr stark schwanken kann [Man-2022, S. 105ff.].

Mögliche Alternativen zum zentralen Wechselraum sind das Einrichten mehrerer dezentraler Räume. Dadurch können die Anfahrtswege für die Fahrer verkürzt werden, allerdings entstehen bei Räumen höhere Kosten, da sowohl zusätzliche Technik installiert werden muss als auch weitere Batteriewarte benötigt werden. Darüber hinaus ist es möglich, Wechselfahrzeuge einzusetzen. Hierfür werden mehr FFZ als eigentlich nötig eingesetzt und an neuralgischen Punkten bzw. vor dem Wechselbereich mit geladenen Batterien zur Verfügung gestellt, sodass der Fahrer lediglich das Fahrzeug zu wechseln hat. Die Zeitverluste für den eigentlichen Wechsel fallen so weg, wobei An- und Rückfahrt aus dem Einsatzbereich sowie Ab- und Ankoppeln weiterhin durchzuführen sind. Die Kosten erhöhen sich durch den höheren FFZ- und Batterieeinsatz. Eine weitere Alternative stellt, insbesondere für Routenzüge, die Einführung von Wechselzonen mit Gestellen mit Rollenbahnen für die PbB dar, die zentral versorgt werden und bei denen der Fahrer die Batterie tauschen kann. So können Wegstrecken für An- und Rückfahrt zum Einsatzbereich eingespart werden. Diese werden auf den Batteriewart verlagert, der die Gestelle mit den Batterien versorgt und entsorgt.

Ladebetrieb (vorrangig bei LIB)

Neben dem Wechselbetrieb kann für Batterien der Ladebetrieb implementiert werden. Hierbei verbleiben die Batterien während des Ladevorgangs im FFZ. Dies eignet sich vorrangig für LIB, da die Zellstruktur Schnellladungen mit hohen Strömen erlaubt, die als Zwischenladungen in Pausen oder Schichtübergängen durchgeführt werden können. Zudem wird dies für FFZ mit integrierten LIB eingesetzt. Die Ladezeit ist für die Entscheidung für den Ladebetrieb ausschlaggebend, da die FFZ während der Ladung nicht produktiv verfügbar sind und darüber hinaus eine Ladestation belegt ist. Der Ladebetrieb eignet sich besonders im Einschichtbetrieb oder im Mehrschichtbetrieb mit geringer Belastung.

Die Ladeplätze können bei dieser Vorgehensweise freier positioniert werden als bei PbB, da LIB beim Ladevorgang nicht ausgasen. Allerdings muss je Ladeplatz mehr Fläche vorgesehen werden, da nicht nur eine Batterie abgestellt wird, sondern das FFZ darauf Platz finden muss. Es ist möglich, die Ladeplätze dezentral einzurichten, besonders geeignet sind bspw. Plätze in der Nähe von Pausenräumen, um die Batterien während der Pausen zwischenzuladen. [VDMA-2019, S. 16]

Für die Zwischenladung sind die Batterien an das installierte HF-Ladegerät am Ladeplatz anzustecken, sofern keine induktive Ladeinfrastruktur installiert ist. Für den Vorgang des Ladens wird daher kein weiterer Mitarbeiter benötigt, da der Fahrer dies durchführt. Bei FTF bieten LIB außerdem die Möglichkeit eines automatisierten Prozesses, da diese ohne menschliches Eingreifen mit den Kontakten an Stationen verbinden oder sich für das induktive Laden positionieren können.

Die LIB-Technologie sieht vor, dass vorrangig während Pausen und nach Schichtende geladen wird, allerdings ist das Energiemanagement wesentlich und hat hohen Einfluss auf die Verfügbarkeit der FFZ. Wenn bspw. der Fahrer vergisst, in der Pause zwischenzuladen oder das FFZ ein intensives Lastprofil fährt, muss zusätzlich in der produktiven Zeit geladen werden. Außerdem müssen die Fahrer vor und nach den Pausen während der Einsatzzeit den Weg zu den Ladestationen oder dem Einsatzort fahren. Neben den Ladezeiten, die nicht durch Pausen abgedeckt werden können, entstehen weitere Ausfallzeiten durch die Fahrwege zu den Ladestationen. On-Board-Ladegeräte für flexibles Laden können diesen potenziellen Ausfallzeiten als Range-Extender (mit schwächerer Ladeleistung) entgegenwirken, da sie an jeder regulären Steckdose unabhängig von der Ladestation eingesteckt werden können [Grü-2021].

Wasserstoffbetankung (bei BzS)

Bei BzS ist das Laden der integrierten Batterie über das Stromnetz bisher nicht technisch implementiert; die Batterie wird über die energieerzeugende Einheit geladen. Für den elektrochemischen Prozess benötigt diese Wasserstoff, der über die Betankungsinfrastruktur in den im BzS integrierten Tank gefüllt wird. Für diesen Schritt sind für die FFZ zentrale Dispenser vorzusehen, die innerhalb von Gebäuden installiert werden können. Der Vorteil ist, dass bereits mit einem Dispenser eine gesamte Flotte versorgt werden kann. Der Dispenser selbst benötigt wenig Platz innerhalb der Hallen, vor dem Dispenser ist lediglich der Stellplatz für das FFZ – mit möglichen Anhängern bei Routenzugschleppern – vorzusehen. Die Betankung kann, sofern der Tankfüllstand gering ist, bei Vorbeifahren des Fahrzeuges am Dispenser erfolgen und benötigt wenige Minuten. Die Tankzeit stellt eine Ausfallzeit dar, da das FFZ in dieser Zeit nicht produktiv eingesetzt werden kann. Die Positionierung innerhalb des Einsatzbereiches und der vorgesehenen Fahrwege der FFZ ist daher ausschlaggebend, damit die Fahrzeuge keine weiteren Ausfallzeiten für An- und Rückfahrt verursachen. Die Positionierung ist somit abhängig von der individuellen Verfügbarkeitsanforderung an die FFZ. Zudem stellt diese Anforderungen an den Aufbau der Infrastruktur, da die Installation der Wasserstoffrohrlösungen mit Ventilen bis zur Versorgungsstelle vorgesehen werden müssen. Bei Installation einer mobilen bzw. kompakten Betankungsanlage in Form eines Containers mit Dispenser oder bei Installation einer Outdoor-Tankstelle müssen die

FFZ für die Betankung während der eigentlichen Einsatzzeit die Strecken dorthin zurücklegen, wodurch weitere Ausfallzeiten entstehen.

Für die Betankung selbst ist neben dem FFZ-Fahrer kein weiterer Mitarbeiter vorzusehen, da es sich um einen einfachen Tankvorgang handelt, der nach einmaliger Unterweisung durchgeführt werden kann. Dem eigentlichen Tanken vorgelagert sind weitere Prozessschritte, die als Ausfallzeiten zu berücksichtigen sind. Es handelt sich um das Positionieren des FFZ, das Absteigen, das Öffnen der Tankklappe, das Ankoppeln der Kupplung für die Wasserstoffbetankung, bei manchen BzS das Ankoppeln der Kupplung für die Kondensat-Absaugung, das Starten des Betankungsvorgangs und anschließend bei vollem Tank die Schritte in umgekehrter Reihenfolge.

6.2.2 Identifikation der relevanten Aspekte

Der vorausgehende Unterabschnitt zum prozessualen Vergleich der ESS dient der Systemanalyse und hat gezeigt, dass mehrere Kriterien in der Bewertung der Technologien zu berücksichtigen sind. Den wesentlichen Unterschied der Technologien stellt der prozessbedingte Einfluss auf die Verfügbarkeit der FFZ dar. Allerdings existieren weitere prozessuale Aspekte, die im Zuge der Bewertung einzubeziehen sind.

Die Infrastruktur und deren Positionierung hat Einfluss auf den Prozess zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit in Bezug auf die **produktiven Prozesszeiten der FFZ**, die sich für die drei ESS unterscheiden. Im Projekt ‚H2IntraDrive‘ konnte gezeigt werden, dass bei suboptimalem Wechselprozess bei PbB mit vielen Ausfallzeiten sowie hohem Platz- und Personalbedarf BzS eine wirtschaftliche Alternative darstellen können [Gün-2015a, S. 149]. Ein häufiges Argument für BzS ist außerdem, dass durch die kürzeren Tankzeiten im Vergleich zum Batteriewechsel geringere Ausfallzeiten entstehen. Für den Anwendungsfall im Projekt ‚FFZ70‘ wurde erkannt, dass nicht nur in diesem Schritt geringere Zeitverluste zu verzeichnen sind, sondern ebenfalls in den vor- und nachgelagerten Prozessschritten, wie den die An- und Rückfahrten und möglichen Warteschlangen am Wechselraum [Man-2022, S. 108].

Zur Ermittlung der verfügbaren Prozesszeiten der FFZ mit den eingesetzten ESS – und somit der **Verfügbarkeit** bzw. des **Nutzungsgrades** – ist zunächst die Einsatzzeit mit den Betriebsstunden der FFZ zu betrachten. Der Nutzungsgrad wiederum hat Einfluss auf die **Nutzungsdauer**, was in der monetären Bewertung eine wichtige Einflussgröße darstellt.

Die Richtlinien *VDI 3423* und *VDI 3960* liefern Informationen zur Berechnung der Verfügbarkeit bzw. des Gesamtnutzungsgrades der FFZ über deren **Einsatzzeit**, die in

den Richtlinien auch Belegungszeit T_B ²¹ genannt wird. Die Nutzungszeit T_N der FFZ stellt dabei die Zeit dar, in der das FFZ tatsächlich im produktiven Einsatz ist. Diese Zeit wird ergänzt durch die Addition verschiedener **Ausfallzeiten** zur Belegungszeit. Die Ausfallzeiten werden hierbei unterschieden in: [VDI-3960, S. 3f.; VDI-3423, S. 5ff.]

- Organisatorische Ausfallzeit T_O bspw. durch Fehlen von Energie (Batterielaadung, Wasserstoff), Umrüstung, nicht verfügbares Transportgut, Störung im Arbeitsablauf, fehlendes Personal,
- Technische Ausfallzeit T_T bspw. durch Störungen oder Schäden, dadurch notwendige Instandsetzung oder betriebliche Störungen und
- Wartungszeit T_W bspw. für geplante Instandhaltung oder Reinigung des FFZ.

Für den Einsatz der verschiedenen ESS bedeutet das, dass die größten Prozessunterschiede der organisatorischen Ausfallzeit zugehörig sind. Dies bezieht sich auf die Summe der Prozesszeiten, die für die Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit erforderlich sind. Neben der eigentlichen Tank-/Wechsel-/Ladezeit zählt ebenfalls der Zeitbedarf der beschriebenen vor- und nachgelagerten Prozessschritte in diese Kategorie.

Weitere Ausfallzeiten, die der technischen Ausfallzeit und der Wartungszeit zuzuordnen sind, entstehen durch Instandhaltung, also Maßnahmen an den FFZ respektive ESS zum Erhalten oder Wiederherstellen des funktionsfähigen Zustandes mit dem Ziel die geforderten Funktionen zu erfüllen [DIN-31051, S. 4]. Zu den Maßnahmen zählen Wartung, Inspektion, Instandsetzung oder Verbesserung [DIN-31051, S. 5f.]. Wartung, Inspektion und Verbesserung kann für die drei Energiespeicher PbB, LIB und BzS in der Regel im Rahmen der anhand der Betriebsstunden intervallmäßig vorgesehenen Maßnahmen für die FFZ durchgeführt werden. Wobei der Aufwand von LIB gegenüber PbB deutlich reduziert ist [VDMA-2019, S. 17]. Bei PbB ist eine regelmäßige Reinigung erforderlich wie auch die bereits erwähnte Überprüfung des Wasserstandes [Grü-2021]. Typische Störungen, die im Rahmen der Instandsetzung behoben werden und zur technischen Ausfallzeit zählen, können bei PbB korrodierte Pole, defekte Batteriekabel und Kontakte, falsches Wassermanagement (zu viel oder zu wenig) oder Beschädigungen beim Wechsel sein. Bei LIB handelt es sich um defekte Schütze oder gelöste Steckverbindungen. Bei BzS können dies defekte Wasserstoffsensoren, Steuerungsprobleme oder die Batterie sein. Die Zeiten für Instandhaltungsmaßnahmen sind bei der Berechnung der verfügbaren Zeit ebenfalls zu berücksichtigen.

²¹ Für eine Einheitlichkeit in den Formeln dieser Arbeit werden die Formelzeichen aus den Richtlinien in folgende Formelzeichen überführt: $T_B \rightarrow t_{\text{Belegung}}$, $T_N \rightarrow t_{\text{Nutzung}}$, $T_O \rightarrow t_{\text{Ausfall,org}}$, $T_T \rightarrow t_{\text{Ausfall,techn}}$, $T_W \rightarrow t_{\text{Wartung}}$. Der Nutzungsgrad N_G wird zudem als Verfügbarkeit η_{ver} ausgewiesen.

Neben den genannten Prozesszeiten hat die in Unterabschnitt 6.1.3 aufgezeigte Bewertung des Lastprofils für FFZ zur Ermittlung der Energieverbrauchswerte Einfluss auf die **Auslegung der Infrastruktur**. Jede der Technologien stellt spezifische Anforderungen an die Infrastruktur und die Anzahl der vorzusehenden Komponenten. Insbesondere bei der BzS-Technologie stellt die Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur eine große Herausforderung dar, allerdings müssen auch bei PbB und LIB Energiebedarfe frühzeitig in der Auslegung eingeplant werden.

Abgeleitet aus den verfügbaren Prozesszeiten der ESS und deren Nutzungsgrad lässt sich die ursprünglich eingeplante **Anzahl der FFZ** überprüfen, um Einsparpotenziale der verschiedenen ESS aufzuzeigen.

Diese hat – neben der Auslegung der Infrastruktur – ebenfalls Auswirkungen auf die erforderliche **Anzahl der Mitarbeiter**. Die Anzahl wirkt sich insbesondere bei monetärer Betrachtung der Technologieunterschiede auf die Betriebskosten der ESS aus. Hierbei handelt es sich einerseits um die Fahrer der FFZ und andererseits um mögliches Personal für Batteriewechsel/Betankung und Instandhaltung.

Die folgenden Unterabschnitte widmen sich der quantitativen Bewertung und formalen Beschreibung dieser identifizierten prozessualen Aspekte für das Modell.

6.2.3 Bewertung von Nutzungszeit, Nutzungsgrad und Nutzungsdauer

Nach vorausgehender detaillierter Systemanalyse mit Identifikation der wichtigen Aspekte für die prozessuale Bewertung wurde die Bewertung von Nutzungszeit und Nutzungsgrad als wesentlicher Parameter für die Quantifizierung der aufgezeigten Prozessunterschiede ermittelt. Dieser Unterabschnitt widmet sich der formalen Darstellung für die Energiespeicher PbB, LIB und BzS.

Nach VDI 3423 besteht für die Belegungszeit von Einzelmaschinen, wie zuvor in Unterabschnitt 6.2.2 aufgestellt, der folgende Zusammenhang zwischen Nutzungszeit und Ausfallzeiten [VDI-3423, S. 7]:

$$t_{\text{Belegung}} = t_{\text{Nutzung}} + t_{\text{Ausfall,org}} + t_{\text{Ausfall,techn}} + t_{\text{Wartung}} \quad (6-14)$$

Die Belegungszeit stellt die Summe der produktiven Nutzungszeit mit allen Ausfallzeiten dar. Daraus ergibt sich die Berechnung des Gesamtnutzungsgrades respektive der Gesamtverfügbarkeit η_{ver} , also des Maßes für die Effektivität der Nutzung, durch Angabe des Verhältnisses der Nutzungszeit zur Belegungszeit [VDI-3423, S. 8]:

$$\eta_{ver} = \frac{t_{Nutzung}}{t_{Belegung}} = \frac{t_{Belegung} - t_{Ausfall,org} - t_{Ausfall,techn} - t_{Wartung}}{t_{Belegung}} \quad (6-15)$$

Der Gesamtnutzungsgrad steht für den Anteil der produktiven Nutzungszeit an der Gesamteinsatzzeit, der Belegungszeit. Aus Formel (6-14) kann zudem der kumulative Wert der Ausfallzeiten für alle FFZ einer Flotte $t_{Ausfall,FFZ,ges}$ ermittelt werden:

$$t_{Ausfall,FFZ,ges} = (t_{Belegung} - t_{Nutzung}) \cdot n_{FFZ} \quad (6-16)$$

Die Formeln (6-14) und (6-15) bilden Grundlage für die Bewertung der Nutzungszeit und des Nutzungsgrades beim Einsatz der ESS in FFZ. Die folgenden Absätze schildern die formale Beschreibung für die Zeitanteile bei PbB, LIB und BzS. Für die Formalisierung wird angenommen, dass bei PbB der Wechselbetrieb (W), bei LIB der Ladebetrieb (L) und bei BzS das Tanken am Dispenser (T) vorgesehen ist.

Organisatorische Ausfallzeit $t_{Ausfall,org}$

Im Betrieb von FFZ sorgen verschiedene Ereignisse für organisatorische Ausfallzeiten. Neben Umrüstungen, Störungen im Betriebsablauf oder fehlendem Personal zählt hierzu insbesondere das Fehlen von Energie und somit der beschriebene Prozess des Wiedererlangens der Leistungsfähigkeit für Wechsel, Laden oder Tanken.

Aufgrund der Prozessunterschiede weicht die Berechnung der Zeiten für die drei ESS voneinander ab. Für die drei Technologien ist allerdings jeweils die Zeit für die An- respektive Rückfahrt $t_{Anfahrt}$ zu berechnen mit der Annahme, dass die Streckenlänge für beide Fahrten identisch ist. Diese errechnet sich aus der Strecke s_{WLT} zum Wechsel-, Lade- oder Tankprozess dividiert durch die durchschnittliche Geschwindigkeit der FFZ v_{FFZ} . Bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten und Einsatzbereichen ist die Anfahrtszeit für jeden FFZ-Typ separat zu berechnen.

$$t_{Anfahrt} = \frac{s_{WLT}}{v_{FFZ}} \quad (6-17)$$

Neben der Anfahrtszeit sind weitere prozessbedingte Ausfallzeiten zu berücksichtigen. Die Zeitanteile für die organisatorische Ausfallzeit beim Wechselbetrieb und Einsatz von PbB $t_{Ausfall,org,W}$ sind, neben der Anfahrts- und Rückfahrtszeit $t_{Anfahrt,W}$, die Vorbereitungszeit $t_{Vorbereitung,W}$ z. B. für Abkoppeln der Anhänger, die Wartezeit $t_{Warten,W}$ sofern der Wechselbereich belegt ist, die Ein-/Ausfahrtszeit $t_{Einfahrt,W}$ zur Einfahrt und Positionierung für den Wechsel, die Zeit für den Batteriewechsel $t_{Wechsel}$ und die Nachbereitungszeit $t_{Nachbereitung,W}$. Da bei PbB zusätzlich nach jedem Wech-

sel bei den vollen Batterien ein Wartungsaufwand in Form des Prüfens und ggf. Nachfüllen des Wasserstandes $t_{Wasserstand}$ durchzuführen ist, wird dieser der Wechselzeit hinzugezählt. Da nicht bei jedem Wechsel der Wasserstand nachgefüllt werden muss, ist ein Mittelwert, der die Häufigkeit berücksichtigt, zu verwenden. Die Summe der Zeiten ergibt die organisatorische Ausfallzeit für PbB je FFZ:

$$t_{Ausfall,org,W} = 2 \cdot t_{Anfahrt,W} + t_{Vorbereitung,W} + t_{Warten,W} + 2 \cdot t_{Einfahrt,W} + t_{Wechsel} + t_{Wasserstand} + t_{Nachbereitung,W} \quad (6-18)$$

Für den Ladebetrieb bei LIB sehen die Zeitanteile der organisatorischen Ausfallzeit $t_{Ausfall,org,L}$ ähnlich aus, allerdings sind dort weniger Kriterien zu berücksichtigen. Es ist keine Wartezeit zu berücksichtigen, da die FFZ auf einen freien Ladeplatz fahren, wobei die Anfahrtszeit wegen belegter Plätze länger ausfallen kann. Zudem ist kein Wartungsaufwand erforderlich. Die Einfahrtszeit ist dort ebenfalls bereits Bestandteil der Anfahrt – die exakte, zeitaufwändige Positionierung wie beim Wechsel mit technischem Equipment ist für das Einstecken am Ladegerät nicht erforderlich. Die Vor- und Nachbereitungszeit $t_{Vorbereitung,L}$ und $t_{Nachbereitung,L}$ bestehen im Wesentlichen aus dem Ein-/Abstecken des Ladegerätes.

Zur überschlägigen Berechnung der Ladezeit einer Batterie in Stunden liefert *Martin* eine Formel, abhängig von energetischen Größen. Diese ergibt sich anhand der Energiemenge E_5 aus der 5-Stunden-Kapazität der Batterie (K_5) dividiert mit dem Ladestrom I_{Laden} und der Ladespannung U_{Laden} [Mar-2016, S. 109]:

$$t_{Laden} = \frac{1000 \cdot E_5}{I_{Laden} \cdot U_{Laden}} \quad (6-19)$$

Die Berücksichtigung der Ladezeit t_{Laden} ist kompliziert, da nicht die gesamte Ladezeit als Ausfallzeit zu sehen ist. Ziel beim Ladebetrieb und Einsatz von LIB ist es, dass die größten Zeitanteile der Ladung innerhalb der Pausen oder nach Schichtende erfolgen. Es ist somit ein geringerer Zeitanteil der technischen Ladezeit einzubeziehen, der als tatsächliche Ausfallzeit zu betrachten ist. Dieser Anteil hängt von der individuellen Ladestrategie ab und kann über Multiplikation der Ladezeit mit dem Faktor $k_{Ladestrategie}$ berücksichtigt werden. Dieser stellt den Anteil der Zeitanteile des Ladens dar, die innerhalb der Nutzungszeit $t_{Nutzung}$ erfolgen. Die organisatorische Ausfallzeit beim Einsatz der LIB errechnet sich somit wie folgt:

$$t_{Ausfall,org,L} = 2 \cdot t_{Anfahrt,L} + t_{Vorbereitung,L} + k_{Ladestrategie} \cdot t_{Laden} + t_{Nachbereitung,L} \quad (6-20)$$

Bei der H₂-Betankung sind die grundlegenden Prozessschritte ähnlich dem Laden. Neben An-/Rückfahrt ist Zeit für das Warten $t_{Warten,T}$ zu berücksichtigen, da die Tankstelle durch ein anderes tankendes Fahrzeug der Flotte belegt sein kann. Außerdem sind mögliche Vor-/Nachbereitungszeiten $t_{Vorbereitung,T}$ bzw. $t_{Nachbereitung,T}$ einzubeziehen. Die eigentliche Tankzeit t_{Tanken} beinhaltet den zugehörigen Schritt der Wasserabsaugung, dessen Dauer verwendet wird, sofern dieser Schritt länger als der eigentliche Tankvorgang dauert. Die organisatorische Ausfallzeit für BzS $t_{Ausfall,org,T}$ bildet sich durch die Summe der genannten Zeitanteile:

$$t_{Ausfall,org,T} = 2 \cdot t_{Anfahrt,T} + t_{Warten,T} + t_{Vorbereitung,T} + t_{Tanken} + t_{Nachbereitung,T} \quad (6-21)$$

Die beschriebenen organisatorischen Ausfallzeiten für die Prozesse des Wechsels, Ladens und Tankens können im nächsten Schritt mit der Häufigkeit des Eintretens – bspw. mit einer Schicht als Bezugsgröße – multipliziert werden, um vergleichbare Größen für einen festgelegten Zeitraum zu erhalten. Die Häufigkeit ergibt sich aus der in Formel (6-8) ermittelten Reichweite der ESS durch das Dividieren der Anzahl der Stunden je Schicht, also die Belegungszeit, mit der Reichweite der Technologien. Durch die Multiplikation mit diesem Wert zur Anzahl des Eintretens $n_{WLT,Schicht}$ errechnet sich die ESS-bedingte organisatorische Ausfallzeit je Schicht $t_{Ausfall,org,WLT,Schicht}$:

$$t_{Ausfall,org,WLT,Schicht} = t_{Ausfall,org,WLT} \cdot n_{WLT,Schicht} = t_{Ausfall,org,WLT} \cdot \frac{RW_{ESS}}{t_{Belegung}} \quad (6-22)$$

Zusätzlich zu diesen Ausfallzeiten können weitere Einflüsse die produktive Nutzungszeit verringern und den Nutzungsgrad der FFZ beeinflussen. Hierzu zählen fehlendes Transportgut, Störungen im Arbeitsablauf oder fehlendes Personal. Zudem kann eine ungenaue Einsatzplanung Ausfallzeiten erhöhen. Hinzu kommt die Anfahrtszeit zum Arbeitsbereich zu Schichtbeginn $t_{Anfahrt,Schichtbeginn}$ durch den Fahrer, für deren Berechnung ebenfalls Formel (6-17) verwendet werden kann. Diese Zeiten sind für alle ESS identisch und ergeben sich unternehmensspezifisch anhand der Abläufe und Planungen. Sie werden in dem Vorgehen daher zusammengefasst als ablaufbedingte Ausfallzeiten $t_{Ausfall,org,Ablauf}$ zu den organisatorischen Ausfallzeiten aus dem Wechsel-, Lade- und Tankprozess hinzugerechnet. Die gesamte organisatorische Ausfallzeit je Schicht errechnet sich je FFZ durch die Summe der beiden Kategorien.

$$t_{Ausfall,org,Schicht} = t_{Ausfall,org,WLT,Schicht} + t_{Ausfall,org,Ablauf,Schicht} \quad (6-23)$$

Technische Ausfallzeit $t_{Ausfall,techn}$

Die technische Ausfallzeit beinhaltet die Verluste in der Nutzungszeit durch technische Mängel. Hierzu zählen technische Störungen, Schäden und Instandsetzung des FFZ oder auch betriebliche Störungen. Technische Einflussfaktoren, wie Startverzögerungen können ebenfalls zu den technischen Ausfallzeiten gezählt werden.

Für den Einsatz der drei ESS in FFZ setzt sich die technische Ausfallzeit aus den Zeitanteilen für die Startverzögerung der FFZ zu Schichtbeginn $t_{Starten}$, die unabhängig vom ESS ist, sowie der Ausfallzeit durch entstehende Schäden oder Störung $t_{Störung}$ unter Einbezug der Entstörungszeit und Instandsetzung zusammen. Die mittlere Störungszeit wird auch als ‚Mean Time To Repair‘ (MTTR) bezeichnet. Die Störungszeit kann sich je nach ESS unterscheiden.

$$t_{Ausfall,techn} = t_{Starten} + t_{Störung} \quad (6-24)$$

Durch das Schaffen der Bezugsgröße, bspw. einem Jahr, können die mittleren Werte addiert und vergleichbar gemacht werden.

Im Zusammenhang mit der MTTR, z. B. für die Berechnung der Verfügbarkeit²², ist ebenfalls die mittlere Zeit zwischen zwei außerplanmäßigen Instandsetzungen eine wichtige Größe, die ‚Mean Time Between Failures‘ (MTBF). [VDI-3649]

Wartungszeit $t_{Wartung}$

Die Wartungszeit errechnet sich aus geplanter Instandhaltung oder Reinigung der FFZ. Hinsichtlich der Instandhaltungszeit $t_{Instandhaltung}$ unterscheiden sich die ESS. Bei PbB ist bspw. eine zusätzliche regelmäßige Reinigung erforderlich, neben der bereits im Wechsellvorgang berücksichtigten Wartungszeiten zum Prüfen und Nachfüllen des Wasserstands. Zusätzlich ist bei den FFZ zu Fahrtbeginn eine Sichtprüfung des ESS vorzunehmen. Die Wartungszeit ergibt sich aus der Summe dieser Zeitanteile:

$$t_{Wartung} = t_{Instandhaltung,WLT} + t_{Sichtprüfung} \quad (6-25)$$

Die Wartungszeit kann ebenso wie die organisatorische bzw. technische Ausfallzeit mithilfe einer zeitlichen Bezugsgröße vergleichbar dargestellt werden.

²² Hier definiert als ein Maß für „die Wahrscheinlichkeit, ein Element oder ein System zu einem vorgegebenen Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen“ [VDI-3649, S. 2].

Nutzungszeit $t_{Nutzung}$ und Belegungszeit $t_{Belegung}$

Die Nutzungszeit, in der das FFZ produktiv mit vollem Leistungsvermögen für den vorgesehenen Einsatzzweck eingesetzt ist, errechnet sich, wie in Formel (6-14) aufgezeigt, aus der Belegungszeit abzüglich aller aufgeführten Ausfallzeiten. Die Belegungszeit stellt hierbei die gesamte mögliche Einsatzzeit des FFZ dar, also bei einer Arbeitsschicht als Bezugsgröße die Schichtdauer $t_{Schicht}$ abzüglich der Pausenzeiten t_{Pausen} .

$$t_{Belegung} = t_{Schicht} - t_{Pausen} \quad (6-26)$$

Die beschriebenen Formeln dienen der Ermittlung der Nutzungszeit je FFZ. Die tatsächlichen Prozesszeitverluste der Flotte haben Einfluss auf die Anzahl der erforderlichen FFZ zur Erfüllung der geforderten Leistung (s. folgender Unterabschnitt 6.2.4).

Gesamtnutzungsgrad η_{ver}

Aus den aufgeführten Zeitanteilen kann der Gesamtnutzungsgrad bzw. die Gesamtverfügbarkeit der FFZ $\eta_{ver,WLT}$ für die ESS errechnet werden. Der Wert kann unter Verwendung von Formel (6-15) für den Anwendungsfall berechnet werden. Umgekehrt errechnet sich durch Umstellung der Formel (6-15) die Nutzungszeit über einen bekannten Nutzungsgrad und die Belegungszeit über das Produkt der beiden Faktoren:

$$t_{Nutzung,WLT} = \eta_{ver,WLT} \cdot t_{Belegung,WLT} \quad (6-27)$$

Für die Berechnung und den Vergleich der Zeitanteile sowie des Nutzungsgrades sind diese in eine zeitliche Bezugsgröße zu setzen. Darüber hinaus sind die aufgeführten Zeitanteile für die verschiedenen FFZ-Typen einzeln zu berechnen, da je nach eingesetztem ESS und genauem Einsatzbereich die Zeiten variieren.

Nutzungsdauer $t_{Nutzungsdauer}$

Die Nutzungsdauer stellt die Zeit in Jahren dar, die ein FFZ oder ESS in Abhängigkeit vom unternehmensinternen Nutzungsgrad eingesetzt werden kann. Die Nutzungsdauer $t_{Nutzungsdauer}$ in Jahren ergibt sich über die Division der vom Hersteller angegebenen Nutzungsdauer $t_{Nutzungsdauer,Herst}$ durch die zuvor berechnete jährliche Nutzungszeit $t_{Nutzung}$:

$$t_{Nutzungsdauer} = \frac{t_{Nutzungsdauer,Herst}}{t_{Nutzung}} \quad (6-28)$$

Zwischen Nutzungsgrad und der Nutzungsdauer besteht ein Zusammenhang. Bei einem geringen Nutzungsgrad können FFZ eine höhere Nutzungsdauer, also Lebensdauer, erreichen. Die Abhängigkeit ist allerdings nicht linear, vielmehr hat die Intensität der Nutzung Einfluss auf Verschleißteile, Instandhaltungskosten und das Vorhalten von Ersatzfahrzeugen. [VDI-2497, S. 2f.]

Wenn eine Ermittlung auf diese Art aufgrund fehlender Eingangsdaten nicht möglich ist, können bei der Festsetzung der Nutzungsdauer, die in der monetären Bewertung eine wichtige Rolle spielt, die Abschreibungstabellen für die Absetzung für Abnutzung (AfA) des Bundesministeriums für Finanzen mit der betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer für Anlagegüter als Orientierung herangezogen werden. Gemäß der ‚AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter‘ ergeben sich für FFZ acht Jahre Nutzungsdauer. Bei Batterieladegeräten liegt der Wert bei zehn Jahren, für Batterien liegt diese bei fünf Jahren. BzS finden noch keine Berücksichtigung. Für Tank- und Zapfanlagen für Treib- und Schmierstoff wie auch Kompressoren ist die Nutzungsdauer auf 14 Jahre festgesetzt. [Bun-2000; VDI-2695, S. 6] Bei genauer Kenntnis der Lebensdauer für den Anwendungsfall, z. B. anhand der Betriebsstunden und Auslastung, sollte die herangezogene unternehmensinterne Nutzungsdauer daran orientiert sein.

6.2.4 Berechnung von Fahrzeug- und Personaleinsatz

Aus den errechneten Zeitanteilen für die Nutzungszeit der FFZ bei Einsatz der drei Energiespeicher PbB, LIB und BzS kann für die Technologien der notwendige Fahrzeugeinsatz überschlagen werden. Die Soll-Anzahl $n_{FFZ,Soll,WLT}$ je ESS ergibt sich aus der Division der für den Anwendungsfall geplanten Nutzungszeit $t_{Nutzung,Plan}$ aller ein-geplanten FFZ $n_{FFZ,Plan}$ mit der jeweils neu errechneten Nutzungszeit der ESS $t_{Nutzung,WLT}$:

$$n_{FFZ,Soll,WLT} = \frac{n_{FFZ,Plan} \cdot t_{Nutzung,Plan}}{t_{Nutzung,WLT}} \quad (6-29)$$

Für den Planwert der FFZ-Anzahl $n_{FFZ,Plan,WLT}$ liefern *Günthner und Micheli* die Formel (6-31) für die Berechnung über die Nutzungszeit $t_{Nutzung}$, den Nutzungsgrad $\eta_{ver,WLT}$ und die Anzahl der Flurförderzeugstunden pro Schicht $n_{FFZh,Schicht}$. Die FFZ-Stunden pro Schicht stellen den Bezugswert dar, der in der Logistikplanung häufig anhand vorausgehender Analysen zu den Arbeitsaufgaben, z. B. mithilfe von MTM, ermittelt wird. Dieser Wert ist für die drei Technologien identisch, da es sich um die erforderliche produktive Einsatzzeit aller FFZ für die zu verrichtenden Arbeitsaufgaben handelt, s.

Formel (6-30). Die FFZ-Anzahl weicht abhängig von Nutzungszeit und Nutzungsgrad voneinander ab. [Gün-2015a, S. 127]

$$n_{FFZh,Schicht,W} = n_{FFZh,Schicht,L} = n_{FFZh,Schicht,T} \quad (6-30)$$

$$n_{FFZ,Plan,WLT} = \frac{n_{FFZh,Schicht}}{t_{Nutzung,WLT} \cdot \eta_{ver,WLT}} \quad (6-31)$$

Das Delta aus dem Planungswert $n_{FFZ,Plan}$ und dem Sollwert $n_{FFZ,Soll}$ hilft bei der detaillierten Analyse des Prozesses sowie beim Aufzeigen möglicher Einsparpotenziale beim Einsatz der ESS.

Ausgehend von der Soll-FFZ-Anzahl $n_{FFZ,Soll}$ kann für die ESS der Umfang des unternehmenseigenen Personaleinsatzes abgeleitet werden, sofern die Flotte nicht durch einen Dienstleister betrieben wird. Je Schicht sind für alle eingesetzten, nicht automatisierten FFZ Fahrer vorzusehen. Der Personalbedarf an Fahrern errechnet sich aus der Differenz der Gesamtfahrzeuge mit der Anzahl der automatisierten FFZ n_{FTF} . Zudem erfordern der Wechselbetrieb bei PbB und der Tankbetrieb bei FTF mit BzS den Einsatz von Personal in der Funktion des Batterie- bzw. Tankwarts. Diese Anzahl $n_{MA,WLT}$ ergibt sich abhängig von der Anzahl der Wechselbereiche und der weiteren Einsatzmöglichkeiten der Mitarbeiter – der Wert kann kleiner als 1 sein, wenn Mitarbeiter mehrere Tätigkeiten ausüben. Die erforderliche Arbeitszeit und damit Anzahl an Mitarbeitern für den Batteriewechsel lässt sich aus den Zeitanteilen im Wechselbereich, der Anzahl der FFZ sowie die Häufigkeit der Wechsel ermitteln. Bei LIB-FFZ und nicht automatisierten BzS-FFZ errechnet sich die erforderliche Anzahl an Mitarbeitern je Schicht aus der Anzahl der eingesetzten FFZ abzüglich der FTF und somit der Anzahl der nötigen Fahrer. Bei LIB im Ladebetrieb sind keine weiteren Mitarbeiter für den Wechselprozess erforderlich, da diese der Fahrer durchführt, ebenso wie bei der Wasserstoffbetankung der BzS. Die Anzahl der Mitarbeiter n_{MA} je Schicht ergibt sich somit als:

$$n_{MA} = n_{FFZ} - n_{FTF} + n_{MA,WLT} \quad (6-32)$$

Weitere Mitarbeiter, die für Service und Instandhaltung der FFZ sowie der ESS mit der Infrastruktur verantwortlich sind, werden in der Berechnung nicht einbezogen. Hierbei handelt es sich vorrangig um die Mitarbeiter des Lieferanten der Technologien, die über Servicevereinbarungen bezahlt werden und nicht als Mitarbeiter des Unternehmens einzuplanen sind. Die variierenden Instandhaltungsaufwände der ESS werden in Form von Kosten in der monetären Bewertung berücksichtigt.

6.2.5 Dimensionierung der Infrastruktur beim Einsatz von BzS

Die Infrastruktur zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit und deren Auslegung hat an mehreren Stellen Einfluss auf die Bewertung und den Vergleich der Technologien. Insbesondere beim Einsatz von BzS stellt sich diese als aufwändiger im Vergleich zu PbB und LIB dar, da die in Unterabschnitt 2.2.5 beschriebenen Komponenten der Betankungsinfrastruktur jeweils ein eigenes System darstellen, das gestaltet und dimensioniert werden kann. Der tatsächliche Wasserstoffbedarf der Flotte hat Einfluss auf die Dimensionierung dieser Komponenten und Systeme, die der Wasserstoff bis zur Betankung durchläuft. Die Ausgestaltung der Komponenten, die Abstimmung dieser aufeinander und die Auslegung der Gesamtanlage hat großen Einfluss auf die Kosten und somit den wirtschaftlichen Einsatz von BzS-FFZ. Im Rahmen des Forschungsprojektes ‚FFZ70‘ wurde daher ein Vorgehen zur Dimensionierung der Komponenten der Betankungsanlage im stufenförmigen System aus Abbildung 2-7 als Orientierung in der Planungsphase entwickelt; das Vorgehen bezieht sich auf die wasserstoffführenden Kernkomponenten der Infrastruktur; es resultiert aus Literaturrecherche mit Marktanalyse sowie Expertengesprächen [fml-2019]. Die folgenden Inhalte wurden in Auszügen bereits durch die Autorin in der *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* veröffentlicht. [Wag-2020, S. 720ff.]

Die richtige Dimensionierung stellt sich durch die verschiedenen Komponenten und deren Zusammenspiel als komplex dar, weshalb ein abstrahiertes analytisches Vorgehen zur Abschätzung der Komponenten entwickelt wurde. Die formale Darstellung mit Durchschnittswerten erfolgt ohne Berücksichtigung des Einflusses des individuellen Tank- und Nutzerverhaltens, räumlicher Gegebenheiten oder dem temperaturabhängigen Verhalten von Wasserstoff. Die Ermittlung des Wasserstoffbedarfs (s. Unterabschnitt 6.1.6) stellt die wichtigste Kenngröße für die Dimensionierung der Anlage dar.

Berechnung der Anzahl nötiger Dispenser

Der erste Schritt dient der Ermittlung der Anzahl der Dispenser $n_{Dispenser}$. Hierfür ist die Anzahl der Tankvorgänge für die Flotte $n_{Tankvorgang}$ pro Betriebsstunde mit dem ermittelten Wasserstoffbedarf zu berechnen. Man teilt den Bedarf durch die Summe der Tankinhalte m_{BzS} aller FFZ multipliziert mit dem Füllkoeffizienten $k_{Füllstand}$, der die nachzutankende Menge Wasserstoff beschreibt, also die Differenz des Füllstandes vor und nach dem Tankvorgang bezogen auf das Tankvolumen. Die Tankvorgänge der Flotte erhält man durch Multiplikation mit der Soll-Anzahl der FFZ $n_{FFZ,Soll}$:

$$n_{Tankvorgang} = \frac{m_{Wasserstoff,ges}}{n_{FFZ,Soll} \cdot m_{BzS} \cdot k_{Füllstand}} \cdot n_{FFZ,Soll} \quad (6-33)$$

Für die Ermittlung der Dispenserzahl folgt eine Berechnung der Anzahl maximal möglicher Befüllungen pro Dispenser $n_{\text{Befüllungen/Dispenser}}$ pro Stunde unter den Annahmen, dass die Tankzeit t_{Tanken} bei allen BzS-Typen gleich ist, die Betankung während der Betriebsstunden der FFZ erfolgt und die Fahrzeuge pro Schicht gleich ausgelastet sind. Zur Betankungszeit addieren sich Pufferzeiten für prozessbedingte Vor-/Nachlaufzeiten der Betankung und Wasserabsaugung, die zur Belegung des Dispensers führen.

$$n_{\text{Befüllungen/Dispenser}} = \frac{3600}{t_{\text{Tanken}} + t_{\text{Vorbereitung,T}} + t_{\text{Nachbereitung,T}}} \quad (6-34)$$

Die Dispenserzahl (mit $n_{\text{Dispenser}} \geq 1$) errechnet sich dann aus Gleichungen (6-33) und (6-34), indem die Gesamtzahl der Tankvorgänge durch die möglichen Befüllungen pro Dispenser dividiert wird:

$$n_{\text{Dispenser}} = \frac{n_{\text{Tankvorgänge}}}{n_{\text{Befüllungen/Dispenser}}} \quad (6-35)$$

Wenn die FFZ in verschiedenen Werkshallen auf dem Gelände eingesetzt werden, die nicht in unmittelbarer Nähe zueinander liegen, empfiehlt es sich für die Berechnung ebenfalls die Anfahrtszeit einzubeziehen und eine Variante mit Dispensern in jedem Bereich zu kalkulieren.

Dimensionierung des Niederdruckspeichers

Sofern der Wasserstoff per Trailer angeliefert wird, ist für die Berechnung der Größe des Niederdruckspeichers $m_{\text{Niederdruck}}$ die Wasserstoffmenge im Trailer m_{Trailer} zu berücksichtigen. Diese ist mit dem Sicherheitsfaktor $k_{\text{Sicherheit,ND}}$ zu multiplizieren. Dieser sollte unter Berücksichtigung der Wiederbeschaffungszeit des Wasserstoffs so gewählt werden, dass die Versorgung der Flotte auch bei Lieferengpässen nicht abbricht.

$$m_{\text{Niederdruck}} = k_{\text{Sicherheit,ND}} \cdot m_{\text{Trailer}} \quad (6-36)$$

Bei Vor-Ort-Erzeugung orientiert sich die Größe des Niederdruckspeichers an Herstellungsart und Verbrauch. Insbesondere bei der Erzeugung aus erneuerbaren Energien muss eine wirtschaftliche Abwägung zwischen Speichergröße und möglichen Produktionsspitzen gefunden werden. Bei Pipelineversorgung entfällt der Speicher.

Auslegung von Hochdruckspeicher und Verdichter

Die Dimensionierung von Hochdruckspeicher und Verdichter erfolgt in direkter Abhängigkeit voneinander. Bei einem großen Speicher, z. B. für den errechneten Tagesbedarf, kann der Verdichter kleiner gewählt werden und über den Tag verteilt den Hochdruckspeicher befüllen.

Die erste Möglichkeit für die Dimensionierung der Komponenten ist die Auslegung anhand des Tagesbedarfes. Die im Hochdruckspeicher gelagerte Menge $m_{Hochdruck}$ wird dann durch den Faktor $k_{Tagesverbrauch}$, der für den Anteil am Tagesverbrauch steht, beeinflusst:

$$m_{Hochdruck} = k_{Tagesverbrauch} \cdot m_{Wasserstoff,ges} \cdot t_{Belegung} \cdot n_{Schichten,Tag} \quad (6-37)$$

Die tägliche Liefermenge des Verdichters $m_{Verdichter}$ in kg muss in diesem Fall mindestens $m_{Wasserstoff,ges}/k_{Tagesverbrauch}$ entsprechen, was einer Auslastung von $\rho_{Verdichter} = 100\%$ entspräche. In der Praxis hat sich eine Teilauslastung bewährt, z. B. $\rho_{Verdichter} = 75\%$. Die zu verdichtende Menge Wasserstoff lässt sich damit wie folgt bestimmen:

$$m_{Verdichter} = \frac{m_{Wasserstoff,ges} \cdot \rho_{Verdichter}}{k_{Tagesverbrauch}} \quad (6-38)$$

Die zweite Variante für die Auslegung des Verdichters ist die Berechnung in zusätzlicher Abhängigkeit von der Anzahl der Dispenser unter der Annahme, dass unmittelbar nacheinander betankt werden kann. Der Massenstrom des Verdichters $\dot{m}_{Verdichter}$ in kg je s lässt sich unter Berücksichtigung der Auslastung $\rho_{Verdichter}$ und der gesamten Tankzeit $t_{Tanken,ges}$ errechnen. Dies erfolgt über die Summe der einzelnen Nettotankzeiten der FFZ t_{Tanken} . Die Lieferleistung des Verdichters muss sich um die Anzahl der Dispenser $n_{Dispenser}$ erhöhen, um einen Engpass zu vermeiden. Die Bevorratung im Hochdruckspeicher steigert sich bei gleichzeitiger Betankung nicht, jedoch verkürzt sich die Tankzeit auf $t_{Tanken,ges}/n_{Dispenser}$.

$$\dot{m}_{Verdichter} = \frac{m_{Hochdruck}}{t_{Tanken,ges} \cdot \rho_{Verdichter}} \cdot n_{Dispenser} \quad (6-39)$$

Redundanzen und Auslegungsstrategien

Bei großen Flottenanwendungen mit BzS ist eine hohe Verfügbarkeit der Anlage erforderlich. Die Sicherstellung der Versorgung erfordert redundante Ausführungen einzelner Komponenten [Gün-2015c, S. 21]. In der Planungsphase hilft eine Fehlerana-

lyse bei der Identifikation ausfallkritischer Komponenten, wie Verdichter und Dispenser. Beim Verdichter ist ein Notfallkonzept unumgänglich. Eine Möglichkeit hierfür ist die Installation von zwei Verdichtern mit je einer Teilauslastung von 50 % anstelle eines Verdichters bei 100 % Auslastung. Bei Ausfall könnte der andere Verdichter auf 100 % hochgefahren werden, damit die Versorgung nicht abbricht. Bei gleichzeitiger Vergrößerung des Hochdruckspeichers kann die Ausfallzeit überbrückt werden. Hinsichtlich der Dispenser ist ebenfalls ein Notfallkonzept vorzusehen. Wenn in der Berechnung mit Formel (6-35) ein Dispenser ausreichen würde, sollte mindestens ein zweiter Dispenser installiert werden, da bei Ausfall nicht betankt werden kann. Neben der Versorgungssicherheit sind bei Auslegung der Komponenten mit nötigen Redundanzen auch wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen.

Platzbedarf

Da für den Einsatz von BzS keine zusätzlichen ESS außerhalb des FFZ vorzusehen sind, setzt sich der benötigte Platz für die Infrastruktur innerhalb der Halle $A_{Infrastruktur,Indoor}$ aus dem Platz für den Dispenser $A_{Dispenser}$ mit dem vorgesehenen Stellplatz A_{FFZ} , der während der Betankung belegt ist, sowie nötigen Sicherheitsabständen $A_{Sicherheit}$ zu bspw. Fertigungstechnik zusammen:

$$A_{Infrastruktur,T,Indoor} = (A_{Dispenser} + A_{FFZ} + A_{Sicherheit,T,Indoor}) \cdot n_{Dispenser} \quad (6-40)$$

Außerhalb der Halle ist je nach Konfiguration der Infrastruktur deutlich mehr Fläche $A_{Infrastruktur,Outdoor}$ vorzusehen als für den Aufbau der übrigen Infrastruktur-Komponenten. Sowohl die verschiedenen Speicher und der Verdichter als auch die Bereitstellung, über Pipeline oder Trailer-Anlieferung, bzw. Erzeugung und Sicherheitsvorkehrungen, wie eine Absperrung oder ein Zaun, fließen in die Berechnung ein:

$$\begin{aligned} A_{Infrastruktur,T,Outdoor} &= \\ &= A_{Verdichter} + A_{Niederdruck} + A_{Hochdruck} + A_{Bereitstellung} \\ &+ A_{Sicherheit,T,Outdoor} \end{aligned} \quad (6-41)$$

6.2.6 Auslegung der Infrastruktur beim Einsatz von Batterien

Im Vergleich zur Verwendung von BzS und dem Aufbau der dafür notwendigen Wasserstoffinfrastruktur gestaltet sich die Infrastruktur bei PbB und LIB weniger komplex. Analog zur Dimensionierung der wasserstoffführenden Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur ist die Auslegung der stromführenden Infrastrukturkomponenten abhängig vom ermittelten Energiebedarf der Flotte über die Anzahl der eingesetzten ESS. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um die zu installierenden Ladegeräte, die an das

öffentliche Stromnetz angeschlossen sind. Die Anzahl hat Einfluss auf die prozessuale, energetische und monetäre Betrachtung. Bei der energetischen Betrachtung stehen diesbezüglich insbesondere die Netzverfügbarkeit und die Abbildbarkeit von Lastspitzen im Fokus.

Berechnung der Anzahl nötiger Ladegeräte

Die unterschiedlichen Batterietypen der FFZ benötigen je nach Spannung passende Ladegeräte. Die Anzahl der Ladegeräte je FFZ-Typ errechnet sich aus der Anzahl der FFZ multipliziert mit dem Faktor $k_{\text{Sicherheit,Ladegerät}}$, welcher Redundanzen vorsieht.

$$n_{\text{Ladegerät}} = \sum_{i=1}^n n_{\text{FFZ,Soll},i} \cdot k_{\text{Sicherheit,Ladegerät},i} \quad (6-42)$$

Bei LIB sollte die Anzahl der Ladegeräte größer als die Anzahl der FFZ sein, da sonst die Gefahr besteht, dass FFZ nicht zwischenladen können, wenn die angefahrenen Ladeplätze alle bereits belegt sind, insbesondere wenn die Plätze an verschiedenen Stellen innerhalb der Gebäude sind und keine feste Zuordnung von Fahrzeug und Ladestation existiert. Sofern bei Verwendung von PbB mit zwei Batterien je FFZ gearbeitet wird, gilt $k_{\text{Sicherheit,Ladegerät}} = 1$, da immer eine Batterie im Fahrzeug ist und eine in der Ladestation. Wenn allerdings weitere Batterien als Ersatz vorgesehen sind, ist auch hinsichtlich der Ladegeräte ein Puffer einzuplanen.

Platzbedarf

Beim Ladebetrieb verbleibt die Batterie im FFZ, was bedeutet, dass im Gegensatz zum Wechselbetrieb keine zusätzlichen ESS benötigt werden. Die notwendige Fläche je Ladeplatz, die Indoor vorzusehen ist, ist somit die Grundfläche des größten FFZ sowie des Ladegeräts. Zwischen den Ladestationen sind darüber hinaus sicherheitsbedingte Mindestabstände von 0,5 m einzuhalten, die zu addieren sind [VdS-2259, S. 5]. Die Fläche der Infrastruktur ergibt sich aus der Multiplikation mit der Anzahl der Ladegeräte:

$$A_{\text{Infrastruktur,L}} = (A_{\text{Ladegerät,L}} + A_{\text{FFZ}} + A_{\text{Sicherheit,L}}) \cdot n_{\text{Ladegerät,L}} \quad (6-43)$$

Beim Wechselbetrieb sind je FFZ mehrere Batterien vorzusehen, da diese nicht im Fahrzeug verbleiben. Der Ladebereich benötigt daher weniger Platz, da nur die Fläche des ESS A_{ESS} dort vorzusehen ist und nicht die Grundfläche des FFZ. Auch bei Batterie-Ladestationen sind Mindestabstände einzuhalten. Bei PbB ist zudem aufgrund des Ausgasens ein abgegrenzter Bereich erforderlich. Für den Wechselvorgang selbst ist mehr Platz erforderlich: für das Abstellen des größten und des längsten FFZ, für die

Technik zum Wechsel der ESS, für das Handhaben der ESS beim Wechsel, für das Nachfüllen des Wassers. Die Indoor-Flächen errechnen sich wie folgt:

$$\begin{aligned} A_{\text{Infrastruktur},W} &= \\ &= (A_{\text{ESS}} + A_{\text{Ladegerät},W} + A_{\text{Sicherheit},W}) \cdot n_{\text{Ladegerät},W} + A_{\text{Wechseltechnik}} \quad (6-44) \\ &+ A_{\text{FFZ}} + A_{\text{Arbeitsbereich}} + A_{\text{Wasser}} \end{aligned}$$

6.3 Monetäre Bewertung

In das dritte Modul des multikriteriellen Modells, der monetären Bewertung, fließen neben den dem Planungsprojekt zugrundeliegenden technischen und projektbezogenen Daten die zuvor ermittelten Zielgrößen und Produktivitätskennzahlen der energetischen und prozessualen Betrachtungen ein. Ausgehend von den bestehenden Bewertungsmöglichkeiten der Kosten werden die relevanten Faktoren und Kostenarten identifiziert. Die formale Beschreibung für die monetären Kennzahlen erfolgt im Anschluss daran. Für die Analyse und die folgende Identifikation der relevanten Aspekte und Kostenarten dienen – neben den erarbeiteten technischen Grundlagen und dem Stand der Wissenschaft und Technik – die Erkenntnisse und das Life Cycle Cost-Modell von *Günthner und Micheli* [Gün-2015a, S. 123ff.] als Grundlage.

6.3.1 Identifikation der Kostenarten und relevanten Faktoren

Der Einsatz von ESS in FFZ verursacht verschiedene Kosten. Je nach Technologie sind spezifische initiale Investitionen erforderlich und in der Betriebsphase fallen zusätzlich – vorrangig aufgrund der zuvor aufgezeigten energetischen und prozessualen Unterschiede – betriebsabhängige Kosten an. Die Analyse der Zusammensetzung der Kosten und das Zuordnen zu Kostenarten dient der Kategorisierung der Kosten mit der Identifikation der relevanten LCC-Faktoren und bildet einen wichtigen Schritt des LCC-Verfahrens. Die Strukturierung kann anhand verschiedener Kriterien erfolgen und stellt das Grundgerüst für die Kostenerfassung und -rechnung dar.

Für den Anwendungsfall der ESS in FFZ sind die für das Modell relevanten Kosten, neben den technischen Spezifika, vorrangig durch die prozessualen und energetischen Unterschiede des Anwendungsfalls beeinflusst, die in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben wurden. Abbildung 6-2 zeigt die davon abhängigen, übergeordneten Kosten in Anlehnung an die in Unterabschnitt 2.3.4 vorgestellten Kostenhauptgruppen nach *Coenenberg et al.*, in denen sich PbB, LIB und BzS unterscheiden. Diese Kostenartenhauptgruppen sind jeweils für die drei Nutzungsphasen zu identifizieren. Für den individuellen Entscheidungsfall ist, auch abhängig von den Unternehmenszielen, zu bewerten, welche Kosten und Kostenarten für die drei Phasen berücksichtigt werden sollen. Die Einordnung erfolgte anhand des *VDMA-Einheitsblattes 34160* und wurde für die drei Lebenszyklus-Phasen vorgenommen. Die Energiekosten sind für den spezifischen Anwendungsfall aufgrund ihrer Wichtigkeit aus den Sachkosten herausgelöst. Planungskosten könnten ebenfalls als Dienstleistungskosten anfallen, sofern dies ausgelagert wird. Umgekehrt können Instandhaltungskosten, ebenso wie Inbetriebnahmekosten, auch interne Personalkosten darstellen. Die Anschaffungs-

kosten sind alle der Entstehungsphase zugeordnet, im Falle von Miet- oder Leasingverträgen fallen die Kosten in der Betriebsphase an. Kosten für Fremdrechte sind für die Anwendung von ESS in FFZ nicht relevant und werden daher nicht explizit berücksichtigt.

	Entstehungsphase (vor der Nutzung) $t = 0$	Betriebsphase (während der Nutzung)	Verwertungsphase (nach der Nutzung) $t = t_{Nutzung}$
Personal-/Sozialkosten	Planung	FFZ-Fahrer	
	Schulung	Bediener Infrastruktur	
Sachkosten	Investition FFZ mit ESS	Miete	Entsorgung FFZ/ESS/Infrastruktur
	Inbetriebnahme FFZ mit ESS	Ersatzteile / Material	Demontage / Rückbau
	Investition Infrastruktur	Notfallstrategie	Verkauf
	Inbetriebnahme Infrastruktur		
Energiekosten		Energie (Strom)	
		Energie (Wasserstoff)	
Kapitalkosten		Zinsen Eigen-/Fremdkapital	
Dienstleistungskosten	Gutachten	Instandhaltung FFZ	Gutachten
		Instandhaltung ESS	
		Instandhaltung Infrastruktur	
Öffentliche Abgaben	Genehmigungen	CO ₂ -Steuer	Genehmigungen
	Förderung		
Versicherungskosten		Versicherung	
		Wagniskosten	

Abbildung 6-2: Unterschiede in anfallenden Kosten in LCC-Phasen bei den verschiedenen ESS in FFZ

Es zeigt sich, dass in den drei Phasen unterschiedliche Kostenarten anfallen, die für den Entscheider relevant sein können. Da sich die Technologien hinsichtlich der Anschaffungs- und Betriebskosten stark unterscheiden, soll für die weitere Betrachtung die Unterteilung in **Kosten in der Entstehungsphase, in der Betriebsphase und in der Verwertungsphase** erfolgen. Neben den Kosten, die unabhängig von der Wahl des ESS anfallen, wie Projektierungskosten, fallen in der Entstehungsphase bspw. in den Kategorien Personal-/Sozialkosten, Sachkosten und öffentliche Abgaben wesentliche Kosten an, die für Unterschiede in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der ESS sorgen. In der Betriebsphase zeigen sich in allen sieben Kostengruppen Unterschiede, wohingegen in der Verwertungsphase vorrangig Sachkosten, Dienstleistungskosten und öffentliche Abgaben voneinander abweichen. Der Fokus für das Modell liegt auf den unterschiedlichen Kostengruppen und Unterschieden zwischen den Technologien in der Entstehungs- und der Betriebsphase. Kostenarten, die für die drei ESS identisch

sind, werden nicht explizit betrachtet. Dies geschieht im Sinne der *VDI 2884*, die empfiehlt die Anzahl der Kriterien für eine geringere Komplexität auf die wichtigsten mit dem deutlichsten Einfluss auf die Gesamtkosten zu reduzieren.

Statische Berechnungsverfahren sind eher für kleine Investitionsentscheidungen und daher für eine fundierte Entscheidung für das ESS nicht geeignet, da nur ein Durchschnittszeitpunkt berücksichtigt wird und nicht der gesamte Lebenszyklus über die Nutzungsdauer der Technologien. Für die Berechnung der Gesamtkosten wird daher die Kapitalwertmethode als dynamisches Verfahren angewandt.

Die Gesamtkosten ergeben sich dabei aus der Summe aller Kostenarten für einen festgelegten Betrachtungszeitraum, idealerweise der Nutzungsdauer der Investition. Essentiell für die Investitionsentscheidung und die Bewertung der Kosten über den Lebenszyklus ist somit die Festlegung des Betrachtungszeitraums. Da die wesentliche Technologie mit gleicher Nutzungsdauer unabhängig von der ESS-Wahl das FFZ darstellt, ergibt sich der Betrachtungszeitraum anhand dessen Nutzungsdauer. Die Nutzungsdauer als Anzahl der Perioden in Jahren kann mithilfe der Formel (6-28) ermittelt werden. Die Nutzungsdauer der einzelnen Bestandteile der ESS-Technologien ist unterschiedlich. Während FFZ und ESS eine relativ ähnliche Nutzungsdauer haben, ist die der Infrastruktur länger. Dieser Abweichung wird formell in der Ermittlung des Kapitalwertes begegnet, indem am Ende des herangezogenen Betrachtungszeitraums, der Nutzungsdauer der FFZ, der Restwert der übrigen Hardware eingerechnet wird. Dieser kann basierend auf der linearen Abschreibung der jeweiligen Investition mit den verbleibenden Jahren der jeweiligen Nutzungsdauer angesetzt werden. Die zunehmende Degradation über die Lebensdauer der ESS wird hierbei nicht berücksichtigt. Der Restwert wirkt als Einzahlung im letzten Jahr der Nutzungsdauer und es gilt die Annahme, dass ein Verkauf zu diesem Preis möglich wäre. Die Abschreibung erfolgt dabei nur für das tatsächlich vorhandene Anlagevermögen, also die in den Sachkosten (s. 6.3.3) angeführten Anschaffungskosten, nicht aber für die Inbetriebnahmekosten oder sonstige Planungs- oder Genehmigungskosten [Gün-2015a, S. 128].

Die folgenden Unterabschnitte widmen sich der Ermittlung der einzelnen Kosten und Kostenarten in den vier Hauptgruppen, zugeordnet zu den drei Phasen, und liefern hierzu Berechnungsmöglichkeiten. Diese dienen der Berechnung des Kapitalwerts der Planungsalternativen anhand Formel (2-1) für den Vergleich der ESS im multikriteriellen Vorgehensmodell.

6.3.2 Ermittlung der Personal- und Sozialkosten

In der Gruppe der Personal- und Sozialkosten fallen vor und während der Nutzung Kosten an, die sich für die drei Technologien unterscheiden.

In der Entstehungsphase handelt es sich hierbei einerseits um die anfallenden **Kosten für die Planung**. Wie zuvor beschrieben kann der Kunde bei PbB und ebenfalls bei LIB alle Komponenten und deren Inbetriebnahme bei einem Zulieferer in Auftrag geben, bei BzS hingegen, ist seitens des Planers ein deutlich höherer Zeitaufwand nötig, um alle Lieferanten zu koordinieren und auch, um die Infrastruktur detailliert zu planen. Der zeitliche Aufwand für Genehmigungen, und damit ebenfalls verbundene Personalkosten, stellen eine weitere zu berücksichtigende Kostengröße dar.

Andererseits spielen **Kosten für Schulung und Unterweisung** des Personals eine Rolle. Aus haftungsrechtlicher Sicht ist der Unternehmer angehalten, sein Personal abhängig von der Gefährdungsbeurteilung des Arbeitsplatzes zu schulen. Zudem müssen die Mitarbeiter für die auszuführende Tätigkeit qualifiziert sein und im Falle der Fahrer die Eignung zum Führen der FFZ mit einem Flurfördermittelschein nachweisen. Diese Qualifizierung ist unabhängig bei allen drei Technologien für die Fahrer erforderlich. Bei PbB muss der Batteriewart für die Handhabung mit den Batterien sowie dem Kran unterwiesen werden, bei LIB sind die Fahrer für die Besonderheiten beim Laden zu sensibilisieren. Zudem muss der Arbeitgeber bei Batterien ebenfalls zu den einhergehenden Gefährdungen unterweisen. Bei Wasserstoff sollten grundsätzlich alle Mitarbeiter zu den besonderen Eigenschaften und Gefährdungspotenzialen geschult werden, die in Berührung mit der Technologie kommen, also sowohl die Fahrer, Werker oder auch die Werksfeuerwehr. Für die Festlegung der Qualifizierungsmaßnahmen und somit die Identifikation der Anzahl der Mitarbeiter mit Schulungsbedarf $n_{MA,Schulungsbedarf}$ ist seitens des Unternehmers eine Bewertung der Gefährdung der Arbeitsplätze durchzuführen. Die Summe der Schulungskosten $K_{Schulung,ges}$ ergibt sich aus dem Produkt der Einzelkosten für die Schulungsmaßnahme $K_{Schulung}$ mit der Anzahl der Mitarbeiter:

$$K_{Schulung,ges} = n_{MA,Schulungsbedarf} \cdot K_{Schulung} \quad (6-45)$$

Wesentlich stärker ins Gewicht als die Personal-/Sozialkosten in der Entstehungsphase fallen die Kosten dieser Hauptgruppe in der Betriebsphase. Hierbei handelt es sich um die **Personalkosten für die FFZ-Fahrer** $K_{Personal,Fahrer}$ sowie für die **Bediener** der jeweiligen Infrastruktur $K_{Personal,Bediener}$. Die folgenden Formeln stellen eine Erweiterung der Berechnungen von *Günthner und Micheli* dar, die die Zusammenhänge für eine Berechnung der Personalkosten für die FFZ-Anwendung erarbeitet haben: [Gün-2015a, S. 128ff.]

$$K_{Personal,ges} = K_{Personal,Fahrer} + K_{Personal,Bediener} \quad (6-46)$$

Die jährlichen Kosten für die FFZ-Fahrer errechnen sich aus dem Produkt der Anzahl der Soll-Fahrzeuge, der Schicht-Dauer $t_{Schicht}$ – aufsummiert aus der Belegungszeit T_B und den vorgesehenen Pausenzeiten t_{Pause} –, der Anzahl der Schichten je Tag, der Anzahl der Arbeitstage je Jahr, der Personalkosten je Stunde und dem Ausfallfaktor für Abwesenheiten (Krankheiten/Urlaube) $k_{Abwesenheit}$.

$$\begin{aligned} K_{Personal,Fahrer} &= \\ &= n_{FFZ,Soll} \cdot t_{Schicht} \cdot n_{Schichten,Tag} \cdot n_{Arbeitstage,Jahr} \cdot K_{Personal,h} \\ &\cdot k_{Abwesenheit} \end{aligned} \quad (6-47)$$

Für die Bediener der Infrastruktur, also Batterie- oder Tankwarte, errechnen sich die jährlichen Kosten nicht über die Anzahl der Fahrzeuge, sondern über die Anzahl der Mitarbeiter, die für Tätigkeiten als Bediener an der Infrastruktur eingesetzt werden $n_{MA,WLT}$. Dieser Wert kann < 1 sein, sofern die Mitarbeiter dies nur neben weiteren Tätigkeiten als kleinen Anteil ihrer Arbeit erledigen. Der Ausfallfaktor ist hier ebenfalls zu berücksichtigen.

$$\begin{aligned} K_{Personal,Bediener} &= \\ &= n_{MA,WLT} \cdot t_{Schicht} \cdot n_{Schichten,Tag} \cdot n_{Arbeitstage,Jahr} \cdot K_{Personal,h} \\ &\cdot k_{Abwesenheit} \end{aligned} \quad (6-48)$$

Außerdem lassen sich die jährlichen Personalkosten für die Flurförderzeugstunden je Schicht ermitteln, unter der Annahme, dass keine FTF eingesetzt werden. Die Berechnungsmethodik für die Prozesszeiten aus Abschnitt 6.2.3 über den Nutzungsgrad und -zeit der FFZ erlaubt es, die prozessbedingten Abweichungen in den Personalkosten darzustellen. Die Anzahl der Fahrzeuge und damit auch Mitarbeiter unterscheidet sich durch die Ausfallzeiten und verschiedene Verfügbarkeit der Fahrzeuge mit den eingesetzten Technologien. Der Bezugswert $n_{FFZh,Schicht}$ ist für die drei Technologien aus dem aufgezeigten Zusammenhang in Formel (6-30) identisch, da es sich um die geforderten produktiven Stunden der Flotte handelt; allerdings sind die Kosten für die Flurförderzeugstunden je Schicht durch die abweichende Nutzungszeit verschieden.

$$K_{Personal,FFZh} = \left(\frac{t_{Schicht} - t_{Nutzung}}{t_{Nutzung}} + 1 \right) \cdot n_{FFZh,Schicht} \cdot K_{Personal,h} \quad (6-49)$$

$$K_{Personal,FFZh,Jahr} = n_{Schichten,Tag} \cdot n_{Arbeitstage,Jahr} \cdot K_{Personal,FFZh} \quad (6-50)$$

In dieser Rechnung werden die Kosten für alle Tätigkeiten berücksichtigt, die in direktem Zusammenhang mit den ermittelten Zeitwerten für die Aufgaben der Flurförderzeugstunden stehen. Vorgänge für Wechseln, Laden, Tanken, die nicht vom Fahrer ausgeführt werden, sind anteilig über deren zugehörigen Zeitaufwand zu dem ermittelten Wert der $K_{Personal,FFZh}$ zu addieren, um die Gesamtkosten je FFZ-Stunde zu erhalten.

Zur Vereinfachung sieht die beschriebene Vorgehensweise lediglich die Lohnkosten vor. Sozialkosten in Form von Lohnnebenkosten oder freiwilligen sozialen Leistungen des Arbeitgebers, die je Mitarbeiter anfallen, werden nicht berücksichtigt, können aber über einen Faktor je Mitarbeiter (z. B. 1,2) ergänzt werden.

In der Verwertungsphase entstehen keine im Modell zu berücksichtigenden Personalkosten.

6.3.3 Berechnung der Sachkosten

Die Sachkosten stellen die größte Hauptgruppe dar und verursachen einen großen Anteil der Kostenunterschiede zwischen den drei Technologien. Dabei fallen in allen drei Phasen des Lebenszyklus verschiedene Kostenarten an.

Bei den in der **Entstehungsphase** anfallenden Sachkosten handelt es sich vorrangig um die Anschaffungskosten für die FFZ mit Integration der ESS und die zugehörige Infrastruktur, s. auch VDI 2695 [VDI-2695, S. 6]. Für letztere fallen ebenfalls Kosten für nötige Umbau- und Sicherheitsmaßnahmen an. Die Inbetriebnahme der FFZ mit ESS sowie der Infrastruktur kann weitere Kosten verursachen. Hierbei handelt es sich vorrangig um fixe Kosten, die für die Hardware-Komponenten anfallen. Weitere Kosten für Software, wie Flottenmanagement, sind nicht berücksichtigt, da diese für die unterschiedlichen ESS ähnlich ausfallen.

Anschaffungskosten FFZ

Die Beschaffung der FFZ stellt eine erste Kostenart dar, die sich für die drei Technologien allerdings noch nicht stark unterscheidet. Die Kosten für die gesamte Flotte errechnen sich für die Anzahl der Fahrzeuge je FFZ-Typ aus den Grundkosten für das FFZ $K_{FFZ,Grundpreis}$, der gewählten Ausstattung $K_{FFZ,Ausstattung}$, ggf. anfallenden Umbaukosten²³ $K_{FFZ,Umbau}$, Kosten für die Einsatzmöglichkeit aller ESS in ein Fahrzeug

²³ Diese fallen an, sofern für das BzS Änderungen am Fahrgestell vorzunehmen sind, bspw. für zusätzliche Lüftungsschlitze oder aufgrund vom Batterietrog abweichender Abmessungen des Systems.

über eine ‚H2ready‘-Option $K_{FFZ,H2ready}$ sowie Kosten für eine gewünschte Garantieverlängerung $K_{FFZ,Garantie}$:

$$K_{Invest,FFZ,ges} = n_{FFZ} \cdot (K_{FFZ,Grundpreis} + K_{FFZ,Ausstattung} + K_{FFZ,Umbau} + K_{FFZ,H2ready} + K_{FFZ,Garantie}) \quad (6-51)$$

Die Summe der Kosten aller FFZ-Typen ergibt die Gesamtkosten für die Anschaffung der FFZ-Flotte.

Anschaffungskosten ESS

Damit die beschafften FFZ eingesetzt werden können, benötigen sie ein entsprechendes ESS, für das ebenfalls Kosten anfallen. Je FFZ-Typ und somit zugehörigem ESS-Typ werden die Kosten ähnlich denen der FFZ errechnet. Die Kosten je ESS setzen sich aus dem Einzelkosten für ein System mit zusätzlicher Ausstattung, wie eine Bedieneinheit, und einer möglichen Garantieverlängerung zusammen. Multipliziert mit der Anzahl der erforderlichen ESS n_{ESS} , die sich aus der Anzahl der FFZ je Typ addiert um die Anzahl der Ersatz- bzw. Wechselgeräte, ergeben sich die Kosten für die ESS je Fahrzeugtyp. Die Summe über alle Fahrzeugtypen ergibt wiederum die Gesamtkosten.

$$K_{Invest,ESS,ges} = n_{ESS} \cdot (K_{ESS,Grundpreis} + K_{ESS,Ausstattung} + K_{ESS,Garantie}) \quad (6-52)$$

Inbetriebnahmekosten FFZ mit ESS

Für die Inbetriebnahme nach Anlieferung können für die FFZ weitere Kosten $K_{Inbetr,FFZ}$ entstehen. Diese setzen sich zusammen aus Kosten für die entstehenden Personalaufwände, Reisekosten $K_{Reise,Inbetr}$, Kosten für erforderliche Betriebsmittel oder Gerätschaften $K_{Betriebsmittel}$, wie Krane, Kosten für Werkzeug $K_{Werkzeug}$ und Kosten für Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe K_{RHB} : [VDMA-34160, S. 6]

$$K_{Inbetr,FFZ} = (t_{Inbetr,FFZ} \cdot K_{Personal,Inbetr,FFZ,h} + t_{Betriebsmittel} \cdot K_{Betriebsmittel,h} + K_{RHB}) \cdot n_{FFZ} + K_{Werkzeug} + K_{Reise,Inbetr} \quad (6-53)$$

Einen wesentlichen Einfluss auf die Zeit- und Kostenaufwände für die Inbetriebnahme ($t_{Inbetr,FFZ} \cdot K_{Personal,Inbetr,FFZ,h}$) hat die Integration der ESS in die FFZ, sofern nicht beide Systeme beim selben Lieferanten bestellt wurden und die Integration bereits im Kaufpreis enthalten ist. Bei der Integration sind Kosten für die Systemumstellung im FFZ auf das eingesetzte ESS einzuplanen.

Anschaffungskosten Infrastruktur

Zusätzlich zu den Hardwarekosten für FFZ und ESS entstehen Hardwarekosten für die Infrastruktur zur Energieversorgung. Die folgenden Formeln schlüsseln die Berechnung der Kosten für die drei Arten der Infrastruktur für PbB, LIB und BzS auf. Für den Wechselbetrieb fallen einerseits – abhängig von der Geräteanzahl – die Kosten für die Ladegeräte $K_{Ladegerät}$ an. Darüber hinaus entstehen Kosten hinsichtlich der Wechseltechnik $K_{Wechseltechnik}$, wie Kran oder Verschiebewagen. Außerdem fallen Kosten an $K_{Infra,Sonstige,W}$ für die weitere Ausstattung der Bereiche, wie die Batteriestellplätze, oder auch zusätzlich erforderliche Transportfahrzeuge bei dezentralen Stationen:

$$K_{Invest,Infra,W} = n_{Ladegerät} \cdot K_{Ladegerät} + K_{Wechseltechnik} + K_{Infra,Sonstige,W} \quad (6-54)$$

Im Ladebetrieb ist die Berechnung der Anschaffungskosten in Hardware vergleichsweise einfach. Die Kosten werden über die Anzahl der Ladegeräte und deren Einzelkosten sowie sonstige Kosten, wie für erforderliche Netzkomponenten, ermittelt:

$$K_{Invest,Infra,L} = n_{Ladegerät} \cdot K_{Ladegerät} + K_{Infra,Sonstige,L} \quad (6-55)$$

Für den Tankbetrieb bei wasserstoffbetriebenen Systemen errechnen sich die Anschaffungskosten für die Hardware, abhängig von der festgelegten Dimensionierung (s. 6.2.5), aus der Summe der Kosten für die einzelnen Komponenten:

$$K_{Invest,Infra,T} = K_{Erzeugung} + K_{Niederdruck} + K_{Hochdruck} + K_{Betankungsanlage} + n_{Dispenser} \cdot K_{Dispenser} \quad (6-56)$$

Die Kosten für die Betankungsanlage $K_{Betankungsanlage}$ enthalten hierbei die Anzahl der Verdichter und deren Kosten sowie aller weiteren Subsysteme der Anlage.

Inbetriebnahmekosten Infrastruktur

Neben den eigentlichen Hardwarekosten fallen bei der Infrastruktur Kosten für Aufbau, Installation und Inbetriebnahme an. Die Aufschlüsselung der Kosten orientiert sich am *VDMA-Merkblatt 34160* [VDMA-34160, S. 7]. Bei allen drei Arten der Infrastruktur fallen Baukosten K_{Bau} für die Neubauten an Gebäuden und Einrichtungen an, die einen wesentlichen Anteil ausmachen können. Diese beinhalten die Kosten für Sicherheitsmaßnahmen, wie die Maßnahmen für explosionsgefährdete Bereiche. Dazu addieren sich Kosten zur Anbindung an die bestehende Versorgung $K_{Versorgung,Infra}$ von Energie, Hilfsstoffen und Daten und die Entsorgung $K_{Entsorgung,Infra}$. Kosten für den Aufbau von neuen Ver- und Entsorgungsnetzwerken sind über $K_{Netzinfrastuktur}$ abgebildet. Die Kosten für die Auslegung und den Ausbau des Strom-Netzanschlusses fallen

ebenfalls hierin. Die übrigen Kosten ähneln denen der Inbetriebnahme der FFZ, also Personalkosten, Reisekosten, Betriebsmittelkosten, Werkzeugkosten und Kosten für Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe.

$$\begin{aligned}
 K_{Inbetr,Infra} = & K_{Bau} + K_{Versorgung,Infra} + K_{Entsorgung,Infra} + K_{Netzinfrastruktur} \\
 & + t_{Inbetr,Infra} \cdot K_{Personal,Inbetr,Infra,h} + K_{Reise,Inbetr} + t_{Betriebsmittel} \\
 & \cdot K_{Betriebsmittel,h} + K_{Werkzeug} + K_{RHB}
 \end{aligned} \quad (6-57)$$

Im Gegensatz zu den vorgestellten Kosten in der Entstehungsphase entstehen in der **Betriebsphase** vorrangig variable Kosten. Neben dem großen Anteil der Energiekosten (s. Unterabschnitt 6.3.4) fallen Kosten für Miete, für Ersatzteile, für Material, z. B. Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe, und für die vom Unternehmen vorgesehene Notfallstrategie zur Gewährleistung der Leistungserbringung an. Die Instandhaltungskosten, die ebenfalls in der Betriebsphase anfallen, sind für das Modell in die Hauptgruppe der Dienstleistungskosten eingeordnet, da die Maßnahmen bei FFZ mit ESS größtenteils an Servicetechniker ausgelagert werden. Unterabschnitt 6.3.6 beschreibt diese näher.

(Kalkulatorische) Mietkosten

Kalkulatorische Kosten entstehen für das Unternehmen, da es das für die Investition gebundene Geld nicht anderweitig, z. B. am Kapitalmarkt, investieren kann und dafür somit keine Zinsen erhält. „Entscheidend für Ansatz und Bewertung sind entweder die Kosten der besten Verwendungsalternative oder der entgangene Nutzen (Opportunitätskosten) oder die Kosten, die für alternative Faktoren hätten aufgebracht werden müssen, wenn auf den Einsatz der gewählten Faktorart verzichtet worden wäre (Alternativkosten).“ [Coe-2016b, S. 90] Opportunitätskosten stellen damit den Gegenwert für einen entgangenen Nutzen bei Verwendung des eigenen Kapitals für betriebliche Zwecke dar [May-1997, S. 130ff.]. Für das Vorgehensmodell werden die **Mietkosten** als fixe Kosten für den Flächenbedarf innerhalb der Halle für Infrastruktur oder Lade-/Wechsel-/Tankprozesse berücksichtigt, da dieser Raum nicht wertschöpfend genutzt werden kann und sich bei den drei Technologien stark unterscheiden kann. In die Berechnung der kalkulatorischen Flächenkosten fließen die errechneten Platzbedarfe für die Tankinfrastruktur aus (6-40) und (6-41), für die Ladeinfrastruktur aus (6-43) und für die Wechsellinfrastruktur aus (6-44) ein. Die jährlichen Kosten ergeben sich über das Produkt des Flächenbedarfes, Indoor wie Outdoor, mit dem jeweiligen (unternehmensinternen) Kostensatz je m² K_{m^2} [VDMA-34160, S. 10]:

$$K_{Miete} = A_{Infrastruktur,Indoor} \cdot K_{m^2,Indoor} + A_{Infrastruktur,Outdoor} \cdot K_{m^2,Outdoor} \quad (6-58)$$

Die interne Festlegung des Kostensatzes erfolgt abhängig von der Lage und dem Wert der verwendeten Fläche und berücksichtigt neben der Miete ebenfalls Kosten für Heizung oder Instandhaltung des Gebäudes [VDMA-34160, S. 10]. Wenn die Fläche produktionsnah ist und ebenfalls wertschöpfend genutzt werden könnte, ist der Kostensatz entsprechend höher anzusetzen. Sofern das Unternehmen Flächen anmietet, ist der tatsächliche Kostensatz und kein kalkulatorischer Wert zu verwenden.

Ersatzteil- und Materialkosten

Weitere im Betrieb anfallende Kosten sind Ersatzteil- und Materialkosten. In den Instandhaltungskosten (s. 6.3.6) sind die Materialkosten für Wartungen sowie geplante und ungeplante Instandhaltungen bereits enthalten. Je nach Einsatzbedingungen kann es frühzeitig zum Verschleiß kommen oder Material, z. B. in Form von Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffen nötig sein. Bei PbB muss bspw. regelmäßig Wasser nachgefüllt werden. Sofern das Unternehmen plant, verschiedene Ersatzteile vorzuhalten, sind deren Kosten sowie die Lagerung als gebundenes Kapital kalkulatorisch ebenfalls zu berücksichtigen.

Kosten für Notfallstrategie

Auch das Vorhalten einer Notfallstrategie für die Sicherstellung der vom Unternehmen geforderten Leistungserbringung, bspw. hinsichtlich Verfügbarkeiten, kann Kosten verursachen. Diese hängen wesentlich von der gewählten Strategie ab und beinhalten neben Anschaffungskosten häufig auch Personalkosten für den Einsatz von Servicetechnikern. Je nach Einsatztechnologie kann diese unterschiedlich gestaltet werden. Mögliche Strategien sind:

- Vorhalten von Ersatzfahrzeugen: Bei arbeitsintensiven Anwendungen oder Fahrzeugen mit fest verbauten Batterien, wie bei manchen LIB-Staplern, können einzelne Fahrzeuge mit derselben ESS-Technologie vorgehalten werden, die beim Ausfall eines FFZ/ESS eingesetzt werden können.
- Vorhalten von zusätzlichen ESS für einzelne Fahrzeuge: Eine vergleichsweise günstige Notfallstrategie ist das Bereitstellen zusätzlicher ESS für einen möglichen Ausfall eines Systems.
- Vorhalten von Ersatzbatterien für alle Fahrzeuge: Beim Einsatz von BzS können bspw. für alle FFZ PbB vorgehalten werden, um bei längerem Ausfall der Infrastruktur weiter agieren zu können.
- Redundante Ausführungen in der H₂-Infrastruktur: Einzelne, ausfallkritische Komponenten (wie Verdichter oder Dispenser) sollten für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit doppelt installiert sein (s. 6.2.5).

- Erhöhen der Anzahl der Ladeplätze/Geräte: Um Stillstände wegen geringer Ladebestände entgegenzuwirken, ist es hilfreich, eine höhere Anzahl an Ladegeräten/-plätzen vorzusehen als es im Einsatz befindliche Geräte gibt.
- Einsetzen von Flotten-Servicetechnikern und Vorhalten von Ersatzteilen zur Verkürzung der MTTR: Techniker vor Ort können dafür sorgen, dass Ausfälle mit kurzen Reaktionszeiten behoben werden können und eine schnelle Wiederinbetriebnahme erfolgt.

Je nach Wichtigkeit der FFZ-Anwendung sollten die entstehenden Kosten mit dem resultierenden Nutzen abgeglichen werden. Bei Einsatz der FFZ in der Produktionsversorgung können Ausfälle zu einem teuren Bandstillstand führen, den es in jedem Fall zu vermeiden gilt.

Verwertungskosten

Einen weiteren Bestandteil der Lebenszykluskosten stellen die anfallenden Kosten und Erlöse der **Verwertungsphase** dar. Zu den Sachkosten sind die Kosten für **Demontage bzw. Rückbau, Verkauf** und **Entsorgung** der Sachwerte anzusetzen; diese fallen je nach Lebensdauer der Komponenten unterschiedlich hoch aus. Für das Modell wird angenommen, dass das gesamte Anlagevermögen in der Verwertungsphase liquidiert wird, auch wenn in der Realität die Infrastruktur, insbesondere bei Wasserstoff mit regelmäßiger Instandhaltung, eine längere Lebensdauer als FFZ und ESS hat. Der Restbuchwert der FFZ, ESS und Infrastruktur muss hierfür ermittelt werden. Der Restbuchwert ergibt sich basierend auf der linearen Abschreibung über die Lebensdauer im Verhältnis zur Nutzungszeit. Sofern der Schrottwert den Verkaufswert übersteigt, wird der Wert der Verschrottung herangezogen. Die dadurch generierten Mittel fließen als Einnahmen zum Ende des Betrachtungszeitpunkt in eine Bewertung ein. [fml-2020] Die gesamten Verwertungskosten $K_{Verwertung}$ stellen damit die Summe der Rückbaukosten $K_{Rückbau}$ – bestehend aus Demontagekosten, Logistikkosten für Abtransport, Verschrottungskosten, Entsorgungs- und Sanierungskosten –, des Restwertes des Anlagevermögens $K_{Restwert}$ und sonstigen Kosten und Erlösen der Verwertung $K_{Sonstige,Verwertung}$: [VDMA-34160, S. 12f.]

$$K_{Verwertung} = K_{Restwert,ESS} + K_{Restwert,FFZ} + K_{Restwert,Infra} + K_{Rückbau} + K_{Sonstige,Verwertung} \quad (6-59)$$

Beim Restwert handelt es sich idealerweise um einen Erlös, weshalb dieser mit einem negativen Vorzeichen zu versehen ist.

Abschreibungen

Zur Ermittlung des Restwertes, insbesondere bei Anlagevermögen, dessen Nutzungsdauer länger ist als die Betrachtungszeit, dienen (kalkulatorische) Abschreibungen. Dies kann in diesem Fall sowohl für die ESS als auch die Infrastruktur der Fall sein. Kalkulatorische Abschreibungen werden in der Kostenrechnung verwendet, um den Wertverzehr abnutzbaren Anlagevermögens zu berücksichtigen und somit die Kosten verursachungsgerecht über die Nutzungsdauer zu verteilen. Kalkulatorische Abschreibungen sind, nicht wie bilanzielle Abschreibungen, unabhängig von Vorschriften. Die lineare Abschreibung mit konstanter Verteilung des Wertverlustes über die Nutzungsdauer stellt die einfachste Berechnungsart dar. [Coe-2016a, S. 213ff.] Die jährlichen Kosten für die kalkulatorischen Abschreibungen werden für die einzelnen Anlagegüter über die folgende Formel ermittelt:

$$K_{\text{Abschreibung}} = \frac{K_{\text{Invest}}}{t_{\text{Nutzungsdauer}}} \quad (6-60)$$

Die Nutzungsdauer in Jahren $t_{\text{Nutzungsdauer}}$ sollte hier, wie in Formel (6-28) ermittelt, die tatsächliche Nutzungsdauer unter den Einsatzbedingungen im Unternehmen widerspiegeln. Der Restwert für die ESS, die FFZ sowie die Infrastruktur, sofern deren Nutzungszeit die Betrachtungszeit übersteigt, stellt sich wie folgt dar:

$$K_{\text{Restwert}} = \frac{K_{\text{Invest,ges}}}{t_{\text{Betrachtung}}} \cdot (t_{\text{Nutzungsdauer}} - t_{\text{Betrachtung}}) \quad (6-61)$$

Sollte die Nutzungsdauer kürzer als die Betrachtungszeit sein, ist eine neue Investition in die jeweilige Komponente erforderlich. Deren Restwert wiederum kann dann zum Ende des Betrachtungszeitraums über (6-61) ermittelt werden.

6.3.4 Ermittlung der Energiekosten

Zu den betriebsabhängigen, variablen Kosten zählen außerdem Kosten für Kraftstoffe und elektrische Energie.

Energiekosten für FFZ mit PbB und LIB

Wie bereits in 6.1.1 ausgeführt, setzen sich die jährlichen Energiekosten für Unternehmen aus mehreren Bestandteilen zusammen. Auf der einen Seite sind das die leistungsabhängigen Kosten $K_{E,\text{leistungsabh}}$, also die fixen Kosten, die sich aus Leistungspreis $K_{E,\text{leist/kW}}$ und der Peak-Leistung $P_{\text{Stromnetz,max,Laden}}$ aus Formel (6-10) des jeweiligen Jahres ergeben. Hinzu kommen arbeitsabhängige Kosten $K_{E,\text{arbeitsabh}}$, wel-

che die tatsächlich von der Infrastruktur verbrauchte Energiemenge $E_{Stromnetz}$ mit Arbeitspreis $K_{E,arbeit/kWh}$ darstellen. Zusätzlich fällt der kundenabhängige Grundpreis $K_{E,kundenabh}$ an, der sich abhängig vom Gesamtenergiebedarf des Unternehmens ergibt; dieser ist somit nur anteilig für die FFZ in Bezug auf den Gesamtenergiebedarf des Unternehmens anzusetzen. [Heu-2013, S. 667ff.; Hab-2018, S. 43] Unter Berücksichtigung der Ausführungen aus 6.1.6 ergibt sich folgender Zusammenhang für die jährlichen Energiekosten:

$$\begin{aligned}
 K_{Energie,PbB/LIB} &= K_{E,leistungsabh} + K_{E,arbeitsabh} + \frac{E_{Stromnetz}}{E_{ges}} \cdot K_{E,kundenabh} \\
 &= K_{E,leist/kW} \cdot P_{Stromnetz,max,Laden} + K_{E,arbeit/kWh} \cdot E_{Stromnetz} \cdot t_{Nutzung} \quad (6-62) \\
 &\quad \cdot n_{Schichten,Tag} \cdot n_{Arbeitstage,Jahr} + \frac{E_{Stromnetz}}{E_{ges}} \cdot K_{E,kundenabh}
 \end{aligned}$$

Energiekosten für FFZ mit BzS

Für die Berechnung der Energiekosten beim Einsatz von BzS können ebenfalls die Überlegungen aus der energetischen Bewertung in Unterabschnitt 6.1.6 herangezogen werden. Zu den Kosten zählen einerseits die Wasserstoffkosten, also für den Wasserstoff je kg sowie dessen Anlieferung respektive Bereitstellung, und andererseits die Kosten für den zusätzlichen Strombedarf der Infrastruktur. Zur Berechnung der Kosten für den Wasserstoff werden neben den jährlichen Anlieferkosten $K_{Anlieferung,H2}$ noch die Kosten für den tatsächlichen Wasserstoffbedarf ermittelt – also die Menge in kg aus (6-12) bzw. aus (6-13) multipliziert mit dem Preis je kg $K_{Wasserstoff/kg}$, den das Unternehmen für den Wasserstoffbezug zahlen muss. Die Kosten für den Energieverbrauch der Infrastruktur bei BzS ergeben sich analog Formel (6-62) aus dem mithilfe von (6-11) für die Wasserstoffinfrastruktur errechneten Strombedarf:

$$\begin{aligned}
 K_{Energie,BzS,Bh} &= m_{Wasserstoff,ges} \cdot K_{Anlieferung,H2/kg} + m_{Wasserstoff,ges} \\
 &\quad \cdot K_{Wasserstoff/kg} + K_{E,leist/kW} \cdot P_{Stromnetz,max,H2} + K_{E,arbeit/kWh} \\
 &\quad \cdot E_{Stromnetz,H2} + \frac{E_{Stromnetz,H2}}{E_{ges}} \cdot K_{E,kund} \quad (6-63)
 \end{aligned}$$

Der Jahreswert resultiert wiederum aus der Multiplikation mit $(t_{Nutzung} \cdot n_{Schichten,Tag} \cdot n_{Arbeitstage,Jahr})$. Die Leistungsspitze $P_{Stromnetz,max,H2}$ kann auch mithilfe von Formel (6-11) kalkuliert werden, indem nicht die durchschnittlichen Werte, sondern stattdessen die maximalen Verbrauchswerte für die Summanden, also die Verbraucher, angenommen werden.

6.3.5 Berücksichtigung der Kapitalkosten

Bei Kapitalkosten handelt es sich um die Kosten, die in einem Unternehmen anfallen, wenn es eine Investition aus **Eigen- oder Fremdkapital** tätigt. Die Summe aus Eigenkapital- und Fremdkapitalkosten ergibt die Gesamtkapitalkosten. Klassische Fremdkapitalkosten stellen Zinsen für aufgenommene Kredite dar; die genauen Kosten sind in Kreditverträgen festgelegt. Diese ergeben sich vorrangig aus den Investitionen in der Entstehungsphase und fallen in der Betrachtungszeit über die Nutzungsdauer bis in die Betriebs- und Verwertungsphase hinein an. Je höher die Investition in die Sachkosten aus 6.3.3 ausfällt, desto höher sind die damit verbundenen Kapitalkosten. Eigenkapitalkosten sind keine tatsächlich anfallenden Kosten, sondern fiktive, kalkulatorische Kosten. Diese kalkulatorischen Zinsen werden, wie alle kalkulatorischen Kosten, unternehmensindividuell bestimmt und entsprechend sehr unterschiedlich gehandhabt. [Hee-2021, S. 123ff.] Ein Ansatz für die Berechnung der Eigenkapitalkosten in Form der kalkulatorischen Zinsen r_{EK} ist über die Rendite auf dem Kapitalmarkt. Das sind einerseits risikofreie Raten r_f , die auf dem Kapitalmarkt z. B. aus sicheren Staatsanleihen resultieren. Und andererseits die Marktrisiko-, Risiko- oder Geduldsprämie r_p , die sich aus dem Ertrag der durchschnittlichen, alternativen Anlage und Rendite auf dem volatilen Aktienmarkt abzüglich der risikofreien Rendite der Anlage ergibt. Die Geduldsprämie ist stark abhängig vom betrachteten Anlagezeitraum – bei längerer Anlage nivelliert sich der Wert auf eine Höhe, die oberhalb der risikofreien Rendite liegen kann. Die Erweiterung der Formel um den individuellen Risikofaktor k_{Risiko} sorgt für die Berücksichtigung unternehmensinterner, portfoliobedingter Schwankungen: [Hee-2021, S. 125ff.]

$$r_{EK} = r_f + k_{Risiko} \cdot r_p \quad (6-64)$$

Die *VDI-Richtlinie 2695*, die im März 2010 herausgegeben wurde, verwendet bei Ermittlung der Betriebskosten für Fahrzeuge mit Batterie und Ladegerät für die Kapitalkosten einen beispielhaften Zinssatz von 0,08 der halben Investitionssumme. [VDI-2695, S. 6]

6.3.6 Betrachtung der Dienstleistungskosten

Dienstleistungskosten fallen in allen Lebenszyklusphasen an. In der Entstehungsphase handelt es sich um **Kosten für die Gutachten** zu Brandschutz, Schallschutz, Explosionsschutz und zur Prüfung der Gesamtanlage, die in Verbindung mit dem Genehmigungsverfahren stehen, weshalb auf diese in 6.3.7 Bezug genommen wird. Die Genehmigungen selbst erzeugen ebenfalls Kosten. Auch in der Verwertungsphase stellen die Kosten für Gutachten zur Stilllegung und Abbau sowie für mögliche Dienstleistungen in Zusammenhang mit der Entsorgung die wesentlichen Kostenarten dar.

Der größte Anteil an den Dienstleistungskosten entsteht allerdings in der Betriebsphase. Es handelt sich dabei vor allem um die **Instandhaltungskosten**. Diese resultieren wesentlich aus der gewählten Instandhaltungsstrategie des Unternehmens und fallen sowohl für die FFZ, als auch für die ESS und die Infrastruktur an. Es handelt sich um variable Kosten, deren Höhe betriebsabhängig ist. Die Entscheidung für eine Instandhaltungsstrategie – und den damit zusammenhängenden Umfang von Instandhaltungsmaßnahmen – hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab, z. B. von der vereinbarten technischen Verfügbarkeit der FFZ oder der Festlegung der Verantwortlichkeit für die Durchführung der Maßnahmen. Die Entscheidung ist nicht trivial und kann daher auch Fokus von LCC-Betrachtungen sein. [VDI-2884, S. 9f.] Insbesondere bei FFZ wird die Instandhaltung vermehrt an Dienstleister ausgelagert, weshalb die Kosten in diese Hauptgruppe eingeordnet wurden. Grundsätzlich liefern die Hersteller in der Betriebsanleitung eine Empfehlung zu den Wartungszyklen, die für die Berechnungen verwendet werden kann [VDI-2497, S. 2]. Die *VDI-Richtlinie 2885* unterstützt bei der detaillierten Analyse des Prozesses, zeigt Ausgestaltungsmöglichkeiten für die Instandhaltungsplanung sowie hilft beim Schaffen einer transparenten Datenbasis für die LCC-Betrachtung. [VDI-2885]

Im Zuge der Identifikation der Prozesszeiten und damit der technischen Ausfallzeit und Wartungszeit in Unterabschnitt 6.2.2 erfolgte bereits eine Beschreibung der unterschiedlichen Tätigkeiten für die ESS. Daraus leiten sich einerseits die Kosten für die Maßnahmen der Wartung und Inspektion ab, die für die ESS und die FFZ gleichzeitig durchgeführt werden können. Andererseits fallen Kosten für die Arbeiten der Instandsetzung an, sowohl die geplante als auch die ungeplante. Die *VDI-Richtlinie 2695* enthält eine vereinfachte Berechnung für Reparatur- und Wartungsaufwände von Gabelstaplern mit EM. Die Kalkulation unterscheidet zwischen den drei Lastkategorien (leicht, normal, schwer) aus *VDI 4461*, die in Tabelle 6-1 dargestellt sind. Für die Lastkategorien wurde ein Kostenfaktor für Reparaturen und Ersatzteile ermittelt, der die jährlichen Kosten inkl. Löhne sowie Verschleiß- und Ersatzteilkosten abbildet. Durch Multiplikation des Faktors mit der Investitionssumme erhält man die Werte für die Wartungs-, Prüf- und Instandsetzungsaufwände. Der Faktor startet hier für Kategorie I bei 0,05 und endet mit Kategorie III bei 0,18. [VDI-2695, S. 6]

Da die drei Technologien sich in den Instandhaltungskosten stark unterscheiden können, insbesondere aufgrund der geringeren Erfahrung mit dem Einsatz von BzS, ist die detaillierte Betrachtung für die Berechnung der Kosten für die drei ESS sinnvoll. Das *VDMA-Einheitsblatt 34160* liefert für diese Kosten ein Berechnungsverfahren für die mittleren jährlichen Kosten, das ebenfalls auf die FFZ übertragen werden kann. Diese helfen bei der Ermittlung, sofern keine Pauschalregelung für die verschiedenen anfallenden Instandhaltungsmaßnahmen festgelegt ist. [VDMA-34160, S. 8]

Die Kosten für die Wartung und Inspektion errechnen sich über die Kosten je Wartung multipliziert mit Anzahl der Wartungen $n_{Wartungen}$. Hinzu kommt die jährliche Wartungspauschale $K_{Wartung,pauschal}$, die z. B. für einen Dienstleistungsvertrag anfällt. Die Kosten je Wartung errechnen sich aus den Personalkosten $K_{Personal,Wartung,h}$ für die Wartungszeit je Vorgang $t_{Wartung,Vorgang}$ für die eingesetzten Mitarbeiter $n_{MA,Wartung}$, aus den Materialkosten für die Wartung $K_{Material,Wartung}$ und, sofern nötig, dem Betriebsmitteleinsatz pro Wartungsvorgang mit dem Zeitaufwand $t_{Betriebsmittel}$ und dem Betriebsmittelstundensatz $K_{Betriebsmittel,h}$. [VDMA-34160, S. 8]

$$\begin{aligned} K_{Wartung} = & n_{Wartungen} \cdot (n_{MA,Wartung} \cdot t_{Wartung,Vorgang} \cdot K_{Personal,Wartung,h} \\ & + K_{Material,Wartung} + t_{Betriebsmittel} \cdot K_{Betriebsmittel,h}) \\ & + K_{Wartung,pauschal} \end{aligned} \quad (6-65)$$

Die Formel für die geplante Instandsetzung ist derjenigen Formel der Wartungskosten sehr ähnlich. Die jährlichen Gesamtkosten $K_{Instand,plan}$ errechnen sich über die Anzahl der geplanten Instandsetzungen mit den Kosten je Vorgang, also den Personalkosten für die Zeit, die Materialkosten und die Betriebsmittelaufwände: [VDMA-34160, S. 8f.]

$$\begin{aligned} K_{Instand,plan} = & n_{Instand,plan} \cdot (n_{MA,Instand} \cdot t_{Instand,plan} \cdot K_{Personal,Instand,h} \\ & + K_{Material,Instand} + t_{Betriebsmittel} \cdot K_{Betriebsmittel,h}) \end{aligned} \quad (6-66)$$

Kosten für die ungeplante Instandsetzung $K_{Instand,n.plan}$ bei Störungen oder Ausfällen lassen sich wie folgt ermitteln. Die Anzahl der Vorgänge wird ermittelt über die jährlichen Betriebsstunden in Form der geplanten Belegungszeit $t_{Belegung}$ dividiert durch die mittlere Zeit zwischen zwei außerplanmäßigen Instandsetzungen, der $MTBF$. Die Anzahl der Vorgänge wird wiederum mit den anfallenden Kosten multipliziert. Diese setzen sich zusammen aus den Stundenkosten aller Mitarbeiter, die für die mittlere Zeit der Reparatur $MTTR = t_{Störung}$ eingesetzt werden (s. Unterabschnitt 6.2.3). Hinzu kommen Kosten für Material und Betriebsmittel. [VDMA-34160, S. 9]

$$\begin{aligned} K_{Instand,außerplan} = & \\ = & \frac{t_{Belegung}}{MTBF} \cdot (n_{MA,Instand} \cdot t_{Störung} \cdot K_{Personal,Instand,h} \\ & + K_{Material,Instand} + t_{Betriebsmittel} \cdot K_{Betriebsmittel,h}) \end{aligned} \quad (6-67)$$

Die Berechnungen sind für die drei wesentlichen Bestandteile – FFZ, ESS und Infrastruktur – jeweils durchzuführen. Bei Verwendung der Werte im LCC sollte berücksichtigt werden, dass Instandhaltungskosten, ebenso wie Betriebskosten, mit zunehmender Nutzungsdauer ansteigen werden. [VDI-2884, S. 5]

6.3.7 Öffentliche Abgaben und Versicherungskosten

Bei den **öffentlichen Abgaben** fallen ebenfalls in den Phasen verschiedene Kosten an. In der Entstehungsphase handelt es sich um Kosten für Genehmigungen und Gutachten. Außerdem können Unternehmen in dieser Phase Unterstützung in Form von Förderungen erhalten. Diese gehen teilweise über die Entstehungsphase hinaus und reichen in die Betriebsphase hinein. In der Betriebsphase selbst stellen CO₂-Zertifikate und -Steuern eine Kostenlast dar, die künftig wachsen wird, da die geplante CO₂-Steuer die Emissionen verursachergerecht verrechnet.

Die Kosten für Genehmigungen und die dafür erforderlichen Gutachten fallen insbesondere beim Errichten der H₂-Infrastruktur und der Prüfung der Anlage an, können aber auch bei Laderäumen von PbB oder dem Einsatz von LIB im Unternehmen gefordert sein. Wie in Unterabschnitt 2.2.5 bereits ausgeführt ist ein mehrstufiges Genehmigungsverfahren zu durchlaufen. Für die Erlaubnis nach §18 BetrSichV und die Genehmigung der Infrastruktur gemäß BImSchG werden als Grundlage Gutachten in den Bereichen Brandschutz, Schallschutz und Explosionsschutz gefordert. Darüber hinaus sind eine Gefährdungsbeurteilung sowie ein Gefahrenabwehrplan vorzuweisen; zudem sind die Anforderungen der Feuerwehr, der Versicherung und des Betriebsrats zu erfüllen. Die Prüfung und Endabnahme ist durch anerkannte Prüfsachverständige durchzuführen und zu dokumentieren. Die Kosten für die Genehmigungen setzen sich aus der Summe der genannten Einzelpositionen inkl. der Personalaufwände, die in 6.3.2 aufgeführt wurden, zusammen. [Man-2022, S. 62ff.]

Die Bundesregierung fordert und fördert Maßnahmen zum Klimaschutz. Für alternative Antriebe und emissionsfreie Technologien bestehen diverse Fördermöglichkeiten. BzS wurden und werden vom BMWK im Zuge des ‚Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie‘ auch für FFZ-Anwendungen gefördert. Während in der ersten Phase die Forschung und Entwicklung im Fokus lag, zielt die zweite Phase auf die Marktaktivierung ab. Die Höhe der Förderung hängt dabei von der Verfügbarkeit von Fördermitteln und veröffentlichten Förderaufrufen ab. [BMWK-2016; NOW-2022] Auch für den Einsatz von Staplern mit LIB besteht eine Fördermöglichkeit. Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) fördert die eingesparte Menge an CO₂-Emissionen beim Kauf und Einsatz eines neuen, energieeffizienteren Staplers. [Toy-2022b]

Wesentliche Kosten, die bei FFZ in der Betriebsphase anfallen und vom Energiebedarf der Flotte und den Primärenergiequellen abhängen, sind der Kauf von CO₂-Zertifikaten je Tonne ausgestoßenem Kohlendioxid sowie in der Regierung viel diskutierte CO₂-Steuern. Diese sind künftig eine weitere nationale Maßnahme, neben der Vorgabe

hinsichtlich der Reduktion der Treibhausmissionen, um den Klimaschutz voranzutreiben. Der CO₂-Ausstoß der Unternehmen wird dabei nach dem Verursacherprinzip verrechnet; es findet dadurch eine Internalisierung der externen Kosten statt, da die Steuern auf diese Weise zu einem internalisierten Kostenfaktor werden, der für die Unternehmen hohe Betriebskosten zur Folge haben kann. Im Zuge des Klimaschutzprogramms legte die Bundesregierung bereits ein nationales Emissionshandelssystem für den Verkehrs- und Gebäudesektor vor, das seit 2021 die Versteuerung der dort anfallenden Emissionen und jährlich eine schrittweise Erhöhung vorsieht. [Fre-2021, S. 199; Bun-2019]

In die letzte Hauptgruppe fallen **Versicherungskosten und kalkulatorischen Wagnisse**. Projekterfahrungen im Forschungsprojekt ‚FFZ70‘ zeigten, dass sich die Kosten für die Versicherung bei den drei Technologien nicht unterscheiden. Die Versicherung der Infrastruktur kann allerdings individuell je nach Auslegung und bspw. Vor-Ort-Erzeugung ausfallen, weshalb die Kosten beim Vergleich entsprechend zu berücksichtigen sind. Kalkulatorische Wagnisse stellen ebenfalls fiktive Kosten dar, die Unternehmer ansetzen können, um spezifische Einzelrisiken unternehmensintern abzusichern. Hierunter fallen verschiedene Risiken, wie bspw. Arbeitswagnisse, Beständewagnisse, Entwicklungs- oder Anlagenwagnisse. Für den Anwendungsfall der ESS in FFZ gelten insbesondere letztere als Risiko; vor allem aufgrund geringerer Technologiereife und Einsatzerfahrungen bei BzS können unvorhersehbare Störungen oder Fehleinschätzungen der Nutzungsdauer ein erhebliches Risiko darstellen. Die interne Absicherung über kalkulatorische Wagnisse kann entweder orientiert an Versicherungsprämien oder als erfahrungsbasierte Opportunitätskosten erfolgen. [Coe-2016b, S. 104f.]

7 Multikriterielles Vorgehensmodell

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Vorgehensmodell zu erarbeiten, das für den individuellen Anwendungsfall verwendet werden kann und bei der strukturierten Entscheidungsfindung für ESS unterstützen soll. Nach der ausführlichen Herleitung der Berechnungsverfahren beschäftigt sich dieses Kapitel nun mit dem multikriteriellen Vorgehensmodell. Es verknüpft die beschriebenen Bestandteile, überführt diese in ein analytisches Modell und ordnet sie im übergeordneten Kontext ein. Nach der Darstellung des Gesamtkonzeptes und der Erläuterung des Vorgehensmodells (Abschnitt 7.1) folgt die Erläuterung aller relevanten qualitativen Einflussparameter, die in das Modell und die energetische, prozessuale und monetäre Bewertung einfließen (Abschnitt 7.2). Der folgende Abschnitt 7.3 beschreibt die schrittweise Bewertung für die Entscheidungsfindung mithilfe des Modells. Anschließend wird in Abschnitt 7.4 die Gestaltung des Zielsystems und der Ergebnisgrößen fokussiert. Abschnitt 7.5 zeigt, wie der Planer das Modell für das individuelle Entscheidungsproblem implementieren kann.

7.1 Konzept und Vorgehensschritte

Im Planungsprozess steht der Logistikplaner in der Phase der Systemplanung vor der Entscheidung für das geeignete Antriebskonzept der Fördermittel im individuellen Anwendungsfall. Für dieses Planungsproblem gilt es die Lösung zu finden, bei dem die unternehmensspezifischen Zielgrößen des angestrebten Soll-Zustands möglichst gut erfüllt werden. Eine detaillierte Untersuchung der Systemvarianten und deren Ausprägungen kann bei der Entscheidungsfindung unterstützen. Das multikriterielle Vorgehensmodell, das für dieses Planungsproblem unter Einbeziehung des Modellbildungsprozesses aus *VDI 4465* entwickelt wurde, soll Abhilfe schaffen. Nach weiterer Detaillierung der Module des multikriteriellen Vorgehensmodell im vorherigen Kapitel kann das in Abbildung 5-2 vorgestellte Grobkonzept des Modells weiter konkretisiert werden. Abbildung 7-1 stellt das Modell dar.

Die Eingangsgrößen des Modells in Form von Einflussgrößen, die bereits in der Formalisierung des analytischen Modells berücksichtigt wurden, bilden die wichtigste Grundlage für die Bewertungen innerhalb der drei Module. Es handelt sich um quantitative Parameter zu betrieblichen Rahmenbedingungen, Intensität der Anwendung, Energiebedarfen, Wirkungsgraden, Ausfallzeiten, Flächenbedarfen, Nutzungsdauer sowie internen und externen Kostensätzen. Sie ermöglichen die Anwendbarkeit des Modells auf den spezifischen Anwendungsfall.

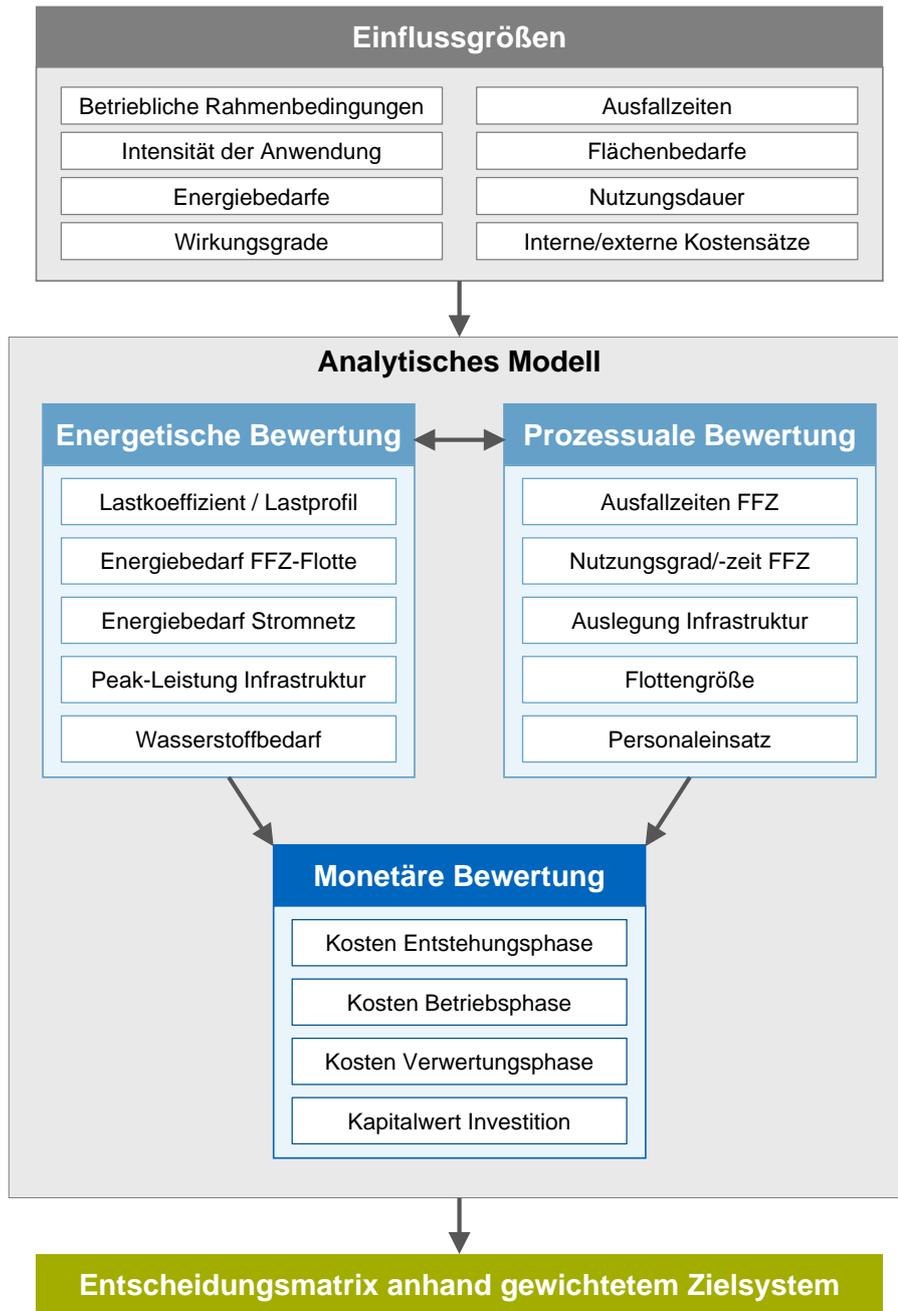


Abbildung 7-1: Multikriterielles Vorgehensmodell

In der energetischen Bewertung resultieren für die drei ESS aus dem analytischen Modell die Ergebnisgrößen Lastkoeffizient, Energiebedarf der gesamten FFZ-Flotte, Energiebedarf aus dem Stromnetz, Peak-Leistung der Infrastruktur sowie der Wasserstoffbedarf. Die Berechnungen zur prozessualen Bewertung resultieren in den unterschiedlichen Ausfallzeiten, Nutzungsgrad und Nutzungszeit der FFZ, Auslegung der Infrastruktur, Flottengröße zur Leistungserfüllung und dafür notwendigem Personaleinsatz. Die anschließende monetäre Bewertung bildet das Kernstück des Modells; in diese fließen die zuvor ermittelten, umfangreichen Größen zu energetischen und pro-

prozessualen Parametern ein. Mithilfe des beschriebenen formalisierten Vorgehens werden die Kosten für die für den Vergleich der ESS relevanten Kostenarten ermittelt. Ergebnisse des monetären Moduls unter Verwendung des LCC sind die Gesamtkosten in den drei Lebenszyklusphasen Entstehung, Betrieb und Verwertung sowie der Kapitalwert der jeweiligen Investition für die drei Planungsalternativen. Die Ergebnisgrößen fließen für die Entscheidungsmatrix in ein gewichtetes, unternehmensindividuelles Zielsystem ein.

Der Einsatz des Modells im spezifischen Anwendungsfall bedarf einer festgelegten Vorgehensweise. Die *VDI 2884* liefert Vorgehensschritte für die Anwendung des LCC im Logistikkontext und kann ebenfalls auf das entwickelte Vorgehensmodell übertragen werden; Abbildung 7-2 zeigt diese Schritte. Nach der Entscheidung für das Verfahren, in diesem Fall das neu entwickelte Vorgehensmodell, folgt die Identifikation der Alternativen, die aus den identifizierten Anforderungen resultieren und die in Rahmen dieser Arbeit PbB, LIB und BzS sind. Anschließend erfolgt der Schritt der Erfassung der spezifischen Einsatzbedingungen und der Festlegung der Planungsprämissen für die drei Modellbestandteile, dazu zählen ebenfalls die technischen Spezifikationen und Leistungsdaten. Darauf folgt die Festlegung der relevanten Faktoren mit der Ermittlung der Eingangsdaten für das Modell, die im vorherigen Kapitel ausführlich beschrieben wurde. Die Bewertung der anwendungsspezifischen Eingangsdaten für die drei Module der energetischen, prozessualen und monetären Bewertung führt zu mehreren Ergebnisgrößen, die mit einem individuellen Zielabgleich und Entscheidungsregeln die Entscheidung für eine ESS-Technologie herbeiführen.



Abbildung 7-2: Vorgehensschritte bei Anwendung des Modells in Anlehnung an [VDI-2884]

7.2 Ermittlung und Erhebung der Eingangsdaten

Für die Berücksichtigung des spezifischen Projektes in der logistischen Planung dienen verschiedene quantitative Parameter der vorausgehenden Planung als Eingangsdaten der drei Modellbestandteile. Es handelt sich einerseits um projektbezogene Daten und andererseits um projektübergreifende technische Daten, deren Spezifikation durch die projektbezogenen Daten beeinflusst wird. Dieser Abschnitt dient der Identifikation der relevanten Aspekte und veränderlichen Parameter für die prozessuale, energetische und monetäre Bewertung der Planungsalternativen für den Anwendungsfall. Die Genauigkeit in der Erfassung und die Identifikation valider Eingangsgrößen stellt die Grundlage des multikriteriellen Modells und der Entscheidung dar.

7.2.1 Betriebliche Rahmenbedingungen

Grundlage für die Anwendung der Berechnungsverfahren im multikriteriellen Vorgehensmodell bilden die Planungsdaten zum spezifischen Anwendungsfall im Unternehmen. Diese haben Einfluss auf alle weiteren, identifizierten Zielgrößen der drei beschriebenen Module. Die Entscheidungen im Planungsprojekt, wie die Auswahl eines FFZ-Typs eines bestimmten Herstellers, haben ebenfalls Auswirkungen auf die projektübergreifenden technischen Daten. Als betriebliche Rahmenbedingungen konnten die Einflussgrößen der unten aufgeführten Tabelle 7-1 identifiziert werden. Diese übergeordneten Größen fließen in die energetischen, prozessualen wie auch monetären Bewertungen der drei ESS ein.

Tabelle 7-1: Einflussgrößen hinsichtlich betrieblicher Rahmenbedingungen

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Dauer einer Schicht	s	$t_{Schicht}$
Dauer vorgesehene Pausen je Schicht	s	t_{Pause}
Anzahl Schichten am Tag	1	$n_{Schichten,Tag}$
Arbeitstage pro Jahr	1	$n_{Arbeitstage,Jahr}$
Initial geplante Anzahl FFZ (ohne Berücksichtigung Ausfallzeiten)	1	$n_{FFZ,Plan,initial}$
Anzahl der eingeplanten autonomen FFZ	1	n_{FTF}
Geplante Nutzungszeit je FFZ für den Anwendungsfall	s	$t_{Nutzung,Plan}$
Faktor für die Ermittlung der Anzahl der Ersatz-ESS $n_{ESS,Ersatz}$	1	$k_{Sicherheit,ESS}$
Faktor für die Ermittlung der Anzahl der Ladegeräte $n_{Ladegerät}$	1	$k_{Sicherheit,Ladegerät}$
Anzahl Mitarbeiter für Wechseln/Tanken/Laden je Schicht	1	$n_{MA,WLT}$
Faktor für Abwesenheiten zur Ermittlung Mitarbeiterzahl $n_{Mitarbeiter}$	1	$k_{Abwesenheiten}$
An-/Rückfahrtstrecke zur Infrastruktur	m	S_{WLT}
Durchschnittliche Geschwindigkeit Schlepper	m/s	v_{FFZ}
Interner Zinssatz/Kalkulationszinssatz auf Eigenkapital/Fremdkapital	1	i

7.2.2 Einflussgrößen für die energetische Bewertung

Für die Berücksichtigung der Intensität der Anwendung im ersten Schritt der energetischen Bewertung, der Bewertung der Lastprofile der FFZ aus Unterabschnitt 6.1.3, sind als Eingangsdaten die in Tabelle 7-2 folgenden Parameter mit Bewertung der Belastung in die Kategorien I, II oder III aus VDI 4461 erforderlich.

Tabelle 7-2: Einflussgrößen für die Bewertung des Lastprofils aus VDI 4461

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
A - Lastschwerpunktabstand	1	-
A - Anbaugeräte	1	-
B - Fahrwege	1	-
B - Steigungen	1	-
B - Umgebung	1	-
C - Kraftstoff-/Batteriestromverbrauch (sofern nicht berücksichtigt)	1	-
C - Einsatzintensität	1	-
C - Schichtbetrieb (sofern nicht berücksichtigt)	1	-

In die Ermittlung der Energiebedarfe der verschiedenen Technologien und der tatsächlichen Strombedarfe in der energetischen Bewertung, beschrieben in den Unterabschnitten 6.1.4/6.1.5/6.1.6, fließen, neben den Lastdaten, vor allem die betrieblichen Rahmenbedingungen und Projektdaten sowie technische Daten der untenstehenden Tabelle 7-3 ein.

Tabelle 7-3: Einflussgrößen für die energetische Bewertung

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Energiebedarf FFZ (DIN/VDI-Testzyklus)	kWh	$E_{FFZ,Testzyklus}$
Standby-Energiebedarf Zusatzverbraucher	kWh	$E_{Standby,FFZ}$
Wirkungsgrad ESS	1	$\eta_{ESS,ges}$
Wirkungsgradreduzierung je 1000 Bh	1	$k_{Wirkung}$
Wirkungsgrad Ladeinfrastruktur	1	$\eta_{Ladetechnologie}$
Nennspannung des ESS	V	U_{Nenn}
Nennkapazität des ESS	Ah	K_{Nenn}
Entladegrad bei PbB/LIB	1	k_{DOD}
Ladefaktor bei PbB/LIB	1	k_{Laden}
H ₂ -Tankkapazität des BzS	kg	m_{BzS}
Max. Leistung des PbB/LIB-Ladegeräts	kW	$P_{Ladegerät}$
Gleichzeitigkeitsfaktor beim Laden von PbB/LIB	1	$k_{Gleichzeitigkeit}$
Faktor für die Berücksichtigung der Ladestrategie	1	$k_{Ladestrategie}$
Ladestrom	A	I_{Laden}
Ladespannung	V	U_{Laden}
Standby-Verbrauch Infrastruktur	kWh	$E_{Standby,Infra}$
Energiebedarf Verdichter je kg H ₂	kWh	$E_{Verdichter}$
Energiebedarf Dispenser	kWh	$E_{Dispenser}$
Energiebedarf Erzeugung	kWh	$E_{Erzeugung}$

7.2.3 Einflussgrößen für die prozessuale Bewertung

Die detaillierte prozessuale Bewertung im Vorgehensmodell, die aus den Unterabschnitten 6.2.3 sowie 6.2.4 hervorgeht, erfordert weitere Eingangsdaten zu der prozessualen Planung des Anwendungsfalls. Hierbei handelt es sich insbesondere um logistische Prozessdaten zu den Ausfallzeiten der drei Technologien für die Ermittlung der Nutzungszeit, des Nutzungsgrades sowie den Prozesszeitunterschieden. Diese sind aufgelistet in der nachfolgenden Tabelle 7-4.

Tabelle 7-4: Einflussgrößen zu Prozesszeiten der Technologien

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Vorbereitungszeit für Wechsel, Laden, Tanken	s	$t_{Vorbereitung}$
Wartezeit für Wechsel, Tanken	s	t_{Warten}
Ein-/Ausfahrtszeit Wechselbereich	s	$t_{Einfahrt}$
Nachbereitungszeit für Wechsel, Laden, Tanken	s	$t_{Nachbereitung}$
Zeit für Prüfung Wasserstand und Nachfüllen bei PbB	s	$t_{Wasserstand}$
Wechselzeit für Batterie	s	$t_{Wechsel}$
Tankzeit	s	t_{Tanken}
Ablaufbedingte Ausfallzeit je Schicht	s	$t_{Ausfall,org,Ablauf}$
Störungszeit pro Schicht	s	$t_{Störung}$
Instandhaltungszeit pro Schicht	s	$t_{Instandhaltung}$
Sicherheitsüberprüfungszeit vor Arbeitsbeginn/Start	s	$t_{Sichtprüfung}$
Einschaltverzögerung pro Einschaltvorgang	s	$t_{Starten}$

Die Dimensionierung der H₂-Infrastruktur, die den nächsten Schritt der Vorgehensweise darstellt und in Unterabschnitt 6.2.5 ausführlich beschrieben ist, erfordert – neben Parametern aus den vorherigen Tabellen – die in Tabelle 7-5 folgenden anwendungsbezogenen Daten.

Tabelle 7-5: Einflussgrößen zur Dimensionierung der Wasserstoff-Infrastruktur

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Füllkoeffizient	1	$k_{Füllstand}$
Liefermenge bei H ₂ -Anlieferung im Trailer	kg	$m_{Trailer}$
Sicherheitsfaktor für Auslegung Niederdruck-Speicher	1	$k_{Sicherheit,ND}$
Faktor Tagesanteil für Auslegung Hochdruck-Speicher	1	$k_{Tagesverbrauch}$
Auslastung Verdichter	1	$\rho_{Verdichter}$

Für die Ermittlung der Platzbedarfe der einzelnen Komponenten der Infrastruktur (Indoor sowie Outdoor) gilt es die in Tabelle 7-6 aufgelisteten Einflussgrößen zu berücksichtigen. Diese beeinflussen einerseits die Berechnungen für die Flächenbedarfe der Wasserstoffinfrastruktur aus 6.2.5 sowie andererseits die Ermittlung der erforderlichen Flächen für die Wechsel- und Ladeinfrastruktur für PbB und LIB aus 6.2.6. Sie stellen

ebenfalls eine Eingangsgröße für die Sachkosten der Betriebsphase in der monetären Bewertung dar.

Tabelle 7-6: Einflussgrößen zu Flächenbedarfen

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Fläche Dispenser	m ²	$A_{Dispenser}$
Grundfläche des FFZ (inkl. Anhänger und Anbauten)	m ²	A_{FFZ}
Fläche für Einhaltung Sicherheitsabstand Indoor	m ²	$A_{Sicherheit,Indoor}$
Fläche Verdichter	m ²	$A_{Verdichter}$
Fläche Niederdruckspeicher	m ²	$A_{Niederdruck}$
Fläche Hochdruckspeicher	m ²	$A_{Hochdruck}$
Fläche für Bereitstellung bzw. Erzeugung von H ₂	m ²	$A_{Bereitstellung}$
Fläche für Einhaltung Sicherheitsabstand Outdoor	m ²	$A_{Sicherheit,Outdoor}$
Fläche des Ladegeräts	m ²	$A_{Ladegerät}$
Grundfläche des ESS	m ²	A_{ESS}
Fläche für Wechseltechnik PbB	m ²	$A_{Wechseltechnik}$
Fläche des Arbeitsbereichs PbB	m ²	$A_{Arbeitsbereich}$
Fläche für den Wasserprozess PbB	m ²	A_{Wasser}

7.2.4 Einflussgrößen für die monetäre Bewertung

Die zuvor genannten Einflussgrößen sind ebenfalls für die monetäre Bewertung wichtig. Hinzu kommen in diesem Bestandteil noch zusätzliche projektabhängige Daten, z. B. hinsichtlich der Inbetriebnahme, sowie verschiedene Kostensätze, die intern festgelegt sind oder sich für den Anwendungsfall und die technischen Spezifika über den Einkauf ergeben. Nicht nur Energiekosten gestalten sich unternehmensindividuell, sondern ebenfalls die Einkaufspreise für die Komponenten oder die Kosten für die Erfüllung des gewünschten Servicegrades.

Eine wichtige Eingangsgröße stellt die Nutzungsdauer der Komponenten für den Anwendungsfall dar, s. Tabelle 7-7. Ausgehend von der Bewertung der Einsatzbedingungen kann die Einsatzdauer der Komponenten und Systeme ermittelt werden. Hierfür sind die technischen Daten der Hersteller zur Nutzungsdauer als Einflussgrößen einzubeziehen. Aus den Werten in Zusammenhang zum individuellen Einsatzprofil kann die Betrachtungszeit für die Kapitalwertmethode $t_{Betrachtung}$, wie in Unterabschnitt 6.3.3 beschrieben, ermittelt werden.

Tabelle 7-7: Einflussgrößen zur Ermittlung der Nutzungsdauer

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Herstellerangabe Nutzungsdauer FFZ	Bh	$t_{Nutzungsdauer,FFZ,Herst}$
Herstellerangabe Nutzungsdauer ESS	Bh	$t_{Nutzungsdauer,ESS,Herst}$
Nutzungsdauer für Infrastruktur	a	$t_{Nutzungsdauer,Infra}$

Die weiteren Einflussgrößen lassen sich nach den Phasen aufgliedern, in welcher sie anfallen. In der Entstehungsphase handelt es sich vorrangig um Größen zur Berechnung der Sachkosten für die Anschaffung und Inbetriebnahme aller Komponenten sowie der Planungs- und Schulungskosten und öffentlichen Abgaben. Diese sind in untenstehender Tabelle 7-8 aufgeführt und fließen in das Vorgehen der Unterabschnitte 6.3.2 bis 6.3.7 ein.

Tabelle 7-8: Einflussgrößen zur Bewertung der Kosten in Entstehungsphase ($t=0$)

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Planungskosten	€	$K_{Planung}$
Personalkosten je Stunde	€/h	$K_{Personal,h}$
Schulungskosten (Einzelpreis)	€	$K_{Schulung}$
FFZ-Grundpreis	€	$K_{FFZ,Grundpreis}$
Kosten FFZ-Ausstattung	€	$K_{FFZ,Ausstattung}$
Kosten FFZ-Umbau	€	$K_{FFZ,Umbau}$
Kosten FFZ H ₂ -Ready	€	$K_{FFZ,H2ready}$
Kosten FFZ-Garantie	€	$K_{FFZ,Garantie}$
ESS-Grundpreis	€	$K_{ESS,Grundpreis}$
Kosten ESS-Ausstattung	€	$K_{ESS,Ausstattung}$
Kosten ESS-Garantie	€	$K_{ESS,Garantie}$
Kosten je Ladegerät	€	$K_{Ladegerät}$
Kosten für Wechseltechnik	€	$K_{Wechseltechnik}$
Sonstige Infrastrukturkosten (Kosten je Batteriestellplatz)	€	$K_{Infra,Sonstige}$
Kosten Elektrolyseur	€	$K_{Erzeugung}$
Kosten Niederdruckspeicher	€	$K_{Niederdruck}$
Kosten Hochdruckspeicher	€	$K_{Hochdruck}$
Kosten Betankungsanlage	€	$K_{Betankungsanlage}$
Kosten Dispenser	€	$K_{Dispenser}$
Baukosten	€	K_{Bau}
Kosten für Anbindung an Versorgung	€	$K_{Versorgung,Infra}$
Kosten für Anbindung an Entsorgung	€	$K_{Entsorgung,Infra}$
Kosten für Aufbau der Netzinfrastruktur	€	$K_{Netzinfrastruktur}$
Erforderliche Zeit für Inbetriebnahme FFZ mit ESS	s	$t_{Inbetr,FFZ}$
Personalkosten Inbetriebnahme FFZ mit ESS	€	$K_{Personal,Inbetr,FFZ,h}$
Erforderliche Zeit für Inbetriebnahme Infrastruktur	s	$t_{Inbetr,Infra}$
Personalkosten Inbetriebnahme Infrastruktur	€	$K_{Personal,Inbetr,Infra,h}$
Reisekosten Inbetriebnahme	€	$K_{Reise,Inbetr}$
Zeitbedarf Betriebsmittel	s	$t_{Betriebsmittel}$
Kosten für Betriebsmittel je Stunde	€	$K_{Betriebsmittel,h}$
Kosten für Werkzeug	€	$K_{Werkzeug}$
Kosten Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe	€	K_{RHB}
Kosten für Gutachten	€	$K_{Gutachten}$
Kosten für Genehmigungen	€	$K_{Genehmigung}$

Für die Ermittlung der Kosten in der Betriebsphase fließen weitere Einflussgrößen in die Berechnungen aus den Unterabschnitten 6.3.2 bis 6.3.7 ein. Tabelle 7-9 listet die vereinbarten Kostensätze für die Nutzung der Flächen, den Bezug von Energie sowie die Instandhaltungsvereinbarungen auf.

Tabelle 7-9: Einflussgrößen zur Bewertung der Kosten in der Betriebsphase

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Flächenkosten Indoor je m ² pro Jahr	€/m ²	$K_{m^2,Indoor}$
Flächenkosten Outdoor je m ² pro Jahr	€/m ²	$K_{m^2,Outdoor}$
Stromkosten Leistungspreis	€/kW	$K_{E,leist/kW}$
Stromkosten Arbeitspreis je kWh	€/kWh	$K_{E,arbeit/kWh}$
Stromkosten Kundenabhängiger Grundpreis	€/a	$K_{E,kundenabh}$
Anteil der FFZ an kundenabhängigem Grundpreis	€	$k_{Grundpreis,FFZ}$
Kosten für H ₂ -Anlieferung	€/kg	$K_{Anlieferung,H2}$
Wasserstoffkosten je kg	€/kg	$K_{Wasserstoff/kg}$
Wartungskosten FFZ	€/a	$K_{Wartung,FFZ}$
Kosten planmäßige Instandhaltung FFZ	€/a	$K_{Instand,plan,FFZ}$
Kosten außerplanmäßige Instandhaltung FFZ	€/a	$K_{Instand,außerplan,FFZ}$
Wartungskosten ESS	€/a	$K_{Wartung,ESS}$
Kosten planmäßige Instandhaltung ESS	€/a	$K_{Instand,plan,ESS}$
Kosten außerplanmäßige Instandhaltung ESS	€/a	$K_{Instand,außerplan,ESS}$
Wartungskosten Infrastruktur	€/a	$K_{Wartung,Infra}$
Kosten planmäßige Instandhaltung Infrastruktur	€/a	$K_{Instand,plan,Infra}$
Kosten außerplanmäßige Instandhaltung Infrastruktur	€/a	$K_{Instand,außerplan,Infra}$
Kosten für CO ₂ -Zertifikate sowie CO ₂ -Steuern	€/t	$K_{CO2-Abgabe}$
Kosten für Versicherungen / Wagnisse	€/a	$K_{Versicherung}$

Die relevanten Einflussgrößen für die monetäre Bewertung der Verwertungsphase stellen die anwendungsspezifischen Kosten für Entsorgung, Demontage und Verkauf sowie für Gutachten und Genehmigungen in Tabelle 7-10 dar.

Tabelle 7-10: Einflussgrößen zur Bewertung der Kosten in der Verwertungsphase

Einflussgröße	Einheit	Formelzeichen
Kosten Rückbau	€	$K_{Rückbau}$
Sonstige Verwertungskosten	€	$K_{Sonstige,Verwertung}$
Kosten für Gutachten	€	$K_{Gutachten}$
Kosten für Genehmigungen	€	$K_{Genehmigung}$

7.2.5 Datenaufnahme und -beschaffung

Die Grundlage für die multikriterielle Bewertung der drei ESS bilden die Schritte der Erfassung der spezifischen Einsatzbedingungen, der Ermittlung und Erhebung der relevanten Eingangsdaten. Die Bereitstellung der in diesem Abschnitt aufgelisteten Einflussgrößen als Eingangsdaten des Modells ist erforderlich, um die einzelnen Schritte

im Vorgehensmodell durchlaufen zu können und eine Entscheidungsgrundlage im Vergleich der ESS-Technologien zu erhalten.

Die Eingangsgrößen zu betrieblichen Rahmenbedingungen sind dem Planer intern zugänglich und über Rückfragen, z. B. bei Logistikplanern, zu ermitteln. In die energetische Bewertung fließen ebenfalls Daten aus der logistischen Anwendung ein. Weitere Einflussgrößen sind aus den Typenblättern der Hersteller zu entnehmen, sowohl für die FFZ als auch für die ESS sowie Ladegeräte. Für die Daten zur Wasserstoffinfrastruktur kann das Einholen von Angeboten bei Anbietern zur Absicherung der Werte hilfreich sein. Dies ist natürlich gleichermaßen für alle technischen Eingangsdaten der Fall. Bei den Eingangsdaten für die prozessuale Bewertung können die Daten über ähnliche Wege zugänglich gemacht werden. Einerseits über die internen Abteilungen und andererseits über Herstellerangaben. Bei Unsicherheiten empfiehlt sich auch hier das Einholen von Angeboten. Weitere Daten ergeben sich aus den technischen Spezifikationen der Technologien, wie den Flächenbedarfen. Die Nutzungsdauer, die in die tatsächliche Nutzungszeit der Technologien für die monetäre Bewertung einfließt, kann ebenfalls aus Herstellerangaben entnommen werden. Sofern dem Planer ein Referenzszenario mit ähnlichen Rahmenbedingungen vorliegt, können gewisse Werte, wie die Prozesszeiten oder der Energiebedarf, durch Messungen ermittelt werden. Da dies allerdings bei einer Greenfield-Planung eher unüblich ist, wurden einige Formeln zur analytischen Ermittlung oder Annäherung der Werte eingeführt. Wenn ferner vom Hersteller keine Informationen bekannt sind oder die Datenbeschaffung mit zu großem Aufwand verbunden ist, können zuverlässige Quellen oder Angaben aus Normen, wie bspw. zur Effizienz von Ladegeräten [DIN EN-16796-1] oder für die Lebensdauer der Antriebsbatterien [ZVEI-2001], und ebenfalls die Referenzdaten aus den Quellen und Beschreibungen der vorherigen Abschnitte aus Stand der Wissenschaft und Technik bzw. den detaillierten Herleitungen der drei Module herangezogen werden.

Bei den Kostensätzen ist zwischen internen und externen Kosten zu unterscheiden. Interne Kosten können über das Controlling erfragt werden, ebenso wie Referenzwerte aus früheren Projekten, in denen bspw. eine Netzinfrastruktur aufgebaut wurde oder Geräte beschafft wurden. Die externen Kostensätze können über Angebote spezifiziert werden. Für eine Grobabschätzung kann alternativ mit Schätzwerten und Referenzwerten aus den zuvor identifizierten Quellen gerechnet werden. Eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse hilft bei der Absicherung der Werte mit großen Unsicherheiten.

Da das Modell aufgrund der mehrdimensionalen Betrachtung der unterschiedlichen Größen sehr umfangreich ist, ist die Anzahl der erforderlichen Eingangsgrößen nicht unerheblich. Diesem Schritt sollte daher ausreichend Zeit eingeräumt werden.

7.3 Bewertung im analytischen Modell

Nach dem wichtigen Schritt der Erhebung aller relevanten Daten knüpft die Bewertung dieser in den drei Modellbestandteilen an. Die Daten sind für jeden FFZ-Typ separat zu erheben, um die Unterschiede der Typen vollumfänglich berücksichtigen zu können. Es empfiehlt sich bei der Bewertung mit dem FFZ-Typ zu starten, der die größte zusammenhängende Flotte ausmacht. Die dabei ermittelten Werte sind mit denen aller für den Anwendungsfall definierten FFZ-Typen der Flotte zusammenzuführen. Innerhalb des analytischen Modells erfolgt die Bewertung der drei Module für die drei Energiespeicher PbB, LIB und BzS. Bereits bestehende Infrastruktur, ESS oder FFZ werden hierbei nicht berücksichtigt; das Modell hilft bei der Bewertung der für das Planungsprojekt grundsätzlich geeigneten Technologien. Die energetische und prozessuale Bewertung sollten hierfür simultan erfolgen, da in jedem der Module Größen ermittelt werden, die im jeweils anderen Modul als Eingangsgrößen benötigt werden. Diese Wechselwirkungen bedürfen eines strukturierten Vorgehens, bspw. durch eine unterstützende Implementierung als softwarebasiertes Tool (s. auch Unterabschnitt 7.5.2). Als Resultat der Bewertung ergeben sich aus jedem der drei Module eigene Ergebnisgrößen, die für die Entscheidung relevant sind. Die folgenden Ausführungen detaillieren die Vorgehensweise innerhalb der einzelnen Module.

7.3.1 Vorgehen zur energetischen Bewertung

Mithilfe der Analyse der Unterschiede der Energiepfade für die drei ESS konnten die relevanten Aspekte und Parameter für die Bewertung herausgearbeitet werden, um die an das Modell gestellten Anforderungen zu erfüllen. Die resultierenden Ergebnisgrößen sind, wie in Abbildung 7-1 im Gesamtkonzept dargestellt, das Lastprofil der FFZ, der Energiebedarf der Flotte, der Energiebedarf aus dem Stromnetz, die Peak-Leistung der Infrastruktur sowie der Wasserstoffbedarf. Diese Größen werden mithilfe der beschriebenen Berechnungsverfahren ermittelt.

Die Lastprofile der FFZ wirken wesentlich auf die weiteren energetischen Bewertungen, weshalb mit der Ermittlung des Lastkoeffizienten eine wichtige Einflussgröße festgelegt wird, die Wechselwirkungen auf viele andere Parameter aufweist. Für die Ermittlung ist die spezifische Anwendung anhand der in 6.1.3 vorgestellten Kriterien, wie Steigungen oder Einsatzintensität, einzustufen. Dabei wird für jede Zeile ausgewählt, welche Kategorie am ehesten zutrifft. Kategorie I entspricht dem Faktor 0,85, Kategorie II 1,0 und Kategorie III 1,25. Für jede Kategorie wird die Anzahl der Angaben gezählt und mit dieser Gewichtung der Lastkoeffizient berechnet, der in die weiteren Berechnungen als neu ermittelte Eingangsgröße einfließt. Je detaillierter die Spezifikation des Anwendungsfalls, desto genauer sind die Ergebnisse der folgenden Bewertungen.

Die Erkenntnisse fließen in die Ermittlung des Energiebedarfs der FFZ ein, dessen Vorgehen in 6.1.4 beschrieben ist. Die Berechnung basiert auf den Angaben der Typenblätter der Hersteller, ausgehend von deren Messungen am gefahrenen Testzyklus. Der Lastkoeffizient hilft bei der Ermittlung des Bedarfs im eigenen Anwendungsfall. Die zu berücksichtigende Anzahl der FFZ der Flotte resultiert aus den prozessualen Betrachtungen aus 6.2.4.

Aus den in 6.1.5 folgenden Bewertungen zur Energieeffizienz der Systeme werden die in die ESS einzuspeisende Energie sowie der Energiebedarf der Ladetechnologie ermittelt. Aus diesen kann, unter Berücksichtigung des ermittelten Energiebedarfs der FFZ, die Reichweite der FFZ mit dem jeweiligen ESS berechnet werden. Diese wiederum hat Auswirkungen auf die prozessuale Bewertung, in Form der Häufigkeit der durchzuführenden Vorgänge zum Wiedererlangen der Leistungsfähigkeit des ESS.

Die formalen Darstellungen aus 6.1.6 dienen der Ermittlung der Ergebnisgrößen zu Strom- und Wasserstoffbedarf in der Betriebsphase. Zuerst kann der Energiebedarf aus dem Stromnetz aus den zuvor errechneten Größen betrachtet werden. Es erfolgt zudem eine separate Betrachtung des maximalen Energieverbrauchs der Infrastruktur. Dazu werden die Peak-Leistungen der Infrastrukturen der jeweiligen Technologien gegenübergestellt, die für die Vermeidung von Mehrkosten durch erhöhten Energieverbrauch zu berücksichtigen sind. Auch in die Berechnung des Wasserstoffbedarfes fließen die ermittelten Werte des Lastkoeffizienten ein. Für die Bewertung ist zusätzlich der Nutzungsgrad der FFZ zu berücksichtigen, der im Zuge der prozessualen Bewertung in 6.2.3 beschrieben ist. Der Wasserstoffbedarf kann entweder aus dem Energiebedarf oder aus bekannten Verbrauchswerten aus früheren Veröffentlichungen errechnet werden.

Aus dem Wasserstoffbedarf könnte dann weiterführend der Wert für den Gesamtsekundärenergiebedarf errechnet werden. Für PbB und LIB stellt dies der Wert des Energiebedarfs aus der Netzinfrastruktur dar. Für BzS wird zu diesem Energiebedarf noch der Bedarf für die Erzeugung je kg H₂, bspw. mittels Elektrolyse, addiert.

Innerhalb der Berechnungen werden die Energiewerte alle in kWh angegeben. Der resultierende Bezugswert der Formeln zu Energie- oder Wasserstoffbedarf ist eine (Betriebs-)Stunde. Für den monetären Vergleich sind somit die Ergebnisse auf ein Kalenderjahr, unter Berücksichtigung des Schichtmodells und der jährlichen Arbeitstage im spezifischen Anwendungsfall, hochzurechnen.

Exkurs: CO₂-Emissionen

Die Ermittlung der Emissionen ist im Modell nicht berücksichtigt. Sofern für den Anwendungsfall allerdings die CO₂-Emissionen bewertet und verglichen werden sollen, sind zusätzliche Einflussfaktoren in Form von CO₂-Äquivalenten zu ermitteln. Die Einflussgrößen sind die jeweiligen CO₂-Emissionen je Einheit für die im Unternehmen verwendeten Bezugsarten für Strom, wie grün oder aus dem deutschen Strom-Mix, und Wasserstoff, wie grün oder grau, sowie dem Treibhausgas-Minderungspotenzial. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn in der monetären Bewertung für die Betriebsphase die Kosten für abzuführende CO₂-Abgaben einfließen sollen.

Die einsatzabhängigen Emissionen in der Betriebsphase ergeben sich dann aus den ermittelten Energiebedarfswerten. Bei Wasserstoff sind nicht nur die bei Erzeugung entstehenden Emissionen einzurechnen, sondern ebenfalls die für die H₂-Anlieferung via Trailer, Pipeline oder durch die Eigenerzeugung. Unabhängig von der Intensität der Anwendung erzeugen die Produktion aller Komponenten in der Entstehungsphase und das Recycling in der Verwertungsphase zusätzliche Emissionen. Für die ESS sind diese abhängig von der Nutzungsdauer zu betrachten.

7.3.2 Vorgehen zur prozessualen Bewertung

Die detaillierte Systemanalyse der prozessualen Unterschiede beim Einsatz verschiedener ESS ermöglichte die Ermittlung der wesentlichen Aspekte hinsichtlich der verschiedenen Prozesse der ESS und deren Bewertung. Es liefert Berechnungs- und Bewertungsvorgehen für die folgenden fünf Ergebnisgrößen: Ausfallzeiten der FFZ beim Einsatz verschiedener EES, Nutzungsgrad und -zeit der FFZ, Auslegung der Infrastruktur für BzS und Batterien, Abschätzung der Flottengröße und daraus Überschlagen des Personaleinsatzes. Abbildung 7-1 zeigt die Aspekte für das Modul der prozessualen Bewertung im Gesamtkonzept. Die resultierenden Größen dienen weiterhin als Eingangsgrößen für die folgende monetäre Bewertung. Die ermittelte Flottengröße fließt ebenfalls in die energetische Bewertung ein.

Die Ausfallzeiten und damit im Umkehrschluss die produktiven Zeiten der drei ESS-Technologien sind maßgeblich durch den vorherrschenden Prozess zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit, also Wechselbetrieb, Ladebetrieb oder Betankung, definiert. Über die einzelnen Zeitanteile und die in 6.2.3 angeführten Formeln für die organisatorische Ausfallzeit, technische Ausfallzeit und Wartungszeit lassen sich die Nutzungszeit, in der das FFZ für den vorgesehenen Zweck im Einsatz ist, sowie die Belegungszeit ermitteln. Der Nutzungsgrad, also die Verfügbarkeit des Systems, ergibt sich aus diesen beiden Größen. Die Berechnungen zu den Ausfallzeiten erfolgen je FFZ bzw. FFZ-Typ und sind somit für die Bewertung auf die gesamte Flotte hochzurechnen.

Mithilfe der ermittelten Größen können individuell weitere Bewertungen erfolgen, wie bspw. der kumulative Prozesszeitverlust der Flotte je Schicht. Für die monetäre Bewertung ist zudem die Ermittlung der Nutzungsdauer der ESS und FFZ für den individuellen Anwendungsfall unter Einbezug der ermittelten Nutzungszeit zu berechnen.

Die ermittelte Nutzungszeit hilft nun bei der Berechnung der Anzahl notwendiger Fahrzeuge aus 6.2.4. Diese fließt an mehreren Stellen in die prozessuale Bewertung ein, dient in der energetischen Bewertung, wie bereits aufgezeigt, als Eingangsgröße und hat ebenfalls Einfluss auf die monetäre Bewertung. Für die Ermittlung ist ein Planwert über die Anzahl der erforderlichen Flurförderzeugstunden je Schicht für die Leistungserfüllung zu ermitteln, der dann über die berechnete Nutzungszeit zu einer Sollanzahl an FFZ führt. Aus dieser Soll-Anzahl abzüglich autonomer FFZ und ergänzt um den Mitarbeiterinsatz zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit lässt sich die Anzahl der erforderlichen Mitarbeiter überschlagen.

Die Fahrzeuganzahl hat zudem Auswirkungen auf die Anzahl der notwendigen ESS sowie die Dimensionierung der jeweiligen Infrastruktur. Für BzS stellt sich diese aufwändiger dar als für PbB oder LIB. Die Formeln aus 6.2.5 helfen bei der Festlegung der Größe der einzelnen Komponenten. Der Platzbedarf der Infrastruktur kann im Anschluss ebenfalls über die bereitgestellten Formeln ermittelt werden. Analog liefert 6.2.6 die Formeln für Auslegung und Platzbedarf der Ladeinfrastruktur.

7.3.3 Vorgehen zur monetären Bewertung

In das dritte Modul der monetären Bewertung fließen, neben den identifizierten Einflussgrößen, die zuvor ermittelten Werte aus der energetischen und prozessualen Bewertung ein. Für die dynamische Kostenrechnung dient die Methode des LCC, also der Ermittlung der Lebenszykluskosten in den drei Phasen vor der Nutzung, während der Nutzung und nach der Nutzung. Für das Modell erfolgt die Ermittlung der relevanten Kostenarten. Der Fokus des Modells liegt darauf, die Unterschiede der ESS zu bewerten, konstante Werte für die drei Technologien werden daher nicht berücksichtigt. Es handelt sich im entwickelten Modell um eine Teilkostenrechnung und keine Vollkostenrechnung, da lediglich ein Teil der – vorrangig variablen – Kosten einbezogen wird [Coe-2016b, S. 73]. Unter Berücksichtigung der identifizierten Kostenarten der Kostenhauptgruppen – Personal-/Sozialkosten, Sachkosten, Energiekosten, Kapitalkosten, Dienstleistungskosten, öffentliche Abgaben und Versicherungskosten – für die drei Phasen im Lebenszyklus werden die Ergebnisgrößen für die Entscheidung berechnet.

Aus der Aufsummierung der anfallenden Kostenarten lassen sich für die drei Phasen unter Zuhilfenahme der Einflussgrößen aus 7.2.4 sowie der ermittelten Werte aus der prozessualen und der energetischen Bewertung die Gesamtkosten der drei ESS ermitteln. Eine wichtige Ergebnisgröße stellt der Kapitalwert der drei Investitionsmöglichkeiten unter Einbezug des gesamten Lebenszyklus dar. Die resultierenden diskontierten Werte aus der Anwendung der Kapitalwertmethode aus (2-1) sind für den Anwendungsfall negativ, da für die Investition in FFZ keine direkten Rückflüsse aus Umsatzerlösen erfolgen und es sich in der Logistik um einen unterstützenden Prozess handelt. Neben dem Kapitalwert können noch die Kosten in der Entstehungsphase, die jährlichen Kosten in der Betriebsphase sowie die Kosten in der Verwertungsphase separat betrachtet und verglichen werden. Insbesondere die variablen Kosten in der Betriebsphase, wie die Energiekosten, können Auswirkungen auf die Entscheidung für oder gegen eine Technologie haben.

Für die Berechnung der Gesamtkosten sind die einzelnen Kostenarten über den Betrachtungszeitraum aufzusummieren mit der Bezugsgröße ein Jahr. Als Betrachtungszeitraum stellt sich hier die Nutzungsdauer der FFZ als zielführend dar, da diese Nutzungsdauer für die drei ESS unabhängig vom eingesetzten ESS identisch ist und die Ergebnisse damit vergleichbar macht.

Im Kostenvergleich besteht weiterhin die Ausgangssituation einer Greenfield-Betrachtung, das bedeutet es werden keine existierenden Technologien und somit deren Verwertungsphase der neuen Alternative gegenübergestellt. Das Modell bewertet, welche Kosten bei Anschaffung, Einsatz und Verwertung der drei Technologien PbB, LIB oder BzS entstehen und welche somit die wirtschaftlichste für den spezifischen Anwendungsfall ist. Kalkulatorische Kosten im Sinne von Opportunitätskosten und Restbuchwerten für mögliche existierende Infrastruktur oder FFZ mit ESS finden im Modell keine Berücksichtigung. Kalkulatorische Mietkosten auf die Flächenverfügbarkeiten finden über Flächenkosten Berücksichtigung und separat ausgewiesen werden. Die LCC-Analyse erfolgt zu konstanten Preisen ohne Berücksichtigung von Inflation, da diese für jede der drei Technologien anfallen würde und schwer zu prognostizieren ist.

7.4 Zielgrößen und Entscheidung

Aus der vorausgehenden Bewertung in den drei Modulen resultieren verschiedene Ergebnisgrößen, die bereits in Abbildung 7-1 dargestellt und in 7.3 beschrieben sind. Diese sollen in diesem Abschnitt näher erläutert sowie deren Einfluss auf die Entscheidung und deren Relevanz als Zielgrößen im Zielsystem betrachtet werden. Nicht alle dieser Ergebnisgrößen stellen Zielgrößen dar und manche der Ergebnisgrößen können in mehrere Zielgrößen einfließen. Bei Anwendung des Vorgehensmodells sollten die Überlegungen zum Zielsystem bereits vor der Datenaufnahme getroffen werden, um die Entscheidung nicht durch die transparenten Ergebnisse zu beeinflussen.

Bei den energetischen Ergebnisgrößen stellen drei Größen eine Zielgröße dar: Der Energiebedarf der FFZ-Flotte, der Energiebedarf aus dem Stromnetz sowie die Peak-Leistung der Infrastruktur. Der Lastkoeffizient spielt eine essentielle Rolle und fließt als Ergebnisgröße in mehrere Berechnungen ein, er ist allerdings für alle drei Technologien gleich und somit keine Zielgröße für die Entscheidung. Wie zuvor aufgezeigt, können die CO₂-Emissionen ebenfalls eine Vergleichsgröße darstellen. Der Wasserstoffbedarf kann nur als Zielgröße verwendet werden, sofern eine gewisse Mindestmenge in Bezug auf den Verbrauch festgelegt ist, ab der überhaupt eine Investition zu tätigen ist. Bei Festlegung eines solchen Grenzwertes wäre ein weiteres Ausschlusskriterium für BzS gegeben.

Die prozessualen Ergebnisgrößen liefern weitere Zielgrößen. Die Ausfallzeiten der FFZ, die ebenfalls Nutzungsgrad und -zeit beeinflussen, stellen neben der Soll-Flottengröße und dem erforderlichen Personaleinsatz Zielgrößen dar. Die Ausfallzeiten können ebenfalls als kumulative Prozesszeitverluste betrachtet werden. Eine detailliertere Betrachtung in Form der Aufteilung in organisatorische Ausfallzeit, technische Ausfallzeit und Wartungszeit ist ebenfalls möglich. Individuell können ebenfalls die anwendungsspezifische, lastabhängige Nutzungsdauer der FFZ sowie der ESS betrachtet werden. Die Auslegung der Infrastruktur hingegen dient als Ergebnisgröße, deren Werte in die weiteren, monetären Bewertungen einfließen.

Die Erkenntnisse und Ergebnisgrößen aus der prozessualen und energetischen Bewertung fließen in die monetäre Bewertung ein. Dabei werden mehrere der Ergebnisgrößen als Zielgrößen im Zielsystem berücksichtigt. Die Gesamtkosten stehen abgezinst als Kapitalwert der Investition zur Verfügung. Diese können ebenfalls aufgegliedert werden in die Kosten der Entstehungsphase, also die Investitionssumme mit besonderem Fokus auf Investition in FFZ mit ESS und Infrastruktur, die Kosten der Betriebsphase, insbesondere mit Personal-, Energie- und Instandhaltungskosten, und die Kosten der Verwertungsphase.

Entscheidungsrelevant für das Zielsystem können somit, ausgehend vom entwickelten Modell, die folgenden resultierenden und in Tabelle 7-11 aufgelisteten Zielgrößen sein. Eine doppelte Berücksichtigung der Kriterien, wie durch Berücksichtigung von Ausfallzeiten der FFZ und Nutzungsgrad/-zeit, sind bei Festlegung des Zielsystems zu vermeiden.

Tabelle 7-11: *Mögliche Zielgrößen im multikriteriellen Modell*

Modul	Zielgröße	Entscheidungswert
Energetische Zielgrößen	Energiebedarf FFZ-Flotte	Minimaler Wert
	Energiebedarf Stromnetz in Betriebsphase	Minimaler Wert
	Peak-Leistung Infrastruktur	Minimaler Wert
	CO ₂ -Emissionen	Minimaler Wert
Prozessuale Zielgrößen	Ausfallzeiten FFZ/Prozesszeitverluste <ul style="list-style-type: none"> - Organisatorische Ausfallzeit - Technische Ausfallzeit - Wartungszeit 	Minimaler Wert
	Nutzungsgrad/-zeit FFZ	Maximaler Wert
	Nutzungsdauer FFZ mit Lastprofil	Maximaler Wert
	Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil	Maximaler Wert
	Anzahl Soll-Fahrzeuge	Minimaler Wert
	Anzahl Mitarbeiter	Minimaler Wert
Monetäre Zielgrößen	Kosten Entstehungsphase <ul style="list-style-type: none"> - Investition FFZ mit ESS - Investition Infrastruktur 	Minimaler Wert
	Kosten Betriebsphase <ul style="list-style-type: none"> - Energiekosten - Personalkosten - Instandhaltungskosten FFZ mit ESS - Instandhaltungskosten Infrastruktur 	Minimaler Wert
	Kosten Verwertungsphase	Minimaler Wert
	Kapitalwert Investition	Minimaler Wert

Für die Entscheidung im individuellen Anwendungsfall sind somit die verschiedenen Zielgrößen miteinander abzuwägen und die einzubeziehenden Größen zu identifizieren, damit die Entscheidung nicht anhand eines einzelnen Kriteriums erfolgt. Je nach Unternehmensgröße kann es sich um ein komplexes zu berücksichtigendes Zielsystem handeln. Die Realität wird allgemein durch Modelle mit mehreren Zielsetzungen besser beschrieben. Durch die Vielzahl der Zielgrößen wird deutlich, dass es sich bei dem Entscheidungsproblem dieser Arbeit um ein multikriterielles Problem handeln kann. Dies liegt auch daran, dass sowohl monetäre als auch nicht-monetäre Kriterien

in die Beurteilung einfließen. Das dadurch entstehende multidimensionale Zielsystem mit mehreren zu optimierenden Zielen kann zunächst nur eindeutig gelöst werden, wenn die Ziele nicht in einer konkurrierenden Zielbeziehung zueinanderstehen. Abbildung 7-3 zeigt die möglichen Zielbeziehungen beispielhaft anhand von zwei Zielen auf. Neben konkurrierenden Zielbeziehungen, bei der die Maximierung der Zielerreichung des einen Ziels in der Reduktion des anderen resultiert, existieren auch komplementäre Ziele, wobei Entscheidungen bei allen Zielen zu einem höheren Zielerreichungsgrad führen. Bei einer neutralen Zielbeziehung hat eine Entscheidung lediglich Auswirkung auf eine Zielgröße, wobei die anderen unberührt bleiben. Für die folgende Zielgewichtung ist es wichtig zu analysieren, wie sich die Ziele zueinander verhalten, ob diese bspw. gegenläufig sind. [Dro-2014, S. 341ff.; Arn-2008, S. 38f.; Bam-2019, S. 45ff.]

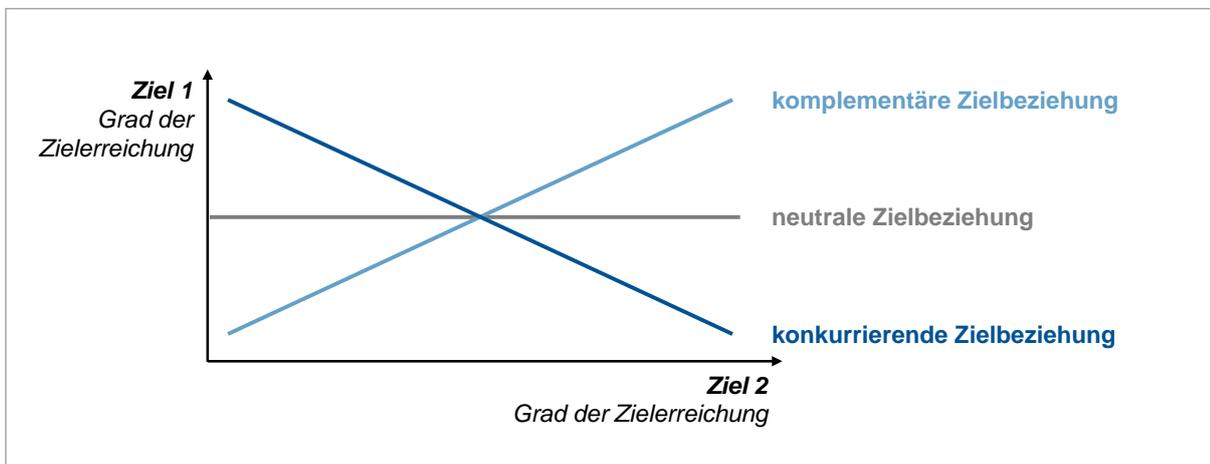


Abbildung 7-3: Zielbeziehungen in Anlehnung an [Dro-2014, S. 343]

Eine Analyse der Zielbeziehungen der möglichen Zielgrößen aus Tabelle 7-11 zeigt, dass diese sich entweder komplementär oder neutral zueinander verhalten. Der Energiebedarf der Flotte ist bspw. komplementär zum Energiebedarf aus dem Stromnetz. Wenn die gesamte Flotte weniger Energie benötigt, resultiert dies ebenfalls in einer Reduktion des Energiebedarfs aus dem Stromnetz. Ebenso verhält es sich mit den CO₂-Emissionen und den Energiekosten in der Betriebsphase. Die Peak-Leistung der Infrastruktur hat ebenfalls Einfluss auf die Energiekosten und verhält sich komplementär: bei einer Minimierung sinken auch die Kosten. Die Minimierung der Ausfallzeiten hat wiederum keine Auswirkungen auf die Minimierung der Energiebedarfe. Dieser Zusammenhang ist für alle Zielbeziehungen des Modells als qualitative Tendenz in der folgenden Tabelle 7-12 dargestellt. Hellgrau steht für eine neutrale Zielbeziehung und hellblau für eine komplementäre Zielbeziehung.

Tabelle 7-12: Zielbeziehungen der Zielgrößen im multikriteriellen Modell

	Energiebedarf FFZ-Flotte	Energiebedarf Stromnetz in Betriebsphase	Peak-Leistung Infrastruktur	CO ₂ -Emissionen	Ausfallzeiten FFZ	Nutzungsgrad/-zeit FFZ	Nutzungsdauer FFZ mit Lastprofil	Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil	Anzahl Soll-Fahrzeuge	Anzahl Mitarbeiter	Kosten Entstehungsphase	Kosten Betriebsphase	Kosten Verwertungsphase
Energiebedarf Stromnetz in Betriebsphase	komplementäre Zielbeziehung												
Peak-Leistung Infrastruktur		komplementäre Zielbeziehung											
CO ₂ -Emissionen	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	neutrale Zielbeziehung										
Ausfallzeiten FFZ				neutrale Zielbeziehung									
Nutzungsgrad/-zeit FFZ					komplementäre Zielbeziehung								
Nutzungsdauer FFZ mit Lastprofil						komplementäre Zielbeziehung							
Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil							komplementäre Zielbeziehung						
Anzahl Soll-Fahrzeuge	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	neutrale Zielbeziehung					
Anzahl Mitarbeiter									komplementäre Zielbeziehung				
Kosten Entstehungsphase										komplementäre Zielbeziehung			
Kosten Betriebsphase	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	neutrale Zielbeziehung		
Kosten Verwertungsphase												neutrale Zielbeziehung	neutrale Zielbeziehung
Kapitalwert Investition	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung	komplementäre Zielbeziehung

Für eine optimale Lösung des Zielsystems bei multikriteriellen Entscheidungsproblemen ist, sofern sich nicht alle Ziele komplementär zueinander verhalten, eine gängige Vorgehensweise die Festlegung der Bedeutung der einzelnen Ziele mithilfe einer Zielgewichtung. Ein häufig verwendetes Instrument für die Zielgewichtung stellt die Nutzwertanalyse dar. Individuelle Gewichtungen, die z. B. aus Befragungen von Experten resultieren, werden auf die Zielgrößen anhand der Präferenzen verteilt. Die resultierenden Gewichtungen der Präferenzrelationen, die in Summe 100 Prozentpunkte ergeben, werden zur Nutzenbestimmung mit den Erfüllungsgraden der berücksichtigten Bewertungskriterien, also den Zielgrößen, je Planungsalternative multipliziert. Diese bilden dann den Nutzenwert des einzelnen Ergebnisses im Verhältnis zum Gesamtnutzenwert ab. Aus der Summe der gewichteten Zielerreichungswerte ergeben sich die Nutzwerte der Planungsalternativen, die wiederum in eine Rangreihung überführt werden können und so in die Entscheidungsmatrix für die Lösung des Entscheidungsproblems einfließen. [Dro-2014, S. 341ff.; Arn-2008, S. 38f.; Bam-2019, S. 45ff.; VDI-5200-4, S. 8f.]

Nach der Analyse der Zielbeziehungen und der Erkenntnis, dass im multikriteriellen Modell keine konkurrierenden Ziele bestehen stellt die Zielgewichtung mithilfe der

Nutzwertanalyse also den folgenden wesentlichen Schritt für die Entscheidungsfindung im multikriteriellen Zielsystem des Modells dar. Für komplementäre Ziele ist hierfür die qualitative Tendenz aus Tabelle 7-12 zur gegenseitigen Beeinflussung in einen unternehmensindividuellen, quantitativen Wert zu überführen. Dieser ist in der Gewichtung zu berücksichtigen, um das Ergebnis nicht durch doppelte Gewichtung zu verfälschen. Die Ausprägung der Kriterien für die Planungsalternativen und die Umwandlung dieser in Zielerfüllungsgrade anhand des Vorgehensmodells hilft dann bei der Ermittlung der Ergebniswerte der Kriterien durch Multiplikation mit der festgelegten Gewichtung. Die Rangfolge für die Entscheidung ergibt sich aus der Summe der Ergebniswerte über die gewählten Zielgrößen. Diese Summe steht für die relative Vorteilhaftigkeit der Entscheidung gegenüber den anderen Alternativen. [Dro-2014, S. 343f.]

Planer können nach Festlegung der für das Unternehmen relevanten Zielgrößen und unter Anwendung der Nutzwertanalyse das individuelle Zielsystem für die Entscheidung zwischen PbB, LIB und BzS erarbeiten. Anhand dieser Nutzenbestimmung können in der Entscheidungsmatrix die Ergebnisse aus dem Modell mit dem definierten Zielsystem zusammengeführt werden, um so die beste Lösung für den Anwendungsfall zu erhalten.

7.5 Rahmenbedingungen zur Nutzung des Modells

Für die Umsetzung des Vorgehensmodells und die Nutzung für den spezifischen Anwendungsfall im Unternehmen sind verschiedene individuelle Voraussetzungen zu schaffen. Dieser Abschnitt liefert daher weitere Ansatzpunkte für die Implementierung des multikriteriellen Vorgehensmodells mit grundsätzlichen Ausschlusskriterien für die Verwendung der drei ESS sowie Hinweisen zur softwarebasierten Umsetzung für den Anwendungsfall. Dafür werden ebenfalls eine mögliche Berücksichtigung und der Umgang mit Unsicherheiten erläutert. Weitere Potenziale zur Optimierung der Ergebnisgrößen sollen bei der individuellen Bewertung des Anwendungsfalls helfen.

7.5.1 Festlegung von Ausschlusskriterien

Die drei ESS sind sich im Einsatzbereich aufgrund der emissionsfreien EM grundsätzlich ähnlich, allerdings gibt es Umfeldler und Rahmenbedingungen, bei denen manche ESS nicht eingesetzt werden können. Dieser Unterabschnitt analysiert und definiert die Ausschlusskriterien für die drei ESS mit wichtigen Aspekten, die vor der Anwendung des Modells beleuchtet werden sollten. Vor der eigentlichen Bewertung sind diese zu prüfen, um ungeeignete Technologien frühzeitig auszuschließen und nicht weiter als Planungsalternative zu betrachten. Die Identifikation der Ausschlusskriterien erfolgte durch das Schaffen der technischen Grundlagen in Kapitel 2 sowie das Aufzeigen des Stands der Wissenschaft und Technik in Kapitel 3. Insbesondere die Analyse zum industriellen Einsatz liefert wesentliche Erkenntnisse hierzu.

Bei BzS für FFZ stellt das größte Ausschlusskriterium weiterhin das Angebot der Systeme auf dem Markt dar. Bisher können nicht alle FFZ mit BzS geliefert werden, da bspw. für Stapler mit schweren Lasten (> 8 t) keine Zellen angeboten werden. Es gibt erst wenige Hersteller der Technologie. Auch bei LIB ist zu prüfen, ob die Technologie bereits für alle gewünschten FFZ-Typen angeboten wird.

Darüber hinaus können nicht alle ESS in allen Einsatzbereichen verwendet werden. Die Eignung für ein Tiefkühlager bspw. ist spezifisch für den FFZ-Typ zu prüfen. PbB sind temperaturempfindlich und ihre Leistungsfähigkeit ist bei geringen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt eingeschränkt. Auch nicht jede LIB eignet sich für den Einsatz bei Minusgraden, genauso wie die BzS. Des Weiteren können PbB aufgrund des Ausgasens von Wasserstoff nicht in empfindlichen Bereichen, wie Reinraumanwendungen, eingesetzt werden. Dies hat ebenfalls Auswirkung auf den Einsatz von BzS und deren Betankungsprozess.

Verschiedene lokale Gegebenheiten und deren Einfluss auf das Erfüllen der infrastrukturellen Anforderungen stellen ein weiteres Hemmnis dar. Sofern in der näheren Umgebung kein Wasserstoff verfügbar ist und keine eigene Wasserstofferzeugung vorgesehen ist oder dieser als Abfallprodukt anfällt, fehlt für den Einsatz von BzS der nötige Energieträger. Bei LIB (und teilweise PbB) ist die Dimensionierung des Stromanschlusses ein begrenzender Faktor für den Einsatz. Nur wenn seitens des Netzbetreibers die Spitzenlasten, die insbesondere beim Schnellladen der LIB in Pausen entstehen, abgedeckt werden können, ist die Verwendung von LIB möglich.

Eine weitere anwendungsspezifische prozessuale Eigenschaft, die den Einsatz der Technologien hemmt, ist die Verfügbarkeit des Platzes für den Aufbau der Infrastruktur und der Positionierung der Wechselstation bei PbB, einzelner Ladeplätze bei LIB oder der zusätzlichen Outdoor-Infrastruktur bei BzS. Diese kann mithilfe des prozessualen Moduls bewertet werden. Gleiches gilt für die Personalverfügbarkeit, welche ein einschränkendes Kriterium für den Einsatz von PbB sein kann mit dem aufwändigen Batteriewechsel und der notwendigen Instandhaltung. Ebenso wie die Forderung nach vollständig automatisierten Prozessen mit Fahren und Wiedererlangen der Leistungsfähigkeit ohne Personaleinsatz; diese sind aktuell nur durch LIB und BzS abbildbar.

7.5.2 Softwarebasierte Umsetzung und Nutzung im Anwendungsfall

Basierend auf den beschriebenen Bestandteilen des Modells können die im Konzept in Abbildung 7-1 dargestellten Zusammenhänge softwarebasiert umgesetzt werden. Hierfür empfiehlt sich die Vorgehensweise anhand der Reihenfolge der Formeln in Kapitel 6. Dabei sind die Einflussgrößen als Eingabefelder zu berücksichtigen. Ergebnisse aus den einzelnen Formeln stellen Eingangsgrößen für andere Formeln dar bis die Ergebnisgrößen errechnet sind. Energetische und prozessuale Bewertung sollten simultan erfolgen, da in beiden Modulen Werte errechnet werden, die Eingangsgrößen im jeweils anderen Modul darstellen. Aufgrund dieser Wechselwirkungen sind die drei Modellbestandteile somit miteinander verknüpft umzusetzen. Die beschriebenen Bausteine eignen sich ebenfalls für die Integration in bereits bestehende Planungstools, um eine detailliertere Betrachtung zu ermöglichen. Zur Prüfung der Anwendbarkeit und für die Szenarioanalyse im Rahmen der Evaluierung wird das Modell mit den beschriebenen Modulen und Zusammenhängen für diese Arbeit in Microsoft Excel umgesetzt.

Für die Eingabe der Eingangs- und Einflussgrößen in das umgesetzte Modell sind umfassende Datenbeschaffungen erforderlich. Es sind einerseits die betriebsinternen Spezifika und Details herauszuarbeiten und Analysen durchzuführen, andererseits müssen insbesondere die technischen Daten von den Herstellern der Technologien eingeholt werden. Da die Qualität der Eingangsdaten maßgebliche Auswirkungen auf

das Endergebnis hat, ist diesem Schritt besondere Aufmerksamkeit wie auch Zeit zu widmen. Auch für die diversen internen Analysen, wie zu den Prozesszeiten, die bspw. mithilfe von MTM erarbeitet werden können, ist ausreichend Zeit einzuplanen. Dies ist ebenfalls der Fall, falls ein Referenzprojekt existiert, an dem Messungen durchgeführt werden können. Die Einflussgrößen für die energetische und monetäre Bewertung erfordern zudem die Festlegung auf einen Hersteller für das FFZ, das ESS sowie die Infrastruktur. Die gesammelten Informationen und Kosten aus den Angebotsunterlagen, Herstellerdaten und Typenblättern können dann in das Modell einfließen. Sollten mehrere Hersteller in Betracht kommen, kann das Vorgehensmodell um diese weitere Planungsalternative erweitert werden. Sofern nicht alle Daten anhand der Typenblätter oder Angebote der Hersteller zur Verfügung stehen, empfiehlt es sich, die Lieferanten für die Analysen und die Bereitstellung der Details einzubeziehen. Die Erkenntnisse und Ergebnisse der Datenbeschaffung sind dabei transparent zu dokumentieren, um zu jeder Zeit und jedem Schritt der Bewertung sowie Entscheidung Klarheit über die Datenherkunft und -güte zu haben.

Nach der Ermittlung aller Eingangsgrößen für die Modellbestandteile kann der Planer zunächst die energetische und prozessuale Bewertung und anschließend die monetäre Bewertung, wie in Abschnitt 7.3 beschrieben, mithilfe des Tools durchführen.

Sofern die Werte mit Unsicherheiten behaftet sind, hilft anschließend die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse bei der Bestimmung der Auswirkungen einzelner Einflussfaktoren mit besonders hoher Unsicherheit auf den Zielwert. Das Vorgehen zielt darauf ab, die Sicherheit der Betrachtung weiter zu erhöhen. Für das Vorgehen wird ein Inputfaktor unter Gleichbleiben aller anderen Faktoren für mehrere Werte durchgerechnet, um die Stärke des Einflusses auf das Ergebnis abzuschätzen. Hierdurch kann die Kausalbeziehung dargestellt werden. Es erfolgt die Identifikation der Inputfaktoren mit dem größten Einfluss auf das Ergebnis. [Tas-2017, S. 123; VDI-2884, S. 19]

Die Ergebnisgrößen der Bewertung fließen dann in das unternehmensindividuelle Zielsystem ein. Bei der Festlegung des geltenden Zielsystems ist es wichtig, dass die Kriterien möglichst unabhängig voneinander gewählt werden, sodass ein Faktor nicht mehrmals in die Bewertung einfließt. Da die Gewichtung subjektiv erfolgt, sollte diese Festlegung ebenfalls gewissenhaft erfolgen und z. B. durch mehrere Experteninterviews unterstützt werden. Das Zusammenführen der Ergebnisgrößen mit den Gewichtungswerten resultiert in einer Ermittlung der Nutzwerte für die festgelegten Kriterien. Die Rangfolge der ESS ergibt sich dann aus der Summe aller Nutzwerte für jede Alternative. Die Alternative mit dem höchsten Wert stellt für die gewählten Ziele die vorteilhafteste dar. Um aber nicht nur ausgehend von diesem einen Wert zu entscheiden, empfiehlt es sich bei der Entscheidung ebenfalls die Ergebniswerte der Zielgrößen

hinter den gewichteten Nutzwerten zu betrachten, um Transparenz in der Entscheidung zu erhalten und die tatsächlich optimale Lösung identifizieren zu können. Das Ergebnis der Entscheidungsmatrix aus den Ergebnissen des Modells für das identifizierte Zielsystem legt dar, welche ESS-Technologie im individuellen Anwendungsfall am besten geeignet wäre, unabhängig davon, ob bereits eine der drei Anwendung findet. Mögliche Restwerte einer bereits bestehenden Flotte mit zugehöriger Infrastruktur sind bei Berücksichtigungswunsch durch den Planer über die Kostenarten der Verwertungsphase hinzuzurechnen.

Das entwickelte Modell dient dem Planer als herstellerunabhängige Hilfestellung zur Entscheidungsunterstützung für die Auswahl der geeigneten ESS-Technologie im spezifischen Anwendungsfall. Die Anwendung des abstrahierten Modells ist somit in der Planungsphase vorgesehen. Die Ergebnisse können dann in der weiteren Ausplanung des logistischen Anwendungsfalls helfen sowie bei weiterführenden Überlegungen. Der Planer kann damit bspw. bewerten, wie viele FFZ mit der dimensionierten Infrastruktur bei BzS zusätzlich umgerüstet werden könnten, was vor allem für Wachstumsstrategien interessant ist. Da die Berechnungen im analytischen Modell mit Mittelwerten erfolgen, handelt es sich nicht um eine detaillierte Berechnung. Diese ist in jedem Fall nach der Entscheidung für eine Technologie in der Detailplanung anzuschließen. Als Hilfestellung ersetzt das Modell also weder die Erfahrungswerte des Planers oder Energieexperten noch die Beratung oder die detaillierte Kenntnis des Unternehmens, wie für die Bereitschaft und Offenheit für den Einsatz neuer Technologien. Qualitative Faktoren finden im Modell keine Berücksichtigung.

7.5.3 Auswirkungen strategischer Entscheidungen auf Ergebnisgrößen

Durch strategische Entscheidungen in der Planung werden die Eingangsgrößen des Modells weiter beeinflusst, sodass die Ergebnisgrößen und deren Aussage unternehmensindividuell optimiert werden können. Das Modell kann dem Planer dabei helfen, diese bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, um so Reduktionspotenziale auszuschöpfen und die Eignung der Technologien für den individuellen Anwendungsfall weiter zu konkretisieren.

Bei den energetischen Ergebnisgrößen kann insbesondere die Peak-Leistung durch Maßnahmen wie Lastmanagement mit einem Energie- und Lademanagement für optimierte Ladestrategien und damit der Reduktion von Lastspitzen beeinflusst werden. Dadurch können die Energiekosten in der Betriebsphase reduziert werden, ebenso wie durch die damit mögliche Nutzung günstiger Stromzeiten für das Laden oder die Erzeugung von Wasserstoff.

Prozessuale Optimierungen der Ausfallzeiten und des Nutzungsgrades lassen sich bspw. durch die Verbesserung der internen Prozesse erzielen. Detaillierte Analysen der geplanten Prozesse, auch mithilfe von MTM, können beim Aufdecken von Schwachstellen und einer verbesserten Ausgestaltung helfen. Aus den erkannten Schwachstellen können die Potenziale abgeleitet werden, die in einer Verkürzung der Ausfallzeiten oder sogar in einer Layout- und damit Wegeoptimierung resultieren. Hierdurch kann sich ebenfalls die Anzahl erforderlicher FFZ reduzieren, was einerseits Auswirkungen auf die Anschaffungskosten der FFZ, ESS und Infrastruktur hat und andererseits auf die Personalkosten durch die Reduktion der erforderlichen Fahrer.

Die Entscheidung für die Anzahl der Mitarbeiter, die in der Betriebsphase für erhöhte Personalkosten sorgt, kann ebenfalls verringert werden. Eine Möglichkeit stellt, sofern im Prozess abbildbar, der Einsatz von FTF dar. Diese sorgen zwar zunächst für höhere Sachkosten in der Entstehungsphase für die erforderliche Hardware und Software, reduzieren aber langfristig die Personalkosten enorm. Darüber hinaus kann die Externalisierung von Personalkosten zu Reduktionen der Ergebnisgrößen führen, also das Auslagern der Logistikprozesse an einen Dienstleister. Je nach Vertragsvereinbarung kann die Zahlung bspw. abhängig von der erbrachten Leistung erfolgen, unabhängig davon, wie viele Mitarbeiter der Dienstleister hierfür einsetzt. Das Outsourcing der Leistungen senkt also die unmittelbaren, eigenen Personalkosten, wobei die Dienstleistungskosten in der Betriebsphase steigen. Dies geschieht allerdings üblicherweise in einem geringeren Maß.

Zudem hat die Wahl der Instandhaltungsstrategie für die FFZ, die ESS und die Infrastruktur wesentliche Auswirkungen auf die prozessualen sowie monetären Ergebnisgrößen. Sofern kein eigenes Personal für die Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen befähigt wird, kann die Beauftragung eines Dienstleisters entweder über eine Einzelbeauftragung zu festgelegten Stundensätzen und Kosten je Wartung oder über eine Pauschalbeauftragung mit Rahmenvertrag zu den Aufgaben erfolgen. Die Vereinbarungen haben hierbei wesentliche Auswirkungen auf die Reaktionszeit und damit die Ausfallzeiten. Kürzere Reaktionszeiten resultieren allerdings in höheren Kosten für das höhere Service-Level. In der Planung ist abzuwägen, welche Vereinbarungen für das Unternehmen die günstigeren sind. Dabei können die transparenten Berechnungen des multikriteriellen Modells ebenfalls helfen; die verschiedenen Varianten können als Planungsalternativen gegenübergestellt werden. Die Entscheidung für die Instandhaltungsstrategie stellt eine strategische Maßnahme zur Steuerung der Ergebnisgrößen dar.

Die energetischen und prozessualen Faktoren haben, wie beschrieben, alle ebenfalls Auswirkungen auf die monetären Ergebnisgrößen. Bei den monetären Ergebnisgrößen kommen allerdings die weiteren Auswirkungen der Auswahl der Finanzierungsmodelle hinzu. Dies bezieht sich auf den Umgang mit der Investitionssumme, also den entstehenden Sachkosten in der Entstehungsphase, für die FFZ, die ESS und die Infrastruktur. Aufgrund der hohen Beträge ist der Kauf der Vermögensgegenstände durch das Unternehmen eher unüblich. Die üblichen Modelle der Finanzierung für Staplerflotten sind [Wil-2022; Fro-2017; Unr-2009; Dro-2014, S. 366]:

- Mietkauf: Zahlung einer individuellen Monatsrate und einer konstanten Mietkauf-rate mit Besitzübergang nach Ablauf des Vertrags.
- Miete: Zahlung von Mietkosten für kurzfristige Miete in Abhängigkeit von der geforderten Leistung und der gewünschten Mietdauer.
- Leasing: Überlassen des Investitionsobjekts durch Leasinggeber für vereinbarten Zeitraum (mittel-/langfristige Miete) mit Zahlung einer Leasingrate als Aufwand für Nutzung, bei Bedarf mit zusätzlichen Instandhaltungskosten, mit Bilanzierung beim Leasinggeber.
- Rental: Sonderform des Leasings mit vereinbarter Verfügbarkeitsgarantie mit monatlichen Zahlungen bestehend aus Leasingkosten sowie Instandhaltungskosten.

Die folgende Tabelle liefert eine Gegenüberstellung der drei häufigsten Finanzierungsmodelle für Flotten: Mietkauf, Leasing und Rental. Diese zeigt die Vor- und Nachteile auf, die bei der Entscheidung für die Finanzierungsform unterstützen können.

Tabelle 7-13: *Finanzierungsmodelle für FFZ-Flotten in Anlehnung an [Wil-2022; Unr-2009]*

Kriterium	Mietkauf	Leasing	Rental
Schonung der Liquidität	•	•	•
Senkung der Kosten auf Betreiberseite	•	•	•
Konstante, planbare Raten	•	•	•
Ratenflexibilität	•		
Möglichkeit der Nutzung von staatlichen Fördermitteln	•		
Steuerliche Abschreibungsmöglichkeit	•		
Eigentum auf Käuferseite	•		
Fuhrpark auf Stand der Technik		•	•
Verbesserung der Bilanzstruktur		•	•
Vereinfachte Verwaltung		•	•
Überwachung Instandhaltung durch Serviceunternehmen		•	•
Komplettbetreuung der Flotte durch Serviceunternehmen			•
Hoher Nutzungsgrad und Einsatzbereitschaft der Flotte			•
Abhängigkeit von Serviceunternehmen über Vertragslaufzeit			•

Neben den aufgezeigten Finanzierungsmodellen kann für die Infrastruktur eine weitere Möglichkeit in Betracht gezogen werden: Pay-per-Use oder auch genannt Pay-at-the-Pump. Diese Variante zeichnet sich dadurch aus, dass der Kunde einen zuvor festgelegten Preis je abgenommenem Kilogramm Wasserstoff bezahlt, der neben den tatsächlichen Kosten für den Wasserstoff ebenfalls die Miete für die Infrastruktur beinhaltet [Gün-2015c, S. 23]. Dieses Modell kann sich insbesondere dann lohnen, wenn der ermittelte Wasserstoffbedarf relativ gering ist, da so die hohen Anschaffungskosten für die Infrastruktur nivelliert werden können. Sofern der Bedarf allerdings stark zunehmen wird, ist die nutzungsabhängige Zahlungsweise weniger relevant. Die Bewertung der geeigneten Methode kann weiterführend ebenfalls mithilfe des entwickelten, multikriteriellen Modells erfolgen, indem die Finanzierungsmöglichkeiten einander als Planungsalternativen gegenübergestellt werden.

Die verschiedenen aufgezeigten Finanzierungsmodelle beeinflussen insbesondere die Kostenlast in der Entstehungsphase und in der Betriebsphase und verlagern diese je nach Entscheidung des Unternehmens. Unberührt davon bleiben die Inbetriebnahmekosten der jeweiligen Elemente, die weiterhin in der Entstehungsphase anfallen.

Die aufgezeigten strategischen Entscheidungen können mitunter starke Auswirkungen auf das Ergebnis der Bewertung haben, welches schlussendlich zur Entscheidung für eine Technologie führt. Grundsätzlich kann das multikriterielle Modell dabei helfen, den Einfluss dieser Entscheidungen aufzuzeigen, indem deren Ausprägungsformen jeweils als Planungsalternativen durchgerechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen werden.

8 Evaluation des entwickelten Vorgehensmodells

Die Evaluation des multikriteriellen Vorgehensmodells dient der Bewertung der Forschungsergebnisse und der kritischen Auseinandersetzung mit diesen. Nach dem Aufzeigen der Zielsetzung und Vorgehensweise der Evaluation folgen die fallstudienbasierte Prüfung der Umsetzbarkeit des Konzeptes sowie die Überprüfung der Anforderungserfüllung für die Identifikation des Nutzens des Modells. Anschließend wird der Rückbezug zur Forschungsfrage dieser wissenschaftlichen Arbeit hergestellt.

8.1 Zielsetzung und Vorgehen der Evaluation

Das gewählte Vorgehen für den Modellbildungsprozess aus *VDI-Richtlinie 4465* sieht eine Verifikation und Validierung in allen Phasen vor, insbesondere aufgrund der umgesetzten Abstraktionen im Zuge der Erstellung des Modells. Die Verifikation beantwortet dabei die Frage, ob das Modell formal korrekt ist, wohingegen die Validierung prüft, ob es sich um das richtige Modell für die Abbildung des Verhaltens des realen Systems handelt. Durch Verifikation und Validierung kann geprüft werden, ob das Modell in sich schlüssig ist und ob alle für das Problem relevanten Eigenschaften des Systems abgebildet sind. Wesentliche Grundlage für eine systematische Prüfung ist die transparente und durchgängige Dokumentation der Zwischen- und Endergebnisse. Die Ergebnisse sind dabei umfassend zu prüfen sowie ebenfalls deren Verknüpfung zu vorherigen Phasen oder Modellbestandteilen. [VDI-4465, S. 24f.]

Die Evaluation in dieser Arbeit beinhaltet neben der Verifikation und Validierung die Bewertung des entwickelten Vorgehensmodells. Während der Entwicklung können lediglich Annahmen zu den Auswirkungen getroffen werden, da eine neue Situation durch das Werkzeug geschaffen wird, die zuvor nicht bestand. Dies kann zu Unschärfen im Modell führen. Zudem kann das Werkzeug in einem dynamischen Umfeld eingesetzt werden. Dies erfordert ebenfalls eine Evaluation des Modells. [Ble-2009, S. 182] Für das resultierende Modell in dieser Arbeit existieren weder aus Praxis noch aus der Wissenschaft öffentlich zugängliche, umfassende Planungsvorgehen für den Vergleich und die Bewertung der drei ESS. Für BzS gibt es in Europa bisher zudem nur wenige Flottenanwendungen. Aufgrund fehlender Vergleichswerte kann eine sogenannte initiale Evaluation im modellierten Umfeld dabei helfen, die Anwendbarkeit, die Nutzbarkeit und den Nutzen des Modells für Planer zu bewerten sowie weiteren Forschungsbedarf für bestimmte Themen, die einer detaillierteren Bewertung bedürfen, zu liefern [Ble-2009, S. 195]. Die vereinfachte, initiale Evaluation wird eingesetzt,

da für die tatsächliche Validierung der Ergebnisse eine Umsetzung der Alternative erforderlich wäre, die über die Nutzungszeit begleitet werden müsste – insbesondere Degradation und damit Lebensdauer der BzS erfordert langjährige Umsetzungsprojekte. Darüber hinaus wurde das entwickelte Vorgehensmodell nicht in einer für Planer einsetzbaren, nutzerfreundlichen Art und Weise als Software-Werkzeug umgesetzt, sondern lediglich für die Zwecke dieser Arbeit als Berechnungswerkzeug erarbeitet.

Aus diesen Anforderungen lassen sich mehrere Schritte für die Evaluation festlegen. Wichtige Erkenntnisse zur Anwendbarkeit wie auch Nutzbarkeit des Vorgehensmodells können über eine fallstudienbasierte Evaluation erarbeitet werden. Diese dient ebenfalls der Verifikation und Validierung der Modellbestandteile. Die Anwendung für eine Fallstudie in der Szenarioanalyse ermöglicht ebenfalls zu prüfen, ob der Entscheidungsprozess durch das Verfahren vereinfacht wird. Die Bewertung des Nutzens des Modells erfolgt über die Überprüfung der Anforderungserfüllung. Eine anschließende kritische Würdigung der Forschungsergebnisse hilft beim Aufzeigen von Verbesserungspotenzialen sowie von Ansatzpunkten für die weitere Forschung.

8.2 Szenarioanalyse

Für die Bewertung der Anwendbarkeit und Nutzbarkeit des Modells wie auch der Verifikation und Validierung der Modellbestandteile dient zum einen die Implementierung der drei Modellbestandteile mit allen Eingangsgrößen und Verknüpfungen in einem Tool. Zum anderen hilft das Anwenden der Methode für ein Fallbeispiel in einer Szenarioanalyse bei der weiteren Evaluierung.

8.2.1 Verifikation und Validierung der Modellbestandteile

Grundlage für die Szenarioanalyse stellt die Verifikation und Validierung der Modellbestandteile mithilfe der softwarebasierten Umsetzung dar. Die Vorgehensweise für die Erstellung wurde in Unterabschnitt 7.5.2 erläutert; für die Evaluation wurde diese angewandt und das Modell als Berechnungswerkzeug in Microsoft Excel umgesetzt. Die Bestandteile des analytischen Modells wurden hierfür basierend auf der Reihenfolge dieser Arbeit implementiert. Dafür wurden alle Ergebnisgrößen aus den Formeln aus Kapitel 6 in der Umsetzung für die drei Planungsalternativen der Energiespeicher PbB, LIB und BzS berücksichtigt. Für die Eingangsgrößen wurden ebenfalls Eingabefelder geschaffen, sodass diese in den Formeln verknüpft sind und in die Berechnungen einfließen. Alle Zwischenergebnisse sind transparent dargelegt, um die Richtigkeit der Ergebnisse bewerten zu können und den Einfluss auf die Ergebnisgrößen ersichtlich zu haben. Ebenso konnten so die Wechselwirkungen zwischen den Formeln und Modellbestandteilen überprüft werden.

Im Zuge der Erarbeitung des Modells als Berechnungstool stand zu jeder Zeit die Verifikation und Validierung im Vordergrund sowie die Anwendbarkeit für die Szenarioanalyse. Die Richtigkeit der Formeln, der einzelnen Bestandteile, der Zwischenergebnisse wie auch der Ergebnisgrößen wurde hierbei ebenso wie die Korrektheit der Zusammenhänge kontinuierlich und strukturiert geprüft. Zudem erfolgte, sofern vorhanden, ein Abgleich mit bestehenden Formeln aus früheren Bewertungen und Bestandteilen anderer existierender Modelle oder Methoden, die im Stand der Wissenschaft und Technik erläutert wurden. Insbesondere bei den Verfahren und Berechnungsmethoden zur Kosten- und Leistungsrechnung handelt es sich um ein etabliertes Vorgehen. Darüber hinaus erfolgte ein Abgleich mit den Erkenntnissen und Daten aus den Forschungsprojekten ‚H2IntraDrive‘ und ‚FFZ70‘, was bei der Validierung und Verifizierung half. Auch die durchgeführte Szenarioanalyse diente einer erneuten Überprüfung des Modells.

Im Modell fand eine Abstrahierung statt, die zu Abweichungen in den Ergebnissen führen kann, weshalb eine Berücksichtigung von Unsicherheiten wichtig ist. Die qualitativ orientierte Szenarioanalyse stellt hierfür eine Alternative zur dynamischen Simulation dar. Grundlage ist ein verbal formuliertes Ausgangsszenario mit einem konsistenten Datensatz für alle Eingangsgrößen. Erkenntnisse daraus sind, im Vergleich zu Simulationen, keine Eintrittswahrscheinlichkeiten, sondern die Darstellung des Outputs eines Modells unter bestimmten Bedingungen. Die Ergebnisse sind stark abhängig vom definierten Szenario und sind daher in Zusammenhang mit diesem zu betrachten. Die Analyse dieser Ergebnisse kann nicht direkt in Handlungsanweisungen überführt werden, liefert allerdings weitere Ansatzpunkte für die Auseinandersetzung mit dem Modell und der Entscheidungsfindung. [Tas-2017, S. 121ff.]

8.2.2 Eingangsdaten und Annahmen für Szenarioanalyse

Für die Szenarioanalyse in dieser Arbeit wird der Evaluierung das folgende Ausgangsszenario zugrunde gelegt, auf welches das Modell angewandt wird:

Ein Logistikplaner hat für ein Neubauprojekt eines Kommissionier-Lagers zu entscheiden, welches ESS für das geplante Routenzugsystem eingesetzt werden soll. Die Entscheidung für ein Routenzugsystem und dessen grobe Planung ist bereits erfolgt. Routenzugsysteme werden zur Verschlankung der Prozesse implementiert mit dem Ziel der Effizienzsteigerung durch gebündelte Transporte zu verschiedenen Bedarfsorten in festgelegten Touren und damit der Reduktion von Leerfahrten [Lie-2017, S. 17]. Insbesondere in einem reinen Kommissionier-Lager kann der Einsatz von Routenzügen zu deutlichen Einsparungen in den Prozesszeiten führen, da konstante Transportbedarfe auf den festgelegten Routen bestehen. Die Ein- und Ausplanung eines Routenzugsystems impliziert somit bereits die Wichtigkeit der hohen Verfügbarkeit der Systeme und der Gesamteffizienz für das Unternehmen. Die Details des Routenzugsystems und somit die Rahmenbedingungen für den Einsatz sind identifiziert und können als Eingangsdaten in die Bewertung der ESS für den Anwendungsfall einfließen.

Tabelle 8-1 zeigt beispielhaft die betrieblichen Rahmenbedingungen aus 7.2.1 für das festgelegte Ausgangsszenario. Grundsätzlich können für das Szenario alle drei ESS eingesetzt werden, da kein Ausschlusskriterium aus 7.5.1 die Anwendung verhindert.

Tabelle 8-1: Betriebliche Rahmenbedingungen für Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$t_{Schicht}$	Dauer einer Schicht in s	32.400 (9 h)		
t_{Pause}	Dauer vorgesehene Pausen je Schicht in s	2.700 (0,75 h)		
$n_{Schichten,Tag}$	Anzahl Schichten am Tag	2		
$n_{Arbeitstage,Jahr}$	Arbeitstage pro Jahr	270		
$n_{FFZ,Plan,initial}$	Initial geplante Anzahl FFZ zur Leistungserfüllung	90		
n_{FTF}	Anzahl der eingeplanten autonomen FFZ	0		
$t_{Nutzung,Plan}$	Geplante Nutzungszeit je FFZ für den Anwendungsfall in s	28980		
$k_{Sicherheit,ESS}$	Faktor für die Ermittlung der Anzahl der Ersatz-ESS	1,7	1	1
$k_{Sicherheit,Ladegerät}$	Faktor für die Ermittlung der Anzahl der Ladegeräte	0,6	1,2	-
$n_{MA,WLT}$	Anzahl Mitarbeiter für Wechseln/Tanken/Laden je Schicht	1,3	0	0
$k_{Abwesenheiten}$	Faktor für Abwesenheiten zur Ermittlung Mitarbeiterzahl	1,3		
s_{WLT}	Anfahrtstrecke zur Infrastruktur in m	500	200	10
v_{FFZ}	Durchschnittliche Geschwindigkeit Schlepper in m/s	1,94		
i	Kalkulationszinssatz auf Eigenkapital/Fremdkapital	0,05		

Als Fahrzeuge sollen Schlepper des Typs P30C des Herstellers Linde Material Handling zum Einsatz kommen. Relevante Daten für die energetische Bewertung werden den Typenblättern entnommen. Bei PbB ist ein Wechselbetrieb in einem separaten Batteriewechselraum vorgesehen, bei LIB ein Ladebetrieb an installierten Ladegeräten und die BzS sollen an einer Tankstelle betankt werden, die prozessnah aufgebaut wird. Der grüne Wasserstoff soll per Trailer angeliefert werden.

Die detaillierten Einflussgrößen für das Ausgangsszenario zur Bewertung des Anwendungsbeispiels können Anhang A entnommen werden. Dort sind die verwendeten Eingangsdaten für die Energiebedarfe, die Wirkungsgrade der Systeme und technische Größen aus 7.2.2 aufgelistet. Dieser enthält ebenfalls die in 7.2.3 identifizierten Einflussgrößen für das Ausgangsszenario zur prozessualen Bewertung der Prozesszeiten, der Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur sowie den Flächenbedarfen. Ergänzt werden diese um die weiteren Einflussgrößen aus 7.2.4 zur Ermittlung der Nutzungsdauer und der monetären Bewertung der drei Lebenszyklusphasen mit den spezifischen Kostensätzen.

Für die Datenaufnahme und -beschaffung zur Erfassung der spezifischen Einsatzbedingungen für das Ausgangsszenario wurden verschiedene Quellen herangezogen. Neben den Projekterfahrungen aus ‚FFZ70‘ und ‚H2IntraDrive‘ konnten viele Herstellerdaten aus Produktblättern und Literaturquellen entnommen werden. Zudem halfen verschiedene Bewertungen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bei der

Identifikation des Ausgangsszenarios. Für das Ausgangsszenario gelten über die ermittelten Daten hinaus folgende Annahmen, die in die Bewertung einfließen:

- Auf dem Markt existieren alle drei ESS mit einem gleich hohen Technologiereifegrad; die Lebensdauer der ESS sowie der Infrastruktur ist hierbei validiert und vom Hersteller gegeben, sodass diese als Nutzungsdauer in den Berechnungen herangezogen werden kann.
- Die Sachgüter (FFZ, ESS, Infrastruktur) sollen für den Vergleich mit den vollen Anschaffungskosten berücksichtigt werden.
- Für die Instandhaltung sollen für alle Systembestandteile Dienstleistungskosten aus Wartungsverträgen einfließen.
- Die Energiekosten verhalten sich konstant und werden kein starkes Wachstum über die Nutzungsdauer der FFZ erleben.
- Grüner Wasserstoff ist zu einem festgelegten Preis verfügbar, auch dieser wird in den Jahren der Nutzungsdauer keine Veränderung erfahren. In die Analyse fließt die erwartete Preisentwicklung in den verwendeten Wert ein.
- Logistiktätigkeiten, also Fahren von FFZ wie auch Wechseln/Laden/Tanken der ESS, sind nicht an einen Dienstleister ausgelagert, sondern werden von eigenen Mitarbeitern durchgeführt.
- Automatisierung ist zunächst nicht vorgesehen, die Option soll in der Bewertung aber berücksichtigt werden.
- Abschreibungen oder kalkulatorische Größen werden häufig in der Investitionsrechnung berücksichtigt. Da Investitionsrechnung zahlungsstrom-orientiert sind, sollten allerdings alle Aufwendungen, die keinen Einfluss auf den Zahlungsstrom haben, ausgeklammert werden. [Hee-2021, S. 16; Dro-2014, S. 247] In der vorliegenden Szenarioanalyse werden diese daher nicht eingerechnet.
- Bei den Eingangsdaten wird von zuverlässigen Werten ausgegangen, sodass keine Unsicherheiten zu berücksichtigen sind.

Zur Auswertung des Fallbeispiels wird ein gewichtetes Zielsystem bei der Gegenüberstellung der drei Technologien herangezogen. Aus den möglichen Zielgrößen für das Modell aus Tabelle 7-11 fließen sieben Zielgrößen in das beispielhafte, individuelle Zielsystem ein. Es handelt sich um die Größen: Energiebedarf Stromnetz in Betriebsphase, Ausfallzeiten FFZ, Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil, Anzahl Soll-Fahrzeuge, Anzahl Mitarbeiter, Kosten Entstehungsphase und Kosten Betriebsphase. Die Gewichtung dieser Zielgrößen ist in untenstehender Tabelle 8-2 dargestellt. Die aufgezeigte qualitative Tendenz zur Komplementarität wurde hierfür in einen quantitativen Wert überführt und in der Gewichtung berücksichtigt. Das Ranking ergibt sich aus der Gegenüberstellung der Zielgrößen untereinander. Wichtigste Zielgröße der Gewichtung stellen die Ausfallzeiten dar, ergänzt um die Anzahl der Mitarbeiter und Fahrzeuge

sowie die Nutzungsdauer der ESS fließen prozessuale Zielgrößen mit einer Gewichtung von 46,43 % in das Zielsystem ein. Die monetären Zielgrößen werden mit einem Wert von 39,29 % berücksichtigt. Energetische Zielgrößen werden mit 14,29 % gewichtet sowie über deren Einfluss in die monetäre Bewertung – insbesondere für die Kosten in der Betriebsphase – einbezogen.

Tabelle 8-2: Gewichtetes Zielsystem für Fallbeispiel

Zielgröße im Zielsystem	Zielwert	Ranking	Gewichtung
Ausfallzeiten FFZ	Minimaler Wert	1	25,00 %
Kosten Entstehungsphase	Minimaler Wert	2	21,43 %
Kosten Betriebsphase	Minimaler Wert	3	17,86 %
Energiebedarf Stromnetz in Betriebsphase	Minimaler Wert	4	14,29 %
Anzahl Mitarbeiter	Minimaler Wert	5	10,71 %
Anzahl Soll-Fahrzeuge	Minimaler Wert	6	7,14 %
Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil	Maximaler Wert	7	3,57 %

Das gewichtete Zielsystem stellt eine wichtige Grundlage für die folgende Analyse des Anwendungsfalls dar, um eine Entscheidung für eine der drei Technologien mithilfe der Entscheidungsmatrix ableiten zu können.

8.2.3 Analyse der Ergebnisse des Fallbeispiels

Nach Eingabe aller Einfluss- und Eingangsdaten in das Modell können die Ergebnisse für das Anwendungsbeispiel ausgewertet werden. Hierzu erfolgt die Bewertung innerhalb der drei Modellbestandteile, wobei mit der energetischen und prozessualen Betrachtung gestartet wird. Die Erkenntnisse fließen dann in die monetäre Bewertung ein. Das Vorgehen erfolgt anhand der detaillierten Ausführungen in Abschnitt 7.3 zu den drei Bestandteilen im multikriteriellen Vorgehensmodell. Aus jedem der drei Module ergeben sich verschiedene Ergebnisgrößen. Tabelle 8-3 zeigt die Größen für die energetische Bewertung für die drei Technologien PbB, LIB und BzS im Anwendungsfall.

Tabelle 8-3: Energetische Ergebnisgrößen für Fallbeispiel

Ergebnisgröße	PbB	LIB	BzS
I_{FFZ} Lastprofil der FFZ	1,04	1,04	1,04
$E_{FFZ,ges}$ Energiebedarf der Flotte in kWh	123,39	144,58	113,42
$E_{Stromnetz}$ Energiebedarf aus Stromnetz in kWh	226,01	174,63	17,26
$P_{Stromnetz,max}$ Peak-Leistung der Infrastruktur in kW	287,49	945,00	18,45
$m_{Wasserstoff,ges}$ Wasserstoffbedarf in kg je Bh	-	-	10,48

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von BzS zu einem geringeren Energiebedarf aus dem Stromnetz führt, wodurch ebenfalls die Peak-Leistung der Infrastruktur reduziert ist. Nicht berücksichtigt sind für dieses Fallbeispiel der Energiebedarf für die Wasserstoffherzeugung, da dieser angeliefert wird und über den Wasserstoffpreis verrechnet wird. Die unterschiedlichen Energiebedarfe der Flotte trotz identischem Lastprofil resultieren aus der Anzahl der Soll-Fahrzeuge, die in Tabelle 8-4 im Rahmen der prozessualen Bewertung ermittelt wurden.

Tabelle 8-4: Prozessuale Ergebnisgrößen für Fallbeispiel

Ergebnisgröße		PbB	LIB	BzS
$t_{\text{Ausfall,FFZ,ges}}$	Ausfallzeit der Flotte je Schicht in s	129.007 (35,84 h)	318.417 (88,45 h)	42.474 (11,80 h)
t_{Nutzung}	Nutzungszeit je FFZ je Schicht in s	28.397 (7,89 h)	26.955 (7,49 h)	29.233 (8,12 h)
η_{ver}	Nutzungsgrad der FFZ	0,96	0,91	0,98
$t_{\text{Nutzungsdauer,FFZ}}$	Nutzungsdauer FFZ mit Lastprofil	4,70	4,95	4,56
$t_{\text{Nutzungsdauer,ESS}}$	Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil	2,82	4,95	9,12
$n_{\text{FFZ,Soll}}$	Anzahl Soll-Fahrzeuge	99	116	91
n_{ESS}	Anzahl notwendiger ESS	169	116	91
n_{MA}	Anzahl Mitarbeiter	100,41	116	91

Für die Nutzungsdauer der FFZ anhand des Lastprofils, die ebenfalls als Betrachtungszeitraum für die monetäre Bewertung herangezogen wird, stellt der Mittelwert der drei ermittelten Werte aufgerundet den Bezugswert dar, also fünf Jahre. Hinsichtlich der Ausfallzeiten wird deutlich, dass sich die drei Technologien vorrangig durch die organisatorische Ausfallzeit unterscheiden, also die Zeitverluste durch Wechseln, Laden oder Tanken. Dadurch, dass bei LIB mehrere Ladevorgänge in der Produktivzeit liegen, fällt dort die Ausfallzeit deutlich höher aus. Für die FFZ ergibt sich daraus der Nutzungsgrad, der bei LIB mit 91 % deutlich niedriger ist als bei BzS mit 98 %. Die kumulativen Prozesszeitverluste in Form der Ausfallzeit der Flotte je Schicht zeigt die Auswirkungen daraus: während bei BzS lediglich 11,80 Stunden Prozesszeit nicht produktiv genutzt werden können, ist dieser Wert bei LIB mit 88,45 Stunden achtmal so hoch. Dies spiegelt sich dann wiederum in der Anzahl der Fahrzeuge wider, die für die Leistungserfüllung erforderlich sind. Bei BzS genügen 91 FFZ, wohingegen LIB 116 FFZ erfordert – dies ist ebenfalls die Anzahl der Fahrer die je Schicht eingesetzt werden müssen. Bei PbB sind 99 Fahrzeuge erforderlich, wofür Fahrer benötigt werden; hinzu kommt noch 1,41 Mitarbeiter für die Durchführung des Batteriewechsels.

Die Berechnungen zur Auslegung der Infrastruktur liefern die in Tabelle 8-5 gelisteten Erkenntnisse. Während bei PbB wegen des Batteriewechsels eine höhere Anzahl an

ESS erforderlich ist, müssen bei LIB mehr Ladegeräte eingeplant werden, um Zwischenladungen gewährleisten zu können. Die Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur resultierte in einem aufzubauenden Indoor-Dispenser sowie den Speichergrößen, die Outdoor vorzusehen sind. Damit die Flotte mit dem ermittelten Wasserstoffbedarf versorgt werden kann, sollte der Verdichter 15,72 kg verdichten. Die H₂-Infrastruktur belegt vorrangig Outdoor-Flächen, wohingegen PbB einen Wechselraum mit 82,32 m² erfordert und die Ladeplätze für LIB innerhalb des Lagers 420 m² einnehmen.

Tabelle 8-5: Prozessuale Ergebnisgrößen zur Auslegung der Infrastruktur

Ergebnisgröße		PbB	LIB	BzS
$n_{Ladegerät}$	Anzahl der Ladegeräte	102	140	-
$n_{Dispenser}$	Anzahl nötiger Dispenser	-	-	0,81
$m_{Niederdruck}$	Größe Niederdruckspeicher in kg	-	-	150,00
$m_{Hochdruck}$	Größe Hochdruckspeicher in kg	-	-	85,09
$m_{Verdichter}$	Liefermenge Verdichter in kg	-	-	15,72
$A_{Infrastruktur,Indoor}$	Indoor-Platzbedarf der Infrastruktur in m ²	83,32	420,00	13,50
$A_{Infrastruktur,Outdoor}$	Outdoor-Platzbedarf der Infrastruktur in m ²	-	-	135,00

Die aufgezeigten, bisher ermittelten Ergebnisgrößen stellen neben den Eingangsdaten eine wichtige Grundlage für die nun anschließende monetäre Bewertung dar. Diese liefert die in Tabelle 8-6 aufgeführten Ergebnisgrößen.

Tabelle 8-6: Monetäre Ergebnisgrößen für Fallbeispiel

Ergebnisgröße		PbB	LIB	BzS
$K_{Entsteh}$	Kosten in Entstehungsphase in €	-2.126.675	-3.082.250	-2.924.030
$K_{Invest,FFZ,ges}$	Investition FFZ in €	-1.232.550	-1.444.200	-1.132.950
$K_{Invest,ESS,ges}$	Investition ESS in €	-253.500	-812.000	-910.000
$K_{Invest,Infra}$	Investition Infrastruktur in €	-208.000	-602.000	-700.000
$K_{Betrieb,Jahr}$	Kosten in Betriebsphase je Jahr in €	-13.003.642	-14.982.145	-11.808.171
$K_{Energie,ges}$	Energiekosten je Jahr in €	-207.739	-165.385	-110.481
$K_{Personal,ges}$	Personalkosten je Jahr in €	-12.687.488	-14.657.760	-11.498.760
$K_{Instand,ges,FFZ}$	Instandhaltungskosten FFZ je Jahr in €	-49.500	-58.000	-45.500
$K_{Instand,ges,ESS}$	Instandhaltungskosten ESS je Jahr in €	-42.250	-17.400	-91.000
$K_{Instand,ges,Infra}$	Instandhaltungskosten Infrastruktur je Jahr in €	-10.000	-50.000	-60.000
$K_{Fläche}$	Mietkosten Flächen je Jahr in €	-6.666	-33.600	-2.430
$K_{Verwert}$	Kosten in Verwertungsphase in €	321.230	616.720	1.998.470
K_0	Kapitalwert der Investition in €	-58.382.503	-67.463.883	-52.481.378

Zu den Zahlen in vorhergehender Tabelle ist es wichtig zu ergänzen, dass die Kosten als positive Werte dargestellt sind, obwohl es sich um Auszahlungen handelt. Lediglich in der Verwertungsphase werden Einzahlungen generiert, weshalb die Kosten in der Entstehungsphase und Betriebsphase negativ sind und in der Verwertungsphase positiv. Die Kapitalwerte der Investition sind ebenfalls als negative Werte zu betrachten. Ausgehend vom Kapitalwert wäre somit der Einsatz von BzS für den Anwendungsfall am vorteilhaftesten, da dieser der größte Kapitalwert ist. In der Entstehungsphase weist LIB die höchsten Kosten auf, BzS hat aber fast ähnlich hohe Kosten. PbB ist deutlich günstiger, was vor allem auf die hohe Marktverbreitung und damit günstigeren Beschaffungskosten für die ESS wie auch Ladegeräte zurückzuführen ist. Die Anschaffungskosten für die Infrastruktur scheinen zunächst niedrig, insbesondere für PbB, allerdings kommen noch Inbetriebnahmekosten in Form von Baukosten, Kosten für Anbindung an die Versorgung oder Kosten für den Aufbau der Netzinfrastruktur hinzu. Diese fallen bei PbB besonders ins Gewicht, sind aber auch bei LIB und BzS nicht zu vernachlässigen.

In der Betriebsphase weisen alle Technologien jährlich hohe Kosten auf. LIB mit dem höchsten Wert, gefolgt von PbB und schließlich BzS. Beim ersten Blick fällt aber direkt auf, dass die Personalkosten den größten Anteil der Kosten in der Betriebsphase ausmachen. Wie bereits über die Anzahl der Mitarbeiter dargestellt, sind diese daher für LIB ebenfalls am höchsten. Hinsichtlich der Energiekosten ist interessant, dass für BzS lediglich 37 % der Kosten anfallen im Vergleich zu LIB und 42 % zu PbB. Instandhaltungskosten fallen vor allem bei BzS ins Gewicht.

Die Verwertungsphase resultiert vor allem für BzS in hohen Einzahlungen, was an den längeren Nutzungsdauern der Technologie, sowohl ESS als auch Infrastruktur liegt. Der Restbuchwert ist entsprechend höher.

Die Berücksichtigung einer Automatisierung aller einzusetzenden FFZ, die aufgrund der hohen Personalkosten für eine Neuinvestition interessant sein könnte, resultiert für den Anwendungsfall in der monetären Betrachtung in den Ergebnissen der Tabelle 8-7. Die Einflussgrößen für diese Planungsalternativen können Anhang A entnommen werden. Personal ist in der neuen Variante für alle drei Technologien lediglich für den Prozess der Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit erforderlich. Die Einmalinvestitionen in der Entstehungsphase sind insbesondere für die FFZ höher, aufgrund des zusätzlichen Energiebedarfs der Automatisierungstechnik sind zudem weitere Fahrzeuge erforderlich, da die Reichweiten dadurch kürzer werden und die Häufigkeit von Wechseln, Laden oder Tanken zunimmt. Bei PbB wären nun 101, bei LIB 122 und bei

BzS 91 FFZ erforderlich. Nach den deutlich höheren Anschaffungskosten in der Entstehungsphase fallen dafür die Kosten in der Betriebsphase deutlich geringer aus. Die Energiekosten machen hierbei nun einen deutlich größeren Anteil aus.

Tabelle 8-7: Monetäre Ergebnisgrößen für Fallbeispiel beim Einsatz von FTF

Ergebnisgröße		PbB	LIB	BzS
$K_{Entsteh}$	Kosten in Entstehungsphase in €	-3.436.775	-4.772.500	-4.058.980
$K_{Invest,FFZ,ges}$	Investition FFZ in €	-2.459.350	-2.970.700	-2.215.850
$K_{Invest,ESS,ges}$	Investition ESS in €	-258.000	-854.000	-910.000
$K_{Invest,Infra}$	Investition Infrastruktur in €	-211.000	-632.100	-700.000
$K_{Betrieb,Jahr}$	Kosten in Betriebsphase je Jahr in €	-593.501	-466.308	-416.040
$K_{Energie,ges}$	Energiekosten je Jahr in €	-258.197	-209.435	-140.756
$K_{Personal,ges}$	Personalkosten je Jahr in €	-225.112	-92.293	-75.274
$K_{Instand,ges,FFZ}$	Instandhaltungskosten FFZ je Jahr in €	-50.500	-61.000	-45.500
$K_{Instand,ges,ESS}$	Instandhaltungskosten ESS je Jahr in €	-43.000	-18.300	-91.000
$K_{Instand,ges,Infra}$	Instandhaltungskosten Infrastruktur je Jahr in €	-10.000	-50.000	-60.000
$K_{Fläche}$	Mietkosten Flächen je Jahr in €	-6.691	-35.280	-2.430
$K_{Verwert}$	Kosten in Verwertungsphase in €	326.370	647.840	1.998.470
K_0	Kapitalwert der Investition in €	-5.962.860	-6.283.768	-4.277.876

8.2.4 Ergebnisse und Fazit zum Fallbeispiel

Aus den ermittelten Ergebnisgrößen für das Fallbeispiel lassen sich im nächsten Schritt die Zielgrößen des Zielsystems genauer analysieren. Tabelle 8-8 zeigt dafür die Bewertung für die relevanten Zielgrößen. Das Ergebnis mit dem besten Zielwert ist dabei mit drei bewertet und der schlechteste mit einer eins.

Tabelle 8-8: Entscheidungsmatrix im Zielsystem für Fallbeispiel

Zielgröße im Zielsystem		Gewichtung	PbB	LIB	BzS
$t_{Ausfall,FFZ,ges}$	Ausfallzeiten FFZ	25,00 %	2	1	3
$K_{Entsteh}$	Kosten Entstehungsphase	21,43 %	3	1	2
$K_{Betrieb,Jahr}$	Kosten Betriebsphase	17,86 %	2	1	3
$E_{Stromnetz}$	Energiebedarf Stromnetz in Betriebsphase	14,29 %	1	2	3
n_{MA}	Anzahl Mitarbeiter	10,71 %	2	1	3
$n_{FFZ,Soll}$	Anzahl Soll-Fahrzeuge	7,14 %	2	1	3
$t_{Nutzungsdauer,ESS}$	Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil	3,57 %	1	2	3
Gewichteter Ergebniswert		100 %	2,04	1,18	2,79

Anhand des gewichteten Zielsystems für den Anwendungsfall fällt mit einem Ergebniswert von 2,79 die Entscheidung auf den Einsatz von BzS und den Aufbau der dafür erforderlichen Infrastruktur.

Die Ergänzung der drei Planungsalternativen um die automatisierte Variante der drei Technologien und damit die Erweiterung der Skala für die Ergebnismatrix im gewichteten Zielsystem um die Zahlen vier bis sechs hat für den Anwendungsfall und die gewählte Gewichtung die in Tabelle 8-9 gelisteten Ergebnisse. Auch bei der Erweiterung würde die Wahl auf die fahrergeführten FFZ mit BzS fallen, dicht gefolgt von den automatisierten FFZ mit BzS. Da die Werte in diesem Falle nah beieinander liegen empfiehlt es sich, sich die genauen Ergebnisse und absoluten Werte der beiden Varianten zu analysieren. Dabei wäre aufgrund der starken Einsparungspotenziale hinsichtlich der Personalkosten eine Automatisierung empfehlenswert.

Tabelle 8-9: Entscheidungsmatrix im Zielsystem für Fallbeispiel mit FTF-Einsatz

Zielgröße im Zielsystem	PbB-1 keine FTF	LIB-1 keine FTF	BzS-1 keine FTF	PbB-2 FTF	LIB -2 FTF	BzS-2 FTF
Ausfallzeiten FFZ	4	2	6	3	1	5
Kosten Entstehungsphase	6	4	5	3	1	2
Kosten Betriebsphase	2	1	3	4	5	6
Energiebedarf Stromnetz in Betriebsphase	3	4	6	1	2	5
Anzahl Mitarbeiter	2	1	3	4	5	6
Anzahl Soll-Fahrzeuge	4	2	6	3	1	6
Nutzungsdauer ESS mit Lastprofil	1	3	5	2	4	6
Gewichteter Ergebniswert	3,61	2,46	4,89	2,96	2,39	4,75

Das Beispiel zeigt, dass die Wahl der richtigen Kriterien und deren Gewichtung für das Zielsystem bedeutend ist. Die Aussage der Entscheidungsmatrix sollte somit immer im Zusammenhang mit den transparent dokumentierten Berechnungen und deren Ergebnissen betrachtet werden. Nur so kann für den Anwendungsfall die am besten geeignete Alternative identifiziert werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen liefert das multikriterielle Vorgehensmodell weitere Ansatzpunkte für die weitere Ausplanung, mögliche strategische Entscheidungen und für die Auseinandersetzung mit den Ergebnissen zur Entscheidungsfindung. Neben einer Automatisierung gibt es bspw. weitere strategische Maßnahmen zur Reduktion der Personalkosten, wie die Beauftragung eines Logistikdienstleisters.

Mithilfe des Fallbeispiels konnte außerdem dargestellt werden, dass das Modell als Software-Tool implementierbar sowie für den spezifischen Anwendungsfall unter Be-

reitstellung der erforderlichen Eingangsdaten anwendbar ist. Die resultierenden Ergebnisse erweisen sich als hilfreich für die Entscheidungsfindung und stellen somit, auch durch das schrittweise, transparente Vorgehen, eine Vereinfachung dar. Der Planer hat durch das Vorgehensmodell die Möglichkeit seinen Wissensstand zu erweitern, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können.

In Realität stellt sich ein Planungsfall komplexer dar als dieses Fallbeispiel. Die getroffenen Annahmen im modellierten Ausgangsszenario dienen der Vereinfachung und der Evaluierung des Modells, bilden allerdings nicht alle Eigenheiten der Realität ab. Preisentwicklungen, Berücksichtigung von Umweltzuständen und deren Auswirkungen wurden ebenso wie die Technologiereifegrade ausgeklammert. Für die Anwendung auf einen tatsächlichen Planungsfall ist es umso wichtiger, der Datenbeschaffung und -aufnahme besondere Aufmerksamkeit zu widmen, ebenso wie der Festlegung des Zielsystems. Für unsichere Werte sollte eine ergänzende Sensitivitätsanalyse oder alternativ eine Variation der Parameter durchgeführt werden.

8.3 Überprüfung der Anforderungserfüllung

Die durchgeführte Szenarioanalyse lieferte bereits wichtige Erkenntnisse zur Anwendbarkeit und Nutzbarkeit des Modells. Für die weitere Bewertung des Nutzens des entwickelten, multikriteriellen Vorgehensmodells dient die Überprüfung der Erfüllung der Anforderungen aus Abschnitt 5.1. Die Herleitung der Anforderungen resultierte einerseits aus dem in den technischen Grundlagen wie auch dem Stand der Wissenschaft und Technik ermittelten Handlungsbedarf und andererseits aus Expertengesprächen im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Projektes ‚FFZ70‘. Daraus ergaben sich sieben Anforderungen an ein Modell, deren Erfüllungsgrad nun erläutert wird.

Anforderung 1: Multikriterieller Aufbau des Modells

Durch das Fehlen multikriterieller Ansätze für die Auswahl des ESS war eine der wesentlichen Anforderungen die Abbildung der verschiedenen Kriterien in einem Gesamtmodell. Die zusammenhängende Gestaltung des Modells sollte mit detaillierten Analysen und Bewertungen des individuellen Anwendungsfalls eine Grundlage für das Treffen einer fundierten Entscheidung für das am besten geeignete ESS liefern. Die Umsetzung als Gesamtkonzept unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussgrößen, die in das analytische Modell aus energetischer, prozessualer und monetärer Bewertung einfließen, wurde in Kapitel 7 ausführlich erläutert. Die vorausgehende detaillierte Systemanalyse zur Ermittlung der relevanten Parameter sorgt weiter für eine umfassende, multikriterielle Betrachtung des Entscheidungsproblems, für welches das Modell entwickelt wurde. Der Aufbau des Vorgehensmodells als multikriterielles Modell erfüllt diese Anforderung.

Anforderung 2: Anwendbarkeit in der Planungsphase

Insbesondere in der frühen Planungsphase besteht bisher kein Modell, das einen umfassenden Vergleich der drei ESS erlaubt. Die Gestaltung des Modells zielt auf eine Anwendung in einer solchen frühen Phase ab. Dies spielt insbesondere bei den Eingangsdaten eine Rolle. Die in Abschnitt 7.2 identifizierten Einflussgrößen bestehen einerseits aus projektbezogenen Daten und andererseits aus projektübergreifenden technischen Daten, deren Ausprägung wiederum durch die projektbezogenen Daten beeinflusst ist. Für die Anwendung des Modells wurde im Zuge der Erarbeitung berücksichtigt, dass im Gegensatz zu bestehenden Bewertungen, lediglich Planungsdaten in das Modell einfließen. Grundsätzliche betriebliche sowie prozessuale Rahmenbedingungen wie auch interne Festlegungen, z. B. zu Kostensätzen, sind ebenfalls für die Bewertung erforderlich. Die Herleitung der weiteren Daten basiert nicht auf Messwerten, sondern analytischen Berechnungen oder Annäherungen oder den technischen Daten der Hersteller der verschiedenen Systembestandteile. Somit ist die Anwendbarkeit in der Planungsphase sichergestellt und diese Anforderung erfüllt.

Anforderung 3: Transparenz über Kennzahlen und Informationsbeschaffung

Die Ausführungen zu den Systemanalysen wie auch der formalen Beschreibung der drei Bewertungsmodule mit allen relevanten Kennzahlen in Kapitel 6 sowie die Erläuterungen zum zusammenhängenden Modell in Kapitel 7 zeigen transparent das Vorgehen des entwickelten Modells auf. Die Darstellung der Eingangsgrößen, der Vorgehensschritte wie der Wirkzusammenhänge im multikriteriellen Modell ermöglicht es dem Planer transparent die Daten zu erfassen, mithilfe des analytischen Modells zu bewerten und damit objektiv die Planungsalternativen zu vergleichen, wobei für die Technologien eine einheitliche Datenbasis erarbeitet wird. Die Alternativen werden anhand der gleichen, als relevant identifizierten Kriterien miteinander verglichen. Die Wege für die Datenbeschaffung, insbesondere hinsichtlich der Eingangsgrößen, für den objektiven Vergleich innerhalb der Modellbestandteile wurde im Zuge der Erarbeitung des Modells aufgezeigt. Durch das Modell erlangt der Planer mithilfe der Datenerhebung zusätzliche Transparenz bspw. über seine Prozesse sowie den Energiekonsum. Für den Planer besteht hiermit eine Transparenz über die Kennzahlen wie auch die Informationsbeschaffung in seinem individuellen Anwendungsfall, womit die dritte Anforderung erfüllt ist.

Anforderung 4: Allgemeingültigkeit und Anwendbarkeit für spezifischen Anwendungsfall

Der Aufbau der Modellbestandteile in Kapitel 6 erfolgten unabhängig vom individuellen Anwendungsfall. Die vorausgehende Systemanalyse sowie die Identifikation der relevanten Parameter half ein allgemeingültiges Vorgehen für die Bewertung innerhalb der drei Module zu erarbeiten. Der in Abschnitt 7.1 erläuterte Aufbau des Modells zeigt, dass die projektbezogenen Eingangsgrößen einen eigenen Baustein darstellen. Diese fließen nach vollständiger Erfassung in das analytische Modell ein. Die resultierenden Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen beziehen sich somit auf den individuellen Anwendungsfall. Damit dient das Modell dem Planer als neutral gestaltetes Werkzeug, das objektiv und systematisch die verschiedenen ESS miteinander vergleicht und die geeignete Lösung für den Anwendungsfall anhand der Unternehmensanforderungen identifiziert. Hiermit ist die Anforderung zur Allgemeingültigkeit im Rahmen des Betrachtungsraums und zur Anwendbarkeit für den individuellen Anwendungsfall ebenfalls erfüllt.

Anforderung 5: Abbildbarkeit der Energiespeichersysteme mit Infrastruktur

Das multikriterielle Vorgehensmodell berücksichtigt den Vergleich von PbB, LIB und BzS. Hierfür wurden die Unterschiede der drei Technologien detailliert analysiert und in der formalisierten Darstellung berücksichtigt. Die größten Unterschiede liegen im Prozess der Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit durch das Laden oder Wechseln von Batterien oder das Betanken mit Wasserstoff. Einen wesentlichen Bestandteil in

der Gestaltung des Prozesses stellt die jeweilige Infrastruktur und deren Dimensionierung dar, weshalb diese ebenfalls umfassend im Modell berücksichtigt wird. Das entwickelte Modell fokussiert daher nicht nur die ESS selbst, sondern ebenfalls die verwendeten FFZ und die zugehörige Infrastruktur mit den geplanten Prozessen und erfüllt damit die gestellte Anforderung.

Anforderung 6: Berücksichtigung prozessualer, energetischer und monetärer Zielgrößen

Das Modell gliedert sich in drei wesentliche Bausteine: die energetische, die prozessuale und die monetäre Bewertung. Jedes der Module dient der Ermittlung mehrerer Zielgrößen, die in das unternehmensindividuelle Zielsystem einfließen können. Durch die umfassende Betrachtung fließen nicht nur finanzielle Größen in den Vergleich und die Bewertung ein, sondern ebenfalls die unterschiedlichen Einflüsse des Technologieeinsatzes auf den Prozess und Energiebedarf der FFZ. Der Prozess zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit – und dessen Auswirkungen auf die Dimensionierung der Infrastruktur, den Nutzungsgrad der FFZ und damit auf Flottengröße und Mitarbeiterbedarf – spielt hierbei eine zentrale Rolle. Unter anderem hieraus ergibt sich für die Technologien ebenfalls ein unterschiedlicher Gesamtenergiebedarf in der Betriebsphase für das gesamte System, bestehend aus FFZ, ESS und Infrastruktur. Neben möglichen Emissionen hat dieser Bedarf in der Nutzungsphase gleichermaßen Einfluss auf die entstehenden Verbrauchskosten, sowohl für Strom als auch für den zu beziehenden Wasserstoff. Die drei Bausteine des Modells ergeben über die verschiedenen Wirkzusammenhänge und Verknüpfungen ein zusammenhängendes Gesamtmodell, in dem alle gewonnenen Erkenntnisse in die weiteren Betrachtungen einfließen. Die Ergebnisse aus energetischer und prozessualer Bewertung ermöglichen eine weitgreifende monetäre Bewertung der Technologien über den Lebenszyklus. Der Planer erhält dadurch eine Transparenz über die Investitionssumme in der Entstehungsphase ebenso wie die Betriebskosten in der Nutzungsphase und die Entsorgungskosten in der Verwertungsphase. Die in Unterabschnitt 7.5.3 dargestellten Auswirkungen strategischer Entscheidungen helfen zudem Reduktionspotenziale bereits in der Planungsphase berücksichtigen zu können. Die Anforderung an die Vielseitigkeit der Zielgrößen und deren Berücksichtigung im Modell ist damit erfüllt.

Anforderung 7: Lösungsansatz für den Umgang mit mehreren Zielgrößen

Aus den drei Modellbestandteilen für die Bewertung resultieren verschiedene Ergebnisgrößen, die eine Entscheidung für eines der drei ESS beeinflussen können. Um diese treffen zu können, sind die Ergebnisgrößen des multikriteriellen Vorgehensmodells einander gegenüberzustellen und zu priorisieren. Die Ergebnisgrößen selbst stehen sich in neutralen oder komplementären Zielbeziehungen gegenüber, womit kein

Zielkonflikt besteht. Dadurch können diese als gewichtete Zielgrößen in das unternehmensindividuelle Zielsystem einfließen. Abschnitt 7.4 beschreibt diese Herausforderung und den Umgang mit den vielfältigen Größen für die Festlegung des eigenen, der Entscheidung zugrundeliegenden und ebenfalls multikriteriellen Zielsystems. Mit diesem Lösungsansatz erhält der Planer eine Unterstützung, um für den eigenen Planungsfall und die Unternehmensanforderungen die am besten geeignete Lösung zu identifizieren und erhält weitere Ansatzpunkte für strategische Entscheidungen und die konkrete Ausplanung sowie eine transparente Dokumentation für die Aufbereitung einer Vorlage für den Entscheider.

8.4 Diskussion und Beantwortung der Forschungsfragen

Der erfolgte Abgleich mit den gestellten Anforderungen zeigt die Erfüllung dieser durch das entwickelte multikriterielle Vorgehensmodell. Mithilfe des Modells hat der Planer ein Werkzeug zur Hand, das ihm bei der Entscheidung für ein ESS für eine FFZ-Flotte erlaubt, eine umfassende und transparente Bewertung mit Vergleich durchzuführen, die neben monetären ebenfalls prozessuale und energetische Berechnungen einbezieht. Darüber hinaus machte die fallstudienbasierte Evaluation deutlich, dass das Vorgehensmodell für den Planungsfall anwendbar ist und dem Planer einen Nutzen als Entscheidungsunterstützung liefern kann. Mithilfe des Modells erhält er Transparenz für die Entscheidung für eine der Planungsalternativen. Er kann mit den Erkenntnissen aus dem Modell den Planungsfall weiter konkretisieren und hat Ansatzpunkte für strategische Maßnahmen sowie fundierte Inhalte für die Aufbereitung einer Vorlage für den Entscheidungsträger. Der Planer kann sich detailliert mit den Ergebnissen für die Entscheidungsfindung auseinandersetzen. Das Vorgehensmodell kann somit für die Bewertung im individuellen Anwendungsfall verwendet werden und liefert für das Entscheidungsproblem als unterstützendes Verfahren einen Mehrwert hin zur Identifikation des geeigneten ESS.

Das Modell weist darüber hinaus Grenzen auf, die im Fortlauf der Arbeit und bei Durchführung der Evaluation sichtbar wurden. Im Untersuchungsraum erfolgte eine Eingrenzung auf elektromotorisch-betriebene FFZ, für FFZ mit VM und deren technische Eigenschaften müsste das Modell erweitert werden. Beim Modellierungsansatz handelt es sich um ein statisches Modell, das den Zeitablauf nicht berücksichtigt. Die ermittelten Werte stellen somit stets Mittelwerte von Systemkennzahlen dar. Bspw. können weder schwankende Transportbedarfe noch saisonale Auftragsschwankungen einbezogen werden. Ebenso werden für die Energiebedarfe oder die Prozesszeiten lediglich Mittelwerte herangezogen. Eine weitere Grenze stellt die Fokussierung auf große Unternehmen mit hinreichend großen Flotten dar, wie bspw. die Produktionsversorgung in der Automobilindustrie. Dort ist, bedingt durch die hohe Anzahl an FFZ, die Wahrscheinlichkeit der wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeit aller drei ESS am höchsten. Für kleinere Unternehmen können die Prozess- und Kostenstrukturen von den Darstellungen abweichen. Die Ergebnisse nutzen dem Planer daher als Orientierungswerte zur Abschätzung des Planungsfalls und als Entscheidungsunterstützung, nicht aber der exakten Berechnung. Die Erkenntnisse aus dem multikriteriellen Modell erhält der Planer dafür mit vergleichsweise einfachen und schnell durchführbaren Bewertungen in der Planungsphase. Darüber hinaus wurden in der Modellbildung verschiedene Abstrahierungen durchgeführt, wodurch Unsicherheiten entstehen können. Diesen sollte durch zusätzliche Analysen und Betrachtungen, wie Sensitivitätsanalysen, entgegen gewirkt werden. Zudem wurden im Modell nur messbare und quantifizierbare Größen

berücksichtigt, Anforderungen hinsichtlich Außenwirkung, der Sicherheit der Technologien, zu Notfallkonzepten oder Offenheit gegenüber neuer Entwicklungen sind nicht eingeflossen. Auch Umweltzustände und deren Auswirkungen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden für die Modellerstellung nicht berücksichtigt. Die Evaluation erfolgte aufgrund der frühen Marktphase von BzS und fehlenden validen Daten aus der Praxis in einem modellierten Umfeld, eine detaillierte Anwendung der Methode am realen Planungsfall stellt damit einen wichtigen Schritt für die weitere Ausarbeitung und Prüfung des Modells dar. Hierzu zählt ebenfalls die Umsetzung des Modells in einem für den Planer verfügbaren, anwenderfreundlichen Tool. Diese Verbesserungspotenziale stellen Ansatzpunkte für weitere, praxisnahe Forschung dar.

Die Erkenntnisse in der voranstehenden Evaluierung ermöglichen an dieser Stelle zudem die vollständige Beantwortung der aufgestellten Forschungsfragen.

Die Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage *„Wie ist ein multikriterielles Modell mit mehreren Bewertungsbestandteilen aufzubauen und welche Aspekte sowie Parameter müssen berücksichtigt werden, damit die Unterschiede der Technologien hinreichend abgebildet werden?“* erfolgte in Kapitel 6, welches sich umfassend den drei Modellbestandteilen widmete. Darin wurde detailliert die energetische, prozessuale und monetäre Bewertung beleuchtet. Nach der ausführlichen Systemanalyse zu den jeweiligen Unterschieden und möglichen Bewertungsmethoden konnten die relevanten Aspekte für die drei Bausteine identifiziert werden. In der formalen Darstellung dieser Einzelaspekte wurden verschiedene Parameter identifiziert, die in das analytische Modell einfließen. Neben den Eingangsgrößen, die als Inputdaten in das jeweilige Modul einfließen und in Abschnitt 7.2 erläutert sind, wurden ebenfalls die Wirkzusammenhänge und Ergebnisgrößen aufgezeigt. Die Unterschiede der Technologien kommen vorrangig aus dem Prozess der Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit, weshalb die Infrastruktur ebenfalls im Modell berücksichtigt wurde. Über die Wechselwirkungen zwischen den drei Modulen, also dadurch, dass Ergebnisgrößen des einen Moduls Eingangsgrößen des anderen Moduls darstellen, werden die Unterschiede der Technologien in allen Modulen abgebildet.

Die drei Module zur Bewertung stellen eigenständig kein Vorgehensmodell dar. Umso wichtiger war die Überführung in ein zusammenhängendes Gesamtmodell, was in Kapitel 7 erfolgte. Dabei wurden ebenfalls Wirkzusammenhänge bzw. Wechselwirkungen zwischen den Modulen umgesetzt und beschrieben. Neben der Identifikation der zu ermittelnden Eingangsdaten für die drei Module hilft eine Konkretisierung der Vorgehensschritte im Modell bei der korrekten Anwendung des Modells sowie der Bewertung der Planungsalternativen hinsichtlich Energie, Prozess und Kosten, womit auch die

zweite Teilforschungsfrage „*Wie können die Planungsalternativen hinsichtlich energetischer, monetärer und prozessualer Ergebnisgrößen analytisch bewertet werden und wie kann ein Gesamtkonzept unter Einbeziehung der identifizierten Parameter und der Wirkzusammenhänge aussehen?*“ beantwortet wurde. Eine Implementierung der Modellbestandteile in einem Softwarewerkzeug vereinfacht die Anwendung des Modells innerhalb einer Szenarioanalyse zudem. Über die identifizierten Zielgrößen und deren Einbindung in ein gewichtetes Zielsystem können die Alternativen miteinander verglichen und das für den Anwendungsfall am besten geeignete ESS ermittelt werden.

Dies greift ebenfalls der Beantwortung der dritten Teilforschungsfrage „*Wie kann das Vorgehensmodell in der Planungsphase bei der Entscheidungsfindung im individuellen Anwendungsfall unterstützen – unter Berücksichtigung der besonderen Unternehmensanforderungen?*“ vor. Das multikriterielle Modell wurde als neutrales Werkzeug so konzipiert, dass es allgemeingültig ist und für den spezifischen Anwendungsfall eingesetzt werden kann. Dafür fließen die spezifischen, quantitativen Parameter des konkreten Planungsprojektes – nach der gewissenhaften Ermittlung und Erhebung – als Eingangsgrößen in das Modell ein. Dabei handelt es sich um projektbezogene Daten, wie betriebliche Rahmenbedingungen, sowie um projektübergreifende technische Daten zu FFZ, ESS und Infrastruktur. Darüber hinaus werden die Unternehmensanforderungen im Zielsystem berücksichtigt. Die Arbeit liefert einen Überblick über mögliche Zielgrößen im individuellen Zielsystem sowie die Zielbeziehungen. Die Auswahl der präferierten Kriterien ebenso wie deren Gewichtung erfolgt für den Anwendungsfall. Ein übergeordnetes Optimierungsziel stellt bei den meisten Unternehmen die Wirtschaftlichkeit der Technologie dar, allerdings sollten für die multikriterielle Bewertung ebenfalls prozessuale und energetische Zielgrößen bei der Entscheidung betrachtet werden. Je nach Einsatzszenario, wie bei einer hohen geforderten Verfügbarkeit der FFZ, können prozessuale Zielgrößen im Vordergrund stehen. Die unternehmensindividuelle Berücksichtigung mehrerer Zielgrößen und deren Gewichtung ist im Zielsystem vorgesehen. Damit hilft das multikriterielle Vorgehensmodell auch im spezifischen Anwendungsfall beim Vergleich und der Bewertung der einsetzbaren ESS.

Die Antworten der Teilforschungsfragen und die Ausführungen zur Gestaltung des konzipierten Vorgehensmodells für die Bewertung und die Gegenüberstellung der ESS für FFZ für den spezifischen Anwendungsfall beantworten die übergeordnete leitende Forschungsfrage „*Wie gestaltet sich ein allgemeingültiges, multikriterielles Vorgehensmodell zum Vergleich und zur systematischen Bewertung des Einsatzes der verfügbaren Energiespeichersysteme in FFZ-Flotten für den spezifischen Anwendungsfall?*“.

Die Ausführungen zeigen, dass die gestellte Zielsetzung erreicht und die identifizierte Forschungslücke geschlossen werden konnte.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Der Klimawandel, politische Forderungen zur Erreichung der Klimaschutzziele ebenso wie steigende Energie- und Rohstoffpreise fordern von Unternehmen den Umstieg auf nachhaltige, erneuerbare Energiequellen. Für die Mobilität steht dies für eine Umstellung auf elektromotorisch-betriebene Fahrzeuge; bei FFZ im innerbetrieblichen Transport stellen diese schon seit Jahrzehnten den Großteil der betriebenen Fahrzeuge dar. Als ESS für elektromotorische FFZ existieren neben konventionellen PbB ebenfalls LIB und BzS. Innerhalb dieses Portfolios an verfügbaren ESS stehen Flottenbetreiber und Logistikplaner vor der Entscheidung für das richtige System für ihren individuellen Anwendungsfall. Insbesondere beim Einsatz der BzS bestehen Hemmnisse. Die Auswahl des richtigen ESS für FFZ gewinnt durch die eingangs genannten Nachhaltigkeitsziele zunehmend an Bedeutung.

Die Analyse des Stands der Wissenschaft und Technik unter Berücksichtigung der industriellen Praxis zeigte, dass die Entscheidungsfindung aktuell weitreichende Erfahrung voraussetzt und keine umfassende Bewertungsmethode existiert. Planer können sich mithilfe der verfügbaren Informationen einen Überblick zu den Technologien verschaffen und deren grundsätzliche Eignung überdenken. Für eine fundierte Entscheidung fehlen allgemeingültige Methoden und Vorgehensschritte zur Bewertung des Einsatzes der drei ESS in der Planungsphase der Flotte unter Berücksichtigung energetischer, prozessualer und monetärer Aspekte. Die daraus abgeleitete Zielsetzung dieser Dissertation war somit die methodische Aufarbeitung und Entwicklung eines multikriteriellen Vorgehensmodells zum Vergleich und zur Bewertung des Einsatzes der ESS in FFZ-Flotten für den individuellen Anwendungsfall. Damit soll dieses Modell sowohl Forschern als auch Planern, auf Anwender- wie Herstellerseite, als neutrales Werkzeug für die Identifikation der am geeigneten Lösung dienen.

Ausgehend von der identifizierten Forschungslücke erfolgte die Ermittlung der Anforderungen zur Konkretisierung der Aufgaben und Ziele des Modells. Die sieben abgeleiteten Anforderungen forderten einen multikriteriellen Aufbau, die Anwendbarkeit in der Planungsphase, Transparenz über Kennzahlen und Informationsbeschaffung, Allgemeingültigkeit und Anwendbarkeit für den spezifischen Anwendungsfall, eine Abbildbarkeit der drei ESS mit der jeweiligen Infrastruktur, die Berücksichtigung prozessualer, energetischer und monetärer Zielgrößen sowie einen Lösungsansatz für den Umgang mit mehreren zu optimierenden Zielgrößen. Für den Untersuchungsraum

ergab sich damit die folgende Spezifizierung. Die Anwendung des Modells erfolgt in der Planungsphase, genauer die Systemplanung, nachdem die Zusammensetzung der Flotte durch zuvor definierte Arbeitsaufgaben festgelegt wurde. Es dient der Systembewertung, dem -vergleich und als Entscheidungsunterstützung. Das Modell bewertet, welche Technologie bei einer Neuplanung – ohne existierende Flotte – die am besten geeignete ist. Das Modell beschränkt sich auf messbare, quantifizierbare Größen. Die Prozessunterschiede stellen einen wesentlichen Anteil dar. CO₂-Emissionen werden wegen der Vielzahl möglicher Energiepfade, die starken Einfluss auf die Emissionen haben, nicht über das Modell berechnet. Die Erkenntnisse aus energetischer und prozessualer Bewertung sollen in einen Vergleich der Lebenszykluskosten einfließen. Das Modell sollte zur Erfüllung des geforderten Zwecks als analytisches Modell umgesetzt werden. Bei den Berechnungsmethoden wurden daher soweit nötig abstrahiert, sodass die Werte einheitlich analytisch ermittelt werden können.

Die gestellten Anforderungen flossen in die Konzeptionierung des Modells ein. Es wurden die Elemente, Parameter und Wirkzusammenhänge für die drei Modellbestandteile als analytische Berechnungsverfahren dargestellt und die relevanten Aspekte für die transparente Bewertung von Energie, Prozess und Kosten identifiziert. Mit der formalen Darstellung dieser Einzelaspekte wurde eine wesentliche Voraussetzung für die Bewertung von Prozesszeiten, Energiebedarf und Wirtschaftlichkeit geschaffen. Die Zusammenführung der drei Module in das Gesamtmodell und deren Einordnung im übergeordneten Kontext konnte daran anschließen. Neben den verknüpften Modulen stellen einen weiteren Bestandteil des Modells die Einflussgrößen dar, die als Eingangsdaten in das Vorgehensmodell einfließen. Darunter fallen die projektspezifischen Daten ebenso wie die technischen Daten zu den eingesetzten Systemkomponenten FFZ, ESS und Infrastruktur. Die Ermittlung und Erhebung der erforderlichen Eingangsdaten für die drei Bewertungsmodule hat großen Einfluss auf die Ergebnisgrößen, weshalb auf diesen Schritt der Fokus gelegt werden sollte. Wenn eine valide Datenbasis besteht, können diese, den Vorgehenschritten folgend, in die Bewertung im zusammenhängenden analytischen Modell einfließen. In der energetischen Bewertung resultieren für die drei ESS die Ergebnisgrößen Lastkoeffizient, Energiebedarf der gesamten FFZ-Flotte, Energiebedarf aus dem Stromnetz, Peak-Leistung der Infrastruktur sowie der Wasserstoffbedarf der Flotte. Die Ergebnisgrößen zu den Berechnungen in der prozessualen Bewertung resultieren in den unterschiedlichen Ausfallzeiten, Nutzungsgrad und Nutzungszeit der FFZ, der Auslegung der Infrastruktur, der erforderlichen Flottengröße zur Leistungserfüllung und dem dafür notwendigen Personaleinsatz für FFZ-Fahrer und Bediener der Infrastruktur. Die beiden Module sind eng miteinander verknüpft und sollten daher parallel bewertet werden. Die zuvor ermittelten Ergebnisse zu energetischen und prozessualen Parametern fließen dann in die mone-

täre Bewertung, die das Kernstück des Modells bildet. Die Ergebnisse der Kostenbetrachtung sind die Gesamtkosten in den drei Lebenszyklusphasen Entstehung, Betrieb und Verwertung sowie der Kapitalwert der jeweiligen Investition für die drei Planungsalternativen. Den letzten Bestandteil des Modells bildet das gewichtete, unternehmensindividuelle Zielsystem, das in einer Entscheidungsmatrix resultiert. Für die Festlegung des Zielsystems sind im Unternehmen die möglichen Ergebnis- respektive Zielgrößen der Module mithilfe einer Nutzenbestimmung zu priorisieren und anschließend zu gewichten. Nur mit einem präzisen Zielsystem, das die unternehmerischen Anforderungen und Präferenzen abbildet, kann eine valide Entscheidung getroffen werden. Aus der Ergebnismatrix lässt sich das für den spezifischen Anwendungsfall am besten geeignete ESS ablesen.

In der Evaluation des entwickelten Modells erfolgte eine Szenarioanalyse sowie der Abgleich mit den gestellten Anforderungen. In der Szenarioanalyse wurde das Modell mithilfe eines modellierten Fallbeispiels getestet, was die Anwendbarkeit und Nutzbarkeit bewies. Die Bestandteile wurden dabei verifiziert und validiert. Durch die Prüfung der Anforderungserfüllung konnte darüber hinaus der Mehrwert des Konzeptes aufgezeigt werden. Das Vorgehensmodell kann sowohl Forschern als auch Planern von FFZ-Flotten als neutrales Werkzeug in der Entscheidungsfindung für ein ESS dienen, das für den individuellen Anwendungsfall und anhand der Unternehmensanforderungen die am besten geeignete Lösung identifiziert. Der Planer kann sich detailliert mit den Ergebnissen auseinandersetzen und damit den Planungsfall weiter konkretisieren. Die Auswertung liefert zudem weitere Ansatzpunkte für strategische Maßnahmen sowie fundierte Inhalte zur Aufbereitung einer Vorlage für den Entscheidungsträger. Das Modell liefert dem Planer also eine Unterstützung für das Entscheidungsproblem und somit einen Mehrwert hin zur Identifikation der am besten geeigneten technologischen Lösung.

9.2 Ausblick

Neben den genannten Vorteilen des Modells weist dieses ebenfalls Grenzen und damit Optimierungspotenziale auf, die wiederum Ansatzpunkte für weitere, praxisnahe Forschung darstellen.

Das entwickelte Modell beschränkt sich auf die drei ESS für elektromotorische Antriebe. Denkbar wäre ebenfalls eine Ausweitung des Modells auf alle existierenden Antriebsarten für FFZ, also auf verbrennungsmotorisch angetriebene FFZ mit Diesel und Gas (LPG, CNG) ebenso wie Hybride.

Die Umsetzung als statisches, analytisches Modell ohne Berücksichtigung des Zeitablaufs lässt lediglich Mittelwerte in die Bewertungen einfließen, womit die Ergebnisse dem Planer als Orientierungswerte zur Abschätzung des Planungsfalls dienen sowie als Entscheidungsunterstützung, nicht aber für exakte Berechnungen zur weiteren Ausplanung. Für die Feinplanung der ausgewählten Planungsalternative könnte ein Simulationsmodell der einzelnen Teilaspekte dabei helfen, bspw. die Anzahl der FFZ oder die Auslegung der Infrastruktur genau festzulegen. Prozesse, wie die zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit, mit Realdaten aus Messungen und zugeordneten Verteilungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten könnten dynamisch simuliert werden, um so die ermittelten analytischen Werte zu verifizieren.

Eine weitere Grenze stellt die Einschränkung auf messbare und quantifizierbare Größen dar, wodurch manche Anforderungen der Stakeholder, wie Umweltzustände mit Auswirkungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten, Sicherheit der Technologien, oder Bereitschaft des Unternehmens gegenüber neuer Technologien nicht eingeflossen sind. Eine Erweiterung des Modells könnte daher die Erweiterung des Parameter-raums über die Berücksichtigung qualitativer Kriterien sein.

Der zunehmende politische und unternehmerische Fokus auf Nachhaltigkeit könnte darüber hinaus ein Anlass sein, das Modell über die Energiepfade um die Ermittlung der CO₂-Emissionen für den spezifischen Anwendungsfall zu erweitern.

Durch die klimapolitischen Ziele rückt auch in anderen Mobilitätsanwendungen die Elektromobilität weiter in den Fokus. Grundsätzlich könnte die Entwicklung eines multikriteriellen Vorgehensmodells ebenfalls für andere Branchen eine interessante Hilfestellung bei der Entscheidung für eine Technologie sein, bspw. für LKW-Flottenbetreiber in der Transportlogistik oder für Unternehmen in der Personenbeförderung im Nah- und Fernverkehr.

Literaturverzeichnis

- [Ada-1992] Adam, D.: Planung und Entscheidung – Modelle - Ziele - Methoden. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1992.
- [Adl-2019] Adler, B.: Moderne Energiesysteme – ein Beitrag zur Energiewende. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Ado-2017] Adolf, J.; Balzer, C. H.; Louis Jurgens; Schabla, U.; Fishedick, M.; Arnold, K.; Pastowski, A.; Schüwer, D.: Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft? – Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂, 2017.
- [Ado-2023] Adomat, M.: Energieeffizienter bewegen – Wie Elektrostapler die CO₂-Bilanz verbessern können. <https://blog.toyota-forklifts.de/energieeffizienter-bewegen-wie-elektrostapler-die-co2-bilanz-verbessern-k%C3%B6nnen>, Aufruf am 19.03.2023.
- [Afs-2020] Afshar, S.; Frank, F.: Batterie versus Brennstoffzelle - Antriebstechnik im Vergleich. In: ATZextra, Jg. 25 (2020), S. 32–37.
- [AGE-2021] AGEB AG Energiebilanzen e.V.: Energieflussbild 2020 für die Bundesrepublik Deutschland. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/09/ageb_energieflussbild-kurz_de-2020-pj_20210923.pdf, Aufruf am 22.04.2022.
- [Air-2016] Air Liquide Advanced Technologies GmbH: Wasserstoff für Material Handling. https://industrie.airliquide.at/sites/industry_at/files/2016/06/09/wasserstoff_fuer_material_handling.pdf, Aufruf am 02.04.2022.
- [All-2021] Allianz pro Schiene e. V.: Deutschland fällt bei E-Mobilität auf Gleisen zurück. <https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/deutschland-faellt-bei-e-mobilitaet-auf-gleisen-zurueck/>, Aufruf am 29.12.2023.
- [Alt-2014] Altmann, M.; Bünger, U.; Landinger, H.; Pschorr-Schoberer, E.; Raksha, T.; Wurster, R.; Zerta, M.: Die Rolle von Wasserstoff in der Energiewende. e-mobil BW GmbH; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2014.
- [Arn-2008] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.: Handbuch Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Bam-2019] Bamberg, G.; Coenenberg, A. G.; Krapp, M.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. Verlag Franz Vahlen GmbH, 2019.
- [Bat-2022] Batisweiler, C.: „Wir bewegen die Welt“. In: Börse Online (2022) Nr. 10, S. 24–25.
- [BDEW-2014] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Definition des Begriffes "Energiespeicher" – Begriffsdefinition und Vorschlag für eine Befreiung von Letztverbraucherabgaben, 2014.

- [Ber-2015a] Berufsgenossenschaft Bau (BG Bau): Abgas: Risiken in geschlossenen Räumen. <https://www.arbeitssicherheit.de/themen/arbeitssicherheit/detail/abgas-risiken-in-geschlossenen-raeumen.html>, Aufruf am 02.03.2022.
- [Ber-2015b] Bergholz, T.: Lithiumbatterien für stationäre und mobile Anwendungen: Benchmarking und experimentelle Umsetzung, Jülich, 2015.
- [BGHM-2018] BGHM Berufsgenossenschaft Holz und Metall: DGUV Information 208-004 – Gabelstapler, Aufruf am
- [Ble-2009] Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. Springer, Dordrecht, Heidelberg, 2009.
- [Blu-2020] Blum, U.; Rosenthal, E.; Diekmann, B.: Energie – Grundlagen für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Machbarkeiten, Grenzen und Umweltauswirkungen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020.
- [BMDV-2020] BMDV Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Elektromobilität mit Wasserstoff / Brennstoffzelle – Aktuelle Informationen zu Förderaufrufen. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/elektromobilitaet-mit-wasserstoff.html>, Aufruf am 02.03.2022.
- [BMW-2018] BMW Group: BMW nimmt in Leipzig 70 Wasserstoff-Routenzüge in Betrieb – „H2Ready“ Industriestandard als Ziel von Wirtschaft und Politik, Leipzig, 2018.
- [BMW-2020] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Nationale Wasserstoffstrategie – Strategiepapier. Bundesregierung, 2020.
- [BMWK-2016] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) – Phase II 2016 - 2026 (Forschung, Entwicklung und Innovation). <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/0040-brennstoffzellen.html>, Aufruf am 23.10.2022.
- [BMWK-2021a] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Deutsche Klimaschutzpolitik – Verbindlicher Klimaschutz durch das Bundes-Klimaschutzgesetz. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html>, Aufruf am 21.10.2022.
- [BMWK-2021b] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren – 2020: Mehr als 40 Prozent weniger Treibhausgasemissionen als 1990. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html>, Aufruf am 21.10.2022.
- [BMWK-2023] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesregierung, 2023.
- [Bra-2013] Brandt, K.: Einsatzfelder für Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 383–391.

- [Bru-2020] Bruns, R.: Flurförderzeuge. In: Bender, B.; Göhlich, D. (Hrsg.): Doppel Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020, S. 395–405.
- [Bun-2000] Bundesministerium der Finanzen: AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter. juris GmbH - Fachportal Steuerrecht, 2000.
- [Bun-2019] Bundesregierung: Klimaschutzprogramm 2030 – Überblick. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>, Aufruf am 23.10.2022.
- [Bun-2022] Bundesregierung: Neuzugelassene Pkw ab 2035 – EU-Umweltrat: Nur noch CO₂-frei fahren. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/verbrennermotoren-2058450>, Aufruf am 21.10.2022.
- [BVES-2016] Bundesverband Energiespeicher (BVES): Speichertechnologien Steckbrief – Li-Ionen Stromspeicher. https://www.bves.de/wp-content/uploads/2016/03/FactSheet_chemisch_Li_Ionen.pdf, Aufruf am 23.03.2022.
- [CIN-2022] CIN: CO₂-Emissionsrechner für Intralogistikanwendungen. <https://www.cleanintralogistics.net/co2-rechner/>, Aufruf am 18.10.2022.
- [CIN-2023] CIN: Clean Intralogistics Net (CIN) – Startseite. <https://www.cleanintralogistics.net/>, Aufruf am 19.03.2023.
- [Coe-2016a] Coenenberg, A. G.; Haller, A.; Mattner, G.; Schultze, W.: Einführung in das Rechnungswesen – Grundlagen der Buchführung und Bilanzierung. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2016.
- [Coe-2016b] Coenenberg, A. G.; Fischer, T. M.; Günther, T.: Kostenrechnung und Kostenanalyse. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2016.
- [Cro-2008] Crown Equipment Corporation: Fast 1 Million US Dollar staatlicher Zuschuss zur Brennstoffzellen-Forschung für Crown. <https://news.crown.com/de/2008/fast-1-million-us-dollar-staatlicher-zuschuss-zur-brennstoffzellen-forschung-fur-crown/>, Aufruf am 30.03.2022.
- [Cro-2011] Crown Equipment Corporation: Crown bietet optimale Lösungen im Bereich der Brennstoffzellentechnologie. <https://news.crown.com/de/2011/crown-bietet-optimale-losungen-im-bereich-der-brennstoffzellentechnologie/>, Aufruf am 30.03.2022.
- [Cro-2022] Crown Equipment Corporation: V-Force Lithium-Ionen-Energiespeichersysteme – Laden statt Wechseln. <https://www.crown.com/de-de/batterien-ladegeraete/lithium-ionen-batterien.html>, Aufruf am 30.03.2022.
- [Deu-2020] Deutscher Bundestag: Energiespeicher der Elektromobilität – Entwicklung der Energiedichten. <https://www.bundestag.de/resource/blob/819220/31128d3d32638f43627fa8a99bd3cb83/WD-8-090-20-pdf-data.pdf>, Aufruf am 24.03.2022.

- [DIN EN ISO-3691-1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Flurförderzeuge - Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung - Teil 1: Motorkraftbetriebene Flurförderzeuge mit Ausnahme von fahrerlosen Flurförderzeugen, Staplern mit veränderlicher Reichweite und Lastentransportfahrzeugen. DIN EN ISO Nr. 3691-1, 2020.
- [DIN EN-16796-1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Energieeffizienz von Flurförderzeugen - Testmethoden. DIN EN Nr. 16796-1, 2017.
- [DIN EN-16796-2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Energieeffizienz von Flurförderzeugen - Testmethoden. DIN EN Nr. 16796-2, 2017.
- [DIN EN-50272-3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen. DIN EN Nr. 50272-3, 2003.
- [DIN EN-60300-3-3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004). DIN EN Nr. 60300-3-3, 2005.
- [DIN EN-62282-4-101] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Brennstoffzellentechnologien - Teil 4-101: Antriebe mit Brennstoffzellen-Energiesystemen (mit Ausnahme von Straßenfahrzeugen und Hilfsantrieben) - Elektrisch betriebene Flurförderzeuge. DIN EN Nr. 62282-4-101, 2015.
- [DIN EN-62282-4-102] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Brennstoffzellentechnologien - Teil 4-102: Antriebe mit Brennstoffzellen-Energiesystemen für elektrisch betriebene Flurförderzeuge. DIN EN Nr. 62282-4-102, 2017.
- [DIN-31051] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen der Instandhaltung. DIN Nr. 31051, 2019.
- [DIN-43531] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Bleiakkumulatoren - Antriebsbatterien 48 V mit Zellen Maßreihe L nach DIN EN 60254-2 für Flurförderzeuge. DIN Nr. 43531, 2012.
- [DIN-43535] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Bleiakkumulatoren - Antriebsbatterien 24 V mit Zellen Maßreihe L nach DIN EN 60254-2 für Flurförderzeuge. DIN Nr. 43535, 2012.
- [DIN-43536] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Bleiakkumulatoren - Antriebsbatterien 80 V mit Zellen Maßreihe L nach DIN EN 60254-2 für Flurförderzeuge. DIN Nr. 43536, 2012.
- [DOE-2018] U.S. Department of Energy: Industry Deployed Fuel Cell Powered Lift Trucks, 2018.
- [Dom-2015] Domínguez, I.; Contreras, A.; Posso, F.; Varela, F.: Simulation of the operation of a fleet of materials handling and transport vehicles, powered by fuel cells. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 40 (2015) Nr. 24, S. 7678–7688.
- [Dop-2020] Doppelbauer, M.: Grundlagen der Elektromobilität – Technik, Praxis, Energie und Umwelt. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.

- [Dör-2016] Döring, N.; Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation – in den Sozial- und Humanwissenschaften. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Dro-2014] Drosse, V.: Managerial Accounting – Kosten- und Leistungsrechnung, Investitionsrechnung, Kennzahlen. Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht GmbH, Freiburg, 2014.
- [Ebe-2020] Ebert, G.; Steinhübel, V.: Kosten- und Leistungsrechnung – Mit einem ausführlichen Fallbeispiel. Springer Gabler, Wiesbaden, Heidelberg, 2020.
- [Ehr-2018] Ehret, O.: Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen, 2018.
- [Eic-2019] Eichinger, K.: Der richtige Batterietyp für den Stapler.
<https://www.materialfluss.de/flurförderzeuge/hangcha-deutschland-bietet-lithium-ionen-technik-der-richtige-batterietyp-fuer-den-stapler.htm>, Aufruf am 21.03.2022.
- [Elg-2009] Elgowainy, A.; Gaines, L.; Wang, M.: Fuel-cycle analysis of early market applications of fuel cells: Forklift propulsion systems and distributed power generation. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 34 (2009) Nr. 9, S. 3557–3570.
- [Fac-2000] Fachinformationszentrum Karlsruhe: Energie im Wandel.
<https://api.deutsche-digitale-bibliothek.de/binary/85e83349-5530-4a66-ab01-41345f25f462.pdf>, Aufruf am 22.04.2022.
- [FEM-2019] FEM European Materials Handling Federation: World Industrial Truck Statistics (WITS) – Information Sheet Q4 - 2018, 2019.
- [FEM-2022] FEM European Materials Handling Federation: World Industrial Truck Statistics (WITS) – Information Sheet Q4 - 2021, 2022.
- [FES-2022] FES GmbH Fahrzeug-Entwicklung Sachsen: Entwicklung Brennstoffzellensystem. <https://fes-2020.saxdata.de/leistungsspektrum/entwicklung-brennstoffzelle-integration/>, Aufruf am 02.04.2022.
- [fml-2019] Hermann, A.: Ausgestaltung und Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur für Brennstoffzellenanwendungen in der Intralogistik. Semesterarbeit, betreut durch M. Wagner. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [fml-2020] Schaal-Mulacek, H.: Ein Modell zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen. Bachelorarbeit, betreut durch M. Wagner. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2020.
- [For-2018] Forstner, M. von: Fuel-Cell Option. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Frankfurt am Main, 06.11.2018.
- [Fot-2022a] Fottner, J.: Maschinensystemtechnik. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2022.

- [Fot-2022b] Fottner, J.: Planung technischer Logistiksysteme. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2022.
- [Fre-2017] Freis, J.: Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO₂-Emissionen von Logistikzentren. Dissertation, Technische Universität München, 2017.
- [Fre-2021] Frenz, W.: Grundzüge des Klimaschutzrechts. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2021.
- [Fro-2011] Fronius International GmbH: Entscheidungshilfe für die Beschaffung von Batterieladesystemen für Elektro-FFZ – Whitepaper, 2011.
- [Fro-2017] Fronius International GmbH: Beschaffung von Elektro-Flurförderzeugen – Fronius Batterieladetechnik optimiert individuelle Finanzierungskonzepte, Aufruf am
- [Fuc-2016] Fuc, P.; Kurczewski, P.; Lewandowska, A.; Nowak, E.; Selech, J.; Ziolkowski, A.: An environmental life cycle assessment of forklift operation: a well-to-wheel analysis. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 21 (2016) Nr. 10, S. 1438–1451.
- [Fue-2017] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU): Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities – FCH Material handling equip. https://www.cleanint-ralogistics.net/wp-content/uploads/2021/02/171121_FCH2JU_Application-Package_WG2_Material-handling-equipment-ID-2910567-ID-2911653.pdf, Aufruf am 03.04.2022.
- [Fue-2022] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU): Who we are. <https://www.fch.europa.eu/page/who-we-are>, Aufruf am 03.04.2022.
- [Gai-2008] Gaines, L.; Elgowainy, A.; Wang, M.: Full Fuel-Cycle Comparison of Forklift Propulsion Systems – Energy Systems Division. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, 2008.
- [Geb-2021] Gebauer, C.: Heraeus Hydrogen Systems – Elevator Pitch. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin, 05.10.2021.
- [Ger-2005] Geraer Batterie Dienst GmbH GBD: Planungsgrundlagen für Batterieladestationen (Blei-Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge), 2005.
- [GLO-2022] GLOBE Fuel Cell Systems GmbH: XLP80 – Das zuverlässigste Brennstoffzellenaggregat für Ihre Intralogistik. <https://www.globe-fuelcell.com/products>, Aufruf am 18.10.2022.
- [Grü-2021] Grünke, B.; Draenkow, D.: Energiesysteme für eine wirtschaftlich nachhaltige Intralogistik – Energiesysteme für Flurförderzeuge auf dem Prüfstand, 2021.
- [Gru-2022] Gruma Nutzfahrzeuge GmbH: Ladegeräte für Stapler – Für jede Anforderung die passende Ladetechnik. <https://www.gruma.de/ladegeraete/>, Aufruf am 23.03.2022.
- [Gün-2015a] Günthner, W. A.; Micheli, R.: H2IntraDrive - Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen

- Forschungsbericht. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Gün-2015b] Günthner, W. A.; Micheli, R.: H2IntraDrive - Einsatz einer wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Gün-2015c] Günthner, W. A.; Micheli, R.: Leitfaden für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen – Am Beispiel H2IntraDrive. Leitfaden. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Hab-2018] Habenicht, S.: Energiebedarfsermittlung einzelner Elemente von Stückgut-Stetigförderanlagen. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2018.
- [Hee-2021] Heesen, B.; Heesen, M. J.: Investitionsrechnung für Praktiker – Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen. Springer Gabler, Wiesbaden, Heidelberg, 2021.
- [Her-2010] Herb, F.: Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen. Dissertation. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Universität Ulm, Ulm, 2010.
- [Hes-2021a] Hesse, K.: Brennstoffzellen-Lösungen von Toyota Material Handling – Elevator Pitch. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin, 05.10.2021.
- [Hes-2021b] Hesse, K.: Mit der richtigen Energie Ressourcen sparen – Wann lohnt sich welche Antriebstechnologie für Ihre Staplerflotte? <https://blog.toyota-forklifts.de/mit-der-richtigen-energie-ressourcen-sparen-wann-lohnt-sich-welche-antriebstechnologie-f%C3%BCr-ihre-staplerflotte>, Aufruf am 18.02.2022.
- [Heu-2013] Heuck, K.; Dettmann, K.-D.; Schulz, D.: Elektrische Energieversorgung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Hor-2020] Horváth & Partners; BloombergNEF: Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Akkus in ausgewählten Jahren von 2010 bis 2019 und eine Prognose bis 2025 – (in Euro/kWh). <https://de-statista.com.de/statistik/daten/studie/534429/umfrage/weltweite-preise-fuer-lithium-ionen-akkus/>, Aufruf am 22.03.22.
- [Hos-2013] Hosseinzadeh, E.; Rokni, M.; Advani, S. G.; Prasad, A. K.: Performance simulation and analysis of a fuel cell/battery hybrid forklift truck. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 38 (2013) Nr. 11, S. 4241–4249.

- [Hus-2013] Huss, A.; Corneille, M.: Flurförderzeuge mit Brennstoffzellen. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2013.
- [Hyd-2020] Hydrogen Council: Path to hydrogen competitiveness – A cost perspective. https://www.cleanintralogistics.net/wp-content/uploads/2020/02/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf, Aufruf am 03.04.2022.
- [Hys-2022a] Hyster-Yale Group; Nuvera: Hydrogen fuel cell payback calculator – Find out your potential payback period with our payback calculator. <https://www.hyster.com/en-us/north-america/industry-solutions/power-sources/Hydrogen-Payback-Calculator/>, Aufruf am 29.03.2022.
- [Hys-2022b] Hyster-Yale Group: Hyster-Yale Materials Handling – A Stable & Innovative History. <https://www.hyster-yale.com/about-hyster-yale/history/default.aspx>, Aufruf am 29.03.2022.
- [Irr-2019] Irrgang, R.: Gute Zukunftsaussichten für die Brennstoffzelle. <https://www.mm-logistik.vogel.de/gute-zukunftsaussichten-fuer-die-brennstoffzelle-a-849519/>, Aufruf am 30.03.2022.
- [ISO-5053-1] ISO: Industrial trucks - Vocabulary. ISO Nr. 5053-1, 2020.
- [Jia-2021] Jiao, M.; Pan, F.; Huang, X.; Yuan, X.: Evaluation on Total Cost of Ownership of Electric Forklifts with lithium-ion battery. 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2021.
- [Jör-2017] Jörgl, T.: Flurförderzeuge: Hyster-Yale Group glaubt an Brennstoffzellen – Hersteller erwartet vor allem von Autobauern vermehrt Anfragen. <https://logistik-heute.de/news/flurfoerderzeuge-hyster-yale-group-glaubt-brennstoffzellen-13612.html>, Aufruf am 29.03.2022.
- [Jun-2021a] Jungheinrich Vertrieb Deutschland: Energielösungen – Mit voller Kraft voraus. Für mehr Effizienz und weniger CO2. <https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/842612/898e008e8b2aa0cc19712c7d20f841b1/download-lithium-ion-brochure-energiemanagement-data.pdf>, Aufruf am 31.03.2022.
- [Jun-2021b] Jungheinrich: Zehn Jahre Lithium-Ionen-Technologie made by Jungheinrich – So wurde Jungheinrich zum Pionier der Technologie. <https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/1051886/2d8f29470fb653654cfdd7c6585bb2c/download-10-jahre-lithium-ionen-technologie-broschuere-data.pdf>, Aufruf am 31.03.2022.
- [Jun-2022a] Jungheinrich: Fazit / Prognose – Zur Zukunft der Antriebssysteme. <https://www.jungheinrich.com/verantwortung/umweltverantwortung/fazit-prognose-1374>, Aufruf am 31.03.2022.
- [Jun-2022b] Jungheinrich: Kosteneffekte – Welche Kosten kommen auf Sie zu? <https://www.jungheinrich.com/verantwortung/umweltverantwortung/kosteneffekte-1350>, Aufruf am 31.03.2022.

- [Jun-2022c] Jungheinrich: Lithium-Ionen-Technologie von Jungheinrich. <https://www.jungheinrich.de/ihre-loesungen/lithium-ionen-technologie-von-jungheinrich>, Aufruf am 31.03.2022.
- [Kam-2018] Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A.: Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Kau-2018] Kaulfuhs-Berger, J.: Brennstoffzelle: „Zukunft hat begonnen“ – Die Lithium-Ionen-Technologie bekommt nun offenbar Konkurrenz in Europa. <https://www.technische-logistik.net/brennstoffzelle-%E2%80%9Ezukunft-hat-begonnen%E2%80%9C>, Aufruf am 31.03.2022.
- [Kio-2020] KION GROUP AG: Wasserstoffenergie bei KION - vom Pilotprojekt zum Branchenstandard. <https://www.kiongroup.com/de/News-Stories/Stories/Energie/Wasserstoffenergie-bei-KION-vom-Pilotprojekt-zum-Branchenstandard.html>, Aufruf am 01.04.2022.
- [Kle-2011] Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung – Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. Vahlen, München, 2011.
- [Kle-2018] Klell, M.; Eichseder, H.; Trattner, A.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik – Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, 2018.
- [Kle-2020] Klebsch, W.; Nina Guckes; Patrick Heininger; VDE e.V.: Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen – Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen am Praxis-Beispiel ›Netz Düren‹, 2020.
- [Köh-2013] Köhler, U.: Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. In: Kort-hauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 95–106.
- [Kom-2021] Komarnicki, P.; Lombardi, P.; Styczynski, Z. A.: Elektrische Energiespeichersysteme – Flexibilitätsoptionen für Smart Grids. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021.
- [Kri-2019] Kriwall, M.; Hannemann, B.; Stonis, M.; Langner, J.: Ökologische Betrachtung logistischer Prozesse von KMU. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 114 (2019) Nr. 6, S. 389–392.
- [Kur-2016] Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik – Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [Lar-2013] Larriba, T.; Garde, R.; Santarelli, M.: Fuel cell early markets: Techno-economic feasibility study of PEMFC-based drivetrains in materials handling vehicles. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 38 (2013) Nr. 5, S. 2009–2019.
- [Leh-2014] Lehmann, J.; Luschtinetz, T.: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.

- [Lie-2017] Lieb, C.; Klenk, E.; Galka, S.; Keuntje, C.: Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung – Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Garching b. München, 2017.
- [Lin-2017] Linde AG: Hydrogen for forklift trucks – The eco-friendly recipe for economical success. https://www.cleanintra-logistics.net/wp-content/uploads/2017/12/28146_Brochure_H2-Forklift.pdf, Aufruf am 03.04.2022.
- [Lin-2018] Linde AG: Die treibende Kraft. – Mit Linde Wasserstoffprojekte realisieren. Linde AG, 2018.
- [Lin-2022a] Linde Material Handling: Energie nach Maß – Energiesysteme von Linde: bewährt und innovativ. <https://www.linde-mh.de/de/Loesungen/Energiesysteme/>, Aufruf am 30.03.2022.
- [Lin-2022b] Linde Material Handling: Energiesystem für die Intralogistik von heute und morgen – Li-ION-Technologie von Linde. <https://www.linde-mh.de/de/Ueber-uns/Innovationen-von-Linde/Lithium-Ionen.html>, Aufruf am 01.04.2022.
- [Lin-2022c] Linde Material Handling: Energiesystem für die Intralogistik von morgen – Li-ION-Technologie von Linde. <https://www.linde-mh.de/de/Ueber-uns/Innovationen-von-Linde/Lithium-Ionen.html>, Aufruf am 23.03.2022.
- [Lin-2022d] Linde Material Handling: Mit Wasserstoff in die Zukunft – Brennstoffzellen-Technologie von Linde. <https://www.linde-mh.de/de/Ueber-uns/Innovationen-von-Linde/Brennstoffzellen.html>, Aufruf am 24.03.2022.
- [Lin-2022e] Linde Material Handling: Mit Wasserstoff in die Zukunft – Brennstoffzellen-Technologie von Linde. <https://www.linde-mh.de/de/Ueber-uns/Innovationen-von-Linde/Brennstoffzellen.html>, Aufruf am 01.04.2022.
- [Lot-2016] Lototsky, M. V.; Tolj, I.; Parsons, A.; Smith, F.; Sita, C.; Linkov, V.: Performance of electric forklift with low-temperature polymer exchange membrane fuel cell power module and metal hydride hydrogen storage extension tank. In: Journal of Power Sources, Jg. 316 (2016), S. 239–250.
- [Mai-2016] Maienschein, B.; Hofmann, B.: Die Stromer kommen gut an. <https://www.mm-logistik.vogel.de/die-stromer-kommen-gut-an-a-553718/>, Aufruf am 30.03.2022.
- [Man-2022] Manke, B.; Stiede, T.; Meth, H.; Weinberger, M.; Richter, T.; Schneider, C.; Orac, T.; Fottner, J.; Wagner, M.: Einsatz von 70 wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen innerhalb des BMW Werks Leipzig – Schlussbericht FFZ70, 2022.
- [Mar-2004] Markwardt, U.: Modellierung modularer Materialfluss-Systeme mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen. Dissertation. Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, Technische Universität Dresden, Dresden, 2004.

- [Mar-2016] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.
- [mat-2019] materialfluss.de: Marktübersicht: Flurförderzeuge. In: materialfluss MARKT (2019), S. 56–57.
- [May-1997] Mayer, E.; Liessmann, K.; Mertens, H. W.: Kostenrechnung – Grundwissen für den Controllerdienst. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1997.
- [May-2021] Mayr, K.; Hofer, F.; Ragowsky, G.; Gruber, W.; Arnberger, A.; Kabza, A.; Wolf, P.; Schmidt, M.; Jörissen, L.: Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug – Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte. AVL; ZSW, 2021.
- [McC-2010a] McConnell, V. P.: Fuel cells in forklifts extend commercial reach. In: Fuel Cells Bulletin, Jg. 2010 (2010) Nr. 9, S. 12–19.
- [McC-2010b] McConnell, V. P.: Rapid refill, high uptime: running forklifts with fuel cells. In: Fuel Cells Bulletin, Jg. 2010 (2010) Nr. 10, S. 12–19.
- [Mic-2015] Micheli, R.; Günthner, W. A.: Prozesse auf dem Prüfstand – Batteriewechsel vs. Wasserstoffbetankung bei Flurförderzeugen. In: Hebezeuge Fördermittel - Flurförderzeuge 2015/2016 (2015), S. 28–32.
- [Mit-2022] Mitsubishi Forklift Trucks: Batterieoptionen – Welche Batterietechnologie ist die richtige? <https://www.mitsubishi-forklift.de/!%C3%B6sun-gen/stapler-batterie>, Aufruf am 31.03.2022.
- [Möl-2013] Möller, K.-C.: Übersicht über die Speichersysteme/Batteriesysteme. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 3–9.
- [Möl-2021] Möllmann, A.: Elevator Pitch: Propan Rheingas GmbH. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin, 05.10.2021.
- [Mül-2016] Müller, M.: Fuel Cell Forklift Systems. In: Stolten, D.; Garland, N.; Samsun, R. C. (Hrsg.): Fuel cells. Wiley-VCH, Weinheim, 2016, S. 323–333.
- [Nor-2013] Noreikat, K.: Brennstoffzelle – Antriebsstrang und Infrastruktur. In: MTZ Wissen, Jg. 74. Jahrgang (2013) Nr. 04, S. 326–331.
- [NOW-2017] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW): Innovationscluster Clean Intralogistics Net (CIN). <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/cin/>, Aufruf am 31.03.2022.
- [NOW-2020] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW): KION HyPower-24V – Entwicklung eines europäischen 24V-Brennstoffzellensystems für Lagertechnikgeräte. <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/kion-hypower-24v/>, Aufruf am 02.04.2022.
- [NOW-2022] Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW): Wasserstoff und Brennstoffzelle – Förderprogramme. <https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/wasserstoff-und-brennstoffzelle/>, Aufruf am 23.10.2022.

- [Nuv-2014] Nuvera Fuel Cells LLC: Nuvera Fuel Cells Acquired by Hyster-Yale Materials Handling. <https://www.nuvera.com/blog/nuvera-fuel-cells-acquired-by-hyster-yale-materials-handling>, Aufruf am 29.07.2019.
- [Nuv-2016] Nuvera Fuel Cells LLC: Nuvera Demonstrates Electrochemical Hydrogen Compressor for Premiere Fueling Event. <https://www.nuvera.com/blog/nuvera-demonstrates-electrochemical-hydrogen-compressor-for-premiere-fueling-event>, Aufruf am 02.04.2022.
- [Nuv-2022] Nuvera Fuel Cells LLC: Fuel Cell Power for Material Handling. <https://www.nuvera.com/forklift-products>, Aufruf am 02.04.2022.
- [Pac-2019] Pacheco, D. S.; Gonzalez, L. G.; Espinoza, J. L.; Campoverde, C. J.: Energy consumption of an electric forklift truck: alternative with fuel cell and supercapacitor. 2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Piscataway, NJ, 2019.
- [Plu-2018a] Plug Power Inc.: GenCare – Guaranteed Uptime: For your GenDrive Fuel Cell-Powered Fleet. https://www.plugpower.com/wp-content/uploads/2020/07/2018_GenCareMH_F1Digi.pdf, Aufruf am 02.04.2022.
- [Plu-2018b] Plug Power Inc.: GenFuel – Hydrogen solutions for today’s Material Handling Applications. https://www.plugpower.com/wp-content/uploads/2020/07/2018_GenFuelSpec_F1Digi.pdf, Aufruf am 02.04.2022.
- [Plu-2022a] Plug Power Inc.: Fuel Cells Products for Material Handling Equipment – Plug Power’s GenDrive fuel cell products can power anything from a forklift and pallet jack to AGVs and tuggers. <https://www.plugpower.com/fuel-cell-power/gendrive/>, Aufruf am 02.04.2022.
- [Plu-2022b] Plug Power Inc.: Powering the future: 7 reasons to upgrade your operations to hydrogen and fuel cells. https://www.plugpower.com/wp-content/uploads/2020/07/7ReasonsH2FC_031422sm.pdf, Aufruf am 02.04.2022.
- [Pol-2019] Poll, D.: Warum Staplerflotten künftig mit Wasserstoff fahren. <https://www.produktion.de/technik/co2-neutrale-industrie/warum-staplerflotten-kuenftig-mit-wasserstoff-fahren-106.html>, Aufruf am 30.03.2022.
- [Pol-2021] Poll, D.: Flurförderzeuge: Induktives Laden steigert Verfügbarkeit enorm – Kabelloses Laden von Flurförderzeugen und Robotern steigert die Verfügbarkeit, indem während des Prozesses geladen wird. Doch das ist nicht der einzige Vorteil. In: Produktion (2021) Nr. 07
- [Pro-2018] Prokosch, S.: Effizienzschub für Flurförderzeuge durch Lithium-Ionen-Technologie. In: ATZ offhighway, Jg. 11. Jahrgang (2018) Nr. 01, S. 44–47.
- [Pro-2020a] Profi-Guide: Batterietechnik für Stapler und Flurförderzeuge. <https://www.jungheinrich-profishop.ch/ch-de/profi-guide/batterietechnik-flurfoerderzeuge/>, Aufruf am 31.03.2022.

- [Pro-2020b] Profi-Guide: Lithium-Ionen-Akkus – leistungsstarke Energiespeicher. <https://www.jh-profishop.de/profi-guide/lithium-ionen-akkus/>, Aufruf am 31.03.2022.
- [Ram-2013] Ramsden, T.: Evaluation of the Total Cost of Ownership of Fuel Cell-Powered Material Handling Equipment – Technical Report. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2013.
- [Ray-2022] Raymond Corporation: Hydrogen Fuel Cell-powered Forklifts. <https://www.raymondcorp.com/products/power-systems/fuel-cells>, Aufruf am 01.04.2022.
- [Rei-2011] Reising, A.: Brennstoffzelleneinsatz in Flurförderzeugen. In: Zadek, H. (Hrsg.): Sustainable Logistics. DVV Media Group Dt. Verkehrs-Verl., Hamburg, 2011, S. 111–118.
- [Rei-2013] Reich, G.; Reppich, M.: Regenerative Energietechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.
- [Ren-2012] Renquist, J. V.; Dickman, B.; Bradley, T. H.: 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.
- [Sau-2009] Sauer, D. U.: Batteriesysteme für Flurförderzeuge – Speichertechnologien - Leistung - Lebensdauer - Elektromobilität. RWTH Aachen, VDI-Berichte Nr. 2070, 2009.
- [Sau-2016] Sauer, A.; Bauernhansl, T.: Energieeffizienz in Deutschland - eine Metastudie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Sch-2013] Schilling, T.; Frenkel, A.; Amberger, M.; Fischer, G.; Braun, M.; Linsel, P.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln der Intralogistik – Forschungsbericht IGF-Vorhaben 16973N. Lehrstuhl MTL, Lehrstuhl fml, Institut IFL, 2013.
- [Sch-2018] Schultz, T.: Hydrogen Fuel Cells in Material Handling Application – Plug Power has made this a reality today! Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Frankfurt am Main, 06.11.2018.
- [Sch-2021] Schultz, T.: Brennstoffzellen und Anwendungsbereiche. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin, 05.10.2021.
- [Ste-2017] Sterner, M.; Stadler, I.: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [STI-2022a] STILL GmbH: Brennstoffzellen-Technologie – Intralogistik mit Wasserstoffantrieb. <https://www.still.de/loesungskompetenz/innovationen-made-by-still/brennstoffzellen-technik.html>, Aufruf am 31.03.2022.
- [STI-2022b] STILL GmbH: Die Gretchenfrage beim Staplerkauf: „Elektro- oder verbrennungsmotorischer Gabelstapler?“ – Entscheidend ist das Einsatzprofil. <https://www.still-zero-emission.de/26178.0.0.html>, Aufruf am 31.03.2022.

- [STI-2022c] STILL GmbH: Energiesysteme für die Intralogistik – Was ist das richtige Energiesystem für meine Intralogistik? <https://www.still.de/loesungskompetenz/energiesysteme-fuer-die-intralogistik.html>, Aufruf am 31.03.2022.
- [STI-2022d] STILL GmbH: Schnellere Leistung für flexible Einsätze – Li-Ion-Akku vs. Blei-Säure-Batterie. <https://www.still-zero-emission.de/?id=29976&L=0>, Aufruf am 31.03.2022.
- [STI-2022e] STILL GmbH: STILL Li-Ion Technologie – Das perfekt abgestimmte Energiesystem. <https://www.still.de/lithium-ionen-technologie-20.html>, Aufruf am 31.03.2022.
- [STI-2023] STILL GmbH: STILL eröffnet erste Produktionslinie für Brennstoffzellensysteme im Hamburger Werk – Die Energiewende vorantreiben. <https://www.still.de/unternehmen/news-presse/news/detail/still-eroeffnet-erste-produktionslinie-fuer-brennstoffzellensysteme-im-hamburger-werk.html>, Aufruf am 29.12.2023.
- [Tas-2017] Taschner, A.: Business Cases – Ein anwendungsorientierter Leitfaden. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [Thi-2020] Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S.; Grimm, A.; Hettesheimer, T.; Langkau, S.; Loibl, A.; Moll, C.; Neef, C.; Plötz, P.; Sievers, L.; Tercero Espinoza, L.; Edler, J.: Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf – Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft?, 2020.
- [Töp-2014] Töppler, J.; Lehmann, J.: Wasserstoff und Brennstoffzelle. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Töp-2017] Töppler, J.; Lehmann, J. (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Toy-2022a] Toyota Material Handling: Finden Sie die richtige Energielösung für Ihren Betrieb. https://toyota-forklifts.de/loesungen/toyota-li-ionen/?_gl=1*1lqish0*_ga*NDczNzU3MzMxLjE2NDg3NjU0NTE.*_ga_393GCHVPN5*MTY0ODc2NTQ0OS4xLjEuMTY0ODc2NTUzMS4w, Aufruf am 01.04.2022.
- [Toy-2022b] Toyota Material Handling Deutschland GmbH: Förderung mitnehmen – Unser Energiesparheld. <https://info.toyota-forklifts.de/foerderung>, Aufruf am 23.10.2022.
- [Toy-2022c] Toyota Material Handling: Lithium-Ionen-Batterielösungen von Toyota. <https://toyota-forklifts.de/loesungen/toyota-li-ionen/lithium-ionen-batterieloesungen/>, Aufruf am 01.04.2022.
- [TRGS-554] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin baua: Abgase von Dieselmotoren. TRGS Nr. 554, 2019.
- [Tüv-2022] TÜV SÜD: Sicherheit von Wasserstoff. <https://www.tuvsud.com/de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/sicherheit-von-wasserstoff>, Aufruf am 24.03.2022.
- [UNE-2021] UNECE: Jährliche Entwicklung des Wechselkurses des US-Dollars gegenüber dem Euro von 1999 bis 2020 (in Euro), Aufruf am

- [Unr-2009] Unruh, V.: Maßgeschneiderte Staplerfinanzierung – Flurförderzeuge. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/massgeschneiderte-staplerfinanzierung-a-227678/>, Aufruf am 26.11.2022.
- [Upr-2016] Upreti, G.; Greene, D. L.; Duleep, K. G.; Sawhney, R.: Impacts of the American Recovery and Reinvestment Act and the Investment Tax Credit on the North American non-automotive PEM fuel cell industry. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 41 (2016) Nr. 5, S. 3664–3675.
- [VDI-2022] Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI); Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE): Wasserstoff für den Schienenverkehr – VDI/VDE-Studie, Aufruf am
- [VDI-2067] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. VDI Nr. 2067, 2012.
- [VDI-2198] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Typenblätter für Flurförderzeuge. VDI Nr. 2198, 2012.
- [VDI-2497] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Empfehlung für die wirtschaftliche Betriebshaltung von kraftbetriebenen Flurförderzeugen. VDI Nr. 2497, 2005.
- [VDI-2695] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Ermittlung der Betriebskosten für Diesel- und Elektro-Gabelstapler. VDI Nr. 2695, 2010.
- [VDI-2884] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). VDI Nr. 2884, 2005.
- [VDI-2885] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten. VDI Nr. 2885, 2003.
- [VDI-3423] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. VDI Nr. 3423, 2011.
- [VDI-3586] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Flurförderzeuge. VDI Nr. 3586, 2007.
- [VDI-3589] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Auswahlkriterien für die Beschaffung von Flurförderzeugen. VDI Nr. 3589, 2014.
- [VDI-3649] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder- und Lagersysteme. VDI Nr. 3649, 1992.
- [VDI-3960] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Ermittlung der Betriebsstunden an Flurförderzeugen. VDI Nr. 3960, 2015.
- [VDI-4461] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Beanspruchungskategorien für Gabelstapler. VDI Nr. 4461, 2010.
- [VDI-4465] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Modellierung und Simulation. VDI Nr. 4465, 2021.
- [VDI-5200-1] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Fabrikplanung. VDI Nr. 5200-1, 2011.
- [VDI-5200-4] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: Fabrikplanung. VDI Nr. 5200-4, 2016.

- [VDMA-2019] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA); Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI): Lithium-Ionen-Batteriesysteme. https://vdma.org/documents/34570/4887730/VDMA_Leitfaden_Lithium.pdf/80c269a5-99a3-3cc6-5717-b3e7852910a9?t=1614935869951, Aufruf am 22.03.2022.
- [VDMA-2020] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA): Antrieb im Wandel – Auswirkungen der Brennstoffzellentechnologie auf den Maschinen- und Anlagenbau und die Zulieferindustrie. https://www.vdma.org/documents/34570/4669864/VDMA_Antrieb-im-Wandel_FCEV_Final-report_2020.pdf/daab76e1-0e62-a732-d496-8cec7cf33fcc?t=1637837147171, Aufruf am 03.04.2022.
- [VDMA-34160] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA): Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. VDMA Nr. 34160, 2006.
- [VdS-2259] VdS Schadenverhütung GmbH: Batterieladeanlagen für Elektrofahrzeuge. VdS Nr. 2259, 2010.
- [ver-2022] verkehrsrundschau.de: Frankreich: Lidl stellt Lagertechnik auf grünen Wasserstoff um. <https://www.verkehrsrundschau.de/amp/frankreich-lidl-stellt-lagertechnik-auf-gruenen-wasserstoff-um-3150282>, Aufruf am 03.04.2022.
- [Wag-2020] Wagner, M.; Hermann, A.; Stiede, T.; Fottner, J.: Wasserstoffinfrastruktur für Flurförderzeuge. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 115 (2020) Nr. 10, S. 719–722.
- [Wag-2021] Wagner, M.: Empfehlungen für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin, 05.10.2021.
- [War-2017] Warmbold, J.: Brennstoffzellen-Fahrzeuge von Jungheinrich für Frischelogistiker. <https://www.materialfluss.de/stapler/brennstoffzellen-fahrzeuge-fuer-frischelogistiker.htm>, Aufruf am 31.03.2022.
- [War-2021] Warmbold, J.: Weltrangliste Flurförderzeuge 2020/2021 – Moderates Wachstum trotz Pandemie. In: dhf Intralogistik, Jg. 2021 (2021) Nr. 10, S. 22–39.
- [Wat-2019] Watter, H.: Regenerative Energiesysteme – Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [Weh-2020] Wehking, K.-H.: Technisches Handbuch Logistik 1. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Wie-2015] Wietschel, M.; Ullrich, S.; Markewitz, P.; Schulte, F.; Genoese, F.: Energietechnologien der Zukunft. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015.
- [Wil-2022] Willenbrock GmbH: Kaufen, Leasen, Mieten - maximal flexibel – Finanzierung. <https://www.willenbrock.de/de/Loesungen/Finanzierung/>, Aufruf am 26.11.2016.

- [Win-2019] Wind, J.: Brennstoffzelle. In: Tschöke, H.; Gutzmer, P.; Pfund, T. (Hrsg.): Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Wip-2019] Wipperfürth, W.: Bedeutung der Elektrolytverteilung in Blei-Säure Batteriezellen – Entwicklung von Grundlagen zur Erzielung und Beurteilung optimaler Verteilung von Elektrolyt zur Aktivmasse. Dissertation. Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019.
- [Wüh-2020] Wühle, M.: Nachhaltigkeit – einfach praktisch! Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Wys-2022] Wystrach GmbH: WyRefueler - High Pressure Hydrogen Refueling. <https://www.wystrach.gmbh/produkte/wyrefueler/>, Aufruf am 03.04.2022.
- [Zaj-2021] Zajac, P.; Rozic, T.: Energy consumption of forklift versus standards, effects of their use and expectations. In: Energy, Jg. 2022 (2021) Nr. 239
- [Zap-2017] Zapf, M.: Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem – Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [Zha-2013] Zhang, Z.; Mortensen, H.; Vestervang Jensen, J.; Andersen, M. A. E.: Fuel Cell and Battery Powered Forklifts. 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2013), Piscataway, NJ, 2013.
- [Zöl-2005] Zöllner, B.: Ersatzbeschaffung von Flurförderzeugen – Kriterien richtig beurteilen. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 2005 (2005) Nr. 45, S. 294–295.
- [Zör-2021] Zörner, A.: Linde Clean Hydrogen. Vortrag. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), Berlin, 05.10.2021.
- [ZVEI-2001] Fachverband Batterien: Lebensdauer-Betrachtungen bei Antriebsbatterien – Merkblatt. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI), 2001.

Durch die Autorin betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der in dieser Dissertation aufgegriffenen Forschungsthematik wurden nachfolgende Studienarbeiten erstellt. Die Anfertigung der Arbeiten erfolgte unter wissenschaftlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Die Inhalte der Arbeiten sind an den gekennzeichneten Stellen eingeflossen. An dieser Stelle gebührt den Studierenden ein besonderer Dank für ihren Einsatz und das Interesse am Thema.

Bilicki, Jan: Nachhaltigkeitsanalyse von Energiespeichertechnologien in der Intralogistik. Bachelorarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2019.

Billinger, Christoph: Strategieentwicklung für ein ganzheitliches Service- und Betreiberkonzept wasserstoffbetriebener Flurförderzeuge. Masterarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2019.

Hermann, Anna: Ausgestaltung und Dimensionierung der Wasserstoffinfrastruktur für Brennstoffzellenanwendungen in der Intralogistik. Semesterarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2019.

Schaal-Mulacek, Henrik: Ein Modell zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen. Bachelorarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2020.

Wachtveitl, Simon: Strategie zur kostengünstigen Vor-Ort-Erzeugung von grünem Wasserstoff für Brennstoffzellen im innerbetrieblichen Transport. Bachelorarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2020.

Duml, Hannes: Der optimale Dispenser für die Wasserstoffversorgung von Flurförderzeugen. Bachelorarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2021.

Fürst, Maximilian: Batterie oder Brennstoffzelle: Auswahl der geeigneten elektrochemischen Speichertechnologie für Fahrzeuge im innerbetrieblichen Transport (Modellkonzeptionierung). Semesterarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2021.

Görkemli, Doruk: Weiterentwicklung eines Modells zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen. Semesterarbeit. Betreut durch M. Wagner. Abgegeben 2021.

Ludwig, Florian: Analyse der Schnittstellen entlang der Wertschöpfungskette brennstoffzellenbetriebener Flurförderzeuge in der Intralogistik. Betreut durch M. Wagner und P. Vollmuth. Abgegeben 2022.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 2-1:	Einordnung der FFZ in die Systematik der Fördermittel für die Stückgutförderung	7
Abbildung 2-2:	Strukturierung der Antriebsarten von Fördermitteln	9
Abbildung 2-3:	Definition Energiespeichersystem	10
Abbildung 2-4:	Prinzip der Sekundärbatteriezellen	12
Abbildung 2-5:	Funktionsprinzip der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle	18
Abbildung 2-6:	Brennstoffzellen-Energiesystem für Flurförderzeuge	19
Abbildung 2-7:	Pfad des Wasserstoffs durch die Infrastruktur bei FFZ-Anwendungen	21
Abbildung 2-8:	Vorgehen für die Genehmigung der Infrastruktur	23
Abbildung 2-9:	Energiekette von Primärenergie zu Endenergie	24
Abbildung 2-10:	Teilphasen in der Konzeptplanung	27
Abbildung 2-11:	Komponenten eines Entscheidungsmodells	30
Abbildung 2-12:	Phasen der Modellbildung im Modellbildungszyklus	31
Abbildung 3-1:	Erwartete TCO-Entwicklung für Stapler in USD je Schicht	62
Abbildung 4-1:	Grundidee zum Vergleich der Energieladezyklen	69
Abbildung 5-1:	Ziele und Anforderungen an den Einsatz von BzS-FFZ	76
Abbildung 5-2:	Konzeptentwurf für Gesamtmodell anhand Anforderungen	81
Abbildung 6-1:	Darstellung der Energiekette für elektromotorische FFZ	84
Abbildung 6-2:	Unterschiede in anfallenden Kosten in LCC-Phasen bei den verschiedenen ESS in FFZ	118
Abbildung 7-1:	Multikriterielles Vorgehensmodell	136
Abbildung 7-2:	Vorgehensschritte bei Anwendung des Modells	137
Abbildung 7-3:	Zielbeziehungen	152

Tabellenverzeichnis

Hauptteil

Tabelle 3-1:	Gegenüberstellung und Bewertung Stand der Forschung Energievergleich	49
Tabelle 3-2:	Gegenüberstellung und Bewertung Stand der Forschung Kostenvergleich	51
Tabelle 3-3:	Gegenüberstellung und Bewertung Stand der Forschung Prozessvergleich	52
Tabelle 3-4:	Zusammenfassung Marktanalyse FFZ-Hersteller	64
Tabelle 4-1:	Zuordnung der Vorgehensweise dieser Arbeit zu Abschnitten im Modellbildungsprozess	73
Tabelle 6-1:	Zuordnung der Belastungen bei Gabelstaplern zu Kategorien	88
Tabelle 6-2:	Mögliche Darstellung der Beanspruchungskategorien für Routenzugschlepper	89
Tabelle 6-3:	Gesamteffizienz von PbB aus Batterie und Lademethode	92
Tabelle 7-1:	Einflussgrößen hinsichtlich betrieblicher Rahmenbedingungen	138
Tabelle 7-2:	Einflussgrößen für die Bewertung des Lastprofils aus VDI 4461	139
Tabelle 7-3:	Einflussgrößen für die energetische Bewertung	139
Tabelle 7-4:	Einflussgrößen zu Prozesszeiten der Technologien	140
Tabelle 7-5:	Einflussgrößen zur Dimensionierung der Wasserstoff-Infrastruktur	140
Tabelle 7-6:	Einflussgrößen zu Flächenbedarfen	141
Tabelle 7-7:	Einflussgrößen zur Ermittlung der Nutzungsdauer	141
Tabelle 7-8:	Einflussgrößen zur Bewertung der Kosten in Entstehungsphase (t=0)	142
Tabelle 7-9:	Einflussgrößen zur Bewertung der Kosten in der Betriebsphase	143
Tabelle 7-10:	Einflussgrößen zur Bewertung der Kosten in der Verwertungsphase	143
Tabelle 7-11:	Mögliche Zielgrößen im multikriteriellen Modell	151
Tabelle 7-12:	Zielbeziehungen der Zielgrößen im multikriteriellen Modell	153
Tabelle 7-13:	Finanzierungsmodelle für FFZ-Flotten	160
Tabelle 8-1:	Betriebliche Rahmenbedingungen für Ausgangsszenario	167

Tabelle 8-2:	Gewichtetes Zielsystem für Fallbeispiel	169
Tabelle 8-3:	Energetische Ergebnisgrößen für Fallbeispiel	169
Tabelle 8-4:	Prozessuale Ergebnisgrößen für Fallbeispiel	170
Tabelle 8-5:	Prozessuale Ergebnisgrößen zur Auslegung der Infrastruktur	171
Tabelle 8-6:	Monetäre Ergebnisgrößen für Fallbeispiel	171
Tabelle 8-7:	Monetäre Ergebnisgrößen für Fallbeispiel beim Einsatz von FTF	173
Tabelle 8-8:	Entscheidungsmatrix im Zielsystem für Fallbeispiel	173
Tabelle 8-9:	Entscheidungsmatrix im Zielsystem für Fallbeispiel mit FTF-Einsatz	174

Anhang

Tabelle A-1:	Einflussgrößen für die Bewertung des Lastprofils im Ausgangsszenario	A-1
Tabelle A-2:	Einflussgrößen für die energetische Bewertung des Ausgangsszenarios	A-1
Tabelle A-3:	Einflussgrößen zu Prozesszeiten der Technologien im Ausgangsszenario	A-2
Tabelle A-4:	Einflussgrößen für die Dimensionierung der H ₂ -Infrastruktur im Ausgangsszenario	A-2
Tabelle A-5:	Einflussgrößen zu Flächenbedarfen im Ausgangsszenario	A-2
Tabelle A-6:	Einflussgrößen zur Ermittlung der Nutzungsdauer im Ausgangsszenario	A-3
Tabelle A-7:	Einflussgrößen für die monetäre Bewertung der Kosten in der Entstehungsphase im Ausgangsszenario	A-3
Tabelle A-8:	Einflussgrößen für die monetäre Bewertung der Kosten in der Betriebsphase im Ausgangsszenario	A-4
Tabelle A-9:	Einflussgrößen für die monetäre Bewertung der Kosten in der Verwertungsphase im Ausgangsszenario	A-4
Tabelle A-10:	Änderungen der betrieblichen Rahmenbedingungen für Ausgangsszenario mit FTF	A-4

Anhang A Einflussgrößen für Ausgangsszenario

Dieser Anhang listet die Einflussgrößen für das Ausgangsszenario der Szenarioanalyse (s. Abschnitt 8.2) für die Evaluation des multikriteriellen Vorgehensmodells. Die zusätzlichen blauen Werte stellen hierbei die Änderung der Ausgangssituation für die Automatisierung durch einen FTF-Einsatz dar. Die folgenden Tabellen sind in der identischen Reihenfolge wie in Kapitel 7.2 angeordnet.

Tabelle A-1: Einflussgrößen für die Bewertung des Lastprofils im Ausgangsszenario

Einflussgröße	Kategorie PbB/LIB/BzS
A - Lastschwerpunktstand	-
A - Anbaugeräte	III
B - Fahrwege	I
B - Steigungen	III
B - Umgebung	I
C - Kraftstoff-/Batteriestromverbrauch (sofern nicht berücksichtigt)	-
C - Einsatzintensität	II
C - Schichtbetrieb (sofern nicht berücksichtigt)	-

Tabelle A-2: Einflussgrößen für die energetische Bewertung des Ausgangsszenarios

Einflussgröße	PbB	LIB	BzS
$E_{FFZ,Testzyklus}$ Energiebedarf FFZ (DIN/VDI-Testzyklus) in kWh	1,16		
$E_{Standby,FFZ}$ (Standby-)Energiebedarf Zusatzverbraucher in kWh	0,04 +0,30		
$\eta_{ESS,ges}$ Wirkungsgrad ESS	0,70	0,90	0,45
$k_{Wirkung}$ Wirkungsgradreduzierung je 1000 Bh	-	-	-
$\eta_{Ladetechnologie}$ Wirkungsgrad Ladeinfrastruktur	0,78	0,92	-
U_{Nenn} Nennspannung des ESS in V	24	24	24
K_{Nenn} Nennkapazität des ESS in Ah	345	410	-
k_{DOD} Entladegrad bei PbB/LIB	0,7	0,85	-
k_{Laden} Ladefaktor bei PbB/LIB	1,8	1,4	-
m_{BzS} H ₂ -Tankkapazität des BzS in kg	-	-	0,7
$P_{Ladegerät}$ Max. Leistung des PbB/LIB-Ladegeräts in kW	8,464	7,5	-
$k_{Gleichzeitigkeit}$ Gleichzeitigkeitsfaktor beim Laden von PbB/LIB	0,333	0,9	-
$k_{Ladestrategie}$ Faktor für die Berücksichtigung der Ladestrategie	-	0,25	-
I_{Laden} Ladestrom in A	-	220	-
U_{Laden} Ladespannung in V	-	24	-
$E_{Standby,Infra}$ Standby-Verbrauch Infrastruktur in kWh	0,01	0,01	0,2
$E_{Verdichter}$ Energiebedarf Verdichter je kg H ₂ in kWh	-	-	1,58
$E_{Dispenser}$ Energiebedarf Dispenser in kWh	-	-	0,5
$E_{Erzeugung}$ Energiebedarf Erzeugung in kWh	-	-	0

Tabelle A-3: Einflussgrößen zu Prozesszeiten der Technologien im Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$t_{\text{Vorbereitung}}$	Vorbereitungszeit für Wechsel, Laden, Tanken in s	35	30	25
t_{Warten}	Wartezeit für Wechsel, Tanken in s	120	-	5
t_{Einfahrt}	Ein-/Ausfahrtszeit Wechselbereich in s	10	-	-
$t_{\text{Nachbereitung}}$	Nachbereitungszeit für Wechsel, Laden, Tanken in s	70	30	10
$t_{\text{Wasserstand}}$	Prüfen Wasserstand und Nachfüllen bei PbB in s	20	-	-
t_{Wechsel}	Wechselzeit für Batterie in s	240	-	-
t_{Tanken}	Tankzeit in s	-	-	120
$t_{\text{Ausfall,org,Ablauf}}$	Ablaufbedingte Ausfallzeit je Schicht in s	90	292	30
$t_{\text{Störung}}$	Störungszeit pro Schicht in s	20	210	220
$t_{\text{Instandhaltung}}$	Instandhaltungszeit pro Schicht in s	10	15	10
$t_{\text{Sichtprüfung}}$	Sicherheitsüberprüfungszeit vor Arbeitsbeginn/Start in s	30		
t_{Starten}	Einschaltverzögerung pro Einschaltvorgang in s	30		

Tabelle A-4: Einflussgrößen für die Dimensionierung der H₂-Infrastruktur im Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$k_{\text{Füllstand}}$	Füllkoeffizient	-	-	0,8
m_{Trailer}	Liefermenge bei H ₂ -Anlieferung im Trailer in kg	-	-	100
$k_{\text{Sicherheit,ND}}$	Sicherheitsfaktor für Auslegung Niederdruck-Speicher	-	-	1,5
$k_{\text{Tagesverbrauch}}$	Faktor Tagesanteil für Auslegung Hochdruck-Speicher	-	-	0,5
$\rho_{\text{Verdichter}}$	Auslastung Verdichter	-	-	0,75

Tabelle A-5: Einflussgrößen zu Flächenbedarfen im Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$A_{\text{Dispenser}}$	Fläche Dispenser in m ²	-	-	0,5
A_{FFZ}	Grundfläche des FFZ (inkl. Anhänger/Anbauten) in m ²	12		
$A_{\text{Sicherheit,Indoor}}$	Fläche für Einhaltung Sicherheitsabstand Indoor in m ²	0,2	0,5	1
$A_{\text{Verdichter}}$	Fläche Verdichter in m ²	-	-	15
$A_{\text{Niederdruck}}$	Fläche Niederdruckspeicher in m ²	-	-	20
$A_{\text{Hochdruck}}$	Fläche Hochdruckspeicher in m ²	-	-	40
$A_{\text{Bereitstellung}}$	Fläche für Bereitstellung bzw. Erzeugung von H ₂ in m ²	-	-	40
$A_{\text{Sicherheit,Outdoor}}$	Fläche für Einhaltung Sicherheitsabstand Outdoor in m ²	-	-	20
$A_{\text{Ladegerät}}$	Fläche des Ladegeräts in m ²	0,2	0,2	0,2
A_{ESS}	Grundfläche des ESS in m ²	0,4		0,4
$A_{\text{Wechseltechnik}}$	Fläche für Wechseltechnik PbB in m ²	20		20
$A_{\text{Arbeitsbereich}}$	Fläche des Arbeitsbereichs PbB in m ²	30		30
A_{Wasser}	Fläche für den Wasserprozess PbB in m ²	5		5

Tabelle A-6: Einflussgrößen zur Ermittlung der Nutzungsdauer im Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$t_{\text{Nutzungsdauer,FFZ,Herst}}$	Herstellerangabe Nutzungsdauer FFZ in Bh	10.000		
$t_{\text{Nutzungsdauer,ESS,Herst}}$	Herstellerangabe Nutzungsdauer ESS in Bh	6.000	10.000	20.000
$t_{\text{Nutzungsdauer,Infra}}$	Nutzungsdauer für Infrastruktur in a	10	10	14

Tabelle A-7: Einflussgrößen für die monetäre Bewertung der Kosten in der Entstehungsphase im Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
K_{Planung}	Planungskosten in €	15.000	6.000	15.000
$K_{\text{Personal,h}}$	Personalkosten je Stunde in €	20		
K_{Schulung}	Schulungskosten (Einzelpreis) in €	-	-	180
$K_{\text{FFZ,Grundpreis}}$	FFZ-Grundpreis in €	10.000		
$K_{\text{FFZ,Ausstattung}}$	Kosten FFZ-Ausstattung in €	2.000		
$K_{\text{FFZ,Umbau}}$	Kosten FFZ-Umbau in €	100 +12.000		
$K_{\text{FFZ,H2ready}}$	Kosten FFZ H2-Ready in €	350		
$K_{\text{FFZ,Garantie}}$	Kosten FFZ-Garantie in €	-		
$K_{\text{ESS,Grundpreis}}$	ESS-Grundpreis in €	1.500	7.000	10.000
$K_{\text{ESS,Ausstattung}}$	Kosten ESS-Ausstattung in €	-	-	-
$K_{\text{ESS,Garantie}}$	Kosten ESS-Garantie in €	-	-	-
$K_{\text{Ladegerät}}$	Kosten je Ladegerät in €	500	4.000	-
$K_{\text{Wechseltechnik}}$	Kosten für Wechseltechnik in €	40.000	-	-
$K_{\text{Infra,Sonstige}}$	Sonstige Infrastrukturkosten in €	117.000	42.000	-
$K_{\text{Erzeugung}}$	Kosten Elektrolyseur in €	-	-	0
$K_{\text{Niederdruck}}$	Kosten Niederdruckspeicher in €	-	-	40.000
$K_{\text{Hochdruck}}$	Kosten Hochdruckspeicher in €	-	-	20.000
$K_{\text{Betankungsanlage}}$	Kosten Betankungsanlage in €	-	-	600.000
$K_{\text{Dispenser}}$	Kosten Dispenser in €	-	-	40.000
K_{Bau}	Baukosten in €	400.000	200.000	120.000
$K_{\text{Versorgung,Infra}}$	Kosten für Anbindung an Versorgung in €			
$K_{\text{Entsorgung,Infra}}$	Kosten für Anbindung an Entsorgung in €			
$K_{\text{Netzinfrastuktur}}$	Kosten für Aufbau der Netzinfrastuktur in €			
$t_{\text{Inbetr,Infra}}$	Zeit für Inbetriebnahme Infrastruktur in s			
$K_{\text{Personal,Inbetr,Infra,h}}$	Personalkosten Inbetriebnahme Infrastruktur in €			
$K_{\text{Reise,Inbetr}}$	Reisekosten Inbetriebnahme in €			
$t_{\text{Betriebsmittel}}$	Zeitbedarf Betriebsmittel in s			
$K_{\text{Betriebsmittel,h}}$	Kosten für Betriebsmittel je Stunde in €			
K_{Werkzeug}	Kosten für Werkzeug in €			
K_{RHB}	Kosten Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe in €	0,5 +15	0,5 +15	1 +15
$t_{\text{Inbetr,FFZ}}$	Zeit für Inbetriebnahme FFZ mit ESS in h	50		
$K_{\text{Personal,Inbetr,FFZ,h}}$	Personalkosten Inbetriebnahme FFZ/ESS in €	5.000	5.000	15.000
$K_{\text{Gutachten}}$	Kosten für Gutachten in €	10.000		
$K_{\text{Genehmigung}}$	Kosten für Genehmigungen in €			

Tabelle A-8: Einflussgrößen für die monetäre Bewertung der Kosten in der Betriebsphase im Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$K_{m^2,Indoor}$	Flächenkosten Indoor je m ² pro Jahr in €/m ²		80	
$K_{m^2,Outdoor}$	Flächenkosten Outdoor je m ² pro Jahr in €/m ²		10	
$K_{E,leist/kW}$	Stromkosten Leistungspreis in €/kW		80	
$K_{E,arbeit/kWh}$	Stromkosten Arbeitspreis je kWh in €/kWh		0,20	
$K_{E,kundenabh}$	Stromkosten Kundenabhängiger Grundpreis in €/a		30.000	
$k_{Grundpreis,FFZ}$	Anteil der FFZ an kundenabh. Grundpreis in €		0,30	
$K_{Anlieferung,H2}$	Kosten für H ₂ -Anlieferung in €/kg	-	-	5
$K_{Wasserstoff/kg}$	Wasserstoffkosten je kg in €/kg	-	-	10
$K_{Wartung,FFZ}$	Wartungskosten FFZ in €/a			
$K_{Instand,plan,FFZ}$	Kosten planmäßige Instandhaltung FFZ in €/a	49.500	58.000	45.500
$K_{Instand,außerplan,FFZ}$	Kosten außerplanmäßige Instandhaltung FFZ in €/a			
$K_{Wartung,ESS}$	Wartungskosten ESS in €/a			
$K_{Instand,plan,ESS}$	Kosten planmäßige Instandhaltung ESS in €/a	42.250	17.400	91.000
$K_{Instand,außerplan,ESS}$	Kosten außerplanmäßige Instandhaltung ESS in €/a			
$K_{Wartung,Infra}$	Wartungskosten Infrastruktur in €/a			
$K_{Instand,plan,Infra}$	Kosten planmäßige Instandhaltung Infrastr. in €/a	10.000	50.000	60.000
$K_{Instand,außerplan,Infra}$	Kosten außerplanm. Instandhaltung Infrastr. in €/a			
$K_{CO2-Abgabe}$	Kosten für CO ₂ -Zertifikate sowie CO ₂ -Steuern in €/t	-	-	-
$K_{Versicherung}$	Kosten für Versicherungen / Wagnisse in €/a	-	-	-

Tabelle A-9: Einflussgrößen für die monetäre Bewertung der Kosten in der Verwertungsphase im Ausgangsszenario

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$K_{Rückbau}$	Kosten Rückbau in €	-	-	-
$K_{Sonstige,Verwertung}$	Sonstige Verwertungskosten in €	-	-	-
$K_{Gutachten}$	Kosten für Gutachten in €		5.000	
$K_{Genehmigung}$	Kosten für Genehmigungen in €		0	
$K_{Restwert,FFZ}$	Restwert/Schrottwert je FFZ in €		170	

Tabelle A-10: Änderungen der betrieblichen Rahmenbedingungen für Ausgangsszenario mit FTF

Einflussgröße		PbB	LIB	BzS
$n_{FFZ,Plan,initial}$	Initial geplante Anzahl FFZ zur Leistungserfüllung		90	
n_{FTF}	Anzahl der eingeplanten autonomen FFZ		90	
$n_{MA,HLT}$	Anzahl MA Wechseln/Tanken/Laden je Schicht	1,78	0,73	0,60