

EIKPI **Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität** **FAPS** Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Rahmenbedingungen KPI Technologisch Ökologisch Ökonomisch Über DE EN

Methode

Arbeitskonzept: BEV
 Objekt: Fahrzeug - Infotrafik
 Anwendung: PKW
 Wirtschaftsbereich: Deutschland
 Stand der Technik: Stand der Technik
 Zeitpunkt: 2020
 Blasenraum: T1W
 Funktionsabstufung: 100 km
 Diagrammtyp: Wasserfalldiagramm

Wirkungsgrad

Rahmenbedingungen

Stand der Technik: Stand der Technik

Ergebnis: Technisch Wünschenswertabhängig

Table:

ID	Parameter	Material	Ressource
0011	air_length_bv		1.04
0070	infiln_verification_bv		2.0
0071	drag_coefficient_bv		0.2
0072	rolling_resistance_coefficient_bv		0.09
0073	rotating_mass_surcharge_factor_bv		0.01
0074	air_density		1.2
0075	g_force_max		9.8
0076	wheel_radius_bv		0.3
1000	product_structure_electricity		hydro power 0.11 photovoltaics 0.06 wind power 0.01

FAU Studien aus dem Maschinenbau 412

Michael Weigelt

Multidimensionale Optionenanalyse
 alternativer Antriebskonzepte für die
 individuelle Langstreckenmobilität

Michael Weigelt

Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für
die individuelle Langstreckenmobilität

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 412

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Michael Weigelt

Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und
Produktionssystematik (FAPS)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen
FAU University Press
2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Weigelt, Michael. 2022. *Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 412. Erlangen: FAU University Press.
DOI: 10.25593/978-3-96147-608-4.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-607-7 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-608-4 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-608-4

**Multidimensionale Optionenanalyse alternativer
Antriebskonzepte für die individuelle
Langstreckenmobilität**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Michael Weigelt, M.Sc., M.Sc.

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 08.08.2022

Gutachter: Prof. Dr. -Ing. J. Franke
Prof. Dr. -Ing. M. Lienkamp, TU München

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt dem Ordinarius des Lehrstuhls Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Franke für die engagierte Förderung meiner Arbeit, die mir gewährte wissenschaftliche Freiheit und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Die zahlreichen fordernden Diskussionen über neue Forschungsvorhaben, Forschungsschwerpunkte und Publikationen haben entscheidend zu meiner fachlichen, aber auch zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen. Danken möchte ich ihm auch für seine Rolle als Erstgutachter in diesem Promotionsverfahren.

Herrn Professor Dr.-Ing. Markus Lienkamp, Ordinarius des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme der Rolle des Korreferenten. Außerdem danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Kai Willner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Martin März für sein Engagement als weiteres Mitglied der Prüfungskommission.

Allen meinen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere aus dem Forschungsbereich Elektromaschinenbau, danke ich für die stets sehr gute und produktive Zusammenarbeit, die konstruktiven fachlichen Diskussionen, die große Hilfsbereitschaft und gegenseitige Unterstützung in den zahlreichen gemeinsamen Projekten und die schöne gemeinsame Zeit.

Auch möchte ich mich bei allen Studierenden bedanken, die mich im Rahmen ihrer Tätigkeiten am Lehrstuhl unterstützt und so einen wichtigen Beitrag zur Entstehung dieser Arbeit geleistet haben.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie, auf deren Rückhalt und Unterstützung ich mich während meines langen Bildungsweges immer verlassen konnte.

Nürnberg, im September 2022

Michael Weigelt

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Analyse des Lösungsraums der Antriebskonzepte	7
2.1 Infrastruktur zur Bereitstellung von Sekundärenergieträgern...8	
2.1.1 Sekundärenergieträger	10
2.1.2 Energiespeisung	17
2.2 Antriebsstrangkomponenten zur Wandlung der Sekundärenergieträger in Vortrieb	25
2.2.1 Energiespeicher	27
2.2.2 Energiewandler	33
2.2.3 Kennungswandler	38
3 Notwendigkeit einer Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte	43
3.1 Kriterien der Technologiebewertung	47
3.1.1 Bewertung des Energiebedarfs von Kraftfahrzeugen	49
3.1.2 Ökologische Bilanzierung und Wirkungsindikatoren	51
3.1.3 Lebenszykluskosten	56
3.2 Mehrdimensionale Technologiebewertung	58
3.3 Analyse bestehender Antriebskonzeptbewertungen	60
3.3.1 Zielsetzung	62
3.3.2 Lösungsraum	63
3.3.3 Bilanzraum	65
3.3.4 Daten	68
3.3.5 Bewertungskriterien	69
3.4 Forschungsbedarf	71

4	Multidimensionale Vergleichsmethodik.....	73
4.1	Definition und Strukturierung des Problems	74
4.1.1	Zielsetzung und Annahmen.....	74
4.1.2	Kennzahlensystembildung.....	76
4.1.3	Rahmenbedingungen	80
4.1.4	Infrastrukturdimensionierung.....	94
4.2	Folgenabschätzung am Beispiel des BEV-Antriebskonzepts....	96
4.2.1	Technologisch.....	96
4.2.2	Ökologisch.....	103
4.2.3	Ökonomisch	110
4.3	Automatisierung durch E KPI-Webapplikation	115
4.3.1	Client-Server-Architektur	117
4.3.2	Relationale Datenbank zur Strukturierung der Rahmenbedingungen	118
4.3.3	Geschäftslogik zur Kennzahlenberechnung.....	119
5	Antriebskonzeptvergleich für einen PKW im Wirtschaftsraum Deutschland	121
5.1	Technologisch.....	121
5.1.1	Fahrzeugmasse und gravimetrische Leistungsdichte	121
5.1.2	Fahrenergiebedarf und -reichweite	123
5.1.3	Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs	126
5.2	Ökologisch.....	128
5.2.1	Kumulierter Energieaufwand.....	128
5.2.2	Kumulierte Rohstoffdissipation.....	130
5.2.3	Globales Erwärmungspotential.....	132
5.3	Ökonomisch	134
5.3.1	Kostenstruktur der Fahrzeugproduktion	134
5.3.2	Infrastruktur- und Energiekosten.....	135
5.3.3	Lebenszykluskosten.....	137
5.4	Multidimensionaler Antriebskonzeptvergleich	139
5.4.1	Stand der Technik	139
5.4.2	Technologisches Potential	141

6	Sensitivitätsanalyse ausgewählter Rahmenbedingungen.....	145
6.1	Entwicklung der Akkumulortechnologie.....	145
6.2	Alternative Antriebskonzepte für Nutzfahrzeuge.....	148
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	153
8	Summary and outlook.....	155
	Anhang.....	157
	Literaturverzeichnis.....	177

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
A_{BF}	m^2	Fahrzeugstirnfläche
AHK	€	Anschaffungskosten
AK	$€h^{-1}$	Kosten Arbeitsstunde
AZ_{WV}	h	Arbeitszeit Maßnahme
a	ms^{-2}	Beschleunigung Fahrzyklus
E_{elH}	%	Elektrische Hilfsenergie
		Infrastrukturkomponente
E_H	%	Hilfsenergie Infrastrukturkomponente
Em^{-1}	$kWhkg^{-1}$	Gravimetrische Energiedichte
$(Em^{-1})_{BF}$	$kWhkg^{-1}$	Produktionsenergiebedarf Basisfahrzeug
EK	€	Energiekosten
C	kWh	Kapazität
$c_{w,BF}$	-	Luftwiderstandsbeiwert
D	km	Referenzfahrdistanz
DTV_{AB}	$Mio. kmh^{-1}$	Durchschnittsverkehrsstärke AB
F_L	N	Luftwiderstand
F_R	N	Rollwiderstand
F_{St}	N	Steigungswiderstand
F_B	N	Beschleunigungswiderstand
F_{Re}	N	Rekuperationswiderstand
F_G	N	Gesamtfahrwiderstand
$FuEGK$	%	F&E Gemeinkostenzuschlag
$f(ND)_{BF}$	-	Restwertfaktor Basisfahrzeug
$f_{R,BF}$	-	Rollwiderstandsbeiwert
G	%	Gewinnzuschlag
$GG_{v,max}$	-	Hochgeschwindigkeitsgüteindex
GWP	$gCO_2ä$	Globales Erwärmungspotential
GWP_E	$gCO_2äkm^{-1}$	GWP Entsorgung
GWP_H	$gCO_2äkm^{-1}$	GWP Herstellung
GWP_{Inf}	$gCO_2äkm^{-1}$	GWP Infrastrukturherstellung
GWP_M	$gCO_2äkm^{-1}$	GWP Materialbereitstellung
GWP_{TtW}	$gCO_2äkm^{-1}$	Fahrzeugseitiges GWP Fahrbetriebs
GWP_{WtT}	$gCO_2äkm^{-1}$	Infrastrukturseitiges GWP Fahrbetriebs

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

GWP_{WtW}	$gCO_2\ddot{a}km^{-1}$	GWP Fahrbetriebs
GWP_{WV}	$gCO_2\ddot{a}km^{-1}$	GWP Wartungs- und Verschleißmaßnahmen
GWP_B	%	GWP Recyclinggutschrift
g	ms^{-2}	Schwerebeschleunigung
g_U	-	Nutzungsgrad
H_i	$kWhkg^{-1}$	Heizwert Brennstoff
HK	€	Herstellungskosten
HK_{BF}	€	Herstellungskosten Basisfahrzeug
h	m	Höhenlage Fahrzyklus
K_{Inf}	$€a^{-1}$	Jährliche Kosten Infrastruktur
K_{Laden}	$€a^{-1}$	Jährliche Kosten Ladeinfrastruktur
KE^{-1}	$€kWh^{-1}$	Energiespezifische Kosten
KEA	$Whkm^{-1}$	Kumulierter Energieaufwand
KEA_E	$Whkm^{-1}$	KEA Entsorgung
KEA_H	$Whkm^{-1}$	KEA Herstellung
KEA_N	$Whkm^{-1}$	KEA Nutzung
KEA_{WV}	$Whkm^{-1}$	KEA Wartungs- und Verschleißmaßnahmen
KP^{-1}	$€kW^{-1}$	Leistungsspezifische Kosten
KRA	kg	Kumulierter Rohstoffaufwand
KRA_{Fzg}	kg	KRA Fahrzeugherstellung
KRA_H	kg	KRA Herstellung
KRA_{Inf}	kg	KRA Infrastrukturherstellung
KRA_{WtW}	kg	KRA Fahrbetriebs
KRA_{WV}	kg	KRA Wartungs- und Verschleißmaßnahmen
KRD	km^{-17}	Kumulierte Rohstoffdissipation
L	mm	Gesamtlänge elektrische Maschine
L_{AB}	$Tsd. km$	Länge AB Netz
LC	km	Laufleistung bis Maßnahme
l	km	Länge Straßenabschnitt
l_a	mm	Aktive Maschinenlänge
l_W	mm	Wickelkopfhöhe
LCC	€	Life Cycle Costs
LL_{BF}	kma^{-1}	Laufleistung Basisfahrzeug
LZ	h	Gesamtzeit Lade- oder Tankvorgang
LZK	€	Lebenszykluskosten
Mm^{-1}	%	Materialzusammensetzung
$(Mm^{-1})_{BF}$	%	Materialzusammensetzung Basisfahrzeug

MK_{WV}	€	Materialkosten Maßnahme
MP^{-1}	$kgkW^{-1}$	Leistungsspezifische Materialzusammensetzung
MR	%	Materialressourcenzuordnung
M_{rec}	%	Materialrecycling
MSV_{AB}	$Mio. kmh^{-1}$	Bemessungsverkehrsstärke AB
MSV_{PKW}	kmh^{-1}	Bemessungsverkehrsstärke PKW
M_v	%	Materialverlust
m	kg	Masse
m_{BF}	kg	Masse Basisfahrzeug
m_{Fzg}	kg	Fahrzeug
m_K	kg	Masse Antriebsstrangkomponente
m_{ZL}	kg	Masse Zuladung
\dot{m}	$kg s^{-1}$	Massenstrom
ND	a	Nutzungsdauer
ND_{BF}	a	Nutzungsdauer Basisfahrzeug
n	-	Anzahl verschleißbedingter Bauteilwechsel
n_{AB}	-	Durchschnittliche Spurenanzahl AB
n_{LP}	-	Anzahl Ladepunkte
P	kW	Leistung
$P_{ab,th}$	kW	Theoretisch erforderliche Fahrleistung
P_{eff}	%	Leistungsanpassung
$P_{el,netto}$	kW	Abgehende elektrische Leistung
P_G	kW	Gesamtfahrwiderstandsleistung
P_N	kW	Nennleistung
$P_{max} P^{-1}$	-	Überlastbarkeit
P_{Mot}	kW	Motorleistung
Pm^{-1}	Wkg^{-1}	Gravimetrische Leistungsdichte
$P_{N,BF}$	kW	Nennleistung Basisfahrzeug
R	km	Fahrreichweite
Res	t	Rohstoffressourcen
RW	€	Restwert
THG	gkm^{-1}	Treibhausgasemissionen
TL	$kWkm€^{-1}g^{-1}$	Technologische Leistungsfähigkeit
t	s	Zeitpunkt Fahrzyklus
$t_{St} t^{-1}$	%	Anteil energiebedingter Fahrstopps
$U_{Entladen}$	V	Entladespannung
U_{Laden}	V	Ladespannung

$VVGK$	%	Verwaltung- und Vertriebsgemeinkostenzuschlag
v	ms^{-1}	Geschwindigkeit Fahrzyklus
\bar{v}	ms^{-1}	Mittlere Reisegeschwindigkeit
$W_{ab,th}$	kWh	Theoretisch abgeführte Energie
W_{in}	kWh	Brennstoffeinsatz
$W_{el,netto}$	kWh	Nutzbare elektrische Energie
W_{Rad}	kWh	Aufzubringende Fahrenergie
WVK	€	Wartungs- und Verschleißkosten
W_{zu}	kWh	Zugeführte Energie
w_{elH}	$Whkm^{-1}$	Aufzubringende elektrische Hilfsenergie
$w_{el,netto}$	$Whkm^{-1}$	Nutzbare elektrische Energie
w_H	$Whkm^{-1}$	Aufzubringende Hilfsenergie
w_{Rad}	$Whkm^{-1}$	Aufzubringende Fahrenergie
w_{Re}	$Whkm^{-1}$	Potentielle Rekuperationsenergie
w_{TtW}	$Whkm^{-1}$	TtW Energiebedarf
w_{WtW}	$Whkm^{-1}$	WtW Energiebedarf
x	%	Anteil Energieträger an Erzeugnisstruktur
α	°	Steigungswinkel
ΔH_R	$kJmol^{-1}$	Reaktionsenthalpie
$\varepsilon_{i,BF}$	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
η	%	Wirkungsgrad
η_{el}	%	Wirkungsgrad Stromerzeugung
η_I	%	Wirkungsgrad Infrastruktur
η_{GF}	%	Gesamtfahrzeug-Wirkungsgrad
η_{Re}	%	Wirkungsgrad Rekuperation
η_{TtW}	%	Wirkungsgrad Antriebsstrang
ρ_{Luft}	kgm^{-3}	Dichte Umgebungsluft

Abkürzung	Beschreibung
AB	Autobahn
AU	Abgasuntersuchung
AEL	Alkalische Elektrolyse
ASM	Asynchronmaschine
BEV	Battery electric vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
BMS	Batteriemanagementsystem
BPP	Bipolarplatten
BZ	Brennstoffzelle
CCS	Combined Charging System
CFP	Carbon Footprint
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik In-formationstechnik in DIN und VDE
E KPI	Multikriterielle Analyse von Antriebstechnologien der individuellen Langstreckenmobilität (Forschungsprojekt)
ERM	Entity-Relationship-Modell
E ROAD	Elektrifizierte Straße mit induktiver Energieübertragung
F&E	Forschung und Entwicklung
FC	Fuel cell (Brennstoffzelle)
FCEV	Fuel cell electric vehicle (Fahrzeug mit Wasserstoffbrennstoffzelle)
GaN	Gallium Nitrid
GDL	Gasdiffusionsschicht
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstromübertragung
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTEL	Hochtemperaturelektrolyse
HU	Hauptuntersuchung
ICE	Internal combustion engine (Verbrennungsmotor)
ICE_D	Fahrzeug mit Dieselmotor
ICE_G	Fahrzeug mit Ottomotor
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode
IPT	Inductive power transfer (Induktive Energieübertragung)

JSON	JavaScript Object Notation
KFZ	Kraftfahrzeug
KPI	Key performance indicator (Kennzahl)
LCA	Life cycle assessment
LCI	Life cycle inventory
LIZ	Lithium-Ionen-Zelle
LKW	Lastkraftwagen
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute
MEA	Membran Electrode Assembly
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
NAAutomobil	Normenausschuss Automobiltechnik
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OBC	Onboard charger (Fahrzeugseitiges Ladegerät)
OTA	Office of Technology Assessment
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PKW	Personenkraftwagen
PM	Permanentmagnet
Pot	Technologisches Potential
RRW	Ressourcenreichweite
RM	Reluktanzmaschine
SAE	Society of Automotive Engineers
SiC	Siliziumkarbid
SLP	Schnellladepunkt
SM	Synchronmaschine
SoA	Stand der Technik
SoC	State of charge (Ladestand)
SQL	Structured Query Language
TAB	Büro für Technikfolgenabschätzung
TCO	Total Cost of Ownership
TCS	Total Cost of Society
THG	Treibhausgas
TtW	Tank-to-Wheel
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure
WtT	Well-to-Tank
WtW	Well-to-Wheel

WV	Wartung und Verschleiß
XML	Extensible Markup Language

Bildverzeichnis

Bild 1: Technologische Leistungsfähigkeit von Antrieb mit Ottomotor (ICE_G) und Batterieelektrischem Antrieb (BEV)	1
Bild 2: Aufbau der Arbeit.....	6
Bild 3: Energieträger und Nutzenergie über den Energiefluss eines Antriebskonzepts.....	8
Bild 4: Infrastrukturkomponenten der Antriebskonzepte.....	9
Bild 5: Anteil, Wirkungsgrad und GWP der Primärenergieträger der Stromerzeugung in Deutschland [17–26].....	11
Bild 6: Aufbau des Übertragungsnetzes in Deutschland [15].....	14
Bild 7: Ladekurven verschiedener BEV-Modelle [52].....	18
Bild 8: Anwendungsfälle konduktiver und induktiver Energieübertragung in Abhängigkeit des Bewegungszustands des Fahrzeuges nach [58, 59].....	20
Bild 9: Schema einer elektrifizierten Straße mit induktiver Energieübertragung (E ROAD).....	21
Bild 10: Fahrzeugseitiges Spulenmodul [58]	24
Bild 11: Antriebsstrangkomponenten der Antriebskonzepte	26
Bild 12: Akkumulator und dessen Bauteile [108–111].....	28
Bild 13: Wasserstoffdruckgasspeicher [133].....	32
Bild 14: Brennstoffzelle und deren Bauteile [136]	33
Bild 15: Elektrische Maschine und deren Bauteile [156]	35
Bild 16: Inverter [156, 183]	39
Bild 17: Einstufiges Getriebe in elektrischem Achsmodul [193]	41
Bild 18: Integrative Technologiebewertung im Innovationsprozess nach [205].....	44
Bild 19: Phasen der Technologiebewertung nach [203].....	46
Bild 20: Skalen zur Interpretation von Bewertungskriterien und Kennzahlen nach [211].....	49

Bild 21: Fahrwiderstände im Längsdynamikmodell zur Bestimmung des Fahrenergiebedarfs	50
Bild 22: Systemdefinition einer Ökobilanz [208]	52
Bild 23: Konzept der Wirkungsindikatoren nach [214]	53
Bild 24: Schematische Darstellung der Life Cycle Costs [221].....	57
Bild 25: Beispiel einer Nutzwertanalyse zum Vergleich von Technologiealternativen [3]	59
Bild 26: Bilanzraum des Fahrzeugbetriebs	65
Bild 27: WtT-Wirkungsgrade der BEV-Infrastruktur verschiedener Autoren [199, 233, 239-244].....	66
Bild 28: Bilanzraum des Fahrzeuglebenswegs in Anlehnung an [231, 245]	67
Bild 29: THG-Emissionen eines BEV in Abhängigkeit des Bilanzraumes verschiedener Autoren [199, 233, 236, 239-244, 246-251]	68
Bild 30: Verteilung der Bewertungskriterien über analysierte Studien [68, 69, 89, 90, 98, 102, 148, 169, 199, 224, 232-244, 246, 247, 249-254, 256-290].....	70
Bild 31: Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit.....	72
Bild 32: Aufbau der Methodik zur Bewertung von Antriebskonzepten	73
Bild 33: Inputs für Technologieszenario eines Antriebskonzepts nach [204]	75
Bild 34: Kriterien zur Bewertung von Antriebskonzepten.....	76
Bild 35: Beispielhafte hierarchische Strukturierung der Bewertungskriterien	77
Bild 36: Struktur der vierstelligen, numerischen Parameter-ID	81
Bild 37: Anteil, Wirkungsgrad und GWP der Primärenergieträger der globalen Stromerzeugung	84
Bild 38: (a) Autobahnfahrzyklus, (b) WLTP-Fahrzyklus nach [298].....	85
Bild 39: UML-Klassendiagramm endogener Rahmenbedingungen am Beispiel des BEV-Antriebskonzepts	88
Bild 40: Skalierung der aktiven Maschinenlänge la nach [305].....	89

Bild 41: Verteilung der Betriebspunkte der elektrischen Maschine: (a) im Autobahnfahrzyklus, (b) im WLTP-Fahrzyklus	90
Bild 42: Produktionsprozesskette einer elektrischen Maschine.....	91
Bild 43: Simulierte Fahrleistungen des BEV im Autobahnfahrzyklus	99
Bild 44: Gesamtfahrenergiebedarf, Umwandlungsverluste und Fahrwiderstand des BEV.....	101
Bild 45: Fahr- und energiebedingte Stoppzeit des BEV für die Referenzfahrtdistanz 1.000 km	102
Bild 46: Primärenergiebedarf, Umwandlungsverluste und Gesamtfahrwiderstand des BEV-Antriebskonzepts	103
Bild 47: Systemumgebung der ökologischen Antriebskonzeptbewertung.....	103
Bild 48: KEA des BEV-Antriebskonzepts über den Lebensweg.....	105
Bild 49: KRA des BEV-Antriebskonzepts über den Lebensweg.....	107
Bild 50: Avoided Burden Methode durch Gutschrift nach [300].....	109
Bild 51: GWP des BEV-Antriebskonzepts über den Lebensweg.....	110
Bild 52: Anschaffungskosten des BEV.....	111
Bild 53: Infrastrukturkosten des BEV.....	112
Bild 54: Energiekosten des BEV gegenüber Strompreisstruktur, Daten Strompreis [318]	113
Bild 55: Inspektions-, Wartungs- und Verschleißkosten des BEV über den Lebensweg.....	114
Bild 56: Lebenszykluskosten des BEV.....	114
Bild 57: UML-Anwendungsfalldiagramm E KPI-Webapplikation.....	115
Bild 58: Schema der Benutzeroberfläche der E KPI-Webapplikation.....	116
Bild 59: Blockdiagramm der E KPI-Webapplikation	117
Bild 60: Entity-Relationship-Modell (ERM) der relationalen Datenbank zur Strukturierung der Rahmenbedingungen (RB).....	118
Bild 61: Vereinfachtes Klassendiagramm der Geschäftslogik zur Kennzahlenberechnung.....	120
Bild 62: Fahrzeugmassen der Antriebskonzepte	122

Bild 63: Gravimetrische Leistungsdichten der Gesamtfahrzeuge je Antriebskonzept	123
Bild 64: Gesamtfahrenergiebedarf der Antriebskonzepte	123
Bild 65: Luftwiderstand in Abhängigkeit des Luftwiderstandsbeiwertes für Autobahnfahrzyklus.....	124
Bild 66: Fahrreichweite und energiebedingte Fahrstopps der Antriebskonzepte bei Langstreckenfahrt von 1.000 km.....	125
Bild 67: Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs der Antriebskonzepte	126
Bild 68: Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs der technologischen Potentiale der Antriebskonzepte zum Vergleichszeitpunkt 2020 und 2050	127
Bild 69: Primärenergiebedarf der Fahrzeugherstellung der Antriebskonzepte.....	128
Bild 70: Kumulierter Energieaufwand der Antriebskonzepte.....	129
Bild 71: Kumulierter Rohstoffaufwand der Antriebskonzepte	130
Bild 72: Ressourcenindividuelle Kritikalität und kumulierte Rohstoffdissipation der Antriebskonzepte	131
Bild 73: Globales Erwärmungspotential der Antriebskonzepte	132
Bild 74: Globales Erwärmungspotential der Antriebskonzepte des Lösungsraums über die Fahrleistung.....	133
Bild 75: Anschaffungskosten der Antriebskonzepte	134
Bild 76: Infrastruktur- und Energiekosten der Antriebskonzepte.....	135
Bild 77: Selbstkosten der Infrastruktur gegenüber Energiepreisen des Wirtschaftsraums, Daten Energiepreise [55, 318, 322]	136
Bild 78: Wartungs- und Verschleißkosten der Antriebskonzepte.....	137
Bild 79: Lebenszykluskosten der Antriebskonzepte	138
Bild 80: Lebenszykluskosten der Antriebskonzepte über Laufleistung...	138
Bild 81: Profildiagramm des Kennzahlensystems für den Stand der Technik in 2020.....	140
Bild 82: Profildiagramm des Kennzahlensystems für das technologische Potential in 2030	142

Bild 83: Kosten, gravimetrische Energiedichte und globale Produktionskapazitäten von Akkumulatoren mit LIZ [113, 116, 132, 324]	145
Bild 84: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte in Abhängigkeit der Fahrzeuglaufleistung und des Akkumulatorverschleißes.....	147
Bild 85: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte in Abhängigkeit der Akkumulatorkosten und des Energiebedarfs der Zellproduktion.....	148
Bild 86: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit der Energiedichte des Akkumulators	149
Bild 87: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit der Fahrzeuglaufleistung und des Akkumulatorverschleißes.....	150
Bild 88: Transportzeit der Antriebskonzepte für schwere LKW bei Langstreckenfahrt von 3.000 km.....	150
Bild 89: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit von Übertragungswirkungsgrad und längenabhängigen Investitionskosten der E ROAD.....	151

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Internationale Standards für IPT-Systeme seit 2010	22
Tabelle 2: Kennzahlen zur Quantifizierung von Bewertungskriterien nach [210]	48
Tabelle 3: Merkmale methodischer Antriebskonzeptbewertungen	61
Tabelle 4: Technologische Dimension des Kennzahlensystems.....	78
Tabelle 5: Ökologische Dimension des Kennzahlensystems	78
Tabelle 6: Ökonomische Dimension des Kennzahlensystems	79
Tabelle 7: Struktur der Rahmenbedingungen	80
Tabelle 8: Exogene Rahmenbedingungen zur Definition des PKW- Basisfahrzeuges.....	82
Tabelle 9: Weitere exogene Rahmenbedingungen des Wirtschaftsraums.....	86
Tabelle 10: Elektrische Maschine	88
Tabelle 11: Stator.....	92
Tabelle 12: BEV-Ladepunkt.....	93
Tabelle 13: Dimensionierung und Umlage des Infrastrukturaufwands auf Fahrkilometer	94
Tabelle 14: Erforderliche Schnellladepunkte (SLP) verschiedener Autoren	95
Tabelle 15: Anforderung an E KPI-Webapplikation	115
Tabelle 16: Datengrundlage zur Darstellung der technologischen Leistungsfähigkeit der Antriebstechnologien ICE_G und BEV....	157
Tabelle 17: Exogene Rahmenbedingungen der globalen Stromerzeugung.....	157
Tabelle 18: Exogene Rahmenbedingungen zur Definition der Material- und Ressourcensituation	159
Tabelle 19: Exogene Rahmenbedingungen der Zuschlagkalkulation	159
Tabelle 20: Exogene Rahmenbedingungen der lokalen Stromerzeugung.....	160

Tabelle 21: Stromnetz	162
Tabelle 22: E ROAD.....	162
Tabelle 23: Wasserstoffelektrolyse.....	163
Tabelle 24: Pipelinedistribution (Wasserstoff).....	163
Tabelle 25: Tankstelle (Wasserstoff).....	163
Tabelle 26: Förderung und Transport (Rohöl)	164
Tabelle 27: Raffinerie (Ottokraftstoff)	164
Tabelle 28: LKW-Distribution (Ottokraftstoff).....	165
Tabelle 29: Tankstelle (Ottokraftstoff).....	165
Tabelle 30: Akkumulator	165
Tabelle 31: Wasserstofftank.....	167
Tabelle 32: IPT-Spulenmodul.....	167
Tabelle 33: Brennstoffzelle	168
Tabelle 34: Inverter	169
Tabelle 35: Elektrischen Maschine (Fortsetzung)	170
Tabelle 36: Einstufiges Getriebe.....	171
Tabelle 37: PKW-Basisfahrzeug (Fortsetzung)	172
Tabelle 38: Nutzfahrzeug	175

1 Einleitung

Der Verbrennungskraftmotor (internal combustion engine ICE) ist seit über 100 Jahren die etablierte Antriebstechnologie für die individuelle motorisierte Mobilität [2]. In dieser Funktion stößt der ICE an die Grenzen seiner technologischen Leistungsfähigkeit. Diese Entwicklung ist anhand des S-Kurven-Konzepts nach Foster darstellbar. Demnach wird eine Technologie über ihren Anwendungszeitraum kontinuierlich verbessert, bis schließlich technische Leistungsgrenzen erreicht sind. Die technologische Leistungsfähigkeit über den kumulierten Forschungs- und Entwicklungsaufwand oder vereinfachend die Zeit aufgetragen, ergibt für die einzelne Technologie eine Kurve mit dem namensgebenden, s-förmigen Verlauf. [3]

Noch vor dem Erreichen der Leistungsgrenzen ist der Übergang auf eine Substitutionstechnologie einzuleiten. Indiz für den optimalen Übergangszeitpunkt ist, dass Forschungs- und Entwicklungsaufwände nur noch zu marginalen Steigerungen der technologischen Leistungsfähigkeit beitragen und sich zunehmend ein konstantes Reifegradniveau einstellt [4]. Beim ICE als Antriebstechnologie für die individuelle motorisierte Mobilität scheint dieses Plateau der technologischen Leistungsfähigkeit erreicht.

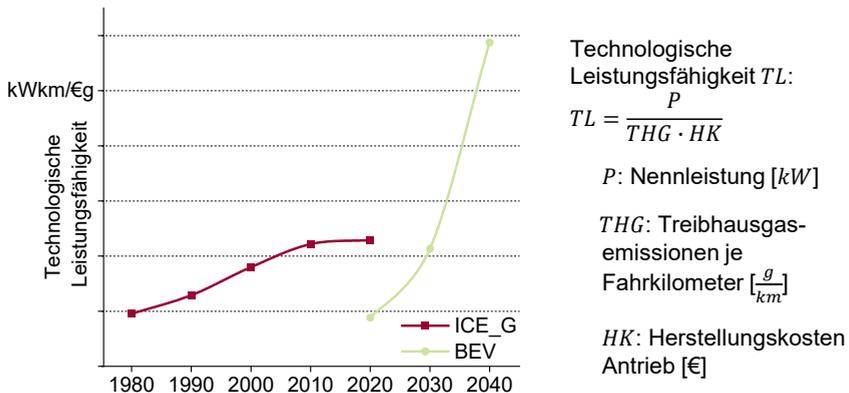


Bild 1: Technologische Leistungsfähigkeit von Antrieb mit Ottomotor (ICE_G) und Batterieelektrischem Antrieb (BEV)

Die technologische Leistungsfähigkeit ist jedoch nicht direkt messbar, sondern hinsichtlich verschiedener Kriterien zu bestimmen. So drückt sich die ökologische Leistungsfähigkeit unter anderem durch Energie- und Ressourcenbedarf sowie entstehende Emissionen aus, während für die ökonomische Leistungsfähigkeit Anschaffungs- und Betriebskosten entscheidend sind. In Bild 1 ist die technologische Leistungsfähigkeit über die reziproken

Treibhausgasemissionen und Herstellungskosten, multipliziert mit der Leistung des Antriebsstrangs dargestellt.

Der abflachende Verlauf der S-Kurve des Antriebs mit Ottomotor deutet an, dass die Leistungsfähigkeit der Technologie nur noch unter umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen und mit ingenieurtechnischer Raffinesse weiter ausreizbar ist. Die etablierte Automobilindustrie sieht sich daher vor Herausforderungen:

Es bestehen kundenseitige Anforderungen an die Antriebstechnologie wie zunehmende Aggregatsleistung, auch durch den anhaltenden Trend zu Stadtgeländewagen, Erschwinglichkeit und geringem Kraftstoffverbrauch. Höhere Aggregatsleistungen führen jedoch zu steigenden Kraftstoffverbräuchen und Fahremissionen. Durch strenger werdende Abgasgrenzwerte stellt der Gesetzgeber zusätzliche Anforderungen an die Antriebstechnologie, die nur durch aufwändige Maßnahmen zur Verbrauchs- und Abgasreduktion einhaltbar sind.

Die Auswirkungen sind bereits erkennbar: Bei Fahrzeugen mit geringen Deckungsbeiträgen ist die moderne Motor- und Abgastechnologie nicht mehr rentabel darstellbar. So werden ehemals erfolgreiche Serien der Kleinwagenklasse wie der Volkswagen UP oder der Opel Adam auslaufen oder aber elektrifiziert aufgesetzt. [5]

Eine nicht marktwirtschaftliche Folge war die zunehmende Verfälschung der Prüfverfahren zur Messung der Fahrzeugemissionen und damit der technologischen Leistungsfähigkeit. So lag der Unterschied zwischen den tatsächlichen Fahrzeugemissionen und der Herstellerangabe in 2013 bei einem Spitzenwert von 38 % [6]. Mit der Einführung des Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure (WLTP) in 2017 konnte die Abweichung reduziert werden. Bei den Schadstoffemissionen von Verbrennerfahrzeugen führte die Lücke zwischen angestrebter technologischer Leistungsfähigkeit und leistbarem Entwicklungsaufwand schließlich zu einem branchenweiten Betrugsfall, dem „Dieselskandal“. So setzten Autohersteller jahrelang bei Dieselfahrzeugen Software ein, welche die Schadstoffgrenzwerte nur in der Prüfstandssituation einhielt, im normalen Fahrbetrieb aber um das Vielfache überschritt. [7]

Eine ganze Branche versucht so, trotz ausgeschöpfter Entwicklungspotentiale, den raschen Übergang auf Substitutionstechnologien zu verzögern. Die Ursache dafür ist ebenso anhand des S-Kurven-Konzepts erklärbar: Der Theorie nach unterschreitet die Substitutionstechnologie zunächst die

Leistungsfähigkeit der etablierten Technologie. Ebenso wird der kumulierte Forschungs- und Entwicklungsaufwand an der etablierten Technologie für die Substitutionstechnologie weitgehend wertlos. Konkretisiert für den Fahrzeugantrieb gibt die etablierte Automobilindustrie mit dem Technologiewechsel ihren technologischen Vorsprung sowie die getätigten Investitionen in Produktionsanlagen für Verbrennungsmotoren auf. Die Substitutionstechnologie ist bei Einführung nicht ebenso günstig wie die Vorgängertechnologie produzierbar. Bislang erzielbare Deckungsbeiträge mit der beherrschten Vorgängertechnologie sind für eine neue Antriebstechnologie zunächst durch Skaleneffekte zu erarbeiten. Die S-Kurve zeigt jedoch auch eindrücklich, dass langfristig die Anforderungen an eine Antriebstechnologie nur durch den technologischen Wandel erreichbar sind. Für den Antrieb der Zukunft stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Der Fokus ist auf jene zu richten, welche die maximale technologische Leistungsfähigkeit versprechen.

1.1 Problemstellung

Situation ist, dass BEV gegenüber fossilen Antriebstechnologien zunehmend an Marktanteilen gewinnen und im Dezember 2021 über 21 % der PKW Neuzulassungen ausmachen [8]. Gründe, die Kunden bislang von der Anschaffung eines BEV abhalten, sind die Anschaffungskosten, gerade für BEV mit großen Akkumulatoren, die begrenzte Fahrreichweite mit einer Ladung sowie die verfügbare Ladeinfrastruktur [9].

Für den Anwendungsfall der individuellen urbanen Mobilität sind Anforderungen lokale Emissionsfreiheit, kurze Fahrdistanzen sowie geringe Fahrzeugabmessungen und -massen. Diese Anforderungen werden durch BEV optimal erfüllt. Für die individuelle Langstreckenmobilität gelten abweichende Anforderungen: Lange Fahrdistanzen sind möglichst unterbrechungsfrei zurückzulegen. Der Reisekomfort wird durch größere Fahrzeugabmessungen und -massen gesteigert. [10, 11]

Zur Erfüllung dieses Anforderungsprofils benötigen BEV große Akkumulatoren, die sowohl hohe Anschaffungskosten als auch große Fahrzeugmassen bedingen. Der maximalen Ladeleistung sind technologische Grenzen gesetzt, weshalb die energiebedingten Stillstandzeiten im Langstreckenbetrieb die eines vergleichbaren ICE überschreiten.

Ob das BEV die Anforderungen der Langstreckenmobilität als Substitutionstechnologie des ICE erfüllt, ist unter Berücksichtigung der technologi-

schen Entwicklungen zu bewerten. Andere alternative Antriebstechnologien wie Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellenaggregat (fuel cell electric vehicle FCEV) oder Energieversorgung während der Fahrt über elektrifizierte Trassen (E|ROAD) stehen in Konkurrenz zur BEV-Technologie.

Vor diesem Hintergrund sind die Fragestellungen dieser Arbeit: Wie ist eine Methodik zum Vergleich von Antriebskonzepten der individuellen Langstreckenmobilität aufzubauen? Und welche Substitutionstechnologie des ICE ist, unter Anwendung dieser Vergleichsmethodik, für die individuelle Langstreckenmobilität am besten geeignet?

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Vergleichsmethodik für die Bewertung von Antriebskonzepten der individuellen Langstreckenmobilität. Ergebnis der Methodik sind quantitative Aussagen über die technologische Leistungsfähigkeit alternativer Antriebskonzepte.

Zur Validierung der Anwendbarkeit der Vergleichsmethodik wird ein Technologievergleich alternativer Antriebskonzepte durchgeführt. Hierfür ist es zunächst Voraussetzung, die Datenbasis für einen solchen Technologievergleich zu erarbeiten. Die Antriebskonzepte des Lösungsraums sind im erforderlichen Detailgrad zu beschreiben und deren konkrete Eigenschaften zu ermitteln. Auch ist eine Beschreibung der Umwelt über die Systemgrenzen des Antriebskonzepts hinaus erforderlich.

Es wird eine vollständige Automatisierung der Vergleichsmethodik angestrebt. Diese ermöglicht einerseits, den Technologievergleich den sich stets verändernden Rahmenbedingungen anzupassen. Zudem wird die Analyse von Sensitivitäten also der Abhängigkeit des Bewertungsergebnisses von veränderten Rahmenbedingungen möglich.

Für die praktische Anwendung hat diese Arbeit den folgenden Nutzen: Es wird eine transparente Informationslage über die technologische Leistungsfähigkeit von Antriebstechnologien geschaffen. Diese kann Informationsbasis für privatwirtschaftliche Investitionsentscheidungen sowie staatliche Förderentscheidungen sein. Mit dem Fokus der individuellen Langstreckenmobilität untersucht diese Arbeit gerade den Anwendungsfall, der für BEV technologisch herausfordernd ist. Für die Wissenschaft liefert diese Arbeit eine validierte Methodik zur multidimensionalen Bewertung von Antriebskonzepten. Wesentliches Alleinstellungsmerkmal ist, dass das Bewertungsobjekt aus dem Fahrzeug mit der jeweiligen Antriebs-

technologie sowie aus der zugehörigen Infrastruktur zur Energiebereitstellung besteht. Nur durch den konsequenten Einbezug der erforderlichen Infrastruktur in die Vergleichsmethodik ist es möglich, alternative Antriebskonzepte mit hohen Infrastrukturaufwänden, wie eine E|ROAD, ganzheitlich zu vergleichen.

Um die beschriebene Zielsetzung zu erreichen, wird im Anschluss an die Einleitung in Kapitel 2 zunächst der Lösungsraum der Antriebskonzepte aufgespannt. In Kapitel 3 werden allgemeine Werkzeuge und Methoden der Technologiebewertung und schließlich spezielle Methoden der Bewertung und des Vergleichs von Antriebstechnologien eingeführt. Bestehende Arbeiten zum Vergleich von Antriebstechnologien werden vorgestellt und inhaltlich analysiert. Das Kapitel schließt mit der Ableitung des allgemeinen Handlungsbedarfs und den speziellen Anforderungen an den nachfolgenden Lösungsansatz. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bewertungsmethodik zum multidimensionalen Vergleich von Antriebskonzepten der individuellen Langstreckenmobilität wird in Kapitel 4 konzipiert. Die Methodik umfasst die Festlegung von Prämissen, die Aufbereitung der Datenbasis, eine Phase der Kennzahlensystembildung sowie die Evaluation der Bewertungsergebnisse. Im abschließenden Unterkapitel wird eine Automatisierung der Bewertungsmethodik durch eine Softwarelösung mit Methoden der Softwareentwicklung beschrieben. Kapitel 5 wendet die entworfene Vergleichsmethodik auf den aufgespannten Lösungsraum aus Kapitel 2 an. In Übereinstimmung mit der Zielsetzung der Arbeit wird ein multidimensionales Kennzahlensystem berechnet und analysiert. Zur Ermittlung der Kennzahlausprägungen wird die notwendige Datenlage erarbeitet und strukturiert. Basierend auf dem ermittelten Kennzahlensystem erfolgt in Kapitel 6 die Detailanalyse der Kennzahlausprägungen in Abhängigkeit veränderter Rahmenbedingungen. Die Arbeit schließt mit einer kritischen Würdigung der Untersuchungsergebnisse sowie einem Ausblick auf weiteren Handlungsbedarf.

Die inhaltliche Struktur der Arbeit zeigt Bild 2:



Bild 2: Aufbau der Arbeit

2 Analyse des Lösungsraums der Antriebskonzepte

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer multidimensionalen Vergleichsmethodik für Antriebskonzepte der Langstreckenmobilität. Zunächst ist daher zu klären, wie sich der Begriff des Antriebskonzepts definiert und welche Antriebskonzepte Teil des Lösungsraums des Technologievergleichs sind. Das vorliegende Kapitel fokussiert die Antriebskonzepte des Lösungsraums im Hinblick auf deren für den Technologievergleich relevante Eigenschaften. Für darüberhinausgehende Informationen zu den einzelnen Antriebskonzepten wird auf die zitierte Literatur verwiesen.

Der Begriff Antriebskonzept beschreibt in dieser Arbeit nicht nur eine fahrzeugseitige Systemarchitektur, sondern die Gesamtheit aus fahrzeugseitigen Antriebskomponenten und infrastrukturseitigen Einrichtungen zur Energiebereitstellung. In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt die Beschreibung der einzelnen Komponenten der erforderlichen Infrastruktur sowie des Fahrzeugantriebs. Die Society of Automotive Engineers (SAE) legt in [12] eine konsistente Terminologie zur Bezeichnung alternativer Antriebsstränge fest, welche die Basis der hier eingeführten Terminologie der Antriebskonzepte ist. Der Lösungsraum dieser Arbeit besteht aus nachfolgenden Antriebskonzepten:

- Das BEV bezieht die Fahrenergie aus einem elektrochemischen Akkumulator. Ein Elektromotor wandelt die elektrische Energie bei Bedarf in mechanische Energie. Zur Maximierung der Fahrreichweite für die Langstreckenmobilität benötigen BEV groß dimensionierte Akkumulatoren sowie eine potente Ladeinfrastruktur, die hohe Ladeleistungen pro Schnellladepunkt zur Verfügung stellt. [12]
- Das dynamisch induktiv ladende Fahrzeug (inductive power transfer electric vehicle IPTEV) unterscheidet sich vom BEV durch den gering dimensionierten Akkumulator. Im Langstreckenbetrieb bezieht das IPTEV die elektrische Fahrenergie über kontaktlose Energieübertragung von einer E|ROAD, die ebenso über die bestehende Energieversorgung gespeist wird. [13]
- FCEV mit einer Brennstoffzelle als Energiewandler nutzen Brennstoff zur Bereitstellung elektrischer Energie, mit der schließlich ein Elektromotor Vortrieb erzeugt. Als Brennstoff wird in dieser Arbeit

Wasserstoff betrachtet, der an einer Zapfstelle dem Fahrzeug zugeführt wird. Für die Bereitstellung des Wasserstoffes sind verschiedene technologische Alternativen denkbar. Ökologische Vorteile verspricht die Erzeugung des Wasserstoffs über Elektrolyseverfahren unter Einsatz elektrischer Energie. [12]

- Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erzeugen durch Verbrennungskraftprozesse mechanische Energie für die Fortbewegung des Fahrzeuges. Je nach Verbrennungskraftprozess und Kraftstoff unterscheidet man Fahrzeuge mit Ottomotor (ICE_G) und Fahrzeuge mit Dieselmotor (ICE_D). Der Brennstoff wird über eine Zapfsäule zugeführt. Der Brennstoffbereitstellung geht dessen Förderung und Raffination voraus.

2.1 Infrastruktur zur Bereitstellung von Sekundärenergieträgern

Folgt man dem Energiefluss entlang der Komponenten eines Antriebskonzepts ist dieser durch verschiedene Förderungs-, Wandlungs- sowie Transportprozesse gekennzeichnet. Über diese Prozesse hinweg verändert sich die Energieform, von chemischer, elektrischer und schließlich mechanischer Energie. Analog verändern sich auch die zugehörigen Energieträger, welche die jeweilige Energieform enthalten und transportabel machen. Es lassen sich Primär- und Sekundärenergieträger unterscheiden, welche schließlich in mechanische Nutzenergie gewandelt werden: [14, 15]

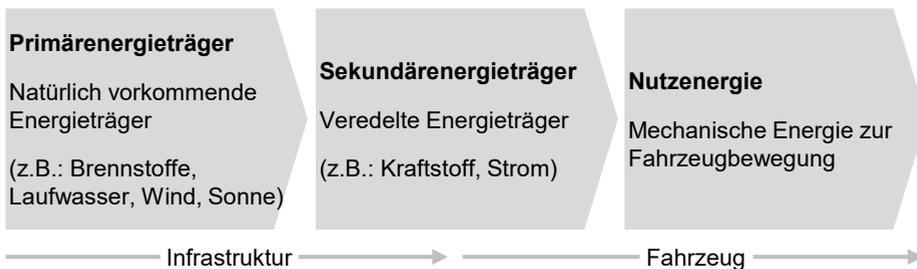


Bild 3: Energieträger und Nutzenergie über den Energiefluss eines Antriebskonzepts

Bild 4 stellt die Infrastrukturkomponenten entlang des Energieflusses der Antriebskonzepte des Lösungsraums dar:

2.1 Infrastruktur zur Bereitstellung von Sekundärenergieträgern

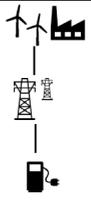
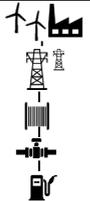
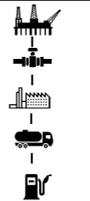
Aufgabe	Antriebskonzepte			
				
	BEV	IPTEV	FCEV	ICE_G
Förderung	Förderung fossiler Energieträger			Rohöl-förderung
Primärenergie	Fossile Brennstoffe, Erneuerbare Energieträger			Rohöl
Transport	Transport fossiler Primärenergieträger			Pipeline, Tanker
Wandler	Heizkraftwerke, Erneuerbare Energien			Raffinerie
Sekundär-energie	Elektrische Energie			Otto- oder Dieselmotorkraftstoff
Transport	Stromnetz			-
Wandler	-	-	Elektrolyseur	-
Sekundär-energie	-	-	Wasserstoff	-
Transport	-	-	Pipeline-Distribution	LKW-Distribution
Schnittstelle	Ladepunkt	E ROAD	Tankstelle (Wasserstoff)	Tankstelle (Diesel- oder Ottomotorkraftstoff)
Legende:  Erneuerbare Energien  Stromnetz  Raffinerie  Ladepunkt  Fossile Heizkraftwerke  LKW-Transport  Elektrolyseur  E ROAD  Rohöl-förderung  Pipeline  Tankstelle				

Bild 4: Infrastrukturkomponenten der Antriebskonzepte

Ausgangspunkt des Energieflusses ist die Förderung der Primärenergieträger. Diese bezeichnen in der Natur in ursprünglicher Form vorhandene Energieträger wie Steinkohle, Rohöl, Rohgas, Lauf- oder Stauwasser, Sonne, Wind, Erdwärme und Biomasse. Im Falle fossiler Brennstoffe folgt der Transportweg von Förderstätte zu Wandler, um Sekundärenergieträger zu erzeugen. Diese bezeichnen veredelte und damit aufgewertete Energieträger. Beispiele sind Kraftstoffe oder elektrischer Strom. Auch beim Durchlaufen mehrerer aufeinander folgender Energiewandlungen wird weiterhin von Sekundärenergieträgern gesprochen. Beispielsweise wird elektrische Energie als bereits veredelter Sekundärenergieträger, für die B tankung eines FCEV im Elektrolyseverfahren zu Wasserstoff gewandelt. Anschließend liegt chemische Energie vor, die jedoch weiterhin als Sekundärenergieträger bezeichnet wird. [14, 15]

Dem Fahrzeug wird der Sekundärenergieträger zugeführt und durch die Antriebsstrangkomponenten in weiteren Energiewandlungsschritten in mechanische Nutzenergie überführt. Die spezifischen Antriebsstrangkomponenten je Antriebskonzept sind in Kapitel 2.2 dargestellt.

Alternative Antriebskonzepte basieren auf der bestehenden Infrastruktur zur Bereitstellung elektrischen Stroms. Die Ladepunkte zum Betrieb des BEV sowie die E|ROAD zur Versorgung des IPTEV werden direkt über das Stromnetz angebunden. Die Infrastruktur des FCEV sieht kraftwerksnahe Elektrolyseure vor, die Wasserstoffgas in Pipelinenetze einleiten und dezentralen Wasserstofftankstellen zur Verfügung stellen. Der Ottokraftstoff für den Betrieb konventioneller ICE_G Antriebskonzepte wird durch die Förderung des Erdöls, dessen Transport sowie Raffination am Tankstellennetz zur Verfügung gestellt.

Nachfolgend sind die im Fokus der Betrachtung stehenden Sekundärenergieträger sowie die Infrastrukturkomponenten zur Energiespeisung des Fahrzeuges aufgeführt und beschrieben.

2.1.1 Sekundärenergieträger

Sekundärenergieträger im Lösungsraum des Technologievergleichs sind elektrischer Strom sowie Wasserstoff als Kraftstoff für Mobilitätsanwendungen. Das vorliegende Kapitel beschreibt die Infrastrukturkomponenten zur Bereitstellung der Sekundärenergieträger sowie deren Funktionsweise am Beispiel des inländischen Wirtschaftsraums.

2.1.1.1 Elektrischer Strom

Elektrische Energie ist reine Exergie, ist also im Gegensatz zu thermischer Energie als Ergebnis von Verbrennungsprozessen, vollständig arbeitsfähig und damit gut in andere Energieformen umwandelbar [16]. Der Transport elektrischer Energie über Leitungen findet als Elektronenbewegung statt, wobei auch über weite Entfernungen nur geringe Leitungsverluste anfallen. Schließlich ist elektrische Energie praktikabel auf Basis erneuerbarer Energieträger generierbar. Unter anderem die obigen Gründe machen die Elektrifizierung zu einem wesentlichen Bestandteil der globalen Dekarbonisierungsanstrengungen. Bild 5 beschreibt den aktuellen Stand sowie die abzusehende Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland hinsichtlich Anteil, Wirkungsgrad und globalem Erwärmungspotential (globale warming potential GWP) der Primärenergieträger:

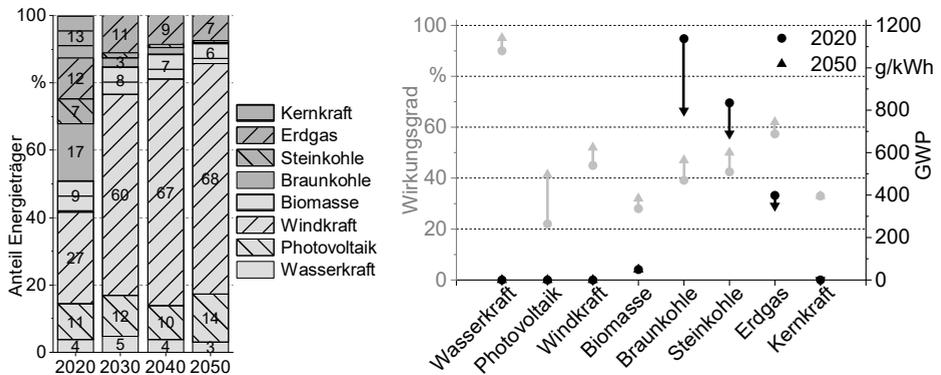


Bild 5: Anteil, Wirkungsgrad und GWP der Primärenergieträger der Stromerzeugung in Deutschland [17–26]

Die Primärenergieträger zur Stromerzeugung können in erneuerbare Energieträger, hauptsächlich Windkraft, Solarstrahlung, Wasserkraft und Biomasse sowie in nicht erneuerbare Energieträger, wie Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und –öl sowie Kernkraft unterteilt werden. Der Anteil der erneuerbaren Energien an der inländischen Stromerzeugung erreicht mittlerweile rund 50 % und nimmt über die kommenden Jahrzehnte stetig zu. 2030 werden über 70 % der Bruttostromerzeugung auf erneuerbaren Energien beruhen [26]. Diese Entwicklung ist jedoch nur durch einen massiven Ausbau der installierten Leistung erneuerbarer Stromerzeugung möglich. Die Verfügbarkeit von Windkraft oder Sonnenstrahlung ist jahreszeit- und witterungsabhängig und daher nicht durchgängig gegeben. Eine Erhöhung

des Anteils erneuerbarer Energieträger an der Bruttostromerzeugung bedingt daher eine überproportionale Erhöhung der installierten Leistung an erneuerbaren Kraftwerksanlagen.

Der Wirkungsgrad der elektrischen Stromerzeugung ist direkt durch die Anteile der Energieträger an der Bruttostromerzeugung und deren individuelle Wirkungsgrade bestimmt. Bei fossilen Kraftwerken entspricht der individuelle Wirkungsgrad η dem Nutzungsgrad, der über den Heizwert des Brennstoffes H_i den eingehenden Massestrom des Brennstoffes \dot{m} und die abgehende elektrische Leistung $P_{el,netto}$ ermittelt wird [20]:

$$\eta = \frac{P_{el,netto}}{\dot{m} \cdot H_i} \quad (2.1)$$

Nach dem Wirkungsgradverfahren gehen erneuerbare Energien nicht mit ihrem physikalischen Wirkungsgrad, also für Windkraft dem Verhältnis aus kinetischer Energie des anströmenden Windes und abgehender elektrischer Energie der Windkraftanlage, in den Gesamtwirkungsgrad der Bruttostromerzeugung ein, sondern pauschal mit 100 %. Die physikalische Qualität der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird also nicht berücksichtigt. In Bild 5 ist der physikalische Wirkungsgrad hellgrau dargestellt. Der Gesamtwirkungsgrad der Bruttostromerzeugung nimmt daher mit dem Anteil erneuerbarer Energieträger zu. Durch technologische Optimierungen erhöhen sich auch die Wirkungsgrade fossiler Kraftwerksanlagen, wobei dies die einzusetzenden Brennstoffe je Kilowattstunde elektrischer Energie zusätzlich zum steigenden Anteil erneuerbarer Energieträger weiter reduziert. Die Heizwerte der Energieträger der Stromerzeugung sind in Tabelle 17 im Anhang dargestellt.

Hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen der Stromerzeugung sind darüber hinaus die Emissionen durch Nutzung der spezifischen Energieträger von Interesse. Über das GWP werden Emissionen mit Klimawirkung in einer wirkungsäquivalenten Menge CO₂-Emissionen (CO₂ä) ausgedrückt. Die in Bild 5 dargestellten GWP fassen die Auswirkung der Verfeuerung von Energieträgern, also der Betriebsphase zusammen. Nicht enthalten sind Klimaauswirkungen durch die Anlagenerrichtung sowie die Bereitstellung der Brennstoffe. Die Nutzung der erneuerbaren Energien Wasserkraft, Photovoltaik sowie Windkraft haben in dieser Betrachtung keine Klimawirkung. Die Klimawirkung der Stromerzeugung verringert sich zum einen mit den Anteilen der Energieträger, zum anderen durch die Optimierung der konventionellen Kraftwerkstechnologien.

Neben dem GWP ist der Materialbedarf zum Aufbau der Infrastruktur zur Stromerzeugung eine relevante ökologische Größe. Leistungsstarke, fossil befeuerte Kraftwerke sind Anlagen mit mehrjähriger Bauzeit deren funktionale Bestandteile unter anderem Heizkessel, Feuerungsraum, Turbine, Schornstein und Kühlturm sind. Auf jede erzeugte Kilowattstunde eines Steinkohlekraftwerks entfallen so 2,3 g Beton und 0,64 g Stahl für dessen Errichtung [27, 28].

Auch die Selbstkosten der Stromerzeugung sind wesentlich durch die Zusammensetzung der Bruttostromerzeugung bestimmt und unterscheiden sich je Energieträger. In Tabelle 20 im Anhang sind die Selbstkosten je Energieträger und deren Entwicklung zusammengestellt. Auffällig ist der fortschreitende Rückgang der Selbstkosten von Photovoltaik- und Windkraftanlagen. Es ist zu beobachten, dass der zunehmende Anteil erneuerbarer Energieträger an der Bruttostromerzeugung zwar vor allem durch staatliche Intervention angestoßen ist, jedoch mittlerweile auch aufgrund marktwirtschaftlicher Prinzipien anhält.

Die Selbstkosten der elektrischen Stromerzeugung sind die Basis des Preises elektrischer Energie für den Verbraucher. Für Haushaltskunden bestehen zwei weitere Bestandteile: Die Entgelte für die Nutzung des elektrischen Übertragungsnetzes sowie staatlich veranlasste Preisbestandteile wie Steuern, Abgaben und Umlagen.

Das elektrische Übertragungsnetz dient dem Transport elektrischer Energie von der Stromerzeugung zu den Lasten. Es sind drei Arten von Übertragungssystemen zu unterscheiden: Einphasige Systeme, Drehstromsysteme sowie Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ). In Deutschland ist die dreiphasige Drehstromübertragung mit vier abweichenden Netzebenen mit jeweils individueller Netzspannung etabliert: Das Verbundnetz auf 220 bis 380 kV, das Transportnetz auf 110 kV, das Verteilnetz auf 10 bis 20 kV sowie das Ortsnetz auf 400 V. Dabei wird bei Netzspannungen ab 110 kV überwiegend auf Freileitungen gesetzt. [29, 15]

Die zunehmende Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Stromerzeugung verändert die Anforderungen an die Übertragungsnetze. Von einer hierarchischen Auslegung mit unidirektionalem Energiefluss von der höchsten zur nächst niedrigeren Spannungsebene hin zu intelligenten Netzen, welche durch eine Kommunikation aller Systemkomponenten flexibel auf veränderte Nachfrage- oder Angebotssituationen reagieren. So kann durch eine flexible Zu- und Abschaltung nicht zeitkritischer Anlagen wie Kühllhäuser oder elektrische Wärmespeicher [30] eine Lastflexibilisierung erreicht werden. [29]

Bild 6 stellt den Aufbau des Übertragungsnetzes in Deutschland dar:

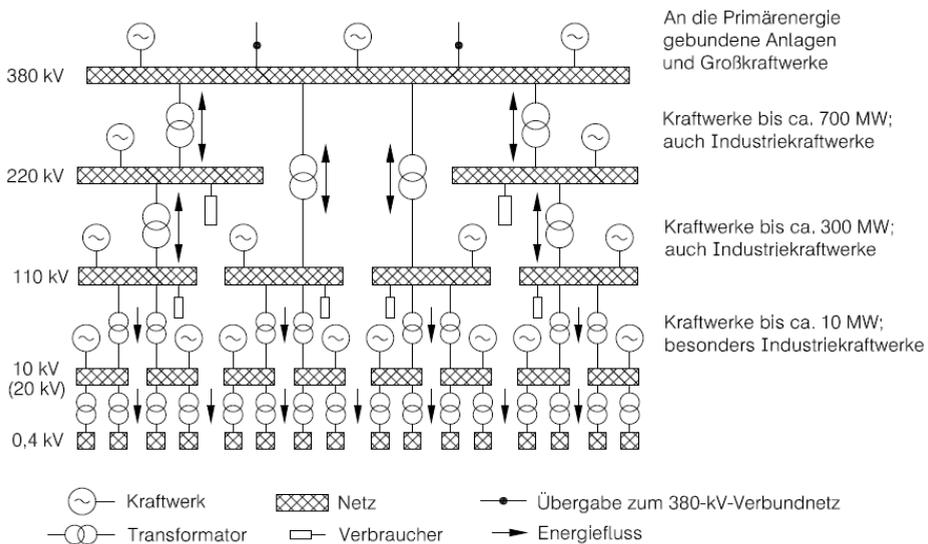


Bild 6: Aufbau des Übertragungsnetzes in Deutschland [15]

Der Wirkungsgrad der Übertragungsnetze ist aus der Differenz zwischen Stromeinspeisung und -abgabe sowie Verrechnung an die Letztverbraucher ermittelbar: Bezogen auf die eingespeiste elektrische Leistung fallen demnach Übertragungsverluste von rund 5 % an [31].

Auch die Errichtung von Übertragungsnetzen ist mit Ressourcenaufwänden verbunden. Die erforderlichen Materialien zum Aufbau einer Übertragungsinfrastruktur je transportierter Kilowattstunde durch das Übertragungsnetz sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Klimawirksam sind insbesondere die großen Mengen an Beton für Fundamentmaterialien für Freileitungsmasten [32].

Die Investitionskosten in das Stromnetz unterscheiden sich je nach Übertragungstechnologie. Für den Neuaufbau einer Langstreckenverbindung über eine Entfernung von 500 km werden in [33] kalkuliert:

- 380 kV Drehstromsystem: 375 €/kW [34]
- HGÜ Freileitung: 775 €/kW
- HGÜ Erdkabel: 1400 €/kW

Um das Energieversorgungsnetz an die veränderten Anforderungen erneuerbarer Energieträger anzupassen, ist die Errichtung von Nord-Süd-Verbindungen zum Transport der durch Windenergie im norddeutschen Tiefland entstehenden elektrischen Energie zu den Verbrauchsschwerpunkten im

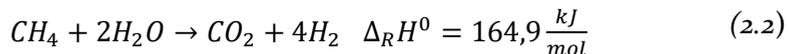
Süden notwendig [16]. Obige Abschätzung der Investitionskosten zeigt, dass der Einsatz von HGÜ-Erdkabeln den Netzausbau um ein Vielfaches verteuert und zunehmende Entgelte für die Nutzung des Übertragungsnetzes zu erwarten sind.

Die Investitions- und Betriebskosten der Infrastruktur des elektrischen Übertragungsnetzes werden über das Netzentgelt als Teil des Preises für elektrische Energie auf die Stromkunden umgelegt. Die Stromnetzentgeltverordnung legt fest, dass Netzentgelte innerhalb einer Netzebene entfernungsunabhängig zu gestalten sind und nach behördlicher Genehmigung veröffentlicht werden [35]. Die Höhe der Netzentgelte unterscheidet sich je nach Verbrauchergruppe. In 2019 wurden im Mittel über Haushalts-, Gewerbe- und Industriekunden 4,6 Cent/kWh Netzentgelt entrichtet [36, 37].

2.1.1.2 Wasserstoff

Elementarer Wasserstoff findet bislang insbesondere in der Chemie- sowie Energieindustrie Anwendung. Im Rahmen der Energiewende gelten Energiespeicher auf Wasserstoffbasis als Schlüsseltechnologie, um die elektrische Energie aus fluktuierend verfügbaren erneuerbaren Energien bei Überkapazitäten zu speichern und im Bedarfsfall wieder zur Verfügung zu stellen. Die Nutzung des Energieträgers Wasserstoff als Energiespeicher für mobile Anwendung ist mengenmäßig unbedeutend. [38]

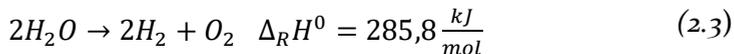
Wie elektrischer Strom ist Wasserstoff ein Sekundärenergieträger, der auf verschiedene Arten erzeugt werden kann. Für den industriellen Maßstab bedeutend ist bislang nur die thermische Spaltung von Kohlenwasserstoffen mittels Dampfreformierung nach folgender Reaktionsgleichung [16]:



Als Edukt kommen leichte Kohlenwasserstoffe und Wasser zur Anwendung. Diese werden in einer endothermen Reaktion aufgespalten, wobei notwendige thermische Energie über eine externe Feuerung zugeführt wird. Die energetische Gesamteffizienz einer industriellen Dampfreformierungsanlage liegt bei über 70 % [16]. Neben Wasserstoff entstehen reaktionsbedingt und aufgrund der Feuerung auch das klimawirksame Kohlendioxid sowie weitere Treibhausgasemissionen (THG). Allein der Dampfreformierungsprozess hat ein GWP von 250 gCO₂ä/kWh bezogen auf den Energieinhalt des erzeugten Wasserstoffgases [39]. Die spezifischen Investitionskosten einer industriellen Dampfreformierungsanlage liegen bei 650 €/kW. Das Kostensenkungspotential ist gering [39].

Unter Power-to-Gas-Verfahren werden Technologien zusammengefasst, die gasförmige Energieträger wie Wasserstoff zur Speicherung überschüssiger elektrischer Energie anwenden [40]. Große Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der Erzeugung des Energieträgers Wasserstoff mittels Wasserstoffelektrolyse zu [16].

Die Reaktion ist endotherm, für deren Ablauf ist also das Aufbringen einer Reaktionsenthalpie erforderlich. Diese setzt sich aus einem thermischen und einem temperaturunabhängigen Teil zusammen, wobei bei höherer Prozesstemperatur die zuzuführende elektrische Energie abnimmt. Elektrische Energie wird als Gleichspannung an den Elektroden angelegt. Die Elektrolyse läuft nach folgender Reaktionsgleichung ab: [16, 39]



Für die praktische Anwendung kommen die Verfahrensalternativen alkalische Elektrolyse (AEL), Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM) sowie die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) zum Einsatz. Die meist verbreitete Technologie ist die AEL, wobei wässrige Kalilauge als Elektrolyt zur Ionenleitung dient. Die Elektrolysereaktion läuft bei einer Betriebstemperatur von rund 80 °C und einem Druck bis zu 30 bar ab. Beim PEM-Verfahren kommt anstelle der Elektrolytflüssigkeit eine protonenleitende Kunststoffmembran zum Einsatz. In diesem Verfahren können höhere Stromdichten erreicht werden, jedoch sind Edelmetalle wie Platin oder Iridium als Katalysatoren einzusetzen. Die HTEL ist am weitesten von einer Anwendungsreife entfernt und wird hier nicht weiter betrachtet. [41]

Sowohl im AEL-als auch im PEM-Verfahren sind in Deutschland bereits Elektrolyseure mit elektrischen Eingangsleistung größer 1 MW installiert. Diese Anlagen erreichen eine Systemeffizienz bezogen auf den Heizwert des abgespaltenen Wasserstoffs und die einzusetzende Energie von 59,3 %. Der Wirkungsgrad ist durch die Nutzung von Abwärme exothermer Prozessschritte oder durch höhere Betriebsdrücke weiter optimierbar. Die Erhöhung des Betriebsdrucks hat jedoch einen beschleunigten Katalysatorverschleiß zur Folge. [39, 40]

Der Materialaufwand zum Aufbau von Elektrolyseuren umfasst neben Baustoffen wie Beton und Stahl auch einzusetzende Edelmetalle wie Platin [42].

Die spezifischen Investitionskosten zur Errichtung industrieller Anlagen liegen bei rund 1.000 €/kW [39, 40], wobei ein Senkungspotential auf 500 €/kW [43, 40] absehbar ist.

Der flexible Transport gasförmigen Wasserstoffs kann in Drucktanks per LKW, Bahn oder Schiff erfolgen. Um jedoch einen Großteil der vorhandenen Fahrzeugflotte in Deutschland mit Wasserstoff zu betreiben, ist dessen Distribution aufgrund der hohen Durchsatzmengen und langen Transportwege nur über den Aufbau eines Pipelinenetzes zur Anbindung dezentraler Tankstellen wirtschaftlich vorstellbar [44, 45].

Für ein großflächiges Wasserstoffdistributionsnetz ist ein Betriebsdruck von 100 bar anzunehmen [46]. Die Speisung des Netzes erfolgt über Kolbenverdichter für deren Betrieb elektrische Energie aufzubringen ist [45]. Für den Transport von Wasserstoffgas fallen daher 2 % des transportierten Energieinhalts an elektrischer Hilfsenergie an [46, 44]. Zusätzlich entstehen Leckageverluste in Höhe von 0,3 % des Mengendurchsatzes an Kompressoren und Dichtungen [46].

Die Investitionskosten zum Aufbau einer Pipelineinfrastruktur zur Versorgung dezentraler Wasserstofftankstellen schätzt [46] für Deutschland auf 23 Mrd. €, wobei ein Pipelinenetz mit einer mittleren Leistung von 21 GW angenommen wird. Dies entspricht leistungsspezifischen Investitionskosten von 1095 €/kW.

2.1.2 Energiespeisung

Der infrastrukturseitige Energiefluss endet mit der Fahrzeugschnittstelle. Je nach Antriebstechnologie kommen abweichende Komponenten zur Versorgung des Fahrzeuges mit Sekundärenergie zum Einsatz. Die Art der Energiespeisung kann in chargenbasierte oder kontinuierliche Energieübertragung im Fahrbetrieb unterschieden werden.

2.1.2.1 Chargenbasierte Energieübertragung

Chargenbasierte Energieübertragung in der Langstreckenmobilität erfordert bei BEV die Schnellladung der fahrzeugseitigen Hochvoltbatterie. Die entscheidende Komponente neben der Hochvoltbatterie, welche die maximale Ladeleistung festlegt, ist das Ladegerät. BEV verfügen über fahrzeugseitige Ladegeräte (onboard charger OBC) für Ladeleistung unter 50 kW. Das Fahrzeug wird unter Anwendung des OBC mit Wechselstrom gespeist, man spricht von AC-Laden. Bei Schnellladevorgängen mit Ladeleistungen über 50 kW werden infrastrukturseitige Ladegeräte genutzt, wobei dem Fahrzeug Gleichstrom zugeführt wird. Unabhängig von der Ausführung ist es Aufgabe des Ladegerätes, den netzseitigen Wechselstrom gleichzurich-

ten und auf das Spannungsniveau der Hochvoltbatterie zu stellen. Das Ladegerät steht mit dem Batteriemanagementsystem (BMS) in Kommunikation, um exakt die Ladeleistung zuzuführen, welche mit dem Zustand des Akkumulators kompatibel ist. Die zuführbare Ladeleistung bestimmt sich insbesondere aus dem aktuellen Ladestand des Akkumulators (state of charge SoC) sowie dessen Temperatur. [47]

Wesentliche Bestandteile eines Schnellladepunkts sind die Anbindung an das Mittelspannungsnetz über einen Transformator, das eigentliche Ladegerät, welches aus einem dreiphasigen Gleichrichter sowie weiteren Sicherheitseinrichtungen besteht und schließlich das für den Anwender sichtbare Ladeinterface mit Ladekabel und -stecker, welche in Europa weitestgehend dem Combined Charging System (CCS) entsprechen. [48, 49]

Aktuelle BEV werden bei Bordnetzspannungsniveaus von 400 V bis 800 V betrieben. Bei über 600 A Ladestrom sind bei 400 V Systemen Spitzenladeleistungen von 250 kW darstellbar [50]. Ladeleistungen darüber hinaus sind durch höhere Spannungsniveaus erreichbar: So liefern Ladepunkte auf 800 V Basis bis zu 350 kW Ladeleistung [51]. Die Ladeleistung fällt üblicherweise mit zunehmendem SoC des Akkumulators ab. Die Ladestrategie hinsichtlich des Verlaufs der Ladeleistung ist abhängig vom BMS des Akkumulators und wesentliches Diversifizierungsmerkmal verschiedener BEV Fahrzeugtypen und Hersteller, wie Bild 7 zeigt:

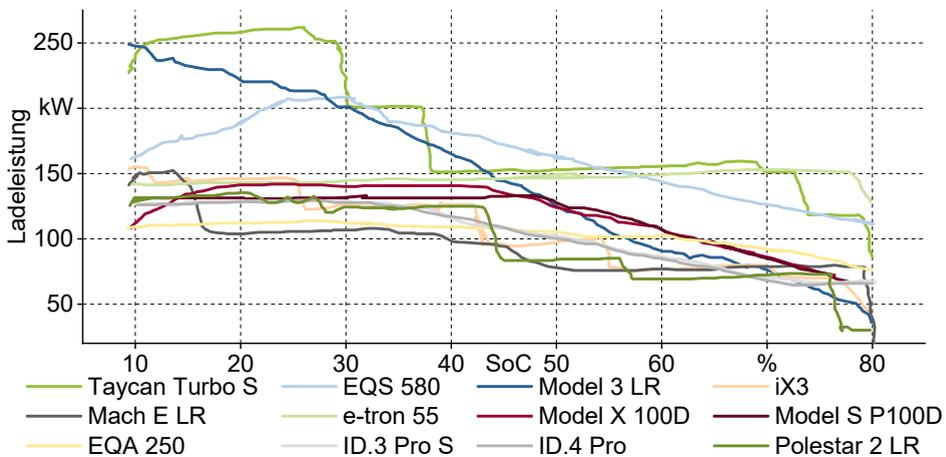


Bild 7: Ladekurven verschiedener BEV-Modelle [52]

Die Nennleistung je Ladepunkt wird für den Stand der Technik mit 150 kW und das technologische Potential mit 350 kW angenommen. Zur Abbildung der mittleren Ladeleistung eines BEV über den Ladevorgang ist die Nenn-

ladeleistung um 80 % zu adjustieren. Durch verbesserte Thermomanagements der Fahrzeugakkumulatoren werden sich die realen Ladeleistungen der Nennleistung der Ladeinfrastruktur annähern.

Der Wirkungsgrad eines Schnellladepunkts ist auf 92 % abschätzbar, wobei infrastrukturseitige Gleichrichter durch einen verbreiteten Einsatz von Halbleitersubstraten wie Siliziumkarbid (SiC) und deren geringere Schaltverluste profitieren werden [48].

Kostentreiber bei der Installation von Schnellladepunkten sind Netzan-schluss, betonierte Fundamente sowie die individuelle Länge der Leistungskabel. Die Installationskosten können mit 500 €/kW für Schnellladepunkte angenommen werden. [48, 53]

Bei FCEV wird die Energiespeisung über die Betankung des fahrzeugseitigen Druckgastanks mit komprimiertem Wasserstoff umgesetzt.

Die Versorgung der Tankstelle mit Wasserstoff ist über verschiedene Anbindungen denkbar. Wasserstoff kann zentral im Reformationsprozess oder aber im Elektrolyseverfahren hergestellt werden und über eine Pipelineinfrastruktur an die dezentralen Tankstellen verteilt werden. Alternativ kann Wasserstoff direkt an der Tankstelle produziert werden. Für hohe Durchsatzmengen, wie für die Versorgung der Langstreckenmobilität anzunehmen, ist jedoch nur die zentrale Herstellung des Wasserstoffs und dessen Verteilung geeignet. Bessere Wirkungsgrade, geringere spezifische Investitionskosten sowie geringere Energiekosten großer Elektrolyseure wiegen die zusätzlichen Aufwände für die Wasserstoffdistribution auf. [46]

In dieser Arbeit wird die Belieferung der Wasserstofftankstellen über ein Pipelinennetz angenommen. Aufgabe der Tankstelle ist es, Wasserstoff zu bevorraten sowie diesen auf den Betriebsdruck des fahrzeugseitigen Druckgastanks zu komprimieren und vorgekühlt bereit zu stellen. Wesentliche Bestandteile einer Wasserstofftankstelle sind daher Druckspeicher, Kompressoren, Kühlvorrichtungen sowie der eigentliche Dispenser zur Betankung der Fahrzeuge mit komprimiertem Wasserstoffgas. [54, 55]

Beim Betanken des Wasserstoffdrucktanks erwärmt sich das Gas aufgrund der Druckzunahme im Fahrzeugtank. Eine Temperatur von 85 °C darf dabei nicht überschritten werden. Um trotzdem hohe Tankleistungen zu erzielen, wird der komprimierte Wasserstoff vor der Betankung auf -40 °C gekühlt. So werden Tankleistungen von knapp 4 MW darstellbar. [55, 56]

Die Kompression des Wasserstoffs auf einen Betriebsdruck oberhalb von 700 bar verbraucht 9,5 % des Energieinhalts an elektrischer Energie. Weitere 5 % des Energieinhalts werden für die Vorkühlung des Wasserstoffs

aufgewandt [55]. Aufgrund dieser energetisch aufwändigen Prozesse sind für den Betrieb einer Wasserstofftankstelle rund 15 % an elektrischer Hilfsenergie in Bezug auf den Energieinhalt des Wasserstoffs anzunehmen.

Die Investitionskosten zur Errichtung von Wasserstofftankstellen werden auf 1.600 €/kW abgeschätzt. Ein Dispenser speist 200 kg Wasserstoff pro Tag, was rund 40 PKW Betankungen entspricht. [55, 57]

2.1.2.2 Kontinuierliche Energieübertragung

Neben der chargenbasierten Energieübertragung am Schnellladepunkt kann elektrische Energie dem Fahrzeug ebenso kontinuierlich, also im Fahrbetrieb bereitgestellt werden. Bild 8 unterscheidet die Anwendungsfälle:

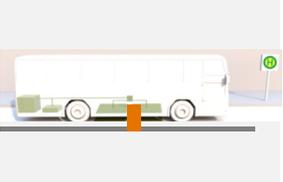
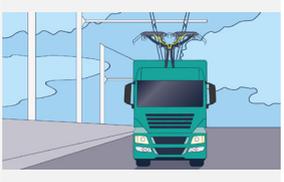
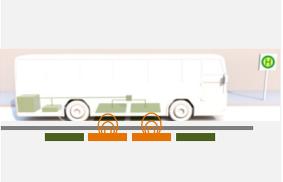
	Stationär	Semidynamisch	Dynamisch
Konduktiv			
Induktiv			
	Häusliches Laden, Arbeit, Einkauf, Schnellladen	Taxistand, Ampel, Bushaltestation	Ladespuren auf Autobahn

Bild 8: Anwendungsfälle konduktiver und induktiver Energieübertragung in Abhängigkeit des Bewegungszustands des Fahrzeuges nach [58, 59]

Stationäre Energieübertragung entspricht dem Stand der Technik der Ladung von BEV. Anwendungsfälle sind häusliches Laden oder Laden beim Arbeitgeber sowie das Schnellladen bei Langstreckenfahrten und hoher Ladeleistung. Semidynamisches Laden hat für urbane Mobilität hohes Anwendungspotential: Verkehrsbedingte oder anderweitig erforderliche Stillstandzeiten an Bushaltestelle oder Taxistand werden für das spontane

Nachladen der Fahrzeuge genutzt. Das dynamische Laden stellt den technologisch anspruchsvollsten Anwendungsfall dar: Ziel ist es, das Fahrzeug im Fahrbetrieb mit Energie zu versorgen. [58]

Dies kann konduktiv durch Schleifkontakte oder berührungslos, durch induktive Energieübertragung erfolgen. Ein Ansatz zur konduktiven Energieübertragung ist das eHighway-System, welches die aus dem elektrifizierten Bahnbetrieb bekannte Technologie des Pantographen auf den Straßengüterverkehr anwendet [60–62]. Nachteilig ist jedoch, dass die konduktive Energiezufuhr von oben geometrisch keine Speisung von PKW zulässt. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung in die Fahrbahn eingelassener Stromschienen [63, 64]. Herausfordernd sind die Personensicherheit sowie die bei Schleifkontakten auftretenden Verschleißerscheinungen [61]. Der höchstmögliche Grad an Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen sowie vollständige Verschleißfreiheit ist durch kontaktlose Energieübertragung auf Basis resonant induktiver Kopplung erreichbar. Fahrbahnseitige Primärspulen emittieren hochfrequente magnetische Wechselfelder, welche eine Sekundärspule im Fahrzeugunterboden durchfluten und dort elektrische Spannungen induzieren [65, 66]. Ein Schema eines elektrifizierten Straßenabschnitts zeigt Bild 9:

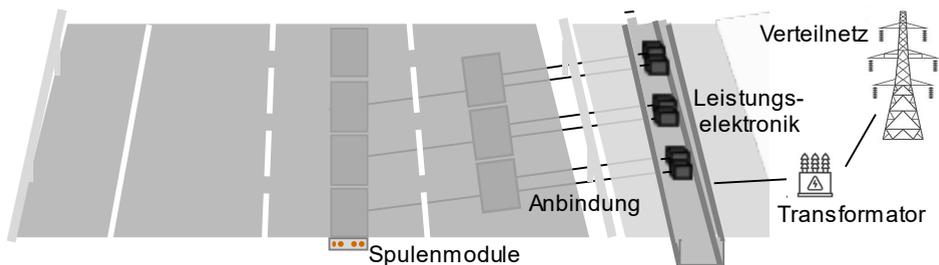


Bild 9: Schema einer elektrifizierten Straße mit induktiver Energieübertragung (E|ROAD)

Zur Elektrifizierung ist eine Anbindung an das Stromnetz mit engmaschigen Einspeisepunkten aus dem Verteilnetz erforderlich [67]. Über streckennahe Transformatoren ist auf das Spannungsniveau der Aktivkomponenten der induktiven Energieübertragungskomponenten (inductive power transfer IPT) zu wandeln. Für eine effiziente Energieübertragung muss jedes straßenintegrierte Spulenmodul bereits über integrierte Kapazitäten sowie möglichst ortsnahe Leistungselektronik zur Generierung der hochfrequenten Wechselfeldspannung verfügen. Bei Überfahrt eines kompatiblen Fahrzeuges wird ausschließlich die in Überdeckung befindliche Spule zu- bzw. abgeschaltet [65, 66]. [67–70]

Die Funktionsfähigkeit der E|ROAD konnte in Prototypen im Rahmen verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte belegt werden. Im dynamischen Betrieb sind unter Laborbedingungen Systemwirkungsgrade im Bereich von 70 – 90 % publiziert [71–73]. Für PKW werden Übertragungsleistungen von 30 kW angestrebt, um den mittleren Fahrenergiebedarf im Langstreckenbetrieb bedienen zu können [74].

Zwingende Voraussetzung für die verzahnte Entwicklung der infrastruktur- sowie fahrzeugseitigen IPT-Komponenten ist die Etablierung von Technologiestandards, um Wirkungsgrad, Übertragungsleistung, Betriebsfrequenz sowie Sicherheit der Systeme zu vereinheitlichen. Bestehende internationale Standards sowie aktuelle Standardisierungsbemühungen in der IPT-Technologie für Automobile beziehen sich vor allem auf den stationären Anwendungsfall im Leistungsbereich bis 22 kW.

Tabelle 1 fasst bestehende internationale Technologiestandards zur IPT-Technologie unter Nennung des letzten Überarbeitungsjahrs zusammen. Aus der Übersicht geht eine Intensivierung der Standardisierungsaktivitäten bis 2021 hervor. Unter den genannten Normen adressiert lediglich die IEC 61980 den Anwendungsfall des dynamischen IPT in Bezug auf die Kommunikation zwischen primärem und sekundärem Spulenmodul [75].

In Deutschland wird die Standardisierung der IPT-Technologie insbesondere im Normenausschuss Automobiltechnik (NAAutomobil) sowie der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE), welche Organe des Deutschen Instituts für Normung (DIN) sind, vorangetrieben.

Tabelle 1: Internationale Standards für IPT-Systeme seit 2010

Normnummer	Titel	Jahr
DIN ISO 19363 [76]	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Magnetische Energieübertragung - Sicherheit und Interoperabilitätsanforderungen	2021
DIN IEC 61980 [75]	Kontaktlose Energieübertragungssysteme für Elektrofahrzeuge	2021
SAE J2847/6 [77]	Communication for Wireless Power Transfer	2020
DIN ISO 15118 [78]	Straßenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation	2019
IEEE C95.1 [79]	Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz	2019

DIN IEC 62827 [80]	Drahtlose Energieübertragung - Management	2018
DIN IEC 63028 [81]	Wireless Power Transfer - Magnetic Resonance Interoperability	2018
SAE J2954 [82]	Wireless Power Transfer for EVs and Alignment Methodology	2017
DIN ISO 15149 [83]	Informationstechnik - Telekommunikation und Infor- mationsaustausch zwischen Systemen - Magnetfeldnetz (MFAN) - Teil 2: Bandinternes Kontrollprotokoll für die kabellose Energieübertragung	2015
SAE J1773 [84]	Electric Vehicle Inductively Coupled Charging	2014
SAE J2836/6 [85]	Use Cases for Wireless Charging Communication for Plug-in Electric Vehicles	2013

Energieübertragung während der Fahrt findet bislang ausschließlich im Hinblick auf konduktive Übertragungstechnologien Berücksichtigung. Der Arbeitskreis DKE/AK 351.1.13 „Elektrische Straßensysteme“ beschäftigt sich mit den Schnittstellen zwischen „Elektrischen Ausrüstungen für Bahnen“ und „Elektrostraßenfahrzeugen“ in Bezug auf Straßennutzfahrzeuge unter Oberleitungen [86]. Die normativen Arbeiten haben Ende 2020 begonnen.

Neben der Standardisierung sind technische Herausforderungen unter anderem die Integration der Aktivkomponenten des IPT-Systems in die Straßeninfrastruktur und die Sicherstellung der Wartbarkeit [87, 88]. Der Bauprozess einer elektrifizierten Straßeninfrastruktur umfasst die Vorfertigung einbaufertiger Übertragungsmodule und deren Bereitstellung. Asphaltbinder- und Deckschicht des Straßenaufbaus sind abzutragen, die Übertragungsmodule sowie Einspeisepunkte zu installieren, anschließend die Asphaltsschichten erneut aufzubauen und durch Bitumenemulsionen zu verkleben. [71]

Bei Errichtung einer E|ROAD-Infrastruktur sind leistungs- sowie längenabhängige Aufwendungen zu unterscheiden. Längenabhängige Aufwendungen skalieren mit dem Ausbaugrad der E|ROAD, also der Länge elektrifizierter Fahrspuren der Autobahn (AB), sowie der Anzahl der ausgestatteten Fahrspuren. Hierzu zählen die Spulenmodule sowie die zu errichtende Parallelverkabelung neben elektrifizierten Straßenabschnitten. Leistungsabhängige Aufwendungen skalieren mit der Dimensionierung der E|ROAD hinsichtlich der Verkehrsdichte energiebeziehender Fahrzeuge wie die Transformatoren der Einspeisepunkte sowie die Kompensationseinrichtungen zur Vermeidung hoher Blindleistungsbedarfe aus dem Netz.

Material- und Kostenaufwendungen sind in Tabelle 22 dargestellt. Je elektrifiziertem Fahrbahnkilometer sind für Spulenmodule und Parallelverkabelung rund 10 t Kupfer zu verbauen [68, 69]. Auf Basis verfügbarer Machbarkeitsstudien ist von längenabhängigen Kosten zwischen 0,3 und 2,4 Mio. €/km je Fahrspur auszugehen. Für den Vollausbau der AB in Deutschland, entspricht dies mindestens einer Investitionssumme von rund 22 Mrd. €. [67, 89–94]

Fahrzeugseitig sind IPTEV mit einem Spulenmodul ausgerüstet, dessen Windungen von dem magnetischen Wechselfeld der E|ROAD durchdrungen werden. Das magnetische Wechselfeld induziert eine Spannung in den Windungen der fahrzeugseitigen Spule. Der Stromfluss ist gleichzurichten und an das Spannungsniveau des Hochvoltbordnetzes anzupassen. [95]

Zur Verringerung von Wechselstromverlusten sind die Flachspulen mit Hochfrequenzlitzenleitern aufgebaut. Oberhalb der Flachspulen sind zur Optimierung des Verlaufs des magnetischen Feldes Ferritspiegel vorgesehen. In Richtung der Fahrgastzelle wird das Gehäuse aus Aluminium ausgeführt, um eine Schirmung des Fahrzeugunterbodens und der Fahrgastzelle gegenüber dem magnetischen Feld zu gewährleisten. Die thermischen Verluste in dem kompakten Spulenmodul im Fahrzeugunterboden müssen durch aktive Wasserkühlung abgeführt werden. Bild 10 zeigt den Aufbau eines fahrzeugseitigen Spulenmoduls:

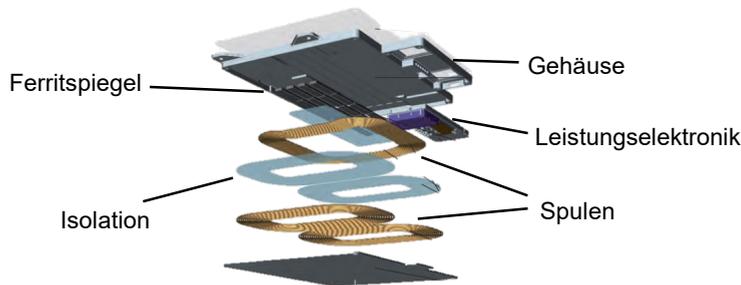


Bild 10: Fahrzeugseitiges Spulenmodul [58]

Die Aktivteile des Magnetkreises wie Spule und Ferritspiegel sowie die Leistungselektronik erwärmen sich im Übertragungsbetrieb, wobei thermische Verluste anfallen. Der Wirkungsgrad des fahrzeugseitigen Spulenmoduls wird mit 97 % angenommen [96]. Für die Fahrzeugseite statischer Energieübertragungssysteme wird eine Leistungsdichte von 0,7 kW/kg erreicht [58].

Der Prozess zur Fertigung des Spulenmoduls beginnt mit dem Verlegeprozess der Hochfrequenzlitze in einen Spulenträger. Die Spulenenden sind auf Anschluss terminals der Leistungselektronik zu kontaktieren und der Ferritspiegel ist in das Gehäuse einzusetzen. Abschließend sind die Spulen durch ein Vergussystem zu kapseln. [97]

Der Energiebedarf für die Produktion der Spulenmodule ist durch die Fertigung des Aluminiumgehäuses bestimmt, die handhabungslastigen Prozessschritte des Verlegens der Hochfrequenzlitze sowie der Ferritmontage haben einen geringen Beitrag [98]. Die Kosten eines Spulenmoduls betragen 34 €/kW [89].

2.2 Antriebsstrangkomponenten zur Wandlung der Sekundärenergieträger in Vortrieb

Aufgabe der Antriebsstrangkomponenten ist es, durch die Infrastruktur zugeführte Energie in mechanische Energie und letztlich Fahrzeugvortrieb zu wandeln. Der Fokus der Lösungsraumanalyse liegt auf Komponenten, die für ein Antriebskonzept spezifisch sind. Komponenten, die unabhängig von der Antriebstechnologie Bestandteil eines Kraftfahrzeuges sind, wie beispielsweise eine Radaufhängung, gehören nicht zum Umfang dieser Lösungsraumanalyse.

Bei der fahrzeugseitigen Technologiebeschreibung erfolgt keine Differenzierung spezifischer Fahrzeugtopologien oder Komponentenanordnungen im Fahrzeug. So werden zum Beispiel für das BEV Motoranordnungen wie Radnabenantrieb oder Tandemantrieb nicht unterschieden. Sowohl für das ICE als auch die alternativen Antriebskonzepte wird der einfachste Fall eines Zentralmotors sowie einer angetriebenen Achse angenommen [99].

Bild 11 fasst die Komponenten der Antriebskonzepte des Lösungsraums zusammen und ordnet diesen deren primäre Aufgabe zu. Speicher nehmen Energie auf und stellen diese wieder bedarfsgerecht zur Verfügung. Wandler passen die Energieform innerhalb technischer Systeme an [100]. Kennungswandler passen hingegen nur die Kennung an, wobei die Energieform unverändert bleibt [101]. In dieser Arbeit werden unter Kennungswandlern auch Komponenten zur Anpassung der Kennung in elektrischen Energieflüssen verstanden.

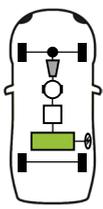
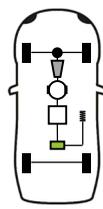
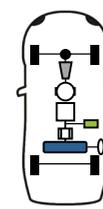
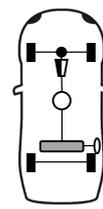
Aufgabe	Antriebskonzepte				
					
	BEV	IPTEV	FCEV	ICE_G	
Infrastruktur-schnittstelle	Ladeanschluss	IPT-Spulenmodul	Tankstutzen		
Speicher	Akkumulator		Wasserstoff-tank	Kraftstofftank	
Wandler	-	-	Brennstoff-zelle	-	
Kennungs-wandler	Inverter			-	
Wandler	Elektrische Maschine			Ottomotor	
Kennungs-wandler	Einstufiges Getriebe			Mehrstufiges Schaltgetriebe	
Legende:					
	Akkumulator		Inverter		Kraftstofftank
	Wasserstofftank		Elektrische Maschine		Einstufiges Getriebe
	Tankstutzen		Ottomotor		Schaltgetriebe
	IPT-Spulenmodul		Ladeanschluss		Differential
			Brennstoffzelle		

Bild 11: Antriebsstrangkomponenten der Antriebskonzepte

Der Antriebsstrang des BEV besteht aus Akkumulator, Inverter, elektrischer Maschine sowie einer einstufigen Untersetzung. Die identischen Komponenten sind Teil des IPTEV-Antriebsstrangs, wobei der Fahrstrom im Betrieb durch induktive Kopplung einer Sekundärspule mit der elektrifizierten Trasse gespeist wird. Der Akkumulator des IPTEV ist erforderlich, um sowohl im Langstreckenbetrieb bei stärkeren Beschleunigungsphasen zusätzlich Leistung bereitzustellen als auch um den Fahrbetrieb auf nicht

elektrifizierten Straßen zu ermöglichen. Das FCEV besitzt die Komponenten eines BEV. Der Akkumulator ist jedoch geringer dimensioniert und wird im Fahrbetrieb über eine Brennstoffzelle mit elektrischer Leistung versorgt. Die Brennstoffzelle speist sich aus dem Wasserstofftanksystem, welches über einen Tankstutzen mit gasförmigem Wasserstoff druckbetankt wird. Der ICE_G Antriebsstrang wird über einen Tankstutzen mit Ottokraftstoff betankt und setzt diesen im Verbrennungsmotor in mechanische Leistung um. In einem Schaltgetriebe wird der begrenzte Drehzahlbereich des Verbrennungsmotors an die Drehzahlanforderung des Fahrbetriebs angepasst. Nachfolgend werden die wesentlichen Antriebskomponenten alternativer Antriebskonzepte wie Energiespeicher und -wandler sowie Kennungswandler im Detail hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften analysiert.

2.2.1 Energiespeicher

Aufgabe des Energiespeichers eines Fahrzeuges ist es, Sekundärenergie zu speichern, diese bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen sowie, falls möglich, Fahrenergie in den Speicher wiederaufzunehmen. Energiespeicher sind anhand der Energieform der gespeicherten Energie unterscheidbar: Für mobile Anwendungen sind chemische, mechanische sowie elektrische Energiespeicher relevant [2]. Für den Einsatz im Fahrzeug muss der Energiespeicher Leistungs- und Energiedichte- sowie Sicherheitsforderungen erfüllen. Ebenso gelten Anforderungen an die Energieeffizienz und Lebensdauer des Speichers [102]. Für alternative Antriebskonzepte im Lösungsraum kommen Akkumulatoren sowie Wasserstofftanksysteme infrage.

2.2.1.1 Akkumulator

Ein Akkumulator ist eine wiederholt aufladbare Batterie und als solche den elektrochemischen Energiespeichern zuzuordnen. Die Energiespeicherung erfolgt in einer Vielzahl einzelner Batteriezellen. In elektrifizierten Antriebssträngen ist die Lithium-Ionen-Zelle (LIZ) Stand der Technik. [103, 104]

Eine LIZ besitzt zwei Elektroden mit abweichendem elektrischem Potential, die durch einen Ionenleiter, den Elektrolyten und eine physische Separatorschicht getrennt sind. Beim Entladen der Zelle sind die Elektroden über einen äußeren Laststromkreis verbunden und streben vom Aktivmaterial der Anode über die Last zum Aktivmaterial der Kathode während die Lithium-Ionen durch den Elektrolyten und die Separatorschicht wandern. [105, 106]

Der Akkumulator setzt sich aus BMS und mehreren Batteriemodulen zusammen. Elektrische Leistung wird über das Hochvoltbordnetz zu- und abgeführt. Ebenso ist eine Anbindung an den Temperierungskreislauf des Fahrzeuges notwendig. Die einzelnen Batteriemodule bestehen wiederum aus vielen LIZ, wie in Bild 12 dargestellt: [107, 103]

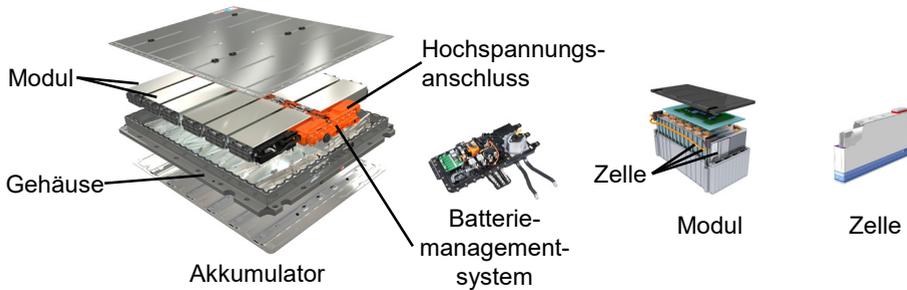


Bild 12: Akkumulator und dessen Bauteile [108–111]

Es sind drei Bauformen von Zellgehäusen bekannt, die in Traktionsanwendungen zum Einsatz kommen: Zylindrische Zellen, prismatische Hardcasezellen sowie prismatische Pouchzellen, die auch als Folienzellen bezeichnet werden. [103, 112]

Als Anodenaktivmaterial kommt in aktuellen LIZ eine Komposite aus Graphit mit geringen Siliziumanteilen zum Einsatz [113]. Wesentliches Differenzierungsmerkmal aktueller Generationen von LIZ ist die Materialkombination des Kathodenaktivmaterials, welches jeweils mit individuellen Stärken und Schwächen behaftet ist. Es sind drei Klassen von Lithium-Metalloxiden unterscheidbar: Schichtoxide, Spinelle und Phosphate. [112, 114]

Schichtoxide folgen der Summenformel LiMO_2 , wobei M stellvertretend für Kobalt, Nickel, Mangan oder Aluminium sowie Kombinationen der genannten Elemente steht [112, 115]. Im Stand der Technik kommen in Traktionsakkumulatoren insbesondere Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA) sowie Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) Verbindungen zum Einsatz. Die Materialanteile der NMC-Verbindung sind dabei variabel. Insbesondere der Verbindung 811, also der Erhöhung des Nickelanteils zugunsten verringerten Kobalt- und Mangananteils wird zunehmende Bedeutung zugemessen [113]. Spinelle besitzen die Summenformel LiM_2O_4 . M steht stellvertretend für Mangan oder Nickel. Dabei ist LiMn_2O_4 für Traktionsanwendungen etabliert, jedoch mit rückläufigem Marktanteil. Bei Phosphaten (LiMPO_4) steht M für Eisen, Mangan, Kobalt oder Nickel. So ist Lithiumeisenphos-

phat LiFePO_4 ein Beispiel dieser Klasse, der ebenso zunehmende Verbreitung, insbesondere für stark kostenoptimierte Modelle, vorausgesagt wird. [112, 113]

Eine wesentliche Anforderung an einen Energiespeicher ist die gravimetrische Energiedichte, also der Energieinhalt pro Masse. Aktuelle Akkumulatoren erreichen Werte von 160 Wh/kg [116, 117]. Mit technologischen Verbesserungen wie Festelektrolytpolymeren oder -keramiken sowie erhöhten Siliziumanteilen auf Anodenseite sind über 220 Wh/kg auf Akkumulatorenebene mit LIZ absehbar [117].

Der Wirkungsgrad η eines Akkumulators ist aus dem Quotienten der Entlade- $U_{Entladen}$ und Ladespannung U_{Laden} über den SoC zu ermitteln: [118]

$$\eta(\text{SoC}) = \frac{U_{Entladen}(\text{SoC})}{U_{Laden}(\text{SoC})} \quad (2.4)$$

Für die relevanten Typen von LIZ lässt sich ein mittlerer Wirkungsgrad von 95 % annehmen, wobei dieser für sehr niedrige und sehr hohe SoC auf 80 % abfallen kann. Extreme SoC werden zum Schutz der Lebensdauer des Akkumulators jedoch durch das BMS vermieden. [112, 118]

Die Zykluslebensdauer bezeichnet die maximale Anzahl der Lade- und Entladezyklen, bevor ein Akkumulator seine ursprüngliche Nennkapazität um 80 % unterschreitet [112]. Durch ein optimiertes Nutzungsprofil hinsichtlich Ladehuben, Lade- und Entladeströmen sowie Betriebstemperatur sind mit aktuellen Generationen von Akkumulatoren über 1000 Ladezyklen möglich [112]. Eine deutliche Optimierung der Zykluslebensdauer zeichnet sich ab. [119, 120]

In [117] und [114] werden perspektivische Entwicklungen wie Feststoffakkumulatoren aufgezeigt. Durch die Entwicklung von Lithium-Metall-Anoden in Kombination mit minimalen Separatorschichten und Feststoffelektrolyten wird eine deutliche Erhöhung der Energiedichten möglich. [117]

Zur Fertigung der LIZ sind zunächst die Kathodenaktivmaterialien verschiedenen Misch-, Heiz-, Wasch- und Trocknungsdurchläufen zu unterziehen. Die entstehenden Vorläufermaterialien (Precursor) werden mit Lithiumkarbonat oder -hydroxid vermischt und bei Temperaturen von 1.000 °C über rund 12 Stunden kalziniert. Auf das Ofenbrennen folgen Zerkleinerungs- und Siebprozesse [121]. Das Anodenaktivmaterial, im Wesentlichen bestehend aus natürlichen oder synthetischen Graphitflocken,

wird Rundungsprozessen unterzogen. Optimale Partikelgrößen zwischen 8 – 30 μm werden durch Siebevorgänge extrahiert [122].

Die eigentliche Herstellung der Elektroden beginnt mit dem Abwiegen der Pulverkomponenten sowie dem Trockenmischen unter Zugabe von Leitruß. Beim anschließenden Nassmischen werden Lösemittel und Binder hinzugegeben, es entsteht eine homogene Masse (Slurry) [112, 123]. Es folgt die Beschichtung der Stromableiterfolien mit dem Slurry. Für die Kathode kommt 15 – 25 μm starke Aluminiumfolie zum Einsatz, während die Anodenfolie aus 6 – 15 μm starkem Kupfer besteht. Die Dicke der Beschichtung mit dem Slurry ist entscheidend für die Kapazität der Zellen und beträgt um 200 μm [123]. Beim Kalandrieren werden Elektrodenmassen mit Hilfe mehrerer Walzen bei Liniendruckkräften von 50 – 60 t verdichtet. [112, 123]

Für die Montage der Zellen sind die bis zu 1.300 mm breiten Kathoden- und Anodenfolien durch Rollmesser oder Lasertechnologie zurechtzuschneiden und vor den folgenden Prozessschritten zu vakuumieren [123]. Nachfolgend werden die Elektroden im Durchlaufverfahren oder in Vakuumschränken getrocknet. Die weitere Zellmontage ist ebenso in Trockenräumen durchzuführen [123, 112]. In Abhängigkeit der Bauform des Zellgehäuses kommen Stapel- oder Wickelverfahren zum Einsatz, welche Kathoden-, Separator- und Anodenfolie zusammenführen. Anschließend sind Ableitfahnen in einem Ultraschallreib- oder Laserstrahlschweißprozess an die konfektionierten Folien zu fügen. Die LIZ wird eingehaust, wobei vor der Versiegelung des Gehäuses ein Stromableiter zwischen den Gehäusehälften anzubringen ist. Es folgt die Befüllung der LIZ mit dem Elektrolyten, welcher von den porösen Separator- und Elektrodenschichten bis zur Sättigung absorbiert wird. Abschließend werden die LIZ unter Vakuum mit Siegelmassen verschlossen. [103, 123]

Die Formierung bezeichnet die erste Ladung der Zelle, die bewirkt, dass sich der elektrische Kontakt zwischen Elektrolyt und Aktivmaterial verbessert. Die genaue Ladestrategie ist herstellerabhängig. In der folgenden Alterung werden die geladenen LIZ bis zu 36 Tage bei ca. 30 °C gelagert, anschließend verbleibende Partikel abgesaugt und die LIZ final versiegelt. Innenwiderstand und Leerlaufspannung sind die entscheidenden Qualitätskriterien der LIZ und lassen die Identifikation fehlerhafter Zellen zu. [123]

Mehrere LIZ werden zu einem Batteriemodul montiert. Die Stromableiter der einzelnen LIZ werden verschraubt oder mittels Ultraschall-, Wider-

stands- oder Laserstrahlschweißen stoffschlüssig gefügt. Es folgt die Integration von Temperierungselementen, Sensorik und die abschließende Montage und Prüfung des Gehäuses. [112]

Die Fertigung der LIZ benötigt aufgrund der mehrstufigen Heiz- und Trocknungsprozesse über 90 % des Energieaufwands der Akkumulatorfertigung. Die Modul- und Systemfertigung hingegen ist nicht energieintensiv. In Summe beträgt der Produktionsenergiebedarf für die Fertigung eines Traktionsakkumulators rund 89 kWh je gefertigter Kilowattstunde Akkumulatorkapazität. [124–127]

Die Materialkomposition eines Akkumulators ist von dessen Kapazität, der Spannungslage sowie insbesondere der chemischen Zusammensetzung der Aktivmaterialien abhängig [104]. Für einen großen Traktionsakkumulator ergibt sich folgende Massenverteilung: 22 – 25 % Kathodenaktivmaterial, 16 % Anodenaktivmaterial, 11 % Elektrolyt sowie rund 8 % Kühlung und Elektronik [128, 121]. Für eine Bewertung der Ressourcenkritikalität haben die Kathodenaktivmaterialien besondere Relevanz. Auf Basis der aktuellen Marktanteile der Kathodenaktivmaterialien von LIZ enthält ein Akkumulator mit 75 kWh Bruttokapazität rund 9 kg Lithium, 12 kg Kobalt, rund 39 kg Nickel und 12 kg Mangan. Darüber hinaus stellen Kupfer und Aluminium wesentliche Anteile.

Nach dem produktiven Einsatz des Akkumulators im Kraftfahrzeug sind die Materialien und Ressourcen zu großen Teilen zurückgewinnbar: Unter der Vorbehandlung wird die Demontage des Batteriesystems bis zur Abtrennung der Aktivmaterialien von den Stromableiterfolien verstanden. Es folgt die Extraktion der Metalle aus den verbleibenden Pulvern im hydro-metallurgischen oder pyrometallurgischen Verfahren und die abschließende Aufbereitung der Materialien. Die erreichbaren Recyclingeffizienzen für die Kathodenaktivmaterialien liegen bei über 93 %, für Lithium bei 80 bis 95 %. [129]

Mit dem Anstieg der globalen Produktionskapazitäten von Akkumulatoren sinken die Herstellungskosten. Auf Batteriesystemebene sind zum Stand der Technik 130 €/kWh anzunehmen, wobei die Zelfertigung mit über 85 €/kWh eingeht [117, 130, 131]. Das mittelfristige Potential liegt auf Systemebene bei 72 €/kWh [117, 130, 132].

2.2.1.2 Wasserstofftank

Kraftstoffe sind chemische Energiespeicher und fungieren im Fahrzeug als Sekundärenergieträger. Im FCEV kommt Wasserstoff als Kraftstoff zum

Einsatz, welcher in einer Brennstoffzelle zu elektrischer Energie gewandelt wird. Bild 13 zeigt den Aufbau eines Wasserstoffdruckgasspeichers, wie im Toyota Mirai verbaut:

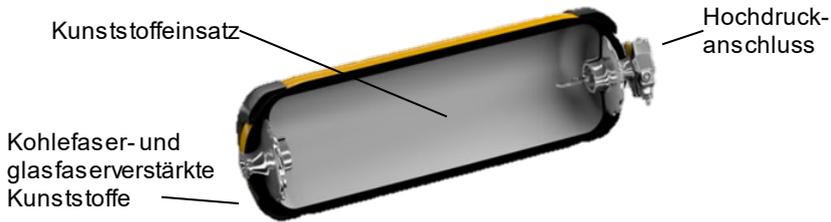


Bild 13: Wasserstoffdruckgasspeicher [133]

Die höchste gravimetrische Energiedichte von rund 2,5 kWh/kg ist durch die Verwendung von Kryotanks erreichbar. Wasserstoff wird bei einer Temperatur von -253 °C verflüssigt und bei rund 4 bar Betriebsdruck in einem bestmöglich wärmeisolierten Tank gespeichert. Eine schleichende Temperaturerhöhung und damit eine kontinuierliche Vergasung, die zu Verlusten an gespeichertem Wasserstoff führt, ist nicht zu vermeiden (Boil-Off-Verluste). Pro Tag ist daher mit 1 bis 3 % Verlust der gespeicherten Energiemenge zu kalkulieren. Auch der Energieaufwand von rund 30 % der im Wasserstoff gespeicherten Energie zur Verflüssigung ist problematisch. [38, 56, 134]

Eine weniger hohe gravimetrische Energiedichte von rund 1,9 kWh/kg [135, 136] ist zum Stand der Technik mit Druckgasspeichern erreichbar. Gasförmiger Wasserstoff wird auf bis zu 700 bar komprimiert und bei Umgebungswärme gespeichert. Aufgrund der ausbleibenden Boil-Off-Verluste hat sich die Druckgasspeicherung für FCEV PKW durchgesetzt. Durch Leichtbaumaterialien und höhere Betriebsdrücke ist von einer Verbesserung der gravimetrischen Energiedichte auf bis zu 2,7 kWh/kg auszugehen [38, 134, 56]. Aktuelle FCEV sind mit mehreren separaten Wasserstoffdruckspeichern ausgestattet und speichern so rund 5 kg Wasserstoff, was einem Heizwert von 167 kWh gleichkommt [136].

Alternativ zu physikalischen Speichern kann Wasserstoffgas auch in chemisch gebundener Form gespeichert werden. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) ermöglichen eine technisch wenig anspruchsvolle Speicherung bei hohen gravimetrischen Energiedichten. Die Ein- und Auslagerung des Wasserstoffs in LOHC unterliegt jedoch zusätzlichen energetischen Verlusten. [137, 138]

Die Fertigung eines Druckgasspeichers beginnt mit dem Blasen des Kunststoffliners. In Folge wird der Einsatz vielfach mit harzgetränkten Kohlefasern umwickelt und abschließend mit einem metallischen Zylinderhals sowie einem Ventileinsatz versehen. [139–141]

Die Produktionskosten eines Wasserstoff Druckgasspeichersystems werden zum Stand der Technik mit 21 €/kWh [142] angenommen, wobei 10 €/kWh [142, 56] als Zielwert gelten. Die Daten sind in Tabelle 31 zusammengefasst.

2.2.2 Energiewandler

Energiewandler haben im Fahrzeug die Aufgabe, die zugeführten Sekundärenergieträger in mechanische Nutzenergie zu überführen. Im Lösungsraum kommen Brennstoffzellen und elektrische Maschinen als Energiewandler zum Einsatz.

2.2.2.1 Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle (Fuel Cell FC) wandelt chemisch gebundene in elektrische Energie. Im Antriebsstrang hat insbesondere die Ausführung als Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-System aufgrund des flexiblen Betriebsverhaltens sowie der günstigen Leistungsdichte Anwendungspotential [143, 38]. Für den Betrieb eines FC-Systems ist Peripherie erforderlich: Das System setzt sich aus FC-Stack, Luft- und Wasserstoffversorgung, Kühlsystem, Leistungselektronik sowie Steuergerät zusammen [144]. Der Aufbau ist in Bild 14 dargestellt:

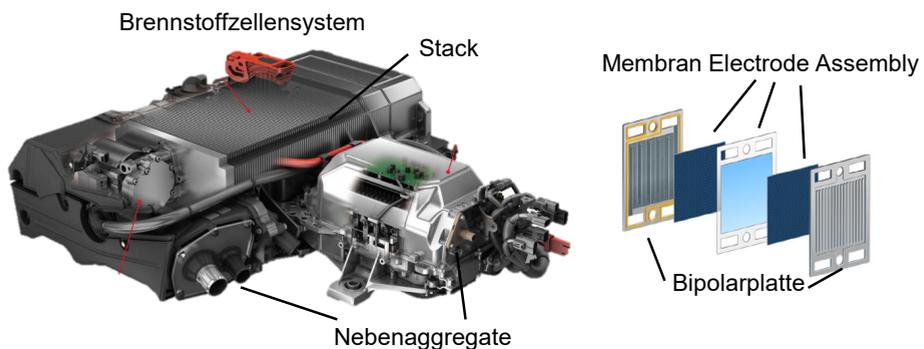


Bild 14: Brennstoffzelle und deren Bauteile [136]

Die PEM FC wird mit reinem Wasserstoff betrieben und erreicht eine Betriebstemperatur von bis zu 90 °C [144]. Eine Zelle besteht aus der Anodenseite, der Kathodenseite sowie der dazwischenliegenden PEM. Hierzu wird

die PEM beidseitig mit einer Katalysatorschicht beaufschlagt und um jeweils eine Gasdiffusionsschicht ergänzt [143, 144]. Am Anodenkatalysator werden die zugeführten H_2 -Moleküle in Atome gespalten. Die frei werden den Elektronen fließen über die externe Last zur Kathodenseite, während die H-Protonen über die PEM zur Kathode wandern. Der an der Kathode zugeführte Sauerstoff wird durch die Elektronen reduziert und reagiert schließlich mit den Wasserstoffprotonen zu Wasser [38, 144]. Die Spannung einer Einzelzelle liegt bei unter 1 V, weswegen bis zu 500 Einzelzellen gestapelt und in Reihe geschaltet werden, um geeignete Betriebsspannungen zu erzielen [144].

Die Wasserstoffversorgung stellt dem FC-Stack unter Anwendung mechanischer Druckreduzierer das Gas im geforderten Betriebsdruck von einigen 100 mbar bereit. Die Luftversorgung liefert das Kathodengas für das FC-Stack. Die Umgebungsluft ist dabei zu filtern und zu komprimieren. Bei leistungsdichten Systemen wie im FCEV ist außerdem eine Befeuchtung der zugeführten Kathodenluft erforderlich, um die Membranen im Stack nicht zu entfeuchten. Bei der Kühlung einer PEM-FC sind vergleichbare Wärmemengen wie bei einem ICE auszuschleusen, weswegen ebenso Wasserkühlungen zum Einsatz kommen. Auch Teil des Brennstoffzellensystems ist ein Gleichspannungswandler, um die je nach Betriebspunkt variierende Ausgangsspannung des Brennstoffzellensystems an das Spannungsniveau des Hochvoltbordnetzes anzugleichen [145]. [45, 144]

Sämtliche Parameter beziehen sich auf das gesamte FC-System und sind auch in Tabelle 33 zusammengefasst. In aktuellen Serienfahrzeugen entspricht die Nennleistung des FC-Systems in etwa der Nennleistung der eingesetzten elektrischen Maschine [136]. Die Leistungsdichte eines FC-Systems liegt bei 0,65 kW/kg, wobei nur geringe Optimierungen darüber hinaus zu erwarten sind [146, 134]. Der Umwandlungswirkungsgrad auf Systemebene ist im Teillastbereich optimal [38, 144], wobei für ein Langstreckenfahrprofil 52 % Wirkungsgrad mit einem technologischen Weiterentwicklungspotential auf 60 % angenommen werden [146, 45].

Die einzelnen Zellen des FC-Stack sind Verschleißmechanismen aufgrund irreversiblen Katalysatorabbaus unterworfen. Die zu erwartende Lebensdauer eines FC-Stack beträgt unter den Leistungsanforderungen automobiler Fahrzyklen rund 5.000 Betriebsstunden, was einer Laufleistung von rund 200.000 km entspricht und soll durch technologische Entwicklung zumindest 8.000 Betriebsstunden erreichen. [146–148]

Die Herstellung eines FC-Stack beginnt mit dem Aufbau der Einzelzellen. Diese bestehen jeweils aus einer Membran Electrode Assembly (MEA) die

beidseitig von Bipolarplatten (BPP) umschlossen ist. Auf die MEA ist eine poröse Gasdiffusionsschicht (GDL) aufgebracht, an deren Grenzfläche zur Membran der Katalysator sitzt und die elektrochemischen Reaktionen ablaufen. Die BPP leitet den Elektronenfluss zur nächsten Zelle, separiert die Gasräume benachbarter Zellen und versorgt über Kanalstrukturen die Elektroden mit Wasser- und Sauerstoff. Zwischen den Einzelzellen sind Kühlvorrichtungen eingebracht. Für den FC-Stack werden die Einzelzellen gestapelt und komprimiert sowie dauerhaft verspannt. Es erfolgt die Montage der Stromkollektoren des Stacks und der Endplatten. Nach einer Prüfung wird der FC-Stack mit den Nebenaggregaten zu einem FC-System montiert. [149, 150, 45]

Für ein 90 kW FC-Stack sind etwa 45 g Platinpulver als Katalysatormaterial einzubringen [151]. Der Produktionsenergiebedarf über die Fertigungskette des FC-Systems beträgt 16,7 kWh/kW [151–153].

Die Systemkosten für ein BZ-System in einer angenommenen Serienproduktion lassen sich auf rund 40 €/kW abschätzen, wobei im technologischen Potential 30 €/kW erreichbar scheinen [146, 154]. Die platinhaltigen Katalysatormaterialien verbleiben auch bei hohen Produktionsstückzahlen als Kostentreiber [154].

2.2.2.2 Elektrische Maschine

Die rotierende elektrische Maschine ist ein bidirektionaler Energiewandler zwischen elektrischer und mechanischer Energie. Im Antriebsstrang alternativer Antriebskonzepte hat die Ausführung als Drehstrommaschine Anwendungsrelevanz [155].

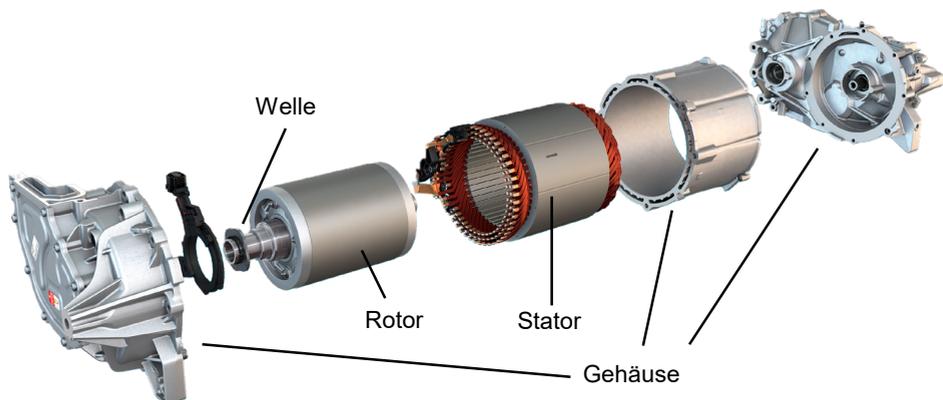


Bild 15: Elektrische Maschine und deren Bauteile [156]

Anhand des Wirkprinzips sind die Ausführungsvarianten Synchronmaschine (SM), Asynchronmaschine (ASM) und Reluktanzmaschine (RM) zu unterscheiden, wobei insbesondere SM und ASM als Traktionsmaschinen Verbreitung haben. Der Stator als ruhender Teil der Maschine ist bei beiden Ausführungsvarianten weitgehend gleich aufgebaut: Mit Drehstrom gespeiste Statorwicklungen erzeugen ein über den Statorumfang rotierendes Magnetfeld. Im Falle der SM folgen Permanentmagneten (PM) oder fremderregte Spulen im Rotor dem Drehfeld des Stators schlupffrei. Bei der ASM erzeugt eine beabsichtigte Asynchronität zwischen dem Drehfeld des Stators und dem Rotor durch Induktion einen Stromfluss im Käfig des Rotors. Die stromdurchflossenen Stäbe im Drehfeld des Stators lassen Tangentialkräfte auf den Rotor wirken, welche diesen in Drehbewegung versetzen. [157, 158]

Die SM hat unter den Traktionsantrieben für alternative Fahrzeugantriebe mit rund 90 % den weitaus höheren Marktanteil [159]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass PM freie Ausführungen wie ASM oder auch fremderregte SM oder SM mit erhöhtem Reluktanzanteil zunehmend Anwendung finden [160].

Eine SM mit PM als Traktionsantrieb erzielt derzeit eine gravimetrische Nennleistungsdichte von deutlich über 1 kW/kg [161–163], kurzzeitig kann in Überlast die zweifache Nennleistung erbracht werden [134, 161, 163]. Die Energieeffizienz der SM ist vom Betriebspunkt abhängig und schwankt über das Motorkennfeld zwischen 75 % und 96 %. Bei gängigen Betriebspunkten für Autobahnfahrt werden 95 % angenommen [161]. Die Nennleistungsdichte der ASM bleibt mit 0,9 kW/kg hinter der einer SM zurück. Jedoch kann eine ASM weiter oder über einen längeren Zeitraum oberhalb der Nennleistung betrieben werden [134, 164, 155]. So erreicht die ASM eines Tesla Model S von 2018 eine Leistungsdichte von über 2,5 kW/kg [165, 166]. Um die Maximalleistung über einen langen Zeitraum bereitstellen zu können, ist eine effiziente Kühlung des Rotors notwendig, da gerade bei hocheffizienten Maschinen ein wesentlicher Teil der Verlustwärme im Rotor entsteht [167]. Die Energieeffizienz einer ASM liegt zwischen 75 % und 94 %, für Autobahnfahrt werden 92 % angenommen [168].

Die Patentaktivität als Indikator für Entwicklungsarbeit zur elektrischen Maschine für Traktionsanwendungen hat sich ab 2010 stark intensiviert [159]. Im Fokus steht die Erhöhung der Leistungsdichte, insbesondere durch höhere Maximaldrehzahlen der Maschine [169]. Um die Maximalleistung über lange Zeiträume bereitstellen zu können, sind innovative Wasser- und Ölkühlungskonzepte notwendig [170]. Langfristig scheinen

bis zu 5 kW/kg gravimetrischer Leistungsdichte erreichbar [159]. Eine weitere Bestrebung ist es, die kostenintensiven Metalle der Seltenen Erden in den PM zu vermeiden. So wird zum einen ein zunehmender Marktanteil von ASM erwartet [159], jedoch auch die fremderregte SM sowie die SM mit Reluktanzanteil höhere Marktanteile erlangen [171].

Grundkörper einer elektrischen Maschine ist das Blechpaket, welches in Stanz- und Paketiervverfahren hergestellt wird. In die Statornuten eingebrachte Nutgrundisolationen schützen die Wicklungen vor Beschädigung im Fertigungsprozess und erhöhen die elektrische Isolationsfestigkeit im Betrieb. Die Wicklung besteht aus isoliertem Kupferdraht, der über unterschiedliche Prozesskinematiken in die Statornuten gewickelt oder eingebracht wird. Die Statorfertigung schließt mit der Imprägnierung der Spulen und deren Verschaltung ab. Die Rotorkäfigstäbe einer ASM können gegossen und durch Aufsetzen und Verschweißen von separaten Kurzschlussringen auf die Rotorstäbe zu einem Käfigläufer komplettiert werden. Im Falle der SM mit PM sind Prozesse zum Einbringen und Magnetisieren der PM notwendig. Der Rotor ist anschließend auf die Welle zu fügen und die Baugruppe auszuwuchten. In der Endmontage wird zunächst der Stator in das Motorgehäuse und anschließend der Rotor in den Stator montiert und das Gehäuse durch die Montage der Lagerschilde verschlossen. [172–174]

Der Materialaufwand der Produktion der elektrischen Maschinen wird durch das Aluminium für die Gehäusefertigung sowie das Elektroblech für die Blechpakete von Rotor und Stator dominiert. Für PMSM sind darüber hinaus Seltene Erden Ausgangsmaterial der Magnete. 94 % der verbauten Materialien sind durch effiziente Recyclingprozesse zurückgewinnbar, die PM werden in aktuellen Recyclingprozessketten jedoch nicht berücksichtigt [175, 176]. Der Energieaufwand der Fertigung ist durch die urformende Herstellung des Maschinengehäuses bestimmt [177].

Die Systemkosten einer elektrischen Maschine ohne Untersetzungsgetriebe lassen sich auf rund 6,50 €/kW für eine ASM und 8,50 €/kW für eine SM mit PM abschätzen [178, 142]. Das langfristige Kostensenkungspotential ist begrenzt [142]. Die Kostendifferenz zwischen den Maschinenarten erklärt sich durch die PM, welche den Einsatz von Metallen der Seltenen Erden wie Neodym und Dysprosium erfordern.

2.2.3 Kennungswandler

Kennungswandler passen die mechanisch oder elektrisch vorliegende Energieform hinsichtlich deren Kennung innerhalb technischer Systeme an.

2.2.3.1 Inverter

Im Antriebsstrang haben leistungselektronische Komponenten die Aufgabe Spannungsniveaus, Stromstärken und Frequenzen elektrifizierter Komponenten nach deren Anforderungen umzuformen. Die vier Grundfunktionen zum Aufbau einer Leistungselektronik sind Gleichspannungs- und Wechselspannungswandlung sowie Gleich- und Wechselrichtung [179].

Man unterscheidet folgende Anwendungen von Leistungselektronik in alternativen Antriebssträngen: Für den Vierquadrantenbetrieb einer mit dreiphasigem Drehstrom betriebenen elektrischen Maschine ist ein bidirektionaler Wechselrichter (Inverter) notwendig, der im motorischen Betrieb auf die Spitzenleistung der Maschine hin ausgelegt ist [180, 181]. Darüber hinaus ist Leistungselektronik erforderlich, um den Akkumulator mit Netzstrom zu laden. Das AC-Laden wird durch den OBC ermöglicht, welcher mit einem Gleichrichter einen isolierten Gleichspannungswandler speist, der das Spannungsniveau des Akkumulators bedient. Für höhere Ladeleistungen ist der Lader infrastrukturseitig installiert. Dem Fahrzeug wird dann Gleichstrom auf dem Spannungsniveau des Akkumulators zugeführt [180].

Für den Betrieb eines FC-Systems ist ein leistungsstarker Gleichspannungswandler notwendig, um die variierende Ausgangsspannung über die Betriebszustände der FC an die Betriebsspannung des Hochvoltbordnetzes anzupassen [180, 182]. Ebenso kann ein Gleichspannungswandler notwendig sein, um einen Traktionsakkumulator mit geringerem Spannungsniveau an das Hochvoltbordnetz anzubinden [182]. Auch zur Anbindung des Niedersvoltbordnetzes zum Betrieb der Nebenverbraucher ist ein Gleichspannungswandler, allerdings niedriger Leistung, erforderlich.

Leistungselektronische Grundfunktionen werden durch eine Kombination aktiver sowie passiver leistungselektronischer Bauelemente abgebildet. Passive Bauelemente dienen der Energiespeicherung in elektrischen Feldern durch Kapazitäten oder in magnetischen Feldern durch Induktivitäten. Aktive Bauelemente sind Transistorschalter auf Halbleiterbasis, welche durch periodische Schalthandlungen Zielwerte elektrischer Größen

einstellen [179]. Die Transistorschaltung wird millionenfach repetitiv auf einem einzelnen Siliziumchip aufgebracht, um parallelgeschaltet als einzelner Leistungsschalter zu fungieren. Mit vergleichsweise niedrigen Steuerspannungen können Transistorschalter so große Spannungen und Ströme schalten. Im elektrifizierten Antriebsstrang kommen Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFET) oder aber Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT) als Grundschaltungstypen zur Anwendung [180]. Neben den beschriebenen Bauelementen ist zusätzliche Peripherie wie Steuerungselektronik, Sensoren sowie Kühlvorrichtungen notwendig [181, 180]. Bild 16 zeigt die Ausführung eines Inverters zur maschinennahen Integration:

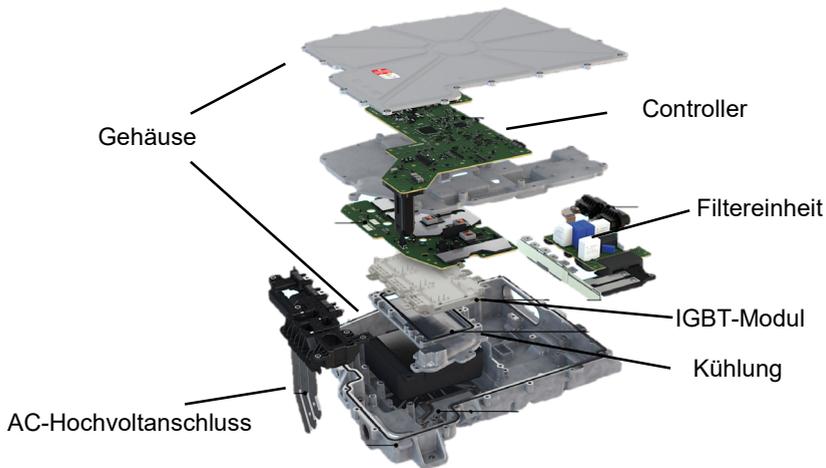


Bild 16: Inverter [156, 183]

Die Leistungsdichte eines Inverters schwankt mit der Leistung des Antriebsstrangs. Im Mittel sind bei aktuellen Modellen 20 kW/kg anzunehmen [184, 185]. Analog zur elektrischen Maschine kann auch der Inverter Leistungen oberhalb der Nennleistung liefern. Der Wirkungsgrad eines Motorinverters mit konventioneller IGBT-Technologie ist im Autobahnbetrieb auf 98 % abschätzbar, unter Verwendung von Siliziumkarbid (SiC) basierten MOSFET-Leistungsschaltern sind 99 % möglich [186].

Der Bauraum leistungselektronischer Komponenten ist von der Schaltfrequenz der aktiven Bauelemente abhängig. Höhere Schaltfrequenzen lassen geringer dimensionierte passive Bauelemente zu, wodurch ein kompakter Gesamtaufbau möglich wird [187]. Auch die zunehmende Integration des Motorinverters in das Gehäuse der elektrischen Maschine führt zu einer Optimierung der Leistungsdichte [181]. Der Wirkungsgrad eines Inverters ist insbesondere durch dessen aktive Bauelemente bestimmt. Auch hier

führt eine Maximierung der Schaltfrequenzen durch eine Verringerung der Schaltverluste aufgrund steilerer Strom- sowie Spannungsflanken zu einer Optimierung [188, 180]. Eine Verringerung der Verlustleistung reduziert die abzuführende Verlustwärme, wodurch mittelbar wiederum eine höhere Leistungsdichte der Gesamtkomponente darstellbar ist [180]. Als Schlüssel zu einer weiteren Erhöhung der Schaltfrequenzen von Leistungsschaltern werden die Substratmaterialien SiC sowie Gallium-Nitrid (GaN) gesehen [188, 186].

Für die Produktion eines Inverters ist eine Vielzahl verschiedener Bauelemente erforderlich. Die aktiven Leistungshalbleiterchips werden bei spezialisierten Halbleiterherstellern produziert: Gegossene Siliziumblöcke werden zu einzelnen Wafern zerschnitten, auf welchen durch Verfahrenskombinationen aus Ionenimplantation, Photolithographie, Ätzen und Beschichtungsabfolgen Transistorschaltungen aufgebaut werden [189].

Der Produktionsprozess der Schaltungsträger für Steuerelektronik und Leistungsmodul des Inverters umfasst das Bestücken vorbereiteter Substratmaterialien mit aktiven und passiven Bauelementen. Als Substratmaterial für Steuerungselektronik kommen Leiterplatten mit integrierten Kupferbahnen zum Einsatz. Je nach Art des Bauelements wird dieses durch Löt-, Sinter- oder Drahtbondverfahren elektrisch kontaktiert. Abschließend folgt die Funktionsprüfung und Kapselung des bestückten Schaltungsträgers. [187, 190]

Die Montage von Leistungsmodul, Steuerelektronik und Gehäuse schließt die Prozesskette zur Herstellung des Inverters ab. Auch bei der Fertigung des Inverters dominiert die urformende Gehäusefertigung im Aluminiumdruckgussverfahren den Energieaufwand der Produktion. Für die Fertigung eines Inverters mit einer Leistung von 90 kW sind rund 24 kWh an Produktionsenergie aufzubringen. [190]

Die Systemkosten eines Inverters betragen rund 4,50 €/kW, wobei durch weitere Optimierung der Produktionsprozesse, wie größere Waferformate sowie höhere Halbzeuggüten, 3 €/kW erreichbar sind [142, 191].

2.2.3.2 Getriebe

Das Getriebe passt innerhalb mechanischer Systeme Drehmoment und Drehzahl an. In elektrifizierten Antriebssträngen wird das niedrige Drehmoment der elektrischen Maschine in ein hohes Antriebsdrehmoment überführt. Trotz des breiten Drehzahlbandes elektrischer Maschinen bietet sich die Verwendung einer Untersetzung an, da hochdrehende elektrische

Maschinen mit niedrigem Drehmoment kompakter bauen als Maschinen mit hohem Drehmoment, wie für Radnabenantriebe erforderlich. Die nachfolgenden Leistungsdaten beziehen sich auf einstufige Übersetzungen, wie sie in BEV mit Zentralantrieben eingesetzt werden. Bild 17 zeigt die einstufige Übersetzung zwischen Antriebs- und Abtriebswelle in einem elektrischen Achsmodul: [192]



Bild 17: Einstufiges Getriebe in elektrischem Achsmodul [193]

Bei der Auslegung einer einstufigen Übersetzung ist für den Antriebsstrang ein Kompromiss zwischen Anfahrbeschleunigung sowie erreichbarer Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges, limitiert durch die Maximaldrehzahl der elektrischen Maschine, zu finden. Dieser Kompromiss kann durch die Verwendung von Mehrganggetrieben gefunden werden, die jedoch zusätzliche Komplexität und Masse bedingen [192]. Gängige Übersetzungsverhältnisse in einstufigen Übersetzungen elektrischer Antriebsstränge sind 9:1 bis 11,53:1 [194].

Bei einstufigen Übersetzungsgetrieben sind Leistungsdichten von über 5 kW/kg [194, 162, 195] möglich. Der Wirkungsgrad einer mechanischen Übersetzung liegt bei über 97 % [196].

Die Getriebeproduktion umfasst die Herstellung des Gehäuses, der Abtriebswelle sowie der Stirnzahnräder. Getriebegehäuse werden im Aluminiumdruckgussverfahren urformend hergestellt und durch spanende Verfahren nachbearbeitet. Der Wellenrohling wird in Drehverfahren um Lagersitze sowie Dichtflächen ergänzt und nach härtender Wärmebehandlung Schleif-, Hon- und Läppprozessen unterzogen. Die Zahnflanken schrägverzahnter Stirnzahnräder werden im Axialwälzfräsverfahren erzeugt und der Prozess durch Wärmebehandlung und Feinbearbeitung abgeschlossen. Es folgt die Endmontage der Komponenten. [197]

Urformende Verfahren der Getriebefertigung sowie Wärmebehandlungsschritte bedingen hohe Energieaufwände der Produktion. Für ein einstufiges Getriebe ist von 90 kWh Energieaufwand auszugehen [198, 199]. Die Kosten liegen bei 1,50 €/kW [142, 47]

3 Notwendigkeit einer Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte

Das vorliegende Kapitel untersucht Methoden und Werkzeuge der Technologiebewertung im Allgemeinen sowie der Bewertung von Antriebstechnologien im Speziellen. Aus dem Stand der Forschung ist anschließend ein Handlungsbedarf für weitere Forschung ableitbar. Ebenso sind bestehende Lösungsansätze auf deren Anwendbarkeit für die hier zu entwickelnde Methodik zu prüfen und in diese sinnvoll zu integrieren.

Die Bewertung von Antriebskonzepten ist eine Aufgabenstellung der Technologiebewertung und damit des Technologiemanagements. Im vorliegenden Abschnitt werden die Begriffe der Methode, der Technologie sowie der Technologiebewertung definiert und der Anwendungsbereich sowie die Phasen von Technologiebewertung umschrieben.

Eine Methode beschreibt ein regelbasiertes und planmäßiges Vorgehen zur Ausführung bestimmter Tätigkeiten, um ein definiertes Ziel zu erreichen [200]. Methoden sind damit als eine Vorschrift zu verstehen, die auf die Lösung einer Aufgabenstellung fokussiert. Ziel des Einsatzes von Methoden in der Technologiebewertung ist die Maximierung der Entscheidungsqualität und damit letztlich die erfolgreiche Umsetzung technologischer Maßnahmen. Komplexe Entscheidungssituationen sind jedoch nur durch das Zusammenwirken verschiedener Einzelmethoden zu meistern. Eine solche Methodenkombination wird auch als Methodik bezeichnet [200]. Die Bewertung eines Antriebskonzepts ist nicht in einer einzigen Methode beschreibbar, sondern setzt sich aus unterschiedlichen Einzelmethoden zusammen. Es ist also eine Methodik notwendig.

Unter Technologie wird wissenschaftlich fundiertes Wissen über Mittel-Zweck-Beziehungen verstanden, das Lösungspotenziale für praktische Problemstellungen bietet. Technologie beschränkt sich damit zunächst auf die Wissensbasis über naturwissenschaftlich-technische Zusammenhänge. Kommt eine Technologie schließlich in Produkten oder Prozessen zur Anwendung und löst damit konkrete Problemstellungen, liegt eine Technik vor. [3, 201]

Dieser Definition folgend ist Technik die materialisierte Form von Technologie – die beiden Teilbereiche sind voneinander differenzierbar und überschneidungsfrei. Alternativ kann ein integratives Begriffsverständnis herangezogen werden, wonach der Technologiebegriff den Technikbegriff voll-

ständig enthält [202]. Nachfolgend wird Technik als Teilbereich von Technologie begriffen und damit das integrative Begriffsverständnis angewandt.

Dieses ist auch für die Technologie- und Technikbewertung anwendbar: Technologiebewertung ist die Beurteilung einer Technologie anhand verschiedener Kriterien. Für unterschiedliche Aufgaben und Entscheidungssituationen stehen verschiedene Methoden der Technologiebewertung zur Verfügung [3]. Im Gegensatz hierzu definiert die Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zur Normung der Begriffe und Grundlagen der Technikbewertung dieselbe als eine Analyse des Stands der Technik und dessen Entwicklungsmöglichkeiten. Dabei werden Folgen der Anwendung einer Technik sowie mögliche Alternativen zu dieser Anwendung beurteilt und wünschenswerte Entwicklungen der Technikanwendung aufgezeigt [203]. Damit zielt eine Technikbewertung im Gegensatz zur Technologiebewertung auf eine Auswirkungsanalyse sowie eine Bewertung des konkreten Technikeinsatzes ab [204].

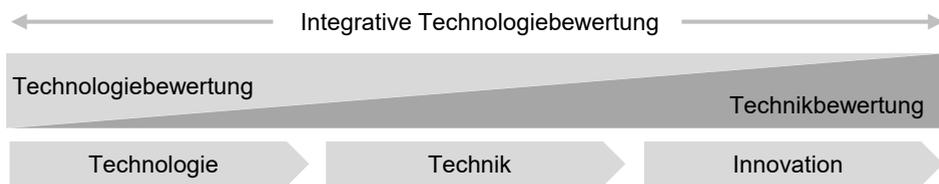


Bild 18: Integrative Technologiebewertung im Innovationsprozess nach [205]

Im Innovationsprozess folgt auf eine Technologieentwicklung die Umsetzung dieser Technologie als Technik. Diese mündet schließlich in eine Innovation. Zu Beginn dieses Prozesses wird von Technologiebewertung gesprochen, während mit zunehmendem Entwicklungsstand die konkrete technische Anwendung zu bewerten ist und damit Technikbewertung vorliegt [204]. Analog zum Technologiebegriff ist jedoch auch ein integratives Begriffsverständnis anwendbar: Technikbewertung ist Teilbereich der Technologiebewertung. Ein Vergleich von Antriebskonzepten ist zunächst eine Aufgabe der Technikbewertung. Verschiedene Antriebskonzepte sind technische Systeme, welche zur Lösung einer konkreten Problemstellung, nämlich des motorisierten Fortbewegens, eingesetzt werden. Die nachfolgenden Ausführungen setzen eine integrative Sichtweise der Technologiebewertung voraus.

Technologiebewertung findet in zwei Bereichen Anwendung: In der staatlichen Politik- und Gesellschaftsberatung sowie im Technologiemanagement eines Unternehmens. Technologiebewertung entstammt der staatlichen Politikberatung [204]. So wurde in den USA im Jahre 1972 das „Office

of Technology Assessment – OTA“ gegründet und in diesem Zusammenhang der Begriff des „Technology Assessment“ erstmalig eingeführt. In Deutschland wurde daraufhin ebenso eine Institutionalisierung von Technikbewertung gefordert, was 1985 in die Gründung eines „Büro(s) für Technikfolgenabschätzung (TAB)“ mündete. Die Aufgabe dieser Institution ist es, Technologiebewertung als Mittel zur Beratung des Parlaments bereitzustellen und damit zur staatlichen Technologiepolitik beizutragen. Die Relevanz einer solchen Institution wird deutlich, zieht man die Folgen von Fehleinschätzungen staatlicher Technologiebewertung in Betracht. So kann eine fehlgeleitete Gesetzgebung und Förderpolitik durch die Einingung der Unternehmensfreiheit hinsichtlich Forschungsaktivitäten ganze Technologiefelder benachteiligen und schließlich zu einer Schwächung der globalen Wettbewerbsposition führen [204]. Die Sicherstellung objektiver und verfälschungsfreier Technologiebewertung ist für eine zielgerichtete staatliche Technologiepolitik entscheidend. Nur so können die Ergebnisse einer Technologiebewertung die fundierte Beratung von Entscheidungsträgern ermöglichen und zur inhaltlichen Aufklärung von Technologiefolgenwirkungen beitragen. [206]

Unternehmen können langfristig im Wettbewerb nur bestehen, wenn sie sich ihrem dynamischen Umfeld in innovativer Weise anpassen. Diese Anpassung findet insbesondere auf dem Gebiet der Technologien statt [207]. Die Aktivitäten des Technologiemanagements begleiten den unternehmensinternen Einsatz einer Technologie. Die Technologiebewertung stellt dabei eine Querschnittsfunktion dar. In allen Phasen des Technologieeinsatzes treten Entscheidungssituationen auf, die einer umfassenden Informationslage bedürfen. Die Bereitstellung dieser Informationslage ist Aufgabe der Technologiebewertung. [3]

Der VDI unterscheidet drei Phasen der Technologiebewertung: Der Entscheidung über einen Technologieeinsatz geht zunächst die Definition und Strukturierung des Problems voraus. Es folgen die Folgenabschätzung sowie die zusammenfassende Bewertung. [203]

Die Phasen der Technologiebewertung stellt Bild 19 dar und konkretisiert diese durch Beispiele der Bewertung von Antriebskonzepten.

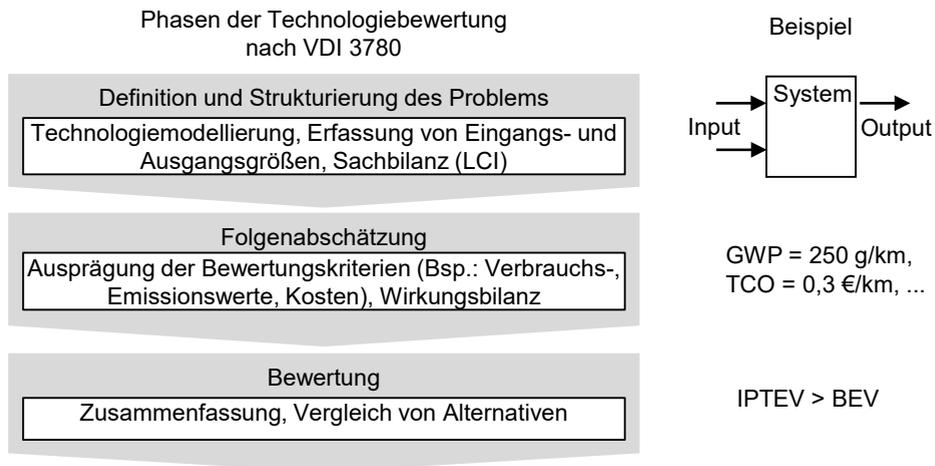


Bild 19: Phasen der Technologiebewertung nach [203]

In der ersten Phase der Technologiebewertung ist das Bewertungsobjekt zu definieren sowie die Rahmenbedingungen unter deren Annahme die Bewertung stattfindet. Je nach Komplexität ist das Bewertungsobjekt in Teilsysteme zu unterteilen und die Zusammenhänge zwischen diesen Teilsystemen aufzulösen. Insbesondere für die Bewertung ökologischer Aspekte ist es erforderlich, die Ein- und Ausgangsgrößen des Bewertungsobjekts über dessen Lebensweg strukturiert zu erfassen. [203, 208]

Während der Folgenabschätzung wird auf Basis der Technologiemodellierungen und Rahmenbedingungen die Ausprägung konkreter Bewertungskriterien bestimmt. Dabei ist die fortschreitende Entwicklung der Technologie selbst sowie der Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Die Bewertungskriterien sind damit Informationsgrundlage für die zusammenfassende Technologiebewertung. Im nachfolgenden Kapitel sind die Grundlagen der Bewertungskriterien, welche Anwendungspotential für die Folgenabschätzung von Antriebskonzepten bieten, beschrieben. [203]

Im Rahmen der abschließenden Bewertung sind die getroffenen Folgenabschätzungen als Teilbewertungen in eine Gesamtbewertung zusammenzuführen. Diese ermöglicht es schließlich, Technologiealternativen vergleichbar zu machen. [203]

3.1 Kriterien der Technologiebewertung

In der Technologiebewertung sind Kriterien die Informationsgrundlage auf welcher der zusammenfassende Bewertungsschritt aufbaut. Die Ausprägung von Bewertungskriterien bestimmt sich über den Nutzen, den eine Technologie stiftet [209]. Dieser ist durch monetäre sowie nicht monetäre Werte bestimmt, welche der VDI sieben thematischen Dimensionen zuordnet: Funktionsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Wohlstand, Sicherheit, Gesundheit, Umweltqualität sowie Persönlichkeitsentfaltung und Gesellschaftsqualität [203].

Für Kriterien der Technologiebewertung gelten die nachfolgenden Anforderungen: Zunächst müssen diese einen logischen Zusammenhang zwischen den Ausgangsdaten der Bewertung und der Ausprägung der Kriterien herstellen. Dieser Zusammenhang lässt sich durch ein Rechensystem beschreiben. Darüber hinaus muss die Zusammenstellung der Bewertungskriterien sämtliche entscheidungsrelevante Aspekte der Technologiebewertung vollständig abdecken. Bei geschlossenen Verfahren der mehrdimensionalen Technologiebewertung folgt auf die Bestimmung der Kriterienausprägung eine Gewichtung und Zusammenfassung zu einem Kennwert wie der Technologieattraktivität. Gerade dann müssen Kriterien die Anforderung der Redundanzfreiheit erfüllen, um eine Überbewertung von Zielwerten im Rahmen der Gewichtung und Zusammenfassung zu vermeiden. [210]

Um Bewertungskriterien zu operationalisieren, also diese messbar und für weitere Bewertungsschritte handhabbar zu machen, eignet sich die Formulierung von Kennzahlen. Diese sind Maßgrößen, welche die Informationsgrundlage der Bewertungskriterien weiter verdichten und zu einer quantitativen Aussage zusammenfassen. Häufig ergibt bereits das Rechensystem zur Ermittlung der Ausprägung eines Bewertungskriteriums einen operationalisierten Wert, der als Kennzahl zur Beschreibung der Technologie herangezogen werden kann. Ist dies jedoch nicht der Fall, ist aus der Ausprägung des Bewertungskriteriums die Ableitung einer aussagekräftigen Kennzahl erforderlich. [210]

Es sind verschiedene Arten von Kennzahlen zu unterscheiden, die in abweichenden Skalen gemessen werden.

Tabelle 2 fasst die Arten von Kennzahlen mit zugehörigen Beispielen zusammen:

Tabelle 2: Kennzahlen zur Quantifizierung von Bewertungskriterien nach [210]

Kennzahl		Beispiel
Grundzahlen	Einzelzahlen	Speicherkapazität [kWh]
	Summen / Differenzen	Antriebsmasse [kg]
Verhältniszahlen	Gliederungszahlen	Wirkungsgrad [%]
	Beziehungszahlen	Emissionen [g/km]
	Indexzahlen	Preisindex

Grundzahlen oder absolute Zahlen werden unabhängig von anderen Zielgrößen dargestellt und kennzeichnen unmittelbar den zugrundeliegenden Zustand. Sie können Einzelzahlen sein wie bei Angabe der Größe eines Energiespeichers oder Summen und Differenzen wie die Masse eines Antriebs als Summe aus einzelnen Antriebskomponenten. Verhältniszahlen setzen zwei Kennzahlen zueinander in Beziehung. Zu unterscheiden sind Gliederungszahlen, welche Teilgrößen in das Verhältnis zu einer Gesamtheit setzen. So bemisst der Wirkungsgrad nutzbare Energie im Verhältnis zur eingesetzten Energie an einem technischen System. Beziehungszahlen setzen inhaltlich ungleichartige Daten, die jedoch in einem kausalen Zusammenhang stehen, ins Verhältnis. In der Technologiebewertung sind Beziehungszahlen verbreitet. Die Basisgröße wird auch als funktionelle Einheit bezeichnet. So können die Emissionen eines Fahrzeuges auf die funktionelle Einheit Fahrkilometer bezogen werden. Indexzahlen sind geeignet, zeitliche Entwicklungen einer Größe wie die Preisentwicklung durch einen Preisindex zu verfolgen. [210, 211]

Zur Interpretation von Bewertungskriterien und Kennzahlen ist die Verwendung von Skalen erforderlich. Bild 20 fasst diese unter Definition zugehöriger Eigenschaften und Beispiele zusammen.

Nominalskalen ermöglichen die Klassifizierung qualitativer Daten. Auf einer Ordinalskala kann darüber hinaus auch eine Rangordnung innerhalb der Daten angegeben werden. Für quantitative Daten eignen sich Intervall- und Ratioskalen. Auf Intervallskalen kann der Abstand zweier Messwerte ausgedrückt werden. Im Gegensatz zur Ratioskala besitzt die Intervallskala jedoch keinen natürlichen Nullpunkt. Die Angabe von Temperaturen in Grad Celsius erfolgt auf einer Intervallskala. [211, 210]

Typ	Eigenschaften			Beispiel
	Nullpunkt	Abstand	Rang	
Nominalskala				Sind Kathodenaktivmaterialien recyclebar? <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja
Ordinalskala			X	Wie gut ist die Infrastruktur des Antriebskonzepts ausgebaut? <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
Invervallskala		X	X	Wie hoch ist zulässige Maximaltemperatur der Motorwicklung [°C]? $\begin{array}{c} --- --- \\ 100 \quad 150 \quad 200 \text{ °C} \end{array}$
Ratioskala	X	X	X	Wie hoch ist der Wirkungsgrad des Inverters? $\begin{array}{c} --- --- \\ 92 \quad 95 \quad 98 \% \end{array}$

Bild 20: Skalen zur Interpretation von Bewertungskriterien und Kennzahlen nach [211]

In den folgenden Abschnitten sind die Grundlagen etablierter Bewertungskriterien für Antriebskonzepte dargestellt.

3.1.1 Bewertung des Energiebedarfs von Kraftfahrzeugen

Der Energiebedarf von Kraftfahrzeugen ist durch eine Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt und stellt eine entscheidende Ausgangsgröße für ökologische sowie ökonomische Bewertungskriterien dar. Für einen Vergleich von Antriebskonzepten können die Energiebedarfe verschiedener Antriebstechnologien nicht einfach über Katalogwerte der Hersteller ermittelt werden, da sich Fahrzeuge verschiedener Hersteller neben den Antriebskomponenten in vielen weiteren Einzelheiten unterscheiden. Es ist daher ein Bewertungskriterium erforderlich, welches die wesentlichen Einflüsse Antriebsmasse sowie Wirkungsgrad auf den Fahrenergiebedarf erfasst.

Für die Berechnung des Fahrenergiebedarfs findet der Ansatz der Längsdynamiksimulation in der Literatur Anwendung [101, 212]. Die im Fahrbetrieb wirkenden Fahrwiderstände werden durch physikalische Ersatzmodelle abgebildet. Fahrwiderstände sind der Fahrzeugbewegung entgegen gerichtete Kräfte, welche in vier Gruppen unterteilbar sind: Roll- und Luftwiderstand dissipieren als Wärme in die Umwelt, während Beschleunigungs- und Steigungswiderstand als kinetische- oder potentielle Energie erhalten bleiben

und mit Fahrzeugentschleunigung oder Abwärtsfahrt wieder nutzbar werden. Bild 21 fasst die Fahrwiderstände im Fahrbetrieb zusammen: [2, 99]

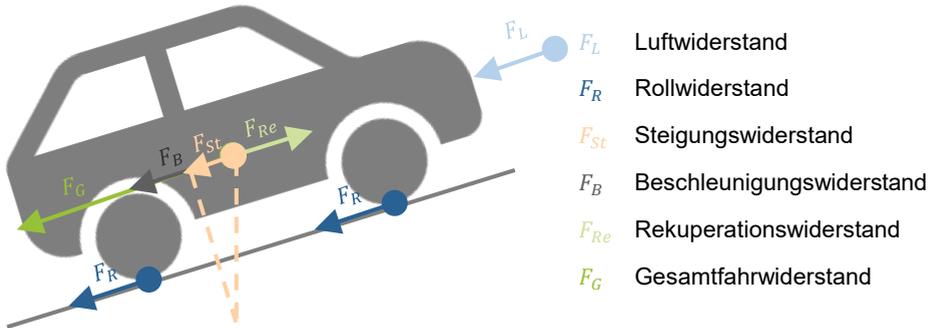


Bild 21: Fahrwiderstände im Längsdynamikmodell zur Bestimmung des Fahrenergiebedarfs

Unter Annahme eines Fahrzyklus lässt sich aus den Fahrwiderständen über den Zeitverlauf ein theoretischer Fahrenergiebedarf ableiten.

Neben der Fahrzeugmasse ist der Wirkungsgrad der Antriebskomponenten entscheidend für den Fahrenergiebedarf. Für ICE haben sich die Bewertungskriterien des Gesamtfahrzeug-Wirkungsgrades sowie des Hochgeschwindigkeitsgütegrades etabliert. [101]

Der Gesamtfahrzeug-Wirkungsgrad η_{GF} entspricht dem Quotienten aus der theoretisch abgeführten Energie $W_{ab,th}$, die auf Basis einer Längsdynamiksimulation für einen Fahrzyklus bestimmt wird, und der zugeführten Energie W_{zu} , welche sich aus der Verbrauchsangabe des Herstellers für den Fahrzyklus und dem Heizwert des Kraftstoffs ergibt: [101]

$$\eta_{GF} = \frac{W_{ab,th}}{W_{zu}} \quad (3.1)$$

Der Gesamtfahrzeug-Wirkungsgrad ist kein geeignetes Bewertungskriterium für den Vergleich von Fahrzeugkonzepten. Das Verfahren hat zum Ziel, herstellerabhängige Wirkungsgradabweichungen innerhalb einer Antriebstechnologie aufzudecken und greift daher auf die gemessenen Fahrzeugverbräuche der Hersteller zurück. Wie oben beschrieben sind herstellerspezifische Energiebedarfe für den Vergleich von Antriebstechnologien nicht anwendbar. Auch eignen sich normierte Fahrzyklen wie der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) oder WLTP nicht für die Abbildung eines typischen Fahrprofils der Langstreckenmobilität. Die Bestimmung der zugeführten Energie über den Brennwert des Kraftstoffs lässt sich darüber hinaus nicht direkt auf alternative Antriebskonzepte übertragen.

Der Hochgeschwindigkeitsgüteindex $GG_{v,max}$ setzt die theoretisch erforderliche Fahrleistung $P_{ab,th}$ bei angegebener Maximalgeschwindigkeit ins Verhältnis zur angegebenen Motorleistung P_{Mot} des Fahrzeuges. Die theoretisch erforderliche Fahrleistung bei Maximalgeschwindigkeit wird ebenso auf Basis des Längsdynamikmodells bestimmt: [101]

$$GG_{v,max} = \frac{P_{ab,th}}{P_{Mot}} \quad (3.2)$$

Auch dieses Bewertungskriterium verwendet herstellerepezifische Angaben zu Maximalgeschwindigkeit und Motorleistung als Ausgangsbasis und ist für einen Vergleich von Antriebskonzepten daher ungeeignet.

Der Mangel einheitlicher Bewertungskriterien für die Effizienz von Kraftfahrzeugen über Antriebstechnologien hinweg ist auch für die konsistente Vergabe von Effizienzlabels sowie die Besteuerung problematisch. In Deutschland wird der Wirkungsgrad von Fahrzeugen mittelbar über deren CO₂-Ausstoß bemessen und im Rahmen der KFZ-Steuer besteuert. Alternative Antriebstechnologien wie BEV werden als „Nullemissionsfahrzeuge“ gewertet, auch Plug-In-Hybridfahrzeuge sind nicht konsistent einordenbar.

In [213] hat das Institut für Energie und Umweltforschung Modelle für die Anwendung der Energieeffizienz als Bewertungskriterium entwickelt. Die Bewertung des Gesamtenergieaufwands ohne Differenzierung der Energieträger bezieht den Bedarf an Energieträgern auf die zurückgelegte Fahrstrecke. Der Energieinhalt von Kraftstoffen wird über deren Heizwert bestimmt, wodurch unabhängig von der Antriebstechnologie ein Energieaufwand pro Strecke in kWh/km bestimmbar ist. [213]

Für den Vergleich von Antriebskonzepten sind Wirkungsgrade innerhalb der Energie-, Kennungswandler sowie Energiespeicher entscheidende Größen für den Bewertungsprozess. Der Gesamtenergieaufwand ohne Differenzierung der Endenergieträger ist daher ein geeignetes Bewertungskriterium.

3.1.2 Ökologische Bilanzierung und Wirkungsindikatoren

Zur Beschreibung von Umweltauswirkungen von Produkten und Produktionsprozessen werden Ökobilanzen (Life cycle assessment LCA) aufgestellt. Durch eine Ökobilanz können Stoff- und Energieströme entlang des Lebenswegs des Betrachtungsobjektes ermittelt und bewertet werden. Der

Lebensweg wird „von der Wiege bis zur Bahre“, also von der Rohstoffgewinnung, über die Produktion, den Betrieb und schließlich das Recycling oder die Entsorgung definiert. [208, 214, 215]

Die Erstellung einer Ökobilanz ist in vier Phasen gegliedert: Zunächst erfolgt die Festlegung der Ziele und des Untersuchungsrahmens der ökobilanziellen Abbildung. Es werden unter anderem das zu untersuchende System definiert, die funktionellen Einheiten festgelegt sowie ergänzende Annahmen getroffen. [208]

Bild 22 zeigt die Systemdefinition für ein Produktsystem, die sich von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Anwendung und Entsorgung erstreckt. Darüber hinaus sind Energieversorgung sowie Transportphasen Teil der Systemumgebung, die über die Systemgrenze von nicht bilanzierten Systemen abgegrenzt ist.

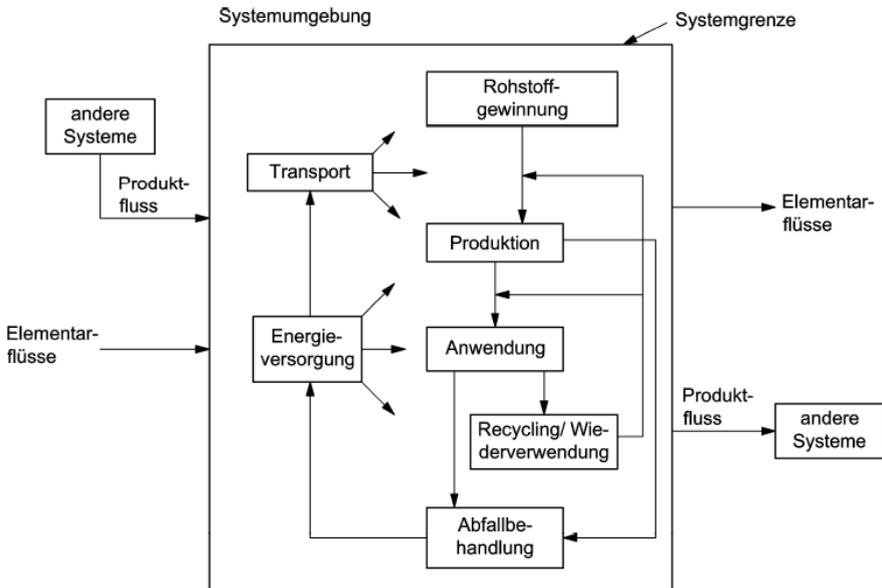


Bild 22: Systemdefinition einer Ökobilanz [208]

Auf Basis des definierten Untersuchungsrahmens erfolgt die Formulierung der Sachbilanz (Life cycle inventory LCI). Im Rahmen der Sachbilanz sind die Ausgangsdaten zu erheben sowie Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Eingangs- und Ausgangsströme des Produktsystems festzulegen. Die Energie- und Stoffstromanalyse ist dabei quantitativer Kern der Sachbilanz [216]. Für deren Durchführung ist eine Prozesskettenanalyse erforderlich, welche das Bewertungsobjekt in Teilprozesse unterteilt. Für jeden Teilprozess werden stoffliche Einsatzmengen und Energieströme erfasst

und für Bewertungsobjekte hoher Komplexität unter Anwendung von Softwaretechnik modelliert. [210, 216, 208]

In der Phase der Wirkungsabschätzung werden durch quantitative Wirkungsindikatoren wertende Aussagen auf Basis der Sachbilanzergebnisse getroffen. Im Klassifizierungsschritt sind die Sachbilanzergebnisse ausgewählten Wirkungskategorien zuzuordnen, hierauf folgend werden im Charakterisierungsschritt die Wirkungsindikatorwerte berechnet. Bild 23 stellt das Konzept der Wirkungsindikatoren dar: [214]

	Beispiel
Sachbilanzergebnisse	120 gCO ₂ /km
Klassifizierung: Sachbilanzergebnisse Wirkungskategorien zugeordnet	Wirkungskategorie: Erwärmungspotential
Charakterisierung: Berechnung Wirkungsindikator	Globales Erwärmungspotential (GWP ₁₀₀)
Wirkungsendpunkte	Globales Klima

Bild 23: Konzept der Wirkungsindikatoren nach [214]

Die Sachbilanzergebnisse liegen als Stoff- und Energieströme in Bezug auf funktionelle Einheiten vor. Für ICE können das die CO₂-Emissionen je gefahrenen Kilometer sein. Im Klassifizierungsschritt sind diese der Wirkungskategorie Erwärmungspotential zuzuordnen. Der Wirkungsindikator des Globalen Erwärmungspotentials kann schließlich zur Analyse der Klimawirkung herangezogen werden. [214]

Abschließender Schritt ist die Auswertung der Ökobilanz. Signifikante ökologische Auswirkungen können identifiziert sowie Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen abgeleitet werden. [208]

Eine Ökobilanz ist kein direkt anwendbares Bewertungskriterium, sondern ein methodischer Rahmen innerhalb dessen ökologische Bewertungskriterien oder Wirkungsindikatoren angewandt werden. Die Phasen zur Erstellung einer Ökobilanz sind daher auch mit den drei generischen Phasen der Technologiebewertung nach Bild 19 vergleichbar. Im Rahmen der Sachbilanz erfolgt die Problemstrukturierung. Die Wirkungsbilanz entspricht der Folgenabschätzung der Technologiebewertung, gefolgt von einer abschließenden zusammenfassenden Auswertung.

Ökologische Bilanzierung ist eine geeignete Methode, um ein Bewertungsobjekt hinsichtlich Umweltauswirkungen strukturiert zu analysieren. Jedoch ist die Einbettung der Ökobilanz in einen mehrdimensionalen Bewertungsansatz notwendig, um auch nichtökologische Kriterien im Bewertungsprozess zu erfassen.

Bewertungskriterien auf Basis der Ökobilanz werden als Wirkungsindikatoren bezeichnet. Wirkungsindikatoren mit Anwendungspotential für die Bewertung alternativer Antriebskonzepte sind nachfolgend dargestellt.

Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der KEA ist eine spezifische Umsetzung der Energiestromanalyse. Das methodische Vorgehen ist in [217] erfasst. Ziel der Norm ist es, einen einheitlichen Rahmen zur Steigerung der Vergleichbarkeit energetischer Daten zu definieren. Der KEA kommt jedoch auch als Wirkungsindikator einer Ökobilanz zur Anwendung. Er ergibt sich als Zusammenfassung aller energetischen Aufwände über den Lebensweg des Betrachtungsobjekts. Dies umfasst den KEA der Herstellung (KEA_H), der Nutzung (KEA_N) sowie der Entsorgung (KEA_E). Über die Bereitstellungsnutzungsgrade ist der KEA auf Primärenergien umzurechnen. Es erfolgt also eine primärenergetische Bewertung aller Energieaufwände. [217]

Zur primärenergetischen Bewertung elektrischer Energie verweist die Norm auf [20]. Dort werden die Nutzungsgrade g_U bei der Erzeugung elektrischer Energie als Quotient aus der nutzbaren elektrischen Energie $W_{el,netto}$ und dem Brennstoffeinsatz W_{in} definiert: [20]

$$g_U = \frac{W_{el,netto}}{W_{in}} \quad (3.3)$$

Der Brennstoffeinsatz wird über den Heizwert der Energieträger bewertet. Problematisch ist die primärenergetische Bewertung elektrischer Energie aus nichtfossilen Energieträgern, da kein Brennstoffeinsatz ansetzbar ist. Für deren Bewertung existieren folgende Ansätze:

Die Äquivalenzmethode erfasst die physikalische Qualität der Energieumwandlung im Umwandlungsgrad nichtfossiler Energieträger. Demnach werden für die Stromerzeugung Nettonutzungsgrade entsprechend der technischen Effizienz in Bild 5 angenommen [20]. Es bleibt unberücksichtigt, dass erneuerbare Energien im Gegensatz zu Energie aus fossilen Energieträgern unbegrenzt verfügbar sind und deren Wirkungsgrad daher eine untergeordnete Rolle gegenüber dem von fossilen Energieträgern hat.

Bei der Ressourcenmethode wird allein die Ressourcenausbeutung durch die Bereitstellung elektrischer Energie betrachtet. Der Einsatz erneuerbarer Energien vermeidet die Verfeuerung von Energierohstoffen und führt daher zu keinem Primärenergiebedarf. Da jedoch auch für die Nutzung erneuerbarer Energieträger Ressourcen und Energie für Errichtung, Betrieb und Rückbau der Anlagen anfällt, kann die Ressourcenmethode nur in Verbindung mit einer Lebensweganalyse der Anlagen sinnvoll Anwendung finden. [20]

Ein pragmatischer Ansatz ist das Wirkungsgradverfahren. Elektrische Energie aus erneuerbaren Energien wird durchgängig mit einem Wirkungsgrad von 100 % angesetzt und damit die physikalische Qualität der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien nicht erfasst und diese als nicht weiter optimierbar angenommen. [20]

Der KEA ist ein geeigneter Wirkungsindikator zur Ermittlung vergleichbarer energetischer Daten über den Lebensweg von Antriebskonzepten. Durch die Einbettung in das methodische Vorgehen der Ökobilanz ist eine konsistente Ermittlung des KEA sichergestellt.

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)

In [218] definiert der VDI mit dem KRA eine spezifische Umsetzung einer Stoffstromanalyse zur Bewertung der Rohstoffkritikalität. Zielsetzung der Richtlinie ist eine Steigerung der Ressourceneffizienz. Auch der KRA ist als Wirkungsindikator in eine Ökobilanz integrierbar.

Der KRA bezeichnet die Summe der zur Bereitstellung eines Bewertungsobjektes eingesetzten Rohstoffmengen entlang der Wertschöpfungskette und umfasst damit alle zur Herstellung und zum Transport des Produktes aufgewendeten Rohstoffe, inklusive der Energierohstoffe. Nicht wirtschaftlich verwendete Stoffe und Stoffgemische bleiben unberücksichtigt. [218]

Der Wirkungsindikator KRA beantwortet bei einem Vergleich von Bewertungsobjekten die Fragestellung nach der Rohstoffintensivität. Auf Basis des KRA können weitere Kriterien wie Vulnerabilität und Versorgungsrisiko abgeleitet werden. [218]

Globales Erwärmungspotential (GWP)

Der menschengemachte Klimawandel ist die große, bislang ungelöste Herausforderung der Weltgemeinschaft. Technologische Entwicklungen sind daher konsequent auf ihre Auswirkung auf den Klimawandel zu prüfen, da eine Eindämmung nur durch Begrenzung der Konzentration der THG in

der Erdatmosphäre erreicht werden kann. THG sind gasförmige Bestandteile der Atmosphäre, welche Strahlung, die von Erdoberfläche, Atmosphäre und Wolken reflektiert wird, absorbieren und damit zur Erwärmung des globalen Klimas beitragen. Verschiedene Gase haben abweichende Strahlungsantriebe und damit Klimawirkung. [219]

Um die Auswirkung eines Bewertungsobjekts auf die THG-Konzentration zu bewerten, gibt die Normung das Konzept des Carbon Footprint (CFP) vor. Der CFP eines Bewertungsobjektes quantifiziert die Summe der emittierten, abzüglich der entzogenen THG-Mengen und beruht auf dem Konzept der Ökobilanz. Wirkungsindikator zur Messung des CFP ist das GWP, welches in CO₂-Äquivalenten angegeben wird. [219]

Der Wirkungsindikator GWP normiert den Strahlungsantrieb aller THG auf den von Kohlendioxid über einen festgelegten Zeitraum, üblicherweise 100 Jahre. So ergibt sich für das THG CH₄ das 28-fache GWP gegenüber CO₂ [220].

Der Wirkungsindikator GWP ist eine zusammenfassende Bewertung aller THG auf den Wirkungsendpunkt des menschengemachten Klimawandels und für die ökologische Bewertung von Antriebskonzepten im Rahmen der ökologischen Bilanzierung anwendbar.

3.1.3 Lebenszykluskosten

Um Gesamtkosten lebenswegübergreifend zu erfassen, kommen Konzepte der Lebenszykluskostenrechnung zum Einsatz. Je nach Anwendungsbereich sind diese auch als Total Cost of Ownership (TCO)-Berechnung bekannt [221]. Mit dem Ausdruck „Life Cycle Costs“ werden alle Kosten, die ein Bewertungsobjekt während seiner Lebensdauer aus Betreibersicht verursacht, zusammengefasst [221]. Neben den Anschaffungskosten, die sich aus dem Zielpreis des Herstellers ergeben, sind dies Instandhaltungs- und Betriebskosten sowie Kosten der Entsorgung nach der produktiven Nutzung [3]. Lebenszykluskostenbetrachtungen können um Verfahren der Investitionskostenrechnung erweitert werden. Durch Auf- und Abzinsen der Zahlungsströme über die Nutzungsdauer kann die ökonomische Bedeutung des Zeitpunkts des Zahlungsstroms in die Betrachtung integriert werden. Bild 24 gibt die Zusammensetzung LCC wieder.

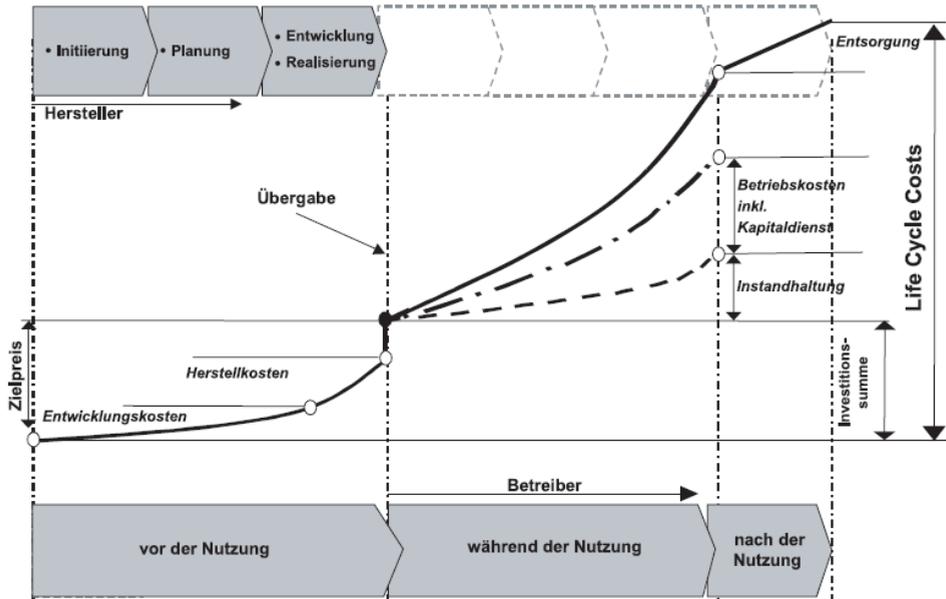


Bild 24: Schematische Darstellung der Life Cycle Costs [221]

LCC- und TCO-Rechnungen finden insbesondere bei Investitionsentscheidungen Anwendung, etablierten sich aber auch als Bewertungskriterium von Antriebskonzepten. Wie bei der Erstellung einer Ökobilanz, ist auch bei einer TCO-Rechnung die Abgrenzung des Betrachtungsobjektes und dessen Lebensweges für das Bewertungsergebnis entscheidend. [222]

Im Gegensatz zu den beschriebenen ökologischen Bewertungskriterien, bei welchen der Lebensweg alle Prozesse umfasst, die ursächlich mit dem physischen Lebensweg des Betrachtungsobjekts in Verbindung stehen, werden bei TCO-Ansätzen nur die Aktivitäten erfasst, welche direkte ökonomische Auswirkung auf den Entscheidungsträger haben [223].

Aus diesem Grund entwickelten sich Ansätze, welche über die TCO hinaus anfallende, sogenannte externe Kosten in die Betrachtung einbeziehen. Für die Bewertung eines Antriebskonzepts fallen externe Kosten in Bezug auf die Nutzung der Straßeninfrastruktur, entstehende Luftverschmutzung sowie Geräuschemissionen an [224]. Auch diese können ökonomisch bewertet und der Antriebstechnologie zugerechnet werden.

3.2 Mehrdimensionale Technologiebewertung

Wie in Bild 19 dargestellt, folgt im Phasenmodell analytischer Technologiebewertung auf die Bestimmung der Ausprägung quantitativer Bewertungskriterien die Zusammenfassung dieser durch Methoden der mehrdimensionalen Technologiebewertung. Dabei sind offene und geschlossene Methoden zu unterscheiden: Ergebnis einer geschlossenen Bewertungsmethode ist ein aggregierter Wert, der den Grad der Zielerfüllung der Technologie zusammenfasst. Hierbei ist eine Gewichtung der Bewertungskriterien vorzunehmen, um diese in einen Zahlenwert zusammenführen zu können. Beispiel einer geschlossenen Bewertungsmethode ist das Technologieportfolio nach Pfeiffer: Im Verlauf der Bewertung sind verschiedene Bewertungs- und Vergleichsmerkmale zur Bestimmung der Technologieattraktivität zusammenzufassen [225, 201]. Dagegen liefert eine offene Bewertungsmethode mehrere Ergebniswerte und kommt daher ohne Gewichtung der Bewertungskriterien aus [226, 209].

Bewertungsmatrix

Ein Werkzeug zur mehrdimensionalen, offenen Bewertung von Technologien ist die Bewertungsmatrix. Ziel der Anwendung einer Bewertungsmatrix ist es, Bewertungskriterien zur Auswahl von Systemen zu strukturieren und darzustellen.

Zur Aufstellung einer Bewertungsmatrix sind relevante Bewertungskriterien zu definieren und anschließend deren Ausprägungen zu bestimmen. Werkzeuge für die Bestimmung qualitativer Kriterien können paarweise Vergleiche oder Punktebewertungen in einer Ordinalskala sein. Quantitative Bewertungskriterien werden als solche in die Matrixdarstellung übernommen. Für einen Vergleich von Technologien eignet sich die vertikale Anordnung der Kriterien sowie die horizontale Anordnung der bewerteten Alternativen. [227, 228]

Die Auswertung der Bewertungsmatrix kann über eine gewichtete Addition der Kriterienausprägungen je Technologiealternative oder ohne weitere Informationsverdichtung erfolgen [227].

Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse entspricht einem Punktbewertungsmodell zur Bewertung von Strategie- oder Technologievarianten. Ziel der Anwendung einer Nutzwertanalyse ist eine Rangliste der Technologien hinsichtlich der bewerteten Kriterien. [3]

Bild 25 zeigt ein Beispiel einer Nutzwertanalyse zum Vergleich von Technologiealternativen, wobei je Bewertungskriterium der Erfüllungsgrad (EG) jeder Technologie festgelegt wird und nach der Gewichtung des Kriteriums in die Rangfolgenbestimmung eingeht:

Bewertungs-kriterium	Gewichtung	Strategiealternativen					
		Technologie A		Technologie B		Technologie C	
		EG	Wert	EG	Wert	EG	Wert
Technische Machbarkeit	15	4	60	3	45	5	75
Hohe Reife der Lösung	3	1	3	1	3	5	15
Niedriges Risiko	9	3	27	5	45	1	9
Gute Technologiebeherrschung	11	5	55	1	11	2	22
Niedrige Herstellkosten	23	1	23	5	115	2	46
Niedrige Investitionskosten	15	3	45	5	75	1	15
Günstige Technologieposition	24	1	24	3	72	5	120
Summe			237		366		302
Rangliste			3		1		2

	Bewertungsstufen				
Erfüllungsgrad (EG)	--	-	0	+	++
Punktzahl	1	2	3	4	5

Bild 25: Beispiel einer Nutzwertanalyse zum Vergleich von Technologiealternativen [3]

Nach Festlegung der Bewertungskriterien erfolgt eine subjektive Einschätzung der Kriterienausprägung je Technologiealternative durch Experten mittels Punktesystemen. Auch bei einer Nutzwertanalyse sind die Bewertungskriterien zu gewichten und abschließend die Nutzwerte aus Punktebewertung und Gewichtung zu berechnen. Bei der Wahl der Kriterien ist die Einhaltung der allgemeinen Anforderungen an Bewertungskriterien, insbesondere die Redundanzfreiheit zu beachten, um einzelne Kriterien bei der Verdichtung nicht überzugewichten. [3]

Die Nutzwertanalyse wendet die Struktur einer generischen Bewertungsmatrix zur Gegenüberstellung von Bewertungskriterien und Technologien an. Es gehen jedoch ausschließlich über Punktebewertung quantifizierte Kriterien in den Bewertungsprozess ein.

Benchmarking

Benchmarking kommt zum Einsatz, um Systeme unternehmensintern oder -extern miteinander zu vergleichen. Das Werkzeug kann auf Technologien, Produkte oder Prozesse bezogen werden und hat zum Ziel, Abweichungen zwischen dem eigenen und einem Benchmarking-Vergleichsobjekt zu identifizieren sowie diese Abweichungen zu erklären und schließlich Maßnahmen für eine Verbesserung des eigenen Objekts abzuleiten. [200, 229]

Zu Beginn des Benchmarkingprozesses sind Ziele der Analyse zu definieren. Abhängig vom betrachteten System können dies Kostenreduktion, Emissionsreduktion oder die Verbesserung funktionaler Eigenschaften sein. In einem folgenden Schritt ist das Benchmarkingobjekt zu bestimmen. Es können Produkte oder Prozesse im Wettbewerb stehender Unternehmen oder aber konkurrierende Technologien verglichen werden. Nachfolgend sind die zu vergleichenden Kriterien festzulegen und die Ausprägungen der Vergleichskriterien für das Benchmarkingsystem zu ermitteln. Dabei ist es herausfordernd, die Kriterienausprägung für das Benchmarkingobjekt objektiv einzuschätzen. Aus den Ausprägungen der Bewertungskriterien des Benchmarkingobjekts sind schließlich Verbesserungspotentiale für das eigene abzuleiten. [200]

Technologiebenchmarking kann durch das Instrument der Bewertungsmatrix zur Gegenüberstellung der Kriterienausprägungen der betrachteten Technologie und der Benchmarkingtechnologie unterstützt werden.

3.3 Analyse bestehender Antriebskonzeptbewertungen

Ziel der Literaturanalyse ist es, Arbeiten zur Bewertung von Antriebskonzepten hinsichtlich der zugrundeliegenden Methodik sowie der quantitativen Ergebnisse zu analysieren. Durch die quantitative Analyse werden Inkonsistenzen zwischen den Bewertungsergebnissen ermittelt und die Ursachen für diese Inkonsistenzen auf abweichende Eigenschaften der Bewertungsmethodik zurückgeführt. Dies ist im anschließenden Kapitel der Ausgangspunkt für die Formulierung der Handlungsbedarfe dieser Arbeit.

Die Literaturanalyse umfasst Arbeiten, welche Bewertungen von Antriebskonzepten mithilfe eines methodischen Vorgehens beschreiben. Die Anwendung des Antriebs ist auf die Straßenfahrzeuge PKW und Nutzfahrzeuge beschränkt. Beiträge können sowohl konventionelle als auch alternative Antriebe oder Kombinationen bewerten. Hinsichtlich der Bewertungsdimensionen besteht keine Einschränkung.

Erfasst werden sowohl englisch- als auch deutschsprachige Beiträge. Die obige thematische Eingrenzung ist in entsprechenden Suchbegriffen umgesetzt. Beiträge sind ab dem Erscheinungsjahr 2010 relevant. Beitragsarten können Monographien, Journalbeiträge und Konferenzbeiträge sein. Auch Forschungsberichte werden berücksichtigt, wenn ein ausreichend dokumentiertes methodisches Vorgehen beschrieben ist.

Über die verwendeten Suchdatenbanken ScienceDirect, IEEE und MDPI können 70 Beiträge ermittelt werden, die obigen Suchkriterien entsprechen. Die Analyse dieser Beiträge hinsichtlich der zugrundeliegenden Bewertungsmethodik führt zu Diversifizierungsmerkmalen, die in nachfolgender Tabelle 3 zusammengefasst sind:

Tabelle 3: Merkmale methodischer Antriebskonzeptbewertungen

Merkmal		Ausprägung				
Zielsetzung	Anwendungsfall	PKW	LKW	Kurzstrecke	Langstrecke	...
	Zeitraumen	Stand der Technik	Potential	Zeitpunkte	...	
Lösungsraum	Technologie	BEV	ICE	FCEV	IPTEV	...
	Bewertungsobjekt	Fahrzeug / Antriebsstrang	Real / Modellierung	Infrastruktur		
Bilanzraum		TtW	WtT	LCA	...	
Daten		Recherche	DB	...		
Bewertungskriterien	Technologisch	Wirkungsgrad	Fahrreichweite	Leistungsdichte	...	
	Ökologisch	Energiebedarf	Emissionen	Rohstoffkritikalität	...	
	Ökonomisch	TCO	Energiekosten	Externe Kosten	...	
	Andere	Sicherheit		...		
	Funktionelle Einheit	[km]	[Jahr]	[Fzg]	...	

Die Definition einer Zielsetzung ist notwendige Voraussetzung einer strukturierten Antriebskonzeptbewertung. In der Mehrheit der erfassten Beiträge sind der Grund der Bewertungsdurchführung sowie die Anwendung des Bewertungsobjekts spezifiziert. Der Lösungsraum der Bewertung umfasst die eigentliche Antriebstechnologie, welche betrachtet wird sowie die Definition des Bewertungsobjekts. Dies kann das Fahrzeug oder aber nur der Fahrzeugantriebsstrang sein. Auch die Infrastruktur zur Energiebereitstellung ist in einigen Beiträgen Teil des Bewertungsobjektes. Der Bilanzraum definiert den Umfang der Betrachtung des Bewertungsobjekts, wobei

zwischen Tank-to-Wheel (TtW), Well-to-Wheel (WtW) und der Lebensweganalyse zu unterscheiden ist. Gemeinsam beschreiben Bewertungsobjekt und Bilanzraum auch die Systemgrenze der Systemdefinition einer Ökobilanz. Die Daten zur Bewertung einer Antriebstechnologie können auf unterschiedliche Arten erhoben werden. Möglich ist die Nutzung einer geschlossenen Datenbank oder die Anwendung strukturierter Recherche. Die Leistungsfähigkeit einer Technologie wird schließlich in Bewertungskriterien quantifiziert. Thematisch verwandte Bewertungskriterien lassen sich zu Bewertungsdimensionen zusammenfassen. Eine weitere Informationsverdichtung ergibt sich durch die Bildung von Beziehungszahlen, also den Bezug der Bewertungskriterien auf funktionelle Einheiten. Dies können sowohl Längeneinheiten wie gefahrene Kilometer oder Zeiteinheiten sein.

3.3.1 Zielsetzung

Teil der Zielsetzung einer Antriebskonzeptbewertung ist die Definition des Ziels der Analyse und des Grundes für deren Durchführung. In [230] ist die Zielsetzung wie folgt definiert: „Ziel der Studie ist es, das Umweltprofil des Referenzfahrzeuges für das Projekt (...) sowohl in ICE- als auch in Elektro-Konfiguration zu bewerten und eine vergleichende Analyse durchzuführen.“ Darüber hinaus enthält die Zielsetzung häufig weitere Spezifizierungen der Analyse. Teil der Zielsetzung kann auch eine Einschränkung der Betrachtung der Antriebsbewertung hinsichtlich der Anwendungsfälle des Fahrzeuges sein. So ist die Einschränkung auf eine Fahrzeugklasse oder der Fokus auf eine Mobilitätsform wie zum Beispiel urbane Mobilität möglich. Auch die Angabe des Zeitraums der Antriebsbewertung erfolgt im Rahmen der Zielstellung. Die Arbeit kann den Stand der Technik oder aber die zu erwartende technologische Entwicklung bewerten.

Eine eindeutige Zieldefinition entlang obiger Merkmale ist Voraussetzung einer strukturierten Antriebskonzeptbewertung. Sie beeinflusst die Annahmen im Bewertungsprozess, den Detailgrad der Untersuchung und damit letztendlich die Untersuchungsergebnisse [208]. So identifizieren auch Nordelöf et al. durch Auswertung von 79 Lebenszyklusanalysen von Antriebstechnologien, dass die Kernaussagen der Beiträge direkt von der getroffenen Zielstellung der Arbeiten abhängen [231].

Bei Analyse der hier betrachteten Antriebsbewertungen sind die obigen Merkmale der Zielstellung zum Teil nicht explizit genannt, weswegen die Klassifikation der Merkmalsausprägungen Ermessensspielräume bietet.

Der Großteil der Beiträge bewertet Fahrzeuge mit verschiedenen Antriebstechnologien in einem genauer spezifizierten Anwendungsfall. So betrachten 77 % der Studien den Antrieb in privaten KFZ-Anwendungen, während 23 % Antriebe für Nutzfahrzeuganwendungen, vor allem Lastkraftwagen (LKW), bewerten. Auch eine Unterscheidung hinsichtlich der betrachteten Fahrstreckenlänge wird durchgeführt. Problematisch ist, dass kein einheitliches Kriterium für die Klassifizierung als Kurz- oder Langstrecken Anwendungen vorliegt. So definieren Wu et al. 78 km als Langstreckenfahrt [232], während Lombardi et al. ab 140 km von Langstrecke ausgehen [233]. Von den analysierten Studien adressieren 17 % ausdrücklich Kurzstrecken Anwendungen, während 30 % auf die Bewertung von Antrieben für Langstrecken Anwendungen abstellen.

Weniger als die Hälfte der Beiträge umfasst die explizite Definition eines Zeitrahmens der Bewertung. 28 % der Beiträge setzen der Bewertung des Stands der Technik von Antriebstechnologien einer Zukunftsbewertung gegenüber. Diese findet zum Teil unter Definition fester Bewertungszeitpunkte oder aber unter Prognose der technologischen Entwicklungspotentiale ohne Verknüpfung mit Bewertungszeitpunkten statt.

3.3.2 Lösungsraum

Im Rahmen der Lösungsraumdefinition einer Antriebsbewertung erfolgt die Festlegung betrachteter Technologien sowie die Beschreibung des Bewertungsobjektes. Es sind konventionelle und alternative Antriebstechnologien zu unterscheiden, wobei 86 % der Arbeiten innerhalb der erfassten Quellenlage Bewertungen und Vergleiche von BEV und ICE Technologie anstreben. 26 % der Arbeiten betrachten FCEV und nur 13 % nehmen IPTEV als Antriebstechnologie in die Bewertung auf.

Als Bewertungsobjekt können konkrete Fahrzeugmodelle von modellierten Fahrzeugen, welche auf einer generischen Basisfahrzeugdefinition basieren, unterschieden werden. Füßel oder Lin et al. führen Vergleiche von BEV und ICE anhand realer Fahrzeugmodelle durch [169, 234]. Entscheidend für aussagekräftige Vergleichsergebnisse über verschiedene Antriebstechnologien ist hierbei die Wahl vergleichbarer Fahrzeugklassen, die jedoch nicht immer eingehalten wird: In Ermangelung anderer BEV-Fahrzeugdaten vergleicht unter anderem Hurtig in 2013 einen Tesla Roadster als BEV mit einem VW Passat als ICE [235].

Demgegenüber bewertet der Großteil der Arbeiten technologieindividuelle Antriebsstränge in Kombination mit einem generischen Basisfahrzeug. Anhand verfügbarer technologischer Beschreibungen der Antriebsstrangkomponenten wird ein Modell eines Fahrzeuges erstellt und anhand dessen die Leistungsdaten der betrachteten Technologie abgeschätzt. So beziehen Reupold sowie Hawkins et al. einen Teil ihrer Bewertung ausschließlich auf den Antriebsstrang und komplettieren diese im Bewertungsverlauf durch Annahmen für ein Basisfahrzeug [102, 236].

20 % der Arbeiten erweitern das Bewertungsobjekt um für den Fahrzeugbetrieb notwendige Infrastruktur. Insbesondere bei der Analyse der durch hohe Infrastrukturaufwände gekennzeichneten IPTEV-Technologie stellen die Autoren auch auf Errichtungs- sowie Betriebsaufwand ab und belegen dessen Bedeutung für die Umweltauswirkung des Antriebskonzepts [68, 237]. Die Ladeinfrastruktur für BEV wird hinsichtlich der Umweltauswirkungen hingegen von Traut et al. als vernachlässigbar eingestuft [238]. In [62] werden technologische Alternativen zum Dieselantrieb für schwere Nutzfahrzeuge betrachtet. Teil der Analyse ist die Abschätzung der Treibhausgasreduzierungs- und Kostenauswirkungen, jedoch ohne Fahrzeug und Infrastruktur in ein Bewertungsobjekt und dieses wiederum in eine ganzheitliche Bewertungsmethodik zu integrieren. Stattdessen erfolgt eine qualitative Beschreibung erwarteter ökologischer sowie ökonomischer Auswirkungen der Technologiealternativen. Andere Beiträge, wie [68], erstellen detaillierte Ökobilanzen von E|ROAD-Infrastrukturen im Vergleich zu konventionellen Straßen, jedoch erfolgt auch keine Umlage der ökologischen Auswirkungen auf Fahrzeugflotten. Der Handlungsbedarf für eine Integration der LCA-Betrachtung in eine ganzheitliche Analyse von Transportsystemen ist jedoch erkannt und beschrieben [68].

Im Rahmen der ökologischen Bilanzierung wird das Bewertungsobjekt über dessen gesamten Lebensweg modelliert. Der Umfang dieser Lebenswegbetrachtung ist durch die Wahl der Systemgrenze beschränkt, wobei die Systemdefinition sowohl das Bewertungsobjekt als auch dessen Lebenswegmodellierung umfasst. Die Systemdefinition ökologischer Bilanzierung vereint damit die Definition des Bewertungsobjekts und des nachfolgend beschriebenen Bilanzraums.

3.3.3 Bilanzraum

Die Festlegung des Bilanzraums definiert den Umfang der Lebenswegmodellierung. Mit einer Ausweitung des Bilanzraums, wird die Bewertung umfangreicher und komplexer. Keine der identifizierten Quellen definiert ausschließlich die Betriebsphase ohne Berücksichtigung der Vorkette der Energiebereitstellung als Bilanzraum. Diese Betrachtung wird als TtW-Analyse bezeichnet. 36 % der Arbeiten führen eine WtW-Analyse durch, erweitern den Bilanzraum also um eine Betrachtung der Energiebereitstellung. Eine vollständige LCA wird von 28 % der erfassten Studien durchgeführt. Bild 26 visualisiert den Bilanzraum der Betriebsphase eines Fahrzeuges von der Gewinnung der Energieressourcen bis zur fahrzeugseitigen Wandlung des Sekundärenergieträgers in Vortrieb:

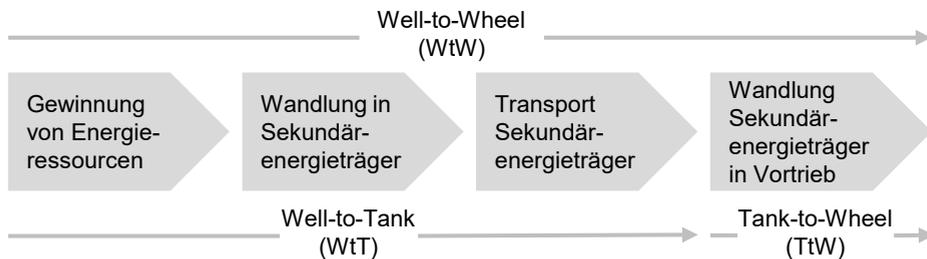


Bild 26: Bilanzraum des Fahrzeugbetriebs

Die Begrenzung einer Antriebsbewertung auf den fahrzeugseitigen Betrieb ist in der Regel nicht zielführend. Der ökologische Vergleich eines BEV mit einem ICE-Antriebsstrang ergibt für BEV vollständige Emissionsfreiheit, während ICE emissionsbehaftet ist. Lediglich für eine lokale Auswirkungsanalyse kann eine solche Eingrenzung des Bilanzraums sinnvoll sein.

Wird der infrastrukturseitige Energiepfad einbezogen, liegt eine WtW-Analyse über die Betriebsphase des Fahrzeuges vor. Hierfür ist es erforderlich, den Bereitstellungspfad der Energie für den Fahrzeugbetrieb zutreffend zu modellieren. Die Modellierungsansätze der Energiebereitstellung beeinflussen das Bewertungsergebnis entscheidend.

Es ist jedoch kein einheitliches Vorgehen für die Abbildung der Energiebereitstellung definiert, die Modellierungsansätze der Autoren unterscheiden sich daher. Bild 27 zeigt die Wirkungsgrade der elektrischen Energiebereitstellung verschiedener Autoren:

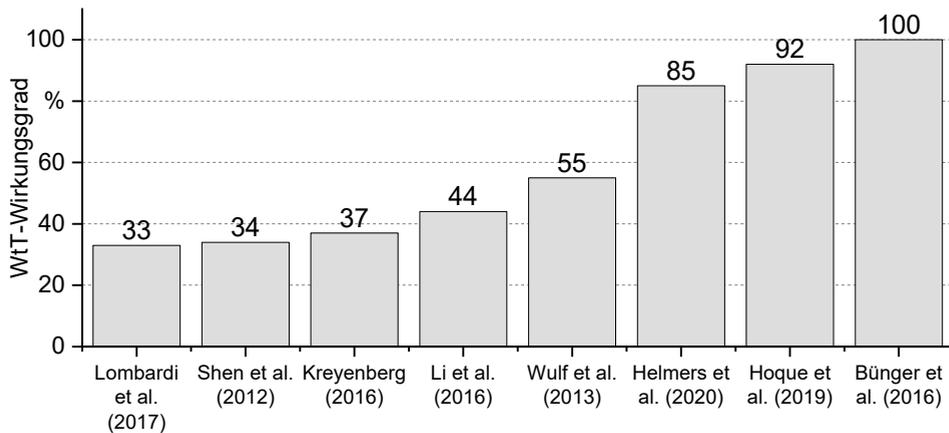


Bild 27: WtT-Wirkungsgrade der BEV-Infrastruktur verschiedener Autoren [199, 233, 239–244]

Die abweichenden Wirkungsgrade können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Zunächst definieren die Autoren die Bestandteile der Energiebereitstellung uneinheitlich. So berücksichtigen Hoque et al. nur Übertragungsverluste des Stromnetzes, lassen jedoch Verluste bei der Erzeugung elektrischen Stroms unberücksichtigt [243].

Der Großteil der Arbeiten leitet den WtT-Wirkungsgrad der Energiebereitstellung aus der Datenlage zur Stromerzeugung eines Wirtschaftsraums ab. In den Arbeiten werden verschiedene Wirtschaftsräume zu unterschiedlichen Betrachtungszeitpunkten herangezogen. So betrachten Lombardi et al. die italienische Stromerzeugung in 2016 [233], während Shen et al. auf die chinesische Stromerzeugung in 2010 abstellen [239].

Ein weiteres entscheidendes Differenzierungsmerkmal ist die Modellierung erneuerbarer Energien. Die abweichenden Vorgehensweisen sind in Kapitel 3.1.2 beschrieben: Es ist zu unterscheiden, ob die physikalische Qualität der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien berücksichtigt wird, wie bei Li et al. [241] oder nach der Wirkungsgradmethode mit einer Effizienz von 100 % in den WtT-Wirkungsgrad eingeht, wie bei Büniger et al. durchgeführt [244].

Im umfassendsten Bilanzraum wird der vollständige Lebensweg einer Antriebstechnologie betrachtet. Neben der Betriebsphase gehen die Materialgewinnung, die Produktion und die Entsorgung des Bewertungsobjekts ein. Bild 28 zeigt dies für den Fahrzeuglebensweg:

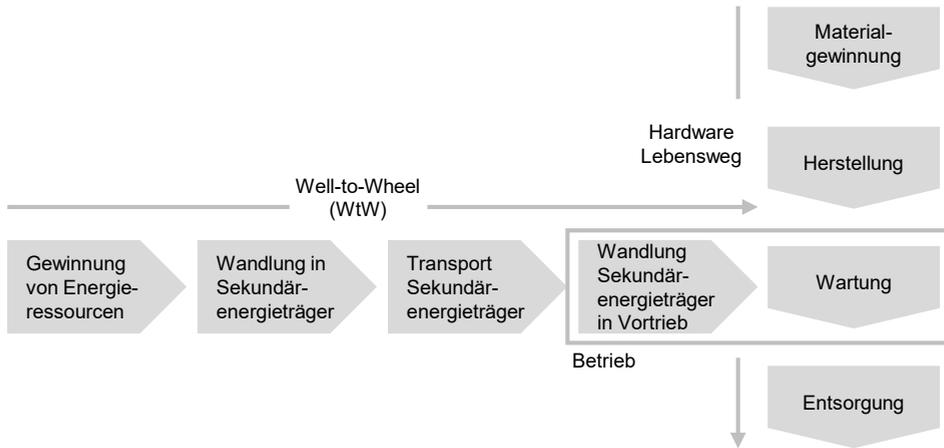


Bild 28: Bilanzraum des Fahrzeuglebenswegs in Anlehnung an [231, 245]

Werden alternative Antriebstechnologien zunehmend mit erneuerbarer Energie betrieben, gewinnen Produktion sowie Entsorgung der Fahrzeughardware für ihre ökologischen Auswirkungen an Bedeutung [246]. Die Durchführung einer Antriebsbewertung über den Lebensweg kann mit vorhandenen Werkzeugen der ökologischen Bilanzierung oder Lebenszykluskostenmodellen strukturiert werden. Entscheidende Einflüsse auf die Antriebsbewertung über den Lebensweg sind, neben den bereits aufgeführten Einflüssen auf die Betriebsphase:

- die Modellierung der Energiebereitstellung, insbesondere für die Hardwareproduktion,
- die Laufleistung des Fahrzeuges sowie
- die Abbildung der Entsorgung und des Recyclings der Hardware.

Über die identifizierte Quellenlage können hinsichtlich dieser Einflüsse wesentliche Abweichungen im gewählten Vorgehen festgestellt werden. Im Ergebnis zeigen sich bei Analyse der THG-Emissionen eines BEV KFZ die Abweichungen zwischen den einzelnen Studienergebnissen sowohl für den WtW als auch für den LCA Bilanzraum, wie in Bild 29 dargestellt.

Die Analyse der Studienergebnisse zeigt, dass abweichende Definitionen des Bilanzraums zu abweichenden Bewertungsergebnissen führen. Wird der Bilanzraum auf eine LCA-Betrachtung erweitert, ergeben sich tendenziell höhere THG-Emissionen pro Fahrkilometer. Für Lebensweganalysen von BEV ermitteln alle Autoren die Betriebsphase als größten Emissions-treiber.

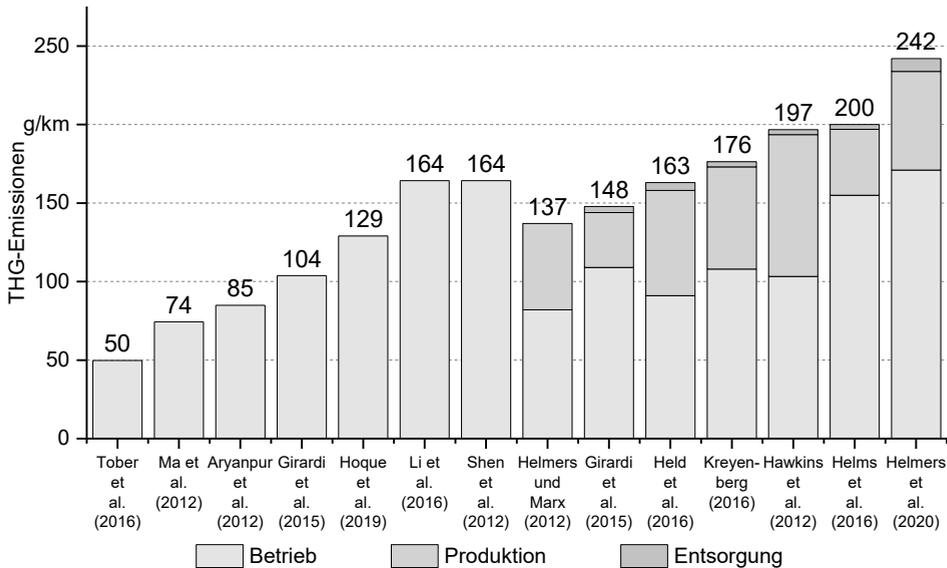


Bild 29: THG-Emissionen eines BEV in Abhängigkeit des Bilanzraumes verschiedener Autoren [199, 233, 236, 239–244, 246–251]

Wird die Infrastruktur als Bewertungsobjekt in eine Lebensweganalyse aufgenommen, ist der Hardwarelebensweg ebenso für die Komponenten der Infrastruktur zu modellieren.

3.3.4 Daten

Daten zu Bewertungsobjekten und deren Umwelt sind die Informationsgrundlage für die Bewertung von Antriebskonzepten. Die Autoren wählen zu ihrer Ermittlung verschiedene Ansätze. 88 % der Beiträge setzen auf Literaturrecherche. Dabei sind Arbeiten zu unterscheiden, die Recherche zur Ermittlung der Ausgangsdaten für die Berechnung von Bewertungskriterien betreiben oder aber Arbeiten, welche als Metastudie die Ausprägungen der Bewertungskriterien anderer Arbeiten zusammenfassen. Zwar liefert eine solche Metastudie ebenso einen Beitrag zur Technologiebewertung, jedoch ist eine Zusammenführung von Kernaussagen mehrerer Studien zur Ableitung ganzheitlicher Bewertungsaussagen nicht zielführend, da studienspezifische Bewertungsergebnisse auf Zielstellungen und Annahmen beruhen und möglicherweise nicht zu einem konsistenten Gesamtbild konsolidierbar sind.

14 % der Autoren nutzen vorhandene Umweltdatenbanken wie EcoInvent, GEMIS oder MOBILE zur Ermittlung der Ausgangsdaten für die Formulie-

rung von Sachbilanzen. Diese Tools sammeln Angaben zu den Umweltauswirkungen verschiedener Ressourcen, Materialien oder technischer Komponenten über deren Lebensweg.

Zur Verarbeitung der Ausgangsdaten verwenden 61 % der Autoren Softwaretools. Lombardi et al. sowie andere Autoren nutzen Matlab Simulink zur Simulation des Fahrenergiebedarfs unter Annahme von Fahrzyklen [233, 252–254]. Es kommen dabei standardisierte Fahrzyklen wie der WLTP zur Anwendung [255].

In einigen Beiträgen kommt darüber hinaus die Software GREET zur Durchführung von Fahrzeuglebensweganalysen zum Einsatz. So analysieren Shen et al. detailliert den WtW-Bilanzraum für ICE [239], während Gao et al. den gesamten Fahrzeuglebensweg mittels GREET abbilden [256].

Die Ausprägungen der Daten, auf welchen der Bewertungsprozess fußt, haben wesentlichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis. Unter anderem hinsichtlich nachfolgender Daten können innerhalb der analysierten Arbeiten wesentliche Abweichungen festgestellt werden:

- Lebensdauer des Fahrzeugakkumulators [233, 224],
- Restwert des Fahrzeuges [224, 257],
- Reparatur und Servicekosten [224, 258].

3.3.5 Bewertungskriterien

Die Leistungsfähigkeit einer Antriebstechnologie wird durch Bewertungskriterien gemessen. Über die identifizierte Quellenlage lassen sich thematisch zusammenhängende Kriterien zu den Bewertungsdimensionen technologisch, ökologisch sowie ökonomisch zusammenfassen. Bild 30 zeigt die Verteilung der Bewertungskriterien über die analysierten Beiträge.

Technologische Bewertungskriterien sind in 41 % der untersuchten Arbeiten zu finden. Energiebedarf und Wirkungsgrad der Antriebstechnologie sind die am häufigsten vertretenen Kriterien.

Der Großteil der erfassten Antriebsbewertungen zielt auf die ökologische Leistungsfähigkeit der Technologien ab. So kommen in 72 % der Arbeiten Bewertungskriterien wie THG, Versauerungspotential und Feinstaubemissionen zur Anwendung. Nur wenige Arbeiten bewerten explizit die Rohstoffkritikalität der Technologien.

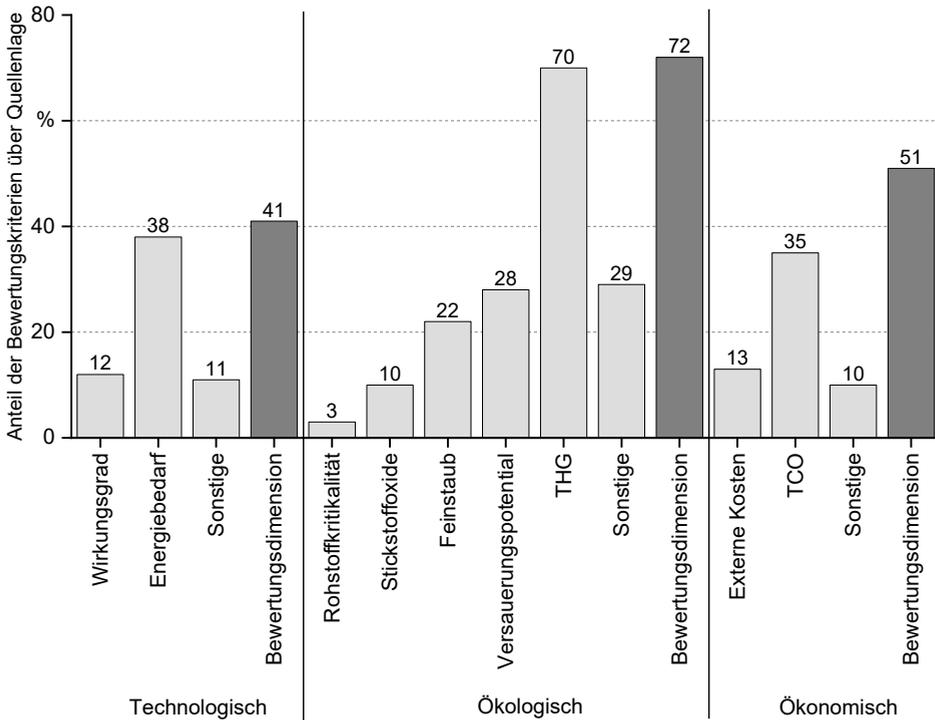


Bild 30: Verteilung der Bewertungskriterien über analysierte Studien [68, 69, 89, 90, 98, 102, 148, 169, 199, 224, 232–244, 246, 247, 249–254, 256–290]

Ökonomische Bewertungskriterien wie die TCO oder externe Kosten werden in 51 % der Antriebsbewertungen herangezogen. Unter externen Kosten oder Total Cost of Society (TCS) versteht man Kosten, welche dem Fahrzeugbesitzer nicht direkt zuordenbar sind, wie Luftverschmutzung, Lärm, Unfälle und Stau [224].

Über die identifizierten Bewertungsdimensionen hinaus, werden weitere Kriterien wie Fahrspaß, Fahrgeräusch oder Sicherheit angeführt [102, 169, 98].

Die Autoren formulieren quantitative Bewertungskriterien zumeist als Beziehungszahlen, um diese zu normalisieren. Das absolute Bewertungsergebnis wird dabei auf eine funktionelle Einheit bezogen. 74 % der Arbeiten beziehen die Bewertungskriterien auf Streckeneinheiten, 28 % auf Zeitintervalle. Der Wert der Streckeneinheit oder des Zeitintervalls ist an der durchschnittlichen Fahrzeughaltedauer oder aber am Lebensweg des Fahrzeuges orientiert und unterscheidet sich stark über die analysierten Arbeiten. Szumska et al. beziehen ihre Analyse auf eine Fahrzeuglaufleistung von

300.000 km [258], während Helmers und Marx von nur 100.000 km ausgehen [284]. Hawkings et al. orientieren sich mit 150.000 km an der Fahrleistungserwartung der Automobilhersteller [236].

3.4 Forschungsbedarf

Voranstehende Fragestellung dieser Arbeit ist, ob und in welchem Umfang alternative Antriebskonzepte die Anforderungen der individuellen Langstreckenmobilität erfüllen. Für die Durchführung einer solchen Antriebskonzeptbewertung ist eine umfassende Datenlage zur Modellierung der Technologiealternativen sowie eine Methodik erforderlich, welche den Vergleichsprozess formalisiert.

Der Lösungsraum der Vergleichsmethodik nimmt elektrifizierte Trassen, in Form dynamischer induktiver Energieübertragung durch eine E|ROAD als Antriebskonzept neben BEV und FCEV in den Vergleich auf. Bislang bestehen kaum Antriebskonzeptvergleiche, welche elektrifizierte Trassen als funktional äquivalente Antriebstechnologie betrachten und bewerten.

Antriebskonzepte wie FCEV oder elektrifizierte Trassen bedingen die Errichtung umfangreicher Infrastruktur zur Energiebereitstellung. Bewertungsobjekt des Vergleichs ist in dieser Arbeit daher das Antriebskonzept unter Einbezug infrastrukturseitiger Einrichtungen. Aus diesem Grund ist ein Vorgehen erforderlich, welches die Dimensionierung der erforderlichen Infrastruktureinrichtungen ermöglicht sowie deren Umlage auf die Fahrzeugflotte umgesetzt.

Die individuellen Bewertungskriterien müssen durch Aggregation eine vollständige Aussage über die technologische Leistungsfähigkeit des Antriebskonzeptes ermöglichen. Bewertungskriterien bestehender Arbeiten können den Dimensionen technologisch, ökologisch sowie ökonomisch zugeordnet werden. Diese Bewertungsdimensionen sind in die Methodik einzubeziehen.

Antriebskonzeptbewertung muss unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts erfolgen und unterliegt daher hoher Dynamik. Auch sind im Bewertungsprozess Annahmen mit hohem Einfluss auf das Bewertungsergebnis zu treffen, deren Festlegung jedoch unter Unsicherheit erfolgt. Es besteht daher der Handlungsbedarf, die Bewertungsmethodik zu automatisieren, um die wiederholte Anwendung für abweichende Ausgangsdaten zu ermöglichen.

Aus dem identifizierten Forschungsbedarf lassen sich die Forschungsfragen der Arbeit formulieren, die Bild 31 zusammenfasst:

**Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte
für die individuelle Langstreckenmobilität**

Wie ist eine **Vergleichsmethodik** für Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität unter Berücksichtigung von **Infrastrukturaufwendungen** aufzubauen, um **verlässliche** und **objektive Bewertungsergebnisse** zu liefern?

Kann die Vergleichsmethodik durch Ansätze der Softwareentwicklung **automatisiert** werden?

In **welchem Maße erfüllen** alternative Antriebskonzepte die **Anforderungen** der individuellen Langstreckenmobilität?

Bild 31: Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit

4 Multidimensionale Vergleichsmethodik

Die Methodik zur Bewertung von Antriebskonzepten unterteilt sich in drei Phasen, welche in der gegebenen Reihenfolge zu durchlaufen sind. Der Aufbau ist am Technologiebewertungsprozess nach VDI 3780 [203] orientiert und in Bild 32 dargestellt:

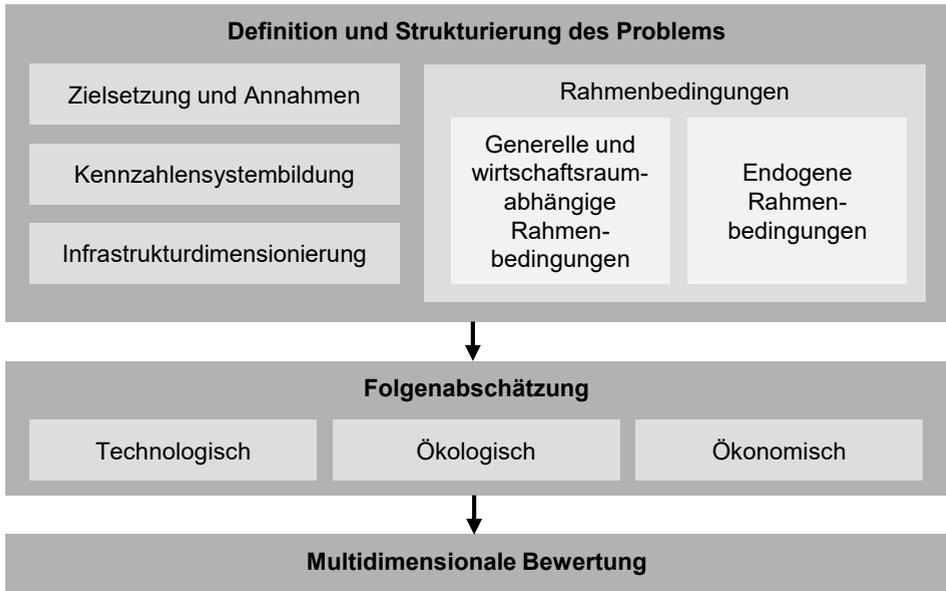


Bild 32: Aufbau der Methodik zur Bewertung von Antriebskonzepten

In der initialen Bewertungsphase erfolgen Definition und Strukturierung des Bewertungsproblems. Im Rahmen dieser Strukturierung wird die Zielsetzung der Bewertung festgelegt und es werden zur Zielsetzung konsistente Annahmen gesetzt. Diese umfassen die Festlegung des Zeitrahmens der Bewertung, den Anwendungsfall, das Bewertungsobjekt sowie Bilanz- und Lösungsraum. Darüber hinaus ist aus der Gesamtheit an Bewertungskriterien von Antriebskonzepten ein Kennzahlensystem zu bilden. Das Bewertungsobjekt des Antriebskonzepts erfordert es, Infrastrukturkomponenten zu dimensionieren und verursachungsgerecht auf die Fahrzeugflotte umzulegen.

Auch Bestandteil der ersten Bewertungsphase ist es, den Lösungsraum zu strukturieren. Antriebskonzepte werden auf Komponentenebene modelliert und für das formulierte Kennzahlensystem relevante Ein- und Ausgangsgrößen zusammengestellt. Sämtliche beschreibende Informationen

über die Bewertungsobjekte sowie deren Umwelt werden in Rahmenbedingungen zusammengefasst.

In der Phase der Folgenabschätzung werden quantitative Bewertungskriterien innerhalb der Bewertungsdimensionen technologisch, ökologisch und ökonomisch berechnet. Technologische Bewertungskriterien fußen auf einer Energiestromanalyse des Fahrbetriebs. Durch eine Längsdynamiksimulation werden die Energiebedarfe im Fahrbetrieb ermittelt und der Energiestrom von der Primärenergie bis zur kinetischen Fahrenergie bestimmt. Im Rahmen der ökologischen Folgenabschätzung werden aus den Sachbilanzergebnissen ökologische Bewertungskriterien abgeleitet. Ökonomische Bewertungskriterien basieren auf den Ergebnissen von Lebenszykluskostenrechnungen unter Berücksichtigung der Fahrenergiebedarfe und Infrastrukturinvestitionen.

In der abschließenden multidimensionalen Bewertung wird aus den Bewertungskriterien der Bewertungsdimensionen schließlich ein Kennzahlensystem zur Beurteilung der technologischen Alternativen abgeleitet. Das Kennzahlensystem kann als Bewertungsmatrix oder Profildiagramm visualisiert werden und ist Ausgangspunkt der Ergebnisinterpretation.

4.1 Definition und Strukturierung des Problems

Die Definition und Strukturierung umfasst die Festlegung von Zielsetzung und Annahmen, Zusammenstellung der Bewertungskriterien und des abgeleiteten Kennzahlensystems sowie das Vorgehen zur Umlage von Infrastrukturaufwendungen auf das Fahrzeug. Sämtliche Ausgangsdaten des Bewertungsprozesses sind in Rahmenbedingungen strukturiert.

4.1.1 Zielsetzung und Annahmen

Zielsetzung der Methodik ist es, Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität durch ein multidimensionales Kennzahlensystem zu vergleichen. Es wird der motorisierte bodengebundene Individualverkehr betrachtet, wonach Verkehrsteilnehmer frei über Fortbewegungsart, -zeit und -strecke entscheiden können, jedoch an die Straßeninfrastruktur gebunden sind [291]. Im Ergebnis entsteht eine transparente Informationssituation über die technologische Leistungsfähigkeit im Anwendungsfall der Langstreckenmobilität. Zur Abgrenzung dieser wird eine analytische Grenze von 100 km Einfachstrecke herangezogen, wie in der Verkehrswissenschaft üblich [11]. Als langstreckenrelevantes Straßennetz des Wirtschaftsraums Deutschland wird auf die AB abgestellt. Antriebskonzepte für

die individuelle Langstreckenmobilität kommen in verschiedenen Kraftfahrzeugtypen zur Anwendung. Die Methodik erlaubt die Analyse der Antriebskonzepte in Personenkraftwagen (PKW) sowie Lastkraftwagen (LKW).

Die Methodik ist zukunftsgerichtet, da die technologische Reife der Antriebskonzepte im Lösungsraum voneinander abweicht. Die Bewertung des technologischen Potentials der Antriebskonzepte erfolgt durch die Bildung von Szenarien, wie in Bild 33 dargestellt:

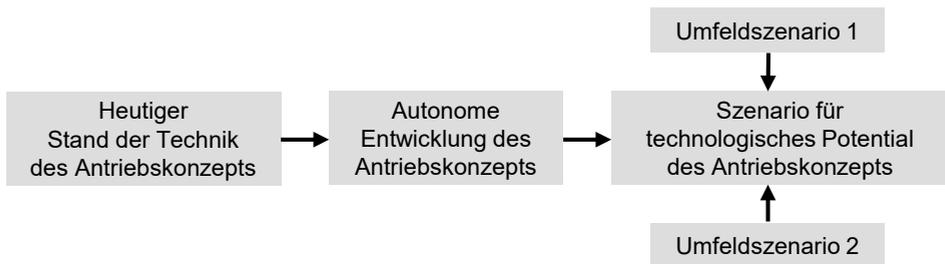


Bild 33: Inputs für Technologieszenario eines Antriebskonzepts nach [204]

In den Bewertungsprozess geht sowohl der aktuelle Stand der Technik sowie die autonome, also vom Umfeldszenario isolierte, Entwicklung der Technologie ein. Für die Entwicklung wird auf das quantitativ absehbare technologische Potential abgestellt. Darüber hinaus entwickelt sich das Umfeld weiter und ist für den Bewertungsprozess zu verschiedenen Vergleichszeitpunkten zu beschreiben.

Für den Stand der Technik sowie das technologische Potential der Antriebskonzepte wird vom vollständigen Ausbau der Technologie für den betrachteten Anwendungsfall der Langstreckenmobilität ausgegangen. Sowohl für die Fahrzeugflotte als auch für die energiebereitstellende Infrastruktur erfolgt also keine Modellierung des Technologiehochlaufs. Sämtliche Fahrzeuge der Fahrzeugflotte werden durch das betrachtete Antriebskonzept betrieben. Ebenso werden die Produktionen zur Fahrzeugherstellung unabhängig von der technologischen Reife des Antriebskonzepts als industrialisierte Serienfertigungen angenommen.

Der Bilanzraum der Methodik umfasst den gesamten Lebensweg des Bewertungsobjekts. Das Antriebskonzept wird also von Materialgewinnung, über Produktion, Betrieb und Entsorgung analysiert.

Die Darstellung des multidimensionalen Bewertungsergebnisses erfolgt unter Anwendung eines Kennzahlensystems. Die Bildung des Kennzahlensystems ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.1.2 Kennzahlensystembildung

Ziel der Kennzahlensystembildung ist es, Bewertungskriterien von Antriebskonzepten hierarchisch zu strukturieren, um schließlich ein informationsverdichtetes Kennzahlensystem ableiten zu können.

4.1.2.1 Bewertungskriterien von Antriebskonzepten

Die Analyse bestehender Antriebskonzeptvergleiche liefert einen umfassenden Überblick über in der Literatur verwendete Bewertungskriterien. Bild 34 fasst eine Auswahl dieser Kriterien zusammen:

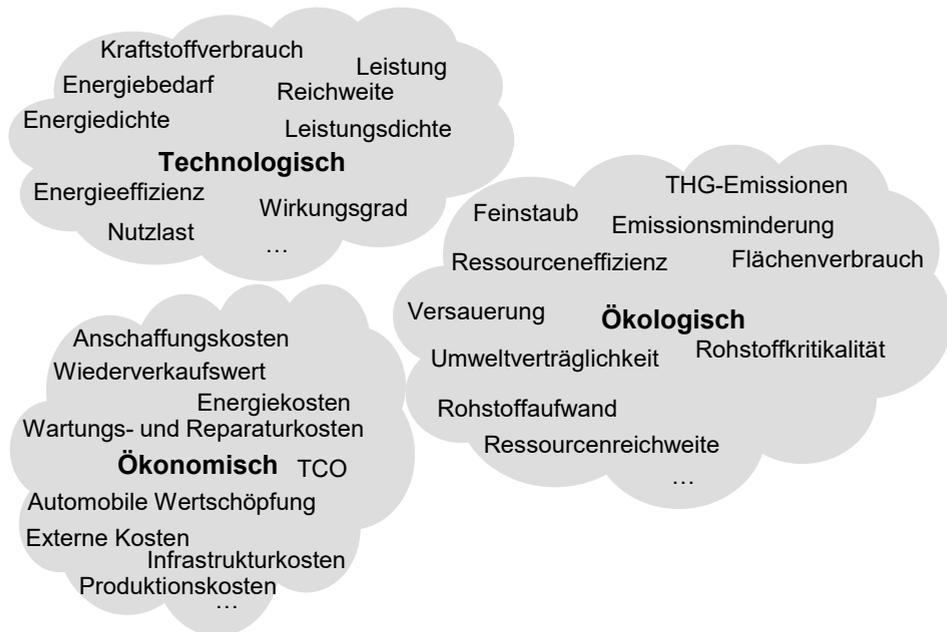


Bild 34: Kriterien zur Bewertung von Antriebskonzepten

Eine Gruppierung der Bewertungskriterien ist in die Bewertungsdimensionen technologisch, ökologisch sowie ökonomisch vorgenommen. Die trennscharfe Zuordnung der Kriterien ist jedoch nicht immer möglich: So ist der Energiebedarf eines Antriebskonzepts in der gegebenen Struktur zwar der technologischen Dimension zugeordnet, die Einordnung in die ökologische Dimension ist jedoch ebenso naheliegend. In der gewählten Aufteilung beschreiben ökologische und ökonomische Bewertungskriterien die Auswirkung technologischer Kriterien. So wirkt sich der Energiebedarf des Fahrzeuges auf dessen Emissionen sowie die Energiekosten der Betriebsphase aus. Innerhalb der Bewertungsdimensionen kann eine wei-

tere Strukturierung in Themengruppen durchgeführt werden. Dies ist sinnvoll, um schließlich eine konsistente Zusammenstellung von Kriterien abzuleiten. Die weitere Strukturierung unterstützt es, synonyme Kriterien zu vermeiden sowie Zusammenhänge und Schnittmengen zwischen den Kriterien zu identifizieren. Nachfolgend ist das Vorgehen gezeigt:

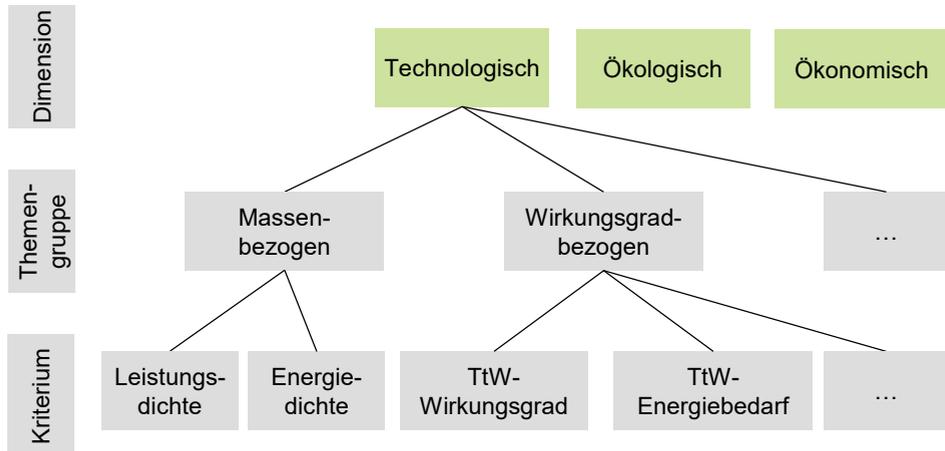


Bild 35: Beispielhafte hierarchische Strukturierung der Bewertungskriterien

Leistungs- und Energiedichte eines Antriebsstrangs beziehen die Leistung des Antriebs bzw. den Energieinhalt des Energiespeichers auf die Fahrzeugmasse, sind also massenbezogene Kriterien. Eine Vielzahl technologischer Kriterien untersucht Wirkungsgrade von Antriebskonzepten oder deren Komponenten. Unter Einbezug der mechanischen Energiebedarfe am Fahrzeuggrad kann so eine Abschätzung des Antriebsenergiebedarfs erfolgen. Kriterien mit einer solchen Ausrichtung werden zu wirkungsgradbezogenen Kriterien zusammengefasst.

4.1.2.2 Ableitung des Kennzahlensystems

Die strukturierte Zusammenstellung der Bewertungskriterien ist Ausgangsbasis für die Formulierung des Kennzahlensystems zur Antriebskonzeptbewertung. Dieser Abschnitt stellt das Kennzahlensystem vor und charakterisiert knapp die einzelnen Kennzahlen sowie deren Optimierungsrichtung.

Tabelle 4 fasst die technologischen Kennzahlen unter Angabe von Formelzeichen und Einheit zusammen:

Tabelle 4: Technologische Dimension des Kennzahlensystems

Kennzahl	Zeichen	Einheit
Gravimetrische Leistungsdichte	P/m	W/kg
TtW-Energiebedarf	w_{TtW}	Wh/km
WtW-Energiebedarf	w_{WtW}	Wh/km
Fahrreichweite	R	km
Energiebedingte Fahrstopps	t_{St}/t	%

Die gravimetrische Leistungsdichte bezieht die Maximalleistung des Fahrzeuges auf dessen Gesamtmasse. Eine hohe Leistungsdichte lässt auf performante Beschleunigung und damit Agilität schließen. Die Kennzahl des TtW-Energiebedarfs bezieht den Umwandlungswirkungsgrad des Antriebsstrangs auf den Fahrenergiebedarf. Der WtW-Energiebedarf erweitert die vorangehende Betrachtung um infrastrukturseitige Umwandlungsverluste. Damit ist der Energiestrom vom Primärenergieträger bis zur mechanischen Nutzenergie am Fahrzeugrad erfasst. Ziel ist ein geringer Energiebedarf im Fahrbetrieb. Die Fahrreichweite gibt die maximale Distanz an, welche das Fahrzeug ohne energiebedingten Fahrstopp zurücklegen kann. Eine hohe Fahrreichweite ist wünschenswert. Wird die Fahrreichweite bei einer Langstreckenfahrt überschritten, ist ein energiebedingter Fahrstopp notwendig. Die Kennzahl „energiebedingte Fahrstopps“ gibt den Zeitanteil an, welchen Lade- oder Tankstopps an der Gesamtfahrdauer für eine definierte Fahrdistanz einnehmen. Ein geringer Anteil an energiebedingten Fahrstopps ist anzustreben.

Die ökologischen Bewertungskriterien sind in Tabelle 5 zusammengefasst:

Tabelle 5: Ökologische Dimension des Kennzahlensystems

Kennzahl	Zeichen	Einheit
Kumulierter Energieaufwand	KEA	Wh/km
Kumulierte Rohstoffdissipation	KRD	1e-17/km
Globales Erwärmungspotential	GWP	g/km

Der kumulierte Energieaufwand entspricht dem primärenergetisch bewerteten Energieaufwand, der über den Lebensweg des Antriebskonzepts aufzubringen ist. Ein niedriger kumulierter Energieaufwand bedingt einen geringen Einsatz von Primärenergieträgern und ist für das Antriebskonzept anzustreben. Die kumulierte Rohstoffdissipation umfasst alle über den Lebensweg des Antriebskonzepts aufgewandten Rohstoffressourcen und bezieht diese auf die global vorhandenen Rohstoffressourcen und dieses Verhältnis wiederum auf Fahrkilometer. Über alle eingesetzten Rohstoffressourcen wird je Antriebskonzept der Mittelwert gebildet. Ein niedriger KRK indiziert eine geringe Rohstoffkritikalität des Antriebskonzepts. Das GWP erfasst sämtliche über den Lebensweg des Antriebskonzepts anfallende Emissionen mit Strahlungsantrieb und normiert diese auf die Fahrkilometer. Zur Eindämmung des menschengemachten Klimawandels ist das GWP eines Antriebskonzepts zu minimieren.

Die Kennzahlen der ökonomischen Bewertungsdimension fasst Tabelle 6 zusammen:

Tabelle 6: Ökonomische Dimension des Kennzahlensystems

Kennzahl	Zeichen	Einheit
Anschaffungskosten	<i>AHK</i>	€
Energiekosten	<i>EK</i>	€/km
Wartungs- und Verschleißkosten	<i>WVK</i>	€/km
Lebenszykluskosten	<i>LZK</i>	€/km

Anschaffungs-, Energie- sowie Wartungs- und Verschleißkosten sind Bestandteile der Lebenszykluskosten des Fahrzeuges. Ein wirtschaftliches Antriebskonzept weist geringe Lebenszykluskosten auf.

Die ökonomische Betrachtung der Infrastruktur erfolgt über die Bewertung der Energiekosten. Diese drücken aus, welche Kosten die antriebskonzeptspezifische Infrastruktur verursacht und in welcher Höhe diese Kosten durch Energiekosten in die Lebenszykluskosten des Fahrzeuges eingehen.

4.1.3 Rahmenbedingungen

Sämtliche Daten, auf welchen der Bewertungsprozess aufsetzt, sind in Rahmenbedingungen strukturiert. Diese Struktur wird nachfolgend beschrieben und die konkrete Ausprägung dieser Daten dargestellt. Tabelle 7 fasst die Struktur der Rahmenbedingungen zusammen:

Tabelle 7: Struktur der Rahmenbedingungen

Merkmal	Ausprägungen			
Parameterbezug	Endogen	Exogen		
		Generell	Wirtschaftsraumabhängig	
Parameterart	Technologisch	Ökologisch	Ökonomisch	Sonstige

Rahmenbedingungen sind anhand des Parameterbezugs unterscheidbar. Endogene Rahmenbedingungen beschreiben das Antriebskonzept, während exogene Rahmenbedingungen unabhängig vom Bewertungsobjekt gelten. Weiteres Unterscheidungskriterium der Rahmenbedingungen ist die Parameterart. Parameter beschreiben eine Eigenschaft der zu bewertenden Technologie oder geltenden exogenen Rahmenbedingungen. Diese Eigenschaften können technologischer, ökologischer oder ökonomischer Art sein.

Um Parameterart und durch den Parameter festgelegte Eigenschaft zu definieren, wird die vierstellige, numerische Parameter-ID eingeführt. Diese dient der eindeutigen Identifikation von Parametern sowie einer vereinfachten Formulierung der folgenden Kennzahlenberechnungen. Auch wird über die Parameter-ID die Erweiterbarkeit der Struktur der Rahmenbedingungen sichergestellt. Die eindeutige Beschreibung der Parameterart durch die Parameter-ID fasst Bild 36 zusammen. Die erste Stelle der Parameter-ID legt fest, ob der Parameter eine technologische, ökologische, ökonomische oder sonstige Eigenschaft beschreibt. Die übrigen drei Stellen definieren schließlich eindeutig die Parameterart. Die Rahmenbedingung zur Definition einer Masse erhält so die Parameter ID 0000.

Struktur der Parameter-ID

0	0	4	0
---	---	---	---

1 {2 3 4}

0: Technologisch	000: Masse
1: Ökologisch	010: Kapazität
2: Ökonomisch	020: Leistung
3: Sonstige	030: Wirkungsgrad
	040: Gravimetrische Energiedichte

Beispiele verschiedener Parameterarten

ID	Parameter	Zeichen	Einheit
0000	Masse	m	kg
0010	Kapazität	C	kWh
0020	Leistung	P	kW
0030	Wirkungsgrad	η	%
0040	Gravimetrische Energiedichte	$\left(\frac{E}{m}\right)$	$\frac{kWh}{kg}$
0050	Gravimetrische Leistungsdichte	$\left(\frac{P}{m}\right)$	$\frac{kW}{kg}$
0060	Nutzungsdauer	ND	a
...

Bild 36: Struktur der vierstelligen, numerischen Parameter-ID

Darüber hinaus erfolgt die Angabe konkreter Parameterausprägung für endogene Rahmenbedingungen unter Definition des Zeitbezugs der Angabe, wobei die Ausprägungen „Stand der Technik“ und „technologisches Potential“ unterschieden werden. Für exogene Rahmenbedingungen wird der Zeitbezug über die Angabe des Kalenderjahres festgelegt.

Zur Formulierung der Berechnungslogik der Wirkungsabschätzung werden Rahmenbedingungen stets unter Nennung des Formelzeichens sowie der hochgestellten Parameter ID genannt. Eine Angabe zur Masse ist in einer Formel als „ m^{0000} “ dargestellt.

Die Ausprägungen der Rahmenbedingungen sind durch Literaturlauswertung ermittelt. Dabei sind Aktualität sowie Eigenständigkeit der Quellen berücksichtigt. Zu jeder Rahmenbedingung sind die Ursprungsquellen dokumentiert.

4.1.3.1 Exogene Rahmenbedingungen

Exogene Rahmenbedingungen gelten unabhängig von der zu bewertenden Technologie. Dies sind Parameter, welche nicht das Antriebskonzept, sondern dessen Umfeld beschreiben. Untergruppe bilden die exogenen Rahmenbedingungen des Wirtschaftsraums, welche nachfolgendes Kapitel 4.1.3.2 darstellt.

Die Definition des Basisfahrzeuges ist eine Zusammenstellung fahrzeugbezogener Parameter, die unabhängig vom betrachteten Antriebsstrang für die Berechnung des Kennzahlensystems erforderlich sind. Tabelle 8 fasst die Parameter des Basisfahrzeuges zusammen und konkretisiert diese für das PKW-Basisfahrzeug.

Tabelle 8: Exogene Rahmenbedingungen zur Definition des PKW-Basisfahrzeuges

ID	Parameter	Zeichen	Material	2020	2030	2040	2050	Einheit	Quelle
0000	Fahrzeugmasse ohne Antriebsstrang	m_{BF}	-	1.150	1.100	1.050	1.000	kg	[192, 292]
0001	Masse der Zuladung	m_{ZL}	-	80				kg	-
0020	Nennleistung	$P_{N,BF}$	-	90	105	120	135	kW	[169]
0060	Nutzungsdauer	ND_{BF}	-	10				a	-
0061	Laufleistung	LL_{BF}	-	15.000				$\frac{km}{a}$	-
0070	Fahrzeugstirnfläche	A_{BF}	-	2				m ²	[2]
0071	Luftwiderstandsbeiwert	$c_{W,BF}$	-	0,25	0,22	0,18	0,15	-	[293]
0072	Rollwiderstandsbeiwert	$f_{R,BF}$	-	0,008				-	[2]
0073	Drehmassenzuschlagsfaktor	$\varepsilon_{i,BF}$	-	0,05				-	[2]
1100	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)_{BF}$	-	0,76				$\frac{kWh}{kg}$	[294-296]
1200	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_{i,BF}$	Stahl	68,8				%	[198]
			
2000	Herstellungskosten	HK_{BF}	-	15.000				€	-
2001	Restwertfaktor	$f(ND)_{BF}$	-	$0,81 \cdot 0,86^{ND}$				-	[297]

Die Rahmenbedingungen des Fahrzeuges umfassen zunächst die Definition von Masse und Nennleistung. Die Fahrzeugmasse ohne Antriebsstrang ist für den Bewertungszeitpunkt 2020 auf 1.150 kg abschätzbar, wobei durch Leichtbaumaßnahmen weiter abnehmende Fahrzeugmassen zu erwarten sind. Die Nennleistung des Basisfahrzeuges ist entscheidend für die Auslegung der Energiewandler im Antriebsstrang. Diese sind so zu dimensionieren, dass die Nennleistung im Dauerbetrieb erbracht werden kann. Darüber hinaus sind Annahmen für Nutzungsdauer und Laufleistung des Fahrzeuges definiert.

Die Fahrzeugstirnfläche beschreibt die Fläche innerhalb der äußeren Konturlinie eines Fahrzeuges, welche bei einer Parallelprojektion auf eine Ebene senkrecht zur Fahrzeuglängsachse erzeugt wird. Zusammen mit dem Luftwiderstandsbeiwert, welcher die Windschlüpfrigkeit der Karosserieform quantifiziert, ist so die Berechnung des Luftwiderstands in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit möglich. [2]

Der Radwiderstand besteht unter der Prämisse einer trockenen und festen Fahrbahn bei eingestellter Spur, intakten Radlagern und korrektem Luftdruck in den Reifen zu über 80 % aus Rollwiderstand. Dieser lässt sich in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse und Fahrgeschwindigkeit aus dem Rollwiderstandsbeiwert berechnen, für welchen in Abhängigkeit der Fahrbahnoberfläche Näherungswerte gelten. Für geteerte Fahrbahnen, grobrauen Zementbeton oder feinrauen Asphaltbeton liegt der Rollwiderstandsbeiwert im Bereich zwischen 0,007 und 0,02 [2].

Im Fahrbetrieb wird, analog zu dem Wirkprinzip eines Schwungmassenspeichers, ein Teil der Fahrenergie als kinetische Energie in der Rotationsbewegung der Komponenten des Antriebsstrangs sowie der Räder gespeichert. Der Drehmassenzuschlagsfaktor setzt die in der Drehbewegung gespeicherte kinetische Energie ins Verhältnis zu der in der translatorischen Fahrzeugbewegung gespeicherten kinetischen Energie. Für einen PKW bei Richtgeschwindigkeit ist ein Drehmassenzuschlagsfaktor von 0,05 anzunehmen [2].

Ökologische Parameter der Basisfahrzeugdefinition umfassen die Materialzusammensetzung sowie den Energiebedarf der Produktion des Basisfahrzeuges. Der Energiebedarf der Basisfahrzeugproduktion ist Nachhaltigkeitsberichterstattungen der Fahrzeughersteller entnommen und um antriebspezifische Energieaufwände bereinigt.

Ökonomische Parameter des Basisfahrzeuges sind dessen Anschaffungskosten sowie der Restwert nach der angenommenen Nutzungsdauer, welcher als Funktion der Nutzungsdauer in die Rahmenbedingungen eingeht.

Weitere exogene Rahmenbedingungen sind zur Beschreibung der globalen elektrischen Stromerzeugung, der Längsdynamiksimulation sowie der Material- und Ressourceneigenschaften erforderlich.

Rahmenbedingungen zur Definition der globalen elektrischen Stromerzeugung sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Die Struktur entspricht der wirtschaftsraumabhängigen Stromerzeugung, die in Kapitel 4.1.3.2 beschrieben ist. Bild 37 fasst Anteil, Wirkungsgrad und GWP der Primärenergieträger zusammen:

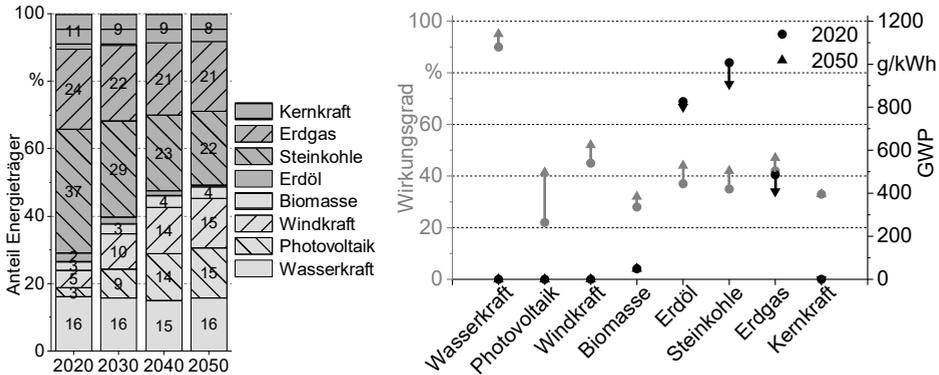


Bild 37: Anteil, Wirkungsgrad und GWP der Primärenergieträger der globalen Stromerzeugung

Ergänzende physikalische Größen zur Simulation der Fahrwiderstände sind die Dichte der Umgebungsluft ρ_{Luft}^{0074} sowie die Schwerebeschleunigung g^{0075} . Die Simulation des Fahrenergiebedarfs basiert auf Fahrzyklen, welche Geschwindigkeits- und Steigungsprofile zusammenfassen. Langstreckenmobilität ist durch lange Überlandfahrten ohne Fahrstopps bei hohen Fahrgeschwindigkeiten charakterisiert. Es ist daher ein Fahrzyklus erforderlich, welcher einen Ausschnitt aus einer solchen Langstreckenfahrt widerspiegelt. Anforderung ist eine geringe Differenz zwischen Anfangs- und Endgeschwindigkeit sowie Ein- und Ausgangshöhe des Zyklus sowie eine Fahrgeschwindigkeit im Bereich der Richtgeschwindigkeit von 130 km/h.

Der seit 2018 in Deutschland für die Fahrzeugprüfung verpflichtende WLTP-Prüfzyklus genügt obigen Anforderungen nicht. Dieser sieht kein Steigungsprofil vor, weist nur einen geringen Anteil an Autobahnfahrge- schwindigkeit auf und enthält mehrfache vollständige Stillstände. [298]

Für die Simulation von Fahrwiderständen der Langstreckenmobilität wird aus diesem Grund eine tatsächliche Autobahnfahrt von 33,8 Streckenkilometern der AB A73 zwischen Ausfahrt 30 und Ausfahrt 23 herangezogen. Der Zyklus beginnt und endet mit einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h. Während der Fahrt wird eine Geschwindigkeit von 130 km/h angestrebt, die tatsächliche Geschwindigkeit unterliegt verkehrsbedingten Anpassungen. Die Aufzeichnung des Zyklus erfolgt durch die Applikation myTracks in Version 7.1.1 [299], welche eine sekundliche Dokumentation von Fahrge- schwindigkeit und Höhenprofil erlaubt. Der Datensatz steht anschließend als Extensible Markup Language (XML)-Datei zur Verarbeitung bereit.

Bild 38 zeigt den Verlauf von Höhe und Geschwindigkeit für den Autobahnfahrzyklus und den WLTP-Fahrzyklus:

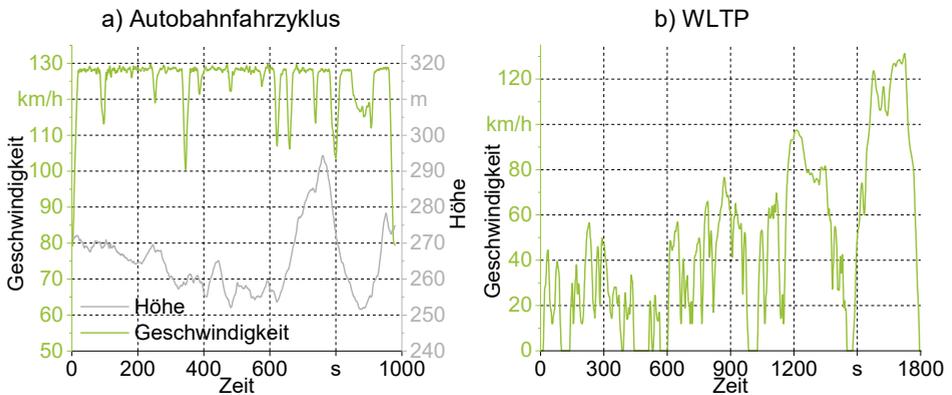


Bild 38: (a) Autobahnfahrzyklus, (b) WLTP-Fahrzyklus nach [298]

Die Material- und Ressourcensituation ist ebenso durch exogene Rahmenbedingungen definiert. Zugehörige Daten sind in Tabelle 18 im Anhang zusammengefasst. Materialien sind Zusammensetzungen von Ressourcen. Diese Zusammensetzungen sind als Ressourcenanteile je Material festgelegt.

Bei der Bereitstellung der Materialien für die Produktion werden Treibhausgase emittiert. Diese sind als GWP der Materialbereitstellung quantifiziert. Betrachtet wird dabei ausschließlich die Menge an bereitgestelltem Material, nicht dessen Beschaffenheit. Für Kupfer besteht beispielsweise keine Unterscheidung zwischen der Bereitstellung als Coil oder als Draht. Am Ende des Lebenswegs können die verbauten Materialien im Umfang der Recyclingfähigkeit wieder in die Produktion von Fahrzeugen oder Infrastruktur eingehen, was ein verringertes GWP dieser Produkte zur Folge hat. Die Bemessung des GWP unter Berücksichtigung recycelter Materialien erfolgt nach der Allokationsmethode „Avoided Burden“ durch einen Gutschriften-Ansatz [300]. In die Rahmenbedingungen geht die Gutschrift als Anteil der GWP der Primärmaterialbereitstellung unter Parameter 1330 ein. Darüber hinaus ist die Ressourcenverfügbarkeit Teil der Rahmenbedingungen. Ressourcen umfassen sämtliche nachgewiesene Rohstoffe sowie geologisch vermutete Vorräte, unabhängig von deren wirtschaftlicher Förderbarkeit [218].

Neben den beschriebenen Rahmenbedingungen sind in Tabelle 19 Kostenzuschläge für die ökonomische Zuschlagskalkulation zur Bestimmung der

Anschaffungskosten des Fahrzeuges definiert. Diesen liegt keine detaillierte Modellierung des Wertschöpfungsnetzwerks zu Grunde. Vereinfachend werden unabhängig von Zuliefereranteil oder Reifegrad der Komponente feste Kostenzuschläge für jede Antriebskomponente angenommen.

4.1.3.2 Exogene Rahmenbedingungen des Wirtschaftsraums

Eine Teilmenge der exogenen Rahmenbedingungen sind wirtschaftsraumabhängige Rahmenbedingungen. In Abhängigkeit des Wirtschaftsraums, für welchen die Bewertung der Antriebskonzepte stattfindet, ergeben sich abweichende Bewertungsergebnisse. Wesentliche Einflussgrößen wirtschaftsraumabhängiger Rahmenbedingungen sind die elektrische Stromerzeugung, das Streckennetz, die Verkehrsdichte, die Fahrzeugflotte sowie die Energiepreise. Tabelle 20 im Anhang fasst alle Rahmenbedingungen der lokalen elektrischen Stromerzeugung zusammen. Anteil der Energieträger, deren Wirkungsgrad sowie GWP sind auch in Bild 5 zusammengefasst. Neben dem Wirkungsgrad der Stromerzeugung je Energieträger und dem Anteil der Energieträger an der Stromerzeugung im Betrachtungsjahr ist eine Hilfsenergie je Energieträger definiert. Diese fasst für fossile Energieträger den Energieaufwand der Brennstoffbereitstellung zusammen. Für die Lebensweganalyse der Antriebskonzepte ist zusätzlich der Materialmix für die Stromerzeugungsarten festgelegt. Das GWP gibt schließlich den Strahlungsantrieb im Betrieb für jeden Energieträger an.

Tabelle 9 fasst weitere exogene Rahmenbedingungen des Wirtschaftsraums Deutschland zusammen:

Tabelle 9: Weitere exogene Rahmenbedingungen des Wirtschaftsraums

ID	Parameter	Zeichen	Wert	Einheit	Quelle
2123	Kosten Arbeitsstunde	AK	41	$\frac{\text{€}}{\text{h}}$	[301]
3100	Länge AB-Netz	L_{AB}	13,2	$Tsd. km$	[302]
3101	Durchschnittliche Spurenanzahl AB	n_{AB}	2,2	-	[303]
3200	Bemessungsverkehrsstärke AB	MSV_{AB}	61,9	$Mio. \frac{km}{h}$	[303]
3201	Durchschnittsverkehrsstärke AB	DTV_{AB}	18,9	$Mio. \frac{km}{h}$	[303]

Die Kosten der Arbeitsstunde sind erforderlich, um Wartungs- und Verschleißmaßnahmen ökonomisch zu bewerten. Das Schnellstraßenverkehrsnetz entspricht in Deutschland der AB und hat eine Länge von 13.192 km. Im Durchschnitt sind 2,2 gleichgerichtete Fahrspuren ausgebaut.

Durch Bemessungsverkehrsstärke (MSV) und Durchschnittsverkehrsstärke (DTV) ist das Verkehrsaufkommen auf der AB definiert. Maßgeblich für die MSV ist die 50. verkehrsstärkste Stunde eines Jahres, die für jeden Streckenabschnitt über Dauerzählstellen oder Abschätzverfahren ermittelt wird. In den 49 Stunden höherer Verkehrsnachfrage wird eine Überlastung der Infrastruktur zugunsten einer höheren Auslastung in allen übrigen Jahresstunden in Kauf genommen. Über die DTV ist die durchschnittliche Verkehrsstärke auf der AB festgelegt. MSV und DTV aller AB-Abschnitte sind aus der Straßenverkehrszählung (SVZ) ableitbar [303].

So ergibt sich der Parameter MSV_{AB}^{3200} für PKW durch Addition der $MSV_{PKW,i}$, also der gezählten Fahrzeuge je Stunde, multipliziert mit der Abschnittslänge l_i nach folgendem Zusammenhang zu 61,9 Mio. $\frac{km}{h}$:

$$MSV_{AB}^{3200} = \sum_{i=1}^n MSV_{PKW,i} \cdot l_i \quad (4.2)$$

Für die Ermittlung des Parameters DTV_{AB}^{3201} gilt das gleiche Vorgehen.

4.1.3.3 Endogene Rahmenbedingungen

Endogene Rahmenbedingungen beschreiben das Antriebskonzept. Bild 39 zeigt die Struktur der endogenen Rahmenbedingungen in einem Klassendiagramm nach der Unified Modeling Language (UML). Neben den Klassen und Beziehungen sind exemplarische Instanzen der Klassen gezeigt. So setzt sich das BEV-Antriebskonzept aus je einem Antriebsstrang sowie einer zugehörigen Infrastruktur zusammen. Sämtliche Beziehungen sind als Kompositionen ausgeführt, um eine Beziehung der Art „bestehend aus“ zu modellieren. Antriebsstrang und Infrastruktur sind wiederum aus einer beliebigen Anzahl an Komponenten zusammengesetzt. Fahrzeugseitige Komponenten bestehen aus Bauteilen, welchen verschiedene Materialien und diesen wiederum Ressourcen zugeordnet sind. Infrastrukturseitige Komponenten besitzen keine Bauteile.

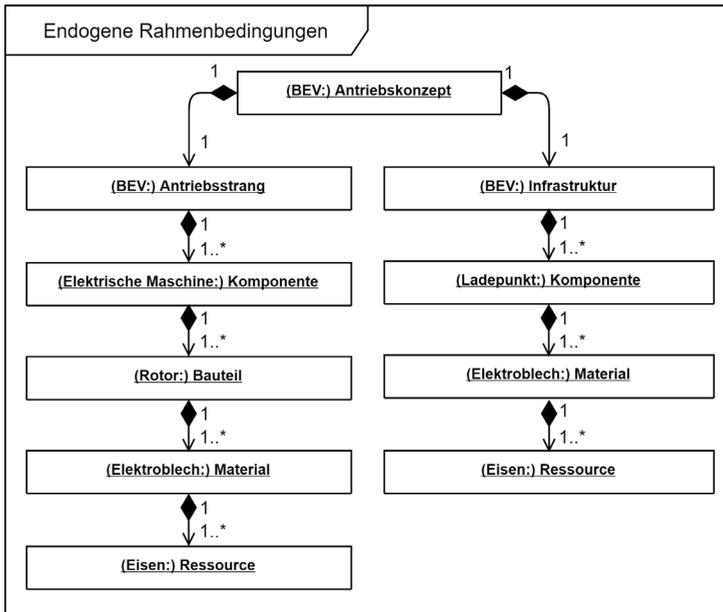


Bild 39: UML-Klassendiagramm endogener Rahmenbedingungen am Beispiel des BEV-Antriebskonzepts

Die Zusammensetzung der spezifischen Antriebsstränge der Antriebskonzepte ist in Kapitel 2 beschrieben. Die dort aufgeführten Eigenschaften sind für alle Antriebsstrang- und Infrastrukturkomponenten durch Rahmenbedingungen modelliert.

Antriebsstrangkomponenten

Die Modellierung der Antriebsstrangkomponenten ist nachfolgend anhand der elektrischen Maschine gezeigt. Auf Komponentenebene gehen in Tabelle 10 zusammengefasste Parameter in die Rahmenbedingungen ein.

Tabelle 10: Elektrische Maschine

ID	Parameter	Zeichen	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0022	Überlastbarkeit	$\left(\frac{P_{max}}{P_N}\right)$	2,2	2,6	-	[134, 42]
0030	Wirkungsgrad	η	91	95	%	[169, 196]
0050	Gravimetrische Leistungsdichte	$\left(\frac{P}{m}\right)$	2,0	3,0	$\frac{kW}{kg}$	[134]
2111	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	8,3	7,9	$\frac{€}{kW}$	[142]

Anstatt der Vergleichszeitpunkte exogener Rahmenbedingungen ist der Stand der Technik (SoA) oder das technologische Potential (Pot) definiert.

Die Masse des Antriebsstrangs ist Ausgangsgröße der Längsdynamiksimulation. Die Massen der Antriebsstrangkomponenten sind über deren gravimetrische Leistungs- bzw. Energiedichte definiert. So wird für die elektrische Maschine eine lineare Beziehung zwischen Nennleistung und Maschinenmasse unterstellt. Diese Skalierung ist jedoch nur vereinfachend und unter Annahmen zulässig:

Unter der Annahme eines konstanten Maschinendurchmessers, also einer reinen Längskalierung zur Abbildung abweichender Maschinenleistungen, ist von einem proportionalen Zusammenhang zwischen Nennleistung P_N und der aktiven Maschinenlänge l_a bzw. dem Maschinenvolumen auszugehen [304]:

$$P_N \sim l_a \quad (4.3)$$

Bild 40 zeigt, dass mit einer abnehmenden aktiven Maschinenlänge der Anteil der Wickelkopfhöhe $\frac{l_W}{2}$ an der Gesamtlänge der Maschine L zunimmt. Demnach stellt sich für Maschinen mit geringer Nennleistung aufgrund der konstanten Wickelkopfhöhe eine geringere Leistungsdichte ein.

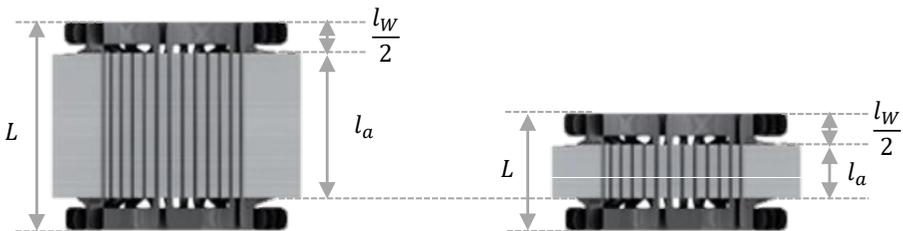


Bild 40: Skalierung der aktiven Maschinenlänge l_a nach [305]

Vereinfachend wird mit konstanter gravimetrischer Leistungsdichte ein linearer Zusammenhang zwischen Nennleistung und Maschinenlänge L und damit dem Maschinenvolumen und der Maschinenmasse unterstellt. Das Verhältnis von Nennleistung zur Masse m der Komponente geht als gravimetrische Leistungsdichte $\left(\frac{P}{m}\right)^{0.050}$ in das Rahmengerüst ein. Die Komponentenmasse der elektrischen Maschine setzt sich aus den Bauteilen Stator, Rotor, Gehäuse und Welle zusammen.

Die Maschinennennleistung ist gerade die Leistung, bei der sich ein Temperaturgleichgewicht zwischen Kühlleistung und der anfallenden Verlust-

wärme in der Maschine einstellt. Aufgrund der thermischen Trägheit erwärmt sich die Maschine bei Überlast verzögert, weshalb kurzzeitige Leistungsabgaben oberhalb der Nennleistung möglich sind. Das Verhältnis zwischen Nennleistung und maximaler Leistung geht als Überlastbarkeit $\left(\frac{P_{max}}{P_N}\right)^{0.022}$ ein [306]. Der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine ist abhängig von deren Betriebspunkt [99]. Bild 41 zeigt die Verteilung der Betriebspunkte des BEV unter Annahme eines Raddurchmessers von 600 mm sowie eines Übersetzungsverhältnisses zwischen der elektrischen Maschine und den Fahrzeigrädern von 1:8. Die Betriebspunkte der Längsdynamiksimulation sind für den Autobahnfahrzyklus sowie den WLTP-Zyklus ausgeleitet.

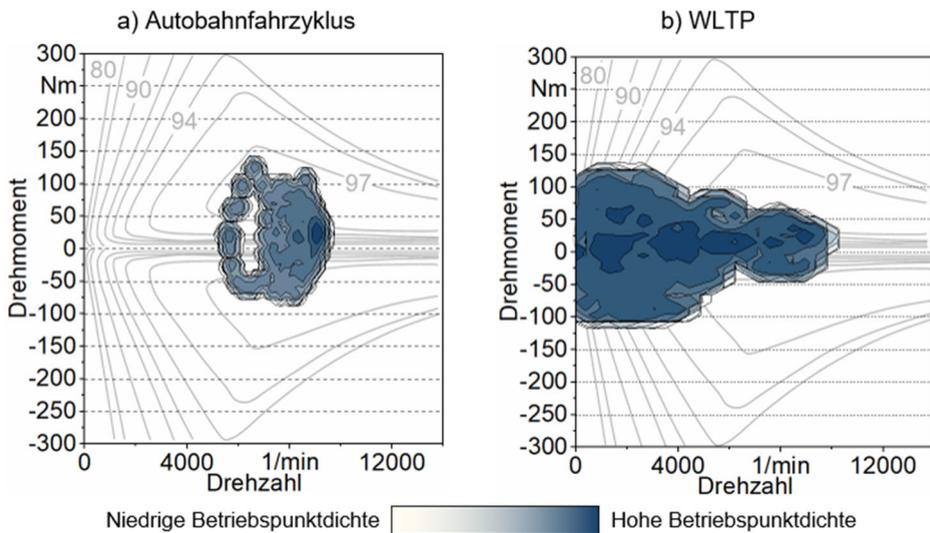


Bild 41: Verteilung der Betriebspunkte der elektrischen Maschine: (a) im Autobahnfahrzyklus, (b) im WLTP-Fahrzyklus

Im WLTP-Fahrzyklus ist ein breiter Drehzahlbereich abgebildet, wobei häufige Stillstände sowie Beschleunigungs- und Entschleunigungsphasen auftreten. Bei hohen Drehzahlen sind im Vergleich zum aufgezeichneten Autobahnfahrzyklus nur mäßige Drehmomente angefordert.

Der aufgezeichnete Autobahnfahrzyklus enthält keine Stillstände oder Langsamfahrten und durchgängig Drehzahlen über 5.000 Umdrehungen pro Minute. Die verkehrsbedingten Verzögerungsphasen im Zyklus führen zu negativen Drehmomenten der Maschine sowie anschließenden erhöhten positiven Drehmomenten und beschreiben somit jeweils Kreise im Betriebsbereichsdiagramm. Der Bereich höchster Dichte der Betriebs-

punkte liegt bei rund 9.000 Umdrehungen pro Minute bei einem Drehmoment von 25 Nm, was rund 17 kW mechanischer Abgabeleistung der Maschine entspricht. Im Betriebsbereichsdiagramm sind zudem die Wirkungsgradbereiche einer beispielhaften elektrischen Traktionsmaschine angetragen [307]. Es zeigt sich, dass die Betriebsbereiche des WLTP-Zyklus einen weitaus breiteren Wirkungsgradbereich der elektrischen Maschine überdecken, als die des Autobahnfahrzyklus. Da für verschiedene Antriebsstrangtechnologien verschiedene Fahrzeugmassen gelten und diese wiederum zu veränderten Fahrwiderständen führen, sind die Betriebsbereiche der elektrischen Maschine jedoch nicht auf andere alternative Antriebsstränge übertragbar. Sämtliche Komponenten gehen daher mit konstanten Wirkungsgraden in die Modellierung ein.

Analog zur konstanten gravimetrischen Leistungsdichte wird eine Skalierung der Komponentenkosten mit der Nennleistung unterstellt. Für die elektrische Maschine sind unter Berücksichtigung der Marktanteile der Maschinenarten 8,3 €/kW anzunehmen [142].

Komponentenbauteile

Bild 39 zeigt, dass Antriebsstrangkomponenten wiederum aus Bauteilen zusammensetzt sind. Ausgangspunkt der Bauteilmodellierung einer Antriebsstrangkomponente ist die Erfassung des zugrundeliegenden Produktionsprozesses. Dieser ist in Kapitel 2.2.2.2 für die elektrische Maschine beschrieben und in Bild 42 als vereinfachter Prozessgraph dargestellt. Hieraus lassen sich die Bauteile Motorwelle, Rotor, Stator sowie Gehäuse ableiten.

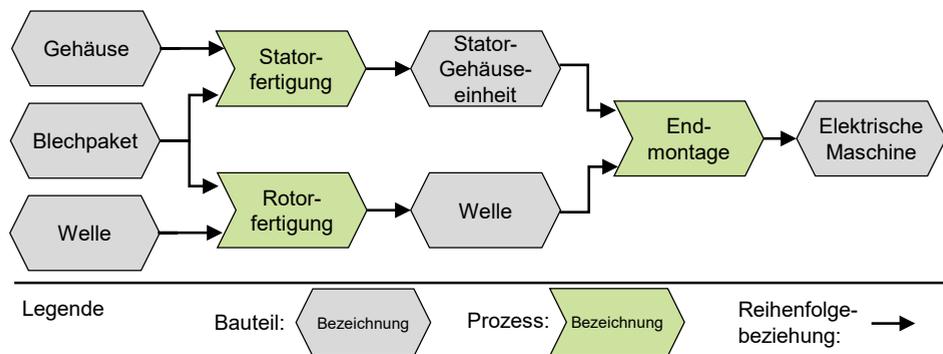


Bild 42: Produktionsprozesskette einer elektrischen Maschine

Die Modellierung der Bauteile ist im Folgenden anhand des Stators der elektrischen Maschine gezeigt.

Tabelle 11 fasst die Rahmenbedingungen des Statorbauteils zusammen.

Tabelle 11: Stator

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	-	-	km	-
1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,32		$\frac{kWh}{kg}$	[177, 134]
1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Stahl	18,9		%	[177, 42]
				
1214	Materialverlust	$M_{v,i}$	Kupfer	1		%	[177]
1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Kupfer	95		%	[151]
		
2121	Materialkosten Maßnahme	MK_{WV}	-	-	-	€	-
2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	-	-	h	-

Der Parameter Laufleistung bis Maßnahme gibt je Bauteil die zu erwartende Laufleistung an, ehe wartungs-, verschleiß- oder inspektionsbedingte (WV) Maßnahmen erforderlich sind. Der Stator der elektrischen Maschine ist über den Lebensweg wartungs- und verschleißfrei, es sind daher keine Angaben zu Laufleistung oder Materialkosten und Arbeitszeit der Maßnahme vorhanden.

Die Definition der Energie- und Materialaufwände der Produktion erfolgt für jedes Bauteil separat. Der Energiebedarf der Produktion wird vereinfachend als elektrische Energie angenommen, da über alle betrachteten Produktionsprozesse hinweg elektrische Energie die dominierende Energieform ist. Für den Energiebedarf der Produktion ist eine Skalierung mit der Maschinenmasse unterstellt.

Der Materialaufwand der Produktion beschränkt sich auf im Produkt verbleibende Materialien unter Berücksichtigung prozessspezifischer Produktionsverluste. Hilfs- und Betriebsstoffe der Produktion finden daher keinen Eingang in die Betrachtung. Der Materialaufwand wird als gravimetrischer Anteil der Komponentenmasse angegeben. Ergänzend sind die bauteilspezifischen Recyclingpotentiale der Materialien als Anteil des verbauten Materials definiert.

Weitere Daten der Komponenten- und Bauteilmodellierung sind ab Tabelle 21 im Anhang zusammengefasst.

Infrastrukturkomponenten

Wie in Bild 39 dargestellt, weicht die Modellierung der Infrastrukturkomponenten von den Fahrzeugkomponenten ab. Komponenten der Infrastruktur sind keine Bauteile zugeordnet, stattdessen ist die Materialzusammensetzung Teil der Komponenten. Für die Komponente ist keine Masse bestimmbar, stattdessen kommt das in Kapitel 4.1.4 beschriebene Vorgehen zur Dimensionierung und Umlage der Infrastrukturaufwendungen zur Anwendung. Demnach skalieren Materialien sowie Kosten der Infrastrukturkomponenten energie-, leistungs- oder längenabhängig.

Tabelle 12 fasst Rahmenbedingungen der Infrastruktur für die Komponente Ladepunkt des BEV-Antriebskonzepts zusammen:

Tabelle 12: BEV-Ladepunkt

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0021	Nennleistung	P_N	-	150	350	kW	[308, 62]
0023	Leistungsanpassung	P_{eff}	-	80		%	[52, 309]
0030	Wirkungsgrad	η	-	93	95	%	[48]
0060	Nutzungsdauer	ND	-	10		a	[310]
1212	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{P}\right)_i$	Stahl	3	1,3	$\frac{kg}{kW}$	[311-313, 32, 67, 314]
				
1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Stahl	90		%	[315]
		
2111	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	500	214	$\frac{€}{kW}$	[48]

Die Nennleistung des BEV-Ladepunkts, korrigiert um die Leistungsanpassung gibt die mittlere Ladeleistung des BEV über den Ladevorgang wieder. Im Ladebetrieb kann von einem Wirkungsgrad von 93 % ausgegangen werden. Für leistungs- und längenabhängig skalierende Infrastrukturkomponenten ist die Definition der Nutzungsdauer notwendig, um deren ökologischen und ökonomischen Aufwand verursachungsgerecht auf Fahrkilometer umzulegen.

Leistungsabhängige Materialzusammensetzungen sind als Parameter 1212 den Infrastrukturkomponenten zugeordnet. Die Definition spezifischer Materialverluste der Produktion ist aufgrund der für Infrastrukturkomponenten nicht spezifizierten Produktionsprozesse nicht vorgesehen. Der ökonomische Aufwand des Ladepunkts ist durch leistungsspezifische Kosten gegeben.

4.1.4 Infrastrukturdimensionierung

Für die Bewertung der Infrastruktur zur Energiebereitstellung ist es erforderlich, eine gedankliche Dimensionierung dieser Infrastruktur vorzunehmen. Die energiebereitstellende Infrastruktur muss im Stande sein, die Anforderungen der Langstreckenmobilität des Wirtschaftsraums zu erfüllen. Auch ist zu definieren, wie die Infrastrukturaufwendungen auf die Einheit Fahrkilometer umzulegen sind.

Tabelle 13 fasst das Vorgehen zur Dimensionierung und Umlage des Infrastrukturaufwands zusammen:

Tabelle 13: Dimensionierung und Umlage des Infrastrukturaufwands auf Fahrkilometer

	Energie-abhängig	Leistungs-abhängig	Längen-abhängig
Anwendung	Bestehende Infrastruktur	Umfänglich zu errichtende Infrastruktur	Durch Streckennetz festgelegt
Beispiel	Stromerzeugung, Erdgasförderung	Ladepunkte, H ₂ -Zapfsäulen	Längenabhängige Bauteile der E ROAD
Dimensionierung	Energiebedarf der Jahresfahrleistung	Leistungsbedarf in Auslegungsverkehrsstunde der AB	Durch Streckennetz festgelegt
Umlage auf Fahrkilometer	Fahrenergiebedarf je Fahrkilometer	Jahresfahrleistung auf AB	

Die Komponenten der Infrastruktur zur energetischen Anbindung der Fahrzeuge sind in Kapitel 2.1 beschrieben. In welchem Umfang Infrastruktur zum Betrieb der vollständigen Fahrzeugflotte mit einem Antriebskonzept erforderlich ist, kann energie-, leistungs- oder längenabhängig bestimmt werden. Je nach Art der Infrastrukturkomponente kommt dabei eine abweichende Dimensionierung zum Einsatz:

Für bereits bestehende Infrastruktur, die durch die Marktdurchdringung eines Antriebskonzepts nicht wesentlich verändert wird, lassen sich Infrastrukturaufwände auf die bereitgestellte Energiemenge verteilen. So drücken beispielsweise die Stromgestehungskosten in €/kWh genau die ökonomischen Aufwände aus, welche zum Aufbau und Betrieb der Stromerzeugung je Energiemenge anfallen. Die Umlage auf Fahrkilometer ist über den Fahrenergiebedarf festgelegt.

Infrastruktur, die für die Durchdringung eines Antriebskonzepts umfangreich zu errichten ist, ist zumeist leistungsabhängig zu dimensionieren. Für die Langstreckenmobilität wird die Annahme getroffen, dass der Leistungsbedarf der Fahrzeugflotte bei Bemessungsverkehrsstärke vollständig durch die energiebereitstellende Infrastruktur gedeckt wird. So kann die Anzahl der erforderlichen Ladepunkte n_{LP} aus der Flottenleistung $w_{TtW}^{KPI} MSV_{AB}^{3200}$ in der Auslegungsverkehrsstunde über die mittlere Leistung des einzelnen Ladepunkts $P_N^{0021} P_{eff}^{0023}$ bestimmt werden:

$$n_{LP} = \frac{w_{TtW}^{KPI} MSV_{AB}^{3200}}{P_N^{0021} P_{eff}^{0023}} \quad (4.1)$$

Für das BEV-Antriebskonzept ergeben sich demnach rund 96 Tsd. Schnellladepunkte zur vollständigen Bedienung der PKW-Langstreckenmobilität. Tabelle 14 zeigt, dass der kalkulierte Umfang erforderlicher Schnellladepunkte im Bereich der Prognosen anderer Autoren liegt:

Tabelle 14: Erforderliche Schnellladepunkte (SLP) verschiedener Autoren

Quelle	Annahmen	SLP
Diese Arbeit	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Marktdurchdringung BEV • Bemessungsverkehrsstärke der AB 	96.460
Lienkamp [316]	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Marktdurchdringung BEV • 800.000 Normalladepunkte 	80.000
Grube [317]	<ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung für 30 Mio. BEV • Erforderliche Ladepunkte an AB 	37.216

Ökonomische sowie ökologische Aufwände für die erforderlichen Ladepunkte lassen sich durch die leistungsabhängige Dimensionierung auf den Umfang zur Bewältigung der Bemessungsverkehrsstärke skalieren.

Das IPTEV-Antriebskonzept sieht den Ausbau der AB zu elektrifizierten Trassen vor. Der Infrastrukturaufwand bestimmt sich daher auch über die Gestalt des Streckennetzes. Es ist sowohl die durchschnittliche Anzahl der

Fahrspuren n^{3204} als auch die Länge des Streckennetzes L^{3200} entscheidend. Materialaufwand und Kosten pro Fahrspur und Streckenkilometer lassen sich in Abhängigkeit der AB auf das gesamte zu elektrifizierende Streckennetz skalieren.

Leistungs- und längenabhängig dimensionierte Infrastrukturaufwände werden über die durchschnittliche Verkehrsmenge auf Fahrkilometer umgelegt.

4.2 Folgenabschätzung am Beispiel des BEV-Antriebskonzepts

Die Folgenabschätzung umfasst die Bestimmung der Ausprägungen des Kennzahlensystems, welches die Informationsbasis der multidimensionalen Bewertung darstellt. Nachfolgend wird das Vorgehen zunächst in allgemeinen Formelzusammenhängen beschrieben und jeweils auf für das BEV-Antriebskonzept konkretisiert.

Rahmenbedingungen werden durch Angabe der in Kapitel o eingeführten Parameter-ID kenntlich gemacht. Dies dient der direkten Zuordnung der Rahmenbedingungen entsprechend der eingeführten Struktur. Kennzahlen werden mit dem Kürzel „KPI“ (Key performance indicator) versehen, sodass die Kennzahl der Leistungsdichte in der zugehörigen Berechnungsgleichung als $(\frac{P}{m})^{KPI}$ symbolisiert ist.

4.2.1 Technologisch

Technologische Kennzahlen zielen auf die Bewertung von Leistungsdichte, Fahrenergiebedarf und Fahrreichweite ab. Die Berechnungen sind die Basis der folgenden ökologischen und ökonomischen Antriebskonzeptbewertung.

Fahrzeugmasse

Die Fahrzeugmasse ist eine Einflussgröße der Energiebedarfssimulation des Fahrzeugbetriebs. Darüber hinaus sind die Massen der Antriebsstrangkomponenten Grundlage der Material- und Ressourcenbedarfskalkulation sowie der Kostenstrukturanalyse.

Die Gesamtmasse des Fahrzeuges m_{Fzg} setzt sich aus der Masse des Basisfahrzeuges m_{BF}^{0000} und der Massen der einzelnen Antriebsstrangkomponenten $m_{K,i}$ zusammen:

$$m_{Fzg} = m_{BF}^{0000} + \sum_{i=1}^n m_{K,i} \quad (4.4)$$

Die Masse von Energie- und Kennungswandlern $m_{K,i}$ ergibt sich aus gravimetrischer Leistungsdichte $\left(\frac{P}{m}\right)_i^{0040}$ sowie der Nennleistung des Basisfahrzeuges P_{BF}^{0020} oder der spezifischen Nennleistung der Komponente P^{0021} . Die Kapazität der Energiespeicher ist für jede Komponente über C^{0010} definiert. Deren Masse $m_{K,i}$ ergibt sich aus C_i^{0010} und der gravimetrischen Energiedichte $\left(\frac{E}{m}\right)_i^{0040}$.

Gravimetrische Leistungsdichte

Die Leistungsdichte des Fahrzeuges $\left(\frac{P}{m}\right)^{KPI}$ ergibt sich aus der Maximalleistung des Antriebsstrangs P_{max} , bezogen auf die Gesamtfahrzeugmasse m_{Fzg} . Die Maximalleistung des Antriebsstrangs entspricht der Spitzenleistung des Fahrzeugantriebs, die sich für elektrifizierte Antriebskonzepte aus der Nennleistung des Basisfahrzeuges $P_{N,BF}^{0020}$ und dem Überlastfaktor ergibt:

$$\left(\frac{P}{m}\right)^{KPI} = \frac{P_{N,BF}^{0020} \left(\frac{P_{Max}}{P_N}\right)^{0022}}{m_{Fzg}} \quad (4.5)$$

Längsdynamikmodell zur Bestimmung der Fahrwiderstände

Der Fahrenergiebedarf ist durch die Verluste der Antriebsstrangkomponenten und die Fahrwiderstände bestimmt. Fahrwiderstände sind der Fahrzeugbewegung entgegen gerichtete Kräfte: Roll- und Luftwiderstand dissipieren als Wärme in die Fahrzeugumgebung, während Beschleunigungs- und Steigungswiderstand als kinetische- oder potentielle Energie erhalten bleiben und mit Fahrzeugentschleunigung oder Abwärtsfahrt wieder nutzbar werden. Bild 21 fasst die Fahrwiderstände zusammen. [2, 99]

Das Längsdynamikmodell wird auf den aufgezeichneten Autobahnfahrzyklus angewandt. Dieser definiert über Zeitschritte den Verlauf der Fahrgeschwindigkeit sowie das Höhenprofil. Für jeden Zeitschritt i legt der Fahrzyklus Zeitpunkt $t(i)$, Geschwindigkeit $v(i)$ sowie Höhenlage $h(i)$ fest.

Der Steigungswinkel $\alpha(i)$ für den Zeitschritt i ergibt sich über:

$$\alpha(i) = \tan^{-1} \left(\frac{h(i) - h(i-1)}{(v(i)(t(i) - t(i-1)))} \right) \quad (4.6)$$

Die Beschleunigung $a(i)$ für den Zeitschritt i ist über folgenden Zusammenhang definiert:

$$a(i) = \frac{v(i+1) - v(i-1)}{t(i+1) - t(i-1)} \quad (4.7)$$

Der Luftwiderstand $F_L(i)$ ist bei Autobahnfahrgeschwindigkeit der dominante Fahrwiderstand. Unter Annahme von Windstille ist der Luftwiderstand aus Fahrzeugstirnfläche A_{BF}^{0070} , Luftwiderstandsbeiwert $c_{w,BF}^{0071}$ des Basisfahrzeuges sowie der Dichte der Umgebungsluft ρ_{Luft}^{0074} und der Fahrgeschwindigkeit $v(i)$ zu ermitteln [2]:

$$F_L(i) = A_{BF}^{0070} c_{w,BF}^{0071} \left(\frac{\rho_{Luft}^{0074}}{2} \right) (v(i))^2 \quad (4.8)$$

Der Rollwiderstand $F_R(i)$ ist durch die Formänderungsarbeit des Reifens im Abrollvorgang bedingt und ist von Radlast, Reifeninnendruck, Reifentemperatur und Fahrgeschwindigkeit abhängig. Vereinfacht kann der Rollwiderstand über die Normalkraft auf die Fahrbahnoberfläche $m_{Fzg} g^{0075} \cos(\alpha)$ multipliziert mit dem Rollwiderstandsbeiwert $f_{R,BF}^{0072}$ abgebildet werden, wobei dieser in Abhängigkeit der Fahrbahnoberfläche definiert ist. [2, 99]

$$F_R(i) = f_{R,BF}^{0072} m_{Fzg} g^{0075} \cos(\alpha(i)) \quad (4.9)$$

Gegenüber Luft- und Rollwiderstand dissipiert die Energie zur Überwindung des Steigungswiderstands nicht in Wärme, sondern wird in potentielle Energie umgewandelt. Der Steigungswiderstand $F_{St}(i)$ ergibt sich aus der zur Fahrbahn parallelen Komponente der Gewichtskraft [2].

$$F_{St}(i) = m_{Fzg} g^{0075} \sin(\alpha(i)) \quad (4.10)$$

Die Kraft zur Überwindung des Beschleunigungswiderstands $F_B(i)$ hat einen translatorischen Anteil aus der linearen Beschleunigung der Fahrzeugmasse m_{Fzg} sowie einen rotatorischen Anteil aus der rotatorischen Beschleunigung sich drehender Komponenten des Fahrzeuges. Dabei sind Raddrehzahl, verschiedene Getriebewellendrehzahlen sowie Motordrehzahl zu berücksichtigen. Der Drehmassenzuschlagsfaktor ε_i^{0073} fasst die rotatorischen Kraftanteile in Bezug auf die Fahrzeugleermasse m_{Fzg} zusammen, womit sich $F_B(i)$ wie folgt berechnet: [2, 99]

$$F_B(i) = \left((\varepsilon_{i,BF}^{0073} + 1) m_{Fzg} + m_{ZL}^{0001} \right) a(i) \quad (4.11)$$

Die Gesamtfahrwiderstandsleistung $P_G(i)$ ergibt sich aus dem Gesamtfahrwiderstand F_G multipliziert mit der Fahrgeschwindigkeit $v(i)$. Der Gesamtfahrwiderstand setzt sich aus den Fahrwiderständen zusammen:

$$P_G(i) = F_G(i)v(i) = (F_L(i) + F_R(i) + F_{St}(i) + F_B(i)) v(i) \quad (4.12)$$

Wird der Fahrwiderstand $F_G(i)$ negativ, so ist eine Verzögerungsleistung aufzubringen. Diese kann durch mechanische Bremsarbeit oder ein Rekuperationssystem geleistet werden. Die potentielle Rekuperationskraft $F_{Re}(i)$ entspricht:

$$F_{Re}(i) = F_G(i), \text{ wenn } F_G(i) < 0 \quad (4.13)$$

Durch Multiplikation der einzelnen Fahrwiderstände mit der Fahrgeschwindigkeit $v(i)$ ergibt sich die zugehörige Leistungskomponente. Bild 43 gibt die Fahrleistungskomponenten über einen Abschnitt des Autobahnfahrzyklus wieder:

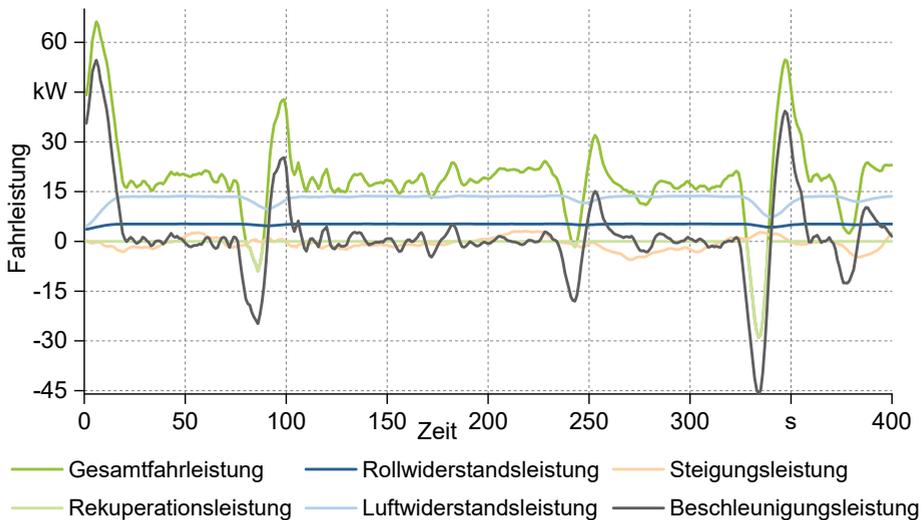


Bild 43: Simulierte Fahrleistungen des BEV im Autobahnfahrzyklus

Die mechanische Energie, welche an den Rädern des Fahrzeuges aufzubringen ist, um den Fahrzyklus zu durchfahren W_{Rad} , ist aus dem Integral der Gesamtfahrleistungen $P_G(i)$ über die Zeit berechenbar. Dabei ist die Gesamtzahl der Zeitschritte n des Fahrzyklus zu berücksichtigen:

$$W_{Rad} = \int_{i=1}^n t(i) P_G(i) di \quad (4.14)$$

Der mechanische Energiebedarf des Fahrzeuges, normiert auf die zurückgelegte Strecke w_{Rad} , ergibt sich zu:

$$w_{Rad} = \frac{W_{Rad}}{\sum_{i=1}^n v(i)(t(i) - t(i-1))} \quad (4.15)$$

Analog ist die potentielle Rekuperationsenergie w_{Re} bestimmbar zu:

$$w_{Re} = \frac{\int_{i=1}^n t(i) F_{Re}(i) v(i) di}{\sum_{i=1}^n v(i)(t(i) - t(i-1))} \quad (4.16)$$

Fahrenergiebedarf

Der Fahrenergiebedarf ist neben den Fahrwiderständen durch die Umwandlungsverluste des Antriebsstrangs bestimmt. Die Komponenten des Antriebsstrangs tragen mit ihren Wirkungsgraden η_i^{0030} zum Gesamtwirkungsgrad bei. Der Fahrenergiebedarf w_{TtW}^{KPI} ergibt sich unter Berücksichtigung der nutzbaren Rekuperationsleistung $\eta_{Re} w_{Re}$ zu:

$$w_{TtW}^{KPI} = \frac{w_{Rad}}{\prod_{i=1}^n \eta_i^{0030}} - \eta_{Re} w_{Re} \quad (4.17)$$

Der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs unter Berücksichtigung der Rekuperation η_{TtW} entspricht dem Quotienten der mechanischen Energie am Fahrzeugrad w_{Rad} und dem Energiebedarf des Fahrzeuges w_{TtW}^{KPI} :

$$\eta_{TtW} = \frac{w_{Rad}}{w_{TtW}^{KPI}} \quad (4.18)$$

Bild 44 zeigt für den BEV-Antriebsstrang Fahrenergiebedarf, Umwandlungsverluste der Komponenten und Fahrwiderstände in einem Wasserfalldiagramm. Die Energien sind auf Fahrkilometer normiert.

Steigungswiderstand und Beschleunigungsleistung erscheinen im Diagramm nicht, da sich deren Beiträge über den Fahrzyklus aufheben. Dieser sieht ein Profil vor, welches hinsichtlich Fahrgeschwindigkeit und Höhe bei Zyklusbeginn und -ende beinahe identisch ist.

Der Energiebedarf für Nebenverbraucher wie die Klimatisierung der Fahrzeugkabine wird nicht berücksichtigt, da dieser bei Langstreckenfahrten nach initialer Temperierung der Kabine untergeordnete Bedeutung hat.

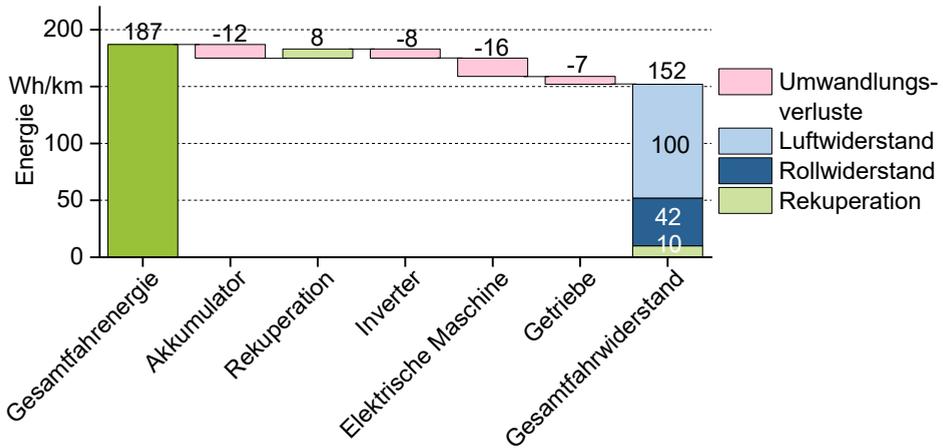


Bild 44: Gesamtfahrenergiebedarf, Umwandlungsverluste und Fahrwiderstand des BEV

Fahrreichweite und energiebedingte Fahrstopps

Die Fahrreichweite R^{KPI} ergibt sich aus der Kapazität des Energiespeichers C_i^{0010} dividiert durch den auf die Fahrstrecke normierten Energiebedarf w_{TtW}^{KPI} .

$$R^{KPI} = \frac{C_i^{0010}}{w_{TtW}^{KPI}} \quad (4.19)$$

Überschreitet die Referenzfahrtdistanz D^{3001} die maximale Fahrreichweite R^{KPI} sind Lade- oder Tankstopps erforderlich, welche die Fahrdauer erhöhen. Der Anteil energiebedingter Fahrstopps an der Gesamtfahrdauer $\left(\frac{t_{St}}{t}\right)^{KPI}$ ist abhängig von der Leistung des Ladepunkts oder der Zapfsäule P_i^{0021} sowie der mittleren Reisegeschwindigkeit \bar{v} . Für die Gesamtzeit an Lade- oder Tankstopps LZ gilt:

$$LZ = \left(\frac{D^{3001}}{R^{KPI}} - 1\right) \frac{C_i^{0010}}{P_{N,i}^{0021} P_{eff,i}^{0023}} \quad (4.20)$$

Damit ergibt sich der Anteil energiebedingter Fahrstopps $\left(\frac{t_{St}}{t}\right)^{KPI}$ zu:

$$\left(\frac{t_{St}}{t}\right)^{KPI} = \frac{LZ}{LZ + \frac{\bar{v}}{D^{3001}}} \quad (4.21)$$

In die Kennzahlenberechnung fließt nur der reine Lade- oder Tankvorgang ein. Außer Acht bleibt die An- und Abfahrt sowie der Bezahlvorgang.

Bild 45 zeigt die Fahr- und energiebedingte Stoppzeit des BEV für eine Referenzfahrtdistanz von 1.000 km. 13,5 % der Reisezeit entfallen auf energiebedingte Fahrstopps.

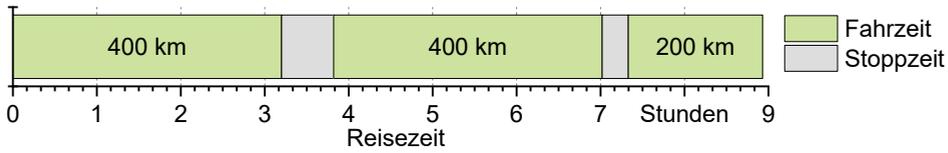


Bild 45: Fahr- und energiebedingte Stoppzeit des BEV für die Referenzfahrtdistanz 1.000 km

Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs

Der Wirkungsgrad der Infrastruktur η_I ergibt sich analog zum Fahrzeug aus den Einzelwirkungsgraden der Komponenten η_i^{0030} . Neben Umwandlungsverlusten bedingen einige Infrastrukturkomponenten vom betrachteten Energieträger abweichende Energieaufwände. Hierunter fallen zum Beispiel die Energieaufwände für die Bereitstellung von Brennstoffen für fossile Kraftwerke der Stromerzeugung eines Wirtschaftsraums. Diese Energieaufwände werden nachfolgend als Hilfsenergien bezeichnet. Für eine Komponente i ergibt sich die Hilfsenergie $w_{H,i}$ aus dem Energiefluss multipliziert mit dem Hilfsenergiefaktor $E_{H,i}^{0033}$ der Komponente nach folgendem Zusammenhang:

$$w_{H,i} = E_{H,i}^{0033} \frac{w_{TtW}^{KPI}}{\eta_I} \prod_{j=1}^i \eta_j^{0030} \quad (4.22)$$

Entsprechend ist die elektrische Hilfsenergie $w_{elH,i}$ über den Hilfsenergiefaktor $E_{elH,i}^{0032}$ definiert. Der Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs w_{WtW}^{KPI} ergibt sich aus den Umwandlungsverlusten der Infrastrukturkomponenten sowie den primärenergetisch bewerteten elektrischen Hilfsenergien und sonstigen Hilfsenergien über alle Infrastrukturkomponenten:

$$w_{WtW}^{KPI} = \frac{w_{TtW}^{KPI}}{\eta_I} + \sum_{i=1}^n \left(w_{H,i} + \frac{w_{elH,i}}{\eta_{el}} + w_{elH,i} E_{elH,i}^{0033} \right) \quad (4.23)$$

Analog zum Wirkungsgrad des Antriebsstrangs, entspricht der Wirkungsgrad des Antriebskonzepts η_{WtW} dem Quotienten aus mechanischem Energiebedarf an den Fahrzeugrädern zur Überwindung der Fahrwiderstände w_{Rad} und dem Primärenergiebedarf w_{WtW}^{KPI} . Für das BEV ergibt sich der in Bild 46 dargestellte Primärenergiebedarf je Fahrkilometer:

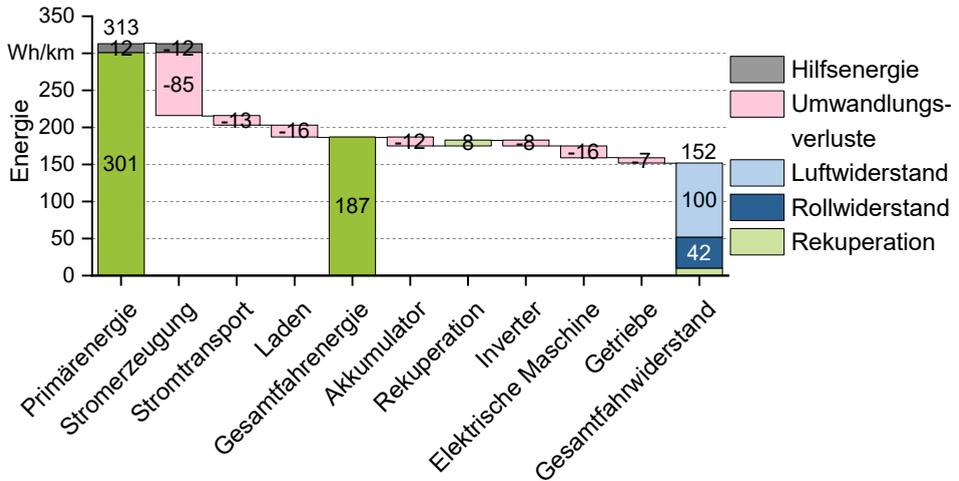


Bild 46: Primärenergiebedarf, Umwandlungsverluste und Gesamtfahrwiderstand des BEV-Antriebskonzepts

Infrastrukturseitig fallen beim BEV Antriebskonzept neben Ladeverlusten und energetischen Verlusten beim Stromtransport Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung an. Darüber hinaus bedingt der Betrieb fossiler Kraftwerke Hilfsenergie zur Bereitstellung von Brennstoffen.

4.2.2 Ökologisch

Die ökologische Bewertung zielt auf den KEA, KRA sowie das GWP ab. Bild 47 zeigt die Systemumgebung, welche den Lebensweg des Antriebskonzepts umfasst. Aufgrund der Datenlage unterscheidet sich der Umfang der Abbildung jedoch in Abhängigkeit des Bewertungskriteriums:

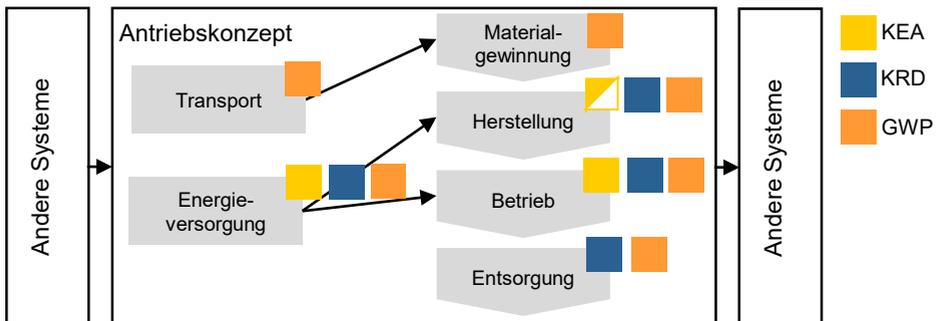


Bild 47: Systemumgebung der ökologischen Antriebskonzeptbewertung

Bewertungsobjekt ist das Antriebskonzept. Andere Systeme, wie die Hardware des Produktionssystems zur Fahrzeugherstellung, befinden sich außerhalb der Systemgrenze und gehen daher nicht in die Bilanzierung ein.

Betrieb und Produktion der Hardware sind durch die Energieversorgung beeinflusst. Ebenso unterliegt die Phase der Materialgewinnung Einflüssen durch das Transportsystem.

Das Vorgehen für den KEA umfasst die Produktion des Fahrzeuges sowie den Energieaufwand des Fahrbetriebs. Für den Primärenergieaufwand der Produktion der Infrastrukturkomponenten liegen nicht ausreichend valide Daten vor, um diese in die Systemumgebung einzubeziehen.

Der KRA berücksichtigt die Ressourcen zur Bereitstellung der Energien, welche für Produktion und Betrieb des Bewertungsobjekts notwendig sind. Darüber hinaus geht der Ressourcenbedarf zur Produktion des Antriebskonzepts und dessen Betrieb sowie der mögliche Rückfluss der Materialien im Rahmen der Entsorgung in die Betrachtung ein. Ressourcen, welche in der Phase der Materialgewinnung eingesetzt werden, sind nicht im KRA enthalten.

Aufgrund der fundierten Datenlage kann die Systemumgebung für das GWP am umfänglichsten abgebildet werden. Über die Systemumgebung des KRA hinaus, gehen in das GWP zusätzlich die Auswirkungen der Materialgewinnung und des Transports ein.

Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der KEA ist der primärenergetisch bewertete Energieaufwand. Die Kennzahl KEA^{KPI} bezieht diesen auf die Einheit Fahrkilometer. Die Systemumgebung umfasst die Fahrzeugherstellung KEA_H sowie den primärenergetisch bewerteten Betrieb des Antriebskonzepts, bestehend aus Fahrbetrieb w_{WtW}^{KPI} und Energieaufwand der Produktion der Verschleißteile KEA_{WV} :

$$KEA^{KPI} = \frac{KEA_H}{ND^{0060}LL^{0061}} + \underbrace{w_{WtW}^{KPI} + KEA_{WV}}_{\text{Betrieb}} \quad (4.24)$$

Der Energieaufwand der Herstellung KEA_H ergibt sich aus dem Energieaufwand der Herstellung des Basisfahrzeuges sowie der Antriebsstrangkomponenten, welche jeweils über die Massen skaliert sind. Die primärenergetische Bewertung der Fahrzeugherstellung erfolgt vereinfachend über die globale elektrische Stromerzeugung nach der Wirkungsgradmethode. Der primärenergetische Energieaufwand der Herstellung ist schließlich auf die Fahrzeuglebensdauer ND^{0060} unter Berücksichtigung der jährlichen Fahrleistung LL^{0061} zu verteilen. Neben der Fahrzeugproduktion geht der primärenergetisch bewertete Fahrenergieaufwand w_{WtW}^{KPI} in den KEA des Antriebskonzepts KEA^{KPI} ein. Bild 48 stellt den KEA des BEV über den Lebensweg dar.

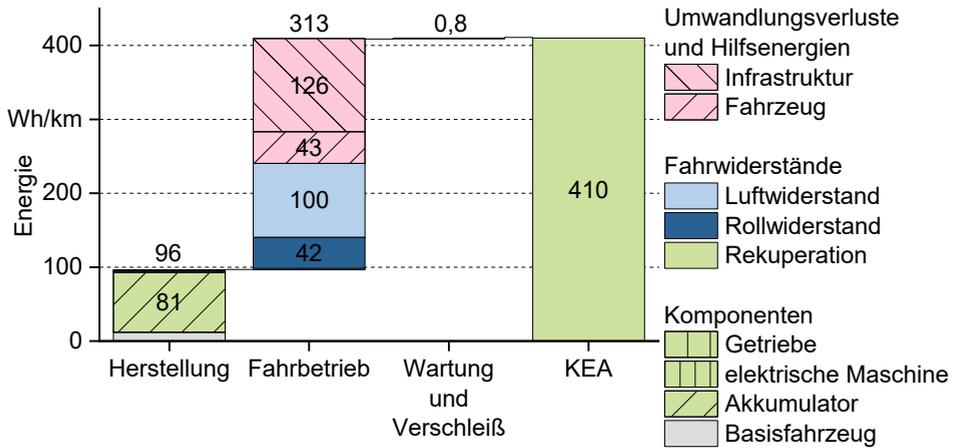


Bild 48: KEA des BEV-Antriebskonzepts über den Lebensweg

Über die Laufleistung fallen verschleißbedingte Bauteilwechsel an, die durch den KEA_{WV} erfasst werden. Der Energieaufwand der Bereitstellung von Ersatzbauteilen ist analog zur Fahrzeugproduktion über die globale elektrische Stromerzeugung primärenergetisch bewertet. Die Häufigkeit verschleißbedingter Bauteilwechsel n ergibt sich für jedes Bauteil i aus der bauteilindividuellen Lebensdauer LC_i^{0063} und der Fahrzeuglaufleistung $ND^{0060}LL^{0061}$, abgerundet auf ganze Zahlen:

$$n = \left\lceil \frac{ND^{0060}LL^{0061}}{LC_i^{0063}} \right\rceil \quad (4.25)$$

Für BEV beträgt der KEA_{WV} 0,8 Wh/km über den Lebensweg. Im Diagramm ist dieser daher kaum ablesbar.

Kumulierte Rohstoffdissipation (KRD)

Der KRA bezeichnet die Summe an Ressourcen, die über den Lebensweg des Antriebskonzepts eingesetzt werden. Die Systemumgebung umfasst Herstellung, Betrieb sowie Rückführung im Rahmen der Entsorgung:

$$KRA = KRA_H + \underbrace{KRA_{WtW} + KRA_{WV}}_{Betrieb} \quad (4.26)$$

Der KRA der Betriebsphase KRA_{WtW} ergibt sich aus den Energieressourcen, die zur Bereitstellung der Sekundärenergie erforderlich sind sowie dem Materialaufwand für die Fahrzeuginstandhaltung KRA_{WV} . Das BEV Antriebskonzept erfordert elektrische Energie. Die Nettostromproduktion entspricht der aufzuwendenden elektrischen Energie vor dem Strom-

transport $w_{el,netto}$. Für den fossilen Energieträger i ergibt sich der Brennstoffbedarf aus dem Anteil an der Erzeugnisstruktur des Wirtschaftsraums x_i^{1000} , dem Wirkungsgrad der Stromerzeugung η_i^{0030} sowie dem Heizwert H_i^{1001} :

$$KRA_{wtw,i} = w_{el,netto} \frac{x_i^{1000}}{\eta_i^{0030} H_i^{1001}} \quad (4.27)$$

Fallen elektrische Hilfsenergien an, ist auch deren Einfluss auf den KRA_{wtw} analog zu obigem Vorgehen zu erfassen. Für sonstige Hilfsenergien, wie Energie zur Bereitstellung der Brennstoffe für die elektrische Stromerzeugung, ist die Erzeugnisstruktur unbekannt, weshalb diese nicht in die KRA-Berechnung eingehen können.

Das Vorgehen zur Ermittlung des KRA_{wv} entspricht der Berechnung des KEA_{wv} , wobei Brennstoffe für Produktionsenergie sowie Materialaufwand der Bauteilproduktion eingehen.

Der KRA der Herstellung KRA_H setzt sich aus der Fahrzeug- KRA_{Fzg} sowie der Infrastrukturherstellung KRA_{Inf} zusammen. In die Fahrzeugproduktion gehen Brennstoffe für die Produktionsenergie von Basisfahrzeug und Antriebsstrang sowie Materialien der Produktion ein. Es gilt die Struktur der globalen elektrischen Stromerzeugung.

Die Materialien i , welche Eingang in die Fahrzeugproduktion finden, berechnen sich aus den gravimetrischen Materialzusammensetzungen der Komponentenbauteile $\left(\frac{M}{m}\right)_i^{1210}$, der Komponentenmasse m , der bauteil- und materialspezifischen relativen Produktionsverluste $M_{v,i}^{1214}$ sowie den relativen Recyclingpotentialen $M_{rec,i}^{1230}$:

$$KRA_{Fzg,H,i} = \left(\frac{M}{m}\right)_i^{1210} \left(\left(\frac{1}{1 - M_{v,i}^{1214}} \right) - M_{rec,i}^{1230} \right) m \quad (4.28)$$

Das Vorgehen zur Berechnung des KRA der Fahrzeuginfrastruktur ist analog zu dem des Fahrzeuges, jedoch finden aufgrund der noch heterogenen Produktionsprozesse stoffliche Verluste im Rahmen der Produktion keine Berücksichtigung. Das Vorgehen zur Dimensionierung und Umlage der infrastrukturseitigen Aufwendungen auf Fahrkilometer ist in Kapitel 4.1.4 ausgeführt.

In die Produktion von Fahrzeug und Infrastruktur gehen Materialien ein. Jedem Material i ist über die Rahmenbedingung $MR_{i,j}^{4000}$ eine Zusammensetzung an Rohstoffressourcen j zugeordnet. Somit kann für einen gegebenen Materialmix die zugehörige Zusammensetzung der Rohstoffressourcen bestimmt werden.

Für die Darstellung in Diagrammform ist es anschaulich, den KRA je Resource über der globalen Verfügbarkeiten aufzutragen. Für die Verfügbarkeit wird auf die geologischen Ressourcen abgestellt, welche die Gesamtheit aller Vorkommen beschreibt, die nachweislich vorhanden oder aus geologischen Gründungen zu vermuten sind, unabhängig von deren wirtschaftlicher Förderbarkeit [218]. Bild 49 stellt den KRA des BEV über die Verfügbarkeit der Rohstoffressourcen dar:

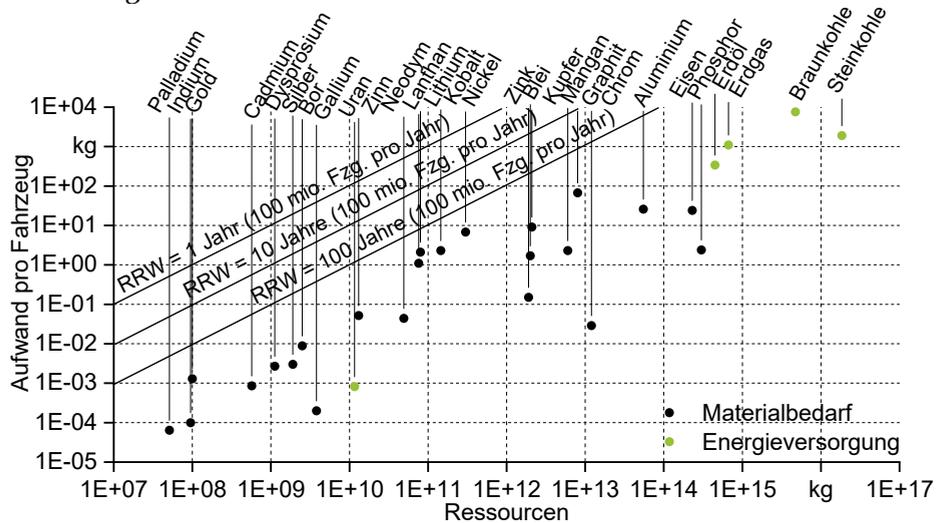


Bild 49: KRA des BEV-Antriebskonzepts über den Lebensweg

Aufgrund der hohen Spannweite der KRA-Werte sowie der globalen Verfügbarkeiten ist eine logarithmische Skalierung erforderlich. Neben dem Ressourcenbedarf pro Fahrzeug ist aus der Position der Diagrammpunkte die theoretische Ressourcenreichweite (RRW) unter der Annahme von 100 Mio. produzierten Fahrzeugen pro Jahr ableitbar.

Die Kennzahl KRD^{KPI} bezieht den KRA auf die verfügbaren Ressourcen Res_i^{1010} und bildet den Durchschnitt dieser. Die Kennzahl quantifiziert damit den durchschnittlichen Anteil für das Antriebskonzept aufgewendeter Ressourcen an den globalen Rohstoffressourcen. Über Nutzungsdauer und Laufleistung $ND^{0060} LL^{0061}$ des Basisfahrzeuges wird die Kennzahl auf Fahrkilometer bezogen:

$$KRD^{KPI} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{KRA_i}{Res_i^{1010}}}{nND^{0060}LL^{0061}} \quad (4.29)$$

Die Kennzahl ist damit Indikator für die Ressourcenkritikalität eines Antriebskonzepts. Auch können über den KRD^{KPI} kritische Ressourcen je Antriebskonzept ermittelt werden.

Globales Erwärmungspotential (GWP)

Das GWP beschreibt die Menge an Kohlenstoffdioxid, die dem akkumulierten Strahlungsantrieb aller emittierten THG eines Antriebskonzepts über 100 Jahre entspricht [170]. Über die Systemumgebung des KRA hinaus, geht in das GWP die Materialbereitstellung ein.

$$GWP = GWP_M + GWP_H + \underbrace{GWP_{WtW} + GWP_{WV}}_{\text{Betrieb}} + GWP_E \quad (4.30)$$

Das GWP des Fahrbetriebs GWP_{WtW} setzt sich aus lokalen Emissionen GWP_{TtW} bei verbrennungsmotorisch betriebenen Antriebskonzepten und infrastrukturseitigen Emissionen GWP_{WtT} zur Bereitstellung der Sekundärenergie zusammen. Für das BEV entspricht GWP_{WtT} dem GWP zur Bereitstellung der elektrischen Energie für den Fahrbetrieb. Dieses wird über den Anteil fossiler Energieträger x_i^{1000} an der Stromerzeugung und deren individuelles Erwärmungspotential im Betrieb GWP_i^{1300} ermittelt. Hilfsenergien $w_{H,i}$ gehen mit individuellen Emissionsfaktoren GWP_i^{1301} in die GWP_{WtT} ein. Das globale Erwärmungspotential der Materialbereitstellung GWP_M , der Herstellung GWP_H , der Instandhaltung GWP_{WV} sowie der Entsorgung GWP_E setzt sich analog zum KRA aus Fahrzeug- und Infrastruktur Betrachtung zusammen. Nachfolgend ist das Vorgehen am Beispiel des BEV gezeigt.

Das Erwärmungspotential der Materialbereitstellung GWP_M ergibt sich aus der Summe aller Materialien i , die in die Produktion des Fahrzeuges eingehen. Für eine Fahrzeugkomponente bestimmen sich diese aus den gravimetrischen Materialzusammensetzungen der Bauteile $\left(\frac{M}{m}\right)_i^{1210}$, der Komponentenmasse m und den bauteil- und materialspezifischen Produktionsverlusten $M_{v,i}^{1214}$. Das Recyclingpotential der Materialien wird entgegen der KRA-Berechnung zunächst nicht begünstigend berücksichtigt. Die Materialbedarfe werden mit dem individuellen Erwärmungspotential der Materialbereitstellung GWP_i^{1302} multipliziert sowie über alle Materialien summiert, um das GWP_M zu bestimmen:

$$GWP_M = \sum_{i=1}^n GWP_i^{1302} \left(\frac{\left(\frac{M}{m}\right)_i^{1210} m}{1 - M_{v,i}^{1214}} \right) \quad (4.31)$$

Das Erwärmungspotential der Fahrzeugherstellung GWP_H leitet sich aus dem Energieaufwand der Fahrzeugherstellung KEA_H ab, der mit den GWP der Erzeugnisstruktur der globalen Stromerzeugung zu verrechnen ist.

Die emissionsreduzierende Wirkung des Recyclings von Materialien wird in der Entsorgungsphase GWP_E über einen Gutschriftenansatz nach der Avoided Burden Methode bewertet. Diese belohnt die potentielle Recyclingfähigkeit der Materialien innerhalb eines Produkts. Beim Gutschriftenansatz werden die bei einem folgenden Produkt resultierenden Einsparungen durch Verwendung von Recyclingmaterial über eine Gutschrift an das erste Produkt vergeben. Der Einsatz von Recyclingmaterial wird nur dann wie Primärrohstoff bewertet, wenn das Material am Ende des Lebenswegs deponiert wird. Bild 50 zeigt den Gutschriftenansatz nach der Allokationsmethode Avoided Burden: [300]

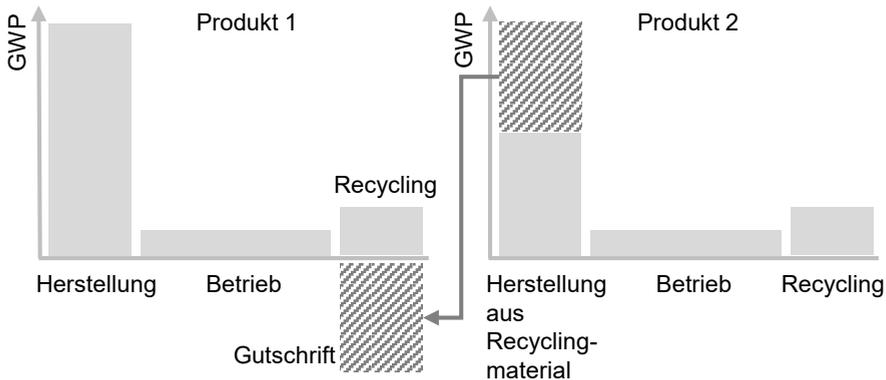


Bild 50: Avoided Burden Methode durch Gutschrift nach [300]

Die Gutschrift ist über die Rahmenbedingung $GWP_{B_i}^{1330}$ umgesetzt, welche die Gutschrift als Anteil des GWP der Materialbereitstellung ausdrückt. Analog zur Fahrzeugseite sind die Lebenswegphasen auch für das Erwärmungspotential der Infrastrukturseite zu erfassen. Dimensionierung und Umlage der infrastrukturseitigen Aufwendungen auf die Fahrkilometer ist in Kapitel 4.1.4 ausgeführt und kommt hier für das GWP_{Inf} zur Anwendung. Das GWP^{KPI} bezieht das kumulierte GWP auf die Gesamtlauflistung $ND_{0060}LL_{0061}$ des Basisfahrzeuges.

Bild 51 stellt das GWP für das BEV über den Lebensweg dar:

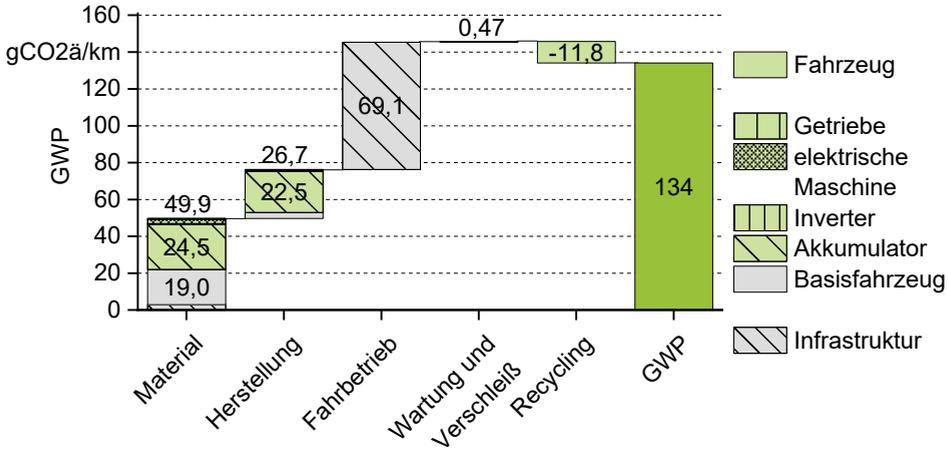


Bild 51: GWP des BEV-Antriebskonzepts über den Lebensweg

4.2.3 Ökonomisch

Die ökonomische Leistungsfähigkeit der Antriebskonzepte geht über Anschaffungskosten, Energiekosten, Wartungs- und Verschleißkosten sowie Lebenszykluskosten in das Kennzahlengerüst ein. Um die Technologiebewertung nicht durch wirtschaftsraumabhängige Rahmenbedingungen der Steuer-, Abgaben-, Umlagen- und Subventionspolitik zu verfälschen, bleiben diese unberücksichtigt.

Kostenstruktur der Fahrzeugherstellung

Die Analyse der Kostenstruktur der Fahrzeugherstellung ermöglicht, kostentreibende Fahrzeugkomponenten einer Antriebsstrangtechnologie zu identifizieren. Die Herstellungskosten HK berechnen sich aus den Herstellungskosten des Basisfahrzeuges HK_{BF}^{2000} sowie der Summe der Herstellungskosten der Antriebsstrangkomponenten HK_i . Die Kosten der Antriebsstrangkomponenten ergeben sich aus leitungsspezifischen Kosten $\left(\frac{K}{P}\right)^{2111}$ oder energiespezifischen Kosten $\left(\frac{K}{E}\right)^{2110}$:

$$HK = HK_{BF}^{2000} + \sum_{i=1}^n HK_i \quad (4.32)$$

Die Anschaffungskosten AHK aus Kundensicht entsprechen dem Verkaufspreis des Herstellers, da Steuern, Abgaben und Umlagen sowie weitere Transaktionskosten des Fahrzeugkaufs nicht in die Betrachtung eingehen.

Der Verkaufspreis setzt sich aus den Herstellungskosten HK , den Gemeinkostenumlagen für Forschung und Entwicklung $FuEGK^{2401}$ sowie Verwaltung und Vertrieb $VVGK^{2402}$ ergänzt um den Gewinnzuschlag des Fahrzeugherstellers G^{2403} im Rahmen einer Zuschlagskalkulation, zusammen:

$$AHK = (HK(1 + FuEGK^{2401} + VVGK^{2402}))(1 + G^{2403}) \quad (4.33)$$

Die Zusammensetzung der Anschaffungskosten des BEV sind in Bild 52 dargestellt:

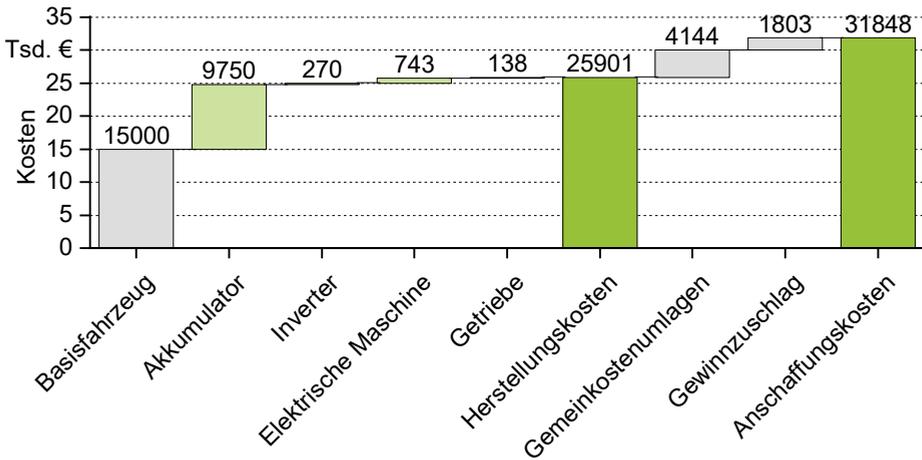


Bild 52: Anschaffungskosten des BEV

Infrastruktur- und Energiekosten

Bei Implementierung eines alternativen Antriebskonzepts fallen Kosten für die Errichtung spezifischer Infrastruktur an. Diese sind nachfolgend am Beispiel der Schnellladeinfrastruktur des BEV sowie des Stromtransports ermittelt.

Die Schnellladeinfrastruktur ist für die vollständige Implementierung des BEV-Antriebskonzepts umfänglich zu errichten und folgt daher einer leistungsabhängigen Dimensionierung. Ausgangspunkt ist die Bemessungsverkehrsstärke MSV_{AB}^{3200} und damit der über den Fahrenergiebedarf w_{TtW}^{KPI} abgeleitete Leistungsbedarf der Fahrzeugflotte. Mit den leistungsabhängigen Herstellungskosten eines Ladepunkts $\left(\frac{K}{P}\right)^{2111}$ und der Nutzungsdauer ND^{0060} ergeben sich die jährlichen Infrastrukturkosten K_{Laden} zu:

$$K_{Laden} = MSV_{AB}^{3200} w_{TtW}^{KPI} \left(\frac{K}{P}\right)^{2111} \frac{1}{ND^{0060}} \quad (4.34)$$

Die Netzinfrastuktur ist hingegen bereits vorhanden. Die Selbstkosten des Stromnetzes können daher über die transportierte Energiemenge verursachungsgerecht dem Antriebskonzept zugerechnet werden. Die Gesamtkosten energieabhängiger Infrastrukturkomponenten ergeben sich über die durchschnittliche Verkehrsleistung DTV_{AB}^{3201} der AB.

Die gesamten jährlichen Infrastrukturkosten eines Antriebskonzepts sind die Summe der energie-, leistungs- und längenabhängigen Kosten aller Infrastrukturkomponenten. Für das BEV stellt Bild 53 die jährlichen Infrastrukturkosten dar. Über die durchschnittliche Verkehrslast der AB DTV_{AB}^{3201} können die Gesamtkosten der Infrastruktur K_{Inf} auf Fahrkilometer umgelegt werden:

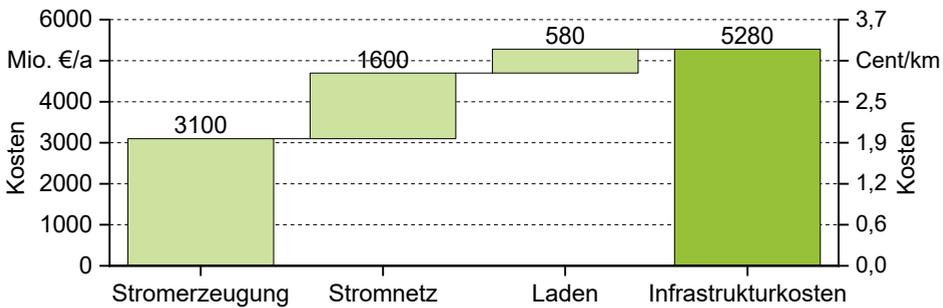


Bild 53: Infrastrukturkosten des BEV

Unter der Annahme, dass die Infrastrukturkosten vollständig über Energiekosten auf die Fahrzeuge verteilt werden, ergeben sich die Energiekosten EK je Kilowattstunde zu:

$$EK = \frac{K_{Inf}}{DTV_{AB}^{3201} w_{TtW}^{KPI}} \quad (4.35)$$

Bild 54 zeigt die Energiekosten des BEV gegenüber der Strompreiszusammensetzung in Deutschland. Die Energiekostenbestandteile der Stromerzeugung und des Stromtransports gleichen den um Abgaben, Steuern und Umlagen bereinigten Strompreisen des Wirtschaftsraums. Dies ist zu erwarten, da die Bestandteile des bereinigten Energiepreises ebenso Netzentgelt, also Kosten des Stromnetzes, und Kosten der Stromerzeugung sind. Über die Selbstkosten ermittelte Netzentgelte liegen deutlich unter den Netzentgelten, welche Endverbrauchern verrechnet werden. Dies ist auf die Entlastung von Industrie- und Gewerbekunden zuungunsten des Endkunden zurückzuführen. Durch die zu errichtende Ladeinfrastruktur erhöhen sich die Energiekosten des BEV und übersteigen den bereinigten Energiepreis des Wirtschaftsraums.

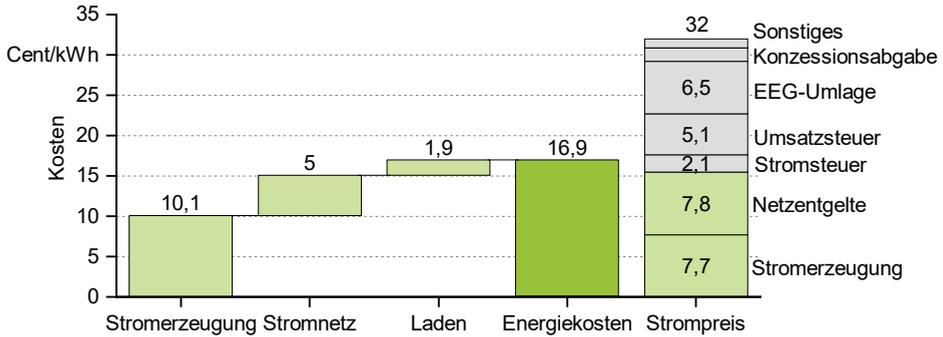


Bild 54: Energiekosten des BEV gegenüber Strompreisstruktur, Daten Strompreis [318]

Lebenszykluskosten

Die Kosten des Fahrzeugbesitzes sind wesentliches Kriterium für die Kaufentscheidung der Konsumenten und damit die Marktdurchdringung eines Antriebskonzepts. Um keine Verzerrung der ökonomischen Bewertung durch staatliche Lenkungs Eingriffe abzubilden, gehen Steuern, Abgaben, Subventionen und Umlagen sowohl bei Fahrzeuganschaffung als auch beim Fahrzeugbetrieb nicht in die Betrachtung ein.

Die Gesamtkosten des Fahrzeugbesitzes LZK^{KPI} setzen sich aus einmaligen und laufenden Kosten zusammen. Die einmaligen Kosten des Fahrzeugbesitzes sind die Anschaffungskosten AHK abzüglich dem Wiederverkaufswert RW nach der Nutzungsdauer:

$$LZK^{KPI} = \underbrace{AHK - RW}_{\text{einmalig}} + \underbrace{EK + WVK}_{\text{laufend}} \quad (4.36)$$

Der Restwert RW errechnet sich in Abhängigkeit der Nutzungsdauer des Fahrzeuges aus dem Restwertfaktor $f(ND)^{2400}$. Die laufenden Kosten des Fahrzeugbetriebs umfassen Energiekosten sowie Wartungs- und Verschleißkosten WVK . Die Energiekosten ergeben sich über die Gesamtfahrleistung $ND^{0060}LL^{0061}$ aus dem Energiebedarf w_{tW}^{KPI} und den Energiekosten EK .

Wartungs- und Verschleißkosten WVK ergeben sich aus der Summe wartungs- und verschleißbedingter Maßnahmen an Antriebsstrangbauteilen sowie dem Basisfahrzeug. Für Bauteil i einer Antriebsstrangkomponente ist die Anzahl der Maßnahmen der Quotient aus Gesamtfahrleistung $ND^{0060}LL^{0061}$ und Laufleistung des Bauteils LC_i^{0063} , gerundet auf ganze Zahlen. Der ökonomische Aufwand der Maßnahme ergibt sich aus dem Arbeitszeitaufwand $AZ_{wv,i}^{2521}$ und den Arbeitskosten des Wirtschaftsraums

AK^{2123} sowie im Fall verschleißbedingter Wechsel aus den Materialkosten des Ersatzteils $MK_{WV,i}^{2121}$:

$$WVK_i = \left[\frac{ND^{0060} LL^{0061}}{LC_i^{0063}} \right] (MK_{WV,i}^{2121} + AZ_{WV,i}^{2521} AK^{2123}) \quad (4.37)$$

Darüber hinaus sind regelmäßige Inspektionen wie Hauptuntersuchung sowie ggf. Abgasuntersuchungen über das Fahrzeugleben erforderlich, die ebenso in die WVK eingehen. Bild 55 fasst die Wartungs- und Verschleißkosten des BEV zusammen. Für den BEV-Antriebsstrang fallen innerhalb der betrachteten Nutzungsdauer ausschließlich Wartungs- und Verschleißmaßnahmen des Basisfahrzeuges an:

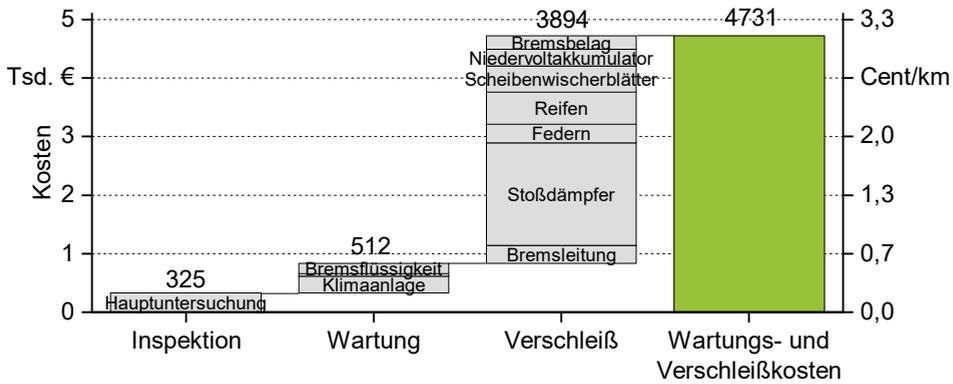


Bild 55: Inspektions-, Wartungs- und Verschleißkosten des BEV über den Lebensweg

Die LZK^{KPI} bezieht die Gesamtkosten des Fahrzeugbesitzes auf die Gesamtfahrleistung $ND_{0060} LL_{0061}$ und damit auf Fahrkilometer. Bild 56 fasst die Gesamtkosten des Fahrzeugbesitzes für das BEV zusammen:

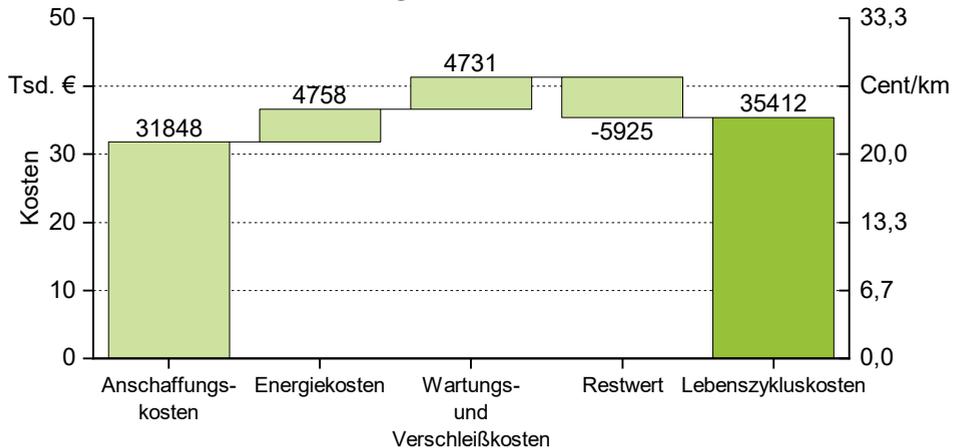


Bild 56: Lebenszykluskosten des BEV

4.3 Automatisierung durch E|KPI-Webapplikation

Forschungsfrage dieser Arbeit ist, wie die multidimensionale Vergleichsmethodik durch Ansätze der Softwareentwicklung effizient automatisierbar ist. Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage ist nachfolgend, entlang eines linearen Vorgehensmodells von Anforderungsanalyse, Entwurfsphase und schließlich Implementierung eine Softwarearchitektur erarbeitet und beschrieben. Diese Architektur konnte im Rahmen des Forschungsprojektes E|KPI in einer Webapplikation umgesetzt werden [319].

Nachfolgende Tabelle fasst die Anforderungen an die Automatisierungslösung des Bewertungsprozesses zusammen:

Tabelle 15: Anforderung an E|KPI-Webapplikation

Nr.	Anforderung
1	Rahmenbedingungen in zentralem Datenspeicher
2	Reaktionszeit der Applikation auf Nutzereingabe kleiner 2 Sek.
3	Minimaler Einrichtungsaufwand für Anwender

Neben allgemeinen Anforderungen lassen sich Anwendungsfälle der Webapplikation formulieren. Bild 57 strukturiert diese Anwendungsfälle in einem UML-Anwendungsfalldiagramm:

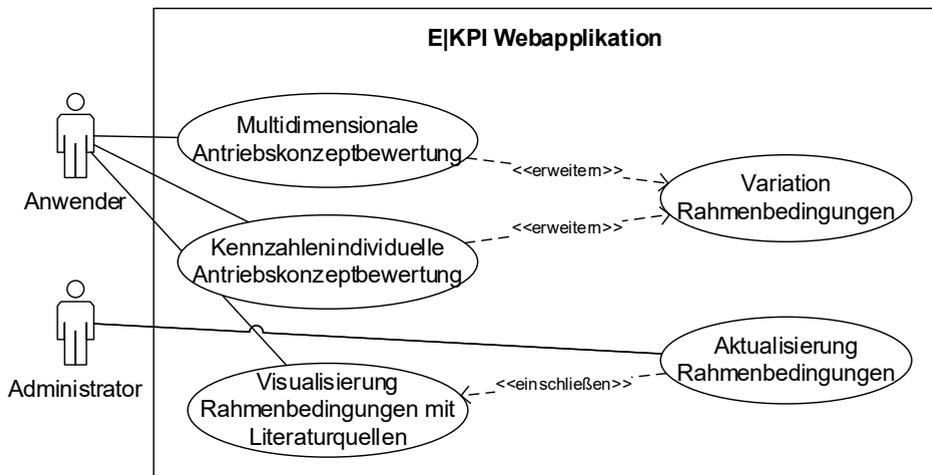


Bild 57: UML-Anwendungsfalldiagramm E|KPI-Webapplikation

Anwender können sowohl das gesamte Kennzahlensystem als auch Detailauswertungen zu einzelnen Kennzahlen über geeignete Diagrammdar-

stellungen abfragen. Die Rahmenbedingungen, die Basis der Kennzahlenberechnung sind, kann der Anwender unter Darstellung zugehöriger Literaturquellen einsehen. Zur Abbildung des Einflusses von Rahmenbedingungen auf das Bewertungsergebnis kann der Anwender einzelne Rahmenbedingungen variieren und das veränderte Bewertungsergebnis abfragen. Ein Administrator kann ebenso die Rahmenbedingungen einsehen und hat zusätzlich die Möglichkeit, diese im zentralen Datenspeicher zu bearbeiten.

Die Visualisierung der E|KPI-Webapplikation besteht aus einem übergeordneten Seitenselektor. Dieser bietet direkten Zugang zur Visualisierung der Rahmenbedingungen, zur multidimensionalen Kennzahlenbewertung oder zu individuellen Kennzahlenauswertungen. Bild 58 stellt das Schema der Benutzeroberfläche der E|KPI-Webapplikation dar:

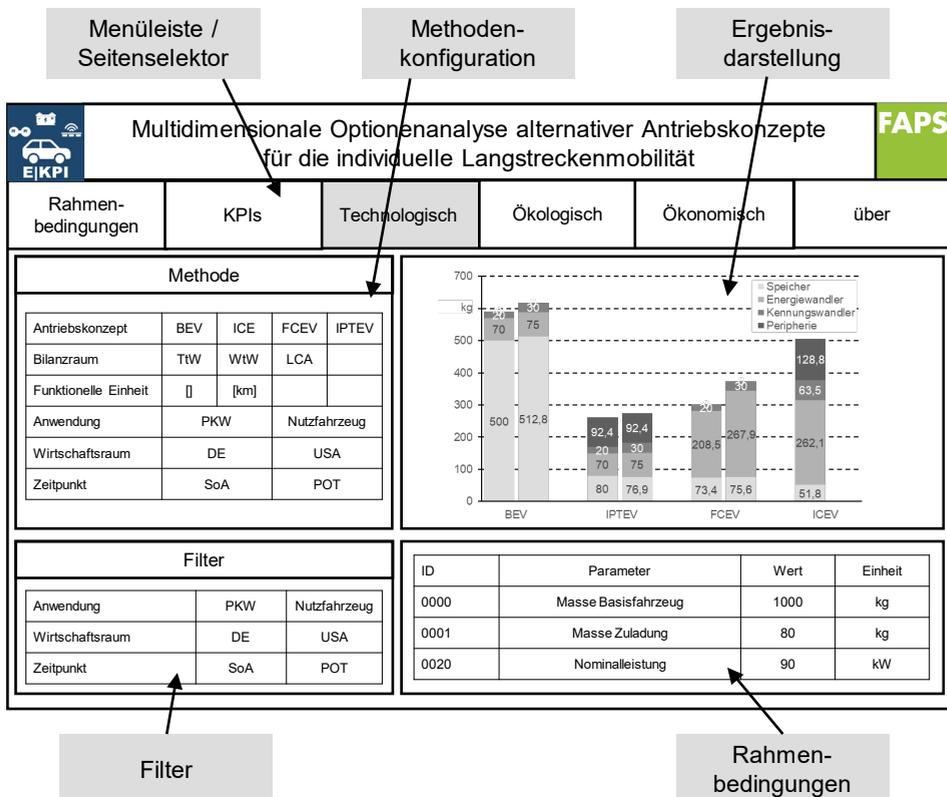


Bild 58: Schema der Benutzeroberfläche der E|KPI-Webapplikation

Ist eine spezifische Auswertung innerhalb einer Bewertungsdimension selektiert, setzt sich die Visualisierungsszene aus vier Bereichen zusammen:

In der Methodenkonfiguration wird die Bewertung hinsichtlich gewähltem Antriebskonzept, dem Bilanzraum oder der funktionellen Einheit spezifiziert. Die Ergebnisdarstellung visualisiert das eigentliche Bewertungsergebnis. Unterhalb werden die Rahmenbedingungen abgebildet, auf deren Basis die Bewertung erfolgt. Der Filterbereich unterstützt den Anwender bei der Auswahl einer spezifischen Rahmenbedingung. Die spezifischen Werte der Rahmenbedingungen kann der Anwender variieren, um deren Einfluss auf das Bewertungsergebnis zu untersuchen.

4.3.1 Client-Server-Architektur

Die Anforderung, Rahmenbedingungen in einem zentralen Datenspeicher zu strukturieren sowie dem Anwender einen geringstmöglichen Einrichtungsaufwand bei der Inbetriebnahme der E|KPI-Webapplikation zu garantieren, ist durch die Umsetzung der Applikation in einer Client-Server-Architektur erfüllbar.

Eine solche Architektur wird zur Verteilung von Aufgaben innerhalb eines Netzwerkes verwendet. Mehrere Clients stehen dabei zu einem Server in einer Konsumenten-Produzenten-Beziehung. Zu beliebigen Zeitpunkten tätigen Clients Anfragen und nutzen als Konsumenten die Antwort des Servers zur Erfüllung von Aufgaben. Als Produzent wartet der Server auf Anfragen der Clients und gibt bei Anfrage das angeforderte Ergebnis zurück. [320]

Bild 59 fasst die Client-Server-Architektur in einem Blockdiagramm zusammen:

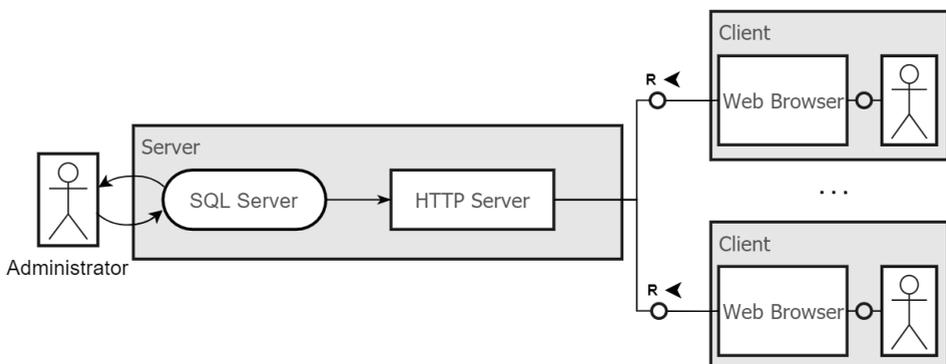


Bild 59: Blockdiagramm der E|KPI-Webapplikation

Der Anwender greift mittels Webbrowser über Hypertext Transfer Protocol (HTTP) Anfragen auf einen physikalischen Server, welcher eine Structured Query Language (SQL)-Datenbank sowie einen HTTP-Server bereitstellt,

zu und fragt ein spezifisches Bewertungsergebnis an. Zur Beantwortung der Anfrage initialisiert der Server Objekte der Geschäftslogik, wie ein spezifisches Antriebsstrangmodell, unter Abfrage der Rahmenbedingungen vom SQL-Server. Die Objekte der Geschäftslogik implementieren spezifische Methoden, zum Beispiel die Energiebedarfssimulation über ausgewählte Fahrzyklen. Unter Aufruf dieser Methoden führt der Server die erforderlichen Berechnungen zur Beantwortung der Clientanfrage durch, fasst die Berechnungsergebnisse in JavaScript Object Notation (JSON)-Objekten zusammen und stellt diese dem Client im Rahmen der Serverantwort bereit. Der Webbrowser des Clients rendert die als HTML und JavaScript erhaltenen Anweisungen in eine anwendergerechte Ergebnisdarstellung.

4.3.2 Relationale Datenbank zur Strukturierung der Rahmenbedingungen

Datenbanken verwalten Informationen, welche zueinander in logischen Beziehungen stehen. Aufgabe der Datenbank ist es, diese Daten effizient und dauerhaft zu speichern sowie bedarfsgerecht in Teilmengen zur Verfügung zu stellen. Es existieren verschiedene Modelle von Datenbanken, wobei das relationale Datenbankmodell das verbreitetste ist [321]. Für die Strukturierung der Rahmenbedingungen der E|KPI-Webapplikation ist eine relationale Datenbank gewählt. Bild 60 fasst den Aufbau der Datenbank in einem Entity-Relationship-Modell (ERM) zusammen:

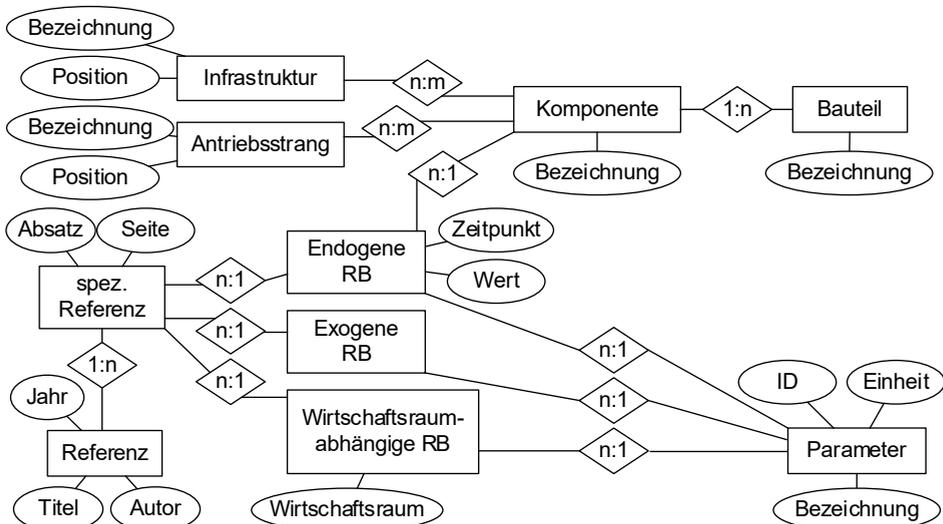


Bild 60: Entity-Relationship-Modell (ERM) der relationalen Datenbank zur Strukturierung der Rahmenbedingungen (RB)

Eine Rahmenbedingung ist stets einem Parameter zugeordnet, wobei zu einem Parameter viele Rahmenbedingungen bestehen können. Die Parameter folgen der in Bild 36 definierten Struktur und weisen stets eine ID, einen Bezeichner sowie eine Einheit auf. So ist dem Parameter „Masse des Basisfahrzeuges“ mit der Parameter ID „0000“ in der Einheit „kg“ eine endogene Rahmenbedingung mit dem Wert „1.250“ für den Stand der Technik zugeordnet. Die Unterteilung in exogene, wirtschaftsraumabhängige sowie endogene Rahmenbedingungen ist über korrespondierende Relationen im ERM abgebildet. Jede Rahmenbedingung weist darüber hinaus mindestens eine spezifische Referenz auf. Spezifische Referenzen können zur detaillierten Quellenangabe die Attribute „Absatz“ und „Seite“ enthalten. Jede spezifische Referenz ist wiederum einer Referenz zugeordnet, wobei diese zu meist die Attribute „Titel“, „Autor“ und „Jahr“ aufweist. Alle endogenen Rahmenbedingungen beziehen sich auf Komponenten, wobei eine Komponente durch viele endogene Rahmenbedingungen definiert wird. Eine Komponente kann verschiedenen Antriebssträngen zugeordnet werden. Die Relation Antriebsstrang enthält für eine Antriebsstrangtechnologie wie BEV mehrere Komponenten mit individuellen Positionen im Energiefluss. Analog erfolgt die Abbildung der Infrastruktur. Antriebsstrangkomponenten sind wieder einzelne oder mehrere Bauteile zugeordnet.

4.3.3 Geschäftslogik zur Kennzahlenberechnung

Die Geschäftslogik implementiert die in Kapitel 4.2 formulierte Methodik zur Berechnung des Kennzahlensystems. Bild 61 stellt die Klassenstruktur der Geschäftslogik dar, wobei die erforderlichen Klassen und Methoden zur Darstellung der Benutzeroberfläche sowie der zugehörigen Diagrammauswertungen nicht Teil der Geschäftslogik sind und daher keinen Eingang in das Diagramm finden.

Der logische Aufbau folgt der eingeführten Struktur der endogenen Rahmenbedingungen in Bild 39. Danach besteht ein Antriebsstrang (drive-train) aus mehreren Komponenten (component). Die Beziehung ist als Komposition konkretisiert. Die Komponente ist wiederum aus einer Vielzahl von Bauteilen (parts) zusammengesetzt. Die erforderlichen Methoden zur Berechnung von Kennzahlen ohne Bezug zur Infrastruktur, wie Antriebsstrangmasse, Leistungsdichte oder Energiebedarf des Betriebs, implementiert die Klasse Antriebsstrang. Spezielle Berechnungsanweisungen, zum Beispiel die Ermittlung der lokalen Emissionen eines Antriebsstrangs (operation_GWP), sind über eine antriebsstrangspezifische Vererbung abgebildet. Damit wird erreicht, sämtliche generische Berechnungsmethoden

des Antriebsstrangs in der Klasse Drivetrain zu implementieren und nur falls erforderlich, in den erbenenden antriebsstrangspezifischen Klassen zu spezialisieren. Ein analoges Vorgehen ist für die Infrastrukturseite umgesetzt.

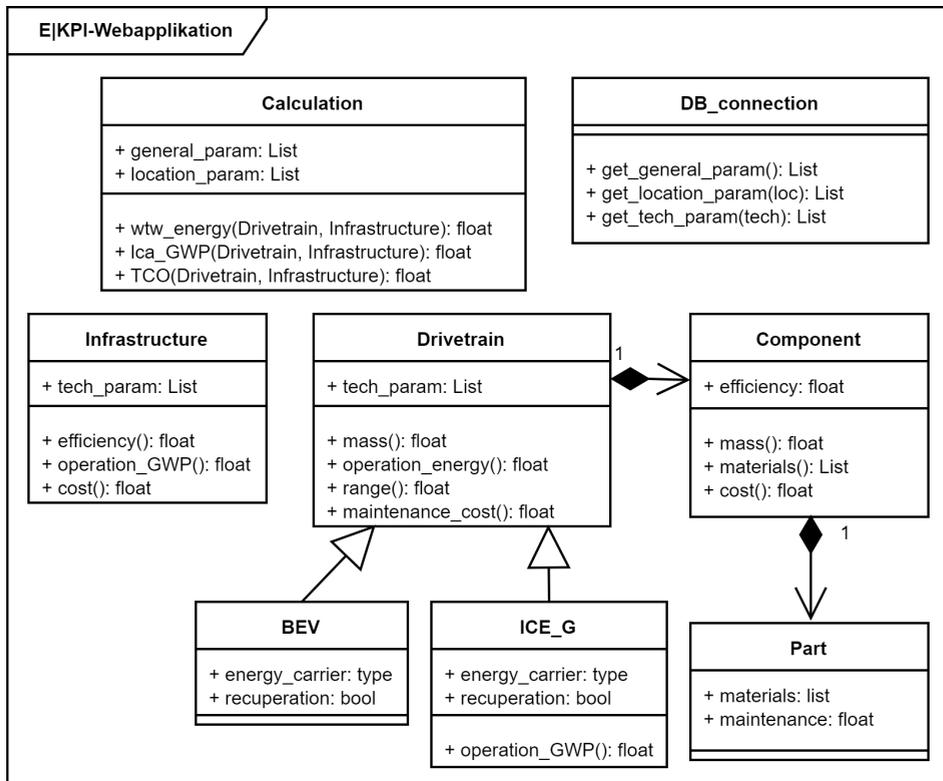


Bild 61: Vereinfachtes Klassendiagramm der Geschäftslogik zur Kennzahlenberechnung

Die Logik zur Berechnung von Kennzahlen mit Bezug zu Antriebsstrang sowie Infrastruktur implementiert die Klasse Calculation. So erfolgt die Berechnung des WTW-Energiebedarfs (*wtw_energy*) durch den Aufruf der zugehörigen Methode der Calculation-Klasse sowie Übergabe eines initialisierten Drivetrain sowie eines Infrastructure-Objekts.

Vor der Berechnung einer spezifischen Kennzahl ist ein Drivetrain-Objekt zu initialisieren. Bei Objekterstellung erfolgt die Abfrage der technologischen Rahmenbedingungen aus der Datenbank. Anschließend kann beispielsweise die Methode „*mass()*“ aufgerufen werden, welche durch Iteration über die Komponenten und deren Leistungs- und Energiedichten dem Aufrufer die Masse des Antriebsstrangs zurückgibt.

5 Antriebskonzeptvergleich für einen PKW im Wirtschaftsraum Deutschland

Die multidimensionale Vergleichsmethodik kommt in diesem Kapitel für die alternativen Antriebskonzepte des Lösungsraums zur Anwendung. Als Referenz wird ebenso der Stand der Technik des ICE_G bewertet. Es gelten die exogenen Rahmenbedingungen aus Abschnitt 4.1.3 sowie dem Anhang und damit die Basisfahrzeugdefinition, welche sich an einem Mittelklasse PKW orientiert. Wirtschaftsraumabhängige Rahmenbedingungen sind für den Wirtschaftsraum Deutschland formuliert. Die Bewertung ist entlang der Dimensionen technologisch, ökologisch und ökonomisch gegliedert.

5.1 Technologisch

Technologische Leistungsdaten beschreiben Merkmale der Antriebskonzepte, welche Basis für die Berechnung der ökologischen oder ökonomischen Dimensionen sind.

Ausgangspunkt der technologischen Bewertung ist die Analyse der Fahrzeugmasse, die sich über die gravimetrischen Energie- und Leistungsdichten der Antriebsstrangkomponenten bestimmt. Die Fahrzeugmasse ist Einflussgröße der Simulation des Fahrenergiebedarfs über das Längsdynamikmodell. Es schließt sich die Berechnung der maximalen Fahrreichweite und energiebedingten Fahrstopps an.

5.1.1 Fahrzeugmasse und gravimetrische Leistungsdichte

Die Fahrzeugmassen bestimmen sich über die Masse des Basisfahrzeuges sowie die Massen der Antriebsstrangkomponenten. Bild 62 fasst die Fahrzeugmassen je Antriebskonzept zusammen. Aufgrund der sich verbessernden Energie- und Leistungsdichten der Antriebsstrangkomponenten vom Stand der Technik zum technologischen Potential hin, verringern sich die Massen der Energie- und Kennungswandler. Der Energiespeicher beim BEV weist mit Abstand den höchsten Massenanteil aller Technologien auf. Die Verbesserung der Energiedichte von Akkumulatoren führt daher zur deutlichsten Massenoptimierung beim BEV.

Das IPTEV verfügt über einen geringer dimensionierten Akkumulator mit einer Kapazität von 12 kWh für Fahrten außerhalb der E|ROAD. Zusätzlich

ist eine Sekundärspule verbaut, um Energie während der Fahrt aufzunehmen. Das FCEV ist mit einem Akkumulator mit 2 kWh Kapazität ausgerüstet, der beim Systemstart die Brennstoffzelle auf Betriebstemperatur bringt und Fahrenergie durch Rekuperation aufnimmt. Weitere Komponenten wie Antriebsachsen oder Radlager sind nicht antriebsstrangspezifisch und daher Teil des Basisfahrzeuges.

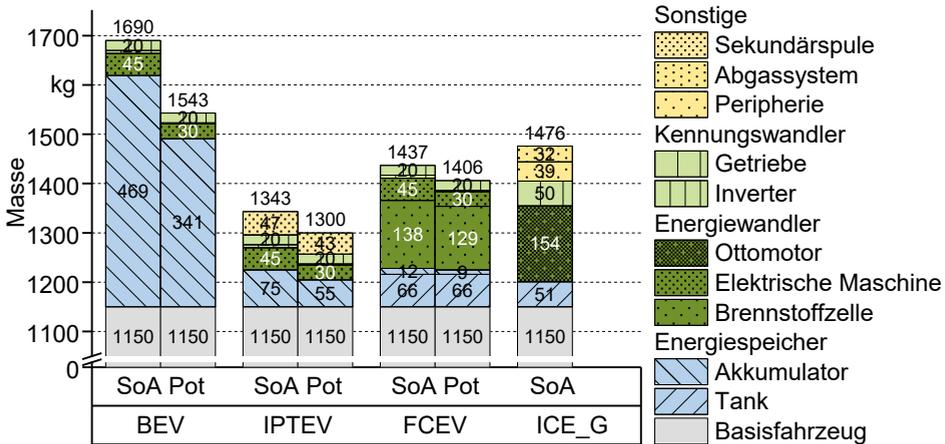


Bild 62: Fahrzeugmassen der Antriebskonzepte

Die Analyse der Fahrzeugmassen zeigt, dass beim BEV der Großteil der Antriebsstrangmasse mit der Kapazität des Akkumulators skaliert, während bei FCEV und ICE_G die Energiewandler die Antriebsstrangmasse dominieren. Beim BEV sind daher höhere Antriebsnennleistungen bei geringem Massenzuwachs darstellbar, als dies bei FCEV und ICE_G der Fall ist. Ein Zuwachs an Fahrreichweite führt umgekehrt beim BEV-Antriebskonzept zu größeren Massenzuwächsen als bei FCEV und ICE_G.

Die gravimetrische Leistungsdichte des Fahrzeuges ergibt sich aus Fahrzeugmasse und Maximalleistung des Antriebsstrangs. Diese ist durch die kurzfristige Spitzenleistung der Antriebskomponenten bestimmt. Zur Optimierung der bewegten Fahrzeugmasse und damit des Fahrenergiebedarfs sowie für ein agiles Fahrverhalten ist eine minimale Fahrzeugmasse bei hoher Spitzenleistung und damit ein hohes gravimetrisches Leistungsgewicht anzustreben. Da elektromotorisch betriebene Antriebskonzepte im Gegensatz zu verbrennungsmotorischen kurzzeitig im Überlastbetrieb gefahren werden können und für die Dimensionierung eine einheitliche Nennleistung des Basisfahrzeuges vorgegeben ist, ergibt sich für das ICE_G die geringste gravimetrische Leistungsdichte. Bild 63 fasst die gravimetrischen Leistungsdichten je Antriebskonzept und deren Entwicklung zusammen:

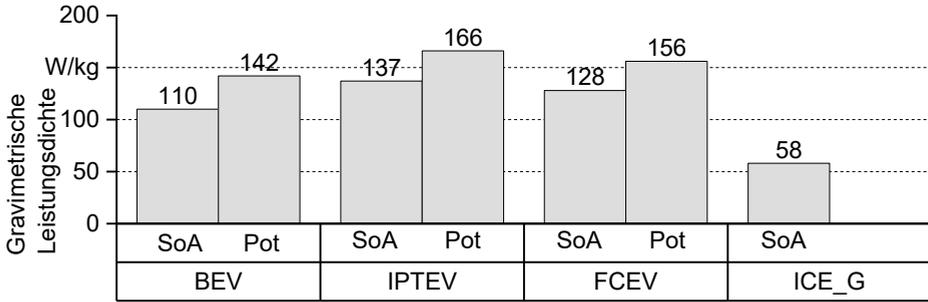


Bild 63: Gravimetrische Leistungsdichten der Gesamtfahrzeuge je Antriebskonzept

Unter den alternativen Antriebskonzepten hat das langstreckentaugliche BEV aufgrund der hohen Masse des Akkumulators die geringste gravimetrische Leistungsdichte.

5.1.2 Fahrenergiebedarf und -reichweite

Der Fahrenergiebedarf ist Ausgangsbasis der ökologischen und ökonomischen Kennzahlenberechnung und der Dimensionierung der Infrastrukturkomponenten zur Energiebereitstellung. Bild 64 stellt die Gesamtfahrenergie je Kilometer für die Antriebskonzepte des Lösungsraums dar:

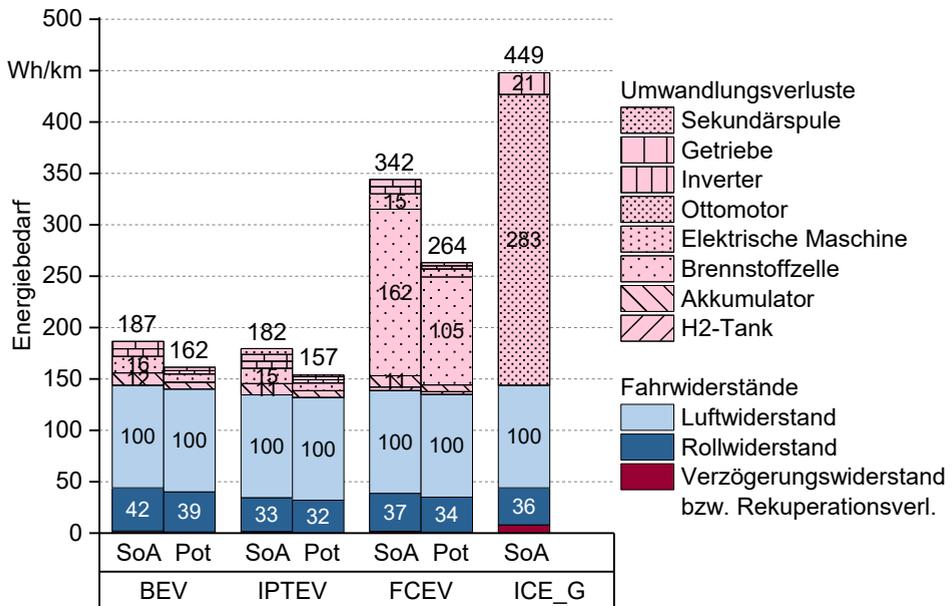


Bild 64: Gesamtfahrenergiebedarf der Antriebskonzepte

Der Gesamtfahrenergiebedarf basiert auf dem simulierten Gesamtfahrwiderstand über den Autobahnfahrzyklus. Dominierende Fahrwiderstände

sind Luft- und Rollwiderstand. Steigungs- und Beschleunigungswiderstand spielen über den Autobahnfahrzyklus keine Rolle, da dieser etwa auf gleicher Höhenlage sowie mit etwa gleicher Fahrgeschwindigkeit startet und endet. Die Steigungs- und Beschleunigungswiderstände heben sich daher über den Zyklus auf. Aus den Umwandlungsverlusten der Antriebsstrangkomponenten ist der Gesamtfahrenergiebedarf ableitbar.

In Abhängigkeit der Fahrzeugmassen stellen sich veränderte Rollwiderstände ein. Für das BEV ergibt sich aufgrund der hohen Antriebsmasse mit 42 Wh/km der höchste Rollwiderstand. Alternative Antriebskonzepte unterstützen Rekuperation statt mechanischer Bremsarbeit. Gegenüber dem ICE_G ist der Fahrenergiebedarf der alternativen Antriebskonzepte daher um 6 Wh/km reduziert.

Der Luftwiderstand ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und dem Luftwiderstandsbeiwert, welcher durch die Karosserieform definiert ist. Diese ist unabhängig von der Antriebsstrangtechnologie und der Luftwiderstandsbeiwert daher über das Basisfahrzeug definiert. Unabhängig vom Antriebsstrang besteht jedoch ein hohes Optimierungspotential des Gesamtfahrenergiebedarfs durch Verbesserung der Aerodynamik, wie in Bild 65 dargestellt:

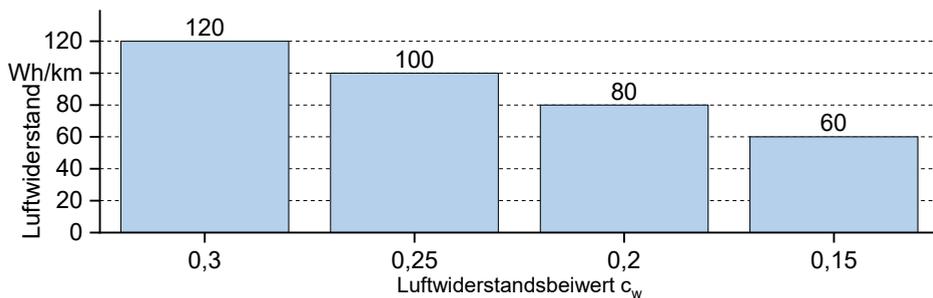


Bild 65: Luftwiderstand in Abhängigkeit des Luftwiderstandsbeiwertes für Autobahnfahrzyklus

Entscheidende Abweichungen sind auf die Umwandlungsverluste der Antriebskomponenten zurückzuführen. Während die Komponenten rein elektrischer Antriebskonzepte Wirkungsgrade über 90 % aufweisen, führt die Brennstoffzelle in FCEV sowie der Ottomotor in ICE_G zu hohen thermisch dissipierenden Umwandlungsverlusten.

Gegenüber dem Stand der Technik sind durch bessere Wirkungsgrade der Antriebskomponenten verringerte Fahrenergiebedarfe möglich. Darüber hinaus führen optimierte Fahrzeugmassen im technologischen Potential zu verringerten Rollwiderständen.

Der Gesamtfahrenergiebedarf und die Kapazität der Energiespeicherkomponenten des Antriebsstrangs legen die maximale Fahrreichweite fest. Eine begrenzte Fahrreichweite führt bei Langstreckenfahrten zu energiebedingten Fahrstopps, deren Dauer durch die Lade- bzw. Betankungsleistung bestimmt ist.

Bild 66 fasst Fahrreichweite und energiebedingte Fahrstopps für eine Langstreckenfahrt von 1.000 km unter Annahme des Autobahnfahrzyklus zusammen:

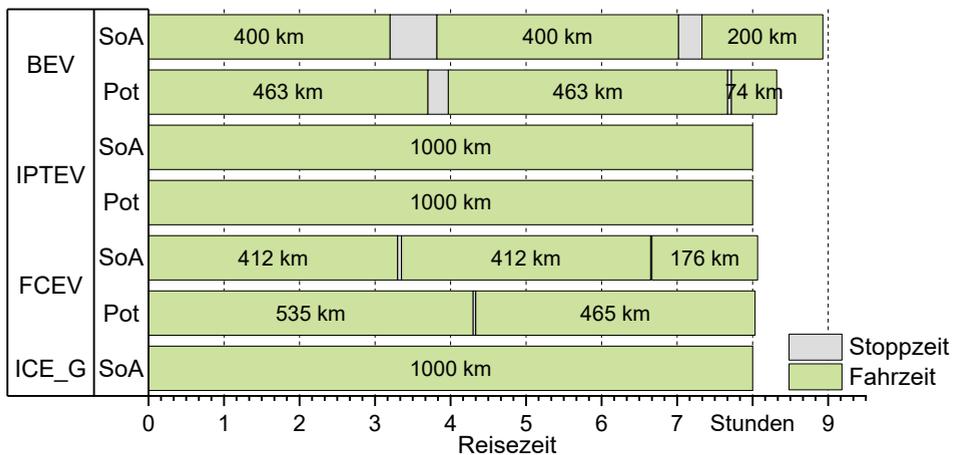


Bild 66: Fahrreichweite und energiebedingte Fahrstopps der Antriebskonzepte bei Langstreckenfahrt von 1.000 km

Das technologische Potential der Fahrreichweite und der energiebedingten Fahrstopps berücksichtigt ausschließlich Verbesserungen aufgrund optimierter Fahrenergiebedarfe. Die Kapazität der Energiespeicher der Fahrzeuge ist Teil der Basisfahrzeugdefinition und bleibt bei Analyse des technologischen Potentials daher unverändert.

Das BEV hat zum Stand der Technik und dem technologischen Potential die geringste Fahrreichweite. Der verringerte Fahrenergiebedarf und die zunehmende Ladeleistung führen zu einer Verringerung energiebedingter Fahrstopps und damit der Reisezeit im technologischen Potential.

FCEV sowie ICE_G weisen höhere Fahrreichweiten auf. Die Betankungsdauern weichen unwesentlich voneinander ab. IPTEV nutzen auf Langstreckenfahrten die kontinuierliche Energieübertragung der E|ROAD und erfordern daher unabhängig von der Fahrdistanz keine energiebedingten Fahrstopps.

5.1.3 Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs

Der Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs umfasst alle Umwandlungsverluste der Fahrzeug- und Infrastrukturkomponenten von aufzuwendender Primärenergie bis zu den Fahrwiderständen. Energieformen, abweichend vom Energiefluss der Komponente wie elektrische Energie zur Verdichtung von Wasserstoff, gehen als Hilfsenergie in die Betrachtung ein. Bild 67 stellt den Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs für die Antriebskonzepte je Fahrkilometer dar:

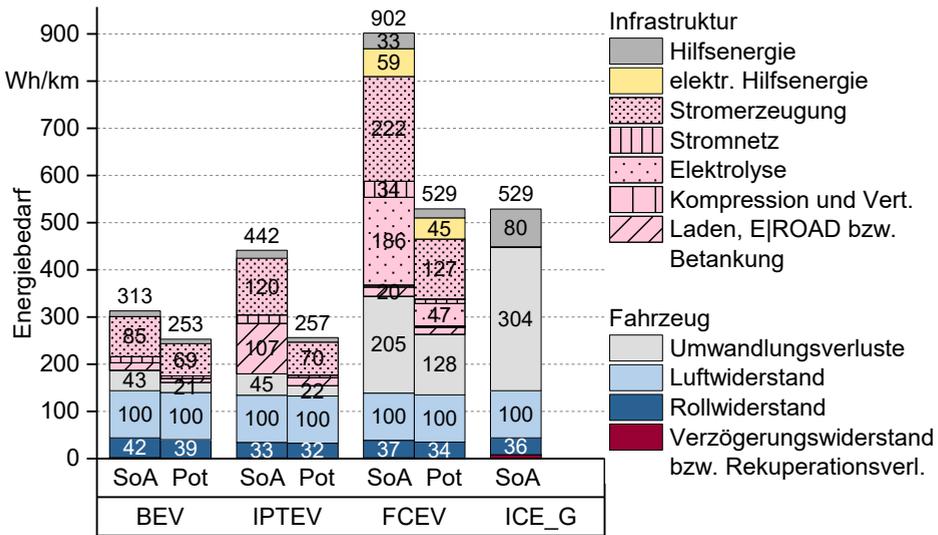


Bild 67: Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs der Antriebskonzepte

Aufgrund der kontaktlosen Energieübertragung der E|ROAD sind die Umwandlungsverluste des IPTEV höher als die des BEV. Für den Stand der Technik geht der Vorteil des geringeren Fahrenergiebedarfs, insbesondere aufgrund niedrigeren Rollwiderstands, des IPTEV im Primärenergiebedarf daher wieder verloren. Im technologischen Potential nähern sich die Primärenergiebedarfe der Technologien an.

Die Umwandlungsverluste des FCEV sind durch die Wasserstoffherzeugung in Elektrolyseuren und die Stromerzeugung bestimmt. Das Potential der Technologie beschreibt mit Umwandlungswirkungsgraden der Elektrolyseure von 85 % eine deutliche Reduktion des Primärenergiebedarfs. Neben den Umwandlungsverlusten ist darüber hinaus elektrische Energie für die Verdichtungsschritte des Gastransports sowie für die Druckgasbetankung aufzubringen. Unabhängig davon, ob Wasserstoff durch Erdgasraffination oder im Elektrolyseverfahren aus elektrischer Energie bereitgestellt wird,

ist in erheblichem Umfang elektrische Energie zum Betrieb des Antriebskonzepts erforderlich.

Über die Infrastrukturkomponenten des ICE_G fallen Hilfsenergien für Transport und Veredelung an, vornehmlich Prozesswärme im Rahmen der Raffination.

Initiale Infrastrukturkomponente von BEV, IPTEV und FCEV ist die elektrische Stromerzeugung. Für den Betrachtungszeitpunkt 2020 setzt sich die inländische Stromerzeugung zu 36 % aus fossilen Energieträgern zusammen, deren Verfeuerung hohen Umwandlungsverlusten unterliegt. Darüber hinaus ist zur Förderung der fossilen Energieträger Hilfsenergie aufzubringen. Im Betrachtungszeitpunkt 2050 reduziert sich die Abhängigkeit der Stromerzeugung von fossilen Energieträgern. Darüber hinaus optimiert sich die Masse des Basisfahrzeugs sowie die Aerodynamik der Karosserie.

Die Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs des Fahrbetriebs vom gewählten Vergleichszeitpunkt geht aus Bild 68 hervor. Es ist der Primärenergiebedarf der Antriebskonzepte unter Annahme des technologischen Potentials für die Vergleichszeitpunkte 2020 und 2050 der exogenen und wirtschaftsraumabhängigen Rahmenbedingungen dargestellt:

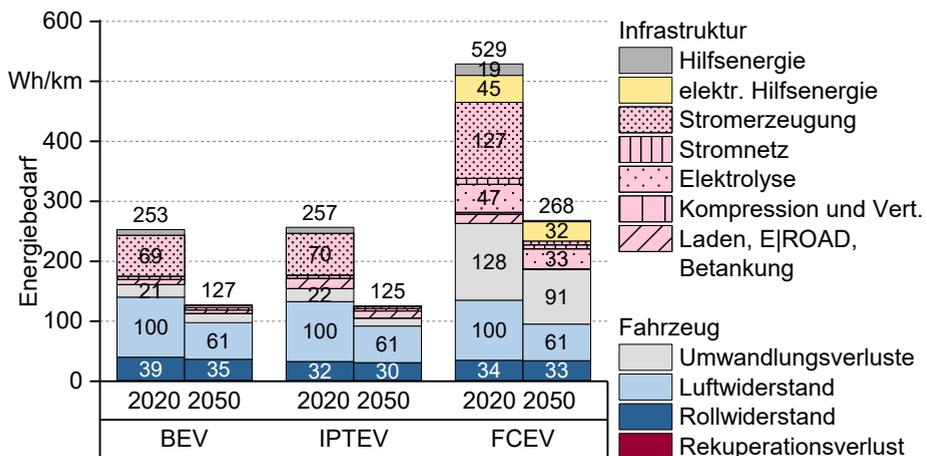


Bild 68: Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs der technologischen Potentiale der Antriebskonzepte zum Vergleichszeitpunkt 2020 und 2050

Aufgrund des verringerten Fahrenergiebedarfs reduzieren sich die absoluten Umwandlungsverluste der Fahrzeug- und Infrastrukturkomponenten. Entscheidenden Einfluss hat die Wahl des Vergleichszeitpunkts auf die Stromerzeugung des Wirtschaftsraums. Der Anteil erneuerbarer Energieträger an der lokalen Stromerzeugung verbessert sich von 52 % auf über

90 %. Ebenso erhöhen sich die Umwandlungswirkungsgrade der verbliebenen fossilen Kraftwerke. Die Entwicklung der exogenen und wirtschaftsraumabhängigen Rahmenbedingungen führen für alternative Antriebskonzepte beinahe zu einer Halbierung des Primärenergiebedarfs des Fahrbetriebs.

5.2 Ökologisch

Die ökologische Analyse der Antriebskonzepte baut auf ermittelten Größen der technologischen Analyse wie Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs und den Massen der Antriebsstrangkomponenten auf. Es kommen die Bewertungskriterien KEA, KRA und GWP zur Anwendung.

5.2.1 Kumulierter Energieaufwand

Der KEA fasst den primärenergetisch bewerteten Aufwand des Fahrbetriebs, der Fahrzeugproduktion sowie wartungs- und verschleißbedingter Maßnahmen zusammen.

Analog zum Fahrbetrieb sind die Energiebedarfe der Produktion für den KEA primärenergetisch zu bewerten. Für Energiebedarfe der Produktion sowie wartungs- und verschleißbedingter Maßnahmen erfolgt die primärenergetische Bewertung anhand der globalen elektrischen Stromerzeugung. Bild 69 zeigt den primärenergetisch bewerteten Energiebedarf der Fahrzeugproduktion der Antriebskonzepte über die Komponenten:

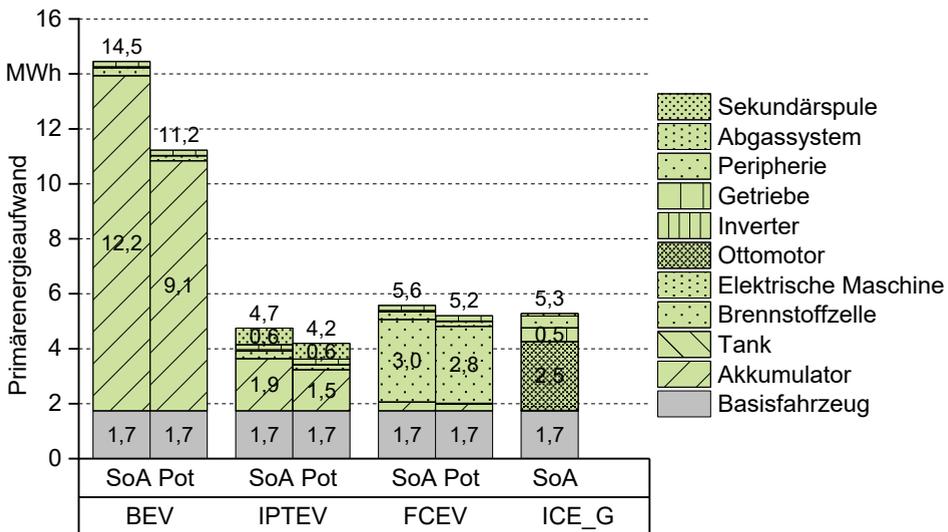


Bild 69: Primärenergiebedarf der Fahrzeugherstellung der Antriebskonzepte

Die Analyse der Primärenergiebedarfe der Fahrzeugproduktion zeigt, dass das BEV die übrigen Antriebskonzepte deutlich übersteigt. Dies ist auf die energieintensiven Prozesse der Akkumulatorproduktion zurückzuführen. In der Zellfertigung führen mehrfache, aufeinander folgende Ofenprozesse zu hohen energetischen Aufwänden. Die Energiebedarfe der übrigen Antriebskonzepte liegen auf vergleichbaren Niveaus.

Aussagekräftige Daten über das technologische Potential der Energiebedarfe der Produktion sind nicht existent. Eine Reduktion der Energiebedarfe ergibt sich daher nur aufgrund der abnehmenden Komponentenmassen der Antriebsstränge, da eine Skalierung der Produktionsenergie mit der Komponentenmasse unterstellt ist. Bild 70 fasst den KEA je Antriebskonzept über den Lebensweg zusammen:

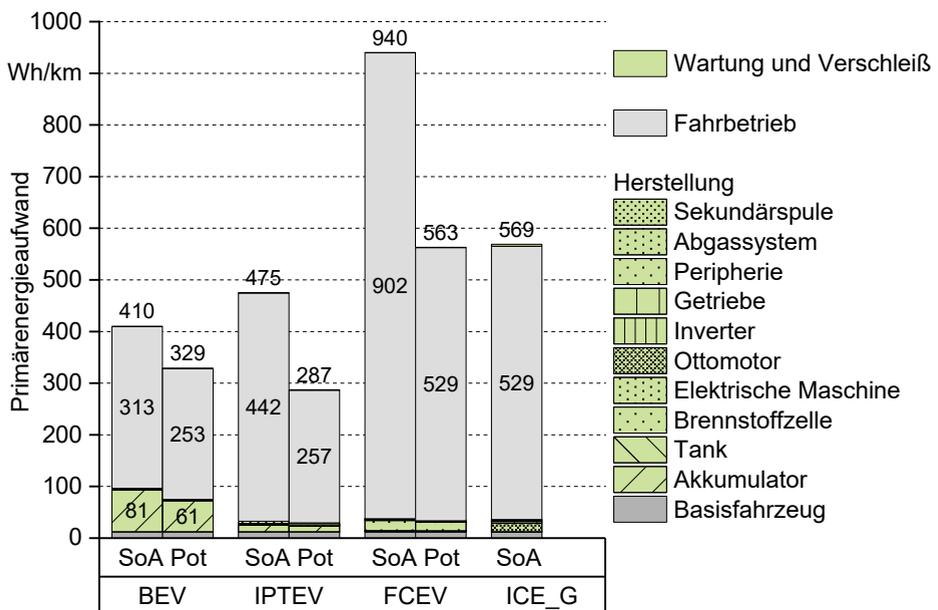


Bild 70: Kumulierter Energieaufwand der Antriebskonzepte

Die Auswertung zeigt, dass der Energieaufwand des Fahrbetriebs den KEA über alle Antriebskonzepte dominiert. Der hohe Energiebedarf der Fahrzeugproduktion des BEV wird durch den geringen Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs gegenüber den anderen Antriebskonzepten vollständig kompensiert.

Die primärenergetische Bewertung der Produktionsenergien reduziert sich mit der fortlaufenden Optimierung der globalen elektrischen Stromproduktion hinsichtlich erneuerbarer Energieträger und Effizienzsteigerungen fossiler Kraftwerke.

5.2.2 Kumulierte Rohstoffdissipation

Der KRA umfasst die Summe für ein Antriebskonzept aufgewendeter Rohstoffe. Es werden sowohl Energierohstoffe als auch Rohstoffe welche in Produktion von Fahrzeug und Infrastruktur sowie wartungs- und verschleißbedingte Maßnahmen eingehen, erfasst. Das Recyclingpotential wird direkt in Abzug gebracht. Durch Gegenüberstellung von Rohstoffaufwand und global verfügbaren Rohstoffressourcen, ist die Kennzahl der kumulierten Rohstoffdissipation ableitbar. Bild 71 zeigt den KRA der Antriebskonzepte:

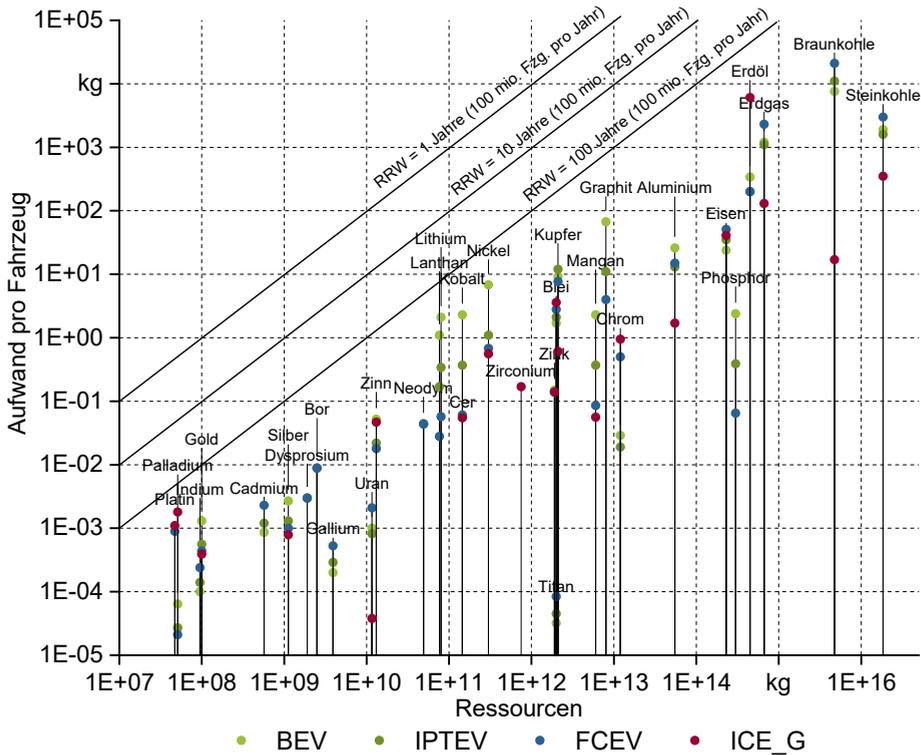


Bild 71: Kumulierter Rohstoffaufwand der Antriebskonzepte

Die Analyse des KEA ergibt, dass der Primärenergieaufwand des Fahrbetriebs gegenüber den anderen Lebenswegphasen dominiert. Für den KRA der Brennstoffe wie Braunkohle, Steinkohle und Erdgas stellt sich daher die gleiche Rangfolge zwischen den alternativen Antriebskonzepten wie beim KEA ein. So weist das FCEV den höchsten Bedarf an Brennstoffen auf. Der KRA von Braunkohle liegt beim FCEV über den Fahrzeuglebensweg bei rund 21 t.

Der Rohstoffaufwand für Produktion von Fahrzeug und Infrastruktur sowie verschleißbedingte Maßnahmen über das Fahrzeugleben zeigt für FCEV sowie ICE_G einen hohen Bedarf an den Edelmetallen Platin und Palladium. Gerade Platin, welches in Abgaskatalysatoren von ICE zum Einsatz kommt, ist nur zu geringen Anteilen zurückgewinnbar, da sich Bestandteile der Katalysatoren über die Laufleistung des Fahrzeuges lösen und mit dem Abgas verloren gehen. Rohstoffe, die in Fahrzeugakkumulatoren Einsatz finden, sind im KRA des BEV aufgrund des großen Akkumulators umfangreich vertreten. Dies sind insbesondere die Metalle Lanthan, Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan. Die Metalle der Kathodenaktivmaterialien sind jedoch zu hohen Anteilen zurückgewinnbar. Der Rohstoffaufwand für die Infrastruktur verteilt sich durch Umlage auf die Gesamtverkehrsleistung der AB. Der Rohstoffaufwand an Kupfer für die Infrastruktur des IPTEV, also für Aufbau der E|ROAD, deren Netzanbindung sowie die Stromerzeugung beläuft sich auf rund 10,2 kg je Fahrzeug, wobei das IPTEV-Antriebskonzept einen KRA an Kupfer von 12 kg aufweist. Der KRA der Antriebskonzepte verringert sich zum technologischen Potential durch die geringeren Primärenergieaufwände des Fahrbetriebs und den damit rückläufigen Brennstoffaufwand. Darüber hinaus führen höhere Energie- und Leistungsdichten der Antriebsstrangkomponenten zu reduzierten Komponentenmassen und damit Rohstoffaufwänden. Auch die Verbesserung der Recyclingpotentiale vermindert den Rohstoffaufwand.

Bild 72 fasst die kritischsten Rohstoffressourcen sowie den KRD je Antriebskonzept zusammen:

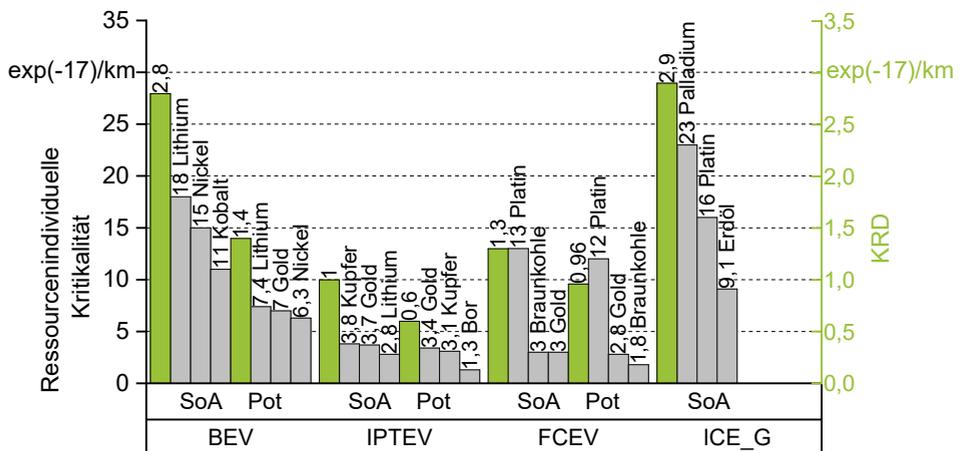


Bild 72: Ressourcenindividuelle Kritikalität und kumulierte Rohstoffdissipation der Antriebskonzepte

Auf die Rohstoffressourcen bezogener Rohstoffaufwand kann je Fahrkilometer angegeben werden und drückt so den Anteil für das Antriebskonzept aufgewendeter Rohstoffe an den global verfügbaren Rohstoffressourcen in der Einheit $\left(\frac{1}{km}\right)^{-17}$ aus. Ressourcenindividuelle Kritikalitäten über alle Rohstoffressourcen gemittelt, ergibt den KRD. Das ICE_G weist aufgrund der Katalysatormaterialien den höchsten KRD auf. Für das BEV ist der KRD durch die Aufwände an den Materialien Nickel und Lithium bestimmt. Der KRD des FCEV ist durch den Platinaufwand dominiert. Über alle Antriebskonzepte hat das IPTEV den geringsten KRD.

5.2.3 Globales Erwärmungspotential

Bild 73 zeigt die Zusammensetzung des GWP der Antriebskonzepte:

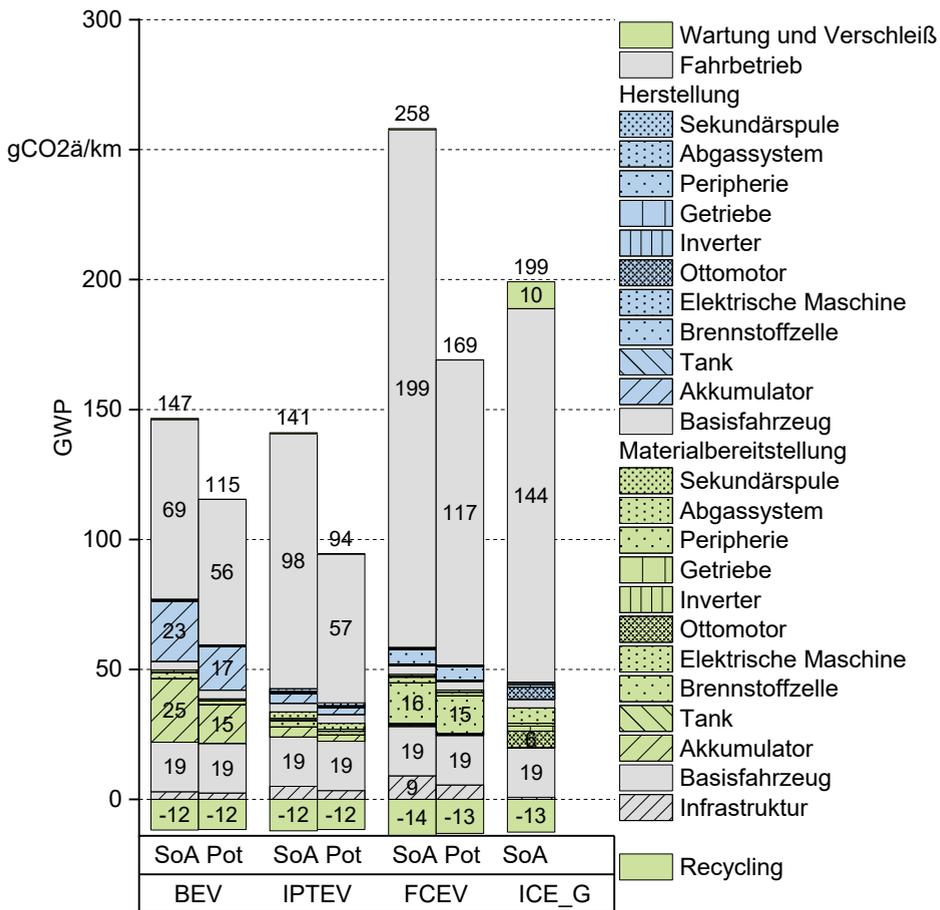


Bild 73: Globales Erwärmungspotential der Antriebskonzepte

Das GWP wird in $\text{gCO}_2\text{ä}$ gemessen und drückt den Strahlungsantrieb der emittierten THG und damit das globale Erwärmungspotential des Antriebskonzepts aus [219].

Das GWP setzt sich aus Emissionen der Materialbereitstellung, der Herstellung, des Fahrbetriebs sowie wartungs- und verschleißbedingter Maßnahmen zusammen. Die Bereitstellung der Materialien der Infrastruktur hat über alle Antriebskonzepte untergeordneten Einfluss.

Das GWP der Materialbereitstellung und Fahrzeugproduktion von BEV und FCEV übersteigt deutlich das von ICE_G. Das BEV weist die geringsten Emissionen im Betrieb auf, während das FCEV aufgrund des hohen Primärenergieaufwands die höchsten Betriebsemissionen erzeugt.

Das GWP fällt zu abweichenden Zeitpunkten über den Fahrzeuglebensweg an. Die Analyse der Emissionen der Betriebsphase über die Laufleistung ermöglicht, Break-Even Punkte des GWP zwischen den Antriebskonzepten zu identifizieren. Diese kennzeichnet, dass höhere GWP in der Produktion durch geringere Emissionen im Fahrbetrieb zu einer bestimmten Laufleistung kompensiert werden. Bild 74 veranschaulicht das GWP der Antriebskonzepte über die Fahrleistung:

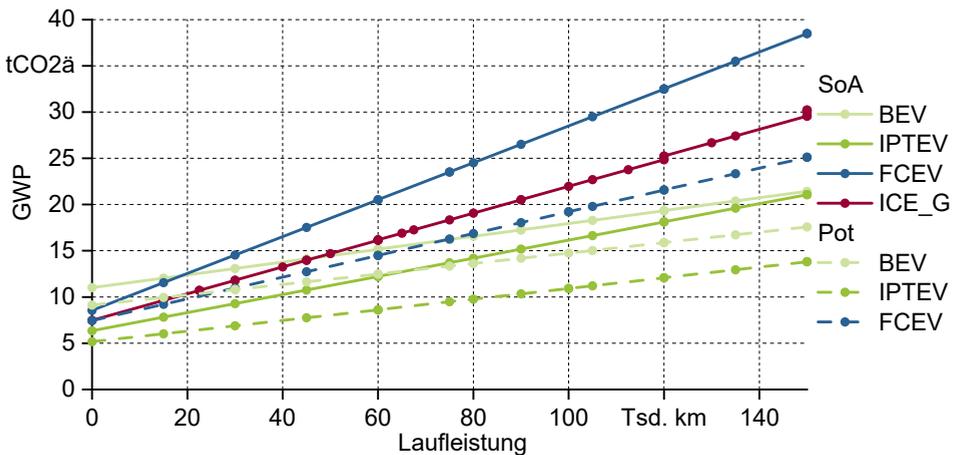


Bild 74: Globales Erwärmungspotential der Antriebskonzepte des Lösungsraums über die Fahrleistung

Das GWP des Fahrbetriebes bedingt die Geradensteigungen, während Wartungs- und Verschleißmaßnahmen zu festgelegten Laufleistungen einen sprunghaften Verlauf hervorrufen.

Das BEV unterschreitet das GWP des ICE_G bereits ab einer Laufleistung von unter 50 Tsd. km. Aufgrund des geringeren Primärenergiebedarfs des

Fahrbetriebs nähert sich das GWP des BEV auch dem des IPTEV an, schneidet dieses jedoch nicht innerhalb der Laufleistung. Im technologischen Potential unterschreitet das GWP des FCEV auch das des ICE_G.

5.3 Ökonomisch

Die ökonomische Analyse umfasst die Anschaffungskosten des Fahrzeuges, die Infrastruktur- und Energiekosten sowie die Lebenszykluskosten.

5.3.1 Kostenstruktur der Fahrzeugproduktion

Über die Analyse der Kostenstruktur der Fahrzeugproduktion wird aus den Komponentenkosten des Antriebsstrangs auf den Fahrzeuganschaffungspreis geschlossen. Bild 75 fasst die Kostenstruktur der Fahrzeugproduktion der Antriebskonzepte zusammen:

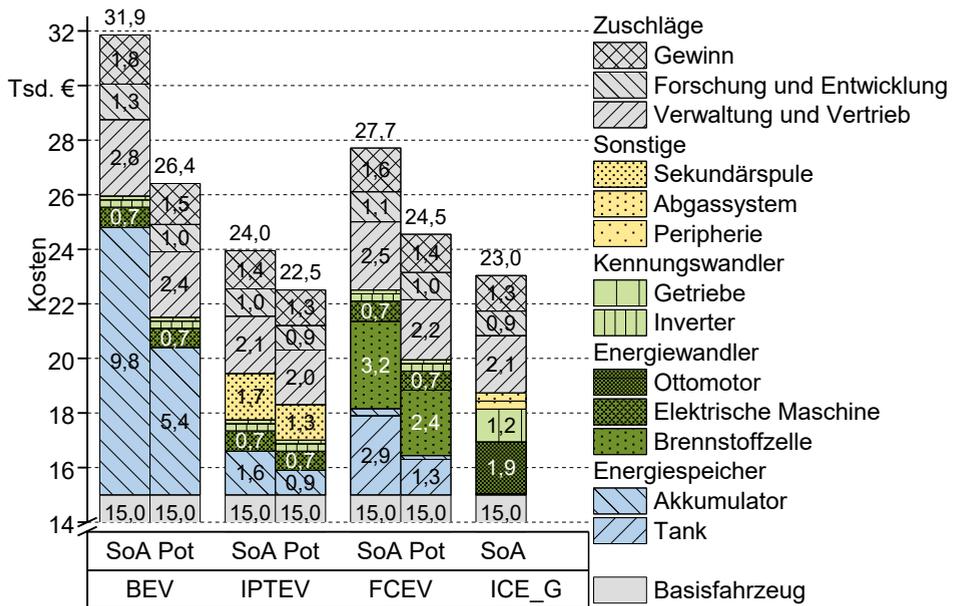


Bild 75: Anschaffungskosten der Antriebskonzepte

Das BEV verursacht die höchsten Anschaffungskosten, wobei die Kosten des Antriebsstrangs durch den Akkumulator bestimmt sind. Das IPTEV ist aufgrund des gering dimensionierten Akkumulators deutlich günstiger. Kostenintensive Komponenten des FCEV sind das Tank- sowie das Brennstoffzellensystem. Für die Komponenten alternativer Antriebskonzepte ergeben sich zum technologischen Potential hin reduzierte Komponentenkosten.

5.3.2 Infrastruktur- und Energiekosten

Die Antriebskonzepte bedingen den Aufbau spezifischer Infrastruktureinrichtungen zur Energiebereitstellung. Deren Kosten bestimmen den ökonomischen Aufwand der Bereitstellung der Fahrenergie. Die Infrastrukturkosten gehen über die Energiekosten in die Betriebskosten des Fahrzeuges ein. Das Vorgehen zur Dimensionierung der Infrastrukturkomponenten sowie zur Umlage dieser Aufwendungen auf die Fahrzeugflotte ist in Kapitel 4.1.4 dargestellt. Bild 76 stellt die jährlichen Selbstkosten der Infrastruktur sowie die sich ergebenden Energiekosten der Antriebskonzepte dar:

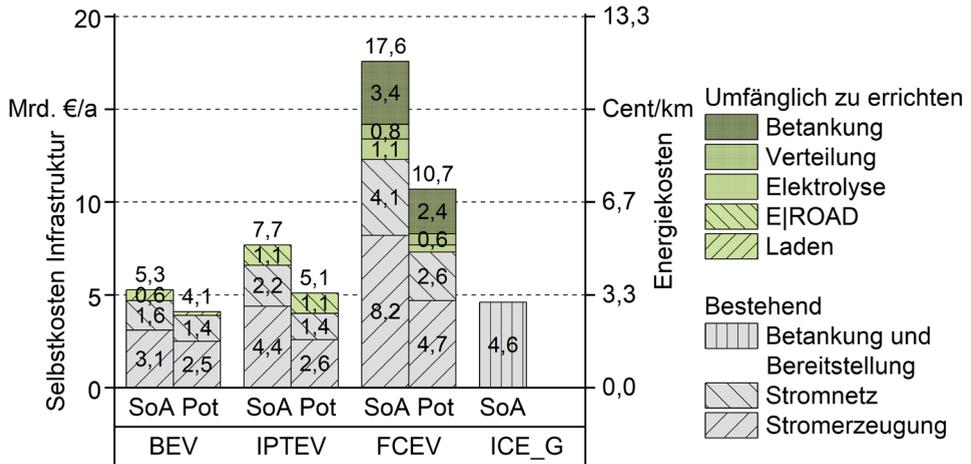


Bild 76: Infrastruktur- und Energiekosten der Antriebskonzepte

Infrastrukturkosten alternativer Antriebskonzepte sind vor allem durch die vorhandene Infrastruktur der Stromerzeugung und des Energienetzes bestimmt. Die Höhe des ökonomischen Aufwands für bestehende Infrastruktur ist durch die Fahrenergiebedarfe festgelegt. Zu errichtende Infrastruktur verursacht bei FCEV mit Elektrolyseuren, Pipelinenetzen und Tankstellen höhere Kosten als bei BEV.

Verringerte Fahrenergiebedarfe, höhere Wirkungsgrade sowie rückläufige energie- und leistungsspezifische Kosten der Infrastrukturkomponenten vermindern die Infrastruktur- und Energiekosten der Antriebskonzepte im technologischen Potential.

Durch Infrastrukturdimensionierung und -umlage ermittelte Selbstkosten der Infrastruktur sind in Bild 77 den Energiepreisen des inländischen Wirtschaftsraums für Endkunden gegenübergestellt. Die Selbstkosten der Infrastruktur sind auf Energiemengen bezogen:

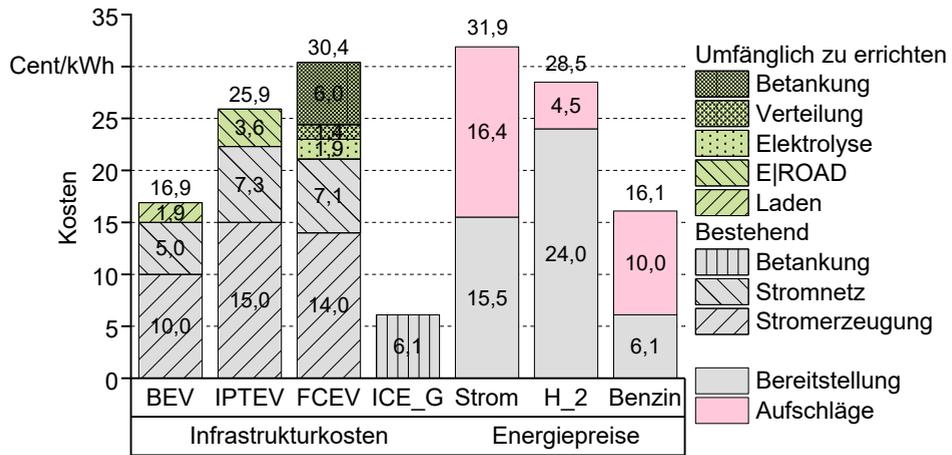


Bild 77: Selbstkosten der Infrastruktur gegenüber Energiepreisen des Wirtschaftsraums, Daten Energiepreise [55, 318, 322]

Ausgangspunkt der betrachteten alternativen Antriebskonzepte ist elektrische Energie. Je nach Antriebskonzept unterliegt die Energiebereitstellung durch die Infrastruktur abweichenden Umwandlungswirkungsgraden, weshalb sich bezogen auf die Energiemenge auch für bestehende Infrastruktur abweichende Selbstkosten ergeben.

Beim BEV fallen infrastrukturseitig geringe Umwandlungswirkungsgrade für Netztransport und Ladevorgang an, weshalb die Selbstkosten von Stromerzeugung und Stromnetz weitestgehend den abgaben-, steuer- und umlagenbereinigten Strompreisen des Wirtschaftsraums entsprechen.

Für das FCEV zeigt sich, dass ein Nettoverkaufspreis von 24 Cent/kWh keinen kostendeckenden Betrieb einer großskaligen Wasserstoffwirtschaft ermöglicht, da die Selbstkosten im Elektrolyseverfahren hergestellten Wasserstoffs auch nach [323] bereits über 21 ct/kWh betragen, wobei die Verteilung an dezentrale Tankstellen und der Aufbau der Tankstelleninfrastruktur selbst noch unberücksichtigt sind.

Als Energiekosten werden in den nachfolgenden Ausführungen die Selbstkosten der Infrastruktur herangezogen. Steuern, Abgaben und Umlagen finden dabei keine Berücksichtigung.

5.3.3 Lebenszykluskosten

Lebenszykluskosten fassen alle mit dem Besitz des Fahrzeuges in Verbindung stehenden Kostenbestandteile zusammen. Neben den dargestellten Anschaffungs- und Energiekosten sind dies wartungs- und verschleißbedingte Kosten über den Lebensweg, welche Bild 78 darstellt:

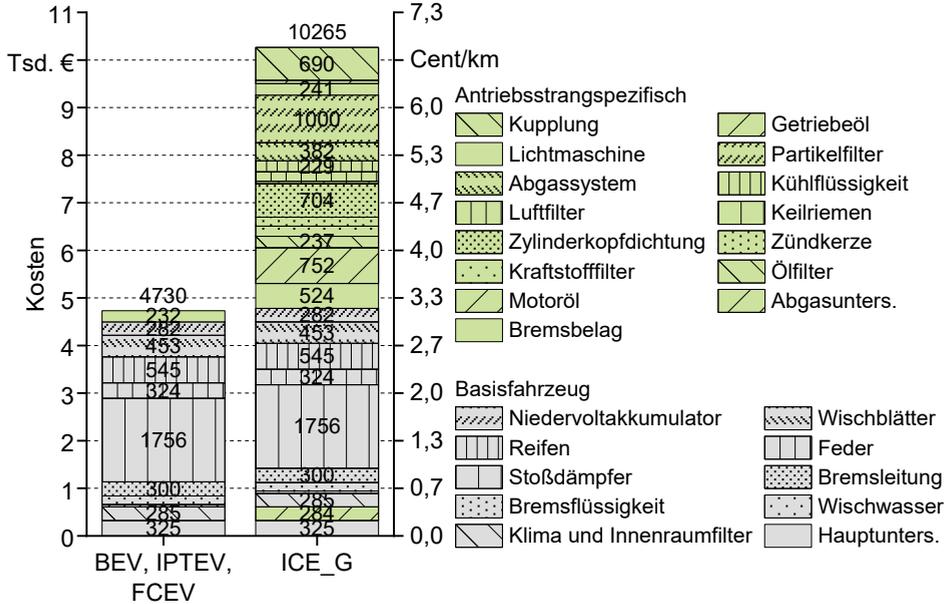


Bild 78: Wartungs- und Verschleißkosten der Antriebskonzepte

Innerhalb der Fahrleistung von 150 Tsd. km fallen keine wartungs- und verschleißbedingten Maßnahmen für die Antriebskomponenten alternativer Antriebskonzepte an. Jedoch sind über das Basisfahrzeug auch alternativen Antriebskonzepten Kosten für Inspektions-, Wartungs- und Verschleißmaßnahmen zugeordnet. Das ICE_G bedingt darüber hinaus Kosten für regelmäßige Abgasuntersuchung, durch größeren Bremsbelagverschleiß sowie zahlreiche Kostenkomponenten, die Ottomotor, Schaltgetriebe und Abgassystem zuzuschreiben sind. Die Gesamtkosten der Wartungs- und Verschleißmaßnahmen alternativer Antriebskonzepte sind gegenüber ICE_G über die Fahrleistung von 150 Tsd. km in etwa halbiert.

Die Lebenszykluskosten der Antriebskonzepte fasst Bild 79 zusammen. In Übereinstimmung mit den Prämissen gehen Abgaben, Steuern und Umlagen nicht in die Betrachtung ein.

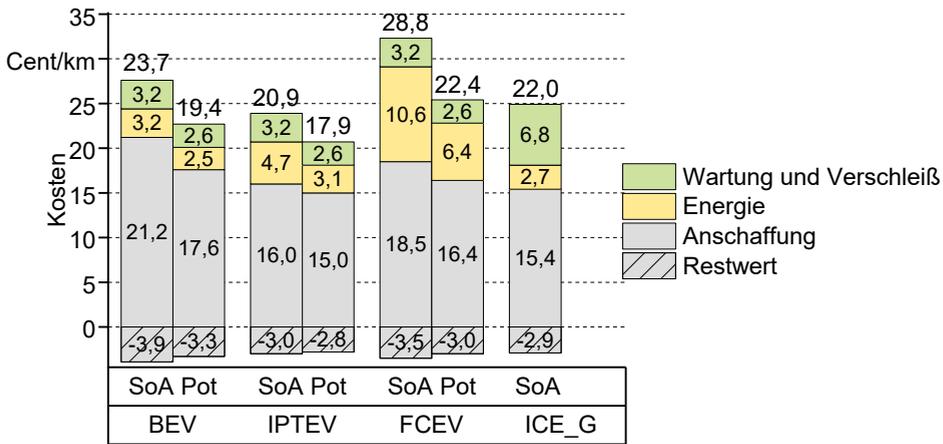


Bild 79: Lebenszykluskosten der Antriebskonzepte

Das BEV ist das Antriebskonzept mit den höchsten Fahrzeuganschaffungskosten. Infrastruktur- bzw. Energiekosten des BEV liegen etwas über denen des ICE_G. Kosten für wartungs- und verschleißbedingte Maßnahmen liegen bei alternativen Antriebskonzepten für die Fahrleistung von 150 Tsd. km deutlich unter den Kosten verbrennungskraftmotorisch betriebener Antriebskonzepte. Aufgrund des hohen Fahrenergiebedarfs und der kostenintensiven Infrastruktur verursacht das FCEV die höchsten Lebenszykluskosten. Im technologischen Potential unterschreiten die Lebenszykluskosten des BEV die des ICE_G. Bild 80 zeigt die Verteilung der Lebenszykluskosten über den Fahrzeuglebensweg:

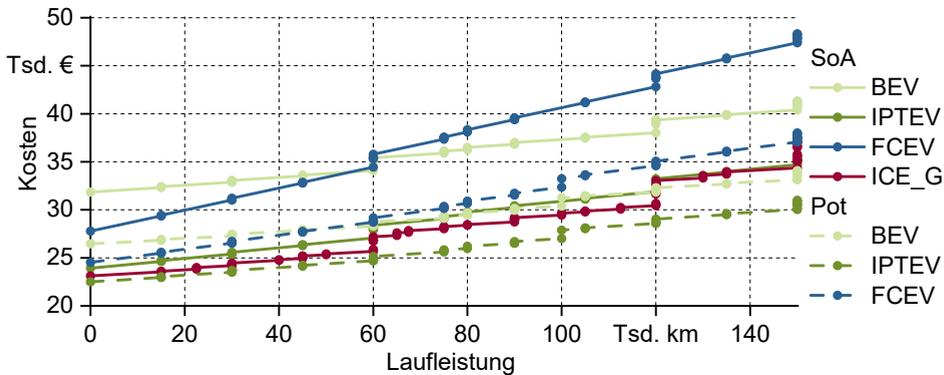


Bild 80: Lebenszykluskosten der Antriebskonzepte über Laufleistung

Da die Verhältnisse von einmaligen zu laufenden Kosten über die Antriebskonzepte abweichen, lassen sich zwischen diesen Break-Even-Punkte identifizieren. Diese markieren Laufleistungen, bei welchen sich die Kostenverläufe der Antriebskonzepte schneiden und sich damit die Rangfolge der

Technologieattraktivität ändert. Die Lebenszykluskosten über die Laufleistung haben aufgrund wartungs- und verschleißbedingter Maßnahmen einen sprungfixen Verlauf. Wartungs- und Verschleißkosten von BEV, IPTEV und FCEV sind für die ersten 150.000 km ausschließlich durch das Basisfahrzeug bestimmt und gleichen sich daher. Abweichende Verläufe für die alternativen Antriebskonzepte ergeben sich durch die abweichenden Fahrzeuganschaffungskosten und die Geradensteigungen, welche durch die Energiekosten bestimmt ist.

Es zeigt sich, dass die Lebenszykluskosten des FCEV trotz geringerer Anschaffungskosten die des BEV innerhalb der ersten 60 Tsd. Fahrkilometer übersteigen. Die Lebenszykluskosten des ICE_G übertreffen bei 120 Tsd. km die des IPTEV aufgrund der antriebsstrangspezifischen wartungs- und verschleißbedingten Maßnahmen.

5.4 Multidimensionaler Antriebskonzeptvergleich

Ergebnis der Bewertungsmethodik ist der multidimensionale Vergleich der Antriebskonzepte über das definierte Kennzahlensystem. Bild 81 fasst die Bewertungsergebnisse für den Stand der Technik in einem Profildiagramm zusammen.

5.4.1 Stand der Technik

Da alle Antriebskonzepte auf die Nennleistung des Basisfahrzeuges ausgelegt sind, unterscheidet sich die gravimetrische Leistungsdichte der alternativen Antriebskonzepte nur durch die Masse der Antriebsstrangkomponenten. Aufgrund des Akkumulators hat BEV eine ungünstigere Leistungsdichte als IPTEV und FCEV.

Wegen der geringen Umwandlungsverluste batterieelektrischer Antriebsstränge haben BEV und IPTEV den günstigsten TtW-Energiebedarf, wobei der des BEV durch den höheren Rollwiderstand aufgrund der Fahrzeugmasse um 8 Wh/km den des IPTEV übersteigt. Das ICE_G hat mit 449 Wh/km den höchsten TtW-Energiebedarf.

In den WtW-Energiebedarf gehen zusätzlich die infrastrukturseitigen Umwandlungsverluste ein. Das IPTEV hat im Vergleich zum BEV durch die induktive Energieübertragung zusätzliche Verlustleistung und damit einen höheren WtW-Energiebedarf. Die Umwandlungsverluste durch Wasserstoffelektrolyse sowie die fahrzeugseitige Brennstoffzelle bedingen beim

FCEV den hohen Fahrenergiebedarf von 903 Wh/km. Gegenüber den alternativen Antriebskonzepten fallen bei ICE_G infrastrukturseitig nur geringe Umwandlungsverluste an.

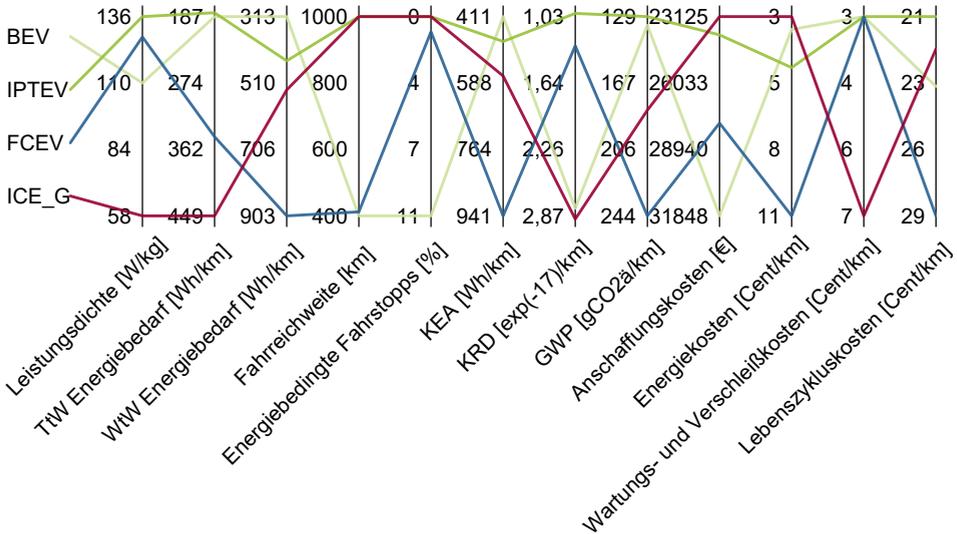


Bild 81: Profildigramm des Kennzahlensystems für den Stand der Technik in 2020

Durch die E|ROAD wird das IPTEV laufend mit Energie versorgt und weist daher die bestmögliche Fahrreichweite und keine energiebedingten Fahrstopps auf. Auch die Fahrreichweite des ICE_G übersteigt die Referenzfahrstrecke von 1.000 km. Beim BEV ist bereits nach 400 km ein Ladestopp erforderlich. Für die Reisestrecke von 1.000 km nehmen Ladestops 10,5 % der Reisezeit ein. Die Reichweite des FCEV liegt für Langstreckenfahrt bei 412 km.

In den KEA geht neben dem Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs der Primärenergiebedarf der Fahrzeugproduktion sowie wartungs- und verschleißbedingter Maßnahmen ein. Der Fahrbetrieb ist der dominierende Einfluss auf den KEA, weshalb die Rangfolge der Antriebskonzepte der des WtW-Energiebedarfs entspricht.

Der KRd entspricht dem Quotienten aus Rohstoffbedarf eines Antriebskonzepts je Fahrkilometer unter Berücksichtigung der Rückgewinnungspotentiale durch Recycling und global verfügbaren Rohstoffressourcen. ICE_G hat den höchsten KRd, es folgen BEV, FCEV und IPTEV. Kritische Rohstoffe bei BEV sind die Kathodenaktivmaterialien des Akkumulators, die in abweichenden Mengen in allen alternativen Antriebssträngen benö-

tigt werden. Beim ICE_G ist der KRA durch die knappen Katalysatormaterialien für das Abgassystem bestimmt. Außerdem ist Rohöl als knappe Energieressource auffällig.

Weitere Kennzahl der ökologischen Dimension ist das GWP. Dieses schließt die Emissionen der Materialgewinnung, der Fahrzeugherstellung, des Fahrzeugbetriebs sowie die begünstigende Wirkung der Materialrückgewinnung im Rahmen des Recyclings ein. Mit 129 gCO₂ä/km hat das IPTEV das geringste GWP. Aufgrund des hohen Fahrenergiebedarfs hat das FCEV mit 244 gCO₂ä/km den größten Erwärmungseffekt auf das Klima.

Kennzahl der ökonomischen Bewertungsdimension sind die Fahrzeuganschaffungskosten. Das ICE_G hat zum Stand der Technik mit 23.125 € die geringsten Anschaffungskosten, während das BEV aufgrund der hohen Kosten des Fahrzeugakkumulators Anschaffungskosten von 31.848 € aufweist.

Die Energiekosten geben die ökonomischen Aufwände der antriebskonzeptspezifischen Infrastruktur wieder. Abgaben, Steuern und Umlagen gehen nicht in die Energiekosten ein. BEV und ICE_G verursachen mit 3,2 bzw. 2,7 Cent/km vergleichbare Energiekosten, während das IPTEV aufgrund der kostenintensiven E|ROAD mit 4,7 Cent/km höhere Energiekosten aufweist. Die Infrastruktur des FCEV bedingt mit 10,5 Cent/km den höchsten ökonomischen Aufwand.

Kosten für wartungs- und verschleißbedingte Maßnahmen liegen für die alternativen Antriebskonzepte bei 3,2 Cent/km. Antriebsstrangspezifische Komponenten bedingen über die betrachtete Laufleistung keine Maßnahmen. Beim ICE_G fallen 6,8 Cent/km an wartungs- und verschleißbedingten Kosten an.

Die beschriebenen ökonomischen Kennzahlen werden durch die Lebenszykluskosten des Fahrzeuges zusammengefasst: Mit 20,8 Cent/km liegen die Lebenszykluskosten des IPTEV am günstigsten. Das ICE_G unterschreitet mit 22,1 Cent/km knapp die Lebenszykluskosten des BEV von 23,6 Cent/km. Aufgrund der hohen Energiekosten ergeben sich für das FCEV mit 28,8 Cent/km die ungünstigsten Lebenszykluskosten.

5.4.2 Technologisches Potential

Die Kennzahlen der Antriebskonzepte verbessern sich zum einen durch autonome Weiterentwicklung der Technologien, zum anderen durch die Veränderung des Umfeldszenarios. So ergeben sich für den Wirtschaftsraum Deutschland, aber auch global, innerhalb der nächsten Jahrzehnte

wesentliche Veränderungen der Stromerzeugung, welche die primärenergetische Bewertung elektrischer Energie begünstigen. Auch für das antriebskonzeptunabhängige Basisfahrzeug sind Veränderungen hinsichtlich Masse, Nennleistung oder Luftwiderstandsbeiwert anzunehmen. Bild 82 fasst die Kennzahlenausprägungen der Antriebskonzepte für deren technologisches Potential und das Umfeldszenario von 2030 zusammen:

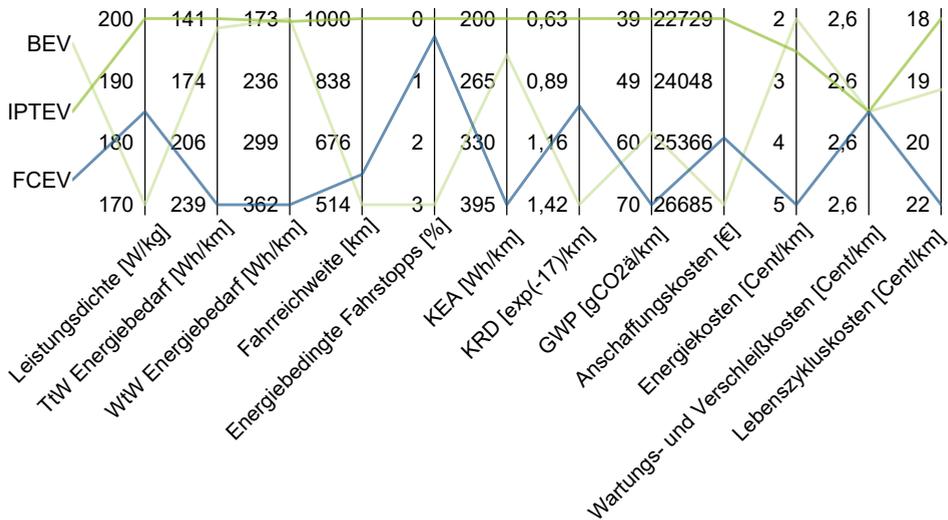


Bild 82: Profildiagramm des Kennzahlensystems für das technologische Potential in 2030

Gegenüber dem Stand der Technik ergeben sich für das technologische Potential im Umfeldszenario von 2030 wesentliche Verbesserungen der Kennzahlenausprägungen: Reduzierter Roll- und Luftwiderstand durch verbesserte Aerodynamik und verringerte Fahrzeugmasse sowie reduzierte Umwandlungsverluste der Antriebsstrangkomponenten führen für das BEV zu einer Optimierung des TtW-Energiebedarfs um 22 %. Der WtW-Energiebedarf aller Antriebskonzepte verbessert sich insbesondere durch den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung des Wirtschaftsraums. Durch den reduzierten Fahrenergiebedarf können bei gleichbleibenden Energiespeicherkapazitäten deutliche Reichweitenverbesserungen erzielt werden. Durch gesteigerte Fahrreichweiten und Lade- bzw. Betankungsleistungen verringern sich die energiebedingten Fahrstopps für die Referenzfahrstrecke von 1.000 km. Beim BEV sind noch 3,1 % der Reisezeit für Ladestopps erforderlich.

Der KEA verbessert sich aufgrund des reduzierten Primärenergiebedarfs des Fahrbetriebs sowie verringerter Energiebedarfe der Fahrzeugproduk-

tion durch die höheren Leistungs- und Energiedichten der Fahrzeugkomponenten. Auch die primärenergetische Bewertung der Produktionsenergie verbessert sich durch die Entwicklung der globalen elektrischen Stromerzeugung.

Der KRД ist über den Bedarf an Energieressourcen mit dem KEA verknüpft. Für alternative Antriebskonzepte vermindert sich daher der Brennstoffeinsatz über den Lebensweg. Relevanz haben auch verbesserte Recyclingeffizienzen der Materialien über die Antriebsstrangkomponenten hinweg. Begünstigend ist darüber hinaus, dass durch verringerten Energiebedarf der Fahrzeugflotte und erhöhte Umwandlungswirkungsgrade und Lade- bzw. Betankungsleistungen der Infrastrukturkomponenten weniger Infrastrukturhardware zur Erfüllung des Leistungsbedarfs der Fahrzeugflotte erforderlich ist. Der Materialeinsatz für die Infrastrukturkomponenten reduziert sich.

Mit reduziertem Primärenergiebedarf des Fahrbetriebs und der Optimierung der lokalen elektrischen Stromerzeugung, gewinnen Fahrzeug- und Infrastrukturherstellung an Relevanz für das GWP. Das FCEV verbleibt mit 70 gCO₂/km aufgrund des hohen Fahrenergiebedarfs das alternative Antriebskonzept mit der höchsten Klimawirkung.

Die Rangfolge der Fahrzeuganschaffungskosten alternativer Antriebskonzepte verändert sich zum technologischen Potential hin nicht. Der Akkumulator des BEV bleibt entscheidender Kostentreiber.

Die verringerten Fahrenergiebedarfe führen zu reduziertem Energiebedarf der Fahrzeugflotte. Es ist daher in geringerem Umfang Infrastruktur zur Bereitstellung der Sekundärenergie für den Fahrbetrieb erforderlich. Die deutlichste Optimierung der Infrastruktur- bzw. Energiekosten ergibt sich für das FCEV durch die Verringerung der Kosten von Elektrolyseuren und Wasserstofftankstellen.

Die Lebenszykluskosten der alternativen Antriebskonzepte entsprechen der Rangfolge für den Stand der Technik. Deutliche Verbesserung erfährt das FCEV aufgrund der reduzierten Energiebedarfe und damit Energiekosten.

6 Sensitivitätsanalyse ausgewählter Rahmenbedingungen

Die Sensitivitätsanalyse ist ein Werkzeug zur Untersuchung der Stabilität der Bewertungsergebnisse bei Variation der Rahmenbedingungen. So kann der Einfluss einzelner Rahmenbedingungen auf das Kennzahlensystem abgebildet werden. [215]

Bei der Variation von Rahmenbedingungen ist sicherzustellen, dass eine konsistente Modellierung vorliegt. Beispielsweise kann eine deutliche Erhöhung der Kapazität des Akkumulators zu einer höheren Fahrzeugmasse und diese wiederum zu einem Fahrleistungsbedarf führen, welchen die angenommene elektrische Maschine nicht leisten kann.

In den folgenden Abschnitten werden Sensitivitätsanalysen zu den technologischen Annahmen des Akkumulators und zur Anwendung der Antriebskonzepte für Lastkraftfahrzeuge durchgeführt.

6.1 Entwicklung der Akkumulortechnologie

Bild 83 zeigt die rasanten Veränderungen im Bereich der Akkumulortechnologie für Traktionsanwendungen:

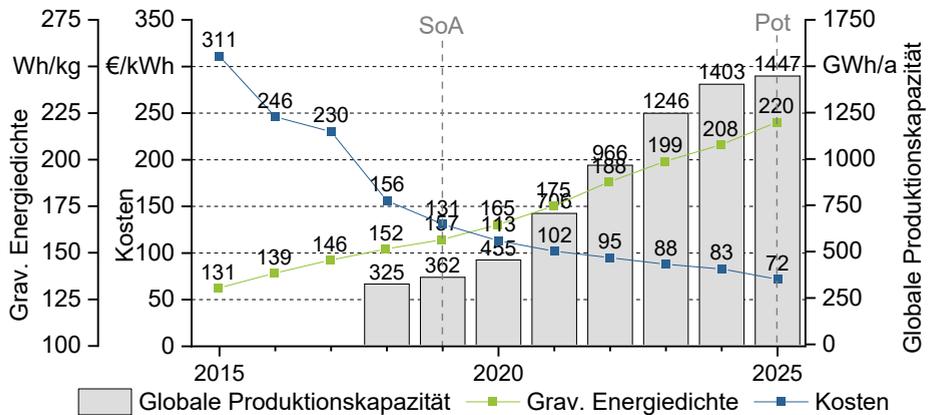


Bild 83: Kosten, gravimetrische Energiedichte und globale Produktionskapazitäten von Akkumulatoren mit LIZ [113, 116, 132, 324]

Während die gravimetrische Energiedichte auf Komponentenebene des Akkumulators einer kontinuierlichen Verbesserung unterliegt, zeigen die

historischen und prognostizierten Kosten einen fallenden Trend. Von Herstellern angekündigte Produktionskapazitäten stellen eine Verdreifachung der globalen Kapazität von 2020 bis 2025 dar.

Die hohe Dynamik erschwert präzise Vorhersagen über die Leistungsfähigkeit der Akkumulatorentechnologie. Entscheidende technologische, ökologische und ökonomische Einflussgrößen des Akkumulators sind dessen gravimetrische Energiedichte, Zyklenfestigkeit, Energie- und Materialbedarf der Produktion, Recyclingraten sowie Herstellungskosten.

Das BEV weist mit 75 kWh den größten Akkumulator der Antriebskonzepte auf. Für sämtliche Sensitivitätsanalysen der Rahmenbedingungen des Akkumulators über die Antriebskonzepte gilt daher, dass die Korrelation zwischen einer beeinflussten Kennzahlausprägung und den variierten Eingangsgrößen beim BEV am stärksten und für IPTEV und FCEV schwächer ausgeprägt ist. Bei konventionellen Antriebskonzepten ohne Traktionsakkumulator liegt keine Korrelation zu den Rahmenbedingungen des Akkumulators vor.

Ökologische und ökonomische Kennzahlen mit Bezug zum Lebensweg des Antriebskonzepts unterscheiden sich darüber hinaus hinsichtlich des Anteils, welchen der Fahrbetrieb am Lebensweg ausmacht. Während bei ökologischen Kennzahlen für die Rahmenbedingungen des Vergleichsgerüsts der Fahrbetrieb in der Regel im Stand der Technik mehr als die Hälfte der Auswirkung über den Lebensweg bedingt, ist es bei den Lebenszykluskosten weniger als die Hälfte.

Die gravimetrische Energiedichte des Akkumulators unterliegt dem in Bild 83 ablesbaren Trend. Eine Optimierung der Energiedichte kann für eine höhere Speicherkapazität bei gleichbleibender Masse oder für eine Verringerung der Antriebsstrangmasse bei gleichbleibender Speicherkapazität genutzt werden. Die Optimierung der Energiedichte spielt insbesondere für die Anwendung des BEV-Antriebsstrangs in Nutzfahrzeugen eine wichtige Rolle.

Lebenswegbezogene Bewertungskriterien haben über die Laufleistung aufgrund von Wartungs- und Verschleißmaßnahmen sprungfixe Verläufe. Durch den gegenüber anderen Antriebsstrangkomponenten hohen ökonomischen und ökologischen Aufwand der Produktion des Akkumulators hat dessen Verschleißfestigkeit entscheidenden Einfluss auf die Antriebskonzeptbewertung.

Bild 84 fasst Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte in Abhängigkeit von Fahrzeuglaufleistung und Verschleißfestigkeit des Akkumulators zusammen:

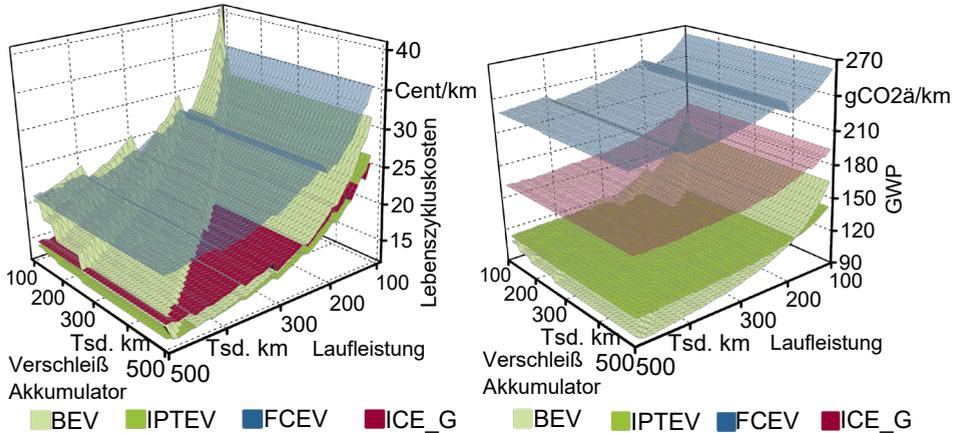


Bild 84: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte in Abhängigkeit der Fahrzeuglaufleistung und des Akkumulatorverschleißes

Lebenszykluskosten und GWP fallen mit zunehmender Laufleistung des Basisfahrzeugs ab, da sich der einmalige Produktionsaufwand auf eine längere Gesamtfahrleistung verteilt. Jedoch ergeben sich durch längere Laufleistungen sprungfixe Zunahmen, da zusätzliche Wartungs- und Verschleißmaßnahmen zu diskreten Laufleistungen Teil der Lebenswegbetrachtung werden. Mit zunehmender Laufleistung flacht die Höhe dieser Ausschläge ab. Mit abnehmender Verschleißfestigkeit des Akkumulators ergeben sich ebenso sprungfixe Zunahmen. Diese sind anhand der Lebenszykluskosten des BEV am deutlichsten zu erkennen. Der erste verschleißbedingte Akkumulatorwechsel ist erforderlich, wenn die Laufleistung des Basisfahrzeugs gerade die Verschleißfestigkeit des Akkumulators übersteigt.

Die minimalen Lebenszykluskosten ergeben sich für das BEV bei maximaler Laufleistung von 500 Tsd. Fahrkilometern unter der Annahme, dass kein verschleißbedingter Akkumulatorwechsel erforderlich ist. Für diesen Fall unterschreitet das BEV die Lebenszykluskosten des ICE_G und des IPTEV. Ab einer Fahrleistung von 450 Tsd. km unterschreiten die Lebenszykluskosten des BEV die des IPTEV auch für die Annahme eines verschleißbedingten Akkumulatorwechsels. Für die minimale analysierte Laufleistung von 100 Tsd. Fahrkilometern in Kombination mit einem verschleißbedingten Akkumulatorwechsel überschreiten die Lebenszykluskosten des BEV die des FCEV.

Für das GWP ergeben sich für BEV und IPTEV geringere Umweltauswirkungen als für ICE_G und FCEV. Der Bereich innerhalb dessen die Klimawirkung des BEV die des IPTEV unterschreitet, ist deutlich ausgeprägter als im Rahmen der ökonomischen Analyse.

Auch die Produktion des Akkumulators hat Einfluss auf die Rangfolge der Technologien im Kennzahlensystem. So machen reduzierte Kosten der Produktion des Akkumulators BEV gegenüber FCEV und IPTEV ökonomisch attraktiver.

Aus ökologischer Perspektive begünstigt ein reduzierter Energiebedarf der LIZ-Produktion KEA, KRA und GWP alternativer Antriebskonzepte. Auch beeinflussen abweichende Kathodenaktivmaterialien oder Recyclingeffizienzen KRA und GWP. Bild 85 zeigt das GWP der Antriebskonzepte für abweichende Energiebedarfe der Zellproduktion sowie die Abhängigkeit der Lebenszykluskosten von den Produktionskosten des Akkumulators.

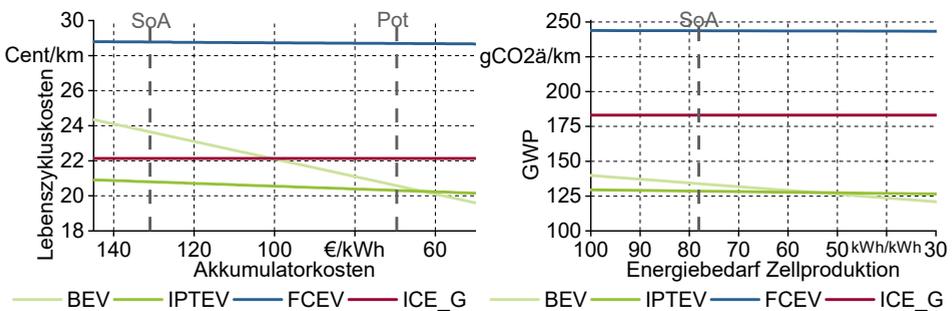


Bild 85: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte in Abhängigkeit der Akkumulatorkosten und des Energiebedarfs der Zellproduktion

Für Produktionskosten des Akkumulators unter 60 €/kWh ergeben sich für das BEV günstigere Lebenszykluskosten als für IPTEV. Das GWP des BEV liegt für den Energiebedarf der Zellproduktion von 78 kWh/kWh zum Stand der Technik noch über dem des IPTEV.

6.2 Alternative Antriebskonzepte für Nutzfahrzeuge

Im Bereich der Langstreckenmobilität schwerer Lastkraftwagen ist der ICE_D die vorherrschende Antriebstechnologie. Die Anwendung des BEV-Antriebskonzepts für schwere Lastkraftwagen ist aus nachfolgenden Gründen herausfordernd:

- Die Masse des Akkumulators bedingt eine Verringerung der maximalen Nutzlast des Zugfahrzeugs.

- Die hohen Laufleistungen im Nutzlastverkehr bedürfen einer hohen Zyklenfestigkeit des Akkumulators.
- Die Reichweite von ICE_D ist mit BEV nicht erreichbar, wodurch in größerem Maße energiebedingte Fahrstopps erforderlich sind.

Zur Abbildung der abweichenden Nutzlasten je Antriebskonzept sind nachfolgende Kennzahlen auf die funktionelle Einheit Tonnenkilometer bezogen.

Die Antriebsstrangmassen beeinflussen die maximale Nutzlast. Schlüsselgröße für die Eignung des BEV für schwere Lastkraftwagen ist daher die Energiedichte des Akkumulators. Bild 86 stellt Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit der Energiedichte des Akkumulators dar:

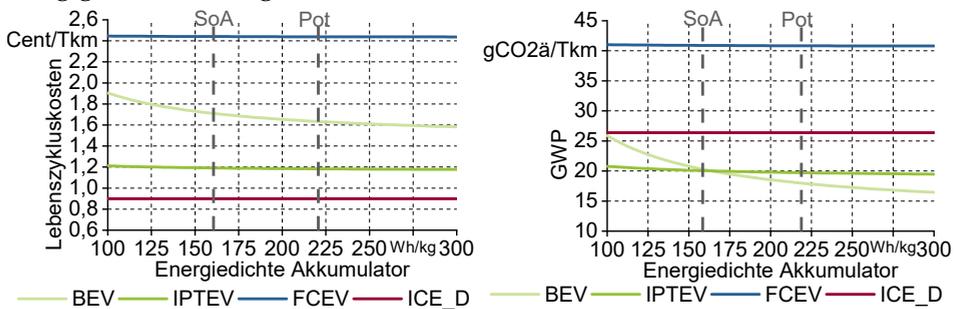


Bild 86: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit der Energiedichte des Akkumulators

Mit höherer Energiedichte des Akkumulators erhöht sich die potentielle Nutzlast alternativer Antriebskonzepte. Die geringere Akkumulatormasse verringert darüber hinaus den Fahrenergiebedarf für die Referenzzuladung. Die Verbesserung der Energiedichte des Akkumulators führt dazu, dass BEV aufgrund des geringeren Fahrenergiebedarfs eine geringere Klimawirkung aufweisen als IPTEV. Zum Stand der Technik können alternative Antriebskonzepte jedoch nicht mit den Lebenszykluskosten des ICE_D konkurrieren.

Unter Vernachlässigung des Akkumulatorverschleißes begünstigen hohe Laufleistungen BEV aufgrund des geringen Fahrenergiebedarfs. Für eine geringe Verschleißfestigkeit des Akkumulators wird dieser Vorteil jedoch sowohl ökonomisch als auch ökologisch kompensiert. Bild 87 fasst Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit der Fahrzeuglaufleistung und des Akkumulatorverschleißes zusammen:

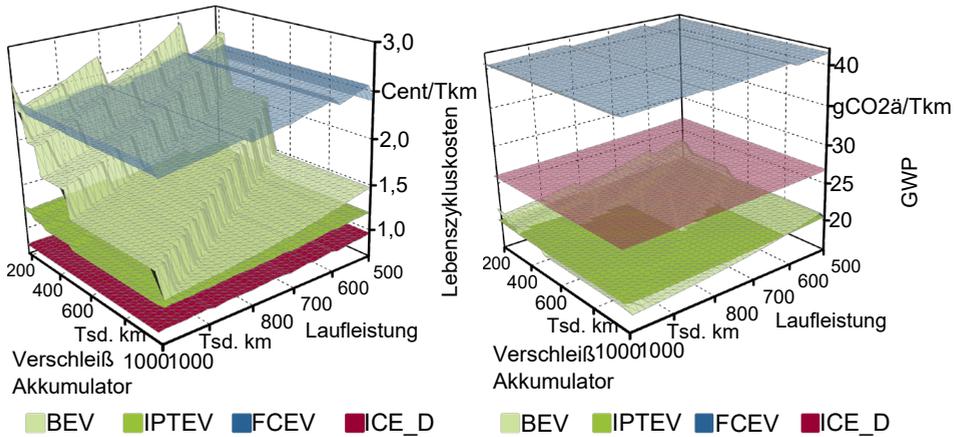


Bild 87: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit der Fahrzeuglaufleistung und des Akkumulatorverschleißes

Hinsichtlich der Lebenszykluskosten kann zum Stand der Technik keine Technologie mit ICE_D konkurrieren. Abhängig von der Laufleistung des Basisfahrzeugs hat FCEV gegenüber BEV ab zwei bis vier verschleißbedingten Akkumulatorwechslern die geringeren Lebenszykluskosten. Als Kombination aus ökonomischer und ökologischer Technologieattraktivität ist das IPTEV die optimale Substitutionstechnologie für ICE_D.

Bild 88 fasst die Auswirkung energiebedingter Fahrstopps auf die Transportzeit schwerer LKW zusammen:

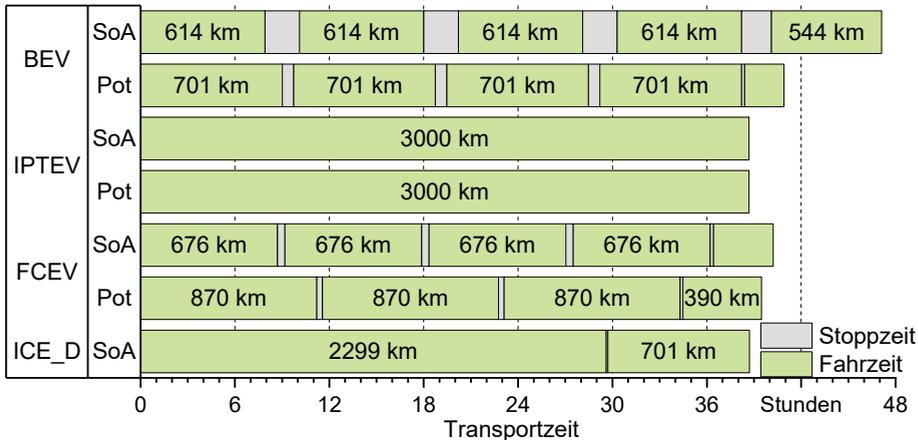


Bild 88: Transportzeit der Antriebskonzepte für schwere LKW bei Langstreckenfahrt von 3.000 km

Die Fahrreichweite konventioneller Zugmaschinen mit ICE_D liegt bei über 2.000 km. Mit BEV oder FCEV mit Drucktank sind diese Fahrreichweiten nicht darstellbar. Voraussetzung für schwere Nutzfahrzeuge als BEV ist daher ein engmaschiges Netz von Schnellladepunkten. Erforderliche energiebedingte Fahrstopps können für gesetzlich vorgeschriebene Lenkpausen des Fahrers genutzt werden. Für absehbare fahrerlose Gütertransporte verursachen energiebedingte Fahrstopps jedoch erhöhte Transportzeiten und damit Kapitalbindung. Für BEV erfordern lange Fahrstrecken zum Stand der Technik eine merklich längere Transportzeit als für die übrigen Antriebskonzepte.

Die Attraktivität des IPTEV Antriebskonzepts für Nutzfahrzeuge bestimmt sich neben den analysierten Rahmenbedingungen durch Übertragungswirkungsgrad und längenabhängige Investitionskosten der E|ROAD. Bild 89 stellt den Einfluss dieser Parameter auf Lebenszykluskosten und GWP dar:

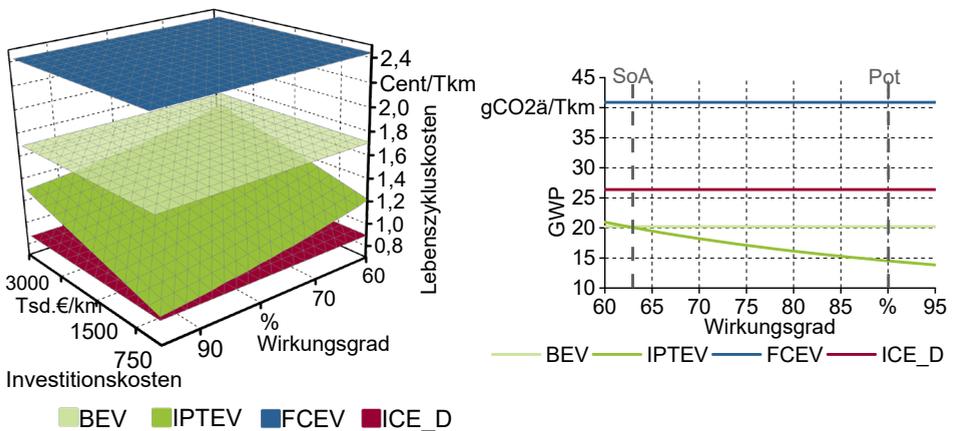


Bild 89: Lebenszykluskosten und GWP der Antriebskonzepte je Tonnenkilometer für schwere LKW in Abhängigkeit von Übertragungswirkungsgrad und längenabhängigen Investitionskosten der E|ROAD

Der Übertragungswirkungsgrad der E|ROAD hat ökonomische sowie ökologische Auswirkungen. Für 63 % Übertragungswirkungsgrad zum Stand der Technik unterschreitet das IPTEV-Antriebskonzept für Nutzfahrzeuge bereits die Lebenszykluskosten und das GWP von BEV. Für längenabhängige Investitionskosten zwischen 300 Tsd. und 3 Mio. €/km liegen die Lebenszykluskosten des IPTEV zwischen den des BEV und ICE_D.

Damit lässt sich zusammenfassen, dass alternative Antriebskonzepte für Nutzfahrzeuge bislang keine ökonomischen Vorteile gegenüber ICE_D haben, jedoch BEV und IPTEV eine wesentlich reduzierte Klimawirkung aufweisen. Es ist daher Aufgabe der Steuer-, Abgaben- und Umlagenpolitik die

Externalität der Umweltauswirkung unter anderem durch eine Bepreisung von Emissionen in das ökonomische Kalkül der Marktakteure zu integrieren.

Für die Antriebswende bei schweren Nutzfahrzeugen bietet sich das IPTEV Antriebskonzept an. Bereits für den Stand der Technik ist dies der bestmögliche Kompromiss aus Ökonomie und Ökologie. Im technologischen Potential verspricht eine E|ROAD die geringste Klimawirkung je Tonnenkilometer bei minimalen Transportkosten. Energiebedingte Fahrstopps sind nicht erforderlich, was insbesondere für fahrerlose straßengebundene Gütertransporte ökonomisch vorteilhaft ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Eignung alternativer Antriebskonzepte für die Langstreckenmobilität zu untersuchen, wird in der vorliegenden Arbeit eine multidimensionale Vergleichsmethodik für Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität entwickelt und angewendet. Die Vergleichsmethodik adressiert folgende Anforderungen:

- Bewertungsobjekt ist das Antriebskonzept, bestehend aus Fahrzeug und zugehöriger Infrastruktur, wobei für Infrastrukturaufwände ein Umlagemechanismus auf Fahrkilometer erforderlich ist.
- Der Lösungsraum alternativer Antriebskonzepte schließt elektrifizierte Trassen als funktional äquivalente Antriebstechnologie ein.
- Die Definition technologischer, ökologischer und ökonomischer Bewertungskriterien ermöglicht eine ganzheitliche Bewertungsaussage.

Die Methodik ist dreiphasig aufgebaut und sieht zunächst die Strukturierung aller bewertungsrelevanten Daten als Rahmenbedingungen vor. In der anschließenden Folgenabschätzung werden durch Analyse und Modellierung relevanter Stoff- und Energieströme multidimensionale Kennzahlen berechnet. In der abschließenden Bewertung werden diese Kennzahlenausprägungen zu einem Gesamtbild assembliert.

Im Rahmen der E|KPI-Webapplikation erfolgt die vollständige Automatisierung der Vergleichsmethodik. Die Implementierung umfasst eine Datenbank zur Strukturierung der Rahmenbedingungen sowie einen Webserver, welcher Webclients eine Benutzeroberfläche der Applikation zur Verfügung stellt. Die Ausgangsdaten der Bewertung können laufend an die technologische Entwicklung angeglichen werden sowie die Auswirkungen veränderter Ausgangsdaten auf das Bewertungsergebnis im Rahmen von Sensitivitätsanalysen untersucht werden.

Der Vergleich der Antriebskonzepte belegt die Relevanz der Infrastruktur für das Bewertungsergebnis: Zwar trägt das GWP der Infrastrukturproduktion für alle Antriebskonzepte weniger als 5 % zum gesamten GWP bei, das GWP der Betriebsphase entsteht jedoch für alternative Antriebskonzepte ausschließlich infrastrukturseitig. Entscheidend ist das Umfeldszenario aus wirtschaftsraumabhängigen Rahmenbedingungen zur Modellierung der Stromerzeugung. In die Lebenszykluskosten gehen Infrastrukturproduktion und -betrieb abhängig vom Antriebskonzept mit 14 % bis 36 % ein.

Auch zeigt sich, dass sowohl durch die Entwicklung des Umfeldszenarios als auch aufgrund technologischer Verbesserungen der Antriebskonzepte die Betriebsphase im Lebensweg an Bedeutung verliert und damit die Relevanz der Materialbereitstellungs-, Produktions- und Recyclingphase zunimmt. Zum Stand der Technik weist das BEV das geringste GWP der Antriebskonzepte für PKW auf und ist ab Laufleistungen von über 250 Tsd. Fahrkilometern auch gegenüber ICE_G die ökonomischere Alternative. FCEV ist weder ökologisch noch ökonomisch attraktiv. Die nachteiligen Umwandlungswirkungsgrade von Elektrolyse und Brennstoffzelle führen zu hohen Energiekosten und Emissionen der Stromerzeugung.

Schwere Nutzfahrzeuge sind mit ICE_D am wirtschaftlichsten. Jedoch ist nur durch BEV und IPTEV eine Dekarbonisierung des straßengebundenen Langstreckengüterverkehrs möglich. Die bestmögliche Kombination aus ökologischer und ökonomischer Leistungsfähigkeit bietet das IPTEV. FCEV sind ab zwei bis vier verschleißbedingten Akkumulatorwechseln bei BEV zwar wirtschaftlicher als diese, aufgrund der hohen Fahrenergiebedarfe führen FCEV über den Lebensweg jedoch zu beinahe dem doppelten GWP von ICE_D und haben damit keine Dekarbonisierungswirkung.

Ausblickend kann die entstandene Vergleichsmethodik vertieft werden: Grundannahme ist bislang, dass die gesamte Langstreckenmobilität eines Wirtschaftsraums durch ein Antriebskonzept dargestellt wird. Somit kann nicht untersucht werden, ob in Abhängigkeit individueller Anforderungen des Mobilitätskonsumenten abweichende Technologieentscheidungen vorteilhaft sind.

Der Detailgrad der Modellierung durch Rahmenbedingungen bietet an verschiedenen Stellen Entwicklungspotential. Beispielhaft genannt sei die Skalierung der Material- und Energiebedarfe der Produktion der Fahrzeugkomponenten. Die Infrastrukturkomponenten sind bislang nicht ausreichend durch LCI-Analysen erfasst, weshalb detaillierte Produktionsprozesse oder Energiebedarfe der Infrastrukturproduktion nicht in die Betrachtung eingehen.

Schließlich bietet die Zusammenstellung der Bewertungskriterien Erweiterungspotential: Die bestehenden Bewertungsdimensionen können zum Beispiel um eine soziale Dimension erweitert werden, welche das Antriebskonzept hinsichtlich der Interessen von Arbeitnehmern, Gesellschaft und Konsument bewertet [215]. So sind für den Mobilitätskunden die zu tragenden Kosten je Fahrkilometer relevant, welche sich unter Berücksichtigung wirtschaftsraumabhängiger Abgaben-, Steuern-, Umlagen- und Subventionspolitik ergeben.

8 Summary and outlook

To investigate the suitability of alternative drive concepts for long-distance-mobility, a multidimensional comparison methodology for drive concepts of individual long-distance mobility is developed and applied. The comparison methodology addresses the following requirements:

- The object of evaluation is the drive concept, consisting of vehicle and associated infrastructure, whereby an apportionment mechanism for infrastructure expenditures is required.
- The solution space of alternative drive concepts includes electrified roads as a functionally equivalent drive technology.
- The definition of technological, ecological and economic evaluation criteria enables a holistic evaluation.

The methodology is structured in three phases and initially provides a structure for all data relevant to the evaluation. In the subsequent impact assessment, multidimensional key figures are calculated by analyzing and modeling relevant material and energy flows. In the final evaluation, these key figure expressions are assembled into an overall picture.

Within the E|KPI web application the automation of the comparison methodology takes place. The implementation includes a database for structuring the data framework as well as a web server, which provides web clients with a user interface of the application. The initial data of the evaluation can be adjusted continuously to the technological development and the effect of changed initial data on the evaluation result can be examined using sensitivity analyses.

The comparison of the drive concepts proves the relevance of the infrastructure for the assessment result: Although the GWP of the infrastructure production contributes less than 5 % of the total GWP for all drive concepts, the GWP of the operating phase arises exclusively on the infrastructure side for alternative drive concepts. The decisive factor is the environmental scenario consisting of economic-area-dependent framework conditions for modeling electricity generation. Depending on the drive concept, infrastructure production and operation are included in the life cycle costs at 14 % to 36 %.

It is also apparent that both the development of the framework scenario and technological improvements to the drive concepts mean that the operating phase in the life cycle is becoming less important and the

relevance of the material provision, production and recycling phase is increasing.

At the state of the art, the BEV has the lowest GWP of the drive concepts for passenger cars and is also the more economical alternative compared to ICE_G for mileages of over 250 thousand kilometers. FCEV is neither ecologically nor economically attractive. The disadvantageous conversion efficiencies of electrolysis and fuel cells lead to high energy costs and emissions from electricity generation.

Heavy-duty vehicles are most economical with ICE_D. However, only BEVs and IPTEVs can decarbonize long-haul road freight transport. The IPTEV offers the best possible combination of ecological and economic performance. FCEVs are more economical than BEVs after two to four battery changes due to wear, but due to the high driving energy requirements, FCEVs lead to almost twice the GWP of ICE_D over their lifetime and thus have no decarbonization effect.

Looking ahead, the resulting comparison methodology can be deepened in the following areas: The basic assumption is that all long-distance mobility of an economic area is represented by one propulsion concept. Thus, it cannot be investigated whether, depending on the individual requirements of the mobility consumer, different technology decisions are advantageous.

The level of detail of the modeling offers potential at various points: One example is the scaling of material and energy requirements for the production of vehicle components. The infrastructure components have not yet been sufficiently covered by LCI analyses, which is why detailed production processes or energies of the infrastructure are yet not included in the analysis.

Finally, the composition of the evaluation criteria offers potential for expansion: the existing evaluation dimensions can be expanded to include a social dimension, which evaluates the drive concept with respect to the interests of employees, society and consumers [215]. For example, the costs per kilometer of travel for the mobility customer, have to take into account policies on charges, taxes, levies and subsidies that depend on the economic region.

Anhang

Tabelle 16: Datengrundlage zur Darstellung der technologischen Leistungsfähigkeit der Antriebstechnologien ICE_G und BEV

Parameter	Technologie	Einheit	1980	1990	2000	2010	2020	2030	2040	Quelle
Nennleistung	-	kW	65	75	85	96	116	126	131	[325]
Akkumulator Kapazität	BEV	kWh					75	90	120	-
THG je Fahrkilometer	ICE_G	g/km	240	210	175	155	155	-	-	[326, 327]
	BEV		-	-	-	-	100	70	30	[328]
Herstellungskosten Antriebsstrang	ICE_G	€	2.775	3.125	3.475	3.860	4.560	-	-	[142]
	BEV		-	-	-	-	12.320	11.495	13.182	

Exogene Rahmenbedingungen

Tabelle 17: Exogene Rahmenbedingungen der globalen Stromerzeugung

ID	Parameter	Zeichen	Material	Energieträger	2020	2030	2040	2050	Einheit	Quelle
0030	Wirkungsgrad	η_i	-	Erdgas	42	43,7	45,3	47	%	[329, 25]
				Erdöl	37	39,3	41,7	44		
				Steinkohle	35	37,3	39,7	42		
				Kernk.	33					
0033	Hilfsenergie Energieträger	E_H	-	Erdgas	11,3				%	[330]
				Erdöl	6,9					
				Steinkohle	11,5					
				Kernk.	9,9					

1000	Anteil Energieträger	x_i	-	Erdgas	23,7	22,5	21,3	20,9	%	[331, 332]
				Steinkohle	36,8	28,6	22,6	21,7		
				Kernk.	10,5	9,2	8,6	8,1		
				Erdöl	2,4	1,8	1,3	0,4		
				Wasser	16,1	15,7	15,0	15,9		
				Biomasse	2,6	3,1	3,6	3,8		
				Phot.	2,6	8,6	14,0	14,8		
				Wind	5,3	10,5	13,7	14,5		
1001	Heizwert Energieträger	$H_{i,i}$	-	Erdgas	12,4				$\frac{kWh}{kg}$	[20, 333, 334]
				Erdöl	11,9					
				Braunkohle	2,6					
				Steinkohle	8,3					
				Uran	24.000.000					
1300	GWP des Energieträgers	$\left(\frac{GWP}{E}\right)_i$	-	Erdgas	486	444	435	409	$\frac{gCO_2\ddot{a}}{kWh}$	[335, 22]
				Erdöl	826	820	810	802		
				Steinkohle	1.007	970	941	908		
				Biomasse	49,6	49,6	49,6	49,6		
1301	GWP Hilfsenergie Energieträger	$\left(\frac{H_GWP}{E}\right)_i$	-	Erdgas	291				$\frac{gCO_2\ddot{a}}{kWh}$	[330]
				Erdöl	418					
				Steinkohle	448					
				Kernk.	168					

Tabelle 18: Exogene Rahmenbedingungen zur Definition der Material- und Ressourcensituation

ID	Parameter	Zeichen	Ressource	Material	Wert	Einheit	Quelle
1010	Ressourcenverfügbarkeit	Res_i	Aluminium	-	55 Mrd.	t	[336]
			Erdgas		665 Mrd.		[337]
		
1302	GWP der Materialbereitstellung	$\left(\frac{GWP}{Mat}\right)_i$	-	Aluminium	11.904	$\frac{gCO_2\ddot{a}}{kg}$	[338]
				Kupfer	7.721		[338]
			
1330	GWP Bonus des Materialrecycling	$\left(\frac{GWP_B}{Mat}\right)_i$	-	Aluminium	0,95	%	[339]
				Kupfer	0,85		...
			
4000	Material-Ressourcenzuordnung	$MR_{i,j}$	Lithium	NCA	7,6	%	[128, 121]
			Nickel		34,2		
		

Tabelle 19: Exogene Rahmenbedingungen der Zuschlagkalkulation

ID	Parameter	Zeichen	Wert	Einheit	Quelle
2400	Materialkostenzuschlag	MGK	5	%	[340]
2401	Forschungs- und Entwicklungsgemeinkostenzuschlag	$FuEGK$	5	%	[341]
2402	Verwaltungs- und Vertriebsgemeinkostenzuschlag	$VVGK$	11	%	[341, 342]
2403	Gewinnzuschlag	G	6	%	[342]

Tabelle 20: Exogene Rahmenbedingungen der lokalen Stromerzeugung

ID	Parameter	Zeichen	Material	Energieträger	2020	2030	2040	2050	Einheit	Quelle
0030	Wirkungsgrad	η_i	-	Erdgas	57	59	60	62	%	[25, 18, 19]
				Braunkohle	39	42	44	47		
				Steinkohle	42	45	48	50		
				Kernk.	33					[20]
0033	Hilfsenergie	E_H	-	Erdgas	11,3				%	[330]
				Braunkohle	2,4					
				Steinkohle	11,5					
				Kernk.	9,9					
1000	Anteil Energieträger	x_i	-	Erdgas	12,2	11,0	9	7,3	%	[21, 26]
				Steinkohle	7,3	1,6	0	0		
				Braunkohle	16,9	2,6	0	0		
				Kernk.	12,6	0	0	0		
				Wasser	3,8	4,7	4	3		
				Biomasse	9,4	8,3	7,8	6,1		
				Phot.	10,6	12,2	10,5	14,4		
				Wind	27,2	59,6	68,7	69,2		
1211	Material für Produktion Energieträger	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Beton	Steinkohle	2,3				$\frac{g}{kWh}$	[18, 343, 27, 28]
			Stahl		0,64					
							

1300	GWP Energieträger	$\left(\frac{GWP}{E}\right)_i$	-	Erdgas	399	383	366	350	$\frac{gCO_2}{kWh}$	[22-24]
				Braun- kohle	1.137	1.024	911	798		
				Stein- kohle	835	787	739	690		
				Bio- masse	50	49,6	49,6	49,6		
1301	GWP Hilfsenergie Energieträger	$\left(\frac{H_GWP}{E}\right)_i$	-	Erdgas	291				$\frac{gCO_2}{kWh}$	[330]
				Braun- kohle	418					
				Stein- kohle	448					
				Kernk.	168					
2110	Selbstkosten Energieträger	$\left(\frac{K}{E}\right)_i$	-	Erdgas	8,9	9,4	11,3	13,1	$\frac{Cent}{kWh}$	[344- 347]
				Braun- kohle	6,3	7,3	8,6	10		
				Stein- kohle	8,1	9,8	11,7	13,6		
				Kernk.	11,5	11,5	11,5	11,5		
				Wasser	10	10	10	10		
				Bio- masse	12,4	12	11	10		
				Phot.	7,6	5,5	4,5	4		
				Wind	7,9	6,4	5,4	5,8		

Endogene Rahmenbedingungen der Antriebskonzepte

Nachfolgende Tabellen fassen die endogenen Rahmenbedingungen der Infrastrukturkomponenten zusammen:

Tabelle 21: Stromnetz

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0030	Wirkungsgrad	η	-	94	97	%	[348, 349]
1211	Material-zusammensetzung	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Stahl	0,54		$\frac{g}{kWh}$	[32, 21, 26, 330]
			Kupfer	0,28			
					
2110	Energiespezifische Kosten	$\left(\frac{K}{E}\right)$	-	4,6	5,0	$\frac{Cent}{kWh}$	[36, 37]

Tabelle 22: E|ROAD

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0030	Wirkungsgrad	η	-	63	97	%	[350, 74, 69]
0060	Nutzungsdauer	ND	-	20		a	[351]
1211	Material-zusammensetzung	$\left(\frac{M}{P}\right)_i$	Stahl	3,0		$\frac{kg}{kW}$	[190, 313]
			Kupfer	1,3			
					
1213	Material-zusammensetzung	$\left(\frac{M}{L}\right)_i$	Sand	235		$\frac{t}{km}$	[69, 32, 303]
			Kupfer	10,3			
					
2111	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	166		$\frac{\text{€}}{kW}$	[67]
2112	Längenspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{L}\right)$	-	333.658		$\frac{\text{€}}{km}$	

Tabelle 23: Wasserstoffelektrolyse

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0030	Wirkungsgrad	η	-	65	85	%	[40, 352, 39]
0060	Nutzungsdauer	ND	-	20		a	[353]
1211	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Stahl	0,18		$\frac{g}{kWh}$	[42, 334]
			Aluminium	0,0018			
					
2111	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	1.000	500	$\frac{\text{€}}{kW}$	[40]

Tabelle 24: Pipelinedistribution (Wasserstoff)

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0030	Wirkungsgrad	η	-	99,7		%	[46]
0032	Elektrische Hilfsenergie	E_{elH}	-	2		%	[44]
0060	Nutzungsdauer	ND	-	30		a	[354]
1211	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Stahl	2,4		$\frac{g}{kWh}$	[330]
					
2110	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	1.095		$\frac{\text{€}}{kW}$	[46]

Tabelle 25: Tankstelle (Wasserstoff)

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0021	Nennleistung	P	-	3.000	4.000	kW	[55, 56, 355]
0032	Elektrische Hilfsenergie	E_{elH}	-	15		%	[55, 356]
0060	Nutzungsdauer	ND	-	10		a	[357]
1211	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Stahl	0,38	0,28	$\frac{kg}{kW}$	[358, 330]
			Zement	0,98	0,73		

2110	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	1.600	1.440	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	[57, 355, 46, 334]
------	-----------------------------	----------------------------	---	-------	-------	-------------------------------	--------------------

Tabelle 26: Förderung und Transport (Rohöl)

ID	Parameter	Zeichen	Material	Wert	Einheit	Quelle
0033	Sonstige Hilfsenergie	E_H	-	4,6	%	[330]
1211	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Stahl	0,7	$\frac{g}{kWh}$	[330]
			Zement	0,5		
				
1301	GWP sonstige Hilfsenergie	GWP	-	377,4	$\frac{gCO_2\ddot{a}}{kWh}$	[330]

Tabelle 27: Raffinerie (Ottokraftstoff)

ID	Parameter	Zeichen	Material	Wert	Einheit	Quelle
0032	Elektrische Hilfsenergie	E_{elH}	-	0,14	%	[330]
0033	Sonstige Hilfsenergie	E_H	-	12,9	%	[330]
1211	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Stahl	0,078	$\frac{g}{kWh}$	[330]
			Zement	0,036		
				
1301	GWP sonstige Hilfsenergie	GWP	-	279	$\frac{gCO_2\ddot{a}}{kWh}$	[330]

Tabelle 28: LKW-Distribution (Ottokraftstoff)

ID	Parameter	Zeichen	Material	Wert	Einheit	Quelle
0033	Sonstige Hilfsenergie	E_H	-	0,25	%	[330]
1211	Material- zusammensetzung	$\left(\frac{M}{E}\right)_i$	Stahl	0,012	$\frac{g}{kWh}$	[330]
			Aluminium	0,0022		
				
1301	GWP sonstige Hilfsenergie	GWP	-	246,8	$\frac{gCO_2\ddot{a}}{kWh}$	[330]

Tabelle 29: Tankstelle (Ottokraftstoff)

ID	Parameter	Zeichen	Material	Wert	Einheit	Quelle
0021	Nennleistung	P	-	18.000	kW	[359]
0032	Elektrische Hilfsenergie	E_{elH}	-	0,01	%	[330]
2110	Energiespezifische Kosten	$\left(\frac{K}{E}\right)$	-	6,1	$\frac{Cent}{kWh}$	[322]

Nachfolgende Tabellen fassen die endogenen Rahmenbedingungen der Antriebsstrangkomponenten zusammen:

Tabelle 30: Akkumulator

Bauteil	ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
-	0010	Kapazität	C	-	BEV: 75, IPTEV: 12, FCEV: 2		kWh	-
	0030	Wirkungsgrad	η	-	94	96	%	[118, 169, 326]
	0040	Gravimetrische Energiedichte	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,16	0,220	$\frac{kWh}{kg}$	[169, 326, 117, 132, 324]
	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	500 Tsd.	1.000 Tsd.	km	[360, 119]

	2110	Energiespezifische Kosten	$\left(\frac{K}{E}\right)$	-	130	72	$\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	[117, 361, 132, 324]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{wv}	-	8		h	[S8]
Zelle	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	12,5		$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	[121, 127, 125, 362]
	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	NMC	16,3	19,5	%	[121, 119, 128]
				NCA	3,3	3,1		
					
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	NMC	80	90	%	[151, 129, 363-366]
				NCA	80	90		
...						
Modul	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Aluminium	4,5	4,5	%	[151, 129, 363-366]
				Kupfer	0,27	0,27		
					
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Aluminium	85	90	%	[151, 367]
				Kupfer	90	95		
					
Pack	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,91		$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	[125]
	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Aluminium	13,8	14	%	[121, 128, 368]
				Stahl	0,64	0,63		
					
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Aluminium	80	90	%	[151, 367]
...						

Tabelle 31: Wasserstofftank

ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
0010	Kapazität	C	-	140		kWh	[369]
0030	Wirkungsgrad	η	-	99		%	[143]
0040	Gravimetrische Energiedichte	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	2,02	2,7	$\frac{kWh}{kg}$	[134]
0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	500.000		km	[360]
1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,036		$\frac{kWh}{kg}$	[141]
1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Kohlefaser	57		%	[141]
			Epoxidharz	24,4			
					
2110	Energiespezifische Kosten	$\left(\frac{K}{E}\right)$	-	21	9,0	$\frac{\text{€}}{kWh}$	[142]
2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{wv}	-	8		h	-

Tabelle 32: IPT-Spulenmodul

Bauteil	ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
-	0021	Nennleistung	P_N	-	30		kW	[370]
	0030	Wirkungsgrad	η	-	97	99	%	[96]
	0050	Gravimetrische Leistungsdichte	$\left(\frac{P}{m}\right)$	-	0,64	0,69	$\frac{kW}{kg}$	[58, 96]
	2111	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	58,2	44,0	$\frac{\text{€}}{kW}$	[96, 89]
Spule	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,03		$\frac{kWh}{kg}$	[S9]
	1211	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Kupfer	5,8		%	[98]

	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Kupfer	95	%	[151]
Gehäuse	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	2,6	$\frac{kWh}{kg}$	[S9]
	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Aluminium	42,7	%	[98]
				Polycarbonat	21,1	%	
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Aluminium	90	%	[151]
Ferritspiegel	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	3,84	$\frac{kWh}{kg}$	[S9]
	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Ferrit	20	%	[98]
Gleichrichter	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,325	$\frac{kWh}{kg}$	[190]
	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Aluminium	4,4	%	[371]
				Kupfer	1,2		
					
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Aluminium	90	%	[151]
...					

Tabelle 33: Brennstoffzelle

Bauteil	ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
-	0030	Wirkungsgrad	η	-	52,5	60	%	[45]
	0050	Gravimetrische Leistungsdichte	$\left(\frac{P}{m}\right)$	-	0,65	0,7	$\frac{kW}{kg}$	[134, 143]
	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	200 Tsd.	400 Tsd.	km	[286]
	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	10,86		$\frac{kWh}{kg}$	[153]
	2111	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	36,1	27,0	$\frac{\text{€}}{kW}$	[146]

	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{wv}	-	16	h	[S8]
Stack	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Edelstahl	24,7	%	[151]
				Platin	0,03		
					
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Edelstahl	95	%	[151]
				Platin	98		
					
DC/DC Wandler	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,054	$\frac{kWh}{kg}$	[360]
	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Kupfer	1,2	%	[371]
					
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Kupfer		%	[151]
					
	Nebenaggregate	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Aluminium	19,3	%
...					...		
1230		Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Aluminium	90	%	[151]
					

Tabelle 34: Inverter

Bauteil	ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Einheit	Quelle
-	0030	Wirkungsgrad	η	-	96	98	%	[96]
	0050	Gravimetrische Leistungsdichte	$\left(\frac{P}{m}\right)$	-	15	50	$\frac{kW}{kg}$	[96]
	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	1.000 Tsd.		km	-
	2111	Leistungsspezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	3		$\frac{€}{kW}$	[142]

	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	1,5	h	[S8]
Elektr. Bauteile	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,68	$\frac{kWh}{kg}$	[190]
	1210	Materialzusam- mensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Kupfer	15,0	%	[190]
				
1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Kupfer	95	%	[151]	
				
Gehäuse	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	3,24	$\frac{kWh}{kg}$	[372, 190]
	1210	Materialzusam- mensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Aluminium	51,9	%	[372]
					
1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Aluminium	90	%	[151]	
					

Tabelle 35: Elektrischen Maschine (Fortsetzung)

Bau- teil	ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Ein- heit	Quelle
Rotor	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	500 Tsd.	1.000 Tsd.	km	-
	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,85	0,80	$\frac{kWh}{kg}$	[177, 134]
	1210	Materialzusammen- setzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Stahl	27,6	%	[177, 42]	
				Neodym	0,53			
						
	1214	Materialverlust	$M_{V,i}$	Stahl	74	%	[177]	
...				...				
1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Neodym	90	%	[175]		
						

	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{wv}	-	12		h	[S8]
Welle	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	500 Tsd.	1.000 Tsd.	km	-
	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,0094		$\frac{kWh}{kg}$	[177, 134]
	1210	Materialzusammen- setzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Stahl	0,039		%	
	1214	Materialverlust	$M_{v,i}$	Stahl	25,3		%	[177]
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Stahl	98,5		%	[373]
	Gehäuse	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	1,95	1,94	$\frac{kWh}{kg}$
1210		Material- zusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Alumi- nium	32,3		%	[177, 134]
1214		Material- verlustfaktor	$M_{v,i}$	Alumi- nium	11,8		%	[177]
1230		Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Alumi- nium	90		%	[151]

Tabelle 36: Einstufiges Getriebe

Bau- teil	ID	Parameter	Zeichen	Material	SoA	Pot	Ein- heit	Quelle
-	0030	Wirkungsgrad	η	-	96	98	%	[169]
	0050	Gravimetrische Leistungsdichte	$\left(\frac{P}{m}\right)$	-	4,5		$\frac{kW}{kg}$	[292]
	2111	Leistungs- spezifische Kosten	$\left(\frac{K}{P}\right)$	-	1,53		$\frac{\text{€}}{kW}$	[142, 47]
Zahn- räder u. Wellen	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	3,07		$\frac{kW}{kg}$	[198]
	1210	Material- zusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Stahl	69		%	[198, 199]
	1214	Materialverlust	$M_{v,i}$	Stahl	25		%	[198]

	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Stahl	98,5	%	[373]
Gehäuse	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	1,81	$\frac{kWh}{kg}$	[372, 177]
	1210	Materialzusammensetzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_i$	Aluminium	31	%	[199, 372]
	1214	Materialverlust	$M_{V,i}$	Aluminium	5,9	%	[372]
	1230	Materialrecycling	$M_{rec,i}$	Aluminium	90	%	[151]

Tabelle 37: PKW-Basisfahrzeug (Fortsetzung)

Bauteil	ID	Parameter	Zeichen	Material	Wert	Einheit	Quelle
-	0050	Gravimetrische Leistungsdichte	$\left(\frac{P}{m}\right)$	-	3,0	$\frac{kW}{kg}$	[S9]
Niedervoltakkumulator	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	75.000	km	[374]
	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,071	$\frac{kWh}{kg}$	[198]
	-
	2120	Materialkosten	K_M	-	100	€	[375]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{wv}	-	1	h	[S8]
Stoßdämpfer	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	60.000	km	[376]
	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,0143	$\frac{kWh}{kg}$	[198]
	-
	2120	Materialkosten	K_M	-	188,75	€	[377]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{wv}	-	0,75	h	[S8]
	4001	Anzahl Bauteile	n	-	4	-	-

Feder	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	150.000	km	[378]
	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,0089	$\frac{kWh}{kg}$	[198]

	2120	Materialkosten	K_M	-	40	€	[379]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	1	h	[S8]
	4001	Anzahl Bauteile	n	-	4	-	-
Radlager	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	180.000	km	[380]
	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,000245	$\frac{kWh}{kg}$	[198]

	2120	Materialkosten	K_M	-	50	€	[380]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	1	h	[S8]
	4001	Anzahl Bauteile	n	-	4	-	-
Reifen	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	60.000	km	[381]
	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,029	$\frac{kWh}{kg}$	[198]

	2120	Materialkosten	K_M	-	58	€	[382]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	0,25	h	[S8]
	4001	Anzahl Bauteile	n	-	4	-	-
Innenr.filter	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	15.000	km	[381]
	1110	Produktionsenergiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,0014	$\frac{kWh}{kg}$	[198]

	2120	Materialkosten	K_M	-	8,0	€ [383]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	0,5	<i>h</i> [S8]
Wischerblätter	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	15.000	<i>km</i> [381]
	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,00066	$\frac{kWh}{kg}$ [198]
	-
	2120	Materialkosten	K_M	-	12,4	€ [384]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	0,25	<i>h</i> [S8]
	4001	Anzahl Bauteile	n	-	2	- -
Wasser	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	15.000	<i>km</i> [S8]
	2120	Materialkosten	K_M	-	5,0	€ [385]
Bremsleitung	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	150.000	<i>km</i> [386]
	1110	Produktions- energiebedarf	$\left(\frac{E}{m}\right)$	-	0,0019	$\frac{kWh}{kg}$ [198]
	-
	2120	Materialkosten	K_M	-	55	€ [387]
	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	0,5	<i>h</i> [S8]
	4001	Anzahl Bauteile	n	-	4	- -
Bremsflüssigk.	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	30.000	<i>km</i> [381, 388]
	-
	2120	Materialkosten	K_M	-	15	€ [389]

	2521	Arbeitszeit Maßnahme	AZ_{WV}	-	0,5	h	[S8]
HU	0063	Laufleistung bis Maßnahme	LC	-	30.000	km	[390]
	2122	Servicekosten	K_S	-	65	€	

Tabelle 38: Nutzfahrzeug

ID	Parameter	Zeichen	Material	2020	2030	2040	2050	Einheit	Quelle
0010	Kapazität	C	-	Akkumulator: BEV: 700, IPTEV: 105, FCEV: 12				kWh	-
			-	Wasserstofftank: 1400				kWh	-
			-	Dieseltank: 5700				kWh	-
0000	Fahrzeugmasse ohne Antriebsstrang	m_{BF}	-	5.300	5.070	4.841	4.611	kg	[391- 393]
0001	Masse der Zuladung	m_{ZL}	-	19.600				kg	-
0002	Zulässige Gesamtmasse	m_{ZGM}	-	40.000				kg	-
0020	Nennleistung	$P_{N,BF}$	-	400	467	533	600	kW	[391- 393]
0060	Nutzungsdauer	ND_{BF}	-	6				a	
0061	Laufleistung	LL_{BF}	-	120.000				$\frac{km}{a}$	
0070	Fahrzeugstirnfläche	A_{BF}	-	10,3				m^2	
0071	Luftwiderstands- beiwert	$c_{W,BF}$	-	0,58	0,5	0,45	0,42	-	
0072	Rollwiderstands- beiwert	$f_{R,BF}$	-	0,0052				-	
0073	Drehmassenzu- schlagsfaktor	$\varepsilon_{i,BF}$	-	0,03				-	
1200	Materialzusammen- setzung	$\left(\frac{M}{m}\right)_{i,BF}$	Stahl	65				%	
			

Anhang

2000	Herstellungskosten	HK_{BF}	-	36.000	€	[391- 393]
------	--------------------	-----------	---	--------	---	---------------

Der vollständige und aktuelle Datensatz kann der E|KPI-Webapplikation unter <http://ekpi.faps.fau.de/> entnommen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] FORSCHUNGSSTELLE FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT E.V. *Diskussion der methodischen Vorgehensweisen bei der primärenergetischen Bewertung von Reststoffen in Sachbilanzen einer Prozesskettenanalyse*, 5. Juli 2002
- [2] HAKEN, K.-L. *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*. 5., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2018. ISBN 978-3-446-45412-5
- [3] SCHUH, G. und S. KLAPPERT. *Technologiemanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-12529-4
- [4] RUMMEL, S. *Eine bewertungsbasierte Vorgehensweise zur Tauglichkeitsprüfung von Technologiekonzepten in der Technologieentwicklung*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014. Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement. 16. ISBN 978-3-8396-0810-4
- [5] APPEL, H. *Up and away* [online], 14. Juni 2019. Verfügbar unter: <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/vw-laesst-up-familie-sterben-und-ueberbrueckt-mit-elektroantrieb-16229711.html>
- [6] MOCK, P., N. LIGTERINK, U. LAMBRECHT, J. KÜHLWEIN und I. RIEMERSMA. *FROM LABORATORY TO ROAD. A 2014 update of official and "real-world" fuel consumption and co2 values for passenger cars in Europe*
- [7] BREITINGER, M. *Der Abgasskandal* [online], 2018. 23 März 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://web.archive.org/web/20181108100850/http://www.zeit.de/wirtschaft/diesel-skandal-volkswagen-abgase>
- [8] KRAFTFAHRTBUNDESAMT. *Neuzulassungsbarometer im Dezember 2021* [online], 2021 [Zugriff am: 27. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2021/202112_Glmonatlich/202112_nzbarometer/202112_n_barometer.html
- [9] LI, W., R. LONG, H. CHEN und J. GENG. A review of factors influencing consumer intentions to adopt battery electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **78**, S. 318-328

- [10] MAREEV, I., J. BECKER und D. SAUER. Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation [online]. *Energies*, 2018, **11**(1), S. 55. ISSN 1996-1073. Verfügbar unter: doi:10.3390/en11010055
- [11] FRICK, R. und B. GRIMM. *Langstreckenmobilität. Aktuelle Trends und Zukunftsperspektiven*, 2014
- [12] Hybrid - EV Committee. J1715: 10.2014, *Surface vehicle information report*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International
- [13] SUH, I.-S., D.-H. CHO, J. FRANKE, S.-M. HONG, S.-K. JUNG, B.-S. LEE, M. JOHN M., F. RISCH, S. NAOKI und F. TURKI. *Wireless charging technology and the future of electric transportation*. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International, 2015. R / SAE International. 444. ISBN 9780768081534
- [14] PETERMANN, J.P.E., Hg. *Erfolgreiches Energiemanagement im Betrieb*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-22479-0
- [15] HEUCK, K., K.-D. DETTMANN und D. SCHULZ. *Elektrische Energieversorgung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010. ISBN 978-3-8348-0736-6
- [16] REICH, G. und M. REPPICH. *Regenerative Energietechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-20607-9
- [17] BRAUNER, G. *Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung. Strategien für effiziente Energieversorgung bis 2050*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN 978-3-658-24853-6
- [18] BANTLE, C. *Kraftwerkspark in Deutschland. Aktueller Kraftwerkspark, Stromerzeugungsanlagen im Bau und in Planung, absehbare Stilllegungen konventioneller Kraftwerke*. Berlin, 27. April 2018
- [19] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V. *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2017*. Berlin, Juli 2018
- [20] SCHWAIGER. *Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung*. München, 1996

- [21] FRAUNHOFER ISE. *Nettostromerzeugung in Deutschland 2020: erneuerbare Energien erstmals über 50 Prozent* [online]. 4 Januar 2021 [Zugriff am: 1. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2020/nettostromerzeugung-in-deutschland-2021-erneuerbare-energien-erstmals-ueber-50-prozent.html#:~:text=In%20Summe%20produzierten%20die%20erneuerbaren,50%20Prozent%20oder%20%C3%B6ffentlichen%20Nettostromerzeugung.>
- [22] MICHAEL MEMMLER, DR. THOMAS LAUF, SVEN SCHNEIDER. *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2017*. Dessau-Roßlau, Oktober 2018
- [23] ICHA, P. *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018*. Dessau-Roßlau, April 2019
- [24] T. MARHEINEKE, W. KREWITT, J. NEUBARTH, R. FRIEDRICH, A. VOß. *Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken*, August 2000
- [25] SCHLESINGER, M., P. HOFER, KEMMLER, ANDREAS, KIRCHNER, ALMUT, S. KOZIEL, A. LEY, A. PIÉGSA, F. SEEFELDT, S. STRAßBURG, K. WEINERT, A. KNAUT, M. RAIMUND, S. NICK, T. PANKE, S. PAULUS, C. TODE, J. WAGNER, C. LUTZ, U. LEHR und P.U. ULRICH. *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie*. Basel, 06.2014. Projekt Nr. 57/12 des Bundesministeriums
- [26] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH. *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. Berlin, 2018
- [27] PAMELA L. SPATH, MARGARET K. MANN, DAWN R. KERR und INCLUDING CONTRIBUTIONS ON PROCESS DEFINITION AND DATA ACQUISITION FROM: JOHN MARANO AND MASSOOD RAMEZAN, FEDERAL ENERGY TECHNOLOGY CENTER. *Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production*, 1999
- [28] DONES, R., C. BAUER, R. BOLLIGER, B. BURGER, T. HECK, A. RÖDER, M.F. EMMENEGGER, R. FRISCHKNECHT, N. JUNGBLUTH und M. TUCHSCHMID. *Life Cycle Inventories of*

- Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries.* Villigen, 2007
- [29] DIEKMANN, B. und E. ROSENTHAL. *Energie. Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung.* 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2014. ISBN 978-3-658-00501-6
- [30] JOHANNES BÜRNER. *Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher.* Dissertation. Erlangen, 2019
- [31] STATISTISCHES BUNDESAMT. *Erzeugung* [online]. *Monatsbericht über die Elektrizitätsversorgung*, 2018 [Zugriff am: 17. September 2020]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/BilanzElektrizitaetsversorgung.html>
- [32] WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE GMBH. *Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen.* Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts „Material-effizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Wuppertal, 1. Juli 2011. Ressourceneffizienz Paper
- [33] HERMANN, H., M. VOGEL und F. FLACHSBARTH. *Räumliche Preissignale für fossile Kraftwerke*, 2016
- [34] KIEßLING, F., P. NEFZGER und U. KAINZCYK. *Freileitungen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001. ISBN 978-3-642-62673-9
- [35] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgeltverordnung - StromNEV)*, 25. Juli 2005. 2005
- [36] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Fragen zur Entwicklung der Netzentgelte im Stromsektor*, 19. Februar 2020. Verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/re-source/blob/689786/9b84cafbe64abf68170c87763ca2b5ea/WD-5-012-20-pdf-data.pdf>
- [37] DROSIHN, D. *Entwicklung des Stromverbrauchs nach Sektoren* [online], Oktober 2019. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_entw-stromverbrauch_2020-02-25.pdf

- [38] JOERG WIND. Brennstoffzelle. In: H. TSCHÖKE, P. GUTZMER und T. PFUND, Hg. *Elektrifizierung des Antriebsstrangs*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019
- [39] BRINNER, A., M. SCHMIDT, S. SCHWARZ, L. WAGENER und U. ZUBERBÜHLER. *Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*, 04.2018
- [40] MILANZI, S., C. SPILLER, B. GROSSE, L. HERMANN, J. KOCHEMS und J. MÜLLER-KIRCHENBAUER. Technischer Stand und Flexibilität des Power-to-Gas-Verfahrens. Working Paper Energie und Ressourcen, 2018
- [41] STERNER, M. und I. STADLER. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-48892-8
- [42] DLR UND WUPPERTAL INSTITUT. *Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität (STROMbegleitung)*. Abschlussbericht im Rahmen der Förderung des Themenfeldes „Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM)“ an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Stuttgart, Wuppertal, Berlin, 2015
- [43] KASTEN, P., M. MOTTSCHELL, W. KÖPPEL und C. DEGÜNTHER. *Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Endbericht*. Dessau-Roßlau, 05.2016
- [44] YANG, C. und J. ODGEN. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode [online]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(2), S. 268-286. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijhydene.2006.05.009
- [45] KLELL, M., H. EICHLSEDER und A. TRATTNER. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-658-20447-1
- [46] KRIEG, D. *Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff*. Dissertation. Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2012. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt. 144. ISBN 9783893368006

- [47] KAMPKER, A., D. VALLÉE und A. SCHNETTLER, Hg. *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-31985-3
- [48] SRDIC, S. und S. LUKIC. Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line [online]. *IEEE Electrification Magazine*, 7(1), 22-31, 2019. Verfügbar unter: doi:10.1109/MELE.2018.2889547
- [49] WILLRETT, U. Future generations for DC fast charging systems. In: M. BARGENDE, H.-C. REUSS und J. WIEDEMANN, Hg. 16. *Internationales Stuttgarter Symposium*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 909-923. ISBN 978-3-658-13254-5
- [50] TESLA TEAM. *Introducing V3 Supercharging* [online], 6. März 2019 [Zugriff am: 2. September 2020]. Verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_DE/blog/introducing-v3-supercharging
- [51] IONITY.EU. *Ionity* [online] [Zugriff am: 2. September 2020]. Verfügbar unter: <https://ionity.eu/de/design-und-technik.html#>
- [52] MARKUS HACKMANN und CHRISTIAN DAAKE. *P3 CHARGING INDEX – UPDATE 2021* [online]. *Vergleich der Schnellladefähigkeit verschiedener Elektrofahrzeuge aus Nutzerperspektive*, 26. April 2021. Verfügbar unter: <https://www.p3-group.com/p3-charging-index-vergleich-der-schnellladefahigkeit-verschiedener-elektrofahrzeuge-aus-nutzerperspektive-update-2021/>
- [53] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT. *Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland. Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015*. AG 3 - Ladeinfrastruktur und Netzintegration. Berlin, November 2015
- [54] E-MOBIL BW GMBH – LANDESAGENTUR FÜR ELEKTROMOBILITÄT UND BRENNSTOFFZELLENTÉCHNOLOGIE. *Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität. Entwicklungsstand und Forschungsbedarf*, März 2013
- [55] SHELL DEUTSCHLAND OIL GMBH. *Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂*. Hamburg, 2017

- [56] UHLMANN, M. *Wasserstoffspeicherung im Brennstoffzellenfahrzeug. Stand der Forschung und aktuelle Entwicklungen*. Dresden, 8. März 2018
- [57] ROBINIUS, M., J. LINßEN, T. GRUBE, M. REUß, P. STENZEL, K. SYRANIDIS, P. KUCKERTZ und D. STOLTEN. *Comparative analysis of infrastructures. Hydrogen fueling and electric charging of vehicles*. Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2018. Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Energie & Umwelt ; Band 408. ISBN 978-3-95806-295-5
- [58] RISCH, F. *Planning and production concepts for contactless power transfer systems for electric vehicles*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2014. Bamberg: Meisenbach, 2014. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 253. ISBN 9783875253696
- [59] DIE TRANSPORTBOTSCHAFTER. *E-Highway: Wenn die Autobahn zur Stromtankstelle wird* [online], 14. Mai 2020. Verfügbar unter: <https://transportbotschafter.de/e-highway-wenn-die-autobahn-zur-stromtankstelle-wird/>
- [60] RODRIGUEZ, D. eHighway. Electrified heavy duty road transport. In: *CERV_2018 5th Annual Conference On Electric Roads & Vehicles*, 2018
- [61] WIETSCHEL, M., T. GNANN, A. KÜHN, P. PLÖTZ, C. MOLL, D. SPETH, J. BUCH und T. BOßMANN. *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie*, 02.2017
- [62] HACKER, F., R. BLANCK, W. GÖRZ, T. BERNECKER, J. SPEISER, F. RÖCKLE, M. SCHUBERT und G. NEUBAUER. *StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Endbericht*. Berlin, Februar 2020
- [63] SÄLL, H. Conductive ERS technology from Elways ready for public road in Sweden. In: *CERV_2018 5th Annual Conference On Electric Roads & Vehicles*, 2018
- [64] SÄLL, H. Maintenance of road based ERS in a Nordic climate. In: *CERV_2018 5th Annual Conference On Electric Roads & Vehicles*, 2018

- [65] RUSSEr, J.A., M. DIONIGI, M. MONGIARDO und P. RUSSEr. A moving field inductive power transfer system for electric vehicles. In: *2013 European Microwave Conference*: IEEE, 6. Oktober 2013 - 10. Oktober 2013, S. 519-522. ISBN 978-2-87487-031-6
- [66] RUSSEr, J.A. und P. RUSSEr. Design considerations for a moving field inductive power transfer system. In: *2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT)*: IEEE, 15. Mai 2013 - 16. Mai 2013, S. 147-150. ISBN 978-1-4673-5010-5
- [67] KTH und P. QIE. *Detailed LCA/LCCA assessment of environment and cost impact of E-Roads*, März 2019. Road Infrastructure Impact & Solutions
- [68] MARMIROLI, B., G. DOTELLI und E. SPESSA. Life Cycle Assessment of an On-Road Dynamic Charging Infrastructure [online]. *Applied Sciences*, 2019, **9**(15), S. 3117. Verfügbar unter: doi:10.3390/app9153117
- [69] OLSSON, O. *Slide-in Electric Road System. Inductive project report*. Gothenburg, 10.2013
- [70] WANG, L. *Israel to test electric roads that wirelessly charge vehicles as they drive* [online], 2017. Verfügbar unter: <https://inhabitat.com/israel-to-test-electric-roads-that-wirelessly-charge-vehicles-as-they-drive/>
- [71] EUROPEAN COMMISSION - CORDIS. *Periodic Report Summary 2 - FABRIC (FeAsiBility analysis and development of on-Road charging solutions for future electric vehiCles)* [online] [Zugriff am: 5. Juli 2017]. Verfügbar unter: http://cordis.europa.eu/result/rcn/192481_en.html
- [72] QUALCOMM INCORPORATED. *From wireless to dynamic electric vehicle charging: The evolution of Qualcomm Halo* [online], 2017 [Zugriff am: 7. August 2017]. Verfügbar unter: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/18/wireless-dynamic-ev-charging-evolution-qualcomm-halo>
- [73] PANCHAL, C., S. STEGEN und J. LU. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system [online]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, **21**(5), S. 922-937. ISSN 22150986. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jestch.2018.06.015

- [74] INTIS - INTEGRATED INFRASTRUCTURE SOLUTIONS GMBH. *Optimierung von Komponenten der induktiven Energieübertragung und Systemerprobung. Verbundvorhaben gefördert vom Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI)*
- [75] DIN IEC. DIN EN IEC 61980: 15. Januar 2021, *Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [76] International Organization for Standardization. ISO 19363:2020: 04.2020, *Electrically propelled road vehicles — Magnetic field wireless power transfer — Safety and interoperability requirements*: International Organization for Standardization. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/73547.html>
- [77] Hybrid - EV Committee. SAE J2847/6: 20. Oktober 2020, *Communication for Wireless Power Transfer Between Light-Duty Plug-in Electric Vehicles and Wireless EV Charging Stations*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International
- [78] DIN ISO. DIN ISO 15118: 08.2019, *Straßenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [79] IEEE Standards Association. IEEE C95.1-2019: 8. Februar 2019, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*: IEEE. Verfügbar unter: https://standards.ieee.org/standard/C95_1-2019.html
- [80] DIN IEC. DIN EN 62827: 07.2018, *Drahtlose Energieübertragung - Management*. Berlin: Beuth
- [81] DIN IEC. DIN EN 63028: 08.2018, *Wireless Power Transfer - AirFuel Resonant Baseline System Specification*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [82] Hybrid - EV Committee. SAE J2954: 9. April 2015, *Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International
- [83] DIN ISO. DIN ISO 15149-2: 05.2015, *Informationstechnik - Telekommunikation und Informationsaustausch zwischen Systemen -*

- Magnetfeldnetz (MFAN) - Teil 2: Bandinternes Kontrollprotokoll für die kabellose Energieübertragung.* Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [84] Hybrid - EV Committee. J1773: 5. Juni 2014, *SAE Electric Vehicle Inductively Coupled Charging*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International
- [85] Hybrid - EV Committee. J2836/6: 3. Mai 2013, *Use Cases for Wireless Charging Communication for Plug-in Electric Vehicles*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International
- [86] DKE. *DKE/AK 351.1.13 Elektrische Straßensysteme* [online], 2020 [Zugriff am: 23. April 2021]. Verfügbar unter: <https://www.dke.de/de/ueber-uns/dke-organisation-auftrag/dke-fachbereiche/dke-gremium?id=3008409&type=dke%7Cgremium>
- [87] AMDITIS, A., G. KARASEITANIDIS, I. DAMOUSIS, P. GUGLIELMI und V. CIRIMELE. Dynamic Wireless Charging for More Efficient FEVs: The Fabric Project Concept. In: *MedPower 2014: Institution of Engineering and Technology*, 2. November 2014, 29 (6.)-29 (6.). ISBN 978-1-78561-146-9
- [88] W. HALLING, M. Design, Construction, and Maintenance of Electrified Roadways. In: *CERV_2018 5th Annual Conference On Electric Roads & Vehicles*, 2018
- [89] LIMB, B.J., Z.D. ASHER, T.H. BRADLEY, E. SPROUL, D.A. TRINKO, B. CRABB, R. ZANE und J.C. QUINN. Economic Viability and Environmental Impact of In-Motion Wireless Power Transfer [online]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(1), S. 135-146. Verfügbar unter: doi:10.1109/TTE.2018.2876067
- [90] SPROUL, E., D.A. TRINKO, Z.D. ASHER, B. LIMB, T.H. BRADLEY, J.C. QUINN und R. ZANE. Electrification of Class 8 Trucking: Economic Analysis of In-Motion Wireless Power Transfer Compared to Long-Range Batteries. In: *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*: IEEE, 13. Juni 2018 - 15. Juni 2018, S. 744-748. ISBN 978-1-5386-3048-8
- [91] ONER, O., C. STEVEN, S. LARRY, W. CLIFF, C. MADHU, T. LIXIN, C. PAUL, O. BURAK und S. DAVID. *Oak Ridge National*

- Laboratory Wireless Charging of Electric Vehicles – CRADA Report*, 06.20.2016
- [92] OLSSON, O. *Inductive_project_report_Draft_phase_1_2013-10-22*
- [93] FRANKE, J. und F. RISCH. *Machbarkeitsstudie zum kontaktlosen Laden von Elektromobilen (E|ROAD)*, 2011
- [94] FRANKE, J. und F. RISCH. *Geschäftspotenziale durch kontaktlose Energieübertragung in Elektromobile*
- [95] RUSSER, J.A., M. HAIDER, M. WEIGELT, M. BECHERER, S. KAHLERT, c. MERZ, M. HOJA, J. FRANKE und P. RUSSER. *A System for Wireless Inductive Power Supply of Electric Vehicles while Driving Along the Route*. In: *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*: IEEE, 2017, S. 128-133. ISBN 9781538610688
- [96] AUTOMOTIVE COUNCIL UK und ADVANCED PROPULSION CENTRE UK. *Power Electronics Roadmap*, 2018
- [97] WEIGELT, M., M. MASUCH, A. MAYR, A. KÜHL und J. FRANKE. *Automated and Flexible Production of Inductive Charging Systems as an Enabler for the Breakthrough of Electric Mobility*. In: R. SCHMITT und G. SCHUH, Hg. *Advances in Production Research. WGP 2018.*: Springer, 2019
- [98] CIRIMELE, V. *Design and integration of a dynamic IPT system for automotive applications*. Politecnico di Torino
- [99] BRAESS, H.-H. und U. SEIFFERT. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-658-01690-6
- [100] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4661: 08.2014, *Energiekenngrößen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [101] LIEBL, J., M. LEDERER, K. ROHDE-BRANDENBURGER, J.-W. BIERMANN, M. ROTH und H. SCHÄFER, Hg. *Energiemanagement im Kraftfahrzeug. Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2014. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-658-04450-3
- [102] PHILIPP REUPOLD. *Lösungsraumanalyse für Hauptantriebsstränge in batterieelektrischen Straßenfahrzeugen*, 2012

- [103] KNOCHE, T.M. *Elektrolytbefüllung prismatischer Lithium-Ionen-Zellen*. Dissertation. München: UTZVERLAG, 2017. ISBN 978-3-8316-7383-4
- [104] PISTOIA, G. und B. LIAW. *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*. Cham: Springer International Publishing, 2018. ISBN 978-3-319-69949-3
- [105] WINTER, M. und R.J. BRODD. What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? [online]. *Chemical Reviews*, 2004, **104**(10), S. 4245-4270. ISSN 0009-2665. Verfügbar unter: doi:10.1021/cro20730k
- [106] GOODENOUGH, J.B. Battery Components, Active Materials for. In: R.A. MEYERS, Hg. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. New York, NY: Springer New York, 2012, S. 739-768. ISBN 978-0-387-89469-0
- [107] VÄYRYNEN, A. und J. SALMINEN. Lithium ion battery production [online]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2012, **46**, S. 80-85. ISSN 00219614. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jct.2011.09.005
- [108] VOLKSWAGEN AG. *Werk Braunschweig wird Zentrum für Batteriesysteme* [online]. *Aufbau eines MEB Batteriesystems.*, 8. November 2019. Verfügbar unter: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/suche?query=Batteriesystem&type=image&utf8=%E2%9C%93>
- [109] MARQUARDT GMBH. *LANG LEBE DIE BATTERIE!* [online]. *Strecke machen mit Marquardt: Innovatives System bringt E-Motoren auf Touren*. Verfügbar unter: <https://www.marquardt.com/magazin/batteriemanagementsystem/>
- [110] HENKEL ADHESIVES. *Electric Vehicle Battery Systems* [online]. *Key challenges and solutions for EV battery systems*. Verfügbar unter: <https://www.henkel-adhesives.com/lv/en/industries/automotive/emobility/electric-vehicle-battery-systems.html>
- [111] ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG BADEN-WÜRTTEMBERG. *Batteriesystemtechnik* [online]. Verfügbar unter: https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/Bilder/Akkumulatoren/Batteriesystemtechnik_Zelle.png

- [112] KORTHAUER, R. *Handbook Lithium-Ion Batteries*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. ISBN 978-3-662-53071-9
- [113] MICHAELIS, S., E. RAHIMZEI, A. KAMPKER, H. HEIMES, C. LIENEMANN, C. OFFERMANN, M. KEHRER, A. THIELMANN, T. HETTESHEIMER, C. NEEF, A. KWADE, W. HASELRIEDER, S. RAHLFS, R. UERLICH und N. BOGNAR. *Roadmap-Batterieproduktionsmittel 2030. Update 2018*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH, 2018
- [114] MANTHIRAM, A. A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry [online]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1), S. 1550. ISSN 2041-1723. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41467-020-15355-0
- [115] GARCHE, J. *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Amsterdam: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-444-52093-7
- [116] TRACY, D. *An Extremely Detailed Look At The Porsche Taycan's Engineering Designed To Take On Tesla* [online] [Zugriff am: 17. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://jalopnik.com/an-extremely-detailed-look-at-the-porsche-taycans-engin-1837802533>
- [117] THIELMANN, A., C. NEEF, T. HETTESHEIMER, H. DÖRSCHER, M. WIETSCHEL und J. TÜBKE. *Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien*. Karlsruhe, 2017
- [118] REDONDO-IGLESIAS, E., P. VENET und S. PELISSIER. Efficiency Degradation Model of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, **55**(2), S. 1932-1940. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2018.2877166
- [119] HARLOW, J., X. MA, J. LI, E. LOGAN, Y. LIU, N. ZHANG, L. MA, S. GLAZIER, M. CORMIER, M. GENOVESE, S. BUTEAU, A. CAMERON, J. STARK und J. DAHN. A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies [online]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2019, **166**, S. A3031-A3044. Verfügbar unter: doi:10.1149/2.0981913jes
- [120] DUONG, H., J. SHIN und Y. YUDI. *Dry electrode coating technology*. Denver, Colorado, USA, Jun. 2018. 48th Power Sources Conference

- [121] DAI, Q., J.C. KELLY, J. DUNN und P.T. BENAVIDES. *Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model*, Oktober 2018
- [122] RAPP, M., M. MUNDSZINGER, S. FARSI, U. GOLLA-SCHINDLER, U. KAISER und M. WACHTLER. *Herstellung und Bewertung mechanisch gerundeter Graphite als Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien*. Frühjahrstagung 2016 des Arbeitskreises Kohlenstoff 26. April 2016, Meitingen. Ulm, 2016
- [123] KURZWEIL. *Elektrochemische Speicher*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN 978-3-658-10899-1
- [124] MELIN, H.E. *Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it*, 07.2019
- [125] DUNN, J.B., L. GAINES, M. BARNES, M. WANG und J. SULLIVAN. Material and energy flows in the materials production, assembly, and end-of-life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle [online], 2012. Verfügbar unter: doi:10.2172/1044525
- [126] EMILSSON, E. und L. DAHLLÖF. *Lithium-Ion Vehicle Battery Production*, November 2019
- [127] DAI, Q., J.C. KELLY, L. GAINES und M. WANG. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications [online]. *Batteries*, 2019, 5(2), S. 48. Verfügbar unter: doi:10.3390/batteries5020048
- [128] AL BARAZI, S. *DERA Rohstoffinformationen Rohstoffrisikobewertung – Kobalt*. Berlin, 2018
- [129] ZHENG, X., Z. ZHU, X. LIN, Y. ZHANG, Y. HE, H. CAO und Z. SUN. A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries [online]. *Engineering*, 2018, 4(3), S. 361-370. ISSN 20958099. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eng.2018.05.018
- [130] NYKVIST, B. und M. NILSSON. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles [online]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(4), S. 329. ISSN 1758-6798. Verfügbar unter: doi:10.1038/nclimate2564
- [131] BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE, MCKINSEY & COMPANY. *AN INTEGRATED PERSPECTIVE ON THE FUTURE OF MOBILITY*, Oktober 2016

- [132] BLOOMBERGNEF. *Hitting the EV Inflection Point. Electric vehicle price parity and phasing out combustion vehicle sales in Europe*, 05.2021
- [133] JEAN JACQUES, C. *Hydrogen? Is that safe?* [online], 5. August 2015 [Zugriff am: 21. März 2021]. Verfügbar unter: <https://blog.toyota.eu/safety/hydrogen-is-that-safe/>
- [134] MATZ, S., HORLBECK, L, FICHT, ANDREA, J. FUCHS, P. BURDA, R. ECKL und M. LIENKAMP. *Description of the modeling style and parameters for electric vehicles in the concept phase*, 04.2016
- [135] TOYOTA. *2017 Mirai Product Information*, 2017
- [136] TOYOTA. *Outline of the Mirai* [online], 2018 [Zugriff am: 26. Mai 2020]. Verfügbar unter: https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf
- [137] KURZWEIL, P. *Brennstoffzellentechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN 978-3-658-00084-4
- [138] HYDROGENIOUS. *Wasserstoffhandhabung leicht gemacht* [online], 2020 [Zugriff am: 24. Juli 2020]. Verfügbar unter: <https://www.hydrogenious.net/index.php/de/hydrogen-2/>
- [139] RIVARD, E., M. TRUDEAU und K. ZAGHIB. Hydrogen Storage for Mobility: A Review [online]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, **12**(12). ISSN 1996-1944. Verfügbar unter: doi:10.3390/ma12121973
- [140] SIEGFRIED ECKERT. *Druckbehälter mit Potenzial für die Zukunft* [online], 2014 [Zugriff am: 20. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/druckbehaelter-mit-potenzial-fuer-die-zukunft-a-455697/>
- [141] BOUREIMA, F.-S., V. WYNEN, N. SERGEANT, H. ROMBAUT, M. MESSAGIE und J. VAN MIERLO. *Clean Vehicles Research: LCA and Policy Measures. LCA report*. Brussel
- [142] FRIES, M., M. KERLER, S. ROHR, S. SCHICKRAM, M. SINNING und M. LIENKAMP. *An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership. Update 2017*. Garching, 2017

- [143] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Fuel Cell Technologies Office. Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan*, 2012
- [144] RECHBERGER, J. Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie. In: G.P. MERKER und R. TEICHMANN, Hg. *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 391-423. ISBN 978-3-658-19211-2
- [145] BETHOUX, O. Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives [online]. *Energies*, 2020, **13**(21), S. 5843. ISSN 1996-1073. Verfügbar unter: doi:10.3390/en13215843
- [146] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Hg. *Fuel Cell Technologies Program. Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan*, 2016
- [147] MAYUR, M., M. GERARD, P. SCHOTT und W. BESSLER. Lifetime Prediction of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell under Automotive Load Cycling Using a Physically-Based Catalyst Degradation Model [online]. *Energies*, 2018, **11**(8), S. 2054. ISSN 1996-1073. Verfügbar unter: doi:10.3390/en11082054
- [148] REDELBACH, M. und H.E. FRIEDRICH. *Competitive Cost Analysis of Alternative Powertrain Technologies*, März 2012
- [149] KAMPKER, A., P. AYVAZ, C. SCHÖN, P. REIMS und G. KRIEGER. *Produktion von Brennstoffzellensystemen*, April 2020
- [150] VOIGT, S., F. HERRMANN, P. RALLY und C. SACHS. Produktionsprozesse von Komponenten konventioneller und neuer Antriebsstränge. In: FRAUNHOFER INSTITUT FÜR ARBEITSWIRTSCHAFT UND ORGANISATION, DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. – INSTITUT FÜR FAHRZEUGKONZEPTE und IMU INSTITUT, Hg. *Elektromobilität und Beschäftigung. Wirkung der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB)*, 2012
- [151] UMWELTBUNDESAMT. *Ableitung von Recycling- und Umweltanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrissen bei innovativen Energiespeichern*. Dessau-Roßau, 2016
- [152] CHEN, Y., X. HU und J. LIU. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicles Considering the Detailed Vehicle Components: Comparison and Scenario Analysis in China Based on Different Hydrogen Production Schemes [online]. *Energies*, 2019, **12**(15), S. 3031. ISSN 1996-1073. Verfügbar unter: doi:10.3390/en12153031

- [153] STROPNIK, R., M. SEKAVCNIK, A. LORRIC und M. MORI. Life Cycle Assessment of 1kW PEMFC system with the focus on critical materials. In: *2019 7th International Youth Conference on Energy (IYCE)*: IEEE, 72019, S. 1-7. ISBN 978-1-7281-3923-4
- [154] JAMES, B.D., HUYA-KOUADIO, JENNIE, M., C. HOUCHINS und DESANTIS, DANIEL, A. *Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2016 Update*, 01.2017
- [155] FISCHER, R. *Elektrische Maschinen*. 17., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2017. Hanser-Fachbuch. ISBN 978-3-446-43767-8
- [156] VOLKSWAGEN AG. *MEB Hinterradantrieb* [online], 2019. 22 März 2021, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-auf-dem-40-wiener-motorensymposium-automatisiertes-fahren-hybridantrieb-und-der-start-einer-neuen-era-der-elektromobilitaet-4997>
- [157] MEYER, M. *Elektrische Antriebstechnik. Band 2*. Stromrichter gespeiste Gleichstrommaschinen und voll umrichter gespeiste Drehstrommaschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1987. ISBN 3540170227
- [158] GARBRECHT, F.W. *Auswahl von Elektromotoren - leicht gemacht. Der Weg von der Anwendungsanalyse zum richtig dimensionierten Elektromotor*. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2008. ISBN 9783800729111
- [159] E-MOBIL BW GMBH. *Strukturstudie BWe mobil 2019* [online]. *Transformation durch Elektromobilität und Perspektiven der Digitalisierung*, 2019. Verfügbar unter: <https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Strukturstudie2019.pdf>
- [160] SAPONARA, S., C.H. LEE, N.X. WANG und J.L. KIRTLEY. Electric Drives and Power Chargers: Recent Solutions to Improve Performance and Energy Efficiency for Hybrid and Fully Electric Vehicles [online]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2020, 15(1), S. 73-83. ISSN 1556-6072. Verfügbar unter: doi:10.1109/MVT.2019.2959343

- [161] PARK, H.-J. und M.-S. LIM. Design of High Power Density and High Efficiency Wound-Field Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction [online]. *IEEE Access*, 2019, 7, S. 46677-46685. Verfügbar unter: doi:10.1109/ACCESS.2019.2907800
- [162] YONEY, D. *Munro Talks Tesla Model 3 Motor Magic And Profit Potential* [online], 2019 [Zugriff am: 14. Juli 2020]. Verfügbar unter: <https://insideevs.com/news/341909/munro-talks-tesla-model-3-motor-magic-and-profit-potential/>
- [163] EPSKAMP, T. *Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine*. Karlsruhe: Karlsruhe, 2020
- [164] POPESCU, M., J. GOSS, D.A. STATON, D. HAWKINS, Y.C. CHONG und A. BOGLIETTI. Electrical Vehicles—Practical Solutions for Power Traction Motor Systems [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(3), S. 2751-2762. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2018.2792459
- [165] EVSPECIFICATIONS.COM. *Tesla Model S P100D - Specifications* [online], 2018 [Zugriff am: 15. Mai 2020]. Verfügbar unter: <https://www.evspecifications.com/en/model/399355>
- [166] TESLARATI.COM. *tesla-model-s-weight* [online], 2018 [Zugriff am: 15. Mai 2020]. Verfügbar unter: <https://www.teslarati.com/tesla-model-s-weight/>
- [167] AARNIOVUORI, L., M. NIEMELA, J. PYRHONEN, W. CAO und E.B. AGAMLOH. Loss Components and Performance of Modern Induction Motors. In: *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*: IEEE, 3. September 2018 - 6. September 2018, S. 1253-1259. ISBN 978-1-5386-2477-7
- [168] PELLEGRINO, G., A. VAGATI, B. BOAZZO und P. GUGLIELMI. Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples [online]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 48(6), S. 2322-2332. ISSN 0093-9994. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIA.2012.2227092
- [169] FÜßEL, A. *Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität. Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. Research. ISBN 9783658166960

- [170] FISCHER, P. und M. BRAUN. Innovative electric motors for the future electric powertrain. In: J. LIEBL, Hg. *Der Antrieb von morgen 2017*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017
- [171] MUSK, E. *Tweet* [online], 2018. Verfügbar unter: <https://twitter.com/elonmusk/status/998015873167208448>
- [172] TZSCHEUTSCHLER, R., H. OLBRISCH und W. JORDAN, Hg. *Technologie des Elektromaschinenbaus*. Berlin: Verl. Technik, 1990. ISBN 3-341-00851-9
- [173] TONG, W. *Mechanical Design of Electric Motors*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 9780429145025
- [174] JUNKER, S. Prozesse und Technologien für den Elektromaschinenbau. In: F. KLAUS, V. SCHÖPPNER und G. SPUR, Hg. *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*. München: Hanser, 2014, S. 751. ISBN 9783446436565
- [175] BAST, U., R. BLANK, M. BUCHERT, T. ELWERT, F. FINSTERWALDER, G. HÖRNIG, T. KLIER, S. LANGKAUF, F. MASCHIEDER-WEIDEMANN, J.-O. MÜLLER, C. THÜRIGEN, F. TREFFER und T. WALTER. *Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben. MORE (Motor Recycling)*
- [176] BAILEY, G., N. MANCHERI und K. VAN ACKER. Sustainability of Permanent Rare Earth Magnet Motors in (H)EV Industry [online]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2017, 3(3), S. 611-626. ISSN 2199-3823. Verfügbar unter: doi:10.1007/s40831-017-0118-4
- [177] NORDELÖF, A. A Scalable Life Cycle Inventory of an Electrical Automotive Traction Machine. Technical and Methodological Description, 2017
- [178] THOMES, P., A. KAMPKER, D. VALLÉE, A. SCHNETTLER und G. KASPERK. Grundlagen. In: A. KAMPKER, D. VALLÉE und A. SCHNETTLER, Hg. *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 5-59. ISBN 978-3-642-31985-3
- [179] SPECIVIUS, J. *Grundkurs Leistungselektronik. Bauelemente, Schaltungen und Systeme*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009. ISBN 978-3-8348-9995-8

- [180] JOHN G. HAYES und G. ABAS GOODARZI. *Electric Powertrain. Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*: John Wiley & Sons Ltd., 2018
- [181] SPATH, D., F. ROTHFUSS, F. HERRMANN, S. VOIGT, M. BRAND, S. FISCHER, T. ERNST, H. ROSE und M. LOLEIT. *Strukturstudie BWe mobil 2011. Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität*. Stuttgart, 2011
- [182] YUMIYA, H., M. KIZAKI und H. ASAI. Toyota Fuel Cell System (TFCS) [online]. *World Electric Vehicle Journal*, 2015, 7(1), S. 85-92. Verfügbar unter: doi:10.3390/wevj7010085
- [183] KARIN, B. *Driving electromobility and energy efficiency forward: Infineon on board the VW ID.4 USA Tour* [online], 2. August 2021. Verfügbar unter: <https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2021/INFATV202108-088.html>
- [184] REIMERS, J., L. DORN-GOMBA, C. MAK und A. EMADI. Automotive Traction Inverters: Current Status and Future Trends [online]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4), S. 3337-3350. ISSN 0018-9545. Verfügbar unter: doi:10.1109/TVT.2019.2897899
- [185] ERICKSON, R., D. MAKSIMOVIC, K. AFRIDI, D. JONES, D. FRIEDRICHS, H. KIM, U. ANWAR, J. ZHU, K. OLEJNICZAK, B. PASSMORE und T. MCNUTT. *A Disruptive Approach to Electric Vehicle Power Electronics Final Report*, 2017
- [186] HOFMANN, M. *Evaluation of potentials for Infineon SiC-MOSFETs in automotive inverter applications. Drive-Cycle Efficiency*, 2017
- [187] FELDMANN, K. *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte. Design, Konzepte, Strategien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. VDI-Buch. ISBN 9783540879701
- [188] EE TIMES STAFF. *The Challenges for SiC Power Devices* [online], 2019 [Zugriff am: 24. Juni 2020]. Verfügbar unter: <https://www.eetimes.eu/the-challenges-for-sic-power-devices/>
- [189] HILLERINGMANN, U. *Silizium-Halbleitertechnologie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN 978-3-658-23443-0

- [190] NORDELÖF, A., M. ALATALO und M.L. SÖDERMAN. A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I: design and composition [online]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, **52**(2), S. 1305. ISSN 0948-3349. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11367-018-1503-3
- [191] BEAURENAUT, L. Principal Engineer bei der Infineon Technologies AG. *SiC für die Automobilelektronik* [online], 20. April 2017 [Zugriff am: 24. Juni 2020]. Verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/sic-fuer-die-automobilelektronik/>
- [192] PISCHINGER, S. und U. SEIFFERT. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN 978-3-658-09527-7
- [193] JB STRAUBEL. *An Engineering Update on Powertrain 1.5* [online], 2008 [Zugriff am: 1. Juli 2021]. Verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_DE/blog/engineering-update-power-train-15
- [194] TESLA MOTORS. *Model 3 Owners Guide*, 2018
- [195] LAMBERT, F. *Tesla Model 3 teardown gives incredible look at the electric powertrain* [online], 2018 [Zugriff am: 14. Juli 2020]. Verfügbar unter: <https://electrek.co/2018/07/26/tesla-model-3-teardown-electric-powertrain/>
- [196] TSCHÖKE, H., Hg. *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ATZ / MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-658-04644-6
- [197] FRITZ KLOCKE, C.B. *Zahnrad- und Getriebetechnik. Auslegung – Herstellung – Untersuchung – Simulation*, 2017. ISBN 978-3-446-43068-6
- [198] NOTTER, D.A., M. GAUCH, R. WIDMER, P. WÄGER, A. STAMP, R. ZAH und H.-J. ALTHAUS. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles [online]. *Environmental science & technology*, 2010, **44**(17), S. 6550-6556. ISSN 0013-936X [Zugriff am: 21. März 2020]. Verfügbar unter: doi:10.1021/es903729a
- [199] HELMERS, E., J. DIETZ und M. WEISS. Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions [online]. *Sustainability*, 2020, **12**(3), S. 1241. Verfügbar unter: doi:10.3390/su12031241

- [200] LINDEMANN, U. *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-01422-2
- [201] VOIGT, K.-I. *Industrielles Management. Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-25648-9
- [202] BINDER, V.A. und J. KANTOWSKY. *Technologiepotentiale*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1996. ISBN 978-3-8244-0282-3
- [203] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3780: 09.2000, *Technikbewertung Begriffe und Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [204] SCHNEIDER, E. *Integrative Ansätze der Technologiebewertung*. Hamburg: Diplom.de, 2003. ISBN 9783832475543
- [205] PFEIFFER, S. und H.-G. SERVATIUS. Ganzheitliche und Evolutionsorientierte Technologiebewertung. In: *Technologiefrühaufklärung. Identifikation und Bewertung von Ansätzen zukünftiger Technologien*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1992. ISBN 3-7910-0604-5
- [206] RAPP, F. *Normative Technikbewertung: Wertprobleme der Technik und die Erfahrungen mit der VDI-Richtlinie 3780*: Edition Sigma, 1999. Technik - Gesellschaft - Natur. ISBN 9783894044695
- [207] KRÖLL, M. *Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2007. Heimsheim: Jost-Jetter-Verl., 2007. IPA-IAO Forschung und Praxis. 468. ISBN 9783939890263
- [208] Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 14040: 2009, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [209] HALL, K. *Ganzheitliche Technologiebewertung. Ein Modell zur Bewertung unterschiedlicher Produktionstechnologien*. Dissertation. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2002. ISBN 978-3-8244-0664-7
- [210] GELDERMANN, J. *Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1999. Als Ms. gedr. Düsseldorf, 1999. Fortschritt-Berichte VDI. Nr. 105. ISBN 3183105160

- [211] ZIMMERMANN, H.-J. und L. GUTSCHE. *Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften. ISBN 978-3-642-58198-4
- [212] LOHRER, J. *Datenbasierte Methoden zur Praediction des Trips und des Fahrprofils*. Dissertation. München, 2018
- [213] JÖHRENS, J. und H. HELMS. *Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen*, 1. Dezember 2013. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- [214] Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 14044: 02.2021, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [215] HERRMANN, C. *Ganzheitliches Life Cycle Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-01420-8
- [216] MARIO SCHMIDT, A.S. *Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. in Ökobilanzen und Öko-Audits*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995. ISBN 978-3-642-79794-1
- [217] Verein Deutscher Ingenieure, *Kumulierter Energieaufwand (KEA)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [218] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4800: 03.2018, *Ressourceneffizienz*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [219] DIN Deutsches Institut für Normen. 14067: Februar 2019, *Treibhausgase*. Berlin: Beuth Verlag GmbH [Zugriff am: 10. Februar 2020]
- [220] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, 2013. ISBN 978-1-107-66182-0
- [221] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 2884: 12.2005, *Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

- [222] ELLRAM, L.M. Total Cost of Ownership: An Analysis Approach for Purchasing [online]. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 1995, 25(8), S. 4-23. ISSN 0960-0035. Verfügbar unter: doi:10.1108/09600039510099928
- [223] NORRIS, G.A. Integrating life cycle cost analysis and LCA [online]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2001, 6(2), S. 118-120. ISSN 0948-3349. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF02977849
- [224] QUENTIN DE CLERCK, TOM VAN LIER, PHILIPPE LEBEAU, MAARTEN MESSAGIE LIESELOT VANHAVERBEKE₁, CATHY MACHARIS und JOERI VAN MIERLO. How Total is a Total Cost of Ownership? *World Electric Vehicle Journal*, 2016
- [225] PFEIFFER, W., G. METZE, W. SCHNEIDER und R. AMLER. *Technologie-Portfolio zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder*. 6., durchges. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht, 1991. Innovative Unternehmensführung. Bd. 7. ISBN 3525125550
- [226] SPECHT, G. und C. BECKMANN. *F & E-Management*. Stuttgart: Schaeffer-Poeschel, 1996. ISBN 3-8252-8112-4
- [227] BUGDAHL, V. *Methoden der Entscheidungsfindung*. Würzburg: Vogel, 1990. Management Wissen. ISBN 3802304160
- [228] HABERFELLNER, R. und W.F. DAENZER, Hg. *Systems Engineering. Methodik und Praxis*. 11., durchges. Aufl. Zürich: Verl. Industrielle Organisation, 2002. ISBN 385743998X
- [229] KREITLEIN, S. *Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Dissertation. Erlangen-Nürnberg, 2016
- [230] PERO, F.D., M. DELOGU und M. PIERINI. Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car [online]. *Procedia Structural Integrity*, 2018, 12, S. 521-537. ISSN 24523216. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.prostr.2018.11.066
- [231] NORDELÖF, A., M. MESSAGIE, A.-M. TILLMAN, M. LJUNGGREN SÖDERMAN und J. VAN MIERLO. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? [online]. *The International*

- Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, **19**(11), S. 1866-1890. ISSN 0948-3349. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11367-014-0788-0
- [232] WU, G., A. INDERBITZIN und C. BENING. Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments [online]. *Energy Policy*, 2015, **80**, S. 196-214. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2015.02.004
- [233] LOMBARDI, L., L. TRIBIOLI, R. COZZOLINO und G. BELLA. Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA. *Int J Life Cycle Assess*, 2017, **22**, S. 1989-2006
- [234] LIN, C., T. WU, X. OU, Q. ZHANG, X. ZHANG und X. ZHANG. Life-cycle private costs of hybrid electric vehicles in the current Chinese market [online]. *Energy Policy*, 2013, **55**, S. 501-510. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2012.12.037
- [235] HURTIG, O.(. *Techno-ökonomischer Vergleich des Einsatzes von Strom, SNG und FT-Diesel aus Waldrestholz im Pkw-Bereich*. Dissertation. Karlsruhe, 15. Oktober 2013
- [236] HAWKINS, T.R., B. SINGH, G. MAJEAU-BETTEZ und A.H. STRØMMAN. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles [online]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, **17**(1), S. 53-64. ISSN 10881980. Verfügbar unter: doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x
- [237] BALIEU, R., F. CHEN und N. KRINGOS. Life cycle sustainability assessment of electrified road systems [online]. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, **20**(sup1), S. 19-33. ISSN 1468-0629. Verfügbar unter: doi:10.1080/14680629.2019.1588771
- [238] TRAUT, E., C. HENDRICKSON, E. KLAMPFL, Y. LIU und J.J. MICHALEK. Optimal design and allocation of electrified vehicles and dedicated charging infrastructure for minimum life cycle greenhouse gas emissions and cost [online]. *Energy Policy*, 2012, **51**, S. 524-534. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2012.08.061
- [239] SHEN, W., W. HAN, D. CHOCK, Q. CHAI und A. ZHANG. Well-to-wheels life-cycle analysis of alternative fuels and vehicle technologies in China [online]. *Energy Policy*, 2012, **49**, S. 296-307. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2012.06.038

- [240] KREYENBERG, D. *Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN 978-3-658-14283-4
- [241] LI, M., X. ZHANG und G. LI. A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis. *Energy*, 2016, **94**, S. 693-704
- [242] WULF, C. und M. KALTSCHMITT. Interdisziplinäre Aspekte der Energiewirtschaft. Wasserstoff als Kraftstoff im Deutschen Verkehrssektor. In: C.C. von WEIZSÄCKER, D. LINDENBERGER und F. HÖFFLER, Hg. *Interdisziplinäre Aspekte der Energiewirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 251-265. ISBN 978-3-658-12725-1
- [243] HOQUE, N., W. BISWAS, I. MAZHAR und I. HOWARD. Environmental Life Cycle Assessment of Alternative Fuels for Western Australia's Transport Sector [online]. *Atmosphere*, 2019, **10**(7), S. 398. Verfügbar unter: doi:10.3390/atmos10070398
- [244] BÜNGER, U., H. LANDINGER, W. WEINDORF, R. WURSTER, J. ZERHUSEN und W. ZITTEL. *Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in LKW im Fernverkehr. EINE EXPERTISE FÜR DIE OPEN GRID EUROPE GMBH | ABSCHLUSSBERICHT*. Eine Expertise für die Open Grid Europe GmbH. Ottobrunn, Mai 2016
- [245] PINHEIRO MELO, S., A. BARKE, F. CERDAS, C. THIES, M. MENNENGA, T.S. SPENGLER und C. HERRMANN. Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies—Challenges, Methods and Tools [online]. *Sustainability*, 2020, **12**(14), S. 5663. Verfügbar unter: doi:10.3390/su12145663
- [246] MA, H., F. BALTHASAR, N. TAIT, X. RIERA-PALOU und A. HARRISON. A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles [online]. *Energy Policy*, 2012, **44**, S. 160-173. ISSN 03014215. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enpol.2012.01.034
- [247] TOBER, W. *Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor. Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. Praxisberichte ÖVK. ISBN 9783658136017
- [248] ARYANPUR, V. und E. SHAFIEI. *Evaluating Alternative Fuel Vehicles from Technical, Environmental and Economic Perspectives: Case of Light-Duty Vehicles in Iran*, 2012

- [249] GIRARDI, P., A. GARGIULO und P.C. BRAMBILLA. A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study [online]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20, S. 1127-1142. ISSN 0948-3349. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11367-015-0903-x
- [250] HELD, M., R. GRAF, WEHNER DANIEL, S. ECKERT, M. FALTENBACHER, S. WEIDNER und O. BRAUNE. *Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen. Abschlussbericht*, 2016
- [251] HELMS, H., J. JÖHRENS, C. KÄMPER, J. GIEGRICH, A. LIEBICH, R. VOGT und U. LAMBRECHT. *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*. Dessau-Roßlau, April 2016
- [252] WOLFF, S., M. FRIES und M. LIENKAMP. Technoecological analysis of energy carriers for long-haul transportation [online]. *Journal of Industrial Ecology*, 2019, S. 1-13. ISSN 10881980. Verfügbar unter: doi:10.1111/jiec.12937
- [253] ATHANASOPOULOU L., H. BIKAS und STAVROPOULOS P. Comparative Well-to-Wheel Emissions Assessment of Internal Combustion Engine and Battery Electric Vehicle [online]. *Procedia CIRP*, 2017, 78, S. 25-30. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2017.04.009
- [254] FAY, T.-A. *Methodischer Technologievergleich von Systemkonzepten für die Elektrifizierung von Stadtbussen*. Doctoral Thesis. Berlin, 2019
- [255] ORECCHINI F., SANTIANGELI A. und F. ZUCCARI. Real Drive Well-to-wheel Energy Analysis of Conventional and Electrified Car Powertrains. *Energies*, 2020, 13
- [256] GAO, L. *Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Impacts of Advanced Vehicles*, 2012
- [257] VANHAVERBEKE, L., D. SCHREURS, Q. de CLERCK, M. MESSAGIE und J. VAN MIERLO. Total cost of ownership of electric vehicles incorporating Vehicle to Grid technology. In: *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER): IEEE*, 11. April 2017 - 13. April 2017, S. 1-6. ISBN 978-1-5386-1692-5

- [258] SZUMSKA EMILIA, R. JURECKI und M. PAWELCZYK. *Assessment of Total Cost of Ownership for Midsize Passenger Cars with conventional and alternative drive trains*, 2019. 21
- [259] XIONG, S., J. JI und X. MA. Comparative Life Cycle Energy and GHG Emission Analysis for BEVs and PhEVs: A Case Study in China [online]. *Energies*, 2019, **12**(5). ISSN 1996-1073. Verfügbar unter: doi:10.3390/en12050834
- [260] NORDELÖF, A., M. ROMARE und J. TIVANDER. Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel [online]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, **75**, S. 211-222. ISSN 1361-9209. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trd.2019.08.019
- [261] SHIMIZU, O., N. SAKAHISA, F. TOSHIYUKI und H. FUJIMOTO. Potential for CO₂ reduction by Dynamic Wireless Power Transfer for Passenger Vehicles in Japan. *MDPI*, 2020
- [262] HUANG, X., X. LI, X. YUAN, B. HE und J. LI. An Economic Evaluation of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Public Places in China [online]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, **168**. ISSN 1755-1307. Verfügbar unter: doi:10.1088/1755-1315/168/1/012018
- [263] KAMPKER, A., K. KREISKÖTHER, M. BLEINE BÜNING und J.G. DORANTES GÓMEZ. Technological and total cost of ownership analysis of electric powertrain concepts for long-haul transport in comparison to traditional powertrain concepts. In: *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*: IEEE, 2018, S. 1-7. ISBN 978-1-7281-0148-4
- [264] CERDAS, F., P. EGEDE und C. HERRMANN. LCA of Electromobility. In: M.Z. HAUSCHILD, R.K. ROSENBAUM und S.I. OLSEN, Hg. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 669-693. ISBN 978-3-319-56475-3
- [265] MITROPOULOS, L.K., P.D. PREVEDOUROS und P. KOPELIAS. Total cost of ownership and externalities of conventional, hybrid and electric vehicle [online]. *Transportation Research Procedia*, 2017, **24**, S. 267-274. ISSN 23521465. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trpro.2017.05.117

- [266] GRÄBENER, S. *Methodische Entwicklung und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für innerstädtische Nutzfahrzeuge*. Dissertation. Berlin, 2017
- [267] ZHANG, Z., M. MAARTEN, H. OMAR und V.M. JOERI. The environmental performance of different power rate's charging infrastructure for electric vehicles, a life cycle perspective. In: *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*: IEEE, 2017, S. 1-7
- [268] FOLEGA, P. und D. BURCHART-KOROL. Environmental Assessment of Road Transport in a Passenger Car using the Life Cycle Approach APPROACH. *Transport Problems*, 2017, **12**(2), S. 147-153
- [269] HAGMAN, J., S. RITZÉN, J.J. STIER und Y. SUSILO. Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion [online]. *Research in Transportation Business & Management*, 2016, **18**, S. 11-17. ISSN 22105395. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.rtbm.2016.01.003
- [270] SEEBERGER, M. *Der Wandel in der Automobilindustrie hin zur Elektromobilität – Veränderungen und neue Wertschöpfungspotenziale für Automobilhersteller*. Dissertation, 2016
- [271] PROPFE, B. *Marktpotenziale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2016
- [272] SCHÜLLER, M., S. TEWIELE und SCHRAMM D. Alternative Antriebe und Kraftstoffe für die nachhaltige Sicherung der Mobilität mit besonderem Fokus aus Ostasien. In: H. PROFF und T.M. FOJCIK, Hg. *Nationale und internationale Trends in der Mobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 179-200. ISBN 978-3-658-14562-0
- [273] AHMADI, P. und E. KJEANG. Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian provinces [online]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, **40**, S. 12905-12917. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijhydene.2015.07.147

- [274] KLEINER, F., E.D. ÖZDEMİR, S. SCHMID, M. BEERMANN, B. CATAY, B. MORAN, O.T. LIM und H.E. FRIEDRICH. *Electrification of transport logistic vehicles: A technoeconomic assessment of battery and fuel cell electric transporter*, 2015
- [275] HACKER, F. *Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen*. Im Auftrag der Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car-Smart Grid-Smart Traffic, 2015
- [276] ROUSSEAU, A., T. STEPHENS, J. BROKATE, E.D. ÖZDEMİR, M. KLÖTZKE, S. SCHMID, P. PLÖTZ, F. BADIN, J. WARD und O.T. LIM. *Comparison of Energy Consumption and Costs of Different Plug-in Electric Vehicles in European and American Context*, 2015
- [277] SCHULZ, A. *Batterieelektrische Fahrzeuge im gewerblichen Flottenbetrieb*. Dissertation. Berlin, 26. März 2015
- [278] INSTITUT FÜR KRAFTFAHRZEUGE. *Modellierung der zukünftigen elektromobilen Wertschöpfungskette und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Stärkung des Elektromobilitätsstandortes NRW. Abschlussbericht*, 09.2014
- [279] PÖTSCHER, F., R. WINTER, W. PÖLZ, G. LICHTBLAU, H. SCHREIBER und U. KUTSCHERA. *Ökobilanz alternativer Antriebe - Elektrofahrzeuge im Vergleich*. Wien, 2014
- [280] HARRISON PETE, N. HILL, A. VARMA, S. KOLLAMTHODI, P. SUMMERTON, H. POLLITT und S. BILLINGTON. *An economic assessment of low carbon vehicles*, 2013
- [281] COONEY, G. Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses [online]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(5). ISSN 10881980. Verfügbar unter: doi:10.1111/jiec.12024
- [282] BARTOLOZZI, I. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy [online]. *Applied Energy*, 2013, 101, S. 103-111. ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apenergy.2012.03.021
- [283] MICHAELIS, J. und PFAHL. Vergleich alternativer Antriebstechnologien Batterie-, Plug-in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug. In: W. FICHTER, Hg. *Workshops am KIT*, 8. März 2012, S. 51-80. ISBN 978-3-86644-944-2

- [284] HELMERS ECKARD und MARX PATRICK, Hg. *Electric cars: technical characteristics and environmental impacts*, 2012
- [285] HILL, N., A. VARMA, J. HARRIES, J. NORRIS und D. KAY. *A review of the efficiency and cost assumptions for road transport vehicles to 2050*, 2012
- [286] PROPFE, B., M. REDELBACH, D.J. SANTINI und H. FRIEDRICH. Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. *World Electric Vehicle Journal*, 2012, **Vol. 5**
- [287] KASTEN, P., W. ZIMMER und S. LEPLER. *CO₂-Minderungspotenziale durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten*. Ergebnisbericht im Rahmen des Projektes „Future Fleet“ AP 2.7, 2011
- [288] CONTESTABILE, M., G.J. OFFER, R. SLADE, F. JAEGER und M. THOENNES. Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. Which will be the winner? [online]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(10), S. 3754-3772. ISSN 1754-5692. Verfügbar unter: doi:10.1039/c1ee01804c
- [289] HELMS H., M. PEHNT, U. LAMBRECHT und A. LIEBICH. *Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions*, 2010
- [290] LINDA GAINES AND PAUL NELSON. *Lithium-Ion Batteries: Examining Material Demand and Recycling Issues*, 2013
- [291] BERTRAM, M. und S. BONGARD. *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr. Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich*. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg, 2014. ISBN 9783658022648
- [292] GREEN-MOTORS.DE. *Tesla Model S: Das wiegen die einzelnen Bauteile des Stromers* [online] [Zugriff am: 7. September 2018]. Verfügbar unter: <https://www.green-motors.de/news/1406182416-tesla-model-s-das-wiegen-die-einzelnen-bauteile-des-stromers>
- [293] HUCHO, W.-H., Hg. *Aerodynamik der stumpfen Körper*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN 978-3-8348-1462-3
- [294] BMW GROUP. *Sustainable Value Report 2018*. München, 2019

- [295] VOLKSWAGEN AG. *Nachhaltigkeitsbericht 2018*. Wolfsburg, 03.2019
- [296] TOYOTA MOTOR CORPORATION. *Sustainability Data Book 2018*. Toyota City, 09.2018
- [297] KFZ-INGENIEURBÜRO BOSKOVSKI & BOSKOVSKI GBR. *Wertbestimmung von Gebrauchtfahrzeugen* [online]. 16 März 2019 [Zugriff am: 18. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://gutachter-kfz.expert/wertbestimmung-von-gebrauchtfahrzeugen/>
- [298] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. *Global technical regulation No. 15 – Global technical regulation on Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)* [online] [Zugriff am: 7. Mai 2018]. Verfügbar unter: https://www.un-ecce.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29gen/wp29glob_registry.html
- [299] DIRK STICHLING. *myTracks - Der GPS-Logger* [online], 2020 [Zugriff am: 9. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://apps.apple.com/de/app/mytracks-der-gps-logger/id358697908>
- [300] SUSKI, P. und K. WIESEN. Einsatz von Sekundärmaterial vs. recyclinggerechtes Design: Diskussion verschiedener End-of-Life-Allokationen unter Berücksichtigung der europäischen Abfallhierarchie [online]. *uwf UmweltWirtschaftsForum*, 2016, 24(1), S. 7-13. ISSN 0943-3481. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00550-016-0395-6
- [301] CHRISTOPH SCHRÖDER. *Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich*. IW-Trends 2/2019, 2019
- [302] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. *Bestandsaufnahme der Straßen des überörtlichen Verkehrs* [online], 1. September 2021 [Zugriff am: 6. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/bestandsaufnahme-strassen-ueberoertlich.html>
- [303] BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN. *Straßenverkehrszählung 2015: Ergebnisse* [online], 2017 [Zugriff am: 27. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-v/2020-2019/v327.html

- [304] WEIß, F. *Optimale Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-22096-9
- [305] FINKEN, T. *Fahrzyklusgerechte Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Aachen, 2011. ISBN 978-3-8440-0607-0
- [306] BINDER, A. *Elektrische Maschinen und Antriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten*. Berlin: Springer, 2012. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-71850-5
- [307] STATON, D. und G. JAMES. *Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & HybridTraction Motors*. Berlin
- [308] KURT MÜHLGRABNER. *Sorglos Laden in der Zukunft. Expert Roundtable der Standortagentur Tirol*. Wiener Neudorf, 20. November 2018
- [309] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB E.V. *Elektroautos auf der Langstrecke: Wie kann das funktionieren?* [online], 2020. 24 Februar 2020 [Zugriff am: 4. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/schnellladen-langstrecke-ladekurven/>
- [310] DOUG KETTLES und RICHARD RAUSTAD. *Electric Vehicle Charging Technologies Analysis and Standards*, Februar 2017
- [311] NANSAI, K., S. TOHNO, M. KONO, M. KASAHARA und Y. MORIGUCHI. Life-cycle analysis of charging infrastructure for electric vehicles [online]. *Applied Energy*, 2001, **70**(3), S. 251-265. ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0306-2619(01)00032-0
- [312] ÖKO-INSTITUT E.V. *Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen*. Anhang zum Schlussbericht. Darmstadt, 2011
- [313] BULACH, W., D. SCHÜLER, G. SELLIN, T. ELWERT und D. SCHMID. *Elektrofahrzeugrecycling 2020. Schlüsselkomponente Leistungselektronik*, 2017
- [314] MIRO HEGEDIC, TIHOMIR OPETUK, GORAN DUKIC und HRVOJE DRASKOVIC. *Life cycle assessment of power transformer-case study*. Zagreb

- [315] SÖREN STEGER, MICHAEL RITTHOFF, WINFRIED BULACH, DORIS SCHÜLER, IZABELA KOSINSKA, STEFANIE DEGREIF, GÜNTER DEHOUST, THOMAS BERGMANN, PETER KRAUSE, RÜDIGER OETJEN-DEHNE. *Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität*. Dessau-Roßlau, 04.2019
- [316] LIENKAMP, M. und F. HOMM. *Status Elektromobilität 2018. Der Kunde wird es entscheiden*, 2018
- [317] GRUBE, T., D. STOLTEN und M. ROBINIUS. *Kosten von Ladeinfrastrukturen für Batteriefahrzeuge in Deutschland*, 2017
- [318] BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT E.V. *BDEW-Strompreisanalyse 2021* [online], 10. Juni 2021 [Zugriff am: 18. Juni 2021]. Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>
- [319] MICHAEL WEIGELT. *E|KPI – Multikriterielle Analyse von Antriebstechnologien der individuellen Langstreckenmobilität* [online], 2021 [Zugriff am: 26. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.faps.fau.de/curforsch/ekpi-multikriterielle-analyse-von-antriebstechnologien-der-individuellen-langstreckenmobilitaet/>
- [320] BENDEL, G. *Grundkurs verteilte systeme. Grundlagen und praxis des client-server-computing - inklusive*. [Place of publication not identified]: Morgan Kaufmann, 2013. ISBN 978-3-8348-1670-2
- [321] SCHICKER, E. *Datenbanken und SQL*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN 978-3-658-16128-6
- [322] MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V. *Verbraucherpreise 2021* [online], 02.2021 [Zugriff am: 5. März 2021]. Verfügbar unter: <https://www.mwv.de/statistiken/verbraucherpreise/>
- [323] WISSENSCHAFTLICHE DIENST DES DEUTSCHEN BUNDESTAGES. *Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff*, 3. April 2020. WD 5 - 3000 - 029/20
- [324] YU, A. und M. SUMANGIL. *Top electric vehicle markets dominate lithium-ion battery capacity growth*, 1. Februar 2021

- [325] KRAFTFAHRTBUNDESAMT. *Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2010 bis 2019 nach technischen Merkmalen*, 2019
- [326] TSCHÖKE, H. und H.-E. HEINZE. Einige unkonventionelle Betrachtungen zum Kraftstoffverbrauch von PKW [online]. *Magdeburger Wissenschaftsjournal*, 2001, S. 11-15. Verfügbar unter: <http://www15.ovgu.de/MWJ/MWJ2001/tschoeke.pdf>
- [327] KORDS, M. *Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch neu zugelassener Personenkraftwagen in Deutschland von 2010 bis 2020* [online], 2021. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/185831/umfrage/kraftstoffverbrauch-von-neuzugelassenen-pkw-in-deutschland/#:~:text=Im%20Jahr%202020%20betrug%20der,ebenfalls%206%2C5%20Liter%20Kraftstoff.>
- [328] WIETSCHEL, M., M. KÜHNBACH und D. RÜDIGER. *Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation*. Karlsruhe, 03.2019
- [329] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. *Baseline Efficiency Analysis of Fossil Fuel Power Plants* [online], 2015 [Zugriff am: 4. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/CES/ge11/CEP.11.2015.INF.4.e.pdf>
- [330] IINAS GMBH – INTERNATIONALES INSTITUT FÜR NACHHALTIGKEITSANALYSEN UND -STRATEGIEN. *GEMIS – Globales Emissions-Modell integrierter Systeme* [online], 2019
- [331] N. SÖNNICHSEN. *Projected electricity generation worldwide from 2018 to 2050, by energy source (in trillion kilowatt hours)* [online], 2020. 9 November 2020, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/238610/projected-world-electricity-generation-by-energy-source/>
- [332] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2020*, 2020
- [333] FORSCHUNGSSTELLE FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT E.V. *Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie. Stromerzeugung in Deutschland*
- [334] LINDE GAS GMBH. *Rechnen Sie mit Wasserstoff. Die Datentabelle*

- [335] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2018*: OECD, 2018. ISBN 9789264302365
- [336] U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral Commodity Summaries 2020*, 31. Januar 2020
- [337] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE. *BGR Energiestudie 2019. Daten und entwicklungen der deutschen und globalen energieverorgung*. Hannover, April 2020
- [338] UMWELTBUNDESAMT. *Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas)* [online] [Zugriff am: 1. Juli 2021]. Verfügbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>
- [339] HELMUT FRISCHENSCHLAGER, BRIGITTE KARIGL, CHRISTOPH LAMPERT, WERNER PÖLZ, ILSE SCHINDLER, MARIA TESAR, HERBERT WIESENBERGER und BRIGITTE WINTER. *Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich*. Wien, 2010
- [340] HAB, G. und R. WAGNER. *Projektmanagement in der Automobilindustrie. Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette*. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN 978-3-658-10471-9
- [341] RTI INTERNATIONAL und TRANSPORTATION RESEARCH INSTITUTE. *Automobile Industry Retail Price Equivalent and Indirect Cost Multipliers*, 2009
- [342] GREG KOLWICH. *Light-Duty Vehicle Technology Cost Analysis – European Vehicle Market (Phase 1)*, 17. Mai 2012
- [343] PACCA, S. und A. HORVATH. Greenhouse gas emissions from building and operating electric power plants in the Upper Colorado River Basin [online]. *Environmental science & technology*, 2002, **36**(14), S. 3194-3200. ISSN 0013-936X [Zugriff am: 9. Oktober 2019]. Verfügbar unter: doi:10.1021/es0155884
- [344] KOST, C., S. SHAMMUGAM, V. JÜLICH, H.-T. NGUYEN und T. SCHLEGL. *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien*, 03.2018
- [345] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. *Marktanalyse Wasserkraft*, 2015
- [346] PROGNOSE AG, Ö.-I.e. *Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken*. Basel, 15. Oktober 2009

- [347] NITSCH, J., T. PREGGER, T. NAEGLER, D. HEIDE, D. LUCA DE TENA, F. TRIEB und SCHOLZ, YVONNE, NIENHAUS, KRISTINA. *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146*, 29. März 2012
- [348] STATISTISCHES BUNDESAMT. *Monatsbericht über die Elektrizitätsversorgung* [online], 2021. 5 März 2021, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/BilanzElektrizitaetsversorgung.html>
- [349] WIETSCHEL, M. und S.J. ULLRICH, Hg. *Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. Lehrbuch. ISBN 978-3-658-07129-5
- [350] WÜRZ, T. *Wireless electric vehicle charging - today and tomorrow*. Wuerzburg, 4. Dezember 2017
- [351] FABRIC CONSORTIUM. *FABRIC. Feasibility analysis and development of on-road charging solutions for future electric vehicles*
- [352] BUNDESVERBAND ENERGIESPEICHER. *Fact Sheet Speichertechnologien. Wasserstoff-Speicherung*, 2016
- [353] NYMOEN STRATEGIEBERATUNG. *Ein Markteinführungsprogramm für Power-To-X-Technologien aus Volkswirtschaftlicher Perspektive*, 12. September 2017
- [354] KREIDELMEYER, S., H. DAMBECK, A. KIRCHNER und M. WÜNSCH. *Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“*, 24. Juni 2021
- [355] TJARKS, G. *Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland*. Karlsruhe, 30. Mai 2018
- [356] FERREIRA-APARICIO, P., J.J. CONDE und A.M. CHAPARRO. *Hydrogen storage options for portable fuel-cell systems*. In: *Portable Hydrogen Energy Systems*: Elsevier, 2018, S. 41-50. ISBN 9780128131282

- [357] NAUSHAUSER, T., M. CORNEILLE, T. SCHMEDING und M. ROBINIUS. *Wasserstoffherzeugung und Märkte Schleswig-Holstein. H₂-Mobilität und Förderrichtlinien Schleswig-Holstein*, 12.2020
- [358] LINDE AG. *450 Bar Wasserstofftankstelle*, 2013
- [359] GÖRGES, D., T. ENGEL, C. RENTSCHLER, J. BRUNSING, S. CABA und W. MANZ. *Tankstelle z.o. Strategie zur nachhaltigen Versorgung von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben in Rheinland-Pfalz*. Kaiserslautern, 18. September 2018
- [360] HOEKSTRA, A. und M. STEINBUCH. *Comparing the lifetime green house gas emissions of electric cars with the emissions of cars using gasoline or diesel*, 2020
- [361] HENZE, V. *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh* [online], 2020 [Zugriff am: 20. März 2021]. Verfügbar unter: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- [362] DUNN, J.B., L. GAINES, J. KELLY, C. JAMES und K. GALLAGHER. The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy Environ. Science*, 2015, S. 158-168
- [363] CHEN, X., Y. CHEN, T. ZHOU, D. LIU, H. HU und S. FAN. Hydrometallurgical recovery of metal values from sulfuric acid leaching liquor of spent lithium-ion batteries [online]. *Waste Management*, 2015, **2015**(38), S. 349-356. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.023>
- [364] CHEN, X., B. XU, T. ZHOU, D. LIU, H. HU und S. FAN. Separation and recovery of metal values from leaching liquor of mixed-type of spent lithium-ion batteries. *Separation and Purification Technology*, 2015, **2015**(144), S. 197-205
- [365] HU, J., J. ZHANG, H. LI, Y. CHEN und C. WANG. A promising approach for the recovery of high value-added metals from spent lithium-ion batteries [online]. *Journal of Power Sources*, 2017, **2017**(351), S. 192-199. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.093>

- [366] CHEN, X., B. FAN, L. XU, T. ZHOU und J. KONG. An atom-economic process for the recovery of high value-added metals from spent lithium-ion batteries [online]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **2016**(112), S. 3562-3570. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615016042?via%3Dihub>
- [367] BUCHERT, M., W. JENSEIT, C. MERZ und D. SCHÜLER. *Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec)*. Darmstadt, 2011
- [368] VDA. *Benchmark Mineral Intelligence. The Current Position of Raw Material Supply*. Belin, 11. Juli 2019
- [369] HUSS, A., H. MAAS und H. HASS. *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Tank-to-wheels (TTW) report, version 4, July 2013*. JEC well-to-wheels analysis. Luxembourg: Publications Office, 2013. EUR, Scientific and technical research series. 26027. ISBN 978-92-79-31195-6
- [370] GOULD, R. *Optimierung von Komponenten der induktiven Energieübertragung und Systemerprobung. Verbundvorhaben gefördert vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)*, 2014
- [371] FABIENNE HABERMACHER. *Modeling material inventories and environmental impacts of electric passenger cars. Comparison of LCA results between electric and conventional vehicle scenarios*. Zürich, 2011
- [372] HEINEMANN, T. *Energy and Resource Efficiency in Aluminium Die Casting*. Cham: Springer International Publishing, 2016. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. ISBN 9783319188140
- [373] UMWELT BUNDESAMT. *Altfahrzeugverwertung und Fahrzeugverbleib* [online] [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#2018-36-mehr-altfahrzeuge-als-2016>
- [374] PAUL R. WINDOVER, RUSSELL J. OWENS, TERRY M. LEVINSON, MICHAEL D. LAUGHLIN. *Stop and restart effects on modern vehicle starting system components*, 2015

- [375] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Was darf eine neue Autobatterie und deren Wechsel in der Werkstatt kosten?* [online], 2019 [Zugriff am: 29. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/autobatterie-kosten>
- [376] LUKAS FARWER. *Lebensdauer eines Stoßdämpfers* [online]. *Infos zu Verschleiß und Haltbarkeit*, 2017 [Zugriff am: 21. November 2019]. Verfügbar unter: https://praxistipps.focus.de/lebensdauer-eines-stosddaempfers-infos-zu-verschleiss-und-haltbarkeit_97874
- [377] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Stoßdämpfer beim VW wechseln* [online]. *Wann, warum und wie hoch sind die Kosten?*, 2020 [Zugriff am: 12. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/vw-stosddaempfer-wechseln>
- [378] VALERIE JOHNSTON. *How Long Do Suspension Springs Last?* [online], 2016 [Zugriff am: 13. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.yourmechanic.com/article/how-long-do-suspension-springs-last>
- [379] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Was kostet es, eine gebrochene Fahrwerksfeder wechseln zu lassen?* [online], 2020 [Zugriff am: 12. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/federn-wechseln-kosten>
- [380] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Radlager wechseln* [online]. *Kosten, Anzeichen, Ablauf und Werkstatttermine*, 2020 [Zugriff am: 13. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/radlager-wechseln-kosten>
- [381] ADAC E.V. *Feste und flexible Wartungsintervalle* [online], 2019 [Zugriff am: 25. November 2019]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/reparatur-pflege-wartung/wartung-inspektion/wartungsintervalle/>
- [382] ADAC E.V. *ADAC - Autokostenberechnung* [online]. *Fahrzeugkosten VW Golf*, 2019
- [383] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Innenraumfilter im Auto wechseln lassen* [online]. *Intervalle, Kosten und Werkstattsuche*, 2020 [Zugriff am: 16. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/innenraumfilter-wechseln>
- [384] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Scheibenwischer wechseln: Wann ist der richtige Zeitpunkt?* [online], 2020 [Zugriff

- am: 16. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/scheibenwischer-wechseln>
- [385] A.T.U AUTO-TEILE-UNGER GMBH & CO. KG. *Wischwasser - Preis* [online], 2020 [Zugriff am: 2. Februar 2020]. Verfügbar unter: https://www.atu.de/shop/Saison-w12247/Wintersaison-w5679/Frostschutzmittel_w5681
- [386] AUTOTEILE RALF SCHMITZ. *Bremsleitung* [online], 2020 [Zugriff am: 2. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.at-rs.de/Bremsleitungen.html>
- [387] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Ein poröser oder gerissener Brems Schlauch wechseln: Anzeichen, Ablauf und Kosten* [online], 2020 [Zugriff am: 16. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/brems-schlauch-wechseln>
- [388] ALLIANZ AG. *Bremsflüssigkeit wechseln* [online]. *Warum das ein Job für den Profi ist*, 2020 [Zugriff am: 16. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.allianz-autowelt.de/werkstatt/bremsfluessigkeit-wechseln/#wieviel>
- [389] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH. *Bremsflüssigkeit wechseln: Kosten in der Werkstatt, Faktoren und Preisvergleich* [online], 2020 [Zugriff am: 16. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.fairgarage.de/bremsfluessigkeit-wechseln-kosten>
- [390] ADAC E.V. *HU und AU: Alles Wissenswerte zum „TÜV“* [online], 2019 [Zugriff am: 17. Februar 2020]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/reparatur-pflege-wartung/hu-und-au/hu-und-au/>
- [391] FRIES, M., S. WOLFF und M. LIENKAMP. Evolutionary Optimization of a Long-Haul Truck Powertrain Design Utilizing a Digital Mock Up. In: *Industrielle Anwendungen der Bionik 2017*, 25. Oktober 2017 - 26. Oktober 2017
- [392] FRIES, M., S. WOLFF, L. HORLBECK, M. KERLER, M. LIENKAMP, A. BURKE und L. FULTON. Optimization of Hybrid Electric Drive System Components in Long-Haul Vehicles for the Evaluation of Customer Requirements. In: *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (IEEE PEDS 2017)*. Hawaii Convention Center, Honolulu, Hawaii, USA, 12-15 December 2017. Piscataway, NJ: IEEE, 2017. ISBN 9781509023653

- [393] WOLFF, S. Erweiterung des Vergleichsgerüsts für die acatech Initiative um ein Basisfahrzeug für Nutzfahrzeuganwendungen. Email vom 21.02.2018, 21. Februar 2018

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] WEIGELT, M., A. MAYR, R. BÖHM, A. KÜHL und J. FRANKE. Quo vehis, Elektromobilität? *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2. März 2018, 2018(1-2), 59-63
- [P2] WEIGELT, M., A. MAYR und J. FRANKE. Vergleich alternativer Technologien zur Reichweitenverlängerung von Elektrofahrzeugen. In: BAYERN INNOVATIV GMBH, Hg. *7th Conference on Future Automotive Technology (CoFAT)*. Focus Electromobility, 2018
- [P3] RUSSER, J.A., M. HAIDER, M. WEIGELT, M. BECHERER, S. KAHLERT, c. MERZ, M. HOJA, J. FRANKE und P. RUSSER. A System for Wireless Inductive Power Supply of Electric Vehicles while Driving Along the Route. In: *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*: IEEE, 2017, S. 128-133
- [P4] WEIGELT, M., A. MAYR, M. MASUCH, K. BATZ, J. FRANKE, P.M. BICAN, A. BREM, J. RUSSER und P. RUSSER. Techno-Economic Evaluation of Strategic Solutions to Extend the Range of Electric Vehicles. In: *EDPC 2018*, 2018
- [P5] WEIGELT, M., M. MASUCH, A. MAYR, A. KÜHL und J. FRANKE. Automated and Flexible Production of Inductive Charging Systems as an Enabler for the Breakthrough of Electric Mobility. In: R. SCHMITT und G. SCHUH, Hg. *Advances in Production Research*. WGP 2018.: Springer
- [P6] MAYR, A., M. WEIGELT, M. MASUCH, M. ADRION, A. BAUER, K. WIRSINGER und J. FRANKE. Sustainability Aspects of Current Market Developments, Different Product Types and Innovative Manufacturing Processes of Electric Motors. In: *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 882, 2018, S. 64-74
- [P7] FRANKE, J., M. WEIGELT, P.M. BICAN und K. BATZ. Analyse der Reichweitenpotenziale elektrischer Fahrzeugantriebe [online]. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2019, 121(5), S. 84-

89. ISSN 0001-2785. Verfügbar unter: doi:10.1007/s35148-019-0041-z

- [P8] WEIGELT, M., A. MAYR, A. KÜHL und J. FRANKE. Methodical comparison of alternative powertrain technologies for long-distance mobility using Germany as an example. *World Electric Vehicle Journal*, 2019

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] BATZ, K. Technisch-wirtschaftliche Evaluation strategischer Konzepte zur Lösung der Reichweitenproblematik von Elektrofahrzeugen. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S2] SUMMA, M. Technisch-wirtschaftliche Evaluation konventioneller und alternativer Antriebstechnologien. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S3] BERLINGER, C. Technisch-wirtschaftliche Evaluation strategischer Mobilitätskonzepte durch quantitative Bewertungen der Ressourcenkritikalität. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S4] MENKE, P. Design- und Produktionsanforderungen einer E|ROAD sowie Quantifizierung der Übertragungseffizienzoptimierung durch die Verwendung von magnetisierbarem Asphalt. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S5] SCHUSTER, C. Sensitivitätsanalysen und Definition leistungsspezifischer Investitionskosten zur Bewertung technologischer Alternativen zur Förderung der Elektromobilität in Deutschland. Projektarbeit. Erlangen, 2019
- [S6] DENGLER, C. Ökonomische Bewertung des Recyclingpotentials von Lithium-Ionen-Batterien im Rahmen der Elektromobilität. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S7] SCHUBERT, J. Erweiterte Lebenszyklusanalyse alternativer Antriebsstrangtechnologien für die individuelle Langstreckenmobilität. Bachelorarbeit. Erlangen, 2019
- [S8] RÜBNER, M. Komponentenorientierte Kostenanalyse alternativer Antriebsstrangtechnologien über den Lebenszyklus. Projektarbeit. Erlangen, 2020
- [S9] SAUER, J. Methodische Analyse der Fertigungsprozessketten alternativer Antriebsstrangkomponenten hinsichtlich Ressourceneinsatz und Energiebedarf. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020

- [S10] MAY, M. Konzeption, Planung und Implementierung eines webbasierten Vergleichs von Antriebstechnologien. Masterarbeit. Erlangen, 2020
- [S11] HEIM, D. Ganzheitliche Lebenszyklusanalyse der Infrastrukturen alternativer Antriebsstrangtechnologien. Bachelorarbeit. Erlangen, 2020

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2022):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hergestoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungs- und Fertigungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionsysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negenandack

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöllner

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ₃₁B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationemethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöllner
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN: 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf

Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert

Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz

Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert

Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel

Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt

Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xxiv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022
ISBN 978-3-96147-607-7.

Abstract

The situation is that battery electric vehicles (BEVs) are increasingly gaining market share over fossil drive technologies. While the use case of urban mobility, with the requirements of short driving distances and local freedom from emissions, is ideally fulfilled by BEVs, different requirements apply to long-distance mobility, such as long driving distances and the absence of energy-related driving stops. The question posed in this thesis is therefore which drive technologies fulfill the requirements of individual long-distance mobility and to what extent.

To address this question, this thesis describes a comparison methodology for drive technologies for individual long-distance mobility, taking infrastructure expenditures into account, which enables reliable and objective evaluation results. The comparison methodology has a three-stage structure and derives technological, ecological and economic key figures from structured framework conditions. Within the problem structuring, the drive technology modeling is performed as well as the application of a dimensioning and apportionment mechanism to distribute required infrastructure expenditures to the vehicle fleet. In the subsequent impact assessment, multidimensional key figures are calculated by a calculation system from quantitative framework conditions, which are finally assembled into a holistic key figure system in the evaluation phase.

The described comparison methodology was furthermore automated within the framework of a web application. The E|KPI web application enables the interactive application of the comparison methodology for the evaluation of the drive technologies of the solution space.

Situation ist, dass batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge (BEV) gegenüber fossilen Antriebstechnologien zunehmend an Marktanteilen gewinnen. Während der Anwendungsfall der urbanen Mobilität, mit den Anforderungen kurze Fahrdistanzen und lokale Emissionsfreiheit, ideal durch BEV erfüllt werden, gelten für die Langstreckenmobilität abweichende Anforderungen, wie lange Fahrdistanzen sowie möglichst ausbleibende energiebedingte Fahrstopps. Fragestellung dieser Arbeit ist daher, welche Antriebstechnologien in welchem Maße die Anforderungen der individuellen Langstreckenmobilität erfüllen.

Um dieser Frage nachzugehen, wird in dieser Arbeit eine Vergleichsmethodik für Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität unter Berücksichtigung von Infrastrukturaufwendungen beschrieben, die verlässliche und objektive Bewertungsergebnisse ermöglicht. Die Vergleichsmethodik ist dreistufig aufgebaut und leitet aus strukturierten Rahmenbedingungen technologische, ökologische und ökonomische Kennzahlenausprägungen ab. Im Rahmen der Problemstrukturierung erfolgt die Antriebstechnologiemodellierung sowie die Anwendung eines Dimensionierungs- und Umlagemechanismus, um erforderliche Infrastrukturaufwendungen auf die Fahrzeugflotte zu verteilen. In der anschließenden Folgenabschätzen werden durch ein Rechensystem aus quantitativen Rahmenbedingungen multidimensionale Kennzahlen berechnet, welche schließlich in der Bewertungsphase zu einem ganzheitlichen Kennzahlensystem assembliert werden.

Die beschriebene Vergleichsmethodik wurde darüber hinaus im Rahmen einer Webapplikation automatisiert. Die EJKPI-Webapplikation ermöglicht die interaktive Anwendung der Vergleichsmethodik zur Bewertung der Antriebstechnologien des Lösungsraums.

