

Ricardo Tiefengruber, BSc

Technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer elektrisch
angetriebenen Logistikplattform für den automatisierten
Verteilerverkehr

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur(in)

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau

Technische Universität Graz

Fachrichtung: Maschinenbau

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of Frank Stronach Institute

Betreuer: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Arno Eichberger

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Fischer

Graz, 23. Oktober 2016

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Arno Eichberger für die Anregung zu dieser Arbeit und seine wissenschaftlich fundierte Betreuung.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Harald Kraus für seine thematischen Ratschläge und zielführenden Hinweise bedanken. Bei der Erstellung der Fahrzeug Simulation in *Matlab Simulink* hat er wesentlich zum Erfolg beigetragen.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Martin Ackerl für seine hilfreichen Vorschläge.

Allen die im Projektteam „MULE“ nützliche Beiträge geleistet haben –neben dem Institut für Fahrzeugtechnik insbesondere das Institut für Technische Logistik (ITL)- bin ich sehr dankbar. Die Zusammenarbeit mit den Kollegen vom ITL Herrn Dipl.-Ing. Michael Schadler und Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. Norbert Hafner war während des ganzen Projektes sehr freundschaftlich und zielorientiert.

Nicht zu vergessen sind an dieser Stelle meine Eltern, die mir dieses Studium erst ermöglicht haben und denen ich sehr viel zu verdanken habe.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

(Unterschrift)

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from used sources.

.....

(Date)

(Signature)

Kurzfassung

Die Verkehrsbelastung im urbanen Raum stellt die Menschen vor neue Herausforderungen und Probleme. Besonders die CO₂ Emissionen bedingt durch den Verkehr wirken sich in Großstädten negativ aus. Ein Teil des Verkehrsaufkommens entfällt dabei auf unternehmerischen Güter- und Zustellverkehr.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit einer elektrisch angetriebenen Logistikplattform für den urbanen Verteilerverkehr. Neben dem Aspekt der Elektrifizierung zur Reduktion der CO₂ Ausstöße soll auch ein realisierbares Konzept für eine Automatisierung der Plattform untersucht und vorgestellt werden. Hemmnisse bei der Einführung elektrifizierter Fahrzeuge sind beim Endkunden subjektiv empfundene kurze Reichweiten, zu hohe Kosten, die weitgehend durch die Batterie verursacht sind sowie langwierige Ladezeiten. Damit stellt sich die Frage ob nicht durch bedarfsgerechte Auslegung des elektrischen Antriebs der Kostennachteil durch kleinere Batterien kompensiert werden kann.

Anhand der zwei gut definierbaren Anwendungen Kurier Express Packet Fahrzeug (3,5 t) und einem 18 t Lastkraftwagen im Verteilerverkehr kann über eine Fahrzeugmodellierung gezeigt werden, dass durch eine bedarfsgerechte Auslegung des Antriebs beachtliche Kosteneinsparungen möglich sind. Dazu werden repräsentative Fahrzyklen beider Fahrzeugklassen im Fahrzeugmodell eingelesen und untersucht. Es zeigt sich, dass durch die Elektrifizierung im Vergleich zu Fahrzeugen mit herkömmlichem Verbrennungsmotor ein deutliches CO₂ Reduktionspotenzial erreichbar ist. Ein weiteres aufgezeigtes Ergebnis zur Kostensenkung des elektrischen Fahrzeugs besteht in der Möglichkeit des Zwischenladens mit Einsparungen bis zu 80%.

Das zusätzlich vorgestellte automatisierte Fahrzeugkonzept besteht aus einem bemannten Zugfahrzeug mit elektronischer Deichsel mit autonomen Folgefahrzeugen. Die Anzahl der Fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) ist dabei variabel und in bestimmten Bereichen (Betriebsgelände, Logistikzentrum) ist ein autonomes Rangieren der Fahrzeuge vorgesehen.

Abstract

Due to congestion in urban areas humans are facing new challenges and problems. Especially the CO₂ emissions caused by traffic has a negative effect in cities. One part of the traffic are the line haul transportations and the last mile deliveries.

The work deals with the technical and economic feasibility of an electrically driven logistics platform for urban distribution. Apart from the aspect of electrification to reduce CO₂ emissions, a viable concept for the platform's autonomization is also researched and presented. Obstructions of the customer in introducing electric driven drivertrains are short ranges, high costs, and long loading times. So the question is, if there is a possibility to construct the drivertrain in the way it is needed to overcome the disadvantages in costs.

On the basis of the two well defined use cases courier express parcel vehicle (3.5 tons) and a lorry with 18 tons in the urban distribution sector a drivertrain model is built. By that is demonstrated, that through construction by these use cases cost reductions are possible. This is realized by representative driving cycles in the drivertrain model. It is also shown, that the electrification leads compared to the combustion engine to enormous CO₂ reductions. Another result is the cost reduction of 80% by making stopover.

The proposed concept has a manned tractor and beside an electric tiller also autonomous episode vehicles. The number of automated guided vehicles is variable, also an autonomous manoeuvring is provided on industrial premises or distribution centers.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Eidesstattliche Erklärung	ii
Kurzfassung	iii
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Abkürzungen	viii
Symbole und Formelzeichen	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung	1
1.2 Motivation und Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Technik Fahrerlose Transportfahrzeuge	3
2.1 Navigation	3
2.1.1 Stützpunkte	4
2.1.2 Physische Leitlinie.....	5
2.1.3 GPS.....	6
2.1.4 Lasernavigation	6
2.1.5 Fahrerassistenzsysteme	6
2.2 Leitsteuerung des FTS.....	7
2.3 Anwendungsbereiche bestehender FTF.....	8
2.3.1 FTF im Innenbereich von Betrieben	8
2.3.2 FTF im Außenbereich von Betrieben	12
2.3.3 FTF für den Gütertransport außerhalb von Betriebsgeländen.....	14
2.4 Rechtliche Bestimmungen.....	16
2.5 Haftung	19
3 Konzept für städtischen Verteilerverkehr	21
3.1 Platooning.....	21
3.2 Patente	22
4 Ladekonzepte von Elektrofahrzeugen.....	23

4.1	Induktionsladen.....	23
4.2	Akkuwechsel.....	23
4.3	Ladekabel.....	24
5	Modellbildung und Simulation.....	26
5.1	Theoretische Grundlagen der Kraftfahrzeug Längsdynamik.....	26
5.2	Simulationsmodell.....	28
5.2.1	Fahrzyklus.....	29
5.2.2	Fahrerregler.....	29
5.2.3	Elektromotor.....	30
5.2.4	Getriebe.....	30
5.2.5	Batterie.....	31
5.2.6	Differential.....	32
5.2.7	Fahrzeug.....	32
5.3	Auswertemethodik.....	32
5.3.1	Motorauslegung.....	32
5.3.2	Masse und Nutzlast.....	34
5.3.3	Energiespeicher.....	35
5.3.4	Energieverbrauch.....	35
5.3.5	Zeitliche Verzögerung.....	36
5.3.6	Reichweite und Mehrkosten.....	37
5.3.7	Energiekosten.....	37
5.3.8	CO ₂ -Ausstoß.....	37
5.3.9	Gesamtkostenberechnung.....	38
5.3.10	Kostenreduktion durch Zwischenladung.....	39
5.3.11	Kostenreduktion durch reale Nutzlast.....	40
6	Simulationsergebnisse und Diskussion.....	41
6.1	3,5 t Fahrzeug.....	41
6.1.1	Motorauslegung.....	42
6.1.2	Masse und Nutzlast.....	45
6.1.3	Energiespeicher.....	46
6.1.4	Energieverbrauch.....	47
6.1.5	Verlängerung der Fahrzeit durch bedarfsgerechte Motorauslegung.....	47
6.1.6	Mehrkosten und Nutzlast über die Reichweite.....	48
6.1.7	Energiekosten.....	49
6.1.8	CO ₂ -Ausstoß.....	50

6.1.9	Gesamtkostenabschätzung	51
6.1.10	Standzeitanalyse.....	52
6.1.11	Kostenreduktion durch Zwischenladen	53
6.1.12	Kostenreduktion durch reale Nutzlast	54
6.2	18 t Fahrzeug.....	54
6.2.1	Motorauslegung	55
6.2.2	Masse und Nutzlast	58
6.2.3	Energiespeicher	59
6.2.4	Energieverbrauch	60
6.2.5	Verlängerung der Fahrzeit durch bedarfsgerechte Motorauslegung	61
6.2.6	Mehrkosten und Nutzlast über die Reichweite.....	61
6.2.7	Energiekosten	62
6.2.8	CO ₂ Ausstoß.....	63
6.2.9	Gesamtkostenabschätzung	64
6.2.10	Standzeitanalyse.....	65
6.2.11	Kostenreduktion durch Zwischenladen	66
6.2.12	Kostenreduktion durch reale Nutzlast	67
7	Zusammenfassung und Ausblick	69
	Abbildungsverzeichnis.....	I
	Tabellenverzeichnis	III
	Literaturverzeichnis.....	IV
A.	Anhang.....	IX

Abkürzungen

AC	A lternating C urrent
ACC	A daptive C ruise C ontrol
AGV	A utomated G uided V ehicle
dGPS	d ifferential G lobal P ositioning S ystem
DC	D irect C urrent
FAS	F ahrerassistenzsystem
FTF	F ahrerlose T ransport f ahrzeuge
FTS	F ahrerlose T ransport s ysteme
GPS	G lobal P ositioning S ystem
KEP	K urier E xpress P aket
Kfz	K raft f ahrzeug
LKW	L ast K raft w agen
LKA	L ane K eeping A ssist
MMS	M agnet M easurement S ensor
SOC	S tate o f C harge
TTC	T ime T o C ollision
VDI	V erein D eutscher I ngenieur e
VPN	V irtual P rivate N etwork
WLAN	W ireless L ocal A rea N etwork

Symbole und Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	m/s^2	Beschleunigung
a_R	-	Rollreibungsbeiwert
A_F	m^2	Anströmfläche
c_w	-	Luftwiderstandsbeiwert
C_{znom}	Ah	Nominales Ladungsspeichervermögen
F_A	N	Antriebskraft
F_L	N	Luftwiderstand
F_R	N	Rollwiderstand
F_S	N	Steigungswiderstand
F_T	N	Beschleunigungswiderstand
F_{Trot}	N	Rotatorischer Beschleunigungswiderstand
F_{Ttrans}	N	Translatorischer Beschleunigungswiderstand
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h_{CO_2}	kg/kWh	CO ₂ Anteil im Strommix
h_{CO_2VKM}	kg/km	CO ₂ Ausstoß des Verbrennungsmotors
i_{Dif}	-	Übersetzung des Differentials
i_{Get}	-	Übersetzung des Getriebes
I_{EM}	A	Stromstärke des Elektromotors
I_Z	A	Stromstärke der Zelle
$J_{R,j}$	kgm^2	Trägheitsmoment einer Komponente des Antriebstrangs
$k_{spezBat}$	€/kWh	spezifische Kosten des Elektromotors

Symbole und Formelzeichen

k_{spezEM}	€/kW	spezifische Kosten des Elektromotors
k_{Sprit}	€/l	Kosten des Treibstoffs
k_{Strom}	€/kWh	Kosten des Stroms
K_{Bat}	€	Batteriekosten
K_{E}	€	Energiekosten
K_{EM}	€	Kosten des Elektromotors
K_{f1}	€	Fixkosten 1
K_{f2}	€	Fixkosten 2
K_{ges}	€	Gesamtkosten
K_{Get}	€	Getriebekosten
K_{Mehr}	€	Mehrkosten
K_{St}	€	Steuernkosten
K_{T}	€	Kosten des Tanks
K_{VKM}	€	Kosten des Verbrennungsmotors
K_{v}	€	Variable Kosten
K_{WR}	€	Wartungs- und Reparaturkosten
m_{Bat}	kg	Masse der Batterie
m_{Beladung}	kg	Masse der Beladung
m_{CO_2}	kg	Masse an CO ₂
m_{F}	kg	Masse des Fahrzeugs
m_{ges}	kg	Gesamtmasse
m_{EM}	kg	Masse des Elektromotors
m_{max}	kg	Maximale Gesamtmasse
m_{NL}	kg	Masse der Nutzlast
m_{spezBat}	kg/kW	spezifische Masse der Batterie
m_{spezEM}	kg/kW	spezifische Masse des Elektromotors

m_{spezVKM}	kg/kW	spezifische Masse des Verbrennungsmotors
m_{Tank}	kg	Masse des Tanks
m_{VKM}	kg	Masse des Verbrennungsmotors
n_{EM}	U/min	Drehzahl des Elektromotors
n_{p}	-	Anzahl der parallelen Zellen
n_{s}	-	Anzahl der seriellen Zellen
P	W	Leistung
Q_{Z}	Ws	Zellarbeit
Q_{nom}	Wh	nomielle Zellarbeit
r_{dyn}	m	dynamischer Reifenradius
r_{j}	m	Radius einer Komponente des Antriebstrangs
R	m	Reichweite
s	m	Weg
s_{Ref}	m	Weg des Referenzfahrzeugs
S_{v}	l/100km	Treibstoffverbrauch
SOC	-	State of Charge
SOC_0	-	State of Charge zu Beginn
T_{Dif}	Nm	Moment des Differentials
T_{EM}	Nm	Moment des Elektromotors
T_{Get}	Nm	Moment des Getriebes
T_{Rad}	Nm	Moment am Rad
t	s	Zeit
t_{end}	s	Zeit am Ende
t_{Stand}	s	Standzeit
t_{v}	s	Zeitliche Verzögerung
t_0	s	Zeit zu Beginn

U_{Bat}	V	Batteriespannung
U_{znom}	V	Nominelle Zellspannung
U_{z0}	V	Zellspannung zu Beginn
v	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_0	m/s	vorgegebene Fahrzeuggeschwindigkeit

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
β	deg	Steigungswinkel
η_{Dif}	-	Wirkungsgrad des Differentials
η_{EM}	-	Wirkungsgrad des Elektromotors
η_{ges}	-	Gesamtwirkungsgrad
η_{Get}	-	Getriebewirkungsgrad
η_{L}	-	Wirkungsgrad beim Ladevorgang
ρ_{L}	kg/m ³	Dichte der Luft
λ	-	Drehmassenzushlagsfaktor
ω_{Dif}	deg/s	Winkelgeschwindigkeit des Differentials
ω_{EM}	deg/s	Winkelgeschwindigkeit des Elektromotors
ω_{Get}	deg/s	Winkelgeschwindigkeit des Getriebes
ω_{Rad}	deg/s	Winkelgeschwindigkeit am Rad

1 Einleitung

1.1 Einführung

Das „Automatisierte Fahren“ ist gegenwärtig sehr populär. Schon in wenigen Jahren verspricht die Automobilindustrie eine technische Verwirklichung des Traums vom Selbstfahrenden Auto. Bereits heute preisen die großen Automobilhersteller in ihren Luxusmodellen neue und innovative Fahrerassistenzsysteme, die dem Kunden größeren Komfort, Sicherheit sowie mehr Automatisierung versprechen. Im innerbetrieblichen Einsatz finden sich derzeit schon eine Reihe von Fahrzeugen, die bereits voll autonom fahren. Möglich ist das, indem die Strecken größtenteils gegen Störungen abgeschirmt sind und somit die Komplexität im gesicherten Bereich wesentlich geringer ausfällt als im Straßenverkehr. Außerdem spielen die gesetzlichen Beschränkungen der autonomen Lenkanlage im privaten Bereich eine eher untergeordnete Rolle, wohingegen es im öffentlichen Verkehr inakzeptable Hürden gibt. Die größten Vorteile der Automatisierung für den urbanen Verteilerverkehr wären sicherlich die reduzierten Kosten durch den Entfall eines Fahrers. Damit stellt sich die Frage ob es nicht doch eine Möglichkeit gibt automatisierte Fahrzeuge in absehbarer Zeit für den städtischen Verteilerverkehr nutzbar zu machen.

In diesem Projekt wird ein solches Konzept untersucht, das auf existente Anwendungen Fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) zurückgreift und sich dennoch in den bestehenden urbanen Verteilerverkehr integrieren lässt.

Ein ganz ähnlicher Trend wie beim „Automatisierten Fahren“ zeigt sich in der Elektrifizierung des Verkehrs. Durch neu am Markt auftretende Hersteller mit innovativen Fahrzeugen wie Tesla entstand ein regelrechter Hype um elektrisch angetriebene Fahrzeuge innerhalb der Branche. Auch Politik und Medien leisteten ihren Beitrag, indem das Bild transportiert wurde, die Elektromobilität sei ein wirksames Mittel zur deutlichen Reduktion von Treibhausgasen im städtischen Raum. Deswegen findet gegenwärtig ein reger Ausbau der benötigten Infrastruktur –sprich der Lademöglichkeiten- für elektrisch betriebenen Fahrzeuge statt. Hemmnisse bei der Einführung elektrifizierter Fahrzeuge sind beim Endkunden subjektiv empfundene kurze Reichweiten, die hohen Kosten, die weitgehend durch die Batterie verursacht sind sowie die Ladezeiten. Damit stellt sich die Frage ob nicht durch bedarfsgerechte Auslegung des elektrischen Antriebs der Kostennachteil durch kleinere Batterien kompensiert werden kann.

Das vorliegende Projekt untersucht dies anhand zweier gut definierbaren Anwendungen, einem Kurier Express Paket (KEP) Fahrzeug mit 3,5 t und einem Lastkraftwagen mit 18 t für den urbanen Verteilerverkehr. Damit beschäftigt sich diese Arbeit sowohl mit dem Automatisierten Fahren als auch der Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen. Um eine Bewertung in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht durchführen zu können, wird für die Elektrifizierung ein Vergleich zu gleichwertigen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gezogen. In der Klasse von 3,5 t wird der elektrisch betriebene Kreisler Electric mit dem Mercedes Sprinter verglichen. Der Vergleich des 18 t schweren Lastkraftwagens (Lkw) basiert auf den Kenndaten des elektrischen E-Force sowie auf konventionell betriebener Seite des Iveco Stralis. Der innovative Ansatz der in dieser Arbeit vollzogen wird besteht darin, dass elektrische Fahrzeug auf den konkreten Anwendungsfall zu beziehen –entgegen dem

Ansatz des Kreisel und E-Force Fahrzeugs- um so die Kostennachteile der Elektrifizierung zu überwinden. Dazu wird eine Fahrzeugmodellierung im Programm *Matlab Simulink* unter der vereinfachten Annahme eines Punktmassenmodells erstellt, dass die wesentlichen Eigenschaften eines Elektrofahrzeugs abgebildet. Anhand der der zwei Fahrzeugklassen und deren Kenndaten sowie entsprechender, für den Anwendungsfall gemessener repräsentativer Fahrzyklen kann das Modell parametrisiert und die Simulation gestartet werden.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Eine der zentralen Fragen mit der sich diese Arbeit beschäftigt lautet: Welches Konzept einer autonomen Verteilerplattform ist für den urbanen Verteilerverkehr auf absehbare realisierbar? Daraus leiten sich weiter ab, welche Rechtlichen Bestimmungen im Bereich des autonomen Fahrens gelten? Und wer haftet für ein autonomes Fahrzeug im Schadensfall? Welche Konzepte gibt es bereits?

Mit dem erarbeiteten Fahrzeugmodell soll folgende Frage beantwortet werden: Welche Potenziale in wirtschaftlicher und technischer Hinsicht ergeben sich durch die Elektrifizierung der Fahrzeuge verglichen mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor durch bedarfsgerechte Auslegung eines genau bestimmbar Anwendungsfalls? Das beinhaltet Aussagen zur Motorisierung, dem CO₂ Ausstoß, dem Energiespeicher, der Nutzlast sowie der Reichweite. Ab welcher Wegstecke könnten die Gesamtkosten des elektrischen Fahrzeugs durch den Ansatz der bedarfsgerechten Dimensionierung des elektrischen Antriebs anhand des konkreten Anwendungsfalls geringer ausfallen als bei einem herkömmlichen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor?

Die Beantwortung dieser Fragen stellt die Hauptmotivation für diese Arbeit dar. Eine weitere Motivation soll die Darstellung einer weiteren Kostenreduktion durch Verkleinerung der Batteriekapazität mittels Zwischenladen während des Fahrzyklus sein.

Das Ziel ist ein Konzept für das Automatisierte Fahren im urbanen Verteilerverkehr zu entwerfen, dass sich auf absehbare Zeit -basierend auf dem gegenwärtigen Stand der Technik- realisieren lässt. Außerdem soll ein möglichst aussagekräftiges Bild durch die Elektrifizierung der zwei Fahrzeugklassen anhand des Bedarfs der bestimmten Anwendungsfälle gezeigt werden, um Interessenten und auch Fachkundigen einen realistischen Einblick in die Potenziale elektrischer Nutzfahrzeuge zu gewähren. Dabei sollen Rückschlüsse über die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Antriebkonzepts beleuchtet werden und bisher ungenutzte Kosteneinsparungen aufgezeigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Technik Fahrerloser Transportfahrzeuge, die diesbezüglichen rechtlichen Aspekte sowie die auftretende Haftungsproblematik erörtert. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 ein Konzept vorgestellt, dass eine mögliche Integration der Automatisierung im Verteilerverkehr zeigt. In Kapitel 4 werden die unterschiedlichen Möglichkeiten zum Laden elektrischer Fahrzeuge dargelegt und die vorhanden Stecker beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 5 die Daten geliefert und die Methodik der Simulation dargelegt. Die daraus folgenden Resultate werden in Kapitel 6 vorgestellt und interpretiert.

2 Stand der Technik Fahrerlose Transportfahrzeuge

Ein Fahrerloses Transportfahrzeug ist laut dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2510 definiert als: „flurgebundene Fördermittel mit eigenem Fahrtrieb, die automatisch gesteuert und berührungslos geführt werden. Sie dienen dem Materialtransport, und zwar zum Ziehen und/oder Tragen von Fördergut mit aktiven oder passiven Lastaufnahmemitteln. In dieser Richtlinie werden Fahrzeuge mit Radantrieben betrachtet. Ausgeschlossen werden schienengeführte Fahrzeuge, Luftkissenfahrzeuge sowie Laufmaschinen“, [Zitat, 1].

Zunächst wird kurz der Stand der Technik von FTFs anhand der Navigationsvarianten, der Leitsteuerung und zum Schluss durch unterschiedliche, existierende Beispiele in verschiedenen Einsatzbereichen erläutert.

2.1 Navigation

Navigation bedeutet, dass Maßnahmen zur Fahrzeugführung getroffen werden um zu ermitteln wo sich das Fahrzeug aufhält, wohin es ohne äußere Eingriffe gelangt und was getan werden muss um ein Ziel zuverlässig zu erreichen. Die Navigation zielt also auf eine möglichst exakte Positionsbestimmung durch Koordinatendarstellung hin. Im Unterschied zur Position beinhaltet der Begriff Standort andere Informationen zu Beschreibung der Position. Auf dem jeweiligen FTF kann ein Fahrzeugkoordinatensystem aufgespannt werden, das in der Regel im Schwerpunkt oder Mittelpunkt des Fahrzeugs seinen Ursprung hat. Das zugehörige Fahrerlose Transportsystem (FTS) spannt in der Grundfläche ebenfalls ein Koordinatensystem auf, dessen Ursprung am Rande des Einsatzbereiches ist und indem sich das FTF bewegt. Die Grundfläche ist mit dem jeweiligen Einsatzbereich des FTF ident. Für das Koordinatensystem auf dem FTF gilt, dass die Bewegungen relativ zum Fahrzeug beschrieben werden. Die Positionsbestimmung des Fahrzeugs wird über die beiden translatorischen Koordinaten der Grundfläche sowie einer rotatorischen Koordinate in der Grundfläche beschrieben. Die Vorgänge Koppeln und Peilen sind dabei je nach Verfahren mehr oder weniger ausgeprägt, [2].

Bei der Odometrie handelt es sich um eine Methode zur Lageschätzung eines mobilen Systems anhand von Daten des Antriebssystems. Dabei wird über Sensoren des Fahrzeugs die Positionsbestimmung realisiert. Möglich ist das durch Drehwinkelgeber an den Rädern, Zeitähler oder Magnetkompass beziehungsweise Lenkwinkel. Die Genauigkeit ist beispielsweise durch Schlupf der Räder oder einer Veränderung der Radumfänge beschränkt und je nach Anwendung fehlerhaft. Da sich Fehler zu unzulässigen Werten aufsummieren können, ist regelmäßig aber auf jeden Fall rechtzeitig eine Peilung erforderlich, [2].

Eine Peilung oder auch Ortung wird durch ortsfeste, meist passive Marken oder aktive Technologien umgesetzt. Solche Marken in Bezug auf FTF können Reflexmarkierungen auf Wänden, Säulen oder anderen Hindernissen sein, oder aber Gebäudekonturen die vom FTF erkannt werden und zur Positionsbestimmung genutzt werden. Die aktive Technologie umfasst die aktiv induktive Spurführung und als aktuelleres System das GPS, [2].

Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht über die üblichsten Navigationsverfahren innerhalb von Betriebsgeländen. Unterpunkt a) von Abbildung 2.1 zeigt die Navigation über eine entweder optisch oder induktiv ausgeführte physische Leitschiene. Desweiteren wird in Abbildung 2.1 b) künstliche Marken im Boden über eine Punktfolge und in 2.1 c) künstliche Marken in Rasteranordnung im Boden gezeigt. Abbildung 2.1 d) illustriert künstliche passive bodenfreie Marken, die vom FTF über Laserscanner abgetastet werden können. Als letztes ist in Abbildung 2.1 e) die Navigation über GPS dargestellt.

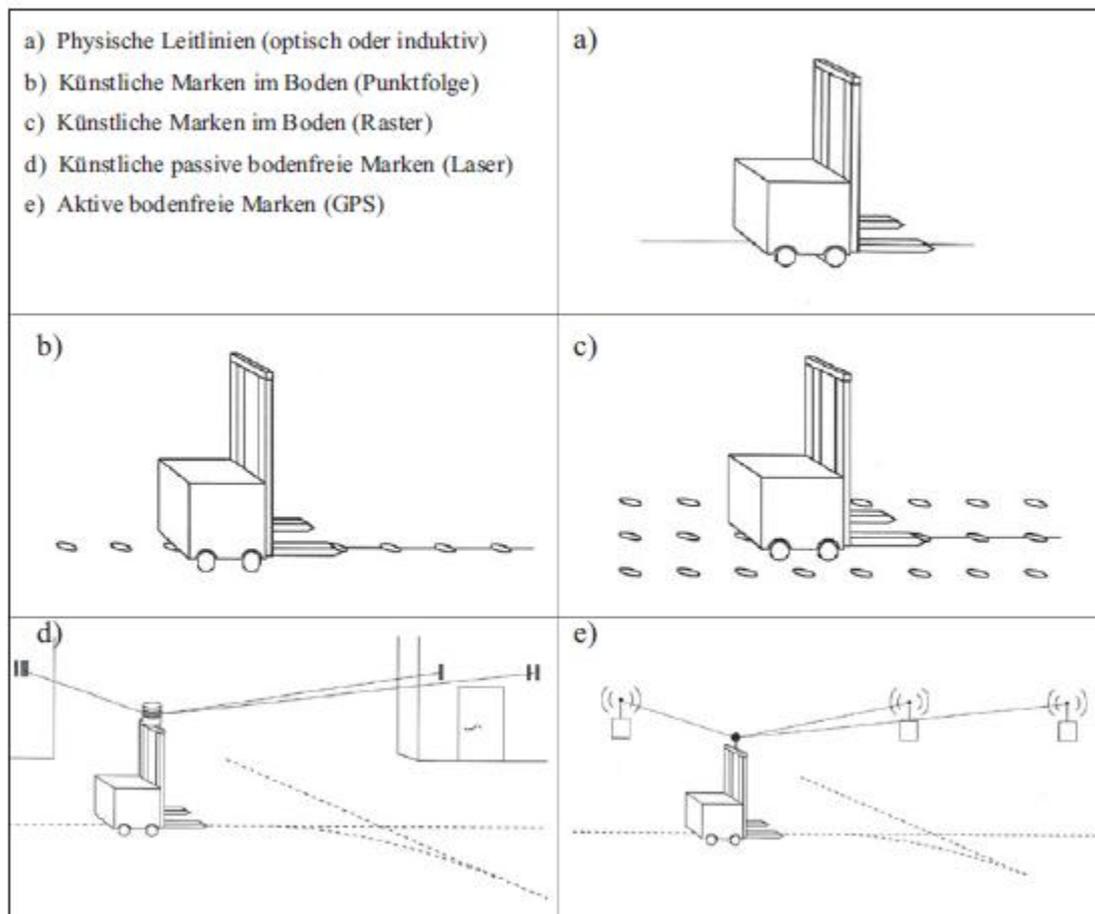


Abbildung 2.1: unterschiedliche Navigationsverfahren: a) physische Leitlinien b) Punktfolge im Boden c) Raster im Boden d) künstliche passive Marken (Laser) e) aktive bodenfreie Marken (GPS) [2]

Für das Fahrerlose Fahren in freier Umgebung –sprich auf Straßen oder Autobahnen- bedarf es noch einiger weiterer Maßnahmen im Bereich der Navigation. Häufig wird eine Kombination von mehreren Systemen verwendet, wie On- Board Fahrdynamiksensoren (zur Regelung von Raddrehzahl, Längs- und Querschleunigung, Lenkwinkel, Giergeschwindigkeit), Kamerasensoren, Car to car Communication, Kommunikation mit Ampeln, Fern- und Nahbereichsradarsysteme sowie GPS, [3].

2.1.1 Stützpunkte

Bei Stützpunkten handelt es sich um künstliche, regelmäßig im Boden angebrachte Marken, bei denen die jeweilige Fahrspur virtuell mit einem Rechner ermittelt wird. Die Leitlinie wird mit Hilfe der Koppelnavigation und den zusätzlich im Boden angebrachten Marken berechnet. Die Marken sind im

einfachen Fall passive Dauermagnete oder eben aktive Transponder. Die Dauermagnete haben eine zylindrische Form, eine einfache Nord-Süd Polung und werden mit Klebstoff in Bohrungen im Fahrbahnboden eingelassen. Sie sind 5-30 mm lang und haben einen Durchmesser von 8-20 mm. Die Anordnung kann als Raster oder Punktfolge durchgeführt werden. Die Punktfolge erlaubt weniger Markierungen, die Rasteranordnung eine erhöhte Flexibilität. Der jeweilige Abstand beeinflusst die Genauigkeit der ausgeführten Fahrbewegung. Übliche Abstandswerte sind 1 bis 10 m, wobei die Lage und Anzahl der Markierungen vom FTS Hersteller zu bestimmen sind, [2, 4].

Die Detektion der Markierungen am FTF erfolgt über eine Magnetsensorleiste, die mit Hall-Sensoren das sie durchfließende Magnetfeld in eine Spannung wandelt, die wiederum proportional der Feldstärke ist. Die Magnetsensorleiste besteht aus bis zu neun Gruppen von je acht Hall-Sensoren. Ein Prozessor überwacht eine Gruppe von Sensoren. In einem Hauptprozessor werden die Daten gesammelt und zur Positionsermittlung ausgewertet. Die Länge einer Sensorleiste ergibt sich aus der Breite des FTF und wird senkrecht zur Fahrspur unter dem Fahrzeug montiert. Es kann eine Messgenauigkeit unter 2 mm erreicht werden, [2].

Eine Alternative zur Magnetsensorleiste ist ein sogenannter Magnet Measurement Sensor (MMS). Es erreicht zwar nur eine Messgenauigkeit von ca. 5 mm, eignet sich jedoch sowohl für den Innen- als auch Außeneinsatz und kann bei Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h immer noch arbeiten, [2].

Im Außenbereich sind im Boden mehrheitlich Transponder eingesetzt, die mittels Leseeinheiten unter dem Fahrzeug über Induktion mit Energie versorgt werden. Über Antennen an den Leseeinheiten wird die Position der Transponder genau vermessen. Vorteilhaft ist der größere Leseabstand sowie die Möglichkeit zusätzliche Layout Informationen zur Standortbestimmung speichern. Nachteilig sind die deutlich höheren Anschaffungskosten, [2, 5].

2.1.2 Physische Leitlinie

Die physische Leitlinie für FTF kennt hauptsächlich drei verschiedene Varianten, die am oder im Boden angebracht sind.

Die optische Leitspur ist ein am Boden aufgetragener Farbstrich mit deutlichem Kontrast zum umgebenden Boden. Eine entsprechende Kamerasensorik, die unter dem Fahrzeug platziert wird errechnet über Kantendetektions-Algorithmen die notwendigen Ansteuerungssignale für die Lenkung. Die optische Leitspur wird mit besonderem Textilband aufgebracht oder einfach lackiert, [2].

Eine andere Möglichkeit ist die passiv-induktive Leitspur. Dabei handelt es sich um einen 5-10 cm breiten Metallstreifen, der am Boden aufgeklebt wird. Ein Sensor aus Magnetfeldsensoren kann am FTF mit Kantendetektion das Metallband erkennen und daraus Lenksteuerung beeinflussen, [2].

Im Fall der aktiv-induktiven Leitspur sind stromdurchflossene Leiter im Boden eingelassen, die in Abschnitte unterteilt ein und ausgeschaltet werden können. Zwei Spulen unter dem FTF sind im rechten Winkel zur Leitspur Spulen platziert. Der Wechselstrom des Leitdrahtes induziert in den Spulen einen Strom, dessen Differenz angibt, inwieweit eine Abweichung von der Leitspur erfolgt ist. Der besondere Vorteil dieser Variante ergibt sich daraus, dass kein negativer Einfluss durch Schmutz,

Schnee, Regen oder die Fahrbahn selbst vorherrscht. Gegenwärtig werden dennoch Verfahren mit virtueller Leitspur bevorzugt, [2, 4].

2.1.3 GPS

Das GPS über Satelliten eignet sich sehr gut in großen Räumen oder im Außenbereich von Betriebsgeländen. Die Selbstortung wird über eine Laufzeitmessung zu Satelliten oder angebrachten codierten Radarreflektoren verwirklicht. Wichtig ist dabei eine freie Sicht zwischen dem Satelliten und der Ortungsantenne am FTF. Aus diesem Grund ist eine GPS Ortung über Satelliten ungeeignet in bebauter Umgebung, also in Hallen oder zwischen Gebäuden. In diesen Bereichen kann ein Sogenanntes Indoor-GPS aufgebaut werden. Dabei werden kostengünstige Funkbaken im Bewegungsbereich des FTF stationär installiert. Gleich wie im herkömmlichen GPS wird auch hierbei die Laufzeit zwischen den Baken gemessen und daraus der Standort des FTF berechnet. Die Abweichung zur gedachten Fahrbahn beträgt in diesem Fall meistens 30 cm. Für eine Positionsgenauigkeit von wenigen Zentimetern Abweichung bietet sich das Differential Global Positioning System (dGPS) an. Allerdings ist das dGPS teurer, [2].

2.1.4 Lasernavigation

Über retroreflektierende Folien an Wänden und anderen Hindernissen kann das FTF mittels eines rotierenden Laserscanners Abstandsmessungen durchführen, die wiederum zur Navigation genutzt werden. Aus Sicherheitsgründen sind sowohl der Laserscanner als auch die Folien oberhalb der Kopfhöhe angebracht. Abhängig davon ob eine direkte Entfernungsmessung oder eine indirekte erfolgt müssen zumindest zwei oder drei Folien stets sichtbar sein. Die Lasernavigation gilt als sehr flexibel, so lassen sich einfach neue Routen programmieren oder über eine Lernfahrt erstellen, [2].

Die fortlaufenden Abstandsmessungen des Laserscanners werden am FTF genutzt, um daraus die Koordinaten der momentanen Position zu ermitteln. Dies geschieht über einen Fahrzeugrechner, der wiederum Kurskorrekturen einleiten kann, [2].

2.1.5 Fahrerassistenzsysteme

In diesem Abschnitt sollen Systeme vorgestellt werden, die ein automatisiertes Fahren im Straßenverkehr erleichtern sollen. Einzelne sind diese Systeme dazu nicht in der Lage, durch eine Kombination der Assistenzsysteme ließe sich das automatisierte Fahren jedoch theoretisch realisieren. Im folgenden werden die Assistenzsysteme vorgestellt, mit denen das in der Arbeit vorgestellte Logistikkonzept für den urbanen Verteilerverkehr realisierbar ist.

Adaptive Cruise Control (ACC)

Mit der adaptierten Distanzregelung wird per Abstandssensor der Abstand Δs sowie die Relativgeschwindigkeit Δv zum vorausfahrenden Auto gemessen, [6].

Während einer Fahrt kann damit der gewünschte Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug durch etwaige Brems- und Motoreingriffe eingehalten werden. Physikalisch beruht diese durch einen Radarsensor verwirklichte Messung auf dem Dopplereffekt. Durch unterschiedliche Wellenlänge zwischen gesendetem und empfangenem Signal lässt sich die Relativgeschwindigkeit zwischen den

Fahrzeugen bestimmen. Daraus kann die verbleibende Zeit bis zu einem Unfall, die sogenannte Time To Collision (TTC), nach Formel (2.1) bestimmt werden, [7].

$$TTC = \frac{\Delta s}{\Delta v} \quad (2.1)$$

Car to car Communication

Das bedeutet, dass zwischen den fahrenden Fahrzeugen ein Informationsaustausch stattfindet. Das beinhaltet Informationen über die Straßen und Verkehrsverhältnisse, stehengebliebene Fahrzeuge oder andere Hindernisse, [8].

Lane Keeping Assist (LKA)

Der Spurhalteassistent hilft ein ungewolltes verlassen der Fahrspur zu verhindern. Das System funktioniert über eine Kamera, die im Bereich des Innenspiegels die Fahrbahnmarkierungen erfasst und bei Abweichungen Fahrkorrekturen einleitet, [6].

Parklenkassistent

Mit diesem System ist eine Steuerung in Längs- und Querparklücken möglich. Benötigt wird dafür eine elektromechanische Servolenkung, Umgebungssensoren wie Ultraschall und Radar, sowie eine Rückfahrkamera, [6].

Lane Change Assist (LCA)

Mit dem Spurwechselassistent wird ein Wechseln der Spur durch zwei zusätzliche Radarsysteme am Heck des Fahrzeugs erreicht. Die Messung der Umgebung des reicht bis zu 50 m hinter sowie in den toten Winkel des Fahrzeugs um sicher zu stellen das kein sich kein Fahrzeug von hinten nähert. In Verbindung mit ACC und LKA kann damit die Spur gewechselt werden, [6].

2.2 Leitsteuerung des FTS

Die Leitsteuerung eines FTS hat die Funktion, das FTS ins jeweilige Einsatzgebiet einzubinden. Die Leitsteuerung besteht aus einer Hard- und Software. Es erfüllt die Aufgabe Transportaufträge zu übernehmen und Servicemöglichkeiten seinen Bedienern anzubieten. Dabei kann das FTF nicht unabhängig agieren, die Fähigkeit Entscheidungen zu treffen und zu koordinieren liegt bei der Leitsteuerung des FTS. Den Bedienern bietet es die Möglichkeit Aufträge an das FTF zu erteilen. Es gibt Forschungen zur Nutzung von Schwarmintelligenz, die darauf abzielt Entscheidungskompetenzen im Fahrzeugverbund besser nutzbar zu machen. Schwarmintelligenz bedeutet, dass die FTF in der Lage sind miteinander zu kommunizieren und abhängig von der Aufgabenstellung selbstständig zu organisieren, [2].

Abbildung 2.2 zeigt vereinfacht die Systemarchitektur eines FTS in Verbindung mit seiner Leitsteuerung. In der gezeigten Systemarchitektur ist das FTF per Wireless Local Area Network (WLAN) mit der Leitsteuerung verbunden. Übergeordnet ist ein Leitsystem mit Rechner zur Zuweisung der Transportaufträge. Für die Ferndiagnose ist ein Virtual Private Network (VPN)-in Abbildung 2.2 als Telefonleitung dargestellt- vorhanden, [2].

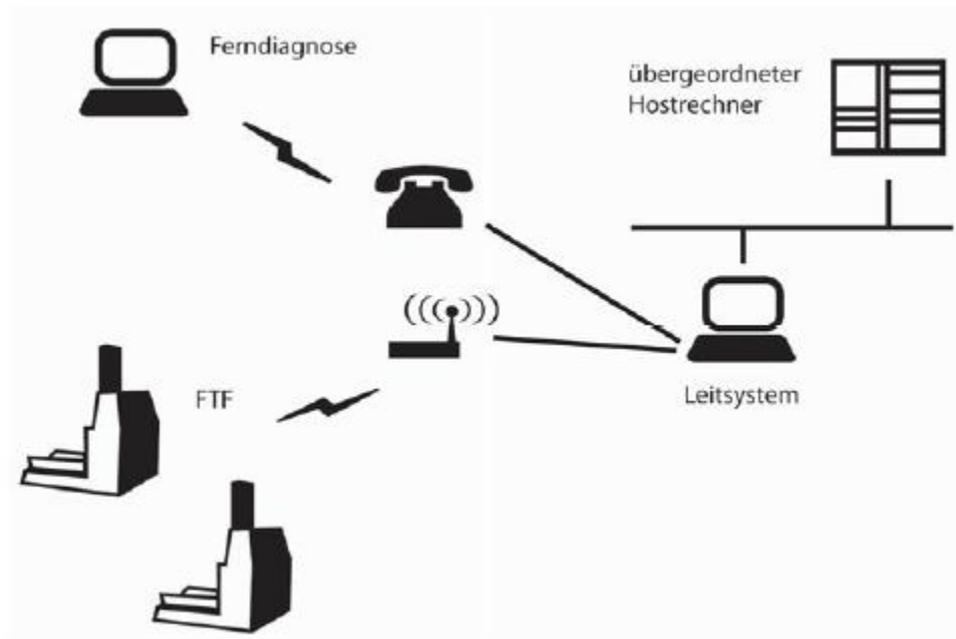


Abbildung 2.2: Systemarchitektur eines FTS [2]

2.3 Anwendungsbereiche bestehender FTF

Es gibt innerhalb des weiten Spektrums der Logistik zahlreiche Anwendungsbereiche von FTF. Um sich über bereits bestehende Systeme einen guten Überblick zu verschaffen ist eine Kategorisierung anhand ihrer Einsatzbereiche sinnvoll. Die Unterteilung erfolgt in die drei Kategorien:

- FTF im Innenbereich von Betrieben (warehouse operations)
- FTF im Außenbereich von Betrieben (outdoor logistic operations)
- FTF für den Gütertransport außerhalb von Betriebsgeländen (line haul transportation, last mile delivery)

Dabei bezeichnet „Warehousing operations“ FTF im Innenbereich des Betriebs, „outdoor logistic operations“ im Außenbereich von Werksanlagen, „line haul transportation“ die Transportlogistik für den Überland Speditions- und Frachtverkehr und „last mile delivery“ Kurier-Express Packet (KEP) Dienste oder FTF im Bereich der Endzulieferung an den Kunden.

2.3.1 FTF im Innenbereich von Betrieben

In der innerbetrieblichen Logistik (Warehousing operations) kommen FTS schon seit langem zum Einsatz. FTF im Innenbereich sind sehr häufig zwischen Produktions- und Montagestufen, dem Warenein- und ausgang sowie in der Kommissionierzone und dem Lager in Verwendung. Eine Kombination aus FTS und Arbeitsroboter ist in vielen Fällen vorteilhaft. Da in Betriebsgeländen eine Begegnung von FTS und Menschen vorkommt bedarf es einiger Personenschutzkonzepte. Früher wurde dies mittels Bügeln und Bumpen sichergestellt, heute kommen vermehrt Laserscanner zum Einsatz, die abhängig von der Fahrgeschwindigkeit einen Bereich von bis zu 7 m abdecken können. Zur Positionierung und Positionserkennung werden zwei Gruppen von Systemen unterschieden. So gibt es einerseits die physische Leitlinie, die entweder als ein Magnetband, durch eine aktiv-induktive Leitspur oder als optische Leitspur ausgeführt ist. Andererseits gibt es Technologien der freien

Navigation, deren Orientierung entweder durch Lasertechnologie oder über Bodenmarken (Magnete, Transponder) erfolgt. Eine neuere, zusätzliche Möglichkeit der Positionsbestimmung wird erreicht durch eine Kombination aus Kamerasystemen, Laserscanner und digitalen Umgebungskarten, die anhand von Umgebungsmerkmalen navigieren, [9].

Die Datenübertragung zwischen der mobilen und stationären Einheit des FTS erfolgt über Breitbandfunk (WLAN) und Schmalbandfunk. Über Indoor-GPS ist eine Funkpeilung und somit eine Ortung möglich, die eine Genauigkeit bis zu 0,5 m erlaubt. Outdoor-GPS erlaubt eine Genauigkeit von bis zu 10 m, mittels d-GPS kann 1 m erreicht werden und erfolgt eine Phasenauswertung sogar bis zu 0,1 m, [9].

Die Transportauftragsabwicklung wird zentral durch eine Leitsteuerung geregelt, wodurch die Fahrzeuge ihre Fahraufträge erhalten. Die Leitsteuerung verwaltet die Arbeiten und disponiert das Fahrzeug. Die sinnvolle Verkehrssteuerung ist somit ein Teil der Auftragsabwicklung, [9].

Es gibt bereits eine Reihe von FTS im Innenbereich von Werks- und Produktionsstätten. Exemplarisch sollen einige Anwendungen vorgestellt werden.

Das in Abbildung 2.3 dargestellte System KARIS PRO vom Lehr- und Forschungsinstitut KIT in Deutschland transportiert kleinere Güter voll autonom und kann sich außerdem mit anderen Fahrzeugen des gleichen Typs zusammen schließen und so eine flexible Beförderungskette bilden. Die Navigation wird durch Lasertechnik ermöglicht, [10].



Abbildung 2.3: Karis Pro System [10]

Dem sehr ähnlich ist das Open Shuttle in Abbildung 2.4 von Knapp. Ausgestattet mit einer Lasernavigation eignet es für den Transport bzw. die Abholung von kleineren Waren in komplexen Logistik Netzwerken. Es reagiert flexibel auf Hindernisse und berechnet stets alternative, kurze Wege zum Zielort.



Abbildung 2.4: Open Shuttle Knapp [10]

Der von Swislog entwickelte RoboCourier wurde speziell für die Gesundheitsfürsorge entwickelt und dient dem Transport von kleineren Arzneien, Proben und Gerätschaften in engen Gängen. Er besitzt die Fähigkeit sich über Lasersensoren zu orientieren, Türen zu passieren und Fahrstühle anzufordern um in andere Stockwerke zu gelangen. In Abbildung 2.5 ist dieses System in Frontansicht zu ersichtlich, [10].



Abbildung 2.5: Robo Courier [10]

Ein weiteres Beispiel zeigt Abbildung 2.6 mit dem vom Fraunhofer Institut gemeinsam mit Demantic entwickelte Multi Shuttle Move, [10].

Dieser transportiert kleine Paletten und Güter voll autonom und kann in Verbindung mit Fahrzeugen vom gleichen Typ schwarmartig Aufträge bearbeiten. Dabei ist die Arbeitsteilung zwischen den Fahrzeugen Teil des Konzepts. Das Shuttle Move verfügt über Abstands- und Beschleunigungssensoren, eine Funkortung sowie Laserscannern zur Navigation. Die Anzahl von

solchen Transport-Shuttles soll eine Alternative zu traditionellen Logistikketten bilden und durch Schwarmintelligenz besondere Vorteile bieten, [11].



Abbildung 2.6: Multi Shuttle Move [11]

Der Gabelstapler „Autopallet Mover“ von Jungheinrich orientiert sich durch eine Lasersteuerung. Ein separates Kontrollsystem überwacht und koordiniert den vollautomatischen Transport der Paletten. Zahlreiche Kontrollsysteme ermöglichen ein präzises bewegen der Paletten und Container, sowie eine kollisionsfreie Fahrt innerhalb des Betriebsgeländes, [12].



Abbildung 2.7: Auto Pallet Mover Jungheinrich [12]

DS Automation GmbH entwickelte einen sehr ähnlichen Gabelstapler. Dieser eignet sich insbesondere zum Kommissionieren von Waren im Lager. Der menschliche Kommissionierer kann bei Bedarf weitere Fahrzeuge ordern, sobald er dies beim Aufladen einer Palette feststellt. Ist eine Palette beladen, so kann er sie wegschicken und mit der anderen weiterarbeiten, wodurch er keine Zeit durch Warten verliert. Das Besondere an diesem FTF ist, dass während des Automatikbetriebes ständig Personen im Wechsel gefahren werden und so ihre Arbeit verrichten können. Die FTS-Leitsteuerung ist per WLAN mit dem FTS in Kontakt und wird über eine Zentrale gesteuert. Die

Navigation erfolgt über eine Magnetpunktfolge. Die Sicherheit während der Mitfahrt wird durch ein Trittbrett, ohne Mitfahrer durch Blinker, Notastaste und Rundumleuchte gewährleistet, [13].

Das Internetversandhaus Amazon verwendet zum Kommissionieren ein eigenes, von Amazonrobotics entwickeltes FTF. Abbildung 2.8 zeigt dieses FTF beim Transport von Regalen. Dabei können ganze Regale bewegt und so die Kundenbestellungen rasch bearbeitet werden. Die Person zum Zusammenstellen der Ware kann so an einem Standort bleiben, während die Transportbewegung vom Fahrzeug ausgeführt wird. Das FTF orientiert sich an am Boden befindlichen Barcodestreifen, [10, 14].



Abbildung 2.8: FTF von Amazonrobotics [14]

Anhand der ausgewählten Beispiele konnte gezeigt werden, dass es bereits eine Reihe von FTF im Innenbereich von Betriebsstätten gibt. Die unterschiedlichen Systeme leisten einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der jeweiligen Logistikprozesse und sind aufgrund ihrer vielfachen Einsatzmöglichkeiten nicht mehr wegzudenken.

2.3.2 FTF im Außenbereich von Betrieben

Es gibt unterschiedliche Bereiche in denen FTS im Außenbereich (outdoor logistic operations) zum Einsatz kommen. In diesem Kapitel bewegen sie sich auf privatem Gelände und verrichten dort Shuttle Dienste oder Schwertransporte, [9].

Eines dieser Systeme ist ein Automated Guided Vehicle (AGV), das Container zwischen Containerlager und Containerbrücke transportiert (z.B. von Terex). Abbildung 2.9 zeigt dieses Fahrzeug ohne Beladung. Dabei sollen Leerfahrten reduziert und Routen verkürzt werden. Eine eigens programmierte Software ermöglicht eine kollisionsfreie Fahrt und Flottenführung, übertragen wird die Leitsteuerung per Datenfunk. Zur Positionsbestimmung werden im Boden eingelassene Transponder eingesetzt. Der Batteriewechsel wird selbstständig durchgeführt, [15, 9, 16].



Abbildung 2.9: AGV für Containertransport [16]

Ein weiteres Beispiel ist ein voll automatisches FTF auf Basis eines Seriennutzfahrzeuges. Es wird in einer Molkerei zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Umschlagsgeschwindigkeit eingesetzt und ist in Abbildung 2.10 beim Andocken an der Laderampe zu sehen. Es transportiert Verpackungsmaterial vom Logistikzentrum zur Produktionsstätte und umgekehrt Fertigprodukte zum Logistikzentrum. Die Be- und Entladung erfolgt voll automatisch. Neben Schaltleisten und Notastaste dient ein Laserscanner zur Kontrolle der Umgebung. Die Hinterachse des Sattelanhängers ist so ausgeführt, dass sie unabhängig von der Zugmaschine automatisch gelenkt werden kann. Dadurch können enge Hüllkurven realisiert werden und eine hohe Genauigkeit in der Positionierung erreicht werden. Die Spurführung ermöglichen Transponder, die entlang der Strecke angebracht sind. Unter der Zugmaschine befindet sich ein Sensor, der die Markierungen mit einer Genauigkeitsreferenz von 3 mm misst. Im Automatikmodus fährt der LKW mit einer Höchstgeschwindigkeit von 6 km/h, [17].



Abbildung 2.10: Fahrerloser LKW in Molkerei [17]

Im Projekt SaLSA „sichere autonome Logistik- und Transportfahrzeuge im Außenbereich“ werden vom Fraunhofer Institut explizit Fahrzeuge untersucht, die sich auch außerhalb von Werks- und Betriebsgeländen bewegen und mit herkömmlichen Fahrzeugen und Passanten interagieren. Das Sicherheitskonzept besteht aus Radarsensoren, die die Umgebung bestmöglich erfassen, [9, 18].

2.3.3 FTF für den Gütertransport außerhalb von Betriebsgeländen

Außerhalb von Betriebsgeländen ist die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen mehrheitlich problemorientiert getrieben. Der Einsatz von Fahrrobotern resultierte aus dem Einsatz in gefährlichen Gebieten. So gibt es z.B. Fahrroboter für unterirdische Explorations in der Tiefsee, zur Entschärfung von Munition, in sehr schwer zugänglichen, abgelegenen Gebieten im Bergbau oder in steilen, dichtbewachsenen Wäldern für die Holzindustrie. Abbildung 2.11 zeigt einen vollautomatischen Muldenkipper im Tagebau in Australien. Die Navigation dieser Systeme erfolgt mit Radar und Lasern sowie durch den Einsatz von Wegpunkten. Weitere Eingriffsmöglichkeiten sind über eine Betriebszentrale mittels WLAN gewährleistet. Gesteuert werden diese FTF durch GPS und eine Koppelnavigation, [9, 10].



Abbildung 2.11: unbemannter Muldenkipper von Caterpillar [10]

Im Bereich der last mile delivery -also der letzten Zustellung zum Kunden-- existieren zwar in großer Menge Ideen für zukünftige, visionäre Anwendungen, konkret umgesetzte Lösungen gibt es jedoch noch nicht. Die last mile umfasst Kurier-Express-Paket (KEP) Dienste und FTF in der Endzulieferung, [10].

Für den Lasttransport auf Autobahnen, bei denen größere Strecken zurück gelegt werden müssen (line haul transportation) gibt es unterschiedliche Projekte mit entsprechenden Lösungsansätzen. Eine der Zukunftsvisionen untersucht ein assistiertes Fahrkonzept, in dem der Fahrer nur im Falle von schwierigen Manövern eingreift und ansonsten ein Autopilot die Steuerung übernimmt. Überlegungen in diese Richtung gehen soweit, dass angedacht wird aus Sicherheitsgründen eine eigene Fahrspur für autonome LKW zu entwickeln, [10].

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist das sogenannte Platooning. Grundidee ist ein bemannter Führungs-LKW, dem im Konvoi autonom fahrende LKW folgen. In Abbildung 2.12 ist dieses Konzept bei der Fahrt auf der Autobahn ersichtlich. Dabei halten die autonom fahrenden Folgefahrzeuge automatisch den richtigen Abstand und die Geschwindigkeit zum an der Spitze fahrenden, bemannten Führungsfahrzeug. Ermöglicht wird dies durch eine elektronische Deichsel, die in Kombination mit einer softwaregestützten Steuerung fungiert. Zahlreiche Forschungsprojekte wie unter anderem SATRE, CONVOI oder COMPANION zeigen, dass durch diese Technologie eine bessere

Nutzung der Straßeninfrastruktur sowie eine Reduktion des Fahrwiderstands erreicht werden kann, [9, 10].

Platooning stellt die Sensorik der autonom folgenden Fahrzeuge vor besondere Herausforderungen an die. Neben einer automatisierten Distanzregelung –Adaptive Cruise Control (ACC) wird ein Spurhalteassistent sowie eine Car-to-Car-Communication benötigt. Außerdem muss über einen zentralen Server der gesamte Zug überwacht und gesteuert werden, [8].



Abbildung 2.12: Convoi während des Satre Projekts [10]

Eine zusätzliche Möglichkeit einer elektrisch angetriebenen, automatischen Verteilerplattform stellen unterirdisch (zum Teil mit Schienen) geführte Fahrzeuge dar. Das Konzept CargoCap kann zwei genormte Europaletten mit einer Beladungshöhe von 1,25 m in einem Fahrrohrleitungsnetz mit Schiene transportieren. Die Zugbildung und Abstandregelung wird durch eine elektronische Deichsel realisiert. In den Röhren befinden sich Schienen, Transponder zur Ortung der Caps, Energieversorgung sowie Informationssysteme. Abbildung 2.13 zeigt die Caps in einer Fahrt durch den Tunnel, [18].

Im engeren Sinn handelt es sich bei dem auf Schienen geführten Fahrzeug laut Definition nicht um ein FTF.

Dem sehr ähnlich erscheint das in den Niederlanden entwickelte OLS-ASH Transportsystem. Es verzichtet im Unterschied zum CargoCap auf Schienen und fährt mittels kleiner Gummireifen durch den Tunnel, [19].

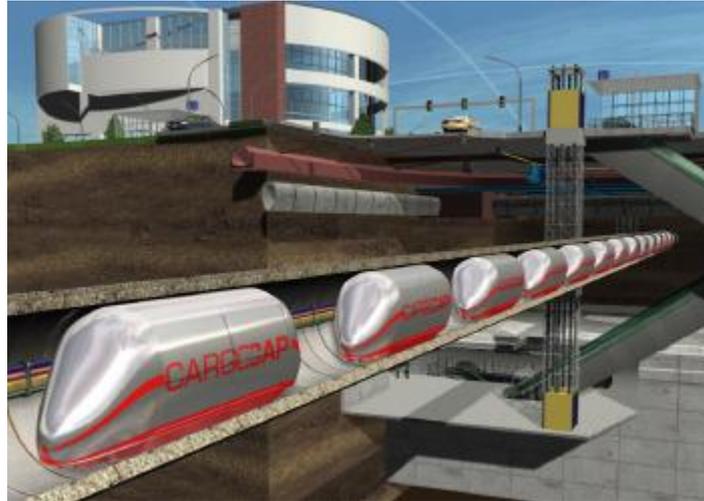


Abbildung 2.13: Cargo Cap [18]

2.4 Rechtliche Bestimmungen

Bis heute besteht für das Führen von Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr eine Handlungs- und Entscheidungsgewalt ausschließlich für das menschliche Handeln. Der Mensch trifft als Individuum, durch seine Wahrnehmung Entscheidungen zum Lenken des Fahrzeugs. FAS unterstützen ihn dabei, in Form einer Arbeitsteilung, ohne jedoch den Mensch vollends zu ersetzen. Das FAS hat dabei immer eine untergeordnete Rolle und kann stets durch das Eingreifen des Fahrers beeinflusst und korrigiert werden. Der derzeitige technische Stand von FAS bedingt es, dass diese Systeme derzeit noch nicht fähig sind alle Systemgrenzen von sich aus zu erfassen. Deswegen verfügen alle FAS über einen Warnhinweis, der den Benutzer darauf hinweist, dass das Assistenzsystem nur unterstützend aber nicht ersetzend agiert. Die letztendliche Verantwortung, als auch eingreifende Autorität besitzt somit immer der Mensch. Für diese Bestimmung ist der Automatisierungsgrad des Fahrzeugs ein wichtiger Parameter. So kann bei FTF die menschliche Autorität nicht mehr ausgeübt werden. Der Automatisierungsgrad ist unterteilt in Stufen (häufig auch als SAE Level bezeichnet) wie in Abbildung 2.14 dargestellt. In Stufe 0 führt der Fahrer dauerhaft alle Längs- und Querführungen aus, ohne dass ein Assistenzsystem aktiv wäre. Stufe 1 wird oft als Assistiertes Fahren bezeichnet, da das Assistenzsystem jeweils die Funktion (Längs- oder Querführung) übernimmt die vom Fahrer nicht wahrgenommen wird. Stufe 2 gilt als Teilautomatisiert, weil der Fahrer das FAS dauerhaft überwachen muss und das System in einem speziellen Anwendungsfall Längs- und Querführung übernimmt. Hochautomatisiert ist bereits Stufe 3, weil der Fahrer das System nicht mehr überwachen muss und nur potenziell übernimmt. Dabei werden Systemgrenzen erkannt und der Fahrer gewarnt. In speziellem Anwendungsfall übernimmt die Steuerung das Assistenzsystem. Stufe 3 gilt als Schwelle, da ab dieser Stufe das System die Umgebung erfasst. Stufe 4 ist hochautomatisiert, da das System in einem spezifischen Anwendungsfall alle Situationen bewältigen kann. Stufe 5 ist Fahrerlos vom Start bis zum Ende der Fahrt, alle Fahraufgaben werden vom System bei allen Bedingungen gemeistert, [9, 20].

Aus diesem Grund ist es wichtig, die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die Haftungsproblematik bezüglich des automatisierten Fahrens genauer zu beleuchten.

	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	
Fahrer	Driver only	Assistiert	Teil-automatisiert	Hoch-automatisiert	Voll-automatisiert	Fahrerlos	Automatisierung
	Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querführung aus.	Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus.	Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.	Fahrer muss System nicht mehr dauerhaft überwachen. Fahrer muss potenziell in der Lage sein zu übernehmen. System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf.	Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall.	Von „Start“ bis „Ziel“ kein Fahrer erforderlich. Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen.	
	Kein eingreifendes Fahrzeug-System aktiv.	System übernimmt die jeweils andere Funktion.	System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall.	System kann im spezifischen Anwendungsfall alle Situationen automatisch bewältigen.			

Abbildung 2.14: Stufen des automatisierten Fahrens [20]

Im Unterschied zum normalen Fahrbetrieb, ist für das automatisierte Fahren vorgesehen, dass ein Fahrerroboter die vollständige Kontrolle und Autorität im Fahrzeug übernimmt und der Mensch – sofern überhaupt vorhanden- lediglich die Rolle eines Passagiers inne hat.

Wie bereits angedeutet kann die Rechtslage bezüglich des autonomen Fahrens nicht abschließend geklärt werden, da im Verkehrsrecht nur Regelungen mit Fahrern vorgesehen sind, die selber die Steuerung des Fahrzeugs beeinflussen. „Dies begründet sich daraus, dass die Rechtsgrundlagen des Straßenverkehrsrechts bei ihrer Entstehung und Weiterentwicklung bislang nur Erwägungen zugrunde legen konnten, die zum Regelungszeitpunkt regelungsbedürftig waren“, [Zitat 9, S.551].

Das Risiko betreffend des Automatisierten Fahrens kann schwer abgeschätzt werden. Zwar wird angenommen, dass es sehr wohl zu Hard- oder Softwareausfällen kommen kann, die Folgen beziehungsweise die Erfolgsquote wird ähnlich eingeschätzt wie bei herkömmlichen, menschlich gesteuerten Fahrzeugen. Dabei handelt es sich um eine von Experten aufgestellte Annahme, die nur

als Diskussionsgrundlage für ein Projekt aufgestellt wurde. Die Entscheidung über die Ermöglichung automatisierter Fahrzeuge liegt aller Wahrscheinlichkeit nach beim Gesetzgeber. Dieser muss entscheiden, ob das Grundrecht auf Leben und körperliche Unversehrtheit durch den Einsatz von eigenständiger, maschineller Fahrzeugsteuerung beeinträchtigt wird. Es stellt sich außerdem die Frage, ob das bestehende Straßenverkehrsrecht nach geltender Ordnung neuartige, automatisierte Steuerungsqualitäten überhaupt erfassen kann. Ist eine praktische Umsetzung zu den gegebenen Annahmen möglich –also das der Straßenverkehr genauso zuverlässig und sicher ist, wie es heutige Fahrzeuge sind- wird der Gesetzgeber das Straßenverkehrsrecht ändern müssen. Die Ermöglichung automatisierter Fahrzeuge obliegt somit einzig und allein dem Gesetzgeber, [9].

Eine Änderung des Verkehrsrechts gibt es nur unter der Voraussetzung, dass das autonome Fahren weniger unfallgefährdet ist als das von Menschen gesteuerte Fahrzeug. Hierbei ergibt sich eine Problematik, da nicht automatisierte Fahrzeuge mit Hilfe von FAS ebenfalls immer sicherer werden. Desweiteren ist die „Sicherheit“, die für solche Vergleiche benötigt würde nur schwer messbar. International regelt das Wiener Abkommen von 1968 den Straßenverkehr, [9, 21, 22].

Die Änderungen des Wiener Übereinkommens von 1968 über den Straßenverkehr lauten:

Art. 8 Abs. 5:

„Jeder Lenker (Führer von Tieren) muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können“, [Zitat 20, Seite 13].

Art. 13 Abs. 1:

„Jeder Fahrzeuglenker muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle im obliegenden Fahrbewegungen auszuführen. Er muss bei der Wahl der Geschwindigkeit seines Fahrzeugs ständig die Umstände berücksichtigen, insbesondere die örtlichen Verhältnisse, den Straßenzustand, den Zustand und die Beladung seines Fahrzeugs, die Witterungsverhältnisse und die Dichte Verkehrs, um innerhalb der nach vom übersehbaren Strecke und vor jedem vorhersehbaren Hindernis sein Fahrzeug anhalten zu können. Er muss langsamer fahren, und wenn nötig, anhalten, sobald die Umstände es verlangen, namentlich wenn die Sicht nicht gut ist.“ [Zitat 20, Folie 13]

Desweiteren existiert die Internationale UNECE-Regelung Nr. 79 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa. Diese umfasst einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage, [20].

UNECE Regelung Nr. 79 der Vereinten Nationen Punkt 5.1.6.1.:

„Sobald die automatische Lenkfunktion einsatzbereit ist, muss dies dem Fahrer angezeigt werden, und die Steuerung muss automatisch ausgeschaltet werden, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit den eingestellten Grenzwert von 10 km/h um mehr als 20% überschreitet oder die auszuwertenden Signale nicht mehr empfangen werden“, [Zitat 20, Seite 15].

Daraus ergibt sich rechtlich gesehen die Problematik, dass für das autonome Fahren für die Lenkanlage nur 10 km/h zulässig sind. Eine solche Geschwindigkeitsbegrenzung ist für den

Straßenverkehr oder die Autobahn zu langsam sind und somit momentan nur schwer realisierbar, [5].

Abbildung 2.15 zeigt eine Übersicht über die rechtlichen Rahmenbedingungen. Die Matrix gliedert sich horizontal in internationales und nationales Recht (Bezug auf Deutschland) sowie vertikal in Verhaltens- und Zulassungsrecht.

	International 	National 
Verhaltensrecht	<p>Wiener Übereinkommen von 1968</p> <p>Art.8 (1) <i>Jedes Fahrzeug ... muss einen Führer haben.</i></p> <p>Art.13 (1) <i>Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, ...</i></p>	<p>StVO*</p> <p><i>Dauerhaftes Abwenden von der Fahraufgabe ist aktuell nicht im Einklang mit Verhaltensrecht in Deutschland.</i></p> <p><i>Gilt auch für andere Staaten. Auch für solche, die das WÜ nicht ratifiziert haben (z.B. USA).</i></p>
Zulassungsrecht	<p>ECE R-79 Lenkanlagen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unterstützende Lenkfunktionen bei allen Geschw. - Automatische Lenkfunktionen <u>nur bis 10 km/h</u> <p>ECE R-48 Lichttechnische Einrichtungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Autom. Blinken nicht geregelt (⇒ kein Problem) - Autom. Notblinken <u>nur nach Notbremsung / Unfall</u> 	<p>---</p> <p><i>In Deutschland keine weiteren Änderungen über internationale Regelungen hinaus</i></p>

Abbildung 2.15: Übersicht über die Rechtlichen Rahmenbedingungen [23]

Diese rechtlichen Vorgaben wurden dahin gehend ergänzt, dass Fahrzeugsysteme, die die Fahrweise beeinflussen vom Fahrer jederzeit übersteuert oder abgeschaltet werden können. Das bedeutet, dass Systeme entwickelt werden können bei denen der Fahrer nicht dauerhaft die Kontrolle innehat, sie aber jederzeit wieder erlangen kann. Damit wären hoch- und voll automatisierte Fahrzeuge künftig zulässig (Stufe 3 und 4 siehe Abbildung 2.14), [24, 25, 26].

Aus den rechtlichen Rahmenbedingungen stellt sich außerdem ein ethischer Wertungskonflikt zwischen Roboter und Lenker, nämlich welcher von beiden in schwierigen Situationen die besseren Entscheidungen trifft. In Regel können Computer bis zum unvermeidbaren Crash bessere Maßnahmen setzen oder Fahränderungen einleiten. Im Zweifelsfall ist dies bis zum Crash-Szenario – also bis hin zum Aussuchen eines Unfallgegners- zu bedenken. Dadurch kann es in Ausnahmesituationen zu einem sogenannten „Entscheidungsdilemma“ kommen, [9].

2.5 Haftung

Die Produkthaftung für ein FTF oder FTS ist bestimmt durch dessen Gebrauch. Tritt während einer vollautomatisierten Fahrt ein Schaden oder ein Unfallschaden auf, so ist die Frage zu klären, ob es sich kausal um einen Produktfehler handelt. Eine zivilrechtliche Haftung für den Hersteller tritt also dann ein, wenn eine falsche Steuerungsentscheidung nachweislich als Produktfehler eingestuft wird. Das bedeutet, dass neben dem Fahrzeughalter auch der Hersteller eines FTF vom Haftungsrisiko für das maschinelle Wirken betroffen ist. Da eine automatische Fahrzeugsteuerung über mehr Eingriffsmöglichkeiten verfügt, erweitert sich auch der Bereich steuerungsrelevanter Fehler und somit das Haftungsrisiko des Herstellers. Der Argumentation kann entgegen gehalten werden, dass eine automatische Fahrzeugsteuerung nur eine von mehreren Unfallursachen darstellt. Deswegen

muss untersucht werden, inwieweit der Straßenverkehr selbst als Unfallursache in Frage kommt. Es muss im Sinne einer naturwissenschaftlichen Kausalität die Ursache für einen Unfallschaden ermittelt werden, [9].

Bis jetzt besteht in den Vorschriften des Haftungsrechts für den Straßenverkehr, bezogen auf die autonome Steuerung, keine direkte Regelung, da es eindeutig eine Steuerung durch einen Fahrer zugrunde legt. Diese rechtliche „Lücke“ bedingt, dass im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren oft von einer „fehlenden“ Haftung die Rede ist, [20].

Dennoch gibt es für den Halter eines Fahrzeugs –unabhängig welche Gefahr es darstellt- eine grundlegende Haftungsvorschrift. Diese besagt, dass der Halter eines Fahrzeugs unabhängig für den Betrieb seines Fahrzeugs zum Ersatz aller kausal darauf zurückzuführenden Schäden – das betrifft nicht Vermögensschäden- verpflichtet ist. Eine Ausnahme stellt der Einfluss einer höheren Gewalt dar. Eine Unterscheidung zwischen technischem Versagen und fahrerischem Steuerungsverhalten wird nicht gemacht. Die Zuordnung eines FTF zu einem Halter stellt kein Problem dar und führt auch rechtlich zu keinen Widersprüchen. Es ergeben sich keine neuen Pflichten für den Halter, jedoch bewirkt ein FTF eine zivilrechtliche Haftung. Es besteht für den Halter eine Versicherungspflicht in Form einer Kraftfahrzeug (Kfz) Haftpflichtversicherung. Für das sogenannte „Maß der Verursachung“ im Falle eines Unfalls ergibt sich mit einem FTF die Forderung nach einer Unfalldatenaufzeichnung, da ansonsten eine Schadensaufteilung nach Verursachungsanteilen für das Haftungsrecht nicht möglich ist. Es müssen also Vorkehrungen getroffen werden, die eine Unfall Rekonstruktion ermöglichen. Allerdings ist hierbei darauf zu achten, dass die Datenverarbeitung nur im erforderlichen Rahmen erfolgt und so der Datenschutz gewährt bleibt. Neben der klassischen Verschuldenshaftung tritt als weiterer Haftungsgrund eine Gefährdungshaftung (EU-KH-Richtlinien). Diese ist verschuldensunabhängig und stellt keine reine Erfolgshaftung dar, [9, 20].

„So fremd wäre das gar nicht, dass das Auto verantwortlich ist, das haben wir im Prinzip jetzt schon bei der Haftpflicht. Nämlich derjenige der ein Fahrzeug hat, dass am Straßenverkehr teilnimmt, hat die Verpflichtung eine Haftpflichtversicherung abzuschließen und wenn durch dieses Fahrzeug –und das haben wir immer wieder das auch Fahrzeuge ohne Lenker sich irgendwie selbstständig machen und dabei einen Schaden verursachen, irgendwie wegrollen, na dann haftet eben die Versicherung. Dann haben wir halt niemanden der strafrechtlich verantwortlich ist, aber wir haben zumindest jemanden der für den Schadenersatz aufkommen muss und das ist ja in den meisten Fällen ausreichend“, [Zitat 27].

3 Konzept für städtischen Verteilerverkehr

3.1 Platooning

Im Rahmen dieser Arbeit wurde am Institut für Fahrzeugtechnik ein Konzept vorgeschlagen, dass in naher Zukunft umsetzbar in den urbanen Gütertransport integriert werden kann. Auf Basis der in Kapitel 2 vorgestellten FTF erscheint das Platooning als das am ehesten realisierbare Konzept, da noch ein Fahrer während der Fahrt in Konvoi anwesend ist. Desweiteren sind für dieses Konzept bereits Testgenehmigungen erteilt worden, die zu keinen größeren Problemen geführt haben.

Abbildung 3.1 zeigt das erarbeitete Konzept des automatisierten urbanen Verteilerverkehrs bestehend aus einem bemannten Zugfahrzeug, das ausgehend von einem Logistikzentrum (in Abbildung 3.1 mit LZ gekennzeichnet) mit einer beliebigen Anzahl von FTF losfährt. Die Kopplung der Fahrzeuge wird durch eine elektronische Deichsel während der Fahrt im Konvoi gewährleistet. Dies geschieht durch die in Kapitel 2.1 beschriebenen Fahrassistenzsysteme des Platooning. Es beliefert zum Beispiel moderne Wohnsiedlungen, sogenannte City-Hubs (also kleinere Verteilerzentren in der Innenstadt) oder Disconter. Die letzte Strecke („last mile“) wird dabei autonom zurückgelegt, indem sich das Fahrzeug bei Erreichen des Zielgebiets aus dem Konvoi löst. Auf dem Betriebsgelände oder Zielgebiet erfolgt die Navigation über die in Kapitel 2.1 vorgestellten Möglichkeiten. Die dafür benötigte Infrastruktur muss an den gegebenen Örtlichkeiten sowie am Fahrzeug vorhanden sein. Deswegen sind zentral gelegene Logistikzentren vorteilhaft, da ein autonomes Rangieren in diesem „privaten“ Bereich kaum Konfliktpotenzial bietet und auch rechtlich durchführbar ist.

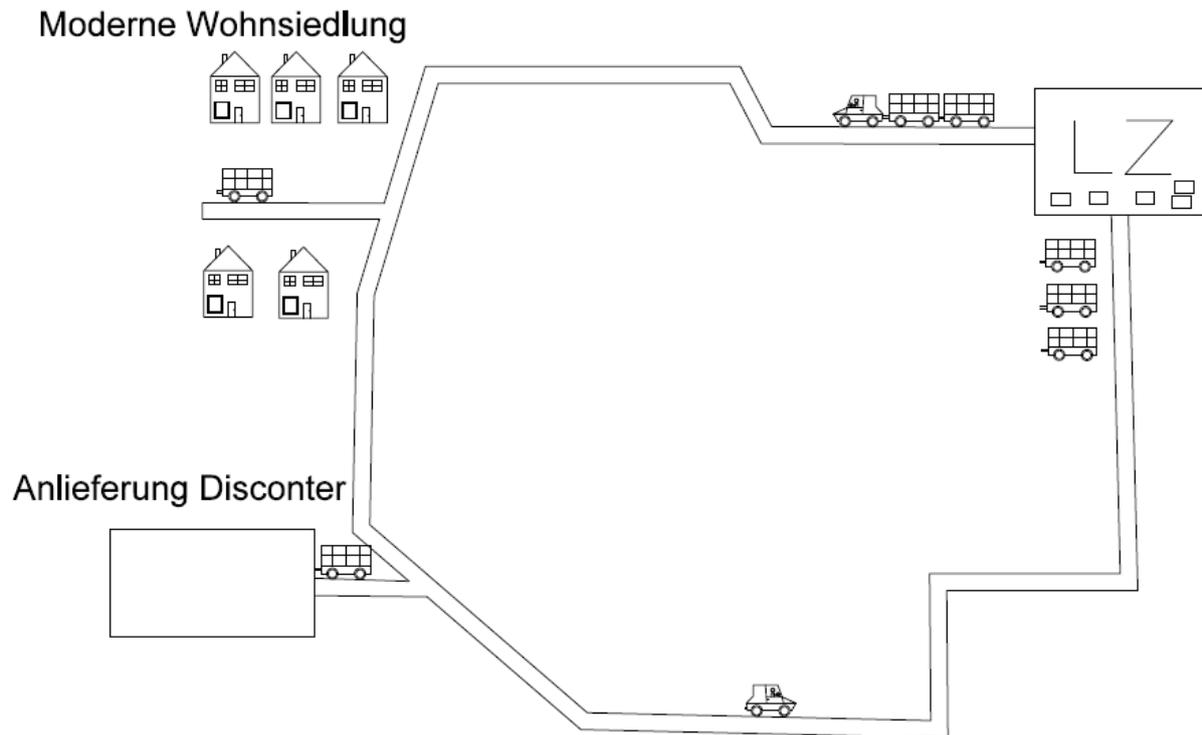


Abbildung 3.1: Konzept autonomes Fahren

Das gezeigte Konzept ist eine realistische und auf absehbare Zeit durchführbare Anwendung auf dem Weg zu einer Autonomisierung des Güterverkehrs. Eine der Herausforderungen birgt sicher das Ankoppeln sowie auskoppeln aus dem Fahrverbund.

3.2 Patente

Es gibt bereits eine Reihe von Patenten, die dem in dieser Arbeit erstellten Konzept sehr nahe kommen. Die elektronische Deichsel ist im Bereich des Platooning bereits Stand der Technik und in Tests erprobt, siehe dazu Kapitel 2.3.3. Aufgrund der Fülle von Patenten die Einsatzkonzepte mit elektronischer Deichsel, bemanntem Zugfahrzeug und automatisierten Folgefahrzeugen auf verschiedenste Weise beschreiben wird auf eine einzelne Patent Betrachtung verzichtet.

4 Ladekonzepte von Elektrofahrzeugen

Aufgrund der vorhandenen Stehzeiten ergeben sich Möglichkeiten zum Nachladen der Batterien. Dazu werden die drei grundlegenden Konzepte vorgestellt und erörtert.

4.1 Induktionsladen

Induktives Laden stellt derzeit die einzige kontaktlose Möglichkeit zum Nachladen dar, [28].

Das Prinzip der Induktionsladung beruht auf der Energieübertragung des Transformators. In der Primärspule erzeugt ein zeitlich veränderlicher Strom ein zeitlich veränderliches Magnetfeld, dass in der unmittelbar nahegelegenen Sekundärspule wiederum eine Induktionsspannung erzeugt. Das durch den Strom erzeugte Magnetfeld überlagert sich in weiterer Folge mit dem der Primärspule. Um die Energieübertragung zu realisieren sind höhere Frequenzen im Bereich bis zu 150 kHz notwendig. Die maximale Kopplung und somit die maximal übertragbare Energie erfolgt bei geringstem Luftspalt sowie deckungsgleicher Spulen. Positionstoleranzen bewirken eine Reduktion der Energieübertragung. Derzeitige Systeme übertragen bei einer 230 V-Wechselspannung eine maximale Anschlussleistung von 3,7 kW. Die Abmessungen der primären und sekundären Einheit liegen in der Größenordnung von 60x60 cm. Das Gewicht einer sekundären Einheit beträgt 15 kg. Zusätzlich besteht die Option durch den Einsatz mehrerer Spulensysteme von 3,7 kW Anschlüsse bis zu 11,1 kW zu erreichen. Dadurch sind jedoch die Anforderungen an die Komponenten höher und außerdem ist eine Abschirmung der elektromagnetischen Felder aus Sicherheitsgründen notwendig. Gegenwärtig können Gesamtwirkungsgrade bis 80% umgesetzt werden, [29].

Der Anbieter Qualcomm bietet die Leistungsstufen 3,3 kW, 6,6 kW sowie 22 kW an. Die Anordnung der Spule variiert dabei zwischen kreisrund, doppel D förmig und überlappend doppel D förmig, [30].

Dem Vorteil der Kontaktlosigkeit steht jedoch der Nachteil des hohen technischen Aufwands sowie der damit verbundenen hohen Kosten für das Fahrzeug und die Ladestation gegenüber. Außerdem muss der Fahrer mit einer Genauigkeit von 150 mm -sowohl rückwärts, seitlich und vorwärts- über der Plattenmitte parken. Dafür ist von den Fahrzeug Herstellern ein Positionierungssystem wünschenswert. Etwaige Gegenstände zwischen Bodenplatte und Fahrzeug stellen ebenfalls ein Risiko dar. Für den aktuellen Serieneinsatz –insbesondere wegen der geringen Ladeströme- ist diese Ladetechnologie derzeit wenig interessant, [28, 30].

4.2 Akkuwechsel

Der Akkuwechsel ist der Vorgang, bei dem die gesamten Batterien durch vollgeladene Batterien ersetzt werden. Hierfür bedarf es einer Demontage der entladenen Batterien und anschließend einer Montage der neuen vollgeladenen Batterien. Vorteilhaft wirkt sich die geringe Standzeit zum Wechseln der Batterien aus. Allerdings sind hierfür eigene Wechselstationen sowie Vorrichtungen notwendig, die eine große Herausforderung an die Infrastruktur darstellen. Außerdem ist eine Standardisierung der Batterien und der am Fahrzeug vorgesehenen Montagestellen nötig. Ein Batteriewechsel ist deswegen gegenwärtig nur in geschlossenen Flotten sinnvoll, [28].

Die Lagerung der getauschten Akkus ist eine zusätzliche Herausforderung die gelöst werden muss. Der elektrisch betriebenen 18 t LKW von E-Force ist so ausgerüstet, dass mit entsprechen Vorrichtungen ein Batteriewechsel in 5 min möglich ist, [31].

4.3 Ladekabel

Das Laden über ein Ladekabel erfolgt gleich wie bei einer Zapfsäule für Benzin oder Dieselfahrzeuge, mit dem Unterschied, dass statt des Treibstoffs Strom über Kabel und Stecker geladen wird. In der Regel ergeben sich lange Standzeiten bis zum vollen Beladen der Batterien. Verglichen mit dem induktiven Laden erweisen sich hingegen die relativ hohen Ladeleistungen als Vorteil. Bezüglich des Ladekabels findet eine Unterscheidung zwischen dem AC- beziehungsweise dem DC-Laden statt. Als AC-Laden bezeichnet man die Wechselstromladung, wohingegen das DC-Laden mit Gleichstromladung durchgeführt wird. Mit dem AC Laden an einer Ladestation können bis zu 43,5 kW Ladeleistung erzielt werden, an einem gewöhnlichen Haushaltsnetz mit maximal 400 V sind 22 kW möglich. In der Regel ist das Ladegerät fest im Fahrzeug eingebaut und kompatibel zur eingesetzten Batterie. Außerdem ist das Kabel sehr flexibel mit allen Lademodi kombinierbar. Beim DC-Laden wird zwischen Low- und High-Ladung unterschieden. Mit der Stecker Vorrichtung des Typs zwei sind durch DC-Low Ladeleistungen bis 38 kW möglich. DC-High Laden ermöglicht mit einem in der Ladestation integrierten Ladegerät Leistungen bis 170 kW. Für diese erhöhten Ladeleistungen benötigt man ein eigenes Netz. Dafür gelten erhöhte Sicherheitsstandards und somit erhöhte Kosten der Ladestation gegenüber AC-Ladestationen, [28].

Das Laden von Elektrofahrzeugen hat definierte Ladebetriebsarten, die sich bezüglich ihrer Ladeleistung, Kommunikationsmöglichkeiten und der verwendeten Stromquelle unterscheiden. Tabelle 4.1 zeigt die verschiedenen Ladebetriebsarten und Modi, [28].

Tabelle 4.1: Ladebetriebsarten [28]

Lade-modus	Anschluss energieseitig	Anschluss fahrzeugseitig	ein-phasig	drei-phasig	Kommunikation mit dem Fahrzeug	Verriegelung
Mode 1	Schutzkontakt oder CEE Steckdose	Typ 2	max. 16 A; 7,4 kW	max. 16 A 11 kW	keine	im Fahrzeug
Mode 2	Schutzkontakt oder CEE Steckdose	Typ 2	max. 32 A; 7,4 kW	max. 32 A 22 kW	Kommunikationsmodul im Ladekabel	im Fahrzeug
Mode 3	Steckdose Typ 2	Typ 2	max. 63 A; 14,5 kW	max. 63 A 43,5 kW	Kommunikationsmodul in der Ladestation	im Fahrzeug und in der Ladesteckdose
Mode 4	festes Ladekabel an Ladestation	Typ 2 Combined Charg. Syst.	DC-Low max. 38 kW; DC-High max. 170 kW		Kommunikationsmodul in der Ladestation	im Fahrzeug

Die Stecker und Kabel unterliegen laut IEC vorgegebenen und definierten Normen. Es besteht also die Möglichkeit anhand des Steckers den Ladevorgang zu beeinflussen, sofern davon ausgegangen wird, dass die benötigte Ladeleistung realisierbar ist. Vorhandene Stecker für die Automobilindustrie sind in Tabelle 4.2 mittels Form und Beschreibung dargestellt und erklärt, [32, 33].

Tabelle 4.2: Steckertypen und zugehörige Ladeleistungen [32, 33]

Form	Beschreibung
	<p>Typ 1-Stecker: einphasiger Stecker mit bis zu 7,4 kW Ladeleistung (230 V, 32 A)</p>
	<p>Typ 2-Stecker: dreiphasiger Stecker mit 22 kW Ladeleistung (400V, 32 A) im privaten Raum; An öffentlichen Ladesäulen sind Ladeleistungen bis 43 kW (400 V, 63 A) möglich</p>
	<p>Cumbo-Stecker (Combined Charging System CCS): ergänzter Typ 2-Stecker mit zusätzlichen Kontakten mit bis zu 170 kW Ladeleistung (in der Praxis jedoch nur 50 kW)</p>
	<p>CHAdEMO-Stecker: Stecker erlaubt Ladeleistungen bis 100 kW, tatsächlich jedoch 50 kW realisierbar</p>
	<p>Tesla Supercharger: dreiphasiger Stecker mit 120 kW Ladeleistung (Gleichstrom), Modifikation des Typ 2-Steckers</p>

5 Modellbildung und Simulation

5.1 Theoretische Grundlagen der Kraftfahrzeug Längsdynamik

Unter Fahrzeugdynamik versteht man die Lehre aus dem Zusammenwirken der Kräfte und Bewegungen eines Fahrzeugs. Die Fahrzeugdynamik kann dabei anhand der Hauptbewegungsrichtungen unterteilt werden in Vertikaldynamik, Fahrzeuglängsdynamik (longitudinal) und Fahrzeugquerdynamik (lateral). Da es sich bei dem in dieser Arbeit erstellten Modell um ein Längsdynamikmodell handelt werden im Folgenden die theoretischen Grundlagen der Längsdynamik kurz erläutert. Während der Fahrt wirken auf das Fahrzeug vier äußere Kräfte. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Steigungswiderstand
- Luftwiderstand
- Rollwiderstand
- Beschleunigungswiderstand

Aus diesen Kräften beziehungsweise Fahrwiderständen kann die Antriebskraft, der Drehmoment an den Rädern sowie die Leistung des Motors berechnet werden, [34].

Steigungswiderstand

Die Widerstandskraft aus der Steigung F_S wirkt während einer Tal beziehungsweise Bergfahrt in Abhängigkeit der gesamten Fahrzeugmasse m_{ges} , der Erdbeschleunigung g und Fahrbahnneigung anhand des Steigungswinkels β (5.1). Ist keine Steigung vorhanden -also der Winkel null- entfällt diese Kraft. Die konstant angenommene Erdbeschleunigung beträgt $9,81 \text{ m/s}^2$, [35].

$$F_S = m_{ges} \cdot g \cdot \sin(\beta) \quad (5.1)$$

Luftwiderstand

Die Luftwiderstandskraft berücksichtigt alle auftretenden Strömungsverluste am Fahrzeug, [36]. Die Kraft rührt aus der Druckdifferenz, die sich entlang der Fahrzeugkarosserie bildet und zu einem Druckwiderstand führt. Von geringerer Bedeutung sind Reibungskräfte oder das Durchströmen des Motorraums. (5.2) stellt eine gute Näherung für den Luftwiderstand dar und beinhaltet neben der Anströmfläche A_F , der Luftdichte ρ_L , den dimensionslosen Widerstandsbeiwert c_w , sowie die Geschwindigkeit v des Fahrzeugs, [34].

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho_L \cdot c_w \cdot A_F \quad (5.2)$$

Rollwiderstand

Das Abrollen des Reifens auf der Fahrbahn bewirkt eine Deformation des Reifens in der Lauffläche sowie den Seitenwänden. Die damit verbundene Walkarbeit wird unter anderem mit dem Rollwiderstandsbeiwert a_R berechnet. (5.3) zeigt den Zusammenhang für die Rollwiderstandskraft F_R , [35].

$$F_R = m_{ges} \cdot g \cdot a_R \quad (5.3)$$

Beschleunigungswiderstand

Der Beschleunigungswiderstand F_T setzt sich aus einem translatorischen F_{Ttrans} und rotatorischen F_{Trot} Anteil zusammen (5.4).

$$F_T = F_{Ttrans} + F_{Trot} \quad (5.4)$$

Der translatorische Anteil des Beschleunigungswiderstands wird häufig auch als translatorische Trägheitskraft bezeichnet. Die Beschleunigung a wird aus der Ableitung des Geschwindigkeitsanteils dv nach der Zeit dt gebildet. Formel 5.5 zeigt die translatorische Trägheitskraft, [34].

$$F_{Ttrans} = m_{ges} \cdot a \quad (5.5)$$

Der rotatorische Anteil berücksichtigt alle rotierenden Trägheitsmomente $J_{R,j}$, die im Antriebsstrang auftreten. Darunter fallen beispielsweise Rad, Motor, Kupplung, Antriebswelle oder Getriebe. Diese stehen im Verhältnis zu den quadrierten Radien r_j der jeweiligen rotierenden Komponente. Verallgemeinert kann der translatorische Beschleunigungswiderstand nach (5.6) angegeben werden, [36, 37].

$$F_{Trot} = \sum_{j=1}^n \frac{J_{R,j}}{r_j^2} \cdot a \quad (5.6)$$

Da eine genaue Berechnung der einzelnen Trägheitsmomente oft schwierig ist wird ein Drehmassenzuschlagsfaktor λ zur Berücksichtigung der rotierenden Teile verwendet, sodass der Beschleunigungswiderstand nach (5.7) geschrieben werden kann, [34].

$$F_T = F_{Ttrans} \cdot \lambda \quad (5.7)$$

Damit folgt für die Antriebskraft F_A die Gleichgewichtsbedingung nach (5.8), [36].

$$F_A = F_S + F_L + F_R + F_T \quad (5.8)$$

5.2 Simulationsmodell

Die Simulation wurde mit *Matlab* und dem zugehörigen Progammpaket *Simulink* erstellt und anschließend durchgeführt. *Simulink* ist ein Zusatzmodul von *Matlab*. Dabei werden Blöcke mathematischer Operatoren mit Signalflusspfeilen verbunden. Für die Berechnung des Fahrzeugs ist zu beachten, dass bei der Simulation ein Punktmassenmodell zugrunde gelegt ist. Das bedeutet, dass die gesamte Fahrzeugmasse auf einen Punkt konzentriert und mit diesem Punkt das Modell berechnet wird. Das Fahrzeugmodell in *Simulink* ist in Abbildung 5.1 dargestellt und bildet die für die Auswertung wesentlichen Komponenten ab.

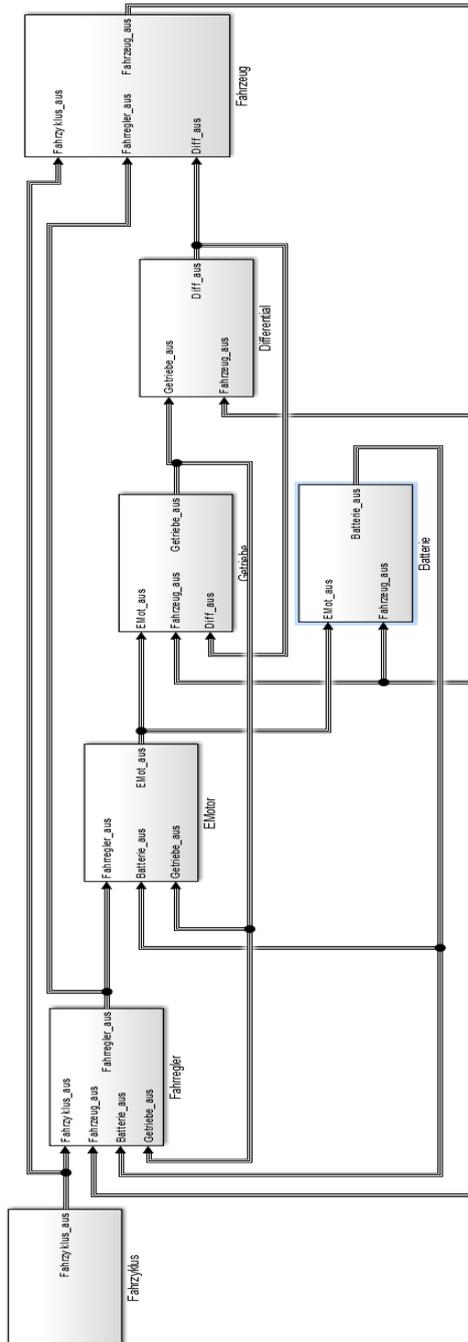


Abbildung 5.1: Simuliertes Fahrzeugmodell

Das erarbeitete Fahrzeugmodell eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs untergliedert sich in sieben simulierte Blöcke (siehe auch Abbildung 5.1):

- Fahrzyklus
- Fahrregler
- E-Motor
- Getriebe
- Batterie
- Differential
- Fahrzeug

Diese sind durch physikalische Größen miteinander verbunden. Innerhalb der Blöcke sind Eingangsgrößen stets grün eingefärbt, Ausgangsgrößen rot, Parameter orange und Umrechnungsfaktoren blau. Damit werden zwei definierte Fahrzeugklassen (3,5 t und 18 t) anhand von zwei ausgewählten repräsentativen Fahrzyklen simuliert, ausgelegt und berechnet. Die Blöcke und dessen wichtigste physikalische Eigenschaften sind nach den angegebenen Formeln aufgebaut und werden im Folgenden vorgestellt.

5.2.1 Fahrzyklus

Der Block Fahrzyklus liefert den Eingangsgrößen für die gesamte Simulation. Der Fahrzyklus beinhaltet –durch die aufgezeichneten Daten aus Fahrversuchen– die vorgegebene Fahrzeuggeschwindigkeit v_0 und den Steigungswinkel β über die Zeit t . Mit der vorgegebenen Geschwindigkeit differenziert nach dem Zeitschritt Δt dient auch die Beschleunigung a als Eingangsgröße.

5.2.2 Fahrerregler

Die Eingangsgrößen des Fahrreglers sind die vorgegebene Fahrzeuggeschwindigkeit aus dem Fahrzyklus, die tatsächlich gefahrene Fahrzeuggeschwindigkeit v des Fahrzeugblocks, der State of Charge SOC der Batterie sowie die Winkelgeschwindigkeit des Getriebes ω_{Get} . Ein einfacher P-Regler vergleicht die vorgegebene Fahrzeuggeschwindigkeit mit der gefahrenen Geschwindigkeit. Die erhaltene Geschwindigkeitsdifferenz Δv (entspricht der Regeldifferenz) wird mit dem Proportionalfaktor p multipliziert (damit erhält man die Stellgröße) und anschließend mit der Pedalstellung aus der Vorsteuerung addiert. Der Proportionalregler hat die Aufgabe das Signal der Regeldifferenz über einen linearen Zusammenhang zu verstärken. [38] Die Vorsteuerung wird benötigt um dem Fahrzeug ein leichteres Erreichen des vorgegebenen Signals aus dem Fahrzyklus zu ermöglichen. Ohne Vorsteuerung würde das Fahrzeug den Fahrzyklus im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm verzögert durchlaufen. Das erhaltene Ergebnis aus der Addition der Pedalstellung mit der Stellgröße aus dem Proportionalregler wird multipliziert mit dem Moment aus dem Motorkennfeld (gebildet über die Winkelgeschwindigkeit des Elektromotors ω_{EM}) zum geforderten Moment für den Elektromotor. Desweiteren wird mit einem sogenannten „*Matlab* Function Block“ das geforderte Bremsmoment über den SOC ausgegeben. Den Block Fahrregler verlassen somit die Werte des geforderten Bremsmoments beziehungsweise des geforderten Moments für den Elektromotor, die vorgegebenen Geschwindigkeit und die tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit.

5.2.3 Elektromotor

Als Eingangssignale erhält der Elektromotor wie in Abbildung 5.2 gezeigt die Winkelgeschwindigkeit des Getriebes vom Getriebeblock, den geforderten Moment für den Elektromotor aus dem Fahrregler sowie die Batteriespannung U_{Bat} aus dem Batterieblock. Die Winkelgeschwindigkeit des Getriebes wird zeitlich differenziert zur Winkelbeschleunigung umgeformt. Das Resultat wird anschließend mit dem Trägheitsmoment des Elektromotors multipliziert und vom geforderten Moment aus dem Fahrregler subtrahiert. Damit kann das erhaltene Resultat zum Drehmoment des Elektromotors T_{EM} über eine Transfer Function umgewandelt werden.

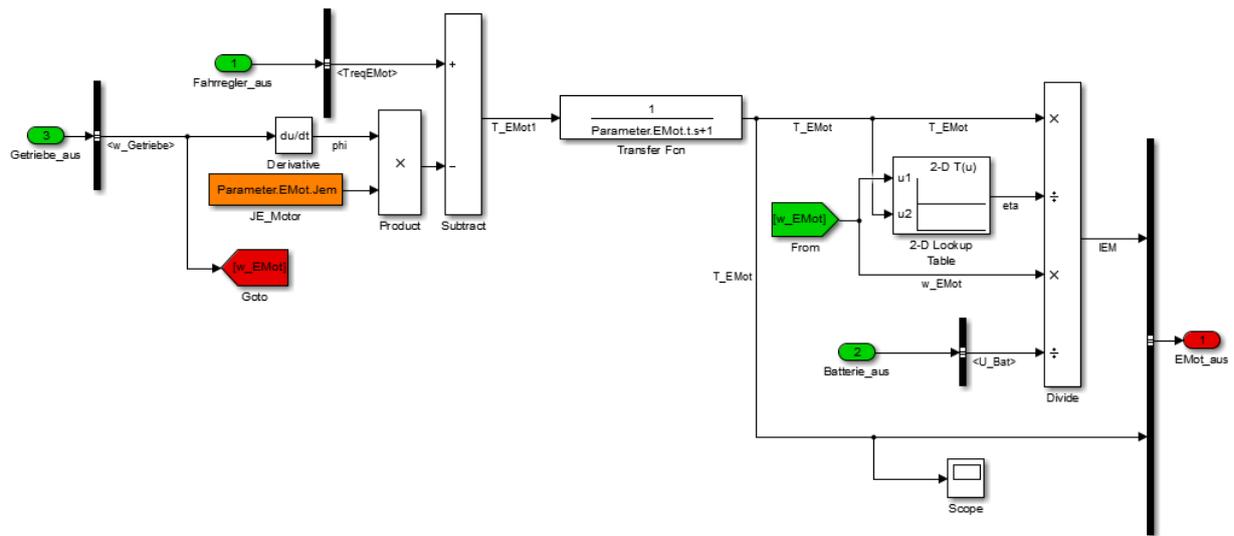


Abbildung 5.2: Simulinkmodell Elektromotor

Mit dem erhaltenen Drehmoment des Elektromotors kann wiederum über den Wirkungsgrad des Elektromotors η_{EM} ein Zusammenhang zur Stromstärke I_{EM} (5.9) hergestellt werden. Die Stromstärke und der Drehmoment des Elektromotors sind die Ausgangsgrößen dieses Modellblocks.

$$I_{EM} = \frac{T_{EM} \cdot \omega_{EM}}{\eta_{EM} \cdot U_{Bat}} \quad (5.9)$$

5.2.4 Getriebe

Im Getriebe wird das Drehmoment des Elektromotors durch die Getriebeübersetzung zu einem höheren Getriebemoment T_{Get} gewandelt. Dabei werden mit einem Getriebewirkungsgrad η_{Get} die auftretenden Verluste näherungsweise berücksichtigt. Abhängig von der Richtung des Motormoments wird durch den Wirkungsgrad dividiert (Bremsen) beziehungsweise multipliziert (Beschleunigen). (5.10) zeigt das Beschleunigen des Fahrzeugs. Dazu ist im Simulink Block ein „Switch“-Schalter implementiert. Die Winkelgeschwindigkeit des Getriebes ω_{Get} berechnet sich aus der Getriebeübersetzung i_{Get} und der Winkelgeschwindigkeit des Differentials ω_{Dif} , so wie in (5.11) gezeigt. Der Getriebemoment und die Getriebewinkelgeschwindigkeit sind die Ausgangsgrößen des Blocks.

$$T_{\text{Get}} = T_{\text{EM}} \cdot \eta_{\text{Get}} \cdot i_{\text{Get}} \quad (5.10)$$

$$\omega_{\text{Get}} = \omega_{\text{Dif}} \cdot i_{\text{Get}} \quad (5.11)$$

5.2.5 Batterie

Das in Abbildung 5.3 gezeigte Modell der Batterie ist so aufgebaut, dass dieses einen eigenen Block für die Zelle enthält (grau eingefärbt in der Mitte von Abbildung 5.3). Eingangsgrößen sind die Stromstärke des Elektromotors sowie der aus dem Fahrzeugblock stammende Weg s (jeweils grün eingefärbt). Die Stromstärke des Elektromotors wird für die einzelne Zelle durch die Anzahl der parallelen Zellen n_p geteilt um so die Stromstärke für die Zelle I_Z zu erhalten (5.12). Die Zellspannung wird hingegen mit der Anzahl der seriellen Zellen n_s multipliziert um so wiederum die Batteriespannung zu erhalten. Die Batterie liefert als Ausgänge den Energieverbrauch E_v pro 100 km, den State of Charge SOC , die Batteriespannung sowie die Batterieladung der Zelle.

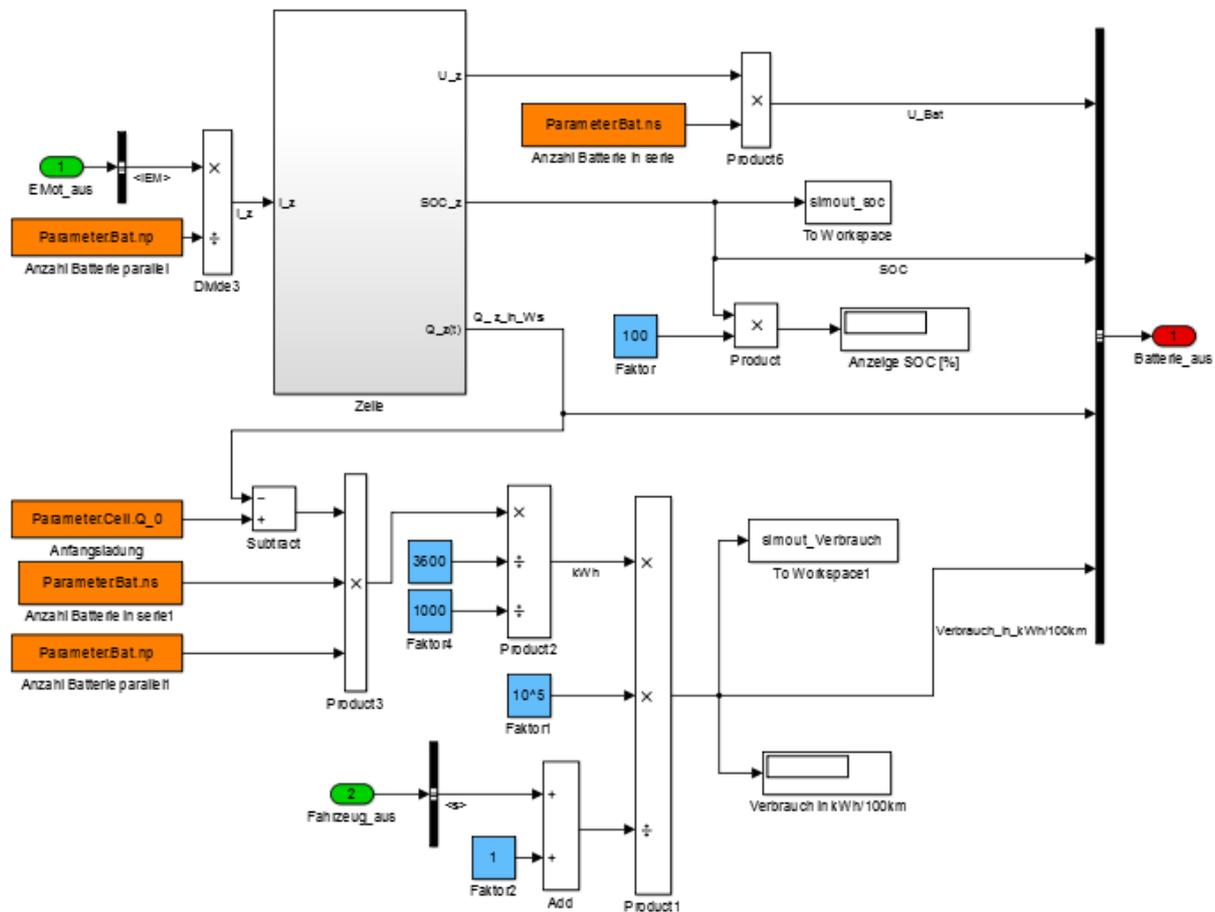


Abbildung 5.3: Simulinkmodell Batterie

$$I_Z = \frac{I_{EM}}{n_p} \quad (5.12)$$

Die Ermittlung des Energieverbrauchs wird in Kapitel 5.2.3 genauer erläutert, findet aber in der Batterie statt. Innerhalb der Zelle wird der State of Charge (SOC) nach Kapitel 5.2.2 und die Zellladung wie in Kapitel 5.2.3 bestimmt.

5.2.6 Differential

Das Differential wandelt das Moment am Getriebeausgang mit der Übersetzung i_{Dif} , sowie einem Wirkungsgrad η_{Dif} zu einem am Differential wirkenden Moment T_{Dif} . Der Wirkungsgrad des Differentials ist gleich wie beim Getriebe richtungsabhängig implementiert und wird deswegen entweder multipliziert (Beschleunigen) oder dividiert (Bremsen). In (5.13) ist dieser Zusammenhang für das Beschleunigen angegeben. Die Winkelgeschwindigkeit des Rads ω_{Rad} ist mit der des Differentials nach (5.14) verknüpft.

$$T_{Dif} = T_{Get} \cdot \eta_{Dif} \cdot i_{Dif} \quad (5.13)$$

$$\omega_{Dif} = \omega_{Rad} \cdot i_{Dif} \quad (5.14)$$

5.2.7 Fahrzeug

Der Modellblock Fahrzeug ist so generiert, dass die Modellierung die Kräfte der Längsdynamik wie in Kapitel 5.1 dargelegt wiedergibt. Ein Unterschied von (5.15) zu (5.8) besteht darin, dass der Fahrzeug Block die Längsdynamik nach dem translatorischen Beschleunigungswiderstand auflöst und statt dem rotatorischen Beschleunigungswiderstand eine Bremskraft F_B einführt.

$$m_{ges} \cdot a = F_A - F_L - F_R - F_S + F_B \quad (5.15)$$

Mit der Division durch die Masse und anschließender zweifacher numerischer Integration der Fahrzeugbeschleunigung kann die tatsächliche Fahrzeuggeschwindigkeit sowie der zurückgelegte Weg berechnet werden.

5.3 Auswertemethodik

5.3.1 Motorauslegung

Die Auslegung des Motors erfolgt zunächst durch das Auflösen der Bewegungsgleichung der nach der Antriebskraft (5.16). Dabei wird die maximale Masse des Fahrzeugs m_{max} eingesetzt.

$$F_A = F_R + F_S + F_{Ttrans} + F_L \quad (5.16)$$

Die Beschleunigung, Geschwindigkeit sowie der Steigungswinkel werden dabei aus dem Fahrzyklus zu den einzelnen Zeitschritten eingelesen. Die restlichen Größen werden vereinfacht als Konstanten eingesetzt. Der am Rad wirkende Moment T_{Rad} wird

anschließend über (5.17) berechnet, wobei ein konstanter dynamischer Reifenradius r_{dyn} vereinfacht angenommen wird.

$$T_{\text{Rad}} = r_{\text{dyn}} \cdot F_a \quad (5.17)$$

Daraus kann der Moment am Elektromotor T_{EM} mithilfe des Gesamtwirkungsgrades η_{ges} und der Übersetzungen bestimmt werden (5.18). Der Gesamtwirkungsgrad beinhaltet die Wirkungsgrade des Getriebes, des Differentials sowie des Elektromotors (5.19).

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Dif}} \cdot \eta_{\text{Get}} \cdot \eta_{\text{EM}} \quad (5.18)$$

$$T_{\text{EM}} = \frac{T_{\text{Rad}}}{\eta_{\text{ges}} \cdot i_{\text{Dif}} \cdot i_{\text{Get}}} \quad (5.19)$$

Die Winkelgeschwindigkeit des Motors wird nach (5.20) berechnet.

$$\omega_{\text{EM}} = \frac{v \cdot i_{\text{Dif}} \cdot i_{\text{Get}}}{r_{\text{dyn}}} \quad (5.20)$$

Zuletzt wird die Winkelgeschwindigkeit mit (5.21) auf die Drehzahl n_{EM} des Elektromotors umgerechnet.

$$n_{\text{EM}} = \frac{\omega_{\text{EM}} \cdot 30}{\pi} \quad (5.21)$$

Als Ergebnis werden die Momente des Elektromotors sowie dessen Drehzahl in einem gemeinsamen Diagramm für jeden Zeitschritt des Fahrzyklus als Punkte abgebildet. Desweiteren werden Drehzahl/Momenten Kennlinie von unterschiedlichen Motoren eingezeichnet und betrachtet inwiefern die auftretenden Momente vom jeweiligen Motor erreicht werden. Zur Auswahl stehen die von Brusa entwickelten Hybrid Synchron Motoren (HSM), wie sie auch in den gewählten Referenzfahrzeugen zum Einsatz kommen (siehe dazu auch Kapitel 6). Abbildung 5.4 zeigt einen Hybrid Synchron Motor der Marke Brusa.



Abbildung 5.4: Brusa Hybrid Synchron Motor [39]

5.3.2 Masse und Nutzlast

Zur Berechnung der Batteriemasse wird ein Massespezifischer Faktor der Batterie m_{spezBat} , die Anzahl der seriellen Zellen, die Anzahl der parallelen Zellen, die nominelle Zellspannung U_{znom} und die nominelle Ladung der Zelle C_{znom} herangezogen. Die Division durch eine Konstante ergibt sich aus der Notwendigkeit, das Ergebnis in Kilogramm zu erhalten. Der Zusammenhang wird in (5.22) angewendet.

$$m_{\text{Bat}} = \frac{m_{\text{spezBat}} \cdot n_s \cdot n_p \cdot U_{\text{znom}} \cdot C_{\text{znom}}}{1000} \quad (5.22)$$

Sehr ähnlich wird die Masse des Elektromotors beziehungsweise des Verbrennungsmotors bestimmt (5.23/5.24). Ausschlaggebend ist die maximale Leistung sowie ein konstanter spezifischer Massefaktor $m_{\text{spezEM}} / m_{\text{spezVKM}}$ des Motors.

$$m_{\text{EM}} = \frac{m_{\text{spezEM}} \cdot (T_{\text{EM}} \cdot \omega_{\text{EM}})_{\text{max}}}{1000} \quad (5.23)$$

$$m_{\text{VKM}} = \frac{m_{\text{spezVKM}} \cdot (T_{\text{VKM}} \cdot \omega_{\text{VKM}})_{\text{max}}}{1000} \quad (5.24)$$

Die Gesamtmasse des Fahrzeugs m_{ges} errechnet sich aus dem Summieren der Massenanteile aller einzelnen Komponenten. Die transportierte mittlere Beladung m_{Beladung} , die Getriebemasse m_{Get} und die Fahrzeugmasse m_{Fahrzeug} sind dabei bekannt. Für das Vergleichsfahrzeug mit Verbrennungsmotor wird Anstelle der Batteriemasse und der Elektromotormasse die mittlere Tankmasse und Motormasse eingesetzt. Allerdings sind für die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor häufig sehr genaue Angaben vorhanden. Die berechneten Werte werden darum um die genauen Werte über des Referenzfahrzeugs geringfügig korrigiert. Die jeweilige Berechnung zeigt (5.25) und (5.26).

$$m_{\text{ges}} = m_{\text{EM}} + m_{\text{Bat}} + m_{\text{F}} + m_{\text{Beladung}} + m_{\text{Get}} \quad (5.25)$$

$$m_{\text{ges}} = m_{\text{VKM}} + m_{\text{Tank}} + m_{\text{F}} + m_{\text{Beladung}} + m_{\text{Get}} \quad (5.26)$$

Zur Berechnung der Nutzlast m_{Nutzlast} wird laut (5.27) in beiden Fällen die bekannte maximale Masse der Fahrzeugklasse m_{max} benötigt.

$$m_{\text{NL}} = m_{\text{max}} - m_{\text{ges}} + m_{\text{Beladung}} \quad (5.27)$$

5.3.3 Energiespeicher

Die Auslegung des Energiespeichers erfolgt nach dem Kriterium, dass beim Durchfahren des Fahrzyklus ein restlicher SOC von 20% vorhanden sein muss. Der SOC entspricht dem Grad der vorhandenen Batterieladung. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis des zeitlichen Verlaufs der Ladung der Zelle $Q_z(t)$ während des Zyklus zur nominellen Zellladung Q_{Znom} (5.28).

$$\text{SOC}(t) = \frac{Q_z(t)}{Q_{\text{Znom}}} \quad (5.28)$$

Die zeitliche Entladung der Zelle wird in Kap. 5.3.4 genauer beschrieben. Der benötigte Energiespeicher E wird nach Erfüllen des 20%-SOC Kriteriums nach (5.29) berechnet.

$$E = n_p \cdot n_s \cdot U_{\text{znom}} \cdot C_{\text{znom}} \quad (5.29)$$

Die Zellen sind so parametrisiert, dass sie der von Kreisel Electric verwendeten Blirnd 21 PLQ Zelle (siehe Abbildung 23) entsprechen. Dabei handelt es sich um eine wassergekühlte Lithium-Ionen Batterie der neuesten Generation. Der Energieinhalt dieser Zelle beträgt 267,1 Wh, [40].



Abbildung 5.5: Kreisel Akku Blirnd 21P LQ [40]

5.3.4 Energieverbrauch

Die Ladung der Zelle ermittelt sich aus der elektrischen Anfangsladung der Zelle Q_0 nach (5.30). Beim Berechnen des Energieverbrauchs muss zwischen Be- und Entladen der Batterie unterschieden werden. Dies geschieht über die elektrische Ladung der Zelle beziehungsweise der darin verfügbaren

Leistung P . Die Anfangsspannung der Zelle U_0 wird aus dem SOC, der Zellspannung und dem SOC zu Beginn innerhalb der Zelle SOC_{z0} interpoliert.

$$Q_0 = C_z \cdot U_0 \cdot SOC_{z0} \cdot 3600 \quad (5.30)$$

Die Leistung wird abhängig ob verzögert (positives Vorzeichen, Laden) oder beschleunigt (negatives Vorzeichen, Entladen) wird vorzeichenrichtig zur Anfangsladung der Zelle zeitlich integriert (5.31).

$$Q_z(t) = Q_0 + \int_0^t P \cdot dt \quad (5.31)$$

(5.32) zeigt die Leistung beim Entladen, (5.33) für den Ladevorgang. Die Zellspannung wird im Bereich von 3 V bis zur nominellen Zellspannung über einen Scope mithilfe des SOC interpoliert. Dabei ist η_{EL} der Wirkungsgrad beim Entlade- und η_L beim Ladevorgang.

$$P = \frac{I_z \cdot U_z}{\eta_{EL}} \quad (5.32)$$

$$P = I_z \cdot U_z \cdot \eta_L \quad (5.33)$$

Wird nach dem Durchlaufen des Fahrzyklus die Anfangszellladung der Zelle wieder subtrahiert, mit der Anzahl der seriellen und parallelen Zellen multipliziert sowie durch den Weg dividiert erhält man nach (5.34) den Energieverbrauch. Um beim Anfahren zum Zeitpunkt $t=0$ einen numerischen Abbruch durch Division durch Null zu vermeiden wird eine Strecke von 1 m addiert.

$$E_v = \frac{(Q_z(t) - Q_{z0}) \cdot n_s \cdot n_p}{s + 1} \quad (5.34)$$

5.3.5 Zeitliche Verzögerung

Um eine Aussage über den Zeitverlust der ausgewählten Motoren zu treffen, wird ausgehend von der 100%-Motorlösung (das entspricht der theoretischen Motorvariante mit der alle numerischen Ausreiser im Drehzahl/Drehmomenten Lieferkennfeld abgedeckt werden) eine Abschätzung über die zeitliche Verzögerung t_v der schwächeren Motoren durchgeführt. Dazu wird die zurückgelegte Wegdifferenz zwischen dem Referenzfahrzeug s_{Ref} und den anderen Fahrzeugen (exemplarisch in (5.35) nur Fahrzeug 1) s_1 durch die durchschnittliche Geschwindigkeit der betreffenden Fahrzeuge (exemplarisch in (5.35) Fahrzeug 1) v_1 mit der jeweils schwächeren Motorisierung dividiert. Die Werte für den Weg und die Geschwindigkeit werden beim Durchlaufen des Fahrzyklus ermittelt und sind somit keine gewählten Parameter.

$$t_v = \frac{s_{\text{Ref}} - s_1}{v_1} \quad (5.35)$$

5.3.6 Reichweite und Mehrkosten

Die Reichweite R des Elektrofahrzeugs kann über den Ansatz in (5.36) hergeleitet werden. Der SOC am Anfang und am Ende des Fahrzyklus ist dabei ausschlaggebend.

$$R = \frac{s \cdot \text{SOC}(t_0)}{1000 \cdot (\text{SOC}(t_0) - \text{SOC}(t_{\text{end}}))} \quad (5.36)$$

Die Mehrkosten werden aus einer Batterieviation erstellt, indem die Anzahl der parallelen Zellen sukzessive erhöht und dadurch die Reichweite und Batteriekosten jeweils mit berechnet werden. Die Energiekosten (Vergleiche dazu Abschnitt 5.3.7) werden über die Reichweite, (in diesem Fall gleichbedeutend mit dem Weg) ebenfalls miteinbezogen. (5.37) zeigt die Berechnung der Mehrkosten. Die Fixkosten K_{f1} ergeben sich aus Abschnitt 5.3.9.1 und die Energiekosten K_E aus Abschnitt 5.3.7.

$$K_{\text{Mehr}} = K_{f1} + K_E \quad (5.37)$$

5.3.7 Energiekosten

Die Energiekosten für das Elektrofahrzeug berechnen sich aus dem Preis des Stroms k_{Strom} , dem zurückgelegten Weg und dem Energieverbrauch nach (5.38).

$$K_E = \frac{k_{\text{Strom}} \cdot s \cdot E_v}{100000} \quad (5.38)$$

Als Vergleich werden die Energiekosten für den Treibstoff berechnet (5.39). Dazu werden die Treibstoffkosten k_{Sprit} mit dem Weg und dem durchschnittlichen Spritverbrauch S_v im Innerstädtischen Bereich multipliziert.

$$K_E = \frac{k_{\text{Sprit}} \cdot s \cdot S_v}{100000} \quad (5.39)$$

5.3.8 CO₂-Ausstoß

Die Masse an Kohlendioxid m_{CO_2} , die vom Elektrofahrzeug indirekt verursacht wird hängt wesentlich vom Strommix des jeweiligen Landes ab und kann deswegen stark variieren (5.40). Länder mit einem hohen Anteil an CO₂ im Strom (gegeben durch die Masse pro Kilowattstunde h_{CO_2}) können durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen kaum ein CO₂-Reduktionspotenzial erwirken.

$$m_{CO2EM} = \frac{s \cdot E_v \cdot h_{EMCO2}}{100000} \quad (5.40)$$

Verglichen wird dieser CO₂ Ausstoß mit dem eines Verbrennungsmotors (5.41). h_{VKMCO2} entspricht dabei der Masse CO₂ im Treibstoff.

$$m_{CO2VKM} = \frac{s \cdot h_{VKMCO2}}{1000} \quad (5.41)$$

5.3.9 Gesamtkostenberechnung

Die Kostenberechnung beinhaltet sowohl Fixkosten K_{f1} und K_{f2} als auch die variablen Kosten K_v . Verglichen werden die Kosten des elektrischen Fahrzeugs mit dem eines herkömmlichen Verbrennungsmotors der gleichen Fahrzeugklasse bezogen auf die zurückgelegten Kilometer. Allgemein gültig ist der Gesamtkostenansatz nach (5.42).

$$K_{ges} = K_{f1} + K_{f2} + K_v \quad (5.42)$$

5.3.9.1 Fixkostenberechnung

Unter den Fixkosten 1 K_{f1} werden im Falle des Elektrofahrzeugs die Batteriekosten K_{Bat} sowie die Kosten des Elektromotors K_{EM} berücksichtigt. Ist das Elektrofahrzeug mit einem schaltbaren Getriebe ausgestattet werden die zusätzlichen Getriebekosten addiert (5.43). Die Fixkosten 2 K_{f2} entsprechen den Fixkosten des gesamten restlichen Fahrzeugs, inklusive aller Einzelkomponenten und beziehen sich auf das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Die Berechnung erfolgt unter der Annahme, dass es zwischen dem elektrischen Fahrzeug und dem mit Verbrennungsmotor keine Kostenunterschiede gibt bis auf die in den Fixkosten 1 berücksichtigten Komponenten.

$$K_{f1} = K_{EM} + K_{Bat} + K_{Get} \quad (5.43)$$

Wobei für den Elektromotor mit einem spezifischen Kostenfaktor des Elektromotors k_{spezEM} multipliziert mit der maximalen Leistung des Motors gerechnet wird (5.44).

$$K_{EM} = \frac{k_{spezEM} \cdot (T_{EM} \cdot \omega_{EM})_{max}}{1000} \quad (5.44)$$

Die Batterie wird wiederum über spezifische Batteriekosten $k_{spezBat}$ ausgerechnet (5.45).

$$K_{Bat} = \frac{k_{spezBa} \cdot t \cdot n_s \cdot n_p \cdot U_z \cdot C_z}{1000} \quad (5.45)$$

Für das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor werden die Kosten für den Motor (inklusive Getriebe) K_{VKM} , sowie die Kosten für den Tank K_T berücksichtigt (5.46). Der Motor wird mit spezifischen Kosten bezogen auf die maximale Leistung berechnet (5.47).

$$K_{f1} = K_{VKM} + K_T \quad (5.46)$$

$$K_{VKM} = \frac{k_{spezVKM} \cdot (T_{VKM} \cdot \omega_{VKM})_{max}}{1000} \quad (5.47)$$

5.3.9.2 Berechnung der Variablen Kosten

Die variablen Kosten des elektrischen Fahrzeugs umfassen die Energiekosten (siehe 5.3.6), Wartungs- und Reparatur Kosten K_{WR} sowie die sich aus den motorbezogenen Steuern ergebenden Kosten K_{St} . Alle werden auf die Strecke, also die Kilometer bezogen. Der Ansatz nach (5.48) gilt sowohl für das Verbrennungsmotor und das elektrisch betriebene Fahrzeug.

$$K_v = K_E + K_{WR} + K_{St} \quad (5.48)$$

Die Wartungs- und Reparaturkosten werden mit einem auf die Kilometer bezogenen Wert k_{WR} sowie der zurückgelegten Strecke s in Kilometern berechnet (5.49).

$$K_{WR} = \frac{k_{WR} \cdot s}{1000} \quad (5.49)$$

Die auf den Motor bezogenen Verkehrssteuern werden auf die gleiche Weise mit einem Kilometerwert k_{St} nach (5.50) berechnet.

$$K_{St} = \frac{k_{St} \cdot s}{1000} \quad (5.50)$$

5.3.10 Kostenreduktion durch Zwischenladung

Da es während eines Fahrzyklus zu Standzeiten kommen kann in denen ein Zwischenladen möglich wäre, wird untersucht welche Speichermenge in dieser Zeit geladen werden kann. Aufgrund der sehr geringen Lademengen des induktiven Ladens und der in Abschnitt 3 dargestellten Ladekonzepte werden anhand der Standzeiten t_{Stand} , der erzielbaren Ladeleistungen P_L (Tabelle 4.2) und dem Ladewirkungsgrad die Ladespeichermenge E_L nach (5.51) berechnet.

$$E_L = \frac{\eta_L \cdot t_{Stand} \cdot P_L}{3600} \quad (5.51)$$

Aus dem Energiespeicher kann die benötigte Anzahl an seriellen und parallelen Zellen angegeben werden. Mit Berücksichtigung der spezifischen Batteriekosten lässt sich das Kosteneinsparungspotenzial durch das Zwischenladen berechnen. Dazu wird (5.33) mit der verringerten Anzahl der Zellen erneut berechnet und mit den vorherigen verglichen. Es reduziert sich außerdem die Batteriemasse (5.22), wodurch eine größere Nutzlast möglich ist (5.27).

In Abschnitt 4 wurde auf die verschiedenen Möglichkeiten zum Laden des elektrischen Fahrzeugs eingegangen. In Kombination mit den Standzeiten über drei Minuten (siehe Abschnitt 6.1.10 und 6.2.10) wird das Potenzial durch Zwischenladen untersucht. Als potenzielle Ladestecker wird der Typ 1 und Typ 2 Stecker, sowie der Tesla Supercharger ausgewählt und die Lademenge (siehe Tabelle 4.2) berechnet. Der Typ 2 Stecker wurde mit 43 kW Ladeleistung berechnet.

Nicht berücksichtigt werden Einflüsse wie die Umgebungstemperatur, Stromnetzkapazität oder die Auslastung an den Ladeplätzen. Außerdem wird die Verlangsamung gegen Ende des Ladevorgangs ebenfalls vereinfacht nicht betrachtet, [33].

5.3.11 Kostenreduktion durch reale Nutzlast

Diese Kostenreduktion errechnet sich durch die verringerte Anzahl an Zellen bei realer Nutzlast im Verhältnis zu der bei maximaler Nutzlast. Es gilt dieselbe Formel wie für die Berechnung des Energiespeichers.

6 Simulationsergebnisse und Diskussion

6.1 3,5 t Fahrzeug

Das Geschwindigkeitsprofil -dargestellt in Abbildung 6.1- ist mit dem Höhenverlauf die Eingangsgröße für die Simulation in *Matlab Simulink*. Für das Fahrzeugmodell des 3,5 t schwere Fahrzeugs wurden bereits vorhandene GPS-Daten eines KEP Dienstleisters verwendet. Der gesamte Fahrzyklus dieses Fahrzeugs dauert 6 h und 43 min. Die gefahrene Strecke beträgt 51,3 km.

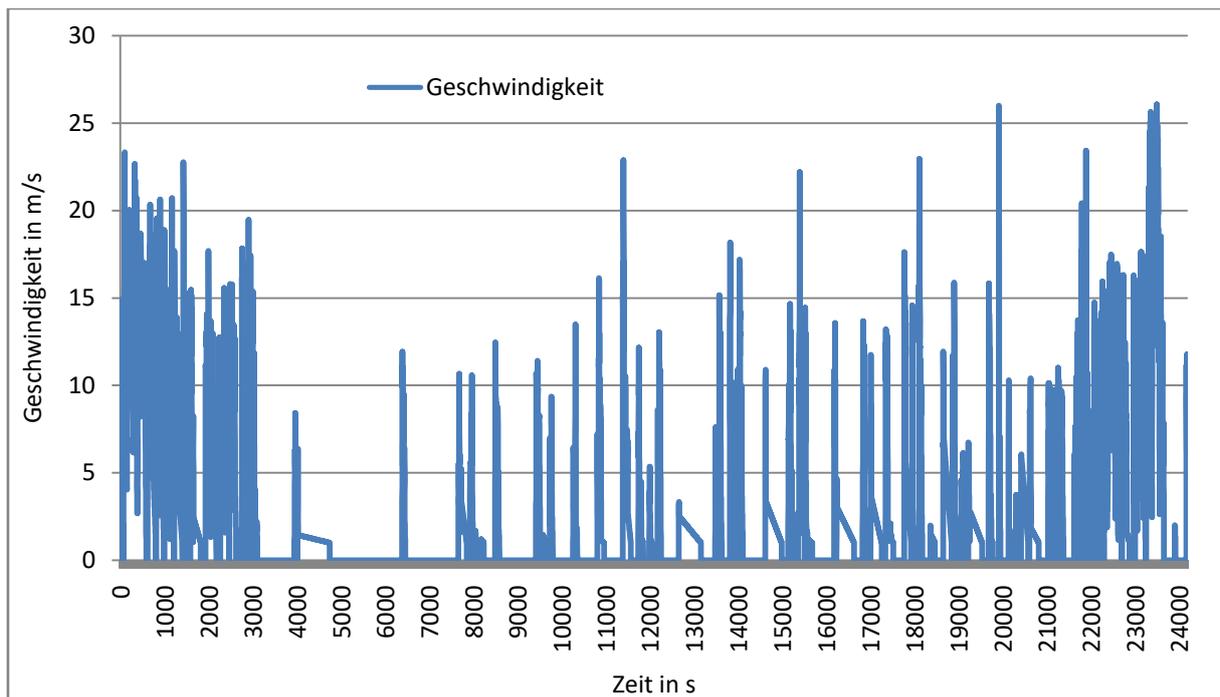


Abbildung 6.1: Geschwindigkeitsprofil 3,5 t Fahrzeug

Um eine sinnvolle Bewertung durchzuführen zu können, wurden in der Fahrzeugklasse bis 3,5 t real existierende Fahrzeuge, sowohl elektrisch als auch mit Verbrennungsmotor herangezogen und als Bezug ausgewählt. Als Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wurde der in Abbildung 6.3 dargestellte Sprinter 313 CDI von Mercedes Benz verwendet. Das elektrische Fahrzeugmodell beruht auf den Kenndaten des in Abbildung 6.2 gezeigten Kreisler Electric, einer elektrifizierten Umbau Variante des Sprinters. Die wichtigsten in der Simulation eingesetzten Parameter werden in Tabellen festgehalten und entsprechen denen der beiden genannten Fahrzeuge.



Abbildung 6.2: Kreisel Electric [41]



Abbildung 6.3: Mercedes Sprinter [42]

6.1.1 Motorauslegung

Der Motor wurde über die Längsdynamikgleichung wie in Abschnitt 5.3.1 dargelegt ausgelegt. Dabei wurde das Fahrzeug mit der maximalen Fahrzeugmasse angenommen. Dabei wurden drei mögliche Motoren ausgewählt. Das Referenzfahrzeug entspricht der „100%-Lösung“ und deckt damit alle im Fahrzyklus ergebenden Momente ab. Damit werden auch sämtliche numerische Ausreißer, Fehler bei der Messung des Fahrzyklus sowie Fehler in der Simulation abgedeckt. Fahrzeug eins wurde gewählt, da der verwendete Motor dem originalen von Kreisel Electric eingesetzten nachempfunden ist. Dabei handelt es sich um den Brusa Motor HSM1-10.18.13. Für Fahrzeug zwei wurde ein etwas schwächerer, aber ebenfalls vorhandener Motor (Brusa HSM1-12.18.13) ausgewählt. Fahrzeug drei entspricht dem Brusa Motor HSM1-6.17.12 nur mit noch geringerer Leistung als die vorigen Varianten. Alle vier Fahrzeugvarianten wurden zusätzlich jeweils mit einem einstufigen Getriebe simuliert, das ab einer vorgegebenen Schaltgeschwindigkeit den Gang wechselt und ab dann mit neuer Übersetzung fährt. Fällt die Fahrgeschwindigkeit hingegen wieder in die ursprüngliche Übersetzung wird zurückgeschaltet. Die Idee für die gewählte Schaltlogik besteht darin, in der Nähe des Punkts mit maximaler Leistung auch beim Gangwechsel zu höheren Geschwindigkeiten zu bleiben. Somit ergeben sich in Summe acht simulierte Fahrzeugvarianten, vier ohne und vier mit schaltbarem Getriebe. In Tabelle 6.1 sind die wichtigsten Kenngrößen, wie maximale Leistung P_{max} , das maximale Drehmoment des Elektromotors T_{EMmax} , sowie die maximale Drehzahl n_{max} dargelegt. Die Momenten Kennlinie für das Referenzfahrzeug ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Abbildung 6.5 zeigt die drei Motorvarianten von Fahrzeug 1 bis Fahrzeug 3 in der Momenten Kennlinie.

Tabelle 6.1: Simulationsergebnis (3,5 t) Kennwerte der Fahrzeuge

Kenngrößen	Referenzfahrzeug	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3
P_{\max}	397,8 kW	156 kW	125 kW	96 kW
$T_{EM\max}$	535 Nm	305 Nm	250 Nm	220 Nm
i_{Get}	5	5	5	5,5
n_{\max}	11500 U/min	14000 U/min	11400 U/min	12000 U/min
v (beim Schalten)	46 km/h	30 km/h	25 km/h	20 km/h
i_{Get} (beim Schalten)	3	3	3	3

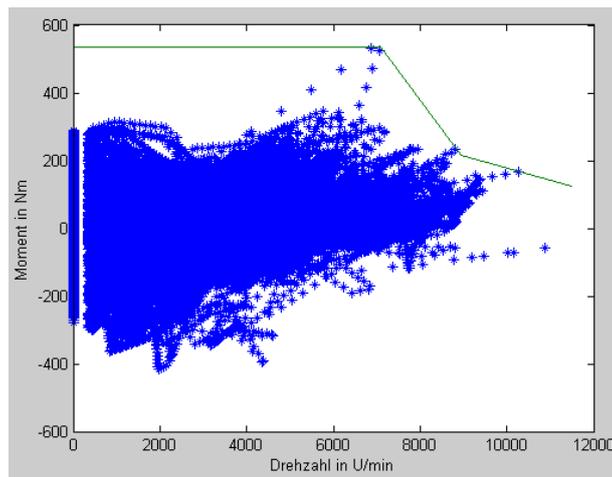


Abbildung 6.4: Momenten Kennlinie (3,5 t) Referenzfahrzeug

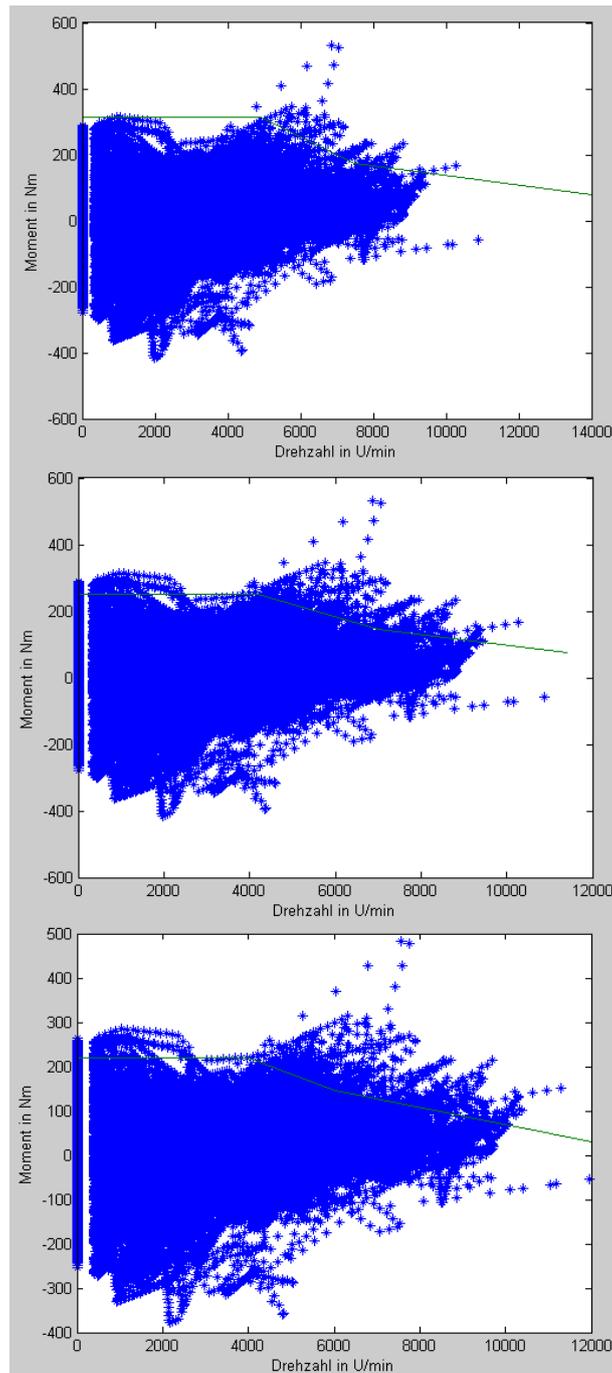


Abbildung 6.5: v. o. n. u. Momenten Kennlinie Fahrzeug 1, 2 und 3

Die für die Berechnung herangezogenen Simulationsparameter nach Abschnitt 5.3.1 sind in Tabelle 6.2 gezeigt.

Tabelle 6.2: Parameter Motorauslegung

Parameter	Wert	Literaturverweis
a_r	0,01 m/s	[43]
A_F	5 m ²	[44]
c_w	0,6	[45]
m_{max}	3500 kg	
r_{dyn}	0,365 m	[46, 47]
η_{Dif}	0,95	[48]
η_{EM}	0,9	[36]
η_{Get}	0,95	[48]
ρ_L	1,204 kg/m ³	[49]

Für alle weiteren Berechnungen wird die tatsächliche Gesamtmasse verwendet (siehe Tabelle 6.3).

6.1.2 Masse und Nutzlast

In Abbildung 6.6 sind die Massenanteile (Nutzlast, E-Motorgewicht, Gesamtgewicht, Batterie) der drei Fahrzeugvarianten ohne Getriebe abhängig von der Anzahl der seriellen Zellen dargestellt. Die Anzahl der parallelen Zellen bleibt dabei konstant beim Wert drei. Die Nutzlast nimmt mit einer Zunahme der Batteriemasse beziehungsweise einer größeren Motormasse linear monoton ab. Aus Abbildung 6.6 können für die gewählte Anzahl an seriell geschalteten Zellen des Elektrofahrzeugs die zugehörigen Massenanteile abgelesen werden.

Für die Fahrzeugvarianten mit Schaltgetriebe müssten im Gesamtgewicht jeweils 10 kg zusätzlich berücksichtigt werden. Die Nutzlast sinkt um selbigen Betrag. [50]

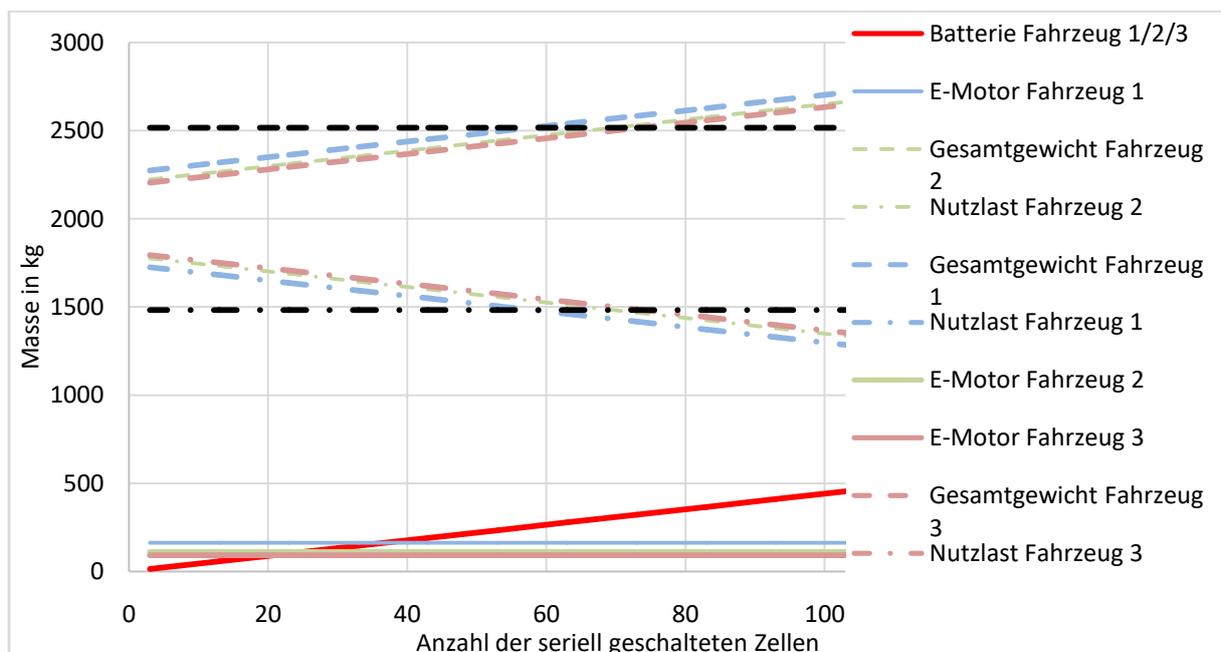


Abbildung 6.6: Simulationsergebnis (3,5 t) Masse und Nutzlast

Für das gewählte Kriterium zur Energiespeicherdimensionierung (siehe 5.3.3) ergeben sich mit der entsprechenden Anzahl an Zellen (siehe Tabelle 6.5) die in Tabelle 6.3 dargestellten Massen.

Tabelle 6.3: Simulationsergebnis (3,5 t) Gesamtmasse/Nutzlast

Fahrzeug	m_{ges}	m_{NL}
1	2327,76 kg	1672,24 kg
2	2272,85 kg	1727,15 kg
3	2249,97 kg	1750,03 kg

Die eingesetzten Parameter sind in Tabelle 6.4 gezeigt.

Tabelle 6.4: Parameter (3,5 t) Masse und Nutzlast

Parameter	Wert	Literaturverweis
m_{Beladung}	500 kg	
m_{F}	1600 kg	[51]
m_{spezBat}	5,5 kg/kWh	[52]
m_{spezEM}	1 kg/kW	[53]
m_{spezVKM}	4 kg/kW	[53, 54]
m_{Tank}	37,5 kg	[42]

6.1.3 Energiespeicher

In Tabelle 6.5 sind der Energiespeicher sowie die Anzahl der seriellen und parallelen Zellen abgebildet. In Tabelle 6.6 ist der Energiespeicher bei maximaler Beladung angegeben. Für Fahrzeug zwei und drei ist der benötigte Energiespeicher gleich groß. Das Schaltgetriebe hat einen zu geringen Einfluss um eine Änderung des Energiespeichers zu bewirken und ist damit jeweils gleichwertig (Tabelle 6.5 und 6.6). Die eingesetzten Parameter sind in Tabelle 6.7 dargelegt.

Tabelle 6.5: Simulationsergebnis (3,5 t) Energiespeicher und Zellanzahl

Fahrzeug	E (mit Schaltgetriebe)	n_{p}	n_{s} (mit Schaltgetriebe)
1	12,02 kWh (12,02kWh)	3	15 (15)
2	11,22 kWh (11,22 kWh)	3	14 (14)
3	11,22 kWh (11,22kWh)	3	14 (14)

Tabelle 6.6: Simulationsergebnis (3,5 t) Energieinhalt und Zellanzahl bei maximaler Fahrzeugmasse

Fahrzeug	E	n_{p}	n_{s}
1	13,62 kWh	3	17
2	12,82 kWh	3	16
3	12,82 kWh	3	16

Tabelle 6.7: Parameter (3,5 t) Energiespeicher

Parameter	Wert	Literaturverweis
C_{znom}	73,5 Ah	[40]
U_{znom}	3,635 V	[40]

6.1.4 Energieverbrauch

In Abbildung 6.7 ist der Energieverbrauch der Fahrzeugvarianten mit und ohne einstufiges Getriebe dargestellt. Es zeigt sich, dass der Energieverbrauch mit Getriebe geringer ausfällt als der ohne Getriebe. Allerdings bewirkt das schaltbare Getriebe nur sehr niedrige Verbrauchseinsparungen im Bereich von 0,1 bis 0,3 kWh/100km. Fahrzeug drei konnte mit 0,3kWh/100km die größte Differenz im Energieverbrauch durch Schaltgetriebe erzielen. Tabelle 6.8 gibt die eingesetzten Parameter an.

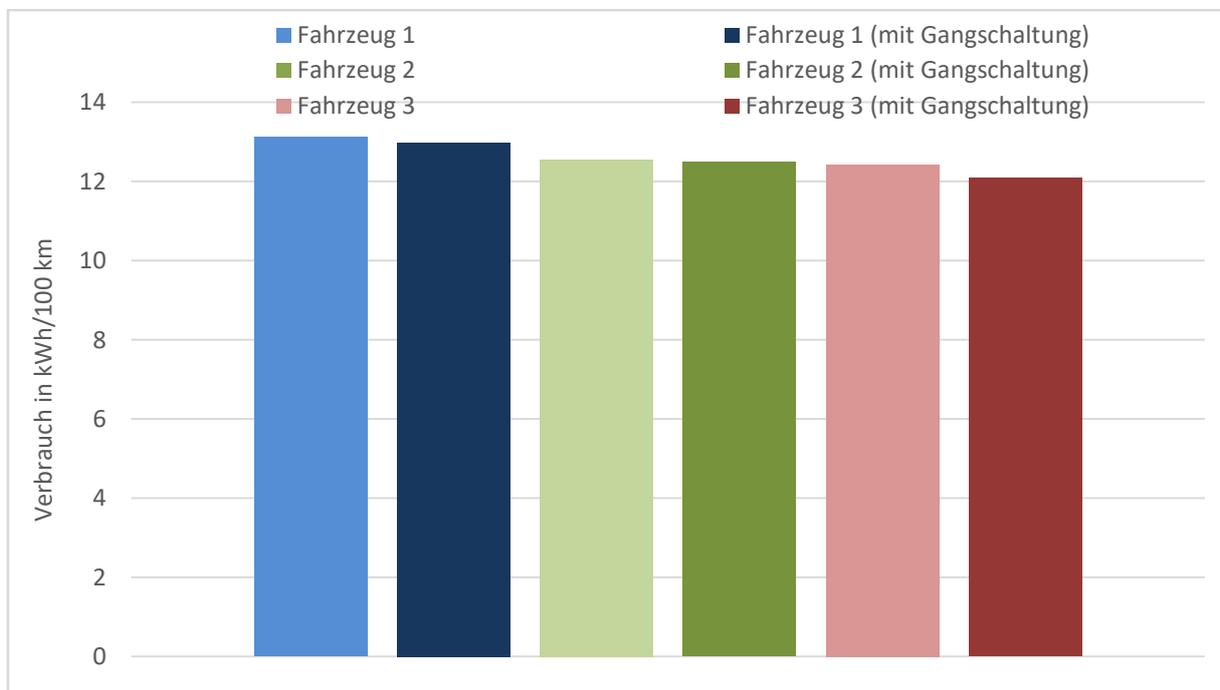


Abbildung 6.7: Simulationsergebnis (3,5 t) Energieverbrauch

Tabelle 6.8: Parameter (3,5 t) Energieverbrauch

Parameter	Wert	Literaturverweis
SOC_{z0}	0,9	
η_{EL}	0,9	[55]
η_L	0,9	[55]

6.1.5 Verlängerung der Fahrzeit durch bedarfsgerechte Motorauslegung

Die Fahrzeugvarianten unterscheiden sich durch drei unterschiedliche Motoren, die wiederum den Fahrzyklus verschieden schnell durchlaufen und deswegen unterschiedliche Wegstrecken zurücklegen. So ist aufgrund der Motorkennlinie (siehe Abbildung 6.4 und 6.5) der auftretende

Moment zu einer bestimmten Drehzahl limitiert. Das bedeutet, dass die vom Fahrzyklus vorgegebene Geschwindigkeit nicht ohne Verzögerung durchlaufen werden kann. Als Referenz für die sich nach Abschnitt 5.3.4 ergebende zeitliche Verzögerung dient das Referenzfahrzeug. Es entspricht der 100% Lösung und deckt alle numerischen Ausreiser ab, sodass der Fahrzyklus genau in der vorgegebenen Zeit und Geschwindigkeit durchlaufen wird. In Abbildung 6.8 sind die prozentuellen Verzögerungen dargestellt. Die Unterschiede liegen im Bereich 0,92% Verzögerung von Fahrzeug 1 bis 0,97% bei Fahrzeug 3.

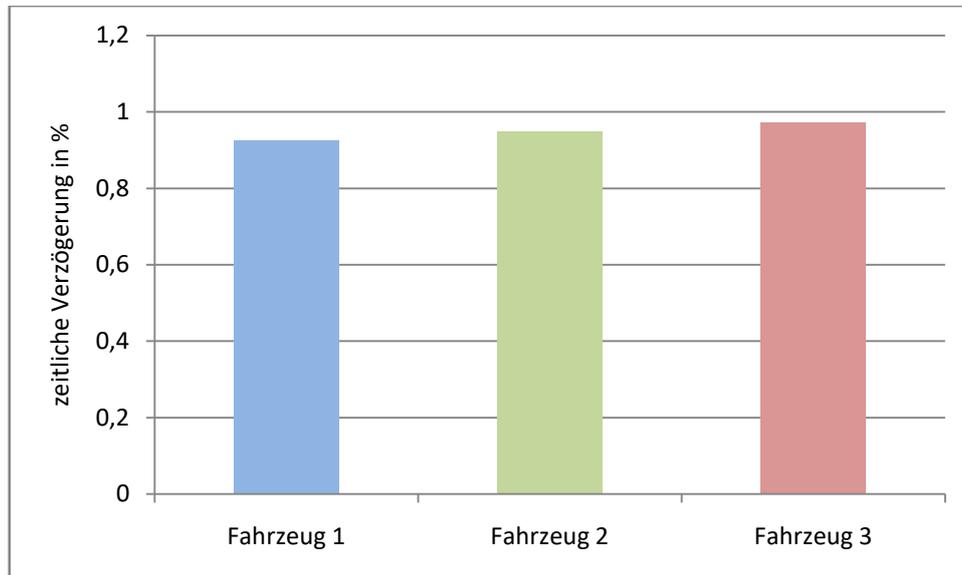


Abbildung 6.8: Simulationsergebnis (3,5 t) Verlängerung der Fahrzeit

Die Berechnung der zeitlichen Verzögerung ist insofern schwierig, da die Simulation einige Fehler nicht berücksichtigt. So sind numerische Ausreiser und Fehler durch die Messung enthalten. Außerdem ist die Simulation nicht linear, weswegen insbesondere die zeitliche Verzögerung nur geschätzt werden kann. Auch bei den Wegstrecken zeigt sich im Fahrzeugblock Fahrregler (siehe Kapitel 5.2.2), dass gerade die schwächeren Motoren bei vorgegebenen Stehzeiten trotzdem mit Geschwindigkeiten unter 1 m/s fahren und somit Weg zurücklegen. Um wenigstens diesen Fehler zu reduzieren wurden nur Geschwindigkeiten über 3 m/s berücksichtigt.

6.1.6 Mehrkosten und Nutzlast über die Reichweite

Die in Abschnitt 6.1.2 dargelegte Abnahme der Nutzlast durch Hinzufügen von mehr seriellen Zellen führt jedoch gleichzeitig zu einer Zunahme der Reichweite ohne Nachladen zu müssen. Die in Abbildung 6.9 dargestellten Zusammenhänge berechnen sich aus den Formeln in Abschnitt 5.3.5, 5.3.6 sowie den Fixkosten 1 mit den Formeln aus Abschnitt 5.3.9.1. Es muss also abgewogen werden für welche Reichweite und Nutzlast das Fahrzeug eingesetzt werden soll. Abhängig davon muss die Anzahl der Batterien gewählt und die entsprechende Investition getätigt werden.

Für das elektrische Fahrzeug mit schaltbarem Getriebe müssen in den Mehrkosten jeweils 100 € addiert werden, [53].

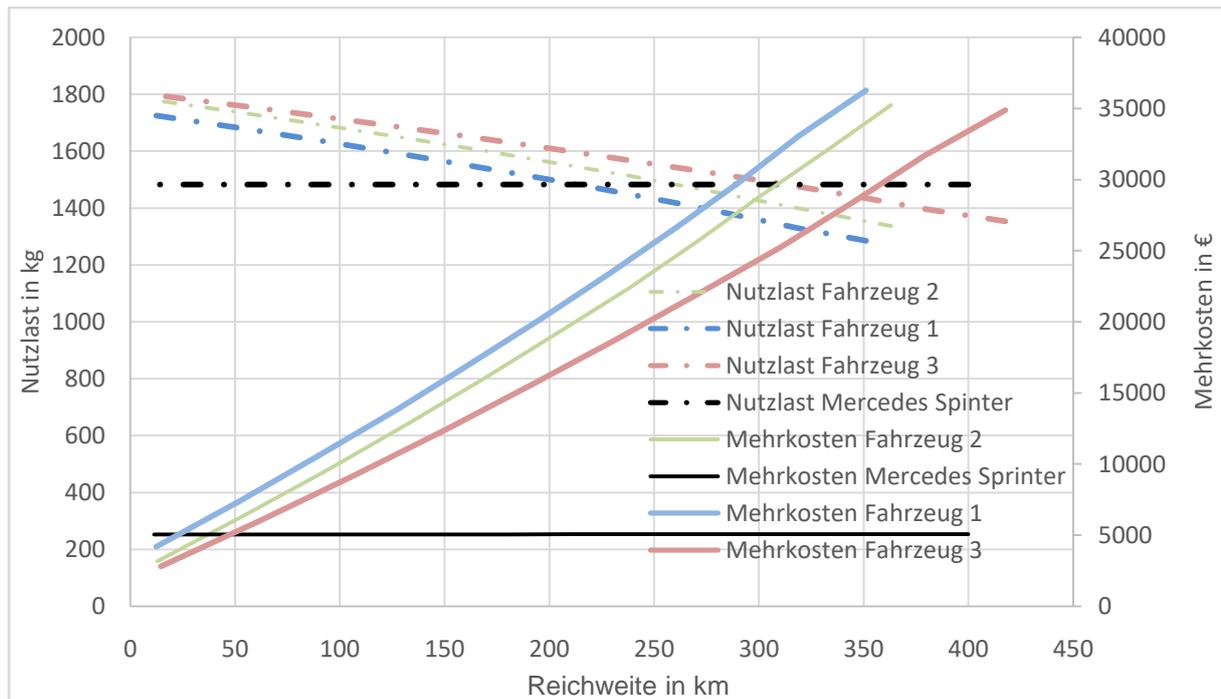


Abbildung 6.9: Simulationsergebnis (3,5 t) Nutzlast/Mehrkosten über Reichweite

Die vermeintlich niedrigen spezifischen Kosten für einen Elektromotor sind nur durch eine ausreichende Stückzahl erzielbar, da dadurch die Kosten pro Stück viel geringer ins Gewicht fallen. Tabelle 6.9 zeigt die Parameter der Simulation.

Tabelle 6.9: Parameter Mehrkosten

Parameter	Wert	Literaturverweis
K_{Get}	100 €	[53]
K_T	125 €	[53]
$k_{spezBa t}$	400 €/kWh	[53]
k_{spezEM}	20 €/kW	[53]
$k_{spezVKM}$	52,4 €/kW	[53]
k_{Sprit}	1,113 €/l	[56]
k_{Strom}	0,212 €/kWh	[57]
S_v	8,6 l/100km	[51]

6.1.7 Energiekosten

Die Kosten für den Treibstoff beziehungsweise den Strom werden anhand der gefahrenen Kilometer beurteilt. Herangezogen werden die jeweiligen Jahresdurchschnittspreise von 2015 (siehe Tabelle 6.9). In Abbildung 6.10 sind die Energiekosten für den Verbrennungsmotor und das elektrische Fahrzeug gezeigt. Der vertikale Abstand zwischen den Linien des Elektrofahrzeugs und den Linien zum des Mercedes Sprinter entspricht der Kosteneinsparung durch die Energiekosten.

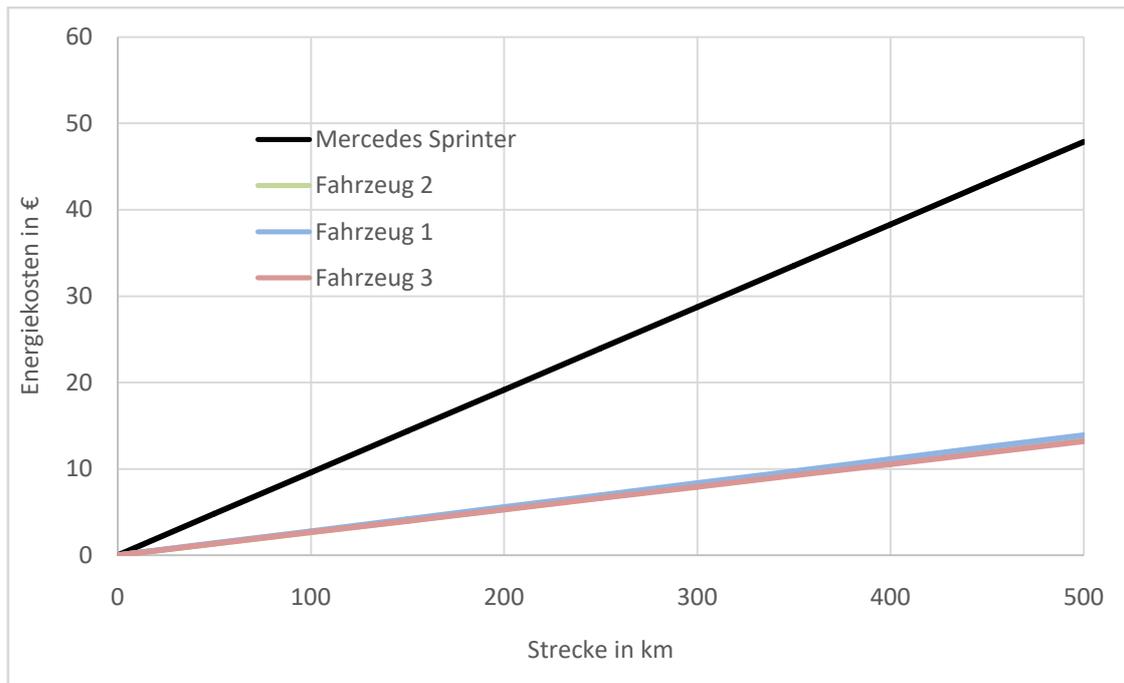


Abbildung 6.10: Simulationsergebnis (3,5 t) Energiekosten

6.1.8 CO₂-Ausstoß

Die CO₂-Emissionen in der Stromerzeugung variieren länderspezifisch sehr stark. In der Simulation wurde der österreichische Emissionswert im Strommix zugrunde gelegt. Dieser enthält verglichen mit anderen Ländern einen sehr geringen Anteil an CO₂. Mit der Elektrifizierung des Verkehrs kann, wie in Abbildung 6.11 dargestellt, eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen insbesondere im innerstädtischen Bereich erzielt werden. Die Einsparung entspricht dabei dem vertikalen Abstand zwischen den Geraden des Mercedes Sprinter sowie der drei elektrischen Fahrzeuge. In Tabelle 6.10 sind die eingesetzten Parameter ersichtlich.

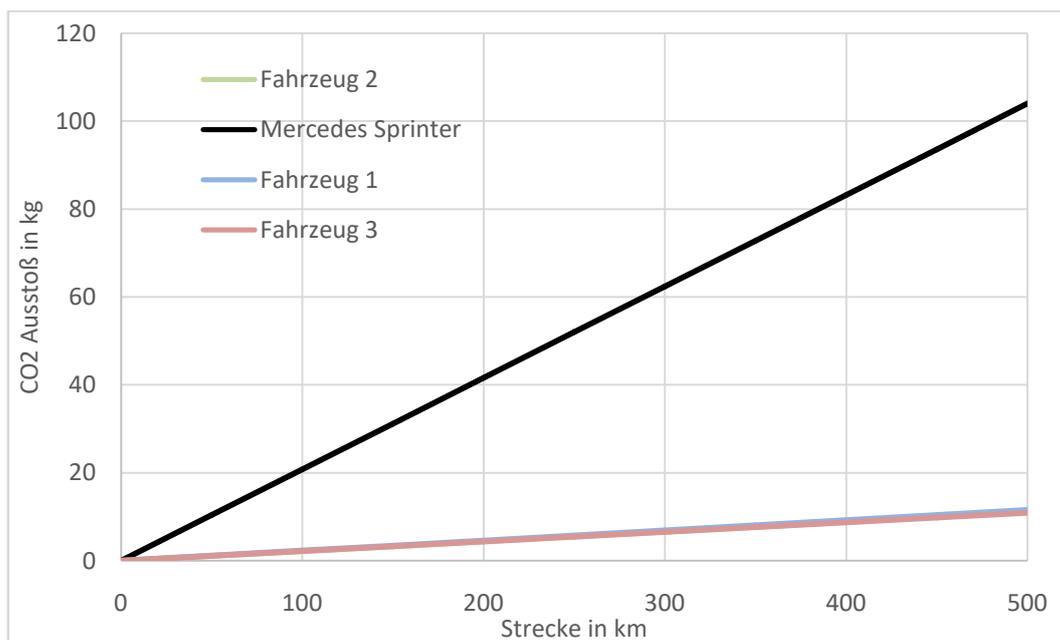


Abbildung 6.11: Simulationsergebnis (3,5 t) CO₂-Ausstoß

Tabelle 6.10: Parameter CO₂-Ausstoß

Parameter	Wert	Literaturverweis
$h_{EMCO\ 2}$	0,176 kg/kWh	[58]
$h_{VKMCO\ 2}$	0,208 kg/km	[51]

6.1.9 Gesamtkostenabschätzung

Die Gesamtkosten werden anhand einer Break-Even Analyse (siehe Kapitel 5.3.9) abgeschätzt. Berücksichtigt werden alle in diesem Abschnitt dargelegten Kosten. Die Batteriekosten sind mit dem elektrischen Energiespeicher aus Tabelle 6.5 berechnet. Grundlage der Parameter ist eine Jahresfahrleistung von 15000 km. In Abbildung 6.12 sind die Kosten von Fahrzeug 3 (jeweils mit und ohne schaltbares Getriebe), des Kreisel Electric sowie des Mercedes Sprinter dargestellt. Die Fixkosten der Fahrzeuge können in den Gesamtkosten bei zurückgelegter Strecke von 0 km als Startwerte abgelesen werden. Der weitere Verlauf ergibt sich aus den variablen Kosten. Ab 10500 km würde sich eine Investition in Fahrzeugvariante 3 verglichen mit dem Mercedes Sprinter bereits lohnen. Tabelle 6.11 zeigt die benötigten Parameter ergänzend zu den bereits vorhandenen. Es zeigt sich, dass durch eine bedarfsgerechte Auslegung (insbesondere der Batterie) ein deutlicher Vorteil gegenüber dem nach Reichweite ausgelegten Bezugsfahrzeug des Kreisel Transporters erwächst mit Fixkosten von 81900 €. Dessen Batterie kostet 26800 €, [59].

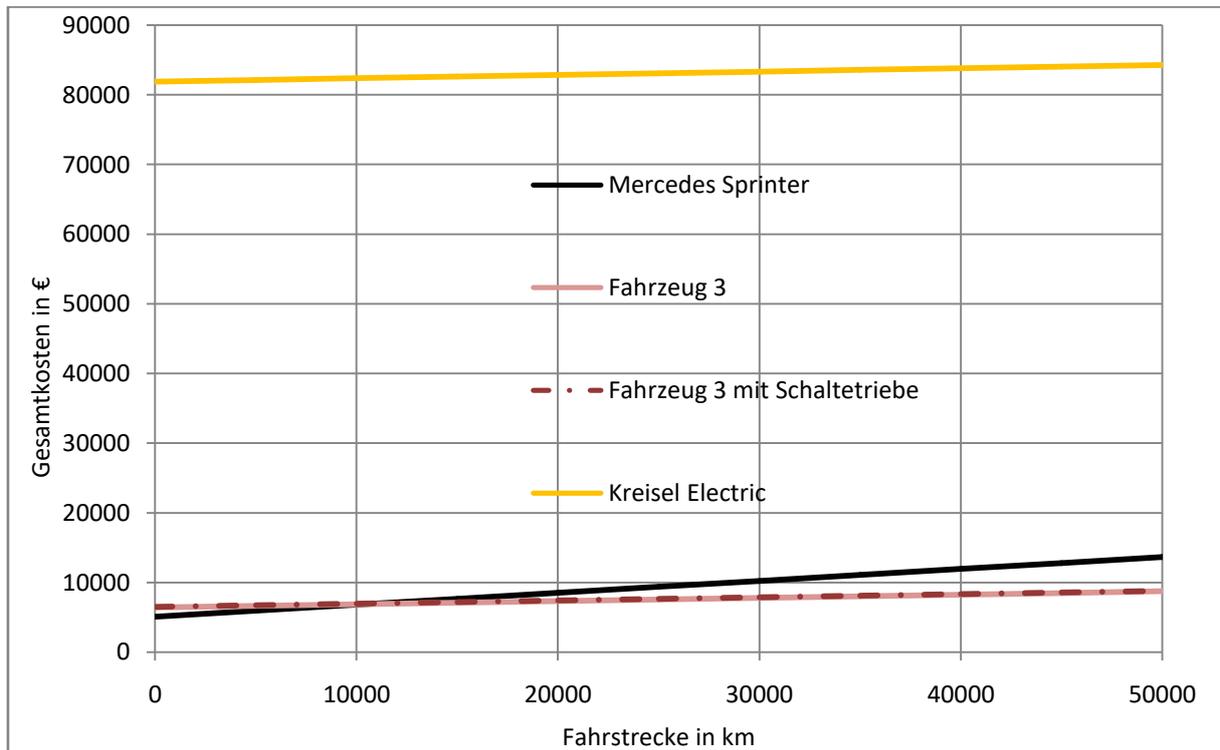


Abbildung 6.12: Simulationsergebnis (3,5 t) Gesamtkostenabschätzung

Werden hingegen in den Gesamtkosten nur die reduzierten Fixkosten 1 (Antriebsstrang und Batterie beziehungsweise im Falle des Mercedes Sprinters statt der Batterie die Tankkosten) berücksichtigt so ergibt sich der Verlauf nach Abbildung 6.13. Darin sind alle drei elektrifizierten Fahrzeuge jeweils mit und ohne schaltbares Getriebe sowie der Mercedes Sprinter dargestellt. Die Investition in

Fahrzeug 3 würde sich dabei ebenfalls wieder ab 10500 km lohnen. Analog kann dies für Fahrzeug 2 und 3 abgelesen werden.

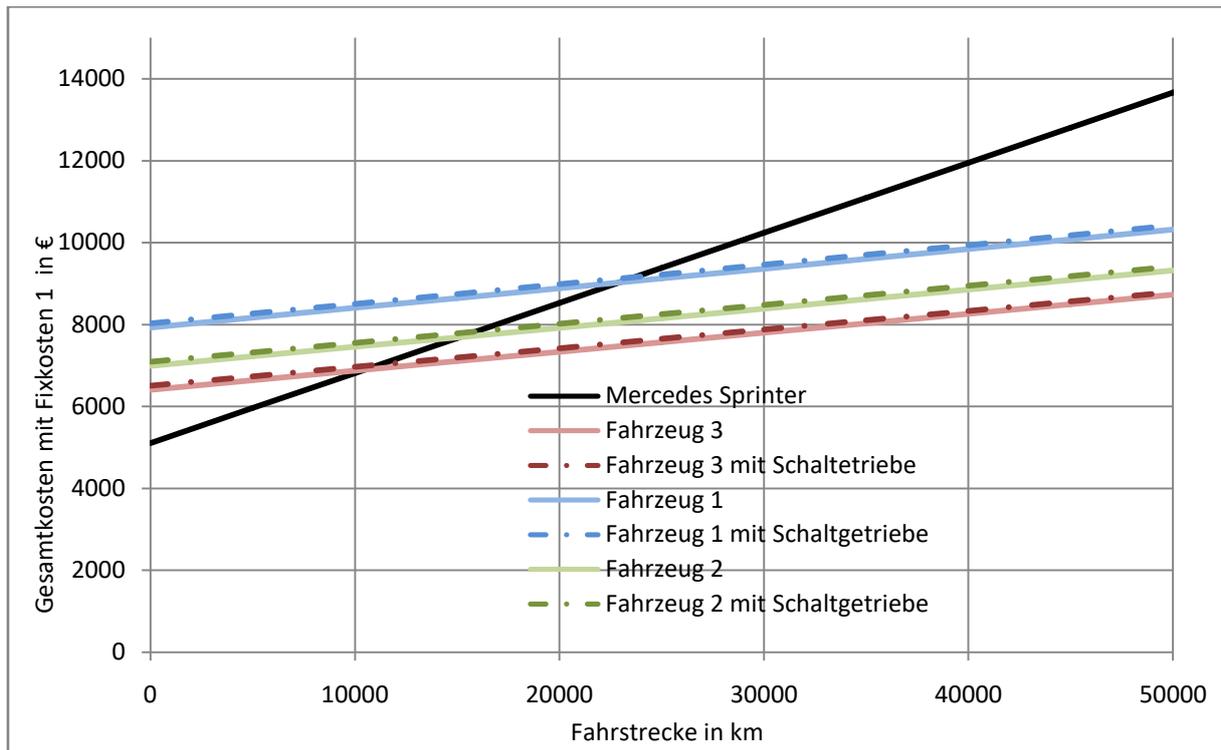


Abbildung 6.13: Simulationsergebnis (3,5 t) Gesamtkostenabschätzung mit Fixkosten 1 für Antriebsstrang und Batterie

Tabelle 6.11: Parameter Gesamtkostenabschätzung

Parameter	Wert	Literaturverweis
k_{StEM}	0 €/km	[60]
k_{StVKM}	0,0354 €/km	[60]
k_{WREM}	0,02 €/km	[61]
k_{WRVKM}	0,04 €/km	[61]
K_{f2}	41116 €	[62]

6.1.10 Standzeitanalyse

Die Ergebnisse aus der Auswertung der Standzeiten aus dem Fahrzyklus (siehe Abbildung 6.1) sind in Abbildung 6.14 ersichtlich. Die gesamte Standzeit –ohne Berücksichtigung von Stehzeiten unter drei Minuten- beträgt während des Fahrzyklus 36 min und 55 s (oder 2215 s). Die längste Standzeit -diese ist auch die erste nach der längsten durchgehenden Fahrzeit von 4025 s - beträgt 17 min.

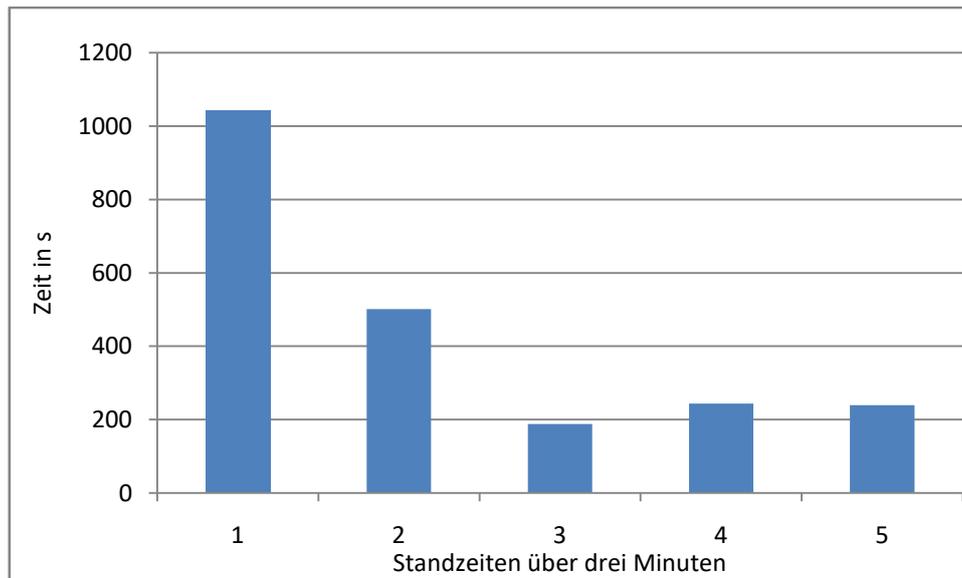


Abbildung 6.14: Standzeit 3,5 t Fahrzeug

6.1.11 Kostenreduktion durch Zwischenladen

Die Kostenreduktion durch Zwischenladen wird in Abbildung 6.15 anhand von Fahrzeug 3 durch die gesunkenen Gesamtkosten dargestellt. Zum Vergleich sind die Kostenverläufe des Kreisel Electric sowie des Mercedes Sprinter illustriert. Die Annahme ist, dass bei allen Standzeiten –laut Kapitel 6.1.10- ein Zwischenladen möglich wäre. Dabei wird die Anzahl der noch benötigten Zellen in Tabelle 6.13 mit der neuen Zellanzahl sowie der sich ergebenden Batteriekostenreduktion angegeben. Obwohl die Lademenge in manchen Fällen die Gesamtspeichermenge übersteigt -siehe Tabelle 6.12- für Typ 2 und den Tesla Supercharger, braucht man zum Zurücklegen der längsten Strecke ohne Lademöglichkeit trotzdem eine Mindestanzahl an Batterien.

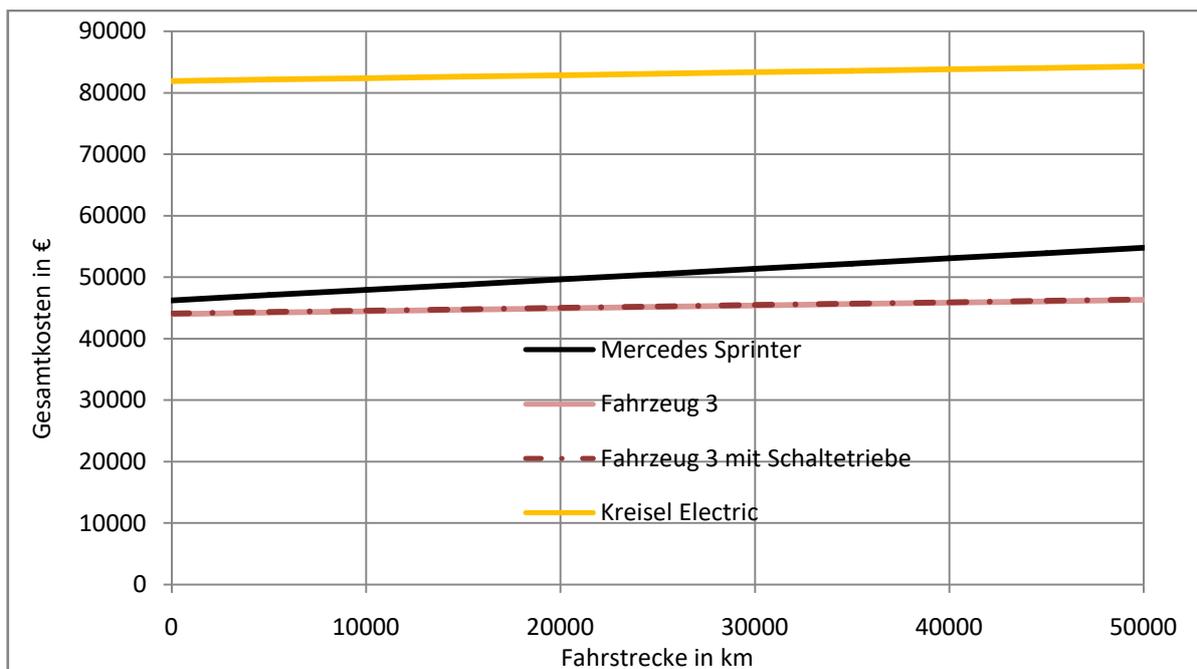


Abbildung 6.15: Simulationsergebnis (3,5 t) Kostenreduktion durch Zwischenladen

Tabelle 6.12: Simulationsergebnis (3,5 t) Lademengen

Steckertyp	E_L
Typ 1	4,1 kWh
Typ 2	23,81 kWh
Tesla Supercharger	66,45 kWh

Tabelle 6.13: Simulationsergebnis (3,5 t) Kostenreduktion und Zellanzahl durch Zwischenladen

Stecker- typ	Fahrzeug 1			Fahrzeug 2			Fahrzeug 3		
	neue Zellanzahl		Kosten- red.	neue Zellanzahl		Kosten- red.	neue Zellanzahl		Kosten- red.
	n_p	n_s		n_p	n_s		n_p	n_s	
Typ 1	3	9	40%	3	9	35,7%	3	9	35,7%
Typ 2	3	3	80%	3	3	78,6%	3	3	78,6%
Tesla S.	3	3	80%	3	3	78,6%	3	3	78,6%

Durch alle drei Steckertypen kann ein wesentlicher Beitrag zur Kostenreduktion erzielt werden. Dies bedeutet eine Verlagerung der Kosten vom Fahrzeug zur Infrastruktur, welche dann entsprechend in der städtischen Raumplanung zu berücksichtigen ist.

6.1.12 Kostenreduktion durch reale Nutzlast

Durch die Energiespeicherdimensionierung anhand der realen Nutzlast (siehe Tabelle 6.5) besteht die Möglichkeit gegenüber der Dimensionierung mit maximaler Fahrzeugmasse (siehe Tabelle 6.6) Batteriekosten einzusparen. Die Batteriekosteneinsparung wird in Tabelle 6.14 aufgezeigt. Da der Energiespeicher mit dem maximalen Fahrzeugmasse größer ist, werden mehr Zellen in der Batterie benötigt. Andere Komponenten ermöglichen keine Kosteneinsparung.

Tabelle 6.14: Simulationsergebnis (3,5 t) Kostenreduktion durch reale Nutzlast

Fahrzeug	Kosteneinsparung
1	11,76%
2	12,5%
3	12,5%

Wird anstatt der maximalen Fahrzeugmasse dauerhaft eine geringere Beladung transportiert, kann der Energiespeicher kleiner ausgelegt werden und damit bis zu 12,5% Batteriekosten gespart werden.

6.2 18 t Fahrzeug

Die Eingangsgröße der Simulation des 18 t LKW im urbanen Verteilerverkehr ist das Geschwindigkeitsprofil in Abbildung 6.15. Auf Antrieb ist ersichtlich, dass es viele Standzeiten enthält. Zusätzlich sind die Steigung und die Beschleunigung Eingangsgrößen des Blocks Fahrzyklus. Das gemessene Fahrprofil wies allerdings einige Ungenauigkeiten auf und musste deswegen überarbeitet

werden. Die Daten wurden mittels GPS-Datenlogger an einem gleichnamigen Fahrzeug im urbanen Verteilerverkehr aufgezeichnet.

Beim Datenlogger handelt es sich um das Gerät 860 E66-Channel GPS Datalogger mit einer Kapazität von bis zu 125000 aufzuzeichnenden Datenpunkten, [63].

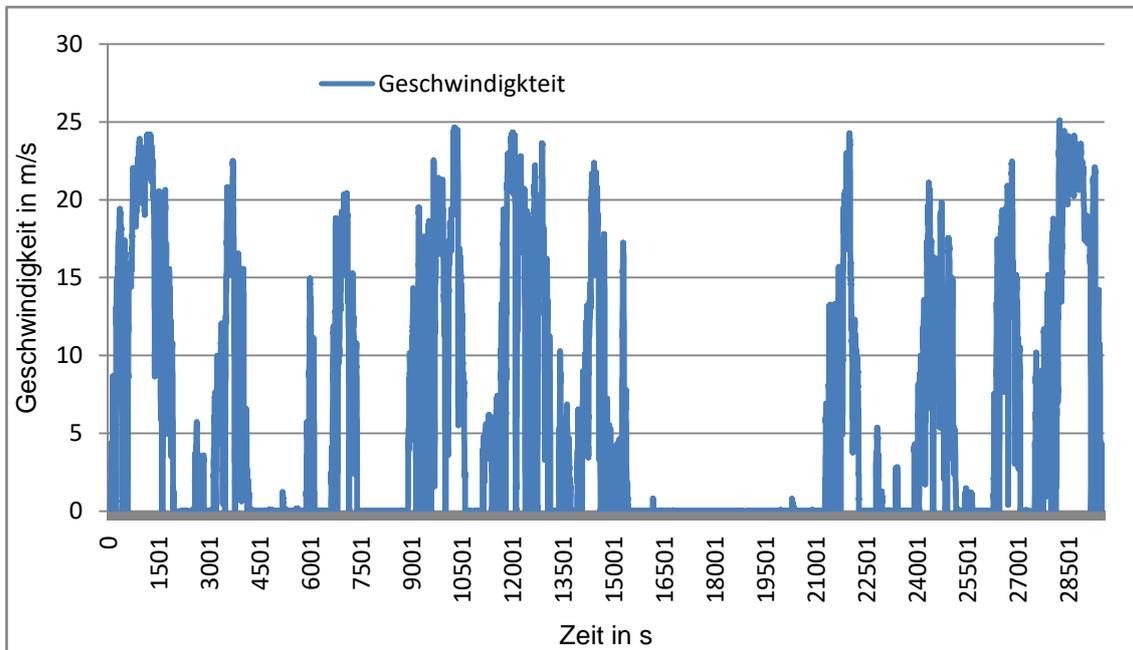


Abbildung 6.16: Geschwindigkeitsprofil 18 t LKW

Das Geschwindigkeitsprofil in Abbildung 6.16 enthält sehr viele Standzeiten. Der gesamte Fahrzyklus dauert 8 h und 13 min. Die gefahrene Strecke beläuft sich auf 167 km. Als Bezugsfahrzeuge wurden der Iveco Stralis HI Road sowie der E-Force ausgewählt. Auf die original im E-Force verwendeten Batterien wurde verzichtet und diese durch die in Abschnitt 5.3.3 beschriebenen ersetzt.

6.2.1 Motorauslegung

Auch diese Motoren wurden über die Längsdynamikgleichung nach Abschnitt 5.2.1 ausgelegt. Das Fahrzeug wurde mit der maximalen Masse angenommen. Dabei wurden wieder jeweils drei verschiedene Motoralternativen ausgewählt, wovon im 18 t schweren LKW jeweils zwei Motoren pro Fahrzeug eingesetzt werden. Das Referenzfahrzeug entspricht der „100%-Lösung“ und deckt alle im Fahrzyklus ergebenden Momente ab. Damit werden auch sämtliche numerische Ausreißer, Fehler bei der Messung des Fahrzyklus sowie Fehler in der Simulation abgedeckt.

Fahrzeug 1 wurde gewählt, da der darin verwendete Motor ident ist mit dem des 18 t LKWs von E-Force. Dabei handelt es sich um zwei Brusa Motor HSM1-10.18.13, [64].

Fahrzeug 2 wurde mit zwei Brusa HSM1-12.18.13 Motoren ausgestattet. Fahrzeug 3 mit dem Brusa Motor HSM1-6.17.12. Alle vier Fahrzeugvarianten wurden zusätzlich jeweils mit einem einstufigen Getriebe simuliert, das ab einer vorgegebenen Schaltgeschwindigkeit den Gang wechselt und ab dann mit neuer Übersetzung fährt. Fällt die Fahrgeschwindigkeit unter die Schaltgeschwindigkeit wird in die ursprüngliche Übersetzung zurückgeschaltet. Die Idee für die gewählte Schaltlogik ist in Kapitel 6.1.1 erläutert. Somit ergeben sich in Summe acht simulierte Fahrzeugvarianten, vier ohne und vier mit schaltbarem Getriebe. In Tabelle 6.15 sind die wichtigsten Kenngrößen, wie maximale

Leistung, der maximale Drehmoment des Elektromotors, sowie die maximale Drehzahl dargestellt. Die Momenten Kennlinien für die die drei Motoren ohne Schaltgetriebe sind in Abbildung 6.18 und für das Referenzfahrzeug in Abbildung 6.17 dargestellt. Es zeigt sich, dass viele Momente über dem maximal möglichen Motormoment liegen. In Tabelle 6.16 sind die zugehörigen Parameter angegeben.

Tabelle 6.15: Kennwerte der Fahrzeuge (18 t)

Kenngrößen	Referenzfahrzeug	Fahrzeug 1	Fahrzeug 2	Fahrzeug 3
P_{\max}	2x750 kW	2x156 kW	2x125 kW	2x96 kW
$T_{EM\max}$	850 Nm	305 Nm	250 Nm	220 Nm
i_{Get}	11	11	9	9,6
n_{\max}	14000 U/min	14000 U/min	11400 U/min	12000 U/min
v (beim Schalten)	26 km/h	25 km/h	29 km/h	15 km/h
i_{Get} (beim Schalten)	7	7	6	5

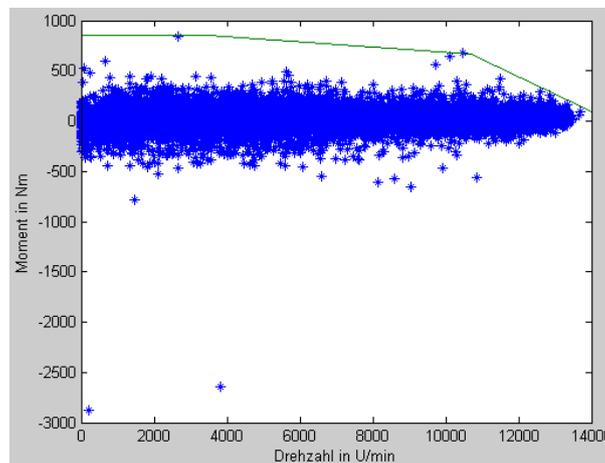


Abbildung 6.17: Simulationsergebnis (18 t) Drehzahl/Momenten Kennlinie Referenzfahrzeug

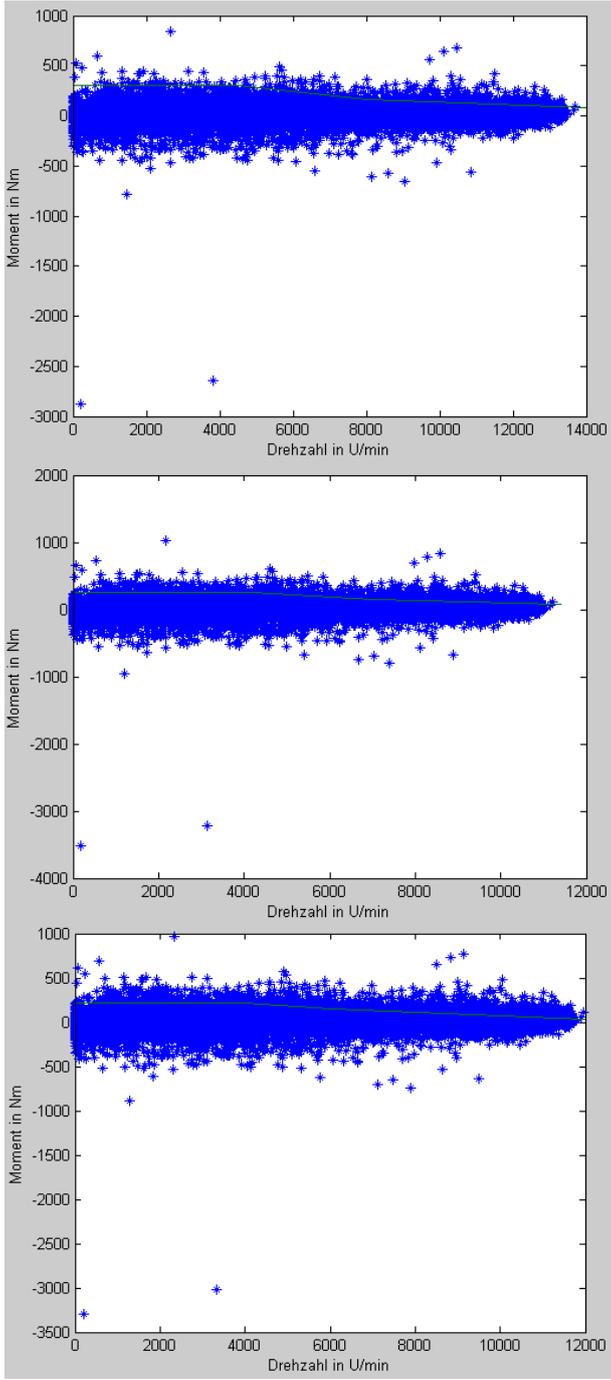


Abbildung 6.18: Simulationsergebnis (18 t) Momenten Kennlinie v. o. n. u. Fahrzeug 1,2,3

Tabelle 6.16. Parameter (18 t) Motorauslegung

Parameter	Wert	Literaturverweis
a_r	0,008 m/s	[43]
A_F	8 m ²	[44]
c_w	0,7	[45]
m_{\max}	18000 kg	
r_{dyn}	0,52 m	[46, 47]
η_{Dif}	0,95	[48]
η_{EM}	0,9	[36]
η_{Get}	0,95	[48]
ρ_L	1,204 kg/m ³	[49]

Alle anderen Simulationen werden mit der realen Fahrzeugmasse durchgeführt.

6.2.2 Masse und Nutzlast

In Abbildung 6.19 sind die Massenanteile (Nutzlast, E-Motorgewicht, Gesamtgewicht, Batterie) der drei Fahrzeugvarianten ohne Getriebe abhängig von der Anzahl der seriellen Zellen dargestellt. Die Anzahl der parallelen Zellen beträgt acht. Die Nutzlast nimmt mit einer Zunahme der Batteriemasse beziehungsweise einer größeren Motormasse kontinuierlich ab. Aus der Abbildung können für die gewählte Anzahl an seriell geschalteten Zellen des Elektrofahrzeugs die zugehörigen Massenanteile abgelesen werden. Nutzlast und Gesamtmasse sind bei 85 seriellen Zellen ident mit dem Iveco Stralis.

Für die Fahrzeugvarianten mit Schaltgetriebe müssten im Gesamtgewicht jeweils 20 kg zusätzlich addiert werden, [50]. Die Nutzlast sinkt genau um diesen Betrag.

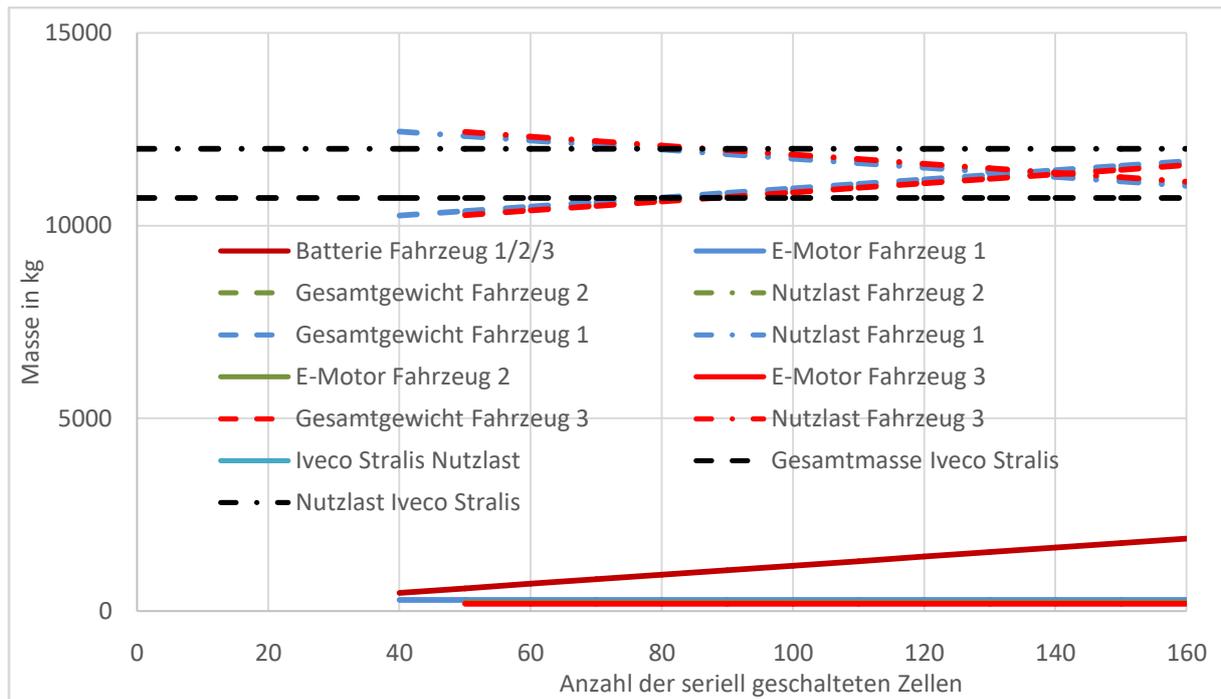


Abbildung 6.19: Simulationsergebnis (18 t) Masse und Nutzlast

Für das gewählte Kriterium zur Energiespeicherdimensionierung (siehe Kapitel 5.3.3) ergeben sich mit der entsprechenden Anzahl an Zellen (Tabelle 6.19) die in Tabelle 6.17 dargestellte Gesamt- und Nutzlast. Die Parameter sind in Tabelle 6.18 vorgestellt.

Tabelle 6.17: Simulationsergebnis (18 t) Gesamtmasse/Nutzlast

Fahrzeug	m_{ges}	m_{NL}
1	10610,35 kg	12089,65 kg
2	10542,8 kg	12157,2 kg
3	10483,7 kg	12216,31 kg

Tabelle 6.18: Parameter (18 t) Masse und Nutzlast

Parameter	Wert	Literaturverweis
$m_{Beladung}$	4700 kg	
m_F	4800	[54]
$m_{spezBat}$	5,5 kg/kWh	[44]
m_{spezEM}	1 kg/kW	[45]
$m_{spezVKM}$	4 kg/kW	[45, 46]
m_{Tank}	300 kg	[55]

6.2.3 Energiespeicher

Der Energiespeicher ist ebenfalls durch die in Abschnitt 5.3.3 vorgestellte Zelle parametrisiert. In Tabelle 6.19 sind der Energieinhalt sowie die Zellanzahl mit und ohne Schaltgetriebe vorgestellt. Abgesehen von Fahrzeug 2 kann durch ein Schaltgetriebe keine Verringerung des Energiespeichers

erwirkt werden. Die Parameter sind gleich wie in Tabelle 6.7. Tabelle 6.20 zeigt den Energieinhalt und die entsprechende Zellanzahl bei maximaler Beladung.

Tabelle 6.19: Simulationsergebnis (18 t) Energieinhalt und Zellanzahl

Fahrzeug	E (mit Schaltgetriebe)	n_p	n_s (mit Schaltgetriebe)
1	149,58 kWh (149,58 kWh)	8	70 (70)
2	149,58 kWh (147,44kWh)	8	70 (69)
3	145,3 kWh (145,3kWh)	8	68 (68)

Tabelle 6.20: Simulationsergebnis (18 t) Energieinhalt und Zellanzahl bei maximaler Fahrzeugmasse

Fahrzeug	E	n_p	n_s
1	194,45 kWh	8	91
2	190,17 kWh	8	89
3	188,04 kWh	8	88

6.2.4 Energieverbrauch

In Abbildung 6.20 ist der Energieverbrauch der drei Fahrzeuge mit und ohne Schaltgetriebe dargestellt. Der Verbrauch aller drei Fahrzeuge liegt bei 60 bis 63 kWh/100km. Der Energieverbrauch sinkt durch den Einsatz schwächerer Motoren und geringfügig und zusätzlich durch eingebautes Schaltgetriebe. Die Reduktion durch ein Schaltgetriebe für den Energieverbrauch ist sehr gering. Die Parameter können Tabelle 6.8 entnommen werden.

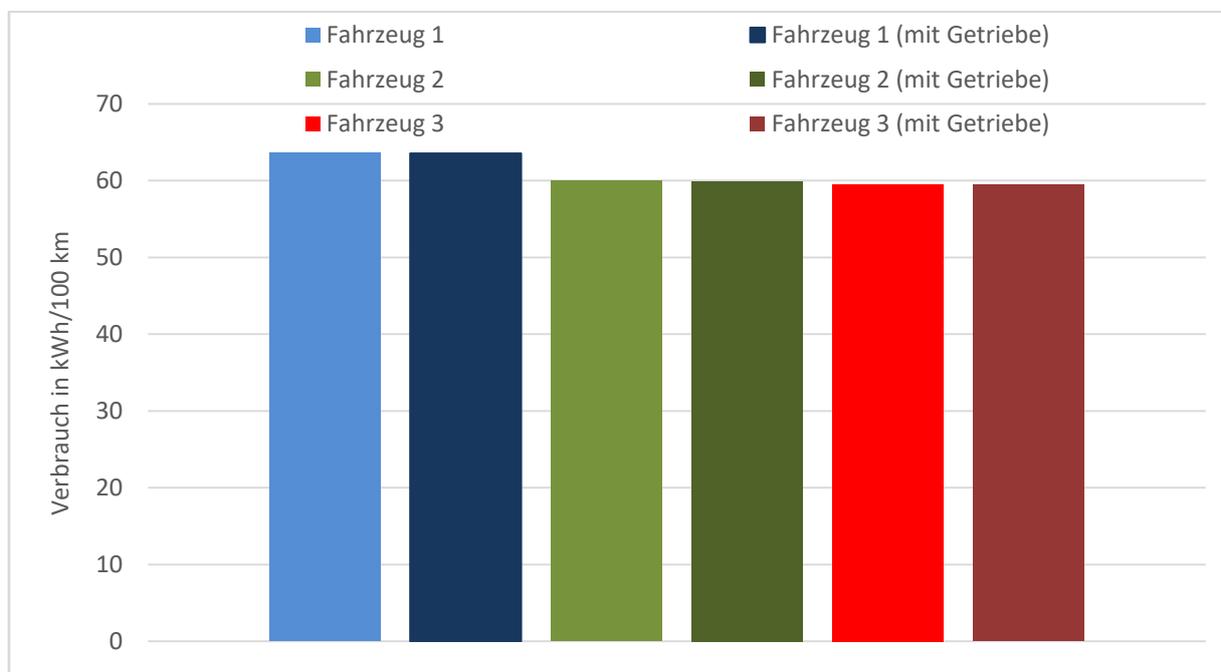


Abbildung 6.20: Simulationsergebnis (18 t) Energieverbrauch

6.2.5 Verlängerung der Fahrzeit durch bedarfsgerechte Motorauslegung

Aufgrund der unterschiedlichen Motoren der drei Fahrzeuge wird der Fahrzyklus unterschiedlich schnell durchlaufen und so verschiedene Wegstrecken zurückgelegt. Als Richtwert für die sich nach Abschnitt 4.2.4 ergebende zeitliche Verzögerung dient das Referenzfahrzeug. Es entspricht der 100% Lösung und deckt alle numerischen Ausreiser ab, sodass der Fahrzyklus genau in der vorgegebenen Zeit und Geschwindigkeit durchlaufen wird. In Abbildung 6.21 sind die prozentuellen Verzögerungen dargestellt. Die Unterschiede liegen im Bereich 0,42% Verzögerung von Fahrzeug eins, bis 1,35% bei Fahrzeug zwei und 2,19% bei Fahrzeug 3. Alle Geschwindigkeiten unter 3 m/s mussten weggefiltert werden, da es bei allen Fahrzeugen bei theoretischen Stehzeiten trotzdem zu langsamem Fahren gekommen ist. Ersichtlich ist das im Geschwindigkeits/Zeit Diagramm des Fahrreglers.

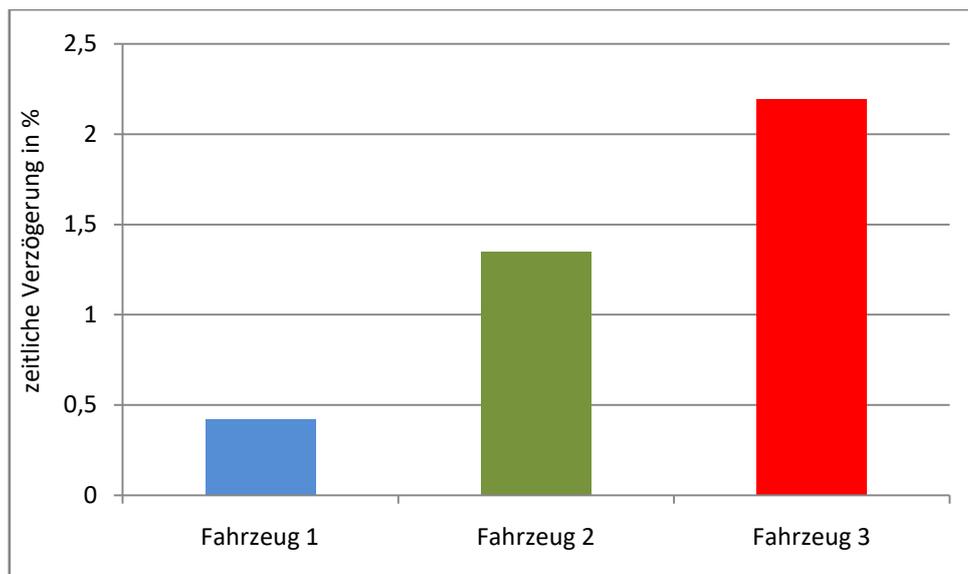


Abbildung 6.21: Simulationsergebnis (18 t) zeitliche Verzögerung

6.2.6 Mehrkosten und Nutzlast über die Reichweite

Der Zusammenhang zwischen den Mehrkosten und der Nutzlast anhand der Reichweite ist in Abbildung 6.22 illustriert. Die Mehrkosten sind bedingt durch die teuren Batterien für die elektrische Ausführung konstant höher als die des Verbrennungsmotors. Ab einer Reichweite von 245 km unterschreitet die Nutzlast der elektrischen Variante jene des herkömmlichen Fahrzeugs. Die Mehrkosten liegen bedingt durch die Batterie konstant über denen des Iveco Stralis und steigen mit zunehmender Reichweite sukzessive an. Die eingesetzten Parameter sind in Tabelle 6.21 gegeben.

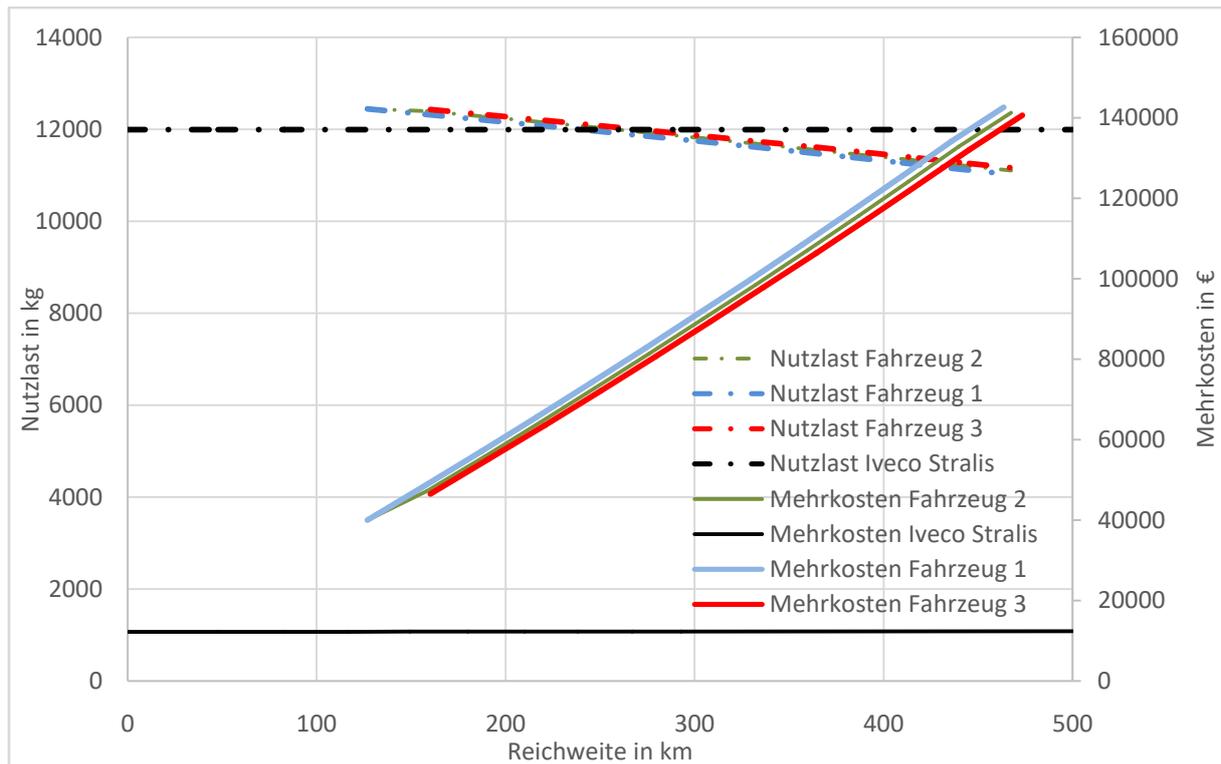


Abbildung 6.22: Simulationsergebnis (18 t) Mehrkosten und Nutzlast über die Reichweite

Tabelle 6.21: Parameter (18 t) Mehrkosten

Parameter	Wert	Literaturverweis
K_{Get}	100 €	[53]
K_{T}	250 €	[53]
k_{spezBat}	400 €/kWh	[53]
k_{spezEM}	20 €/kW	[53]
k_{spezVKM}	52,4 €/kW	[53]
k_{Sprit}	1,113 €/l	[56]
k_{Strom}	0,212 €/kWh	[57]
S_{v}	27,5 l/100km	[67]

6.2.7 Energiekosten

Die Energiekosten divergieren wie in Abbildung 6.23 dargestellt abhängig von der Strecke zunehmend. Die Kosten sind für den elektrischen Betrieb sind jedoch wesentlich geringer. Das Schaltgetriebe hat für die drei Varianten keinen merklichen Unterschied und wird deswegen ausgespart. Die Parameter sind in Tabelle 6.21 gegeben.

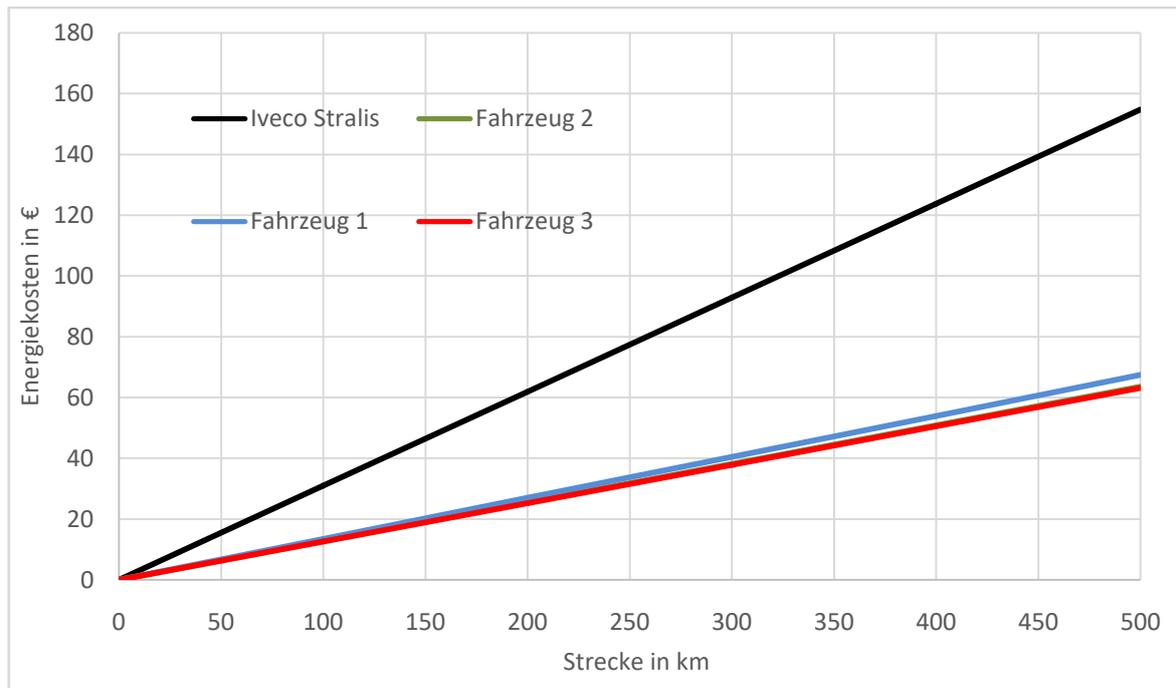


Abbildung 6.23: Simulationsergebnis (18 t) Energiekosten

6.2.8 CO₂ Ausstoß

Der Ausstoß von CO₂ in Ländern mit einem hohen Anteil regenerativen Stromanteil –wie zum Beispiel in Österreich– wirkt sich positiv auf die CO₂ Bilanz aus. In Abbildung 6.24 ist der CO₂-Ausstoß des Iveco Stralis sowie der drei elektrischen Fahrzeuge dargestellt. Zu einer bestimmten Strecke lässt sich die Differenz des Ausstoßes als vertikale zwischen den Linien herauslesen. In Tabelle 6.22 sind die zugehörigen Parameter wiedergegeben.

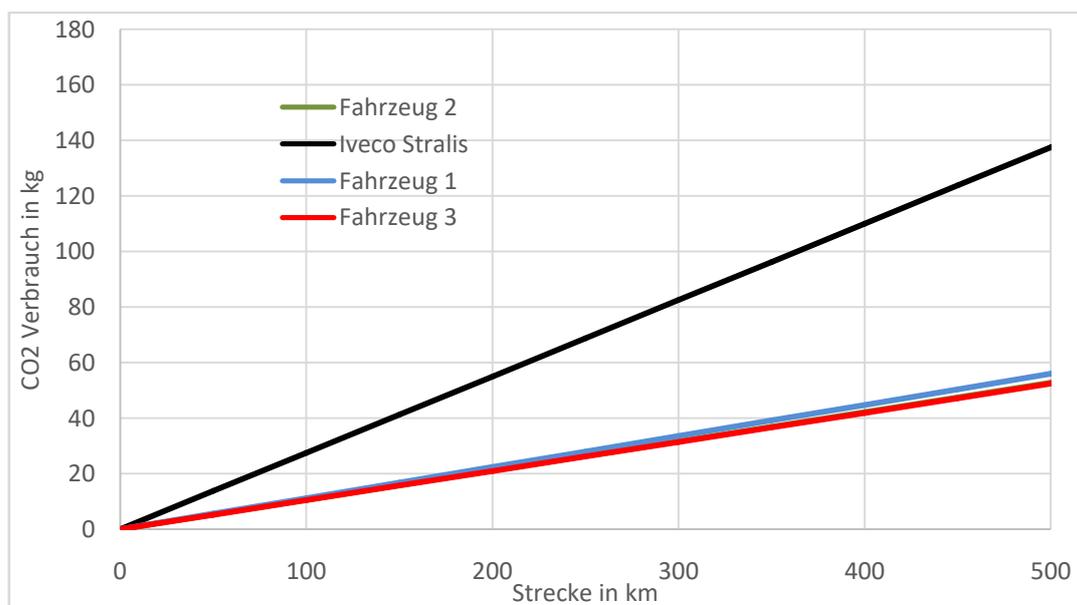


Abbildung 6.24: Simulationsergebnis (18 t) CO₂ Ausstoß

Tabelle 6.22: Parameter CO₂ Ausstoß

Parameter	Wert	Literaturverweis
$h_{EMCO\ 2}$	0,176 kg/kWh	[58]
$h_{VKMCO\ 2}$	0,876 kg/km	[67]

6.2.9 Gesamtkostenabschätzung

Grundlage der Parameter in Tabelle 6.23 ist eine Jahreslaufleistung von 150000 km. In Abbildung 6.25 sind die Gesamtkosten der Fahrzeuge dargestellt. Ab einer Laufleistung von 245000 km zahlt sich die Investition in ein elektrisches Fahrzeug aus. Ab dann sind die zu Beginn getätigten, höheren Anschaffungskosten durch die Batterie amortisiert. Es ist ersichtlich, dass die Fixkosten (0 km Strecke) für die elektrischen Fahrzeuge viel höher ausfallen als für den Iveco Stralis. Bedingt durch die geringeren variablen Kosten mit zunehmender Strecke kann sich eine Investition, wie bereits erwähnt trotzdem auszahlen. Der E-Force 18 t Lastkraftwagen kostet 325000 €. Die Fixkosten dieses Fahrzeugs sind deswegen so hoch, da die Batterie für eine Reichweite von bis zu 300 km bei maximaler Masse ausgelegt ist, [70]. Die Dimensionierung anhand des tatsächlichen Bedarfs eines konkreten Anwendungsfalls mit einem real vorgegebenen Fahrprofil birgt gegenüber der allgemein gängigen Batteriedimensionierung großes Einsparungspotenzial.

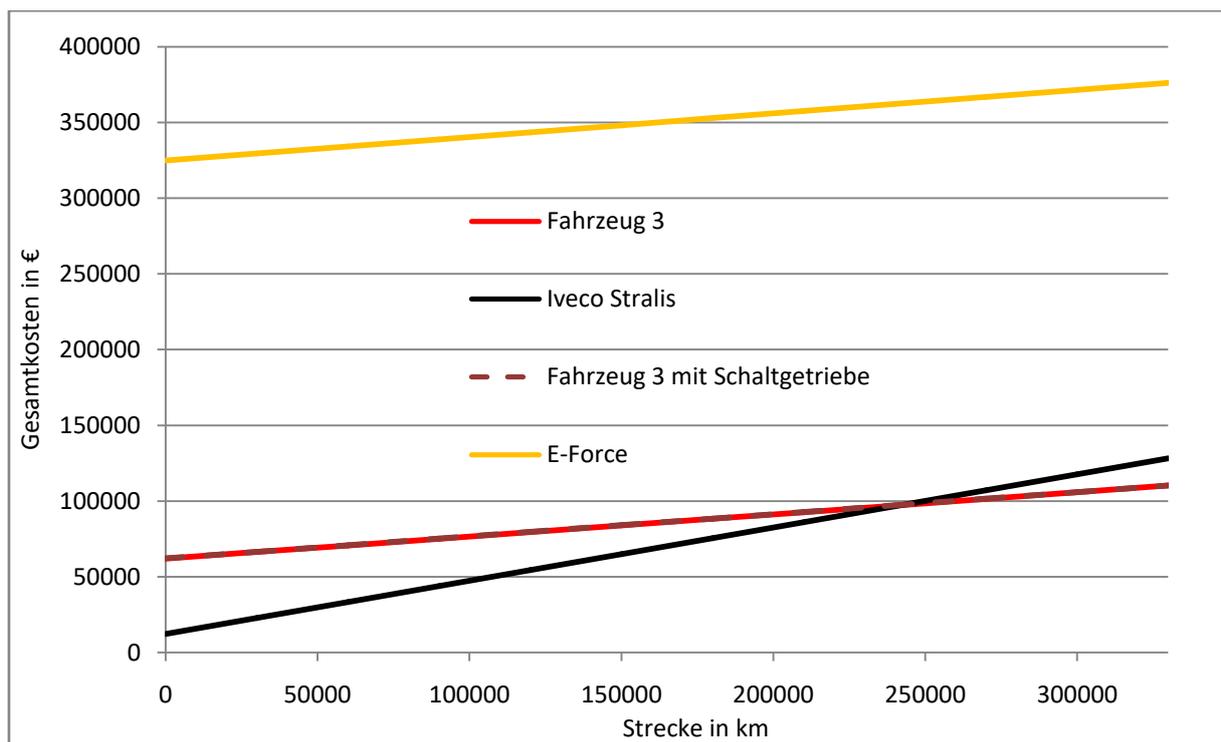


Abbildung 6.25: Simulationsergebnis (18 t) Gesamtkostenabschätzung

Für die Fahrzeuge 2 und 3 verschiebt sich der Break Even Punkt wie in Abbildung 6.26 gezeigt zu einer höheren Strecke. In dieser Abbildung werden nur die Fixkosten für den Antriebsstrang und die Batterie beziehungsweise für den Antriebsstrang und den Tank einberechnet.

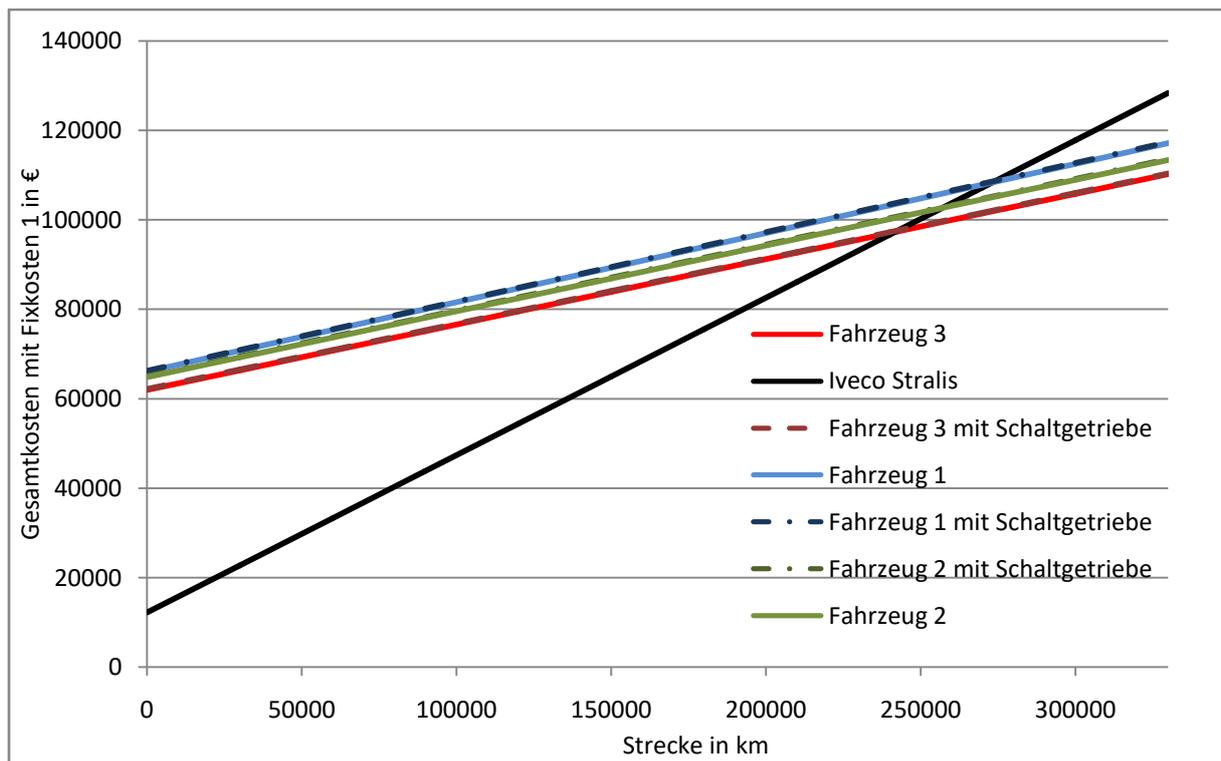


Abbildung 6.26: Simulationsergebnis (18 t) Gesamtkostenabschätzung mit Fixkosten 1 für Antriebsstrang und Batterie

Tabelle 6.23: Parameter Gesamtkostenabschätzung

Parameter	Wert	Literaturverweis
k_{STEM}	0 €/km	[60, 68]
k_{StVKM}	0,002448 €/km	[69]
k_{WREM}	0,02 €/km	[61]
k_{WRVKM}	0,04 €/km	[61]
K_{f2}	117803 €	[70]

6.2.10 Standzeitanalyse

Für das 18 t schwere Fahrzeug sind die Standzeiten über drei Minuten in Abbildung 6.27 dargestellt. In Summe ergibt sich eine Gesamtstandzeit von 4 h, 8 min und 44 s während des gesamten Fahrzyklus. Da es eine sehr lang andauernde Standzeit von 1 h und 40 min an einem Stück gibt sowie zwei Standzeiten zu rund einer halben Stunde ist das Zwischenladen sehr sinnvoll. Dadurch könnten weniger Batterien transportiert werden und die Nutzlast würde steigen. Die längste Zeit ohne anzuhalten beträgt ungefähr in der Mitte des Fahrzyklus 3468 s.

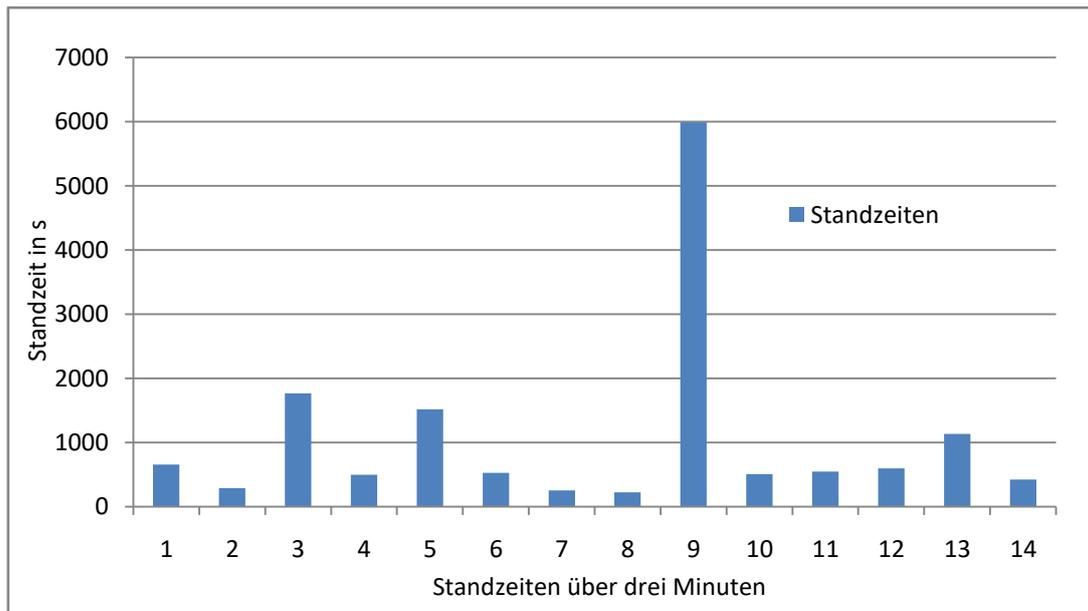


Abbildung 6.27: Standzeit 18 t Fahrzeug

6.2.11 Kostenreduktion durch Zwischenladen

Die Auswertung der Standzeiten ergibt, dass ein Zwischenladen in jedem Fall sinnvoll ist sofern die Infrastruktur gegeben ist. In Abbildung 6.28 sind für Fahrzeug 3 die Gesamtkosten nochmals verglichen mit dem Iveco Stralis und dem elektrifizierten E-Force dargestellt. Durch die verringerte Anzahl an Batterien sinken die Fixkosten der Batterie um 75,71%. Dazu muss entweder mit dem Tesla Supercharger oder mit Typ 2 Ladekabel geladen werden. Bereits bei 31000 km ist der Break-Even Punkt erreicht. In Tabelle 6. 24 sind die Lademengen für die drei Stecker Varianten berechnet. Die Kostenreduktion für die Batterie ist in Tabelle 6.25 jeweils für die Fahrzeuge und die Stecker Varianten dargelegt. Typ 2 und der Tesla Supercharger übersteigen den gesamt Energieverbrauch, sodass nur die mindestens benötigte Anzahl an Zellen für die längste Wegstrecke übrig bleibt.

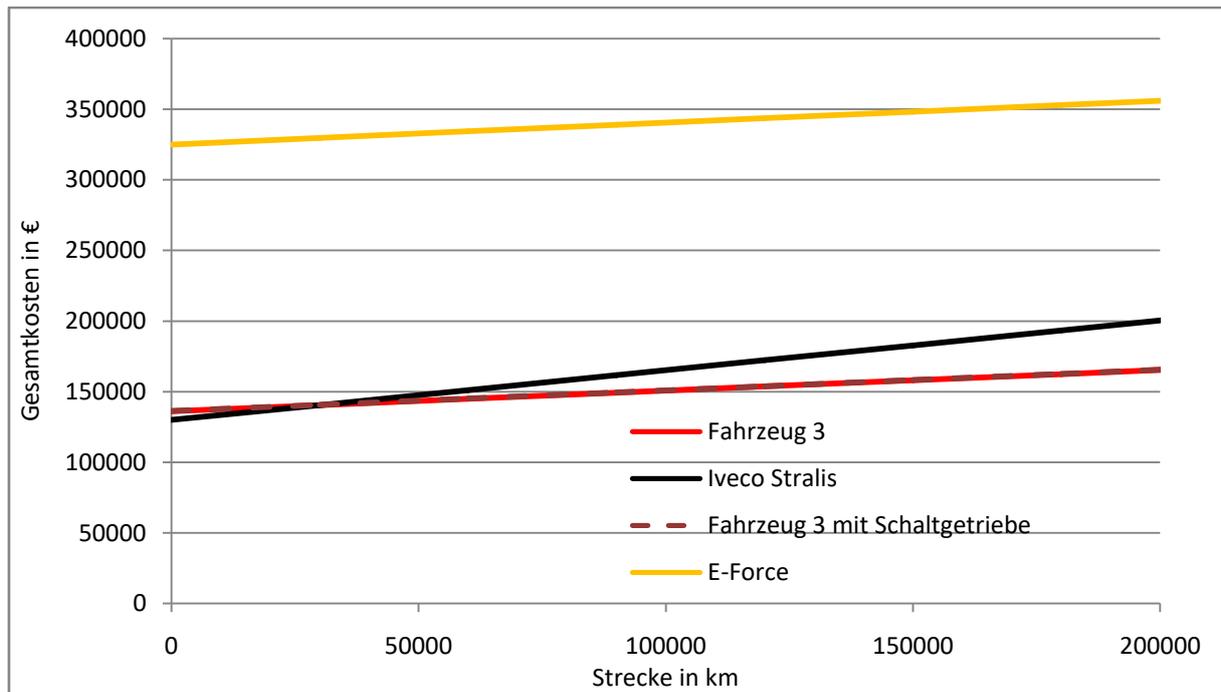


Abbildung 6.28: Simulationsergebnis (18 t) Kostenreduktion durch Zwischenladen

Tabelle 6.24: Berechnung der Lademengen (18 t)

Steckertyp	E_L
Typ 1	27,61 kWh
Typ 2	160,43 kWh
Tesla Supercharger	447,72 kWh

Tabelle 6.25: Simulationsergebnis Kostenreduktion und Zellanzahl durch Zwischenladen

Stecker- typ	Fahrzeug 1			Fahrzeug 2			Fahrzeug 3		
	neue Zellanzahl		Kosten- red.	neue Zellanzahl		Kosten- red.	neue Zellanzahl		Kosten- red.
	n_p	n_s		n_p	n_s		n_p	n_s	
Typ 1	8	58	17,14%	8	58	17,14%	8	56	17,64%
Typ 2	8	17	75,71%	8	17	75,71%	8	17	75,0%
Tesla S.	8	17	75,71%	8	17	75,71%	8	17	75,0%

Gleich wie beim 3,5 t KEP Fahrzeug verschieben sich die Kosten vom Fahrzeug auf die Infrastruktur im städtischen Raum.

6.2.12 Kostenreduktion durch reale Nutzlast

Durch die Energiespeicherauslegung mittels der realen Nutzlast (siehe Beladung in Tabelle 6.18) können gegenüber der maximalen Nutzlast die Batteriekosten um bis zu 23,08% reduziert werden. Wird also häufig statt der gesamten Nutzlast nur eine reduzierte mitgeführt lassen sich Batteriekosten reduzieren. Die Kostenreduktion zeigt Tabelle 6.26.

Tabelle 6.26: Simulationsergebnis (18 t) Kostenreduktion durch reale Nutzlast

Fahrzeug	Kosteneinsparung
1	23,08%
2	21,35%
3	22,72%

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Hauptmotivation dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob durch eine bedarfsgerechte Auslegung des elektrischen Antriebs der Kostennachteil durch eine kleinere Batterie kompensiert werden kann. Außerdem soll ein Konzept der Automatisierung für den urbanen Verteilerverkehr vorgestellt werden, dass sich in naher Zukunft bereits realisieren ließe.

Zur Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit einer elektrisch angetriebenen (automatisierten) Verteilerplattform wurde zunächst der Stand der Technik des autonomen Fahrens erörtert und mittels verschiedener realisierter Beispiele erläutert. Es zeigt sich, dass im geschützten Bereich von Betrieben bereits viele FTF im Einsatz sind während im öffentlichen Straßenverkehr nur sehr wenige im Test befindliche Fahrzeuge aktiv sind. Außerdem wurde auf die gegenwärtige Rechtslage sowie die vorhandene Haftungsproblematik eingegangen. Bis dato gilt für die autonome Lenkanlage eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 10 km/h. Gleichzeitig sieht die Wiener Konvention von 1967 vor, dass immer ein Mensch die Kontrolle und Entscheidungsgewalt im Fahrzeug inne haben muss. Aus den beiden genannten Gründen ist das autonome Fahren gegenwärtig sehr eingeschränkt und nur im geschützten Bereich möglich. Die Haftung gestaltet sich ebenfalls sehr schwierig, da rechtlich immer von einer bemannten Fahrt ausgegangen wird und deswegen von einer „Haftungslücke“ besteht. Prinzipiell haftet jedoch der Halter und nicht der Lenker eines Fahrzeugs für alle verursachten Schäden, die nicht auf Produktfehler zurückgeführt werden können.

Das vorgestellte Konzept besteht aus einem bemannten Zugfahrzeug, das mit einer beliebigen Anzahl von FTF über eine elektronische Deichsel mit dem Zugfahrzeug verbunden ist. In Logistikzentren ist ein automatisiertes Rangieren der Fahrzeuge vorgesehen.

Anschließend wurden bestehende Ladekonzepte von elektrisch betriebenen Fahrzeugen aufgezählt. Die Bandbreite von verschiedenen Steckern reicht von einer Leistung von 7,4 kW bis maximal 120 kW beim Tesla Supercharger. Diese Arbeit wurde zur Untersuchung der Potenziale des Zwischenladens durchgeführt.

Durch die Festlegung auf zwei Fahrzeuge -3,5 t und 18 t- wurden als erstes die Daten der entsprechenden, als repräsentativ betrachteten Fahrzyklen eingeholt. Darauf aufbauend wurde ein Fahrzeugmodell mittels *Matlab Simulink* erstellt, das die wesentlichen Eigenschaften eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs erfasst. Neben Fahrregler, Elektromotor, Batterie, Getriebe, Differential und Fahrzeug dient der Modelblock „Fahrzyklus“ als Eingangsgröße der Simulation. Über physikalische Zusammenhänge sind die einzelnen Blöcke miteinander verbunden. Außerdem wird ein Vergleich zu einem herkömmlichen mit Verbrennungsmotor laufenden Fahrzeug gezogen. Dazu wird im Bereich von 3,5 t der Kreisler Electric mit dem Mercedes Sprinter und bei 18 t der E-Force mit dem Iveco Stralis verglichen. Mit den ausgewählten Parametern der Fahrzeuge kann die Simulation mit Daten initialisiert und anschließend gestartet werden. Die Analyse der technischen Machbarkeit erfolgt zu Beginn durch die Auswahl von jeweils drei elektrischen Motoren anhand der im Fahrzyklus entstehenden Kräfte und Momente. Für das 18 t schwere Fahrzeug werden immer zwei Motoren pro Fahrzeug eingesetzt. Die Motorleistungen betragen 156 kW, 125 kW und 96 kW. Die Auswertung der Masse und Nutzlast ergibt, dass abhängig von der steigenden Anzahl der Zellen die Nutzlast sinkt

und ab 68 Zellen die des Sprinters beziehungsweise ab 80 des Iveco Stralis unterschreitet. Der Energiespeicher beläuft sich –unter der Annahme das ein restlicher SOC von 20% vorhanden sein muss- beim 3,5 t schweren Fahrzeug auf 12 kWh (Energiebedarf von 12,5kWh/100km) und 150 kWh (Energiebedarf von 62 kWh/100km) beim 18 t LKW. Durch eine stärkere Motorisierung lässt sich nur ein sehr geringer Zeitgewinn beim Durchfahren des Fahrzyklus erzielen, der im günstigsten Fall 2,2% beträgt. Durch eine Batterievaryation können konnte gezeigt werden, dass die Mehrkosten für ein elektrisches Fahrzeug -bedingt durch eine ausreichende Reichweite- sehr viel höher sind als die eines mit Verbrennungsmotor. Für die Elektrifizierung gilt, dass größere Reichweiten zu erheblichen Einbußen der Nutzlast sowie zu enormen Mehrkosten bedingt durch den elektrischen Energiespeicher führen. Die Energiekosten für den Betrieb eines Elektrischen Fahrzeugs sind jedoch wesentlich geringer als die eines Diesel-LKW. Für die Gesamtkosten kann festgestellt werden, dass bereits ab 11000 km der Break-Even Punkt für das 3,5 t Fahrzeug erreicht wird. Im Fall des 18 t Fahrzeugs erst ab 240000 gefahrenen Kilometern. Aus einer Standzeitanalyse geht hervor, dass bei vorhandener Infrastruktur ein Zwischenladen für alle Ladekonzepte sehr vorteilhaft ist und zu Kosteneinsparungen bei der Batterie von bis zu 75% führt. Dimensioniert man die Batterie anhand der tatsächlichen Nutzlast, die deutlich unter der maximalen Nutzlast liegt, so sind auch dadurch große Kosteneinsparungen um bis zu 23% möglich. Die beiden Anwendungsfälle, 3,5 t und 18 t Fahrzeuge wurden im Anschluss mit Potentiale hinsichtlich Automatisierung untersucht, die reale Umsetzungsmöglichkeiten bietet

In den kommenden Jahren werden immer neue Ansätze zur Autonomisierung des Straßen- und Güterverkehrs gesetzt. Einige Projekte, wie zum Beispiel das Platooning haben dafür schon zahlreiche genehmigte Testkilometer zurückgelegt. Aber auch in der Automobilindustrie werden immer neue Fahrassistenzsysteme entwickelt die den Traum vom autonomen Fahren immer näher rücken lassen. Rechtliche Änderungen in Bezug auf das Wiener Übereinkommen sind längst in Diskussion und werden schon in naher Zukunft umgesetzt. Das Fahren so wie wir es heute kennen befindet sich im Wandel. In Zukunft wird es mit Sicherheit autonom fahrende Fahrzeuge im Straßenverkehr geben, denn der Grundstein dafür wurde bereits in der innerbetrieblichen Logistik gelegt.

Auch die großen Automobilhersteller folgen diesem Trend und bringen immer mehr Elektrofahrzeuge heraus. Die Politik sieht in der Elektromobilität ein probates Mittel zur Reduktion von CO₂ Emissionen im städtischen Bereich. Neue Batterie Technologien versprechen großes Potenzial lassen auf geringere Kosten, Gewicht, kürzere Ladezeiten und höhere Reichweiten hoffen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: unterschiedliche Navigationsverfahren: a) physische Leitlinien b) Punktfolge im Boden c) Raster im Boden d) künstliche passive Marken (Laser) e) aktive bodenfreie Marken (GPS)	4
Abbildung 2.2: Systemarchitektur eines FTS	8
Abbildung 2.3: Karis Pro System	9
Abbildung 2.4: Open Shuttle Knapp	10
Abbildung 2.5: Robo Courier	10
Abbildung 2.6: Multi Shuttle Move	11
Abbildung 2.7: Auto Pallet Mover Jungheinrich	11
Abbildung 2.8: FTF von Amazonrobotics	12
Abbildung 2.9: AGV für Containertransport	13
Abbildung 2.10: Fahrerloser LKW in Molkerei	13
Abbildung 2.11: unbemannter Muldenkipper von Caterpillar	14
Abbildung 2.12: Convoi während des Satre Projekts	15
Abbildung 2.13: Cargo Cap	16
Abbildung 2.14: Automatisierungsstufen des autonomen Fahrens	17
Abbildung 2.15: Übersicht über die Rechtlichen Rahmenbedingungen	19
Abbildung 3.1: Konzept autonomes Fahren	22
Abbildung 5.1: Simuliertes Fahrzeugmodell	28
Abbildung 5.2: Simulinkmodell Elektromotor	30
Abbildung 5.3: Simulinkmodell Batterie	31
Abbildung 5.4: Brusa Hybrid Synchron Motor	34
Abbildung 5.5: Kreisel Akku Blirnd 21P LQ	35
Abbildung 6.1: Geschwindigkeitsprofil 3,5 t Fahrzeug	41
Abbildung 6.2: Kreisel Electric	42
Abbildung 6.3: Mercedes Sprinter	42
Abbildung 6.4: Simulationsergebnis (3,5 t) Momenten Kennlinie Referenzfahrzeug	43
Abbildung 6.5: Simulationsergenis (3,5 t) v. o. n. u. Momenten Kennlinie Fahrzeug 1, 2 und 3	44
Abbildung 6.6: Simulationsergebnisse (3,5 t) Masse und Nutzlast	45
Abbildung 6.7: Simulationsergebnisse (3,5 t) Energieverbrauch	47
Abbildung 6.8: Simulationsergebnisse (3,5 t) Verlängerung der Fahrzeit	48
Abbildung 6.9: Simulationsergebnisse (3,5 t) Mehrkosten und Nutzlast über Reichweite	49
Abbildung 6.10: Simulationsergebnisse (3,5 t) Energiekosten	50
Abbildung 6.11: Simulationsergebnis (3,5 t) CO ₂ -Ausstoß	50
Abbildung 6.12: Simulationsergebnis (3,5 t) Gesamtkostenabschätzung	51
Abbildung 6.13: Simulationsergebnis (3,5 t) Gesamtkostenabschätzung mit Fixkosten 1 für Antriebsstrang und Batterie	51
Abbildung 6.14: Standzeit 3,5 t Fahrzeug	53
Abbildung 6.15: Simulationsergebnis (3,5 t) Kostenreduktion durch Zwischenladen	53
Abbildung 6.16: Geschwindigkeitsprofil 18 t LKW	55
Abbildung 6.17: Simulationsergebnis (18 t) Momenten Kennlinie Referenzfahrzeug	56
Abbildung 6.18: Simulationsergebnis (18 t) Momenten Kennlinie v. o. n. u. Fahrzeug 1,2,3	57

Abbildung 6.19: Simulationsergebnis (18 t) Masse und Nutzlast	59
Abbildung 6.20: Simulationsergebnis (18 t) Energieverbrauch.....	60
Abbildung 6.21: Simulationsergebnis (18 t) Verlängerung der Fahrzeit.....	61
Abbildung 6.22: Simulationsergebnis (18 t) Mehrkosten und Nutzlast über die Reichweite	62
Abbildung 6.23: Simulationsergebnis (18 t) Energiekosten	63
Abbildung 6.24: Simulationsergebnis (18 t) CO ₂ Ausstoß	63
Abbildung 6.25: Simulationsergebnis (18 t) Gesamtkostenabschätzung.....	64
Abbildung 6.26: Simulationsergebnis (18 t) Gesamtkostenabschätzung mit Fixkosten 1 für Antriebsstrang und Batterie	64
Abbildung 6.27: Standzeit 18 t Fahrzeug.....	66
Abbildung 6.28: Simulationsergebnis (18 t) Kostenreduktion durch Zwischenladen	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Ladebetriebsarten.....	24
Tabelle 4.2: Steckertypen und zugehörige Ladeleistungen	25
Tabelle 6.1: Simulationsergebnis (3,5 t) Kennwerte der Fahrzeuge	43
Tabelle 6.2: Parameter (3,5 t) Motorauslegung.....	45
Tabelle 6.3: Simulationsergebnis (3,5 t) Gesamtmasse/Nutzlast	46
Tabelle 6.4: Parameter (3,5 t) Masse und Nutzlast.....	46
Tabelle 6.5: Simulationsergebnisse (3,5 t) Energiespeicher und Zellanzahl	46
Tabelle 6.6: Simulationsergebnis (3,5 t) Energieinhalt und Zellanzahl bei maximaler Fahrzeugmasse	46
Tabelle 6.7: Parameter (3,5 t) Energiespeicher und Zellanzahl	47
Tabelle 6.8: Parameter (3,5 t) Energieverbrauch.....	47
Tabelle 6.9: Parameter (3,5 t) Mehrkosten.....	49
Tabelle 6.10: Parameter (3,5 t) CO ₂ -Ausstoß	51
Tabelle 6.11: Parameter (3,5 t) Gesamtkostenabschätzung.....	51
Tabelle 6.12: Simulationsergebnis (3,5 t) Lademengen.....	54
Tabelle 6.13: Simulationsergebnis (3,5 t) Kostenreduktion und Zellanzahl durch Zwischenladen.....	54
Tabelle 6.14: Simulationsergebnis (3,5 t) Kostenreduktion durch reale Nutzlast	54
Tabelle 6.15: Kennwerte der Fahrzeuge (18 t).....	56
Tabelle 6.16: Parameter (18 t) Motorauslegung.....	58
Tabelle 6.17: Simulationsergebnis (18 t) Gesamtmasse/Nutzlast	59
Tabelle 6.18: Parameter (18 t) Masse und Nutzlast.....	59
Tabelle 6.19: Simulationsergebnis (18 t) Energiespeicher und Zellanzahl.....	60
Tabelle 6.20: Simulationsergebnis (18 t) Energieinhalt und Zellanzahl bei maximaler Fahrzeugmasse	60
Tabelle 6.21: Parameter (18 t) Mehrkosten.....	62
Tabelle 6.22: Parameter (18 t) CO ₂ -Ausstoß	64
Tabelle 6.23: Parameter (18 t) Gesamtkostenabschätzung.....	65
Tabelle 6.24: Simulationsergebnis (18 t) Lademengen	67
Tabelle 6.25: Simulationsergebnis (18 t) Kostenreduktion und Zellanzahl durch Zwischenladen.....	67
Tabelle 6.26: Simulationsergebnis (18 t) Kostenreduktion durch reale Nutzlast	68

Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Ingenieure, <http://www.forum-fts.com/index.php/de/vdi-fachausschuss-fts/vdi-richtlinien>, aufgerufen am 9.3.2016.
- [2] G. Ullrich: Fahrerlose Transportsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [3] <http://www.golem.de/news/actros-mit-highway-pilot-autonom-fahren-fuehlt-sich-normal-an-1510-116666.html>, aufgerufen am 9.9.2016.
- [4] Zentrum für Fahrerlose Transportsysteme, <https://www.logismarket.de/ic/my-intralogistik-zentrum-fuer-fahrerlose-transportssysteme-942566.pdf>, aufgerufen am 15.3.2016.
- [5] L. Overmeyer, B. Nieman, M. Baum, D.-H. Fricke: Aufbau von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) durch eine dezentrale Datenstruktur, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik Leibniz Universität Hannover und Götting KG, Forschungsbericht, 2006.
- [6] <http://www.volkswagen.de/de/technologie/technik-lexikon/acc.html>, aufgerufen am 6.9.2016.
- [7] J. Wiesinger: Adaptive Cruise Control, <http://www.kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/acc.htm>, aufgerufen am 8.10.2016.
- [8] <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/car-to-car-communication-C2C-Car-to-Car-Kommunikation.html>, aufgerufen am 19.9.2016.
- [9] M. Maurer, J.C. Gerdes., B. Lenz, H. Winner: Autonomes Fahren, Springer Vieweg Verlag, 2015.
- [10] M. Heutger: Self Driving vehicles in logistics, DHL Broschüre, 2014.
- [11] Fraunhofer Institut, <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/maerz/schwaermen-und-transportieren.html>, aufgerufen am 29.1.2016.
- [12] Jungheinrich, <http://www.jungheinrich.com/en/automatic-industrial-trucks/driverless-transport-systems/eks-210a/>, aufgerufen am 30.1.2016.
- [13] G. Ullrich: Effizientes Fullfillment mit Fahrerlosen Transport Fahrzeugen, 2012, http://www.ds-automotion.com/uploads/tx_sbdwloader/hermes.pdf, heruntergeladen am 3.3.2016.
- [14] Amazon Robotics, <https://www.amazonrobotics.com/#/vision>, aufgerufen am 31.1.2016.
- [15] <http://hhla.de/de/container/altenwerder-cta/das-projekt-agv.html>, aufgerufen am 1.2.2016.
- [16] <http://www.terex.com/port-solutions/de/products/automated-guided-vehicles/agv/index.htm>, aufgerufen am 21.3.2016.
- [17] <http://www.goetting.de/news/2012/molkeerei>, aufgerufen am 1.2.2016.
- [18] <http://www.cargocap.de>, CargoCap Broschüre Gütertransport im Untergrund, 2006.

- [19] B. J. Pielage: Underground Freight Transportation. A new development for automated freight transportation systems in the Netherlands , Forschungsbericht, Technische Universität Delft, 2000.
- [20] M. Hoffer: Rechtlos im autonomen Auto?, In: ÖAMTC-Expertenforum, 26.11.2015, Präsentation Wien.
- [21] <http://www.zukunft-mobilitaet.net/17991/analyse/rechtslage-autonomes-fahren-regelungen-gesetz/>, aufgerufen am 2.3.2016.
- [22] ÖAMTC, <http://www.oeamtc.at/portal/autonomes-fahren-traum-oder-realitaet+2500+1642694>, aufgerufen am 18.12.2015.
- [23] T. Form: Automatisches Fahren im VW-Konzern , In: ÖAMTC-Expertenforum, 26.11.2015, Präsentation Wien.
- [24] F. Greis: Autobahnpilot Wiener Übereinkommen erlaubt vollautomatisierte Autos, <http://www.golem.de/news/autobahnpilot-wiener-uebereinkommen-erlaubt-vollautomatisierte-autos-1603-119922-3.html>, aufgerufen am 29.9.2016.
- [25] UNECE, <http://www.unece.org/info/media/presscurrent-press-h/transport/2016/unece-paves-the-way-for-automated-driving-by-updating-un-international-convention/doc.html>, aufgerufen am 25.3.2016.
- [26] UNECE Regelung, Council of the United Nations, Genf, 2014.
- [27] M. Hoffer, Interview in „heute konkret“, <http://tvthek.orf.at/program/heute-konkret/4660549>, aufgerufen am 22.4.2016.
- [28] Mennekes, <http://www.mennekes.de/index.php?id=ladearten&L=0>, aufgerufen am 4.8.2016.
- [29] S. Schraven, F. Kley, M. Wietschel: Induktives Laden von Elektromobilen – eine techno-ökonomische Bewertung, Fraunhofer Institut, 2010.
- [30] A. Thomson: Kabelloses Laden Technische und organisatorische Aspekte auf dem Weg in den Markt, ATZ elektronik Springer Vieweg, 6.12.2015.
- [31] E-Force Technische Spezifikationen, http://eforce.ch/wp/wp-content/uploads/2013/06/E_FORCE_Fact_Sheet_D_2015.pdf, Datenblatt, 2015.
- [32] <http://mobilityhouse.com/de/ladekabelarten-und-steckertypen/>, aufgerufen am 29.8.2016.
- [33] Tesla Supercharger, <https://www.tesla.com/supercharger>, aufgerufen am 29.8.2016.
- [34] B. Geringer: KFZ-Technik Grundzüge, Technische Universität Wien, Skript, 2010.
- [35] W. Hirschberg, M. Ackerl: Nutzfahrzeugtechnik, Technische Universität Graz, Skript, 2015.
- [36] B. Geringer: Kraftfahrzeug Antriebe, Technische Universität Wien, Skript, 2013.
- [37] L. Eckstein: Längsdynamik von Kraftfahrzeugen: Verkehrssystem Kraftfahrzeug, Kräfte am Fahrzeug, Antriebsstrang, Bremsen, Fahrleistungen und Verbrauch, Vorlesungsdruck Fahrzeugdynamik 1, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, Aachen, 2011.

- [38] J. O. Krahl: Regelungstechnik, Fachhochschule Köln, Skript, 2013.
- [39] <http://www.brusa.biz/produkte/antrieb/motoren-400-v/asm1-61712.html>, aufgerufen am 2.9.2016.
- [40] Kreisel Electric Akku, <http://www.kreiselectric.com/technologie/batteriesystem/akkupack/>, aufgerufen am 12.9.2016.
- [41] Kreisel Electric Transporter, <http://www.kreiselectric.com/projekte/electric-transporter/>, aufgerufen am 12.9.2016.
- [42] http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/mpv_and_camper_van/home/new_mpvs_and_camper_vans/models/chassis_for_camper_vans/sprinter_906/facts/technical_data/models.html, aufgerufen am 16.9.2016.
- [43] <http://elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=rollwiderstand>, aufgerufen am 2.6.2016.
- [44] F. Wittmeier: Aerodynamische Lkw Konstruktion und Design, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart, Präsentation, 2013.
- [45] <http://www.eurotransport.de/news/aerodynamik-windschnittige-lastzuege-fuer-weniger-verbrauch-344575.html>, aufgerufen am 2.6.2016.
- [46] <http://home.arcor.de/raederundreifen/umfang.htm>, aufgerufen am 2.6.2016.
- [47] Nutzfahrzeugreifen, Technischer Ratgeber, <http://www.continental-lkw-reifen.de>, 2015.
- [48] E. Bach: Kraftfahrzeugantriebe Lehrbrief B1, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2015.
- [49] <http://www.chemie.de/lexikon/Luftdichte.html>, aufgerufen am 2.6.2016.
- [50] Brusa, Performance Drivertrain/Single Offset Traction Drive (DTS01), www.brusa.com, heruntergeladen am 3.6.2016.
- [51] Mercedes Benz Sprinter, Technische Daten, http://www.mercedes-benz.at/content/austria/mpc/mpc_austria_website/de/home_mpc/van/home/new_vans/models/sprinter_906/panel_van_/data/engines.html, heruntergeladen am 29.5.2016.
- [52] Kreisel Electric, <http://www.kreiselectric.com/projekte/electric-transporter/>, aufgerufen am 29.5.2016.
- [53] M. Blesl, D. Bruchof, N. Hartmann, D. Özdemir, U.Fahl, L.Eltrop, A.Voß: Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität, Endbericht, Universität Stuttgart, 2009.
- [54] <http://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/files/smfiledata/1/4/6/8/1/6/vitotechndaten.pdf>, heruntergeladen am 2.6.2016.
- [55] P. Marx: Wirkungsgrad-Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Fahrzeugen mit Elektromotor, <http://www.mx-electronic.com/pdf/Der-Elektrofachmann-Wirkungsgrad-Vergleich-zwischen-Fahrz.pdf>, heruntergeladen am 2.6.2016.

- [56] ÖAMTC, Dieseldurchschnittspreis 2015, <http://www.oeamtc.at/portal/spritpreise-2015-im-rueckblick+2500+1620752>, aufgerufen am 13.9.2016.
- [57] Stromdurchschnittspreis 2015, <http://stromliste.at/strompreis>, aufgerufen am 13.9.2016.
- [58] Österreichischer Strommix, <http://oesterreichsenergie.at/daten-fakten/statistik/stromerzeugung.html>, aufgerufen am 15.6.2016.
- [59] <http://www.finanzen.at/nachrichten/aktien/Kreisel-Electric-Sprinter-Nutzfahrzeug-mit-bis-zu-9-Sitzplaetzen-und-300-km-elektrischer-Reichweite-Schnellster-Elektro-Kastenwagen-am-Markt-mit-ueber-1--1000727228>, aufgerufen am 2.10.2016.
- [60] <http://www.oeamtc.at/portal/motorbezogene-versicherungssteuer+2500+1603100>, aufgerufen am 29.6.2016.
- [61] http://www.autokostencheck.de/Mercedes/Mercedes-Sprinter/Sprinter/sprinter-213-313-cdi-c_14109/kfz-steuer/, aufgerufen am 29.6.2016.
- [62] Mercedes Sprinter Preisliste, https://www.mercedes-benz.de/content/media_library/germany/mpc_germany/de/mercedes-benz_deutschland/transporter_ng/neue_transporter/sprinter/transporter_neuer.object-Single-MEDIA.download.tmp/MB_Preisliste_Sprinter_160601.pdf, heruntergeladen am 6.10.2016.
- [63] Bedienungsanleitung GPS Datalogger 869E 66-Channel, <http://www.transystem.com.tw/product/97/860E%20Manual%20V1.0.pdf>, aufgerufen am 25.9.2016.
- [64] Brusa Motor im E-Force, <http://electriccarsreport.com/2013/07/brusa-to-supply-drivetrain-components-for-e-force-electric-truck/>, aufgerufen am 28.7.2016.
- [65] Iveco Stralis Hi Street Datenblatt, http://www.iveco.com/Germany/collections/technical_sheets/Documents/2015/STRALIS/TOB_HRoad_EuroVI_AEBS/Stralis%20EURO-VI%20-%20AD%20AT%20HI-ROAD%20HI-STREET%20-%204x2%20Fahrgestelle/ADT_HISR_190S31-33-36-40FPD_E6_AEBS.pdf, heruntergeladen am 14.9.2016.
- [66] <http://truck-data.com/de/truck/IVECO/Stralis/>, aufgerufen am 16.9.2016.
- [67] S. Schneider: Effizienz und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastkraftwagens E-Force von Feldschlösschen Getränke Getränke AG, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2014.
- [68] Bundesministerium für Finanzen, https://www.bmf.gv.at/steuern/fahrzeuge/kraftfahrzeugsteuer.html#heading_Steuersatz, aufgerufen 17.9.2016.
- [69] Moser Consulting, http://www.moser-consulting.at/fileadmin/user_upload/LKW-Kalkulation_2015_Leer.pdf, heruntergeladen am 17.9.2016.

[70] <http://www.stern.de/auto/news/eforce--elektro-lkw-im-alltag-6563350.html>, aufgerufen am 6.10.2016.

A. Anhang