

91. Jahrgang – Heft 1 – 2020

## ZEITSCHRIFT FÜR VERKEHRSWISSENSCHAFT

### INHALTSVERZEICHNIS

|   |          |
|---|----------|
| Verkehrsökonomische Analyse von Minibustaxiverkehren in der<br>Metropolregion Kapstadt und der Minenstadt Rustenburg in Südafrika<br>Von Johannes Simons, Benjamin Wacker, Andreas Bossert und Jan Schlüter | Seite 1  |
| Kommentar zu dem Beitrag:<br>Verkehrsökonomische Analyse von Minibustaxiverkehren in der<br>Metropolregion Kapstadt und der Minenstadt Rustenburg in Südafrika *<br>Von Martin Winter                       | Seite 27 |
| Grüne Logistik: Eine Untersuchung ausgewählter alternativer<br>Antriebstechnologien im Güterverkehr<br>Von Patrick Siegfried und Daniel Strak   | Seite 28 |
| Kommentar zu dem Beitrag:<br>Grüne Logistik: Eine Untersuchung ausgewählter alternativer<br>Antriebstechnologien im Güterverkehr *<br>Von Christian Arnold  | Seite 58 |

\* Dieser Kommentar gilt als zustimmende Stellungnahme hinsichtlich einer Veröffentlichung des genannten Beitrags gemäß dem (Alternativ-)Ansatz zur transparenten Qualitätsprüfung und -diskussion bei der Zeitschrift für Verkehrswissenschaft. Siehe zu diesem Ansatz der Qualitätsprüfung sowie auch zum (Standard-)Ansatz der „Doppel-Blind-Begutachtung“ von Beiträgen die diesbezüglichen Angaben auf der Homepage der ZfV ([www.z-f-v.de](http://www.z-f-v.de) → „Einreichung von Beiträgen und Begutachtung/ Qualitätsprüfung“).

## Herausgeber

Prof. Dr. Thorsten Beckers (Bauhaus-Universität Weimar)  
Prof. Dr. Alexander Eisenkopf (Zeppelin Universität)  
Prof. Dr. Christos Evangelinos (Internationale Hochschule Bad Honnef - Bonn (IUBH))  
Prof. Dr. Frank Fichert (Hochschule Worms)  
Prof. Dr. Astrid Gühnemann (Universität für Bodenkultur Wien)  
Prof. Dr. Georg Hirte (Technische Universität Dresden)  
Prof. Dr. Kai Nagel (Technische Universität Berlin)  
Prof. Dr. Christoph Walther (Bauhaus-Universität Weimar/ PTV AG)

## Herausgeberbeirat

Prof. Dr. Gerd Aberle (Universität Gießen)  
Prof. Dr. Kay W. Axhausen (Eidgenössische Technische Hochschule - ETH, Zürich)  
Prof. Dr. Herbert Baum (Universität zu Köln)  
Prof. Dr. Johannes Bröcker (Universität zu Kiel)  
Prof. Dr. Matthias Finger (École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL))  
Prof. Dr. Karl-Hans Hartwig (Universität Münster)  
Dr. Hendrik Haßheider (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI))  
Prof. Dr. Georg Hauger (Technische Universität Wien)  
Prof. Dr. Christian von Hirschhausen (Technische Universität Berlin)  
Prof. Dr. Günter Knieps (Universität Freiburg)  
Prof. Dr. Jürgen Kühling (Universität Regensburg)  
Prof. Dr. Gernot Liedtke (Technische Universität Berlin/ DLR Berlin)  
Dr. Heike Link (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung - DIW, Berlin)  
Prof. Dr. Robert Malina (Hasselt University)  
Prof. Dr. Kay Mitusch (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))  
Prof. Dr. Hans-Martin Niemeier (Hochschule Bremen)  
Prof. Dr. Werner Rothengatter (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))  
Prof. Dr. Bernhard Schlag (Technische Universität Dresden)  
Prof. Dr. Bernhard Wieland (Technische Universität Dresden)  
Dr. Martin Winter (IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V. Berlin)

## Redaktion

Prof. Dr. Thorsten Beckers (Bauhaus-Universität Weimar)  
Dr. Martin Winter (IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V. Berlin)

## Einreichung von Beiträgen

Manuskripte sind an die folgenden Herausgeber zu senden:

Prof. Dr. Thorsten Beckers  
thorsten.beckers@uni-weimar.de  
Bauhaus-Universität Weimar  
Professur Infrastrukturwirtschaft und -management (IWM)  
Marienstr. 7A  
99423 Weimar

Prof. Dr. Kai Nagel  
nagel@vsp.tu-berlin.de  
Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik (VSP)  
Sekt. SG 12  
Salzufer 17-19  
10587 Berlin

Informationen zur Einreichung von Beiträgen und zur Qualitätsprüfung und Begutachtung eingereicherter Beiträge finden Sie auf der Homepage der ZfV ([www.z-f-v.de](http://www.z-f-v.de) → „Einreichung von Beiträgen und Begutachtung / Qualitätsprüfung“).

## Verlag – Herstellung – Vertrieb – Anzeigen

Verkehrs-Verlag J. Fischer,  
Corneliusstraße 49, 40215 Düsseldorf  
Telefon: (0211) 9 91 93-0, Telefax (0211) 6 80 15 44  
[www.verkehrsverlag-fischer.de](http://www.verkehrsverlag-fischer.de)

Einzelheft EUR 25,50 – Jahresabonnement EUR 75,00 zuzüglich MwSt und Versandkosten  
Für Anzeigen gilt Preisliste Nr. 25 vom 1.1.2009  
Erscheinungsweise: drei Hefte pro Jahr

© Verkehrs-Verlag J. Fischer, Corneliusstraße 49, 40215 Düsseldorf  
ISSN: 0044-3670

Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages nicht gestattet, photographische Vervielfältigungen, Mikrofilme, Mikrophotos u.ä. von den Zeitschriftenheften, von einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen.

# Verkehrswirtschaftliche Analyse von Minibustaxiverkehren in der Metropolregion Kapstadt und der Minenstadt Rustenburg in Südafrika

VON JOHANNES SIMONS, BENJAMIN WACKER,  
ANDREAS BOSSERT UND JAN SCHLÜTER

## 1 Einleitung

Das Minibustaxi ist das meistgenutzte Verkehrsmittel in Südafrika. Es handelt sich dabei um ein öffentliches Verkehrssystem aus privatwirtschaftlich betriebenen Minibussen mit flexibler Linienführung und ohne festen Fahrplan. Wie in vielen anderen Entwicklungs- und Schwellenländern ist auch der Minibustaxiverkehr (MBTV) in Südafrika nur mäßig reguliert und kann als informell bezeichnet werden. Dies führt zu einem Mangel an Professionalität. Teils marode Fahrzeuge, fehlende Fahrgastinformationen und ungenügende Haltestelleninfrastruktur sind nur einige der negativen Merkmale des Systems. Überzeugen kann der MBTV hingegen mit der Flexibilität, der Verfügbarkeit und dem Fahrpreis. Aufgrund mangelnder oder unzureichender konventioneller Angebote im Öffentlichen Verkehr (ÖV) ist der MBTV für die Bevölkerung in vielen Gegenden Südafrikas alternativlos (Neumann et al., 2015, S. 137ff.).

Für diese Arbeit liegt ein umfangreicher Datensatz von aufgezeichneten Minibustaxifahrten in den südafrikanischen Städten Rustenburg und Kapstadt vor. Die Untersuchung dieses Datensatzes ermöglicht eine tiefgehende empirische Analyse des MBTVs und stellt damit eine Besonderheit dar, weil Datensätze über informelle Verkehrssysteme im Allgemeinen

---

### *Anschrift der Verfasser:*

Johannes Simons  
Max-Planck-Institut für Dynamik und  
Selbstorganisation  
Am Faßberg 17  
37077 Göttingen  
E-Mail: johannes.simons@ds.mpg.de

Dr. Benjamin Wacker  
Max-Planck-Institut für Dynamik und  
Selbstorganisation  
Am Faßberg 17  
37077 Göttingen  
E-Mail: benjamin.wacker@ds.mpg.de

Andreas Bossert  
Max-Planck-Institut für Dynamik und  
Selbstorganisation  
Am Faßberg 17  
37077 Göttingen  
E-Mail: andreas.bossert@ds.mpg.de

Dr. Jan Christian Schlüter  
Max-Planck-Institut für Dynamik und  
Selbstorganisation  
Am Faßberg 17  
37077 Göttingen  
E-Mail: jan.schlueter@ds.mpg.de

selten zugänglich sind. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verständnis vom MBTV in Südafrika durch die Auswertung dieses Datensatzes aufzubauen.

## 2 Literaturüberblick

Dieses Kapitel soll eine Übersicht bisheriger Arbeiten und ihrer Ergebnisse liefern. Obwohl das Minibustaxi das meistgenutzte öffentliche Verkehrsmittel Südafrikas darstellt, ist es kaum subventioniert. Eine Reihe von Arbeiten beschäftigt sich vor diesem Hintergrund mit der Sinnhaftigkeit und Gerechtigkeit der südafrikanischen Verkehrspolitik. Kerr (2015) etwa weist nach, dass nur etwa 1% der Subventionen im Öffentlichen Verkehr Südafrikas in den MBTV-Sektor fließen. Subventioniert werden hauptsächlich Bus- und Zugverkehre, wovon vor allem die Mittelschicht profitiert, nicht aber Haushalte mit geringem Einkommen. Zu dem Ergebnis, dass die südafrikanische Verkehrspolitik die Belange der armen Bevölkerung tendenziell missachtet und Ungleichheiten eher stärkt, kommt auch Thomas (2016). Immer wieder findet man den Vorwurf an die südafrikanische Infrastrukturpolitik, vorrangig prestigeträchtige Projekte zu fördern. Van Der Westhuizen (2007) etwa analysiert das Bahnprojekt *Gautrain* in Pretoria und Johannesburg, ein S-Bahn ähnliches System, welches im Zuge der Fußballweltmeisterschaft 2010 realisiert wurde. Mit Halten nur in wohlhabenderen Gegenden, Central Business Districts (CBDs) und dem Flughafen sowie vergleichsweise hohen Fahrpreisen sieht er dieses als symbolisch für eine Politik, die vorrangig darauf abzielt, international den Eindruck eines fortschrittlichen, modernen Staates zu erwecken, immer auch mit dem Ziel, Austragungsort für Events mit wiederum internationaler Aufmerksamkeit zu sein.

Von staatlicher Seite gibt es immer wieder Bestrebungen, den MBTV zu formalisieren. Das größte staatliche Programm stellt das *Taxi Recapitalisation Programme* (TRP) dar, das eine Abwrackprämie für alte Fahrzeuge unter der Bedingung der offiziellen Registrierung des Eigentümers bzw. Fahrers bietet. Dieses Programm bleibt von der Literatur nicht unbeachtet und erntet mitunter Kritik. Grundtenor in der Literatur ist, dass das TRP nicht weit genug gehe. Lomme (2008) argumentiert, dass das Programm nicht ausreichend für eine Formalisierung der Branche sei, sie im Gegenteil sogar daran hindert. Er fordert stattdessen die Integration des MBTVs in formelle Öffentliche Verkehrsangebote. Zu einem ähnlichen, wenn auch weniger drastischen Ergebnis kommt Wosiyana (2013) in einem Resümee über die Auswirkungen des TRPs in den Städten Durban und Pietermaritzburg. Es wird die hohe Effektivität bei der Modernisierung der teils schrottreifen Fahrzeugflotten in der kurzen und mittleren Frist gelobt. Gleichzeitig wird dem Programm eine mangelnde Fähigkeit attestiert, die Branche grundlegend zu reformieren. Es wird eine Kombination des TRPs mit der Integration des MBTVs in andere ÖV-Angebote vorgeschlagen. Solche Angebote der Integration bestehen etwa in Form von Auftragsfahrten innerhalb von öffentlichen Bussystemen. Behrens und Schalekamp (2010) mahnen zusätzlich, dass Integrationsstrategien stets regionalen Gegebenheiten angepasst und nicht blind übertragen werden sollten.

Es gibt Stimmen, die das Problem bei der Integration des MBTVs in konventionelle ÖV-Angebote vor allem auf Seiten der MBTV-Branche sehen. Braumann et al. (2010) beobachten eine Strategie der Abschottung und des unreflektierten Protestes seitens der MBTV-Vertreter. Browning (2006) erklärt es sogar zu einer Charaktereigenschaft der Minibustaxibranche, unfähig zur Formalisierung und generell nicht an Veränderung interessiert zu sein. Er schlägt einen Bottom-Up-Ansatz vor, bei dem den einzelnen Unternehmen und Fahrern Schritt für Schritt Hilfestellung bei der Einrichtung eines professionellen Managements geboten wird, um rückwärtsgewandte und halbseidene Denk- und Verhaltensweisen abzulegen. So soll die Branche langsam, aber stetig von den Vorzügen der Formalisierung überzeugt und gleichzeitig zu ihr befähigt werden.

Nach der Betrachtung der Entstehungsgeschichte wird versucht, eine Charakteristik des MBTVs von heute vorzunehmen. Ein gesonderter Abschnitt beschäftigt sich anschließend mit den zahlreichen Unzulänglichkeiten des Systems. Der Abschnitt endet mit einer Betrachtung der verschiedenen staatlichen Bestrebungen der Qualitätsverbesserung und Formalisierung in der Branche.

## 2.1 GESCHICHTE

Die Anfänge des MBTVs in Südafrika liegen in den 1960er Jahren und damit in der Zeit der Apartheid. Als Apartheid wird der Zustand des Landes vom Anfang des 20. Jahrhunderts bis in die 1990er Jahre bezeichnet, in dem eine strikte Rassentrennung in vielen Lebensbereichen zu Ungunsten der schwarzen Bevölkerung stattgefunden hat, so auch in den Bereichen Mobilität und Wohnraum. Schwarze wurden in eigene Siedlungen am Stadtrand, sog. *Townships*, verdrängt. Eine Anbindung an das Zentrum, und damit zu Arbeitsplätzen und Infrastruktureinrichtungen, war durch öffentliche Verkehrsmittel nur selten vorhanden. Ein eigenes Auto war nur für wenige Schwarze erschwinglich. Wohnten Schwarze in Gebieten mit Bahnanschluss, so war auch dies kein Garant für eine zuverlässige Beförderung in das Stadtzentrum. Die Aufteilung von Zügen in Wagons für Weiße und Schwarze, wobei Weißen überproportional viele Wagons gewährt wurden, bot selten allen Schwarzen genügend Platz. In den 1960er und 1970er Jahren war das Problem besonders groß. Schwarze, die sich ein Auto leisten konnten, begannen, gegen ein kleines Entgelt Beförderungen von den überfüllten Bahnhöfen ins Zentrum anzubieten. Dieses aus der Not geborene Provisorium gilt als der Grundstein für den MBTV in Südafrika. Nach und nach ergriffen einzelne Fahrer und Unternehmer die Chance und boten Fahrten gewerblich an, nicht mehr nur von Bahnhöfen aus, sondern auch aus schlecht oder gar nicht angebundenen Townships. Diese Fahrten waren überwiegend illegal. Die Gesetze waren zu jener Zeit besonders strikt und erlaubten die privatwirtschaftliche Personenbeförderung nur mit höchstens 4 Passagieren. Dies änderte sich mit dem *Road Transportation Act* von 1977. Dieser erlaubte die legale Beförderung von immerhin bis zu 8 Passagieren (Woolf & Joubert, 2013, S. 286).

Fünf Jahre später schließlich wurde mit dem *White Paper on National Transport Policy* die privatwirtschaftliche Beförderung von bis zu 16 Passagieren legal. Nicht zuletzt deshalb

erfuhr das Minibustaxigewerbe in den darauffolgenden Jahren ein starkes Wachstum. Im Gegensatz zu konventionellen Bus- und Bahnangeboten überzeugte der MBTV in vielen Gebieten durch schnelle Verbindungen mit hohem Takt zu niedrigen Fahrpreisen. In einigen Townships war das Minibustaxi gar das einzige öffentliche Verkehrsmittel. Konventionelle Bus- und Bahnbetreiber in der Hand des Staates oder unter dessen Lizenz litten zunehmend unter der Konkurrenz. Allerdings konnten sie eine weitere Deregulierung des Marktes nicht verhindern. Mit dem *Transportation Deregulation Act* von 1988 wurde ein Großteil der Zutrittsbarrieren für den Markt des Öffentlichen Verkehrs abgeschafft. Es folgte ein regelrechter Boom, der bis zum offiziellen Ende der Apartheid 1994 anhielt. Es war vor allem die genannte hohe Verfügbarkeit, die das Minibustaxi zum meistgenutzten öffentlichen Verkehrsmittel des Landes werden ließ. Die weitgehend fehlende Regulierung und die relativ niedrigen Betriebskosten machten es möglich, schnell auf Nachfrageänderungen zu reagieren und auch weniger dicht besiedelte Gebiete bedienen zu können (Venter, 2013, S. 115).

Die niedrigen Zutrittsbarrieren sorgten jedoch auch für einige negative Effekte, die vor allem in einem Überangebot und daraus resultierenden Rivalitäten um Routen und Gebiete bestanden. Die von den Behörden ausgegebenen Lizenzen für bestimmte Gebiete wurden zum einen inflationär ausgegeben. Zum anderen betrieben viele Fahrer ihr Gewerbe ohne Lizenz. Um dem entgegenzuwirken, schlossen sich Fahrer in sog. *Taxi Associations* zusammen. Ziel war es, Fahrer mit offiziellen Lizenzen in einem Gebiet zu vereinen und ihre Rechte gemeinsam durchzusetzen. Jedoch führte dies vielerorts zu neuen Problemen. *Taxi Associations* begannen, eigene Lizenzen auszugeben, sowie Routen, Taxi Ranks und ganze Gebiete für sich zu beanspruchen. Da dies juristisch nicht immer haltbar war, begannen sie, ihre vermeintlichen Ansprüche selbst durchzusetzen. Nicht selten führte dies zu Ausschreitungen, gewalttätigen Auseinandersetzungen und sogar Mordanschlägen. Zwischen 1987 und 1994 waren die sog. *Taxi Wars* in Südafrika auf dem Höhepunkt (Boudreaux, 2006, S. 19ff.).

Es folgten verschiedenste Versuche, die Branche zu reformieren und zu formalisieren. Eine Schilderung der Bestrebungen findet sich in Abschnitt 3.2.4. Bis heute ist der MBTV teils von Überangebot und Gewalt geprägt. Die Folgen der mangelnden Deregulierung in den Anfängen des Systems sind noch heute zu spüren. Die folgenden Abschnitte sollen ein Bild des MBTVs der jüngeren Vergangenheit und der Gegenwart zeichnen.

## 2.2 CHARAKTERISTIK

In diesem Abschnitt soll die Minibustaxibranche charakterisiert werden. Dabei werden vor allem Unterschiede zum konventionellen ÖV deutlich. Linienwege von Minibustaxis sind in der Regel nicht öffentlich deklariert, weder an Fahrzeugen und Haltestellen selbst, noch in Form von digitalen oder papiernen Plänen. Auch wenn Behörden in einigen Städten die Minibustaxi-Routen bekannt sind, sind Bestrebungen, diese zu dokumentieren und Liniennetze oder Fahrpläne zu erstellen, bisher nur bei Privatunternehmen erkennbar, die nicht Teil der Minibustaxibranche sind. So hat etwa das Unternehmen

WhereIsMyTransport Ltd. über mehrere Wochen die Fahrtrassen von Minibustaxis in Kapstadt aufgezeichnet und so ein Liniennetz mit den Haupttrassen erstellt (WhereIsMyTransport, 2017). Ein weiteres Beispiel ist die Firma GoMetro Ltd., die Minibustaxifahrten in verschiedenen Städten aufgezeichnet. Ziel solcher Unternehmen ist es unter anderem, den MBTV in eigene digitale Fahrplanauskünfte zu integrieren und Behörden bessere Planungsgrundlagen durch bisher fehlende Daten über den MBTV liefern zu können. Die Bestrebungen sind also gerade in großen Städten deutlich erkennbar, wenn auch nicht durch die Minibustaxibranche selbst. Diese ist weitestgehend nicht digitalisiert und offenbar wenig interessiert an umfangreichen Fahrgastinformationen. Hinzu kommt, dass sich mit der Zeit zwar feste Routen etabliert haben, der MBTV allerdings vielerorts ein sehr flexibles, nachfragegetriebenes System ist. Fahrer reagieren teilweise binnen Minuten auf Nachfrageänderungen und bedienen die Routen, auf denen der größte Profit zu erwarten ist (Browning, 2006, S. 12).

Fahrgästen wird daher Wissen und Erfahrung im MBTV in ihrer Region abverlangt (Neumann et al., 2015, S. 140). Woolf und Joubert (2013, S. 292) beschreiben sogar eine eigene Art der Kommunikation zwischen Fahrgästen und Fahrern. Es handelt sich dabei um eine Ansammlung verschiedener Handzeichen, die zwischen Regionen und sogar Stadtteilen variieren können. Dazu kommen verschiedene Hupsignale. Etabliert werden diese inoffiziellen Zeichen über Mundpropaganda. Die so geäußerten Fahrtziele können zum einen fest sein, wie etwa Einkaufszentren oder Bahnhöfe. Zum anderen können sich für Veranstaltungen auch kurzfristig Zeichen entwickeln. Beispiel für ein weit verbreitetes Handzeichen ist der erhobene Zeigefinger, der in fast allen größeren Städten Südafrikas für das Fahrtziel der Innenstadt steht. Von einem Fahrgast etwa am Straßenrand geäußert, hält der Fahrer an, sofern er das gewünschte Ziel anfährt und sein Fahrzeug nicht voll besetzt ist.

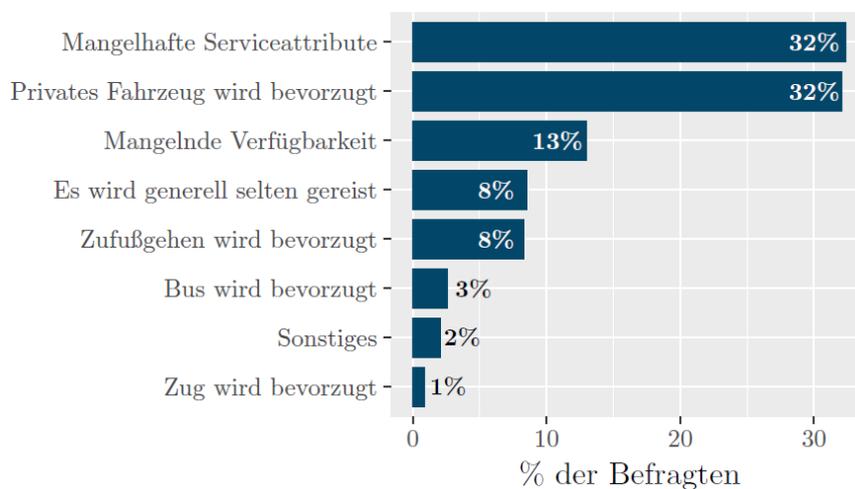
Die Anbieter im Markt lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Einzelne Fahrer mit eigenem Minibus und Unternehmer mit mehreren Fahrzeugen und beschäftigten Fahrern. Unternehmer beginnen oft auch als einfache Angestellte, kaufen nach einiger Zeit ein eigenes Fahrzeug und beginnen in einer nächsten Stufe weitere Fahrzeuge zu kaufen und Fahrer zu engagieren (McCormick et al., 2016, S. 59ff.). Der Eintritt in den Markt gestaltet sich sehr einfach. Es werden lediglich ein Fahrzeug und eine Lizenz benötigt. Einzelne Fahrer mit eigenen Fahrzeugen sehen sich selten als Unternehmer mit entsprechendem Risiko. Vielmehr ist es für sie ein leichter Weg, ihren Lebensunterhalt bestreiten zu können. Dies ist auch oft das einzige Ziel der Unternehmung. Entsprechend unprofessionell wird agiert. Verkehrsbetriebliche Aufgaben wie Buchhaltung, regelmäßige Wartungen oder das geplante Ersetzen von Fahrzeugen finden nur selten statt. In entsprechendem Zustand befinden sich viele der im Einsatz befindlichen Fahrzeuge (Browning, 2006, S. 12ff.).

### 2.3 UNZULÄNGLICHKEITEN

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, gibt es aus Kundensicht einige zu bemängeln - de Eigenschaften des MBTVs, die dafür sorgen, dass das Minibustaxi nicht oder bei

mangelnder Alternative nur ungern genutzt wird. Die NHTS 2013 beinhaltet für diese Thematik einen eigenen Abschnitt (Statistics South Africa, 2014, S. 100ff.). Es wird sich zunächst den Gründen dafür gewidmet, das Minibustaxi nicht zu nutzen, bevor auf die Vielzahl an Servicemängeln im Detail eingegangen wird.

Abbildung 1 zeigt die von den Befragten angegebenen Gründe, das Minibustaxi nicht zu nutzen. Es handelt sich dabei um die Landesdurchschnitte. In einigen Punkten zeigen sich teils deutliche Unterschiede in den Werten der einzelnen Provinzen. Daher wird im Text, sofern sinnvoll, auf die Provinzen Western Cape und Northwest eingegangen, in denen die Städte Kapstadt und Rustenburg liegen, sofern relevante Abweichungen bestehen. Diese stellen die Untersuchungsgebiete in Kapitel 4 dar.

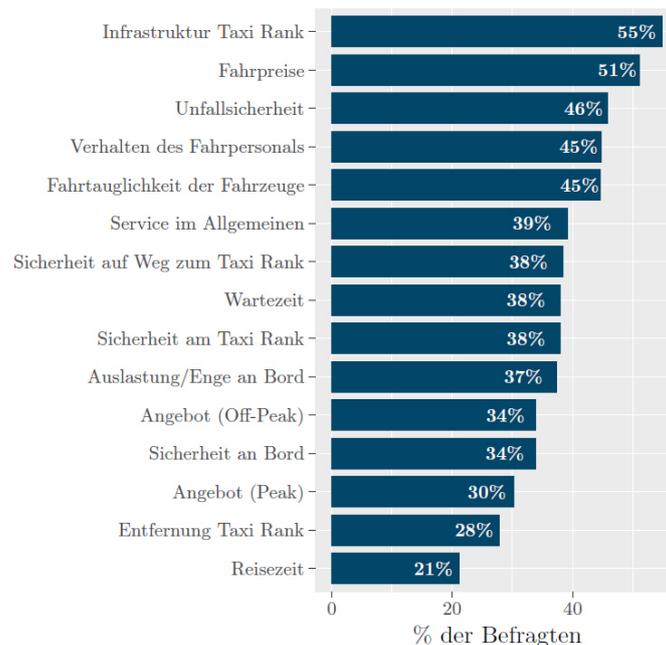


**Abbildung 1: Gründe, das Minibustaxi nicht zu nutzen.** Die Befragten konnten einen der links aufgeführten Gründe nennen, der sie hauptsächlich daran hindert, das Minibustaxi zu nutzen. Ein Balken gibt den Anteil der Befragten an, die dies für den jeweiligen Grund getan haben. (Quelle: eigene Darstellung nach Statistics South Africa (2014, S. 100)).

Ein Hauptgrund, das Minibustaxi nicht zu nutzen, sind mit 32 % verschiedene Unzulänglichkeiten im System Minibustaxi selbst, auf die später in diesem Abschnitt detailliert eingegangen wird. Außerdem zeigt sich, dass private Fahrzeuge mit 32 % eine große Konkurrenz für den MBTV zu sein scheinen. Eingeschlossen ist hier nicht nur der eigene private PKW, sondern auch gebildete Fahrgemeinschaften. Da schlicht kein Angebot vorhanden ist, nutzen 13 % der Südafrikaner den MBTV nicht. Diese Zahl zeigt, dass der MBTV landesweit weit verbreitet und hoch verfügbar zu sein scheint – jedenfalls dort, wo potenzielle Nachfrage vorhanden ist. In der überwiegend urbanen Provinz Western Cape ist dieser Wert mit 7,7 % noch kleiner. In Northwest, einer Provinz mit deutlich geringerer Bevölkerungsdichte, liegt der Wert beim Landesdurchschnitt.

Die Statistik beinhaltet ein Armutszeugnis für den konventionellen ÖV: Eine verschwindend geringe Zahl an Befragten gibt an, dass sie den Zug oder den Bus bevorzugen. Dies kann zum einen Symbol für mangelnde Verfügbarkeit sein, aber auch für Unzulänglichkeiten des Gesamtsystems des konventionellen ÖVs, wie etwa zu hohe Fahrpreise. Wie in der vorangegangenen allgemeinen Analyse der NHTS 2013 zeigt sich auch in dieser Grafik, dass viele Südafrikaner schlicht kaum reisen (8 %). Dieser Wert ist deutlich höher im ländlich geprägten Northwest (16 %) und etwas niedriger in Western Cape (6 %). 8 % der Befragten ziehen das Zufußgehen dem Minibustaxi vor.

Abbildung 2 zeigt verschiedene Serviceattribute des MBTVs, über die Nutzer ihr Missfallen geäußert haben. Zu erwähnen ist, dass es sich um Durchschnittswerte für ganz Südafrika handelt und teils deutliche regionale Unterschiede herrschen. Vor allem bestehen Unterschiede zwischen städtischem und ländlichem Raum.



**Abbildung 2: Unzulänglichkeiten im Minibustaxiverkehr.** Die Befragten konnten mehrere der links aufgeführten Serviceattribute nennen, bei denen sie Unzulänglichkeiten im System Minibustaxiverkehr sehen. Ein Balken gibt den Anteil der Befragten an, die dies für das jeweilige Attribut getan haben. (Quelle: eigene Darstellung nach Statistics South Africa (2014, S. 101)).

Auch im Jahr 2013 macht sich die mangelnde Professionalität im MBTV deutlich bemerkbar. Die Taxi Ranks, große Sammelhaltestellen an zentralen Orten, sind oft gar nicht oder nur schlecht betreut. Entsprechend bemängeln 55 % der Nutzer fehlende oder

schlechte Infrastruktur wie sanitäre Anlagen oder Ansprechpartner. Obwohl Taxi Ranks öffentliche Orte mit viel Fluktuation sind, wird von 38 % der Befragten auch mangelnde Sicherheit genannt. Eher der allgemeinen Sicherheitslage der jeweiligen Stadt zuzuordnen ist der Kritikpunkt mangelnder Sicherheit auf dem Weg zum Taxi Rank (38 %). Dieser Weg wird von vielen jedoch auch als zu lang beschrieben (28 %), was wiederum einen Mangel des Systems Minibustaxi darstellt. Fehlende Sicherheit wird von den befragten Nutzern auch auf der Fahrt selbst beschrieben. 46 % der Befragten haben Angst vor Unfällen. Dass diese Angst nicht unbegründet ist, zeigen Zahlen, nach denen Minibustaxis etwa zweimal so häufig in Verkehrsunfälle verwickelt sind wie andere Personenfahrzeuge. Zudem sind Verkehrsunfälle in Südafrika, mit jährlich ca. 10.000 Verkehrstoten auf ca. 56 Mio. Einwohner, besonders häufig tödlich (Govender & Allopi, 2006, S. 1). Trotz der Bemühungen im Rahmen des TRPs scheinen die Zustände der Fahrzeuge häufig schlecht zu sein, sodass 45 % der befragten Nutzer immer wieder an der Verkehrssicherheit zweifeln. Nicht zuletzt empfinden viele auch das Verhalten des Fahrpersonals als unangemessen (45 %), sei es die Fahrweise oder das Verhalten gegenüber Fahrgästen. Unfreundlichkeit scheint dabei das geringere Übel: Überfälle und sexuelle Belästigungen bis hin zu Vergewaltigungen sind ein ernstes Problem der Branche in einigen Regionen (Chakamba, 2017). Somit verwundert nicht, dass sich 34 % der Befragten an Bord eines Minibustaxis allgemein unsicher fühlen.

Nachfolgend wird sich von den Sicherheitsaspekten entfernt und ein Blick auf Preis, Qualität und Komfort des Angebotes geworfen. Wenngleich das Minibustaxi als das günstigste Öffentliche Verkehrsmittel in Südafrika gilt, bemängeln 51 % der Nutzer die Höhe der Fahrpreise. 38 % der Befragten sind unzufrieden mit den Wartezeiten. Dies kann mit der weit verbreiteten Praxis zusammenhängen, erst dann die Fahrt am Ausgangsort anzutreten, wenn das Fahrzeug voll besetzt ist (Neumann et al., 2015, S. 145). Ein Zeichen dafür, dass Fahrer den Umsatz pro Fahrt der Kundenzufriedenheit vorziehen. Aufgrund einer Art Monopolstellung in der ärmeren Bevölkerungsschicht können sie sich dies erlauben. Wenig überraschend ist daraufhin, dass 37 % der Befragten über Unannehmlichkeiten aufgrund von hoher Auslastung und damit Enge im Fahrzeug klagen. Die Frequenz, in der Fahrzeuge verkehren, halten 30 % in der Peak-Zeit und 34 % in der Off-Peak-Zeit für zu gering. Erklärung dürfte hier allerdings weniger ein mangelndes Angebot sein. Die MBTV-Branche besitzt niedrige Markteintrittsbarrieren, die eine rasche Bedienung einer eventuellen Übernachfrage ermöglichen. Vielmehr kann auf das erwähnte Profitstreben als Erklärung verwiesen werden, das hohe Auslastungen erfordert, denen hohe Frequenzen unter Umständen entgegenstehen. Nur 21 % der Befragten bemängeln die Reisezeit mit dem Minibustaxi. Grund kann das dichte, vielerorts nur mäßig regulierte Netz sein, das viele Direktfahrten bietet und auf Nachfrageänderungen flexibel und schnell reagieren kann. 39 % der Befragten sind unzufrieden mit dem Angebot im Allgemeinen, ohne nähere Spezifikation. Durch Kapstadt als urbaner Raum geprägte Provinz verwundert es nicht, dass in Western Cape der Anteil der Befragten, die über Unannehmlichkeiten wegen hoher Auslastung und Enge in den Fahrzeugen klagen, um 12,6 Prozentpunkte höher (50,3 %) liegt. Gleichzeitig liegt die Zahl der Klagen über hohe Wartezeiten bei 13 Prozentpunkten weniger (24,9 %). Für urbane Räume ebenso wenig verwunderlich ist der

mit 16,2 % landesweit kleinste Wert für Beschwerden über die Entfernung zu m nächsten Taxi Rank. Es zeigen sich ähnliche Effekte wie beim konventionellen ÖV: Dicht besiedelte Räume bieten durch hohe Nachfrage und damit realisierbaren hohen Auslastungsgraden einen wirtschaftlich vertretbaren Rahmen für hohe Takt- und Netzdichten. In der Northwest Provinz sind keine so deutlichen Abweichungen vom Landesdurchschnitt erkennbar bzw. sind die einzelnen Werte immer noch so hoch, dass von keiner deutlich besseren Lage in einzelnen Punkten gesprochen werden kann.

#### 2.4 BESTREBUNGEN DER FORMALISIERUNG

Vor allem die mangelhafte Verkehrssicherheit, niedrige Qualitätsstandards, schlechte Arbeitsbedingungen und gewaltsame Auseinandersetzungen veranlassten die Behörden immer wieder zu versuchen, den MBTV zu formalisieren. In diesem Abschnitt werden die bedeutsamsten Maßnahmen nach Ende der Apartheid beschrieben und diskutiert.

Etwa ein halbes Jahr nach den ersten demokratischen Wahlen im Jahr 1994 wurde das *National Taxi Task Team* gegründet. Vertreter der Minibustaxibranche, der Regierung und der Arbeitnehmerschaft sollten zusammen mit Experten Probleme im MBTV aufdecken und Maßnahmenpakete entwickeln. Der Abschlussbericht beinhaltet ein vernichtendes Urteil über die bisherige Selbstregulierung der Branche. Bemängelt werden ein Überangebot an Lizenzen, eine sehr kleinteilige Verwaltung ohne übergeordnete Institution, sowie eine insgesamt zu beobachtende mangelnde operative Professionalität. Besondere Kritik wird an schlechten Arbeitsbedingungen geäußert, mit denen gegen geltende Gesetze verstoßen wird. All diese Punkte werden als maßgeblich für die in dieser Arbeit mehrfach erwähnten negativen Aspekte der Charakteristik des MBTVs gesehen. Die Handlungsempfehlungen des Komitees fallen entsprechend aus. Es wird eine strengere Regulierung der Branche gefordert, die die Lizenzvergabe, die Besteuerung von Einnahmen und die Kontrolle von Arbeitsbedingungen und Sicherheitsstandards vorsieht. Weiterhin wird die Einrichtung eines übergeordneten Taxiverbandes empfohlen. Um die Branche bei der Umstrukturierung zu unterstützen, werden außerdem staatliche Subventionen gefordert (Barrett, 2003, S. 14f.). Diese Handlungsempfehlungen wurden an das *Department of Transport* übermittelt und anschließend vom Kabinett als Teil zukünftiger Verkehrs- und Wirtschaftspolitik anerkannt. Eine direkte Folge war etwa die Einrichtung einer Taxibehörde in jeder der neun südafrikanischen Provinzen (Khosa, 1998, S. 28).

Das bisher größte Vorhaben stellt das *Taxi Recapitalisation Programme* (TRP), beginnend im Jahr 2005, dar. Initiiert vom *Department of Transport*, zielt es zum einen auf eine modernere und sicherere Fahrzeugflotte ab. Zum anderen wird der Anreiz für Fahrer geschaffen, sich offiziell registrieren zu lassen und damit die gesundheitliche Eignung nachzuweisen und Steuern zu zahlen. Nur so ist es Fahrern möglich, eine

Subventionszahlung zu erhalten. Ihnen wird ein Betrag von R 50.000<sup>2</sup> dafür geboten, entweder die Branche zu verlassen – eine Maßnahme gegen ein herrschendes Überangebot – oder ihr aktuelles Fahrzeug verschrotten zu lassen und ein Neufahrzeug anzuschaffen. Dieses Neufahrzeug muss Kriterien in Bezug auf die Fahrsicherheit, den Komfort und das äußere Erscheinungsbild erfüllen. Gestartet wurde das Programm mit einem Budget von R 7,7 Mrd. (Arrive Alive, 2011).

Bis Juni 2015 wurde das Programm rund 61.000 Mal in Anspruch genommen, wobei etwa R 3,4 Mrd. ausgezahlt wurden (Department of GCIS, 2016, S. 451). Dies wird als Misserfolg gewertet, da das Ziel anfänglich bei 136.000 Fahrzeugen lag. Kritik an dem Programm gibt es vor allem von den Verbänden. Die *National Taxi Alliance* etwa führt an, dass Fahrzeuge, die den Kriterien des Programmes entsprechen, für den einfachen Fahrer zu teuer sind und entsprechende Kredite etwa den zweifachen Betrag der Subvention als Eigenkapital verlangen (Molefi, 2013).

### 3 Datenanalyse

In diesem Kapitel werden die vorliegenden Datensätze von Minibustaxifahrten in den südafrikanischen Städten Rustenburg und Kapstadt analysiert. Zunächst erfolgt eine Beschreibung des Datensatzes und der Untersuchungsregionen. In einer umfangreichen Analyse werden verschiedene Merkmale im Detail betrachtet, um das System MBTV besser zu verstehen und die im vorangegangenen Kapitel vorgenommene Charakterisierung anhand der Daten zu überprüfen. Eine darauffolgende Wirtschaftlichkeitsanalyse stellt eine eigene Kostenschätzung den Fahrteinnahmen aus dem Datensatz in verschiedenen Szenarien gegenüber. Das Kapitel schließt mit der Simulation eines Nachfragerückganges im MBTV in Rustenburg durch die dortige Einführung eines BRT-Systems.

#### 3.1 BESCHREIBUNG DES DATENSATZES

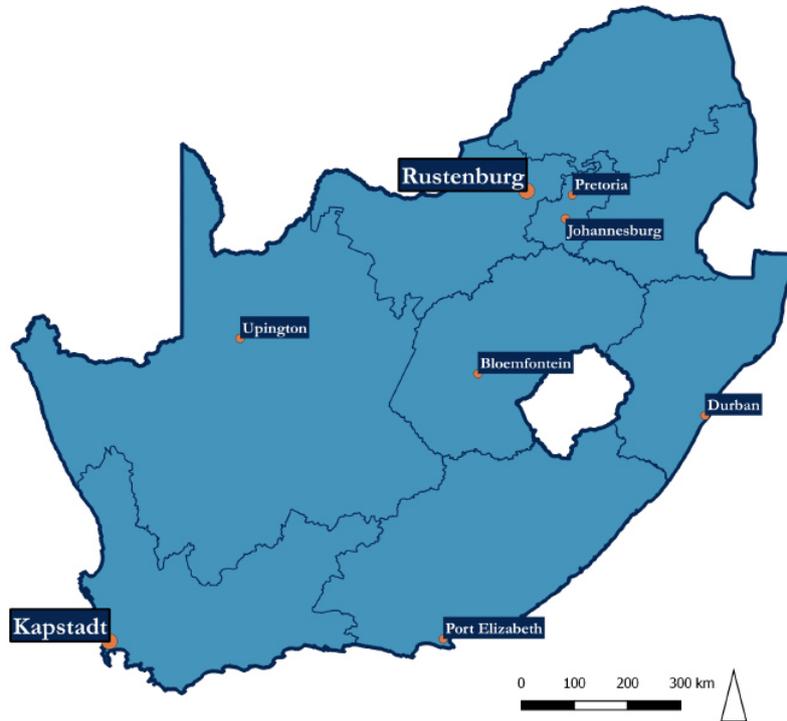
Es liegt ein umfangreicher Datensatz einzelner aufgezeichneter Minibustaxifahrten in den südafrikanischen Städten Rustenburg und Kapstadt vor. Abbildung 3 zeigt die Lage der Untersuchungsgebiete in Südafrika. Rustenburg ist ca. 100 km westlich der Gauteng-Region um Pretoria und Johannesburg gelegen. Die Stadt zählte im Jahr 2011 knapp 105.000 Einwohner auf rund 280 km<sup>2</sup>, die gesamte Region, der Verwaltungsbezirk Rustenburg, knapp 550.000 Einwohner auf rund 3.400 km<sup>2</sup>. Rustenburg gegenüber steht in dieser Arbeit die zweitgrößte Stadt Südafrikas. Kapstadt hat rund 3.740.000 Einwohner auf ca. 1.530 km<sup>2</sup> Fläche. Es handelt sich hierbei bereits um den Verwaltungsbezirk, dessen Betrachtung losgelöst von der Kernstadt nicht sinnvoll ist. Die Übergänge sind fließend und

---

<sup>2</sup> Zur Relation: Laut der National Taxi Alliance kostet ein entsprechendes Neufahrzeug zwischen 350.000 und 500.000 R. Die Subventionszahlung wurde sukzessive auf bis zuletzt R 67.000 erhöht (Molefi, 2013).

Kapstadt kann weit über die westlich gelegene Kernstadt hinaus als urbaner Raum bezeichnet werden (Statistics South Africa, 2012).

Für Rustenburg liegen 7.764 Beobachtungen in Form von einzelnen Minibustaxifahrten vor. Darüber hinaus beinhaltet der Datensatz für einige Fahrten Angaben zu jedem einzelnen Passagier – in Rustenburg 4.280 an der Zahl. Stattgefunden hat die Erhebung in Rustenburg an 49 verschiedenen Tagen zwischen November 2016 und September 2017. In Kapstadt umfasst der Datensatz 4.012 aufgezeichnete Fahrten. Der Umfang der individuellen Passagierdaten ist hier mit 60.383 Beobachtungen allerdings wesentlich größer. Aufgezeichnet wurden die Daten in Kapstadt an 27 verschiedenen Tagen im April und Mai 2017. Quelle der Daten ist die GoMetro Ltd. aus Kapstadt. Die Erhebung fand mittels eigens engagierter Personen an Bord statt, die verschiedenste Daten zu einer Fahrt und den Passagieren über ein Smartphone gesammelt haben. Sozioökonomische Daten zu einzelnen Passagieren sind dabei nur mangelhaft erhoben worden, weshalb diese nicht näher betrachtet werden. In Rustenburg wurden einzelne Fahrzeuge über einen ganzen Tag hinweg begleitet. In Kapstadt fand die Erhebung pro Route statt, wobei Fahrzeuge durch die erhebenden Personen gewechselt wurden.



**Abbildung 3: Lage der Untersuchungsgebiete in Südafrika.** Die Grenzen Südafrikas und der Provinzen. Die hervorgehobenen Städte Rustenburg und Kapstadt stellen die Untersuchungsgebiete dar, weitere Städte dienen zur Orientierung. (Quelle: eigene Darstellung, Kartenmaterial: OpenStreetMap).

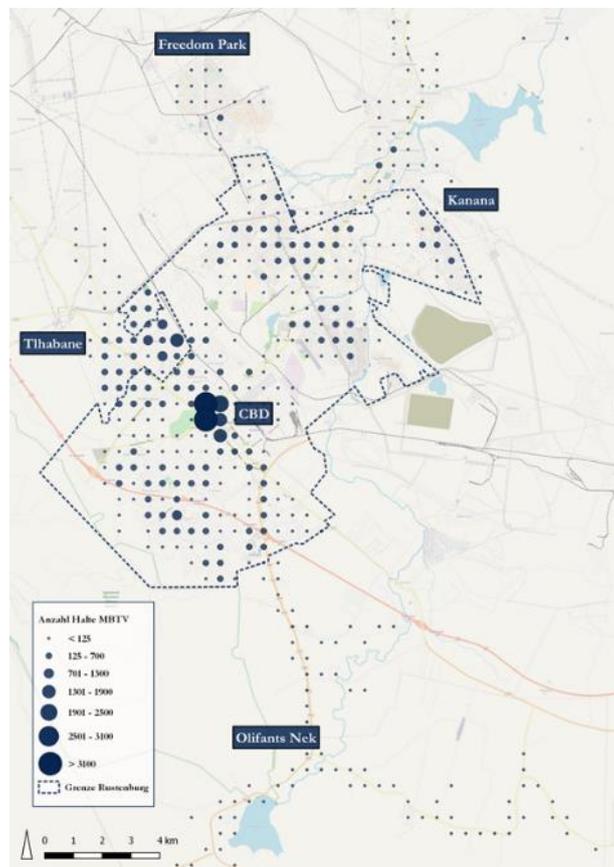
## 3.2 ALLGEMEINE ANALYSEN

In diesem Abschnitt erfolgt eine ausführliche Analyse des Datensatzes, jeweils getrennt nach den beiden Untersuchungsgebieten Rustenburg und Kapstadt. Nach einer Visualisierung der Daten in Kartenform erfolgt eine in die Bereiche *Passagieraufkommen und Auslastung*; *Einnahmen*; *Passagierbezogene Daten* sowie *Routengestaltung und Fahrtverlauf* gegliederte Diskussion einzelner Merkmale.

### 3.2.1 Visualisierung des Datensatzes

Abbildung 4 zeigt die zusammengefassten Halte der aufgezeichneten Minibustaxifahrten in Rustenburg. Dahinter liegen also viele individuelle Positionen. Die Größe eines Punktes ist das Maß für die Zahl an Halten in der Umgebung. Die Umgebung ist abgegrenzt durch das

Runden der Koordinaten auf drei Nachkommastellen. Absolut sind die Zahlen nicht zu interpretieren, da diese vor allem vom Stichprobenumfang abhängen.

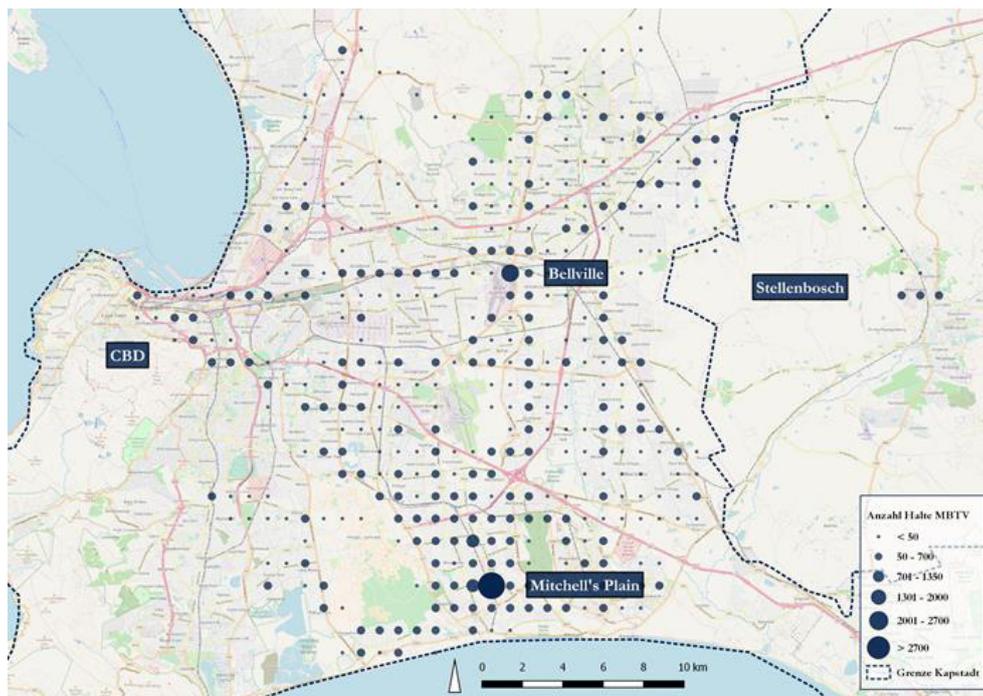


**Abbildung 4: Zusammengefasste Halte von Minibustaxifahrten in Rustenburg.** Jeder Punkt steht für alle Halte in der näheren Umgebung, hier durch Rundung der Koordinaten auf drei Nachkommastellen. Je größer ein Punkt, desto mehr Halte werden durch ihn repräsentiert. (Quelle: eig. Darstellung, Datengrundlage: GoMetro (2017), Kartenmaterial: OpenStreetMap).

Es fällt eine starke Häufung von Halten im CBD Rustenburgs auf. Das MBTV-System in Rustenburg scheint auf das CBD ausgerichtet zu sein. Dort befindet sich das größte Taxi Rank der Stadt. Es zeigt sich ein Phänomen wie in vielen Städten der Größe Rustenburgs: Die Mehrheit der Aktivitäten finden im CBD statt, worauf das öffentliche Verkehrsnetz sternförmig ausgerichtet ist. Oft dient das CBD als Umstiegsort, um zu anderen Punkten in der Stadt zu gelangen. Ein Großteil der Zu- und Ausstiege im Datensatz finden innerhalb der Stadtgrenzen Rustenburgs statt, mit der Entfernung vom CBD nimmt auch die

Häufigkeit ab. Der nordwestlich gelegene Stadtteil *Thabane* liegt zwar nicht innerhalb der offiziellen Grenzen, ist aber de facto Teil der Stadt. Jedoch finden sich im Datensatz auch einige Fahrten in umliegende Bereiche, so etwa in die Siedlungen *Freedom Park*, *Kanana* und *Olifants Nek*.

Abbildung 5 stellt die auf dieselbe Weise wie in Abbildung 4 zusammengefassten Halte von Minibustaxis in Kapstadt dar.



**Abbildung 5: Zusammengefasste Halte von Minibustaxifahrten in Kapstadt.** Jeder Punkt steht für alle Halte in der näheren Umgebung, hier durch Rundung der Koordinaten auf drei Nachkommastellen. Je größer ein Punkt, desto mehr Halte werden durch ihn repräsentiert. (Quelle: eigene Darstellung. Datengrundlage: GoMetro (2017), Kartenmaterial: OpenStreetMap).

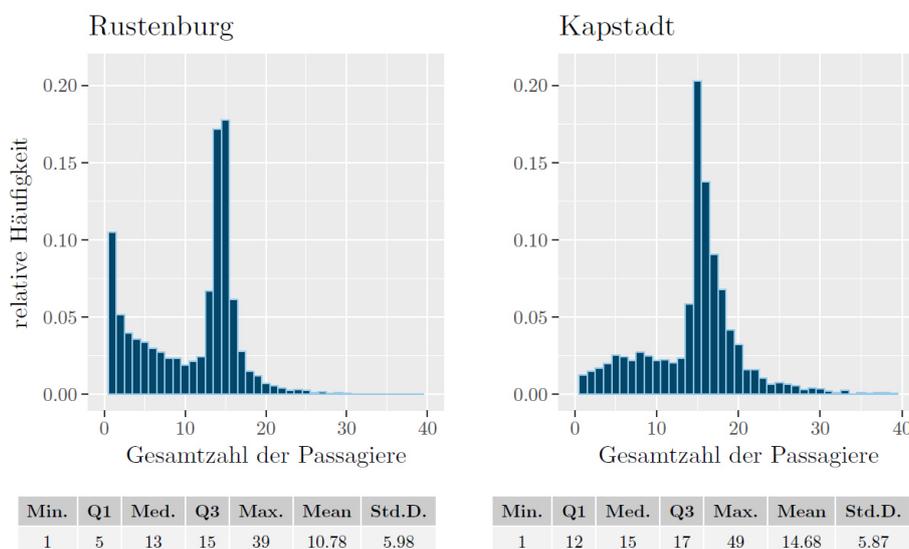
Starke Häufungen finden sich in den Stadtteilen *Mitchell's Plain* und *Bellville* im Osten der Stadt. Dies liegt zum einen daran, dass sich dort stark frequentierte Bahnhöfe und Taxi Ranks befinden. Diese dienen als Umsteigepunkte zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln, aber auch innerhalb des Systems MBTV. Zum anderen liegt der Raum der Erhebung um die genannten Bahnhöfe herum. In Kapstadt liegt die Flächendeckung des Datensatzes bei nur rund 30 %, mit Fokus auf dem Westen der Stadt. Das ist der Grund für vergleichsweise wenige Halte um den westlich gelegenen CBD Kapstadts und nahezu keine Daten im übrigen Westen der Stadt. Überlandfahrten sind nur wenige zu erkennen, ein

Großteil davon in die östlich gelegene Stadt Stellenbosch. An deutlich mehr Punkten als in Rustenburg gibt es größere Punkte mit relativ betrachtet stärkeren Häufungen.

Im Gegensatz zu Rustenburg ist das MBTV-System in Kapstadt polyzentrisch ausgerichtet. Es gibt schlicht mehr Orte wie Einkaufszentren oder Bildungseinrichtungen, die Ziel und Ausgangsort einer Vielzahl von Wegen sind. Hinzu kommen Umsteigemöglichkeiten an mehreren Orten der Stadt. Die Wahrscheinlichkeit für Folgefahrten am Endpunkt einer Route ist in Kapstadt höher als in Rustenburg, wenngleich der Datensatz die Auswertung von Leerkilometern nicht zulässt, weshalb diese These zu beweisen ist. Festgehalten werden kann, dass die unterschiedlichen Strukturen der beiden Regionen zu verschiedenen Nachfragemustern führen.

### 3.2.2 Passagieraufkommen und Auslastung

Abbildung 6 zeigt die Histogramme der Gesamtzahl an Passagieren während einer Fahrt.



**Abbildung 6: Gesamtzahl der Passagiere pro Fahrt.** Histogramme der Gesamtzahl der Passagiere pro Fahrt in Rustenburg und Kapstadt. Die Tabellen geben jeweils dazugehörige statistische Kennzahlen an. (Quelle: eig. Darstellung. Datengrundlage: GoMetro (2017)).

Zu beachten ist, dass Fluktuation während der Fahrt möglich ist, die maximalen Fahrzeugkapazitäten in diesen Zahlen also überschritten werden können. In beiden Städten gibt es Häufungen um die Zahl 15 herum. Um diese Zahl bewegt sich auch die Kapazität der meisten im Einsatz befindlichen Minibusse für den innerstädtischen Verkehr. In Kapstadt werden während einer Fahrt durchschnittlich rund vier Personen mehr als in

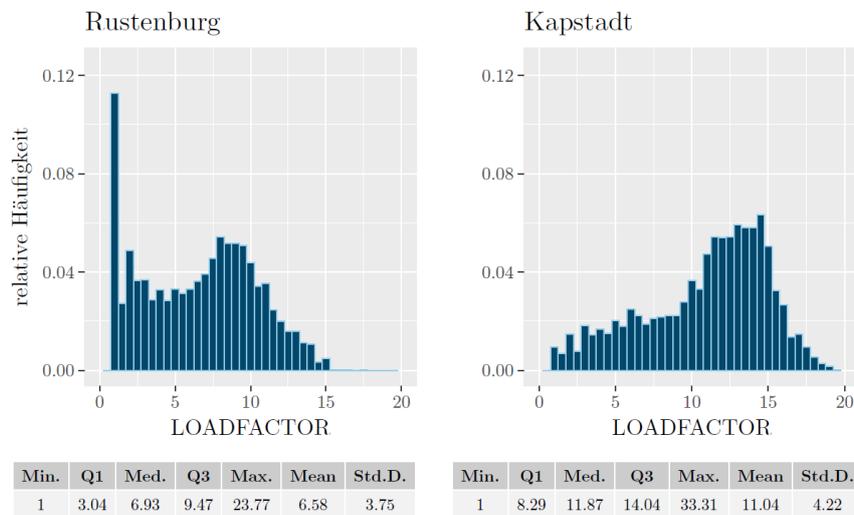
Rustenburg befördert. Sehr deutlich ist der Unterschied bei der oberen Grenze des 1. Quartils. Eine starke Häufung von Fahrten mit nur wenigen oder gar einem Fahrgast in Rustenburg sorgt hier für einen Wert von 5, in Kapstadt liegt dieser bei 12. Auf 25 % der Fahrten in Rustenburg werden somit maximal 5 Personen befördert. Mehr als 10 % der Fahrten werden mit nur einem Fahrgast durchgeführt. In Kapstadt schafft es keine Passagierzahl von weniger als 14 auf einen Anteil von über 3 %. Ein erster Hinweis auf deutliche Unterschiede bei der Auslastung von Fahrzeugen in beiden Städten. Dies kann an einer geringeren Nachfrage in Rustenburg liegen. In Kapstadt gelingt die Auslastung der Fahrzeuge deutlich besser. Allerdings fließen wichtige Komponenten wie Weg und Zeit in Abbildung 6 nicht mit ein. Daher wird im Folgenden der durchschnittliche Auslastungsgrad betrachtet, der wie folgt definiert wird:

$$LOADFACTOR_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} p_{j, j+1} \cdot t_{j, j+1}}{T_i} \quad (1)$$

$p_{j, j+1}$  bezeichnet dabei die Zahl der Passagiere, die an Halt  $j$  zusteigen und an Halt  $j+1$  aussteigen,  $t_{j, j+1}$  die Fahrzeit zwischen den beiden Halten.  $N_i$  bezeichnet die Zahl der Halte auf Fahrt  $i$ ,  $T_i$  die gesamte Dauer der Fahrt  $i$ .  $LOADFACTOR_i$  ist damit der Quotient aus der Summe der On-Board-Zeiten aller Passagiere und der Dauer der gesamten Fahrt.

Abbildung 7 zeigt die Verteilung des  $LOADFACTOR$ s in beiden Städten. Der durchschnittliche Auslastungsgrad eines Fahrzeuges während einer Fahrt ist in Kapstadt deutlich höher. Bereits für die oberen Grenzen des 1. Quartils zeigen sich mit Werten von rund 3 und 8 deutliche Unterschiede. Erneut stechen in Rustenburg Fahrten mit nur einem Fahrgast hervor. Der durchschnittliche Auslastungsgrad liegt in Rustenburg bei rund 6,5 Passagieren, in Kapstadt bei rund 11. In Kapstadt scheint es den Fahrern besser zu gelingen, die Auslastung der Fahrzeuge hochzuhalten. Dies kann an einer höheren Nachfrage, auch an dezentralen Punkten, in Kapstadt liegen. Die Bündelungswahrscheinlichkeit mehrerer Fahrten zu einer Route scheint in Kapstadt deutlich höher.

Zu beachten ist allerdings, dass die Erhebung in Kapstadt nur in einem begrenzten Teil der Stadt stattgefunden hat. Ein Großteil der Fahrten fand zu und von den hochfrequentierten Bahnhöfen *Bellville* und *Mitchell's Plain* statt. Diese dienen gleichzeitig als Umsteigepunkte im MBTV. In Rustenburg fand die Erhebung mit größerer Flächendeckung und damit auch häufiger in weniger dicht besiedelten Gebieten statt. Dies ist bei der Bewertung der Auslastungsgrade zu berücksichtigen.

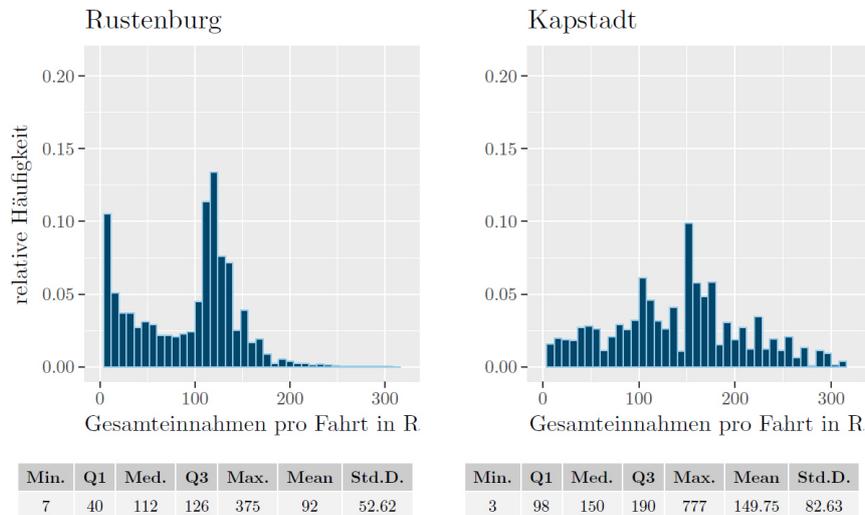


**Abbildung 7: Durchschnittlicher Auslastungsgrad pro Fahrt.** Histogramme des durchschnittlichen Auslastungsgrades während einer Fahrt (*LOADFACTOR*) in Rustenburg und Kapstadt. Die exakte Berechnung des *LOADFACTOR*s findet sich in Formel 1. Die Tabellen geben jeweils dazugehörige statistische Kennzahlen an. (Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: GoMetro (2017)).

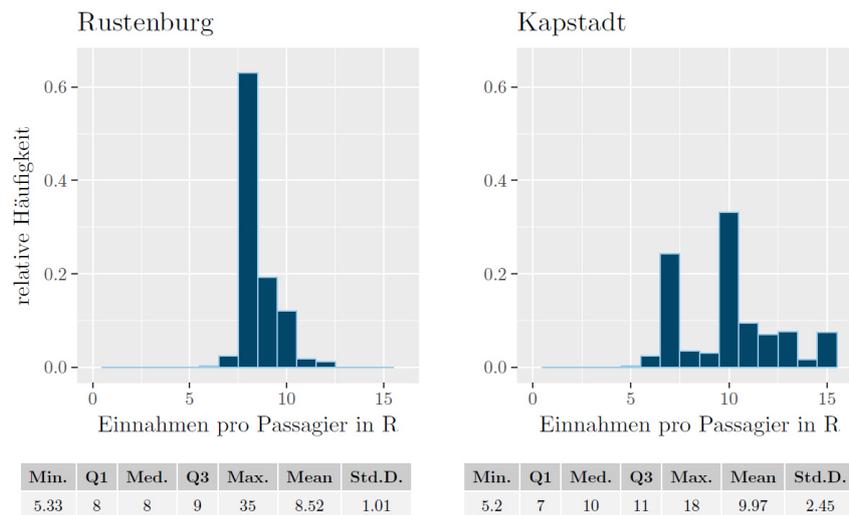
### 3.2.3 Einnahmen

Abbildung 8 zeigt die Histogramme der Gesamteinnahmen während einer Fahrt. Insgesamt sind die Einnahmen pro Fahrt in Kapstadt mit einem Durchschnittswert von rund R 150 im Gegensatz zu R 92 in Rustenburg deutlich höher. Die Streuung ist mit relativen Standardabweichungen von  $52.62/92 = 57\%$  in Rustenburg und  $82.63/149.75 = 55\%$  in Kapstadt ähnlich hoch, wobei zu beachten ist, dass in Rustenburg viele Fahrten mit nur einem Fahrgast durchgeführt werden. Es gibt hier in der Verteilung zwei Höhepunkte, während in Kapstadt die Form des Histogramms der Gesamteinnahmen und die Nähe von Mittelwert und Median eher auf eine Normalverteilung hindeuten.

Im Vergleich zu dem Histogramm des Passagieraufkommens in Rustenburg in Abbildung 6 fällt auf, dass diese nahezu identische Proportionen aufweisen. Daher scheint in Rustenburg ein Pauschalpreis für Minibustaxifahrten zu gelten. Schaut man sich die Daten an, bestätigt sich diese Vermutung. Taxifahrer verschiedener Associations verlangen verschiedene Pauschalpreise, unabhängig von der gefahrenen Distanz. Diese Pauschalpreise liegen bei R 8, R 9 und R 10, wie Abbildung 9 mit den Einnahmen pro Passagier verdeutlicht.



**Abbildung 8: Gesamteinnahmen pro Fahrt.** Histogramme der Gesamteinnahmen pro Fahrt in Rustenburg und Kapstadt. Die Tabellen geben jeweils dazugehörige statistische Kennzahlen an. (Quelle: eigene Darstellung. Datengrundlage: GoMetro (2017)).



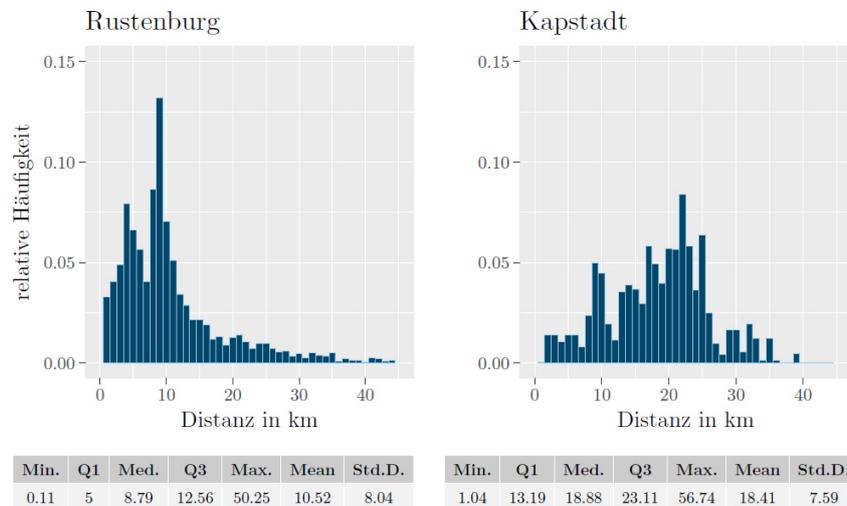
**Abbildung 9: Einnahmen pro Passagier.** Histogramme der Einnahmen pro Passagier in Rustenburg und Kapstadt. Die Tabellen geben jeweils dazugehörige statistische Kennzahlen an. (Quelle: eigene Darstellung. Datengrundlage: GoMetro (2017)).

Nur vereinzelt zeigen die Daten abweichende Einnahmen pro Passagier von R 5, R 7 oder mehr als R 10 an. Ob es sich dabei um Fehler bei der Erhebung oder tatsächlich erhobene Preise handelt, ist nicht bekannt. In Kapstadt lässt sich eine differenziertere Preisgestaltung beobachten. Es zeigen sich schwächere, aber trotzdem auffallende Häufungen. Diese liegen bei Preisen von R 7 und R 10.

#### 3.2.4 Passagierbezogene Daten

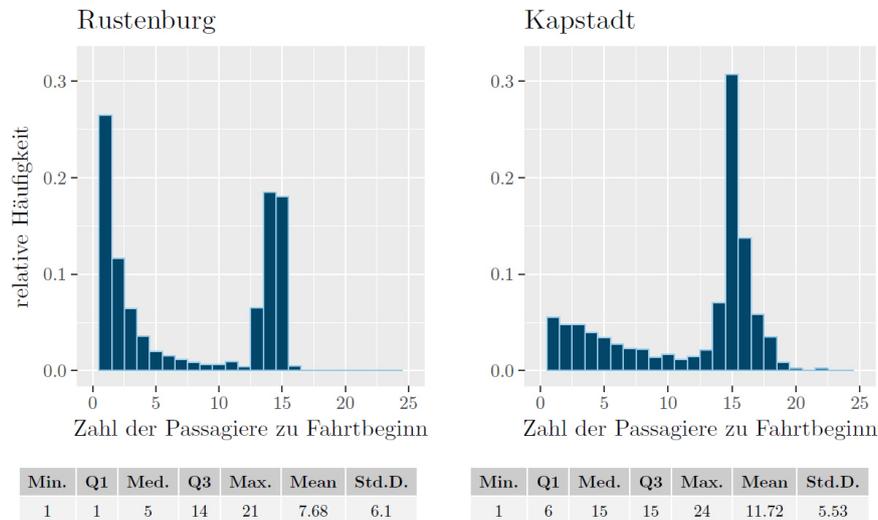
Bevor die Analyse der Daten zu einzelnen Passagieren beginnt, erfolgt eine kritische Betrachtung. In beiden Städten weist der Datensatz immer wieder offensichtliche Schwächen bei der Routenberechnung auf. Es finden sich mehrere tausend Reisezeitwerte, die zusammen mit der ermittelten Fahrtstrecke zu nicht plausiblen Durchschnittsgeschwindigkeiten führen. Eine Studie zu Durchschnittsgeschwindigkeiten im Individualverkehr in europäischen Metropolen kommt zu Werten zwischen 19 und 46 km/h (Forbes, 2017). Wohlwollend gegenüber der verwendeten Methode zur Routenberechnung und unter Berücksichtigung, dass in beiden Städten auch Routen mit einem Anteil an Überlandstrecken und Stadtautobahnen vorhanden sind, werden im Folgenden nur Beobachtungen mit Durchschnittsgeschwindigkeiten eines einzelnen Passagiers von maximal 120 km/h betrachtet. Bei Aufzeichnung der Reisezeit zwischen dem Zeitpunkt der Abfahrt und dem Zeitpunkt der Ankunft, wobei die Halte an einer Stadtautobahn liegen, ist ein solcher Wert denkbar. Die Datensätze für einzelne Passagiere schrumpfen dabei von 4.280 auf rund 3.700 Beobachtungen in Rustenburg und von 60.383 auf rund 44.000 Beobachtungen in Kapstadt. Es liegen zudem einige sehr geringe Werte für Durchschnittsgeschwindigkeiten unter 5 km/h vor. Auch wenn dieser Wert in etwa der Schrittgeschwindigkeit entspricht, werden diese Fahrten als plausibel, z.B. durch Staus oder längere Wartezeiten an Zwischenhalten, angesehen. Daher finden diese im Folgenden ebenfalls Beachtung.

Es wird die von einem einzelnen Passagier zurückgelegte Distanz in Abbildung 10 betrachtet. Es zeigt sich ein zu erwartendes Bild. In Rustenburg, einer mittelgroßen Stadt, folgt auf einen raschen Anstieg der Distanzen zügig ein starker Abfall. Weite Distanzen werden nur selten zurückgelegt. Die vergleichsweise engen Grenzen der Stadt machen dies nicht nötig. Es wird davon ausgegangen, dass die auffällige Häufung bei Strecken von 9 km in Rustenburg dem erwähnten vergleichsweise kleinen Stichprobenumfang für einzelne Passagiere geschuldet ist. In Kapstadt hingegen ist eine Ähnlichkeit zur Normalverteilung zu erkennen. Der Höhepunkt einer fiktiven Glockenkurve liegt bei deutlich höheren Distanzen als in Rustenburg, Median und Mittelwert liegen dicht beieinander. Es ist schlicht die größere Fläche der Stadt, die weitere Wege induziert. Auch besitzt Kapstadt mehrere Zentren, was wiederum zu einer größeren Variation an Relationen und Distanzen führt.



**Abbildung 10: Zurückgelegte Distanzen einzelner Passagiere.** Histogramme der zurückgelegten Distanzen einzelner Passagiere in Rustenburg und Kapstadt. Die Tabellen geben jeweils dazugehörige statistische Kennzahlen an. (Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: GoMetro (2017)).

Eine in Abschnitt 3.2.3 angesprochene Praxis ist es, eine Fahrt überhaupt erst zu starten, wenn ein hoher Auslastungsgrad erreicht ist, auch wenn dies mit langen Wartezeiten verbunden ist. Ein Blick auf die Passagierzahlen zu Beginn einer Fahrt in Abbildung 11 soll dies überprüfen. Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Städten. Während in Kapstadt eine deutliche Häufung um die Kapazitätsgrenze der Minibusse zu beobachten ist, bestehen in Rustenburg zwei Höhepunkte in der Verteilung. Dort wird eine Fahrt bereits bei geringer Auslastung gestartet, am häufigsten sogar mit nur einem Fahrgast. In Kapstadt kann die beschriebene Praxis somit in den Daten wiedergefunden werden, in Rustenburg zeigt sich ein differenzierteres Bild. Grund können auch hier die beschriebenen Unterschiede in der Stadtstruktur sein, die es in Rustenburg durch wenige stark frequentierte Orte selten möglich macht, hohe Auslastungsgrade zu Beginn der Fahrt zu erreichen. Im CBD Rustenburgs, mit dem am stärksten frequentierten Taxi Rank der Stadt, sollte eine bessere Möglichkeit bestehen, Fahrten mit hoher Auslastung zu beginnen. Ein Blick in die Daten bestätigt dies. Die relative Häufigkeit von Fahrten mit nur einem Fahrgast am Startpunkt liegt bei rund 18 %, betrachtet man nur Fahrten mit dem Startpunkt im CBD. Fahrten mit Vollbesetzung zu Beginn bringen es im CBD auf rund 70 %. Bei Fahrten mit Beginn außerhalb des CBDs ist dieses Bild umgekehrt: Mit 1 bis 3 Fahrgästen werden dort 55 % aller Fahrten begonnen, mit voller Auslastung nicht einmal 20 %.



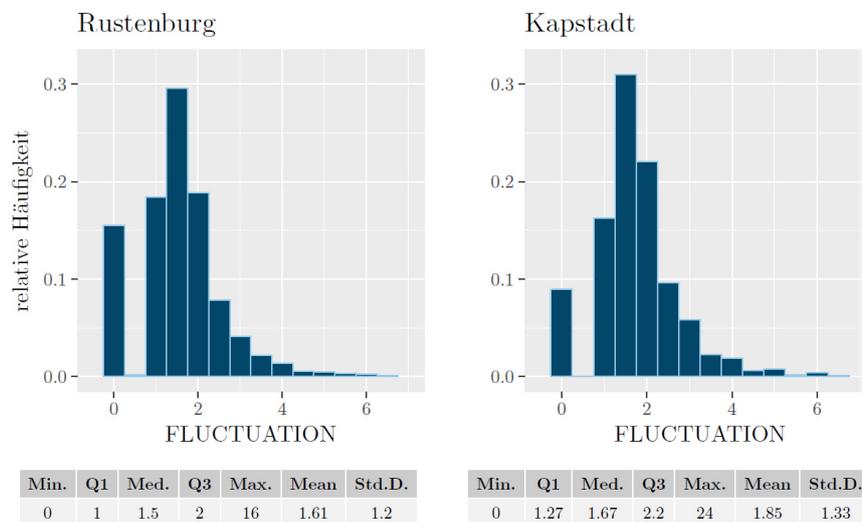
**Abbildung 11: Zahl der Passagiere zu Fahrtbeginn.** Histogramme der Zahl der Passagiere zu Fahrtbeginn in Rustenburg und Kapstadt. Die Tabellen geben jeweils dazugehörige statistische Kennzahlen an. (Quelle: eigene Darstellung. Datengrundlage: GoMetro (2017)).

Eine Charakteristik von Fahrten sind die Aus- und Zustiege entlang der Route, also die Fluktuation von Passagieren. Sie beantwortet u.a. die Frage, ob das System eher auf Direktfahrten zwischen zwei Punkten ausgelegt ist, oder ob es vor allem Aus- und Zustiege entlang der gesamten Route gibt. Bedenkt man die angesprochene Tendenz zu Pauschalpreisen, gibt die Fluktuation außerdem die Effizienz einer Fahrt wieder. Je mehr Fluktuation auf einer Fahrt, desto mehr Fahrgäste zahlen auf dieser den vollen Fahrpreis. Nicht zuletzt gibt die Fluktuation Aufschluss darüber, wie das System MBTV gestaltet ist und wie es genutzt wird. Zu diesem Zweck wird der Faktor *FLUCTUATION* eingeführt, der wie folgt definiert ist:

$$FLUCTUATION_{N_i} = \begin{cases} 0 & \text{für } N_i = 2 \\ \sum_{j=2}^{N_i-1} \frac{b_j + a_j}{N_i - 2} & \text{für } N_i > 2 \end{cases} \quad (2)$$

$N_i$  steht dabei für die Anzahl der Halte während der Fahrt,  $j$  ist die Iterationsvariable der Summe und gibt somit die Nummer des Haltes an.  $b_j$  gibt die Zahl zugestiegener Passagiere an Halt  $j$  an,  $a_j$  die Zahl ausgestiegener Passagiere. Hat eine Fahrt nur zwei Halte, gilt sie als Direktfahrt. *FLUCTUATION* liegt dann bei 0. Für alle anderen Fahrten liegt *FLUCTUATION* beim Quotienten aus der Summe der Zu- und Ausstiege an allen Zwischenhalten und der Zahl der Zwischenhalte. Anders ausgedrückt, gibt sie die Zahl der

im Mittel pro Halt zu- und ausgestiegenen Fahrgäste an. Abbildung 12 zeigt die Histogramme der für die vorliegenden Datensätze berechneten Maßzahl.



**Abbildung 12: Fluktuation während der Fahrt.** Histogramme der Fluktuation in Rustenburg und Kapstadt. *FLUCTUATION* steht dabei für den Durchschnitt der Summe aus zu- und aussteigenden Passagieren pro Halt auf der Strecke (siehe Formel 2). Die Tabellen geben jeweils dazugehörige statistische Kennzahlen an. (Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: GoMetro (2017))

In Rustenburg liegt der Anteil der Direktfahrten bei rund 16 %, in Kapstadt bei rund 9 %. Die angesprochene Konzentration der Aktivitäten in Rustenburg auf das CBD können für diesen Unterschied verantwortlich sein. Der Unterschied beim Anteil der Direktfahrten soll der einzige deutliche Unterschied zwischen beiden Städten in der Fluktuation während der Fahrt bleiben. Die Verteilung nimmt für Werte über 1 eine sehr ähnliche Form an, wenngleich für Rustenburg insgesamt eine geringere Fluktuation zu beobachten ist. So liegt die obere Grenze des 1. Quartils in Rustenburg bei 1, in Kapstadt bei 1,27. Der Median liegt in Rustenburg bei 1,67, in Kapstadt bei 1,85. Das heißt, auf der Hälfte der Fahrten liegt die Summe der Zu- und Ausstiege an einem Zwischenhalt im Durchschnitt bei weniger als 2. Erst im 3. Quartil wird die Grenze von 2 in Kapstadt knapp überschritten. Die Fluktuation von Passagieren an Zwischenhalten ist somit im MBTV der betrachteten Städte gering. Das System basiert vorwiegend auf direkten Fahrten mit keinem oder nur geringem Fahrgastwechsel entlang der Strecke. Dass sich dieses Phänomen in den Datensätzen zweier Städte mit sehr unterschiedlicher Struktur zeigt, ist ein Indiz dafür, dass dies charakteristisch für das System MBTV im Allgemeinen ist.

## 4 Zusammenfassung

Mit der Analyse von Datensätzen zu einzelnen Minibustaxifahrten in den Städten Rustenburg und Kapstadt wird in dieser Arbeit ein umfassendes Bild über den MBTV in Südafrika gezeichnet. Besonders deutlich werden Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsgebieten, der Stadt Rustenburg in einer ländlichen Region sowie dem urbanen Raum von Kapstadt.

Ein Blick auf die Halte in Rustenburg zeigt eine Konzentration der Nachfrage auf das CBD, mit einer gleichmäßigen Streuung in das umliegende Stadtgebiet, welche mit zunehmender Entfernung abnimmt. In Kapstadt hingegen zeigt sich ein polyzentrisches Bild. Mehrere Punkte in der Stadt weisen eine hohe Anzahl von Halten auf, auch zwischen Zentren sind kleinere Häufungen zu erkennen. Dürften Routen in Rustenburg eher sternförmig vom bzw. zum CBD verlaufen, bieten sich in Kapstadt mehr Chancen auf Fahrten zwischen vielen verschiedenen Punkten. Die Wahrscheinlichkeit auf eine Anschlussfahrt steigt.

In Rustenburg gelingt es Fahrern deutlich seltener, hohe Fahrgastzahlen pro Fahrt zu erreichen. Die Praxis nach Neumann et al. (2015), Fahrten erst dann zu beginnen, wenn die Kapazitätsgrenze nahezu erreicht ist, kann für Kapstadt nachgewiesen werden, für Rustenburg jedoch nicht. Oft werden dort Fahrten mit nur einem Passagier durchgeführt. Ein Indiz dafür, dass eine geringere Nachfrage und eine geringere Bündelungswahrscheinlichkeit von mehreren Fahrten zu einer Route in Rustenburg vorliegen. Ein Blick auf den durchschnittlichen Auslastungsgrad pro Fahrt verdeutlicht dies.

Dies hat Auswirkungen auf die Gesamteinnahmen pro Fahrt. Diese sind in Kapstadt um etwa 63% höher als in Rustenburg. Auch die durchschnittlichen Einnahmen pro Passagier liegen in Kapstadt um etwa 17 % höher als in Rustenburg. Relativiert werden diese Unterschiede mit einem Blick auf die zurückgelegten Distanzen einzelner Passagiere. Fahrgäste in Kapstadt legen im Durchschnitt eine um 75% größere Distanz während einer Fahrt zurück. Eine Fahrt in Kapstadt beansprucht mehr Zeit und weitere Ressourcen. Um die Unterschiede in der wirtschaftlichen Situation im MBTV in beiden Regionen abschließend zu klären, muss die Zahl der pro Fahrer bzw. Fahrzeug durchgeführten Fahrten, und damit die Gesamteinnahmen über eine gewisse Periode, miteinander verglichen werden. Der vorliegende Datensatz erlaubt dies lediglich für Rustenburg, womit ein Vergleich nicht möglich ist.

Das TRP, das größte staatliche Subventionsprogramm für den MBTV bislang, hat seine Ziele verfehlt. Diese Arbeit liefert Hinweise darauf, dass ein Grund auch die fehlende Differenzierung zwischen verschiedenartigen Räumen und den dortigen Gegebenheiten im MBTV sein könnte. Weiterhin lässt sich die jeweilige gesamtwirtschaftliche Situation mit dem vorliegenden Datensatz nicht abschließend bewerten. Es lassen sich jedoch Indizien festhalten, welche für eine regionsabhängige Ausdifferenzierung eines Subventionsprogrammes sprechen: unterschiedliche Strukturen in der Region, differenzierte Nachfragemuster, ungleiche Bündelungswahrscheinlichkeit mehrerer Fahrten

zu einer Route, sowie divergierende Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Anschlussfahrten.

Weitere Analysen unterschiedlicher Räume und Bediengebiete sind notwendig. Neben der reinen Betrachtung von Effizienz-Kennzahlen, sollten hierbei ebenso Faktoren wie der Grad der Professionalisierung der Branche vor Ort, sowie die regionale Konzentration von Unternehmen und die Integrationsfähigkeit in den regionalen ÖV betrachtet werden.

## Quellenverzeichnis

- Arrive Alive. (2011). Taxi Recapitalization. Zugriff am 10.08.2017 auf <https://www.arrivealive.co.za/Taxi-Recapitalization>
- Barrett, J. (2003). Organizing in the Informal Economy: A Case Study of the Minibus Taxi Industry in South Africa. SEED Working Paper - Series on Representation and Organization Building (39).
- Behrens, R. & Schalekamp, H. (2010). Engaging paratransit on public transport reform initiatives in South Africa: A critique of policy and an investigation of appropriate engagement approaches. *Research in Transportation Economics*, 29 (1), S. 371-378.
- Boudreaux, K. (2006). Taxing alternatives: Poverty allevation and the South African taxi/minibus industry. *Mercato Policy Series - Policy Comment*, 3.
- Braumann, A., Haferburg, C. & Steinbrink, M. (2010). Fußball-WM 2010 in Südafrika – Platzverweis für die Minitaxis. In C. Haferburg & M. Steinbrink (Hrsg.), *Megaevent und Stadtentwicklung im globalen Süden. Die WM 2010 und ihre Impulse für Südafrika* (S. 166-181). Frankfurt a.M.: Brandes & Apsel.
- Browning, P. (2006). The Paradox of the Minibus-Taxi. Paper presented to the Chartered Institute of Logistics and Transport in South Africa, Pretoria.
- Chakamba, R. (2017). Tackling Rape and Assault in South Africa's Taxi Industry. Zugriff am 26.11.2017 auf <https://www.newsdeeply.com/womenandgirls/articles/2017/04/06/tackling-rape-and-assault-in-south-africas-taxi-industry>. (News Deeply)
- Department of GCIS. (2016). *South Africa Yearbook 2015/16*. Republic of South Africa: Department of Government Communication and Information System (GCIS).
- Forbes. (2017). In Depth: Europe's Most Congested Cities. Zugriff am 25.11.2017 auf <https://www.forbes.com/2008/04/21/europe-commute-congestion-forbeslife-expo0421congestion slide>.
- GoMetro. (2017). *Aufgezeichnete Minibustaxifahrten in den Städten Rustenburg und Kapstadt in den Jahren 2016 und 2017*. (nicht öffentlicher Datensatz der Firma GoMetro Ltd., Kapstadt, Südafrika)
- Govender, R. & Allopi, D. (2006). Towards a safer minibus taxi industry in South Africa. *Proceedings of the 25th Southern African Transport Conference*.
- Kerr, A. (2015). Tax (i) ing the poor? Commuting costs in South Africa. *Southern Africa Labour and Development Research Unit Working Paper* (156).
- Khosa, M. M. (1998). The travail of travelling: urban transport in South Africa, 1930 - 1996. *Transport Reviews*, 18 (1), S. 17-33.

- Lomme, R. (2008). Should South African minibus taxis be scrapped? Formalizing informal urban transport in a developing country. Proceedings of the CODATU XIII Conference. Ho Chi Minh City.
- McCormick, D., Schalekamp, H. & Mfinanga, D. (2016). The nature of paratransit operations. In R. Behrens, D. McCormick & D. Mfinanga (Hrsg.), *Paratransit in African Cities – Operations, Regulation and Reform* (S. 59-78). London: Routledge.
- Molefi, N. (2013). Taxi recapitalization misses target. Zugriff am 10.08.2017 auf <http://www.sabc.co.za/news/a/5c915480405fac53b6bbb7abf44ebaa3/Taxiundefinedrecapitalizationundefinedmissesundefinedtarget-20131607>. (SABC)
- Neumann, A., Röder, D. & Joubert, J. W. (2015). Towards a simulation of minibuses in South Africa. *The Journal of Transport and Land Use*, 8 (1), S. 147-154.
- Statistics South Africa. (2012). *Census 2011 – Census in brief*.
- Statistics South Africa. (2014). *National Household Travel Survey 2013 – Statistical Release*.
- Thomas, D. P. (2016). Public Transportation in South Africa: Challenges and Opportunities. *World Journal of Social Science Research*, 3 (3), S. 352-366.
- Van Der Westhuizen, J. (2007). Glitz, glamour and the Gautrain: Mega-projects as political symbols. *Politikon*, 34 (3), S. 333-351.
- Venter, C. (2013). The lurch towards formalisation: Lessons from the implementation of BRT in Johannesburg, South Africa. *Research in Transportation Economics*, 39 , S. 114-120.
- WhereIsMyTransport. (2017). Integrating the Informal: Collecting Data from Cape Town's Minibus Taxi Network. Zugriff am 01.10.2017 auf <https://www.whereismytransport.com/case-study/integrating-the-informal-mapping-cape-towns-minibus-taxi-network/>.
- Woolf, S. & Joubert, J. (2013). A people-centred view on paratransit in South Africa. *Cities* (35), S. 284-293.
- Wosiyana, M. (2013). An investigation of the impact of the taxi recapitalization project - A case study of Durban and Pietermaritzburg. Abstracts of the 32nd Southern African Transport Conference.

**Kommentar zu dem Beitrag:  
Verkehrsökonomische Analyse von Minibustaxiverkehren  
in der Metropolregion Kapstadt und der Minenstadt Rustenburg  
in Südafrika (von Johannes Simons, Benjamin Wacker, Andreas  
Bossert und Jan Schlüter)\***

VON MARTIN WINTER

Der Beitrag beschäftigt sich mit empirischen Untersuchungen zu Minibustaxiverkehren (MBTV) in zwei Städten Südafrikas, Kapstadt und Rustenburg. Die signifikante Rolle der MBTV in den lokalen Transportsystemen wird beschrieben und analysiert. Der Artikel bietet einen historischen Überblick über diese Dienstleistungen und zeigt dann die größten Herausforderungen der MBTV auf, die hauptsächlich mit der unzureichenden Qualität der Dienstleistungen und einer ungenügenden Regulierung der Branche zusammenhängen. Die umfangreichen Reisedaten werden analysiert, um Gründe und mögliche Lösungen für diese Herausforderungen der MBTV zu finden. Die Analyse deckt Unterschiede in den wichtigsten Serviceeigenschaften und Nachfragemustern zwischen den beiden Städten auf. Basierend auf der empirischen Analyse argumentiert der Beitrag, dass insbesondere die lokalen, raumstrukturell bedingten Unterschiede der Minibustaxidienste bei staatlichen Versuchen zur Verbesserung der Servicequalität der MBTV berücksichtigt werden sollten.

Das Thema der Minibustaxiverkehre ist insbesondere für viele Entwicklungsländer wichtig. Die vorgestellte Datenanalyse liefert erste Ergebnisse, die vor allem für die Wissenschaft sowie für Verkehrs- und Regulierungsbehörden interessant und relevant sind. Darüber hinaus macht der Beitrag auf weiteren Forschungsbedarf zu diesem Thema aufmerksam. Daher sind die Daten und Resultate dieses Artikels für eine Veröffentlichung geeignet.

---

\* Die Qualitätsprüfung / -sicherung des Beitrags „Grüne Logistik: Eine Untersuchung ausgewählter alternativer Antriebstechnologien im Güterverkehr“ von Patrick Siegfried und Daniel Strak erfolgte gemäß dem auf der Homepage der Zeitschrift für Verkehrswissenschaft dargestellten (Alternativ-)Ansatz zur transparenten Qualitätsprüfung und -diskussion (siehe [www.z-f-v.de](http://www.z-f-v.de) → „Einreichung von Beiträgen und Begutachtung / Qualitätsprüfung“). Dabei wird von einem fachkundigen Wissenschaftler eine zustimmende Stellungnahme zur Veröffentlichung des Beitrags eingeholt und zusammen mit dem Beitrag veröffentlicht.

*Anschrift des Verfassers:*

Dr. Martin Winter  
IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.  
Magazinstraße 15-16  
10179 Berlin  
E-Mail: [martin.winter@ikem.de](mailto:martin.winter@ikem.de)

# Grüne Logistik: Eine Untersuchung ausgewählter alternativer Antriebstechnologien im Güterverkehr

VON PATRICK SIEGFRIED UND DANIEL STRAK

## 1 Einführung

Das effiziente Zusammenspiel zwischen ökonomischen und ökologischen Aspekten, auch als „grüne Logistik“ bezeichnet, rückt in den Fokus dieser Betrachtung. Die Ausprägung der grünen Logistik ist abhängig von den verschiedenen Anspruchsgruppen. So kann beispielsweise einerseits das Unternehmen selbst durch Initiativen grüne Logistik voranbringen, andererseits können Unternehmen durch Kunden in die Verantwortung genommen werden oder von der Politik konkrete Gesetze und Verordnungen auferlegt werden. Eine dieser Verordnungen sind die Dieselfahrverbote für Innenstädte. Die Verbote sind auf die Überschreitung der europaweit festgelegten Stickstoffdioxidgrenzwerte zurück zu führen.

Die Fahrverbote resultieren aus der Überschreitung von europaweit festgelegten Stickstoffdioxidgrenzwerten in den Innenstädten. Dieser wird als NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert bezeichnet und wurde 1999 von den EU-Mitgliedstaaten beschlossen. Die Ursache für NO<sub>2</sub> in der Außenluft ist vorrangig auf Fahrzeuge mit Dieselantrieb im Straßenverkehr und im Straßengüterverkehr zurückzuführen.<sup>1</sup> Der gesamte städtische Wirtschaftsverkehr ist in deutschen und europäischen Städten stark ausgeprägt. Es wird davon ausgegangen, dass in europäischen Städten pro Woche zwischen 20.000 und 30.000 Anlieferungen und Abholungen pro km<sup>2</sup> erfolgen. Dabei entfallen etwa 30 bis 40 % der täglichen Anlieferungen auf den Einzelhandel.

---

### *Anschrift der Verfasser:*

Prof. Dr. Patrick Siegfried  
Professur Logistik & Supply Chain Management  
ISM International School of Management GmbH –  
Gemeinnützige Gesellschaft  
Mörfelder Landstraße 55  
60598 Frankfurt/Main  
E-Mail: patrick.siegfried@ism.de

Daniel Strak  
Professur Logistik & Supply Chain Management  
ISM International School of Management GmbH –  
Gemeinnützige Gesellschaft  
Mörfelder Landstraße 55  
60598 Frankfurt/Main  
E-Mail: daniel.strak@ism.de

<sup>1</sup> vgl. Umwelt Bundesamt (2018 online).

Eine Belieferung dieser Betriebe erfolgt drei bis zehnmal pro Woche. Damit verursacht der Frachttransport in europäischen Städten etwa ein Drittel aller transportbezogenen Stickoxidemissionen.<sup>2</sup>

Neben der Möglichkeit der Optimierung des konventionellen Dieselantriebsstrangs unter Berücksichtigung der vereinbarten Reduktionsziele von Treibhausgasemissionen müssen neue Wege beschritten werden. Eine Reduktion kann zukünftig durch die Entwicklung alternativer Antriebe erreicht werden, um die ambitionierten Klimaziele der EU bzw. der Bundesregierung einhalten zu können.<sup>3</sup> Demnach sollen die Emissionen um 20 % bis zum Jahr 2020 und darüber hinaus um weitere 40 % bis zum Jahr 2030 reduziert werden. Dabei beziehen sich die Vergleichszahlen auf das Basisjahr 1990. Letztlich sollen bis zum Jahr 2050 die jährlichen Treibhausgas (THG)- Emissionen, verglichen mit dem Jahr 1990 um 80 bis 95 % gesenkt werden.<sup>4</sup>

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es daher, die Stärken und Schwächen sowie die daraus resultierenden Chancen und Risiken alternativer Antriebstechnologien aus ökonomischer und ökologischer Perspektive unter theoretischen und praktischen Gesichtspunkten gegenüberzustellen.

Dazu wurden insgesamt neun Experteninterviews durchgeführt. Die Stichprobenauswahl von neun Interviews ist zwar nicht repräsentativ, dennoch konnten fundierte Experten aus Unternehmen, Instituten und der Politik gewonnen werden. Dazu zählen ein Verkehrsexperte aus dem hessischen Landtag, der Geschäftsführer eines mittelständig geführten Logistikunternehmens, der Marketing-Verantwortliche eines führenden Herstellers an innovativen Antriebssystemen, der Experte eines führenden deutschen Institutes im Bereich Antriebssysteme sowie weitere Experten der größten deutschen Handelsunternehmen aus den Bereichen Logistik und Supply Chain Management. Die Experten wurden in einem persönlichen Interview bzw. Telefoninterview anhand eines Fragebogens befragt, der entsprechend den Experten modifiziert wurde.

Es stellt sich somit die Frage, ob und wenn ja, welche alternative Technologien sich gegenüber dem Dieselantrieb zukünftig im Straßengüterverkehr durchsetzen können.

---

<sup>2</sup> vgl. IHK (2013 online, S. 2f.).

<sup>3</sup> vgl. Logistra (2018, S. 16-17).

<sup>4</sup> vgl. BMU (o.J. online).

## 2 Antriebstechnologien im Güterverkehr

### 2.1 GÜTERVERKEHR UND ANTRIEBSTECHNOLOGIEN IN DEUTSCHLAND

#### 2.1.1 Grüne Logistik

Unter grüner Logistik ist ein nachhaltiger und systematischer Prozess zu verstehen, der die Erfassung sowie Reduzierung der aus den Logistikprozessen resultierenden Emissionen zum Ziel hat. Damit steht das effiziente Zusammenspiel ökonomischer und ökologischer Aspekte im Fokus der Betrachtung.<sup>5</sup> Die wesentlichen Anspruchsgruppen, deren Ziel es ist, die Entwicklung der grünen Logistik voranzutreiben bzw. Einfluss auf deren zukünftige Entwicklung zu nehmen, werden anhand der nachfolgenden Tabelle dargestellt und im Anschluss erläutert.

| Anspruchsgruppen der grünen Logistik  |  |
|---|--|
| <p><i>Anforderungen des Unternehmens</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kosteneinsparungen</li> <li>- Erzielen von Wettbewerbsvorteilen / Imagevorteilen</li> <li>- Ableitung einer Klimaschutzstrategie</li> </ul>                     | <p><i>Anforderungen der Kunden</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub>-Kennzeichnung von Waren</li> <li>- Unternehmens- und Umweltbilanzen</li> <li>- Zertifizierung von Umweltnormen</li> </ul> |
| <p><i>Anforderungen der Politik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gesetze, Auflagen, Anreiz- und Sanktionsmaßnahmen</li> <li>- Logistik hat als CO<sub>2</sub>-Verursacher eigenen Beitrag zu dessen Reduzierung zu leisten</li> </ul> | <p><i>Anforderungen der Gesellschaft</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Forderung nach mehr Unternehmensverantwortung – Corporate Social Responsibility (CSR)</li> </ul>                                   |

#### Abbildung 1: Anspruchsgruppen an eine grüne Logistik<sup>6</sup>

Die Politik kann durch Gesetze, Verordnungen und anderen Auflagen unmittelbar Einfluss auf die Logistikdienstleister nehmen, um so eine nachhaltige ökologische Entwicklung voran zu treiben. Eine Maßnahme stellt in diesem Zusammenhang beispielsweise die Autobahnmaut dar. Des Weiteren kann ein Unternehmen durch Eigenmotivation und

<sup>5</sup> vgl. Schulte (2017, S. 17).

<sup>6</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: Schulte (2017, S. 17) und Keuschen/ Klumpp (2011, S. 8).

Verantwortung bei der Entwicklung grüner Logistik mitwirken. Hierbei bilden die Mitarbeiter oftmals den Ausgangspunkt, indem sie in einem sozial und ökologisch geführten Unternehmen arbeiten möchten. Außerdem erhöht sich der Druck seitens der Gesellschaft auf Unternehmen und Logistikdienstleister, die ihrer gesellschaftlichen Unternehmensverantwortung nicht bzw. nur bedingt nachkommen. Letztlich stellen die Kunden eine wichtige Anspruchsgruppe dar, die von Lieferanten zunehmend Zertifizierungsnachweise zu Fragen des Umweltmanagements von Produkten und Dienstleistungen erwarten. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass grüne Logistik kein Modethema ist, sondern langfristig Einfluss auf die Wertschöpfung in Unternehmen bzw. der Logistik haben wird.<sup>7</sup>

### 2.1.2 Güterverkehr nach Verkehrsträgern

In Mitteleuropa wird der größte Teil des Güterverkehrs heute auf der Straße abgewickelt, was in der Vergangenheit nicht immer der Fall war. Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat der Lastkraftwagen (LKW) in Deutschland die Eisenbahn als meist genutztes Verkehrsmittel abgelöst.<sup>8</sup> Die Vorteile des Straßenverkehrs beruhen vorrangig auf einem gut ausgebauten Straßennetz.<sup>9</sup> Gegenwärtig werden rund 71 % des Güterverkehrs in Deutschland über die Straße abgewickelt. Dies ist darauf zurück zu führen, dass sich durch vergleichsweise geringere Kosten der Güterverkehr mit LKWs gegenüber anderen Verkehrsträgern wie der Bahn oder der Binnenschifffahrt in vielen Anwendungsfällen, bezogen auf die Beförderungsleistung durchsetzen konnte. Darüber hinaus gibt es vielfältige Gründe, warum Speditionen auf den Einsatz von LKWs zur Güterbeförderung zurückgreifen. LKWs stehen für den Einsatz im Nah-, Regional- und Fernverkehr in ausreichender Zahl zur Verfügung. Die Touren können innerhalb weniger Stunden geplant und befahren werden und es stehen verschiedene Fahrzeugtypen für Standard- bzw. Spezialtransporte zur Verfügung.<sup>10</sup> Zu Beginn des Jahres 2016 waren in Deutschland ca. 3 Mio. leichte und schwere Nutzfahrzeuge registriert.<sup>11</sup>

Die weitaus größte Fahrzeugklasse stellen mit 2.3 Mio. Fahrzeugen bzw. 76 % die leichten Nutzfahrzeuge bis 3,5 t dar, gefolgt von 246.000 Fahrzeugen zwischen 3,5 und 7,5 t, was einem prozentualen Anteil von 8 % entspricht. Die Gewichtsklasse zwischen 7,5 und 12 Tonnen umfasst mit ca. 80.000 Fahrzeugen lediglich etwa 3 %. Der Fahrzeugbestand über 12 Tonnen liegt bei rund 200.000 Fahrzeugen. Zu dieser Gewichtsklasse zählen vorrangig

---

<sup>7</sup> vgl. Keuschen / Klumpp (2011, S. 8).

<sup>8</sup> vgl. zf-zukunftsstudie (2012 online).

<sup>9</sup> vgl. Vry (2008, S. 72).

<sup>10</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 217f.).

<sup>11</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 23).

Motorwagen und Gliederzüge mit einem Anteil von 7 %. Die Kategorie der Sattelzugmaschinen umfasst ca. 200.000 Fahrzeuge mit einem Anteil von 6 %.<sup>12</sup>

### 2.1.3 Transportaufkommen und -leistung

Die Verkehrsleistung des LKWs belief sich im Jahr 2015 auf insgesamt 459 Mrd. tkm. Der LKW verfügt über eine hohe Flexibilität, denn von der Laderampe bis zur Haustür kann dieser fast jedes Ziel erreichen. Darüber hinaus ist er auch beim Transport kleinerer Sendungsgrößen im Nahverkehr einsetzbar, während beispielsweise die Eisenbahn erst ab einer Nutzlast von über 300 t als wirtschaftlich anzusehen ist. Der kombinierte Verkehr aus LKW und Eisenbahn ist darauf aufbauend erst ab einer Entfernung von über 500 km sinnvoll. Da sich jedoch fast 80 % des Güteraufkommens auf Strecken von rund 150 km beschränken, ist der LKW für Transporte mit geringen Volumen und auf kurzen Wegen ideal.<sup>13</sup>

Des Weiteren hat sich die seit 2011 andauernde überdurchschnittliche Entwicklung des Regionalverkehrs (51 bis 150 km) im Vergleich zum Fernverkehr (über 150 km) fortgesetzt. Dies ist vorrangig auf veränderte logistische Abläufe und auf den Aufbau von immer mehr Regionallägen anstelle von Zentrallägen zurückzuführen.<sup>14</sup> Darüber hinaus geht die Verkehrsprognose 2030 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur in seiner jüngsten Verkehrsprognose davon aus, dass im LKW-Segment die Verkehrsleistung mit rund 39 % den stärksten Zuwachs verzeichnen wird.<sup>15</sup>

Der Straßengüterverkehr verursacht einen großen Teil der Schadstoffemissionen im gesamten Straßenverkehr. Daher führte der Gesetzgeber bereits zu Beginn der 1990er Jahre Abgaswerte, die sogenannten Euro-Normen von 1 bis 6 für alle Fahrzeuge ein, mit dem Ziel, die lokalen Emissionen zu verringern. Die Euro-Normen setzten fahrleistungsabhängige Abgaswerte für Luftschadstoffe fest. Diese Klassifizierung ist nicht nur ein wichtiges fahrzeugtechnisches und ökologisches Unterscheidungsmerkmal, sondern stellt für den Fahrzeughalter darüber hinaus eine wirtschaftliche Relevanz. Nach den Klassen richtet sich die Höhe der Kraftfahrzeugsteuer, die Autobahnmaut sowie die Einfahrtberechtigung in entsprechende Umweltzonen.<sup>16</sup>

Darauf aufbauend gibt es für leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t ab dem Jahr 2020 gesetzlich vorgeschriebene Emissionsgrenzwerte. Demnach dürfen in dieser Gewichtsklasse nicht mehr als 147 g/km CO<sub>2</sub> ausgestoßen werden, was in etwa einem Verbrauch von 5,6 l Diesel

---

<sup>12</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 23).

<sup>13</sup> vgl. VDA (o.J. online)

<sup>14</sup> vgl. BAG (2018 online, S. 52f.)

<sup>15</sup> vgl. BMVI (2014 online)

<sup>16</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 25f.)

auf 100 km entspricht. Im Vergleich dazu werden für schwere Nutzfahrzeuge verbindliche CO<sub>2</sub>-Grenzwerte derzeit diskutiert.<sup>17</sup> Da bei den schweren Nutzfahrzeugen die Antriebstechnik und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen abhängig von der Anzahl der Achsen, den speziellen Aufbauten etc. sind, gestaltet sich die Messung sowie der Vergleich fahrzeugspezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionen als Herausforderung. Es bleibt daher abzuwarten, ob und wann es für schwere Nutzfahrzeuge vergleichbare Werte geben könnte.<sup>18</sup>

Bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen gilt es zwischen zwei Emissionsarten zu unterscheiden. So entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen einerseits während der Herstellung bzw. der Bereitstellung der Kraftstoffe (Well-to-Tank = vom Bohrloch bis zum Rad) und andererseits bei der Nutzung (Tank-to-Wheel = vom Kraftstofftank bis zum Rad) des jeweiligen Kraftstoffes.<sup>19</sup>

#### 2.1.4 Alternative Antriebe

Seit den 1920er Jahren wird der Lastkraftwagen von einem Verbrennungsmotor mit Dieseldieselkraftstoff angetrieben. Diesel besteht aus Mineralöl und stellt einerseits eine endliche Ressource dar und andererseits ist die Energieversorgung von einigen wenigen politisch unberechenbaren Lieferländern abhängig. Daher drängt sich die Frage nach Alternativen auf. Des Weiteren entstehen durch den Verbrennungsprozess Schadstoffe, die zwar bis heute aufgrund des technischen Fortschrittes reduziert werden konnten, dennoch ist es unvermeidbar, dass bei der Verbrennung von Diesel CO<sub>2</sub> entsteht.<sup>20</sup>

Daher suchen Automobilhersteller nach neuen Wegen, um die Mobilität der Zukunft zu gestalten. Denn neben dem Aspekt der Abhängigkeit und Endlichkeit des Rohöls, leistet der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verkehrssektor einen erheblichen Beitrag zum Klimawandel. Deshalb werden seitens der Politik bzw. der Automobilhersteller die Einführung alternativ angetriebener Fahrzeuge fokussiert.<sup>21</sup> Außerdem tragen die Kraftstoffkosten bei einer Jahresfahrleistung von etwa 100.000 km pro Jahr bis zu 30 % zu den Gesamtkosten bei und stellen damit neben den Personalkosten des Fahrers, den zweitgrößten Anteil an den gesamten Betriebskosten dar.<sup>22</sup> In Zukunft ist zu erwarten, dass alternative Antriebe immer leistungsfähiger werden und durch günstigere Brennstoffe die Gesamtkosten der Transportwirtschaft insgesamt gesenkt werden können.<sup>23</sup>

---

<sup>17</sup> vgl. Amtsblatt der EU (2014 online)

<sup>18</sup> vgl. Europäisches Parlament (2014 online, S. 4)

<sup>19</sup> vgl. Wietschel et al (2017, S.140)

<sup>20</sup> vgl. Percy (2009, S. 3)

<sup>21</sup> vgl. Wachter (2016, S. 1)

<sup>22</sup> vgl. Wietschel (2017, S. 78f.)

<sup>23</sup> vgl. Global Truck Study (2016 online, S. 24)

Der LKW-Bestand, inklusive leichter Nutzfahrzeuge und Sattelzugmaschinen weist mit 95 % einen sehr hohen Anteil an Dieselantrieben auf. Somit ist der Dieselantrieb als Standardantrieb für Nutzfahrzeuge im Straßengüterverkehr zu sehen. Mit anderen Antriebsarten fahren nur etwa 4 % aller LKWs in Deutschland, wobei ein Großteil dieser Nutzfahrzeuge mit Benzin betrieben werden. Darüber hinaus beträgt der Dieselanteil bei Sattelzugmaschinen etwa 99 %. Alternative Antriebe sind daher vor allem bei den leichten Nutzfahrzeugen, wie z. B. Sprinter oder Transporter zu finden. Damit gilt, je höher das Gesamtgewicht eines LKWs, desto weniger verbreitet sind alternative Antriebe.<sup>24</sup>

Zum Jahresende 2017 waren ca. 12.000 Nutzfahrzeuge mit einem Elektroantrieb (Batterie, Plug-in-Hybride oder Brennstoffzelle) zugelassen. Die dazugehörige Ladeinfrastruktur umfasst etwa 11.000 Ladepunkte. Damit lässt sich festhalten, dass sich der Markt mit alternativen Antrieben und die dazugehörige Tank- und Ladeinfrastruktur noch im Anfangsstadium befindet, obwohl es bereits in 28 deutschen Ballungsräumen zu Überschreitungen der von der EU festgelegten Stickstoffdioxid-Emissionen kommt.<sup>25</sup>

#### 2.1.5 Angebot und Nachfrage alternativer Antriebe

Der Markt für schwere Nutzfahrzeuge in Deutschland wird im Wesentlichen von sieben Herstellern dominiert. Diese sind DAF, Iveco, MAN, Mercedes-Benz, Renault, Scania und Volvo. Dabei gilt es zu beachten, dass Renault zum Volvo-Konzern gehört sowie MAN und Scania Tochterunternehmen der Volkswagen AG sind. Die Marktorientierung der in Deutschland maßgeblichen LKW-Hersteller in Bezug auf den Antriebsstrang gestaltet sich zwiespältig.<sup>26</sup> Dies ist primär darauf zurück zu führen, dass es eine Vielzahl von alternativen Antriebsarten gibt und damit Investitionen in eine bestimmte Technologie aus Sicht der OEMs sowie den LKW-Betreibern als riskant erscheinen. Dies wird durch den ungewissen Ausbau der jeweiligen Versorgungsinfrastruktur weiter verstärkt.<sup>27</sup> Darüber hinaus haben einerseits, die unter hohem Kostendruck operierenden Kunden nur mäßiges Interesse und geringe Zahlungsbereitschaft für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben geäußert und andererseits liegen die Kernkompetenzen der Hersteller in der Produktion von Verbrennungsmotoren, Getrieben und deren Antriebssträngen.<sup>28</sup>

Der erste Anbieter, der ein in Serie gefertigtes elektrifiziertes Hybridfahrzeug mit einer Nutzlast von 12 t auf den Markt brachte, war Mercedes im Jahr 2010 mit dem Atego. Im Jahr 2016 wurde auf der IAA ein Fahrzeug für den schweren Verteilerverkehr vorge stellt.<sup>29</sup>

---

<sup>24</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 25f.)

<sup>25</sup> vgl. NOW (2017 online, S. 3)

<sup>26</sup> vgl. Wietschel (2017, S. 225ff.)

<sup>27</sup> vgl. Fraunhofer (2018 online, S. 4)

<sup>28</sup> vgl. Wietschel (2017, S. 225ff.)

<sup>29</sup> vgl. AMZ (2017, S. 11)

Seit Ende 2018 testet Mercedes den neuen eActros, der mit serienreifen bzw. seriennahen Teilen ausgestattet wurde. Des Weiteren wird die Entwicklung der Brennstoffzelle vorangetrieben, um die Reichweite in Zukunft insgesamt erhöhen zu können.<sup>30</sup>

Im Jahr 2017 begann schließlich MAN mit dem Test elektrifizierter Sattelzugmaschinen, die über eine Reichweite von ca. 150 km verfügten.<sup>31</sup> Momentan gilt MAN als einer der ersten Hersteller, die in Ihrem Produktportfolio vollelektrische Fahrzeuge für den Bereich der City-Logistik zwischen 3 und 26 t anbietet. Dazu zählt unter anderem der vollelektrische Verteiler-LKW, der MAN eTGM.

Renault begann bereits Anfang 2012 mit dem Test eines elektrifizierten 16-Tonnern im Praxiseinsatz. Mit diesem Fahrzeug könnten CO<sub>2</sub> Einsparungen von bis zu 86 % gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen erreicht werden. Neben dem Ziel die Energieeffizienz von Diesel-LKWs erhöhen zu können, investiert Renault auch weiterhin in Forschung und Entwicklung der E-Mobilität.<sup>32</sup> Volvo testet ebenfalls Hybrid-LKWs, vorrangig im Fernverkehr.<sup>33</sup> Des Weiteren greifen einige Hersteller bereits auf verflüssigtes Erd- bzw. Biogas als Treibstoff zurück. So sehen primär Iveco, Scania und darüber hinaus Volvo im Erdgas eine sinnvolle Brückentechnologie.<sup>34</sup>

Des Weiteren gibt es ein Angebot an Firmen, die sich auf die Umrüstung von konventionellen Lastkraftwagen spezialisiert haben. Dazu zählen neben dem Schweizer Unternehmen eForce, die Firma FRAMO GmbH aus dem sächsischen Langenbernsdorf, die für den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneiderte Antriebskonzepte liefern können.<sup>35</sup>

Darüber hinaus hat der weltweit führende Hersteller an innovativen Antriebssystemen, die Deutz AG, vor kurzem eine Kooperation mit dem Start-up-Unternehmen KEYOU unterzeichnet, mit dem Ziel der Industrialisierung und Kommerzialisierung von CO<sub>2</sub>- freien Wasserstoffmotoren. KEYOU entwickelt für Fahrzeug- und Motorenhersteller innovative Wasserstofftechnologien, mit deren Einsatz konventionelle Motoren zu emissionsfreien Wasserstoffmotoren umgebaut werden können. Gemeinsam verfolgen diese beiden Partner das Ziel, zu Beginn des Jahres 2020 erste Prototypen vorzustellen. Schließlich ist bis zum Jahr 2022 eine Serienreife dieser Technologie angestrebt.<sup>36</sup>

---

<sup>30</sup> vgl. DVZ (2018, S. 4f.)

<sup>31</sup> vgl. AMZ (2017 online, S. 12)

<sup>32</sup> vgl. DVZ (2018, S. 5)

<sup>33</sup> vgl. AMZ (2017, S. 12f.)

<sup>34</sup> vgl. DVZ (Nr. 5 vom 30.01.2019)

<sup>35</sup> vgl. AMZ (2017 online, S. 10)

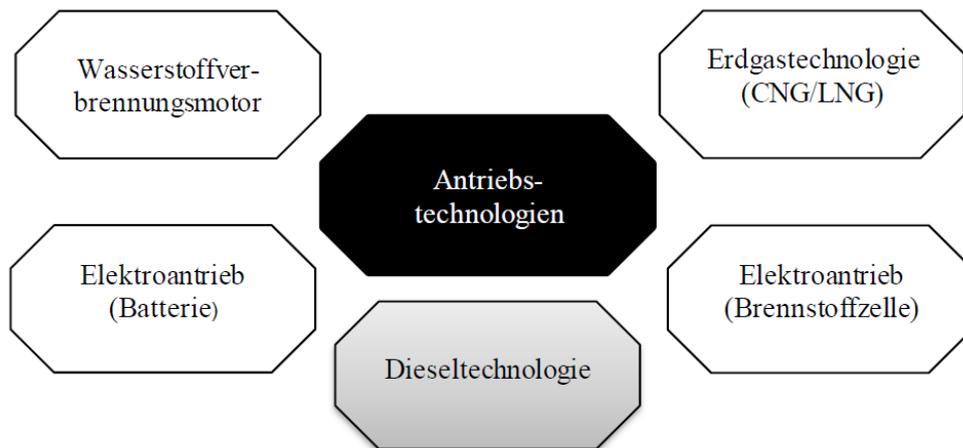
<sup>36</sup> vgl. DEUTZ (2019 online)

## 2.2 ANTRIEBSTECHNOLOGIEN STATE OF THE ART

Die Segmentierung alternativer Antriebstechnologien gestaltet sich vielschichtig. Das Fraunhofer Institut unterscheidet anhand von acht Alternativen zum konventionellen Diesel:<sup>37</sup>

- Dual-Fuel Antrieb
- Elektroantrieb (Batterie)
- Elektroantrieb (Brennstoffzelle)
- Serieller Hybridantrieb
- Paralleler Hybridantrieb
- Synthetischer Kraftstoff
- Biokraftstoff
- Gas-Antrieb (CNG/LNG)

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird neben der Dieselsechnologie die folgende Segmentierung für alternative Antriebstechnologien gewählt und nachfolgend erläutert:



**Abbildung 2: Antriebstechnologien State of the Art<sup>38</sup>**

<sup>37</sup> Vgl. Rüdiger (2014, S.22f.)

<sup>38</sup> Quelle: Eigene Darstellung

### 2.2.1 Dieselsechnologie

Dieselmotoren zählen zu den nicht-regenerativen Kraftstoffen. Durch die Verbrennung von Dieselmotoren entstehen vorrangig Stickoxid-Emissionen sowie Feinstpartikel im Abgas.<sup>39</sup>

Der Dieselmotor gilt seit mehr als 100 Jahren als effizienteste Antriebsmethode unter den Verbrennungsmotoren und ist aufgrund seines hohen Anteils im Güterverkehr als Benchmark zu sehen, da sich mit dieser Antriebsart jeder zukünftige Antrieb messen muss. Doch selbst der Diesel hat eine lange Evolution durchlaufen. So hat sich beispielsweise die Zusammensetzung des Kraftstoffes wesentlich verändert. Dieselmotoren sind ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen. Insgesamt hat der Dieselmotoren etwa 500 Inhaltsstoffe und 200 verschiedene Kohlenwasserstoffe. Anhand des Kohlenstoffgehalts unterscheidet sich der Dieselmotoren vom Ottomotoren. Während Diesel insgesamt mehr Energie pro Liter enthält, was auf die höhere Anzahl an Kohlenstoffatomen im Vergleich zum Ottomotoren zurück zu führen ist, entsteht bei der Verbrennung ein insgesamt höherer CO<sub>2</sub>-Anteil im Vergleich zum Ottomotoren.<sup>40</sup>

Nachdem aufgrund der dynamischen Entwicklung des Straßengüterverkehrs in den 1980er Jahren die Luftschadstoffemissionen ihren Höhepunkt erreichten und daraufhin EU-weite Abgasemissionsstandards für Kraftfahrzeuge eingeführt wurden, begannen die Hersteller mit technischen Innovationen ihre Fahrzeuge zu optimieren. Dazu zählen beispielsweise Abgasreinigungstechniken, die zur wesentlichen Verbesserung der Abgasqualität des Dieselmotors bis heute ihren Beitrag leisten.<sup>41</sup>

Dennoch konnte die Antriebsleistung von Dieselmotoren nicht erhöht werden. Um daher zukünftig die Energie- bzw. Treibstoffeffizienz zu steigern, sowie die Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs zu reduzieren, sind die Hersteller gefordert. Mögliche Ansatzpunkte sind u. a. die Optimierung des Wirkungsgrads, die Hybridisierung und die Abwärmenutzung, um schließlich die Effizienz zu erhöhen. Unter der Verbesserung des Wirkungsgrades ist die Elektrifizierung von Nebenaggregaten wie z. B. Öl- und Wasserpumpen zu verstehen. In dieser Maßnahme wird die Möglichkeit gesehen, den gesamten Wirkungsgrad um 7 bis 14 % zu erhöhen. Darüber hinaus kann durch Hybridisierung elektrische Energie aus dem Fahrzeugbetrieb, die beim Fahrzeugbetrieb des Verbrennungsmotors entsteht, beispielsweise beim Bremsvorgang ähnlich wie bei einem elektrifizierten Fahrzeug rekuperiert werden und in Akkumulatoren, die parallel zum Verbrennungsmotor arbeiten, gespeichert werden. Ein solches Hybridsystem eignet sich vorrangig bei häufigen Brems- und Anfahrvorgängen in urbanen und regionalen Einsatzgebieten. Hierbei ist mit Kraftstoffeinsparungen von bis zu 20 % zu rechnen bzw.

---

<sup>39</sup> vgl. Corradini / Krimmer (2003, S. 14)

<sup>40</sup> vgl. Puls (2006, S. 21)

<sup>41</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 34f.)

auf der Langstrecke mit etwa 5 %. Schließlich bietet die Abwärmenutzung ein Effizienzpotenzial von ca. 5 %, denn mehr als 50 % der im Kraftstoff gespeicherten Energie geht beim Verbrennungsmotor in Form von Wärme über die Motorenkühlung verloren. Eine Voraussetzung für die Abwärmenutzung stellt ein gleichmäßiger Strom der wärmeenergiereichen Abgase dar, die vor allem im Fern- und Langstreckenverkehr gegeben wären.<sup>42</sup>

Eine Alternative zum fossilen Diesel stellen Biodiesel und synthetische Kraftstoffe dar. Bei der Herstellung von Biodiesel werden pflanzliche und tierische Öle, Fette sowie Raps verwendet. Biodiesel wird jedoch nicht in reiner Form verwendet, sondern häufig dem fossilen Diesel beigemischt, um dadurch die vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte einhalten zu können. Neben Biodiesel ist der Einsatz synthetischer Kraftstoffe denkbar. Diese bestehen aus Alkanen und sind nahezu stickstofffrei. Damit kann ebenfalls zur Reduktion der Luftschadstoffemissionen beigetragen werden.<sup>43</sup>

### 2.2.2 Erdgastechnologie

Erdgas als Brennstoff ist so universell einsetzbar wie Öl. Das Erdgas gestaltet sich aufgrund der geringeren Emissionen, die bei der Verbrennung entstehen, gegenüber konventionellen Kraftstoffen, als vorteilhaft. Beim Verbrennen von Erdgas entstehen kaum Schwefeldioxide bzw. Stickoxide.<sup>44</sup> Erdgas ist ein natürliches Gasgemisch, das wie Rohöl in unterirdischen Lagerstätten zu finden ist. Neben Ethan und Propan ist Methan der Hauptbestandteil von Erdgas. Die genaue Zusammensetzung des Erdgases ist abhängig vom Herkunftsland. In Biogasanlagen kann auf Basis eines natürlichen Vergärungsprozesses Biogas gewonnen werden, das dem fossilen Erdgas in seiner Zusammensetzung sehr ähnlich ist.<sup>45</sup>

LPG, CNG, LNG, SNG, Erdgas usw. sind beispielhafte Bezeichnungen für gasförmige Brennstoffe. Im Gegensatz zu festen oder flüssigen Brennstoffen sind gasförmige Brennstoffe weder in Form noch im Volumen beständig. Daher müssen gasförmige Brennstoffe in geschlossenen Behältern gespeichert werden.<sup>46</sup> Für den Einsatz von gasförmigen Brennstoffen im Mobilitäts- und Verkehrssektor stellt die Tatsache, dass die Energiemenge je Volumeneinheit bei gasförmigen Brennstoffen geringer ist, als bei flüssigen Brennstoffen einen Nachteil dar. Unter Normalbedingungen hat Erdgas eine um den Faktor 1.000 höhere Dichte je Liter verglichen mit dem Diesel. Somit werden entweder

---

<sup>42</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 36f.)

<sup>43</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 39)

<sup>44</sup> vgl. Dingel (2004, S. 163)

<sup>45</sup> vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 51)

<sup>46</sup> vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 49)

große Gastanks benötigt oder die mit der Tankfüllung verbundene Reichweite muss gering sein.<sup>47</sup>

Die Speicherung von Erdgas in Fahrzeugen erfolgt im Allgemeinen komprimiert auf 200 bar (Compressed Natural Gas; CNG) in Druckbehältern. Die Anordnung der Druckgastanks ist abhängig vom Fahrzeugkonzept. Bei LKWs über 7,5 t erfolgt die Anordnung der Druckgasbehälter in der Regel meist außen, längs des Rahmens. Die Behälter bestehen entweder aus Stahl, Metall-Kunststoff oder aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Diesem Material wird aufgrund des geringen Gewichtes großes Potenzial bei der Verwendung von Tanks zugeschrieben.<sup>48</sup> Auch wenn eine weitere Komprimierung und damit eine erhöhte Reichweite möglich ist, ist aus Sicherheitsgründen eine Erhöhung des Drucks zur Anwendung im Straßenverkehr nicht zulässig. Des Weiteren kann die Energiedichte von Erdgas durch Abkühlen und Verflüssigen erhöht werden. Erdgas wird bei einer Temperatur von -150 bis 160 °C flüssig. Die Energiedichte von flüssigem Erdgas (liquified natural gas; LNG) ist dreimal so hoch wie die Energiedichte von CNG-Gas.<sup>49</sup>

Eine Kombination aus Erdgas und Diesel stellt das Dual-Fuel-Prinzip dar. Bei diesem Verfahren werden gleichzeitig zwei Kraftstoffe, nämlich Erdgas und Diesel in den Brennraum eingespritzt. Einen Vorteil der Dual-Fuel-Technik stellt die Gegebenheit dar, dass ein Antrieb nur mit Diesel ebenfalls möglich ist, sofern kein Erdgas bzw. eine entsprechende Tankstelle zu Verfügung stehen sollte. Der Antrieb nur mit Erdgas ist hingegen nicht möglich.<sup>50</sup>

Zwar kann Erdgas in modifizierten Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, allerdings ist Erdgas als fossiler Kraftstoff nur limitiert vorhanden und trägt insgesamt zu CO<sub>2</sub>-Emissionen bei, wenn auch vermindert.<sup>51</sup> Ein Argument für den Einsatz von Erdgas in Nutzfahrzeugen stellt die Mautbefreiung seit Anfang 2019 von CNG- und LNG-Fahrzeugen bis zum Jahr 2020 in Deutschland dar. Nach Angaben des Kraftfahrt-Bundesamts sind aktuell 339 Erdgas-LKW in Deutschland zugelassen.<sup>52</sup>

### 2.2.3 Elektroantrieb (Batterie)

Der Definition nach zählen alle Fahrzeuge, die von einem Elektromotor angetrieben werden und ihre Energie vorrangig aus dem Stromnetz beziehen sowie von außen aufladbar sind zur Kategorie der Elektrofahrzeuge. Darüber hinaus dürfen Elektrofahrzeuge nicht mehr als

---

<sup>47</sup> vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 51)

<sup>48</sup> vgl. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (1998, S. 15f.)

<sup>49</sup> vgl. Lange / Auffermann (2016, S. 51)

<sup>50</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 43)

<sup>51</sup> vgl. Corradini / Krimmer (2003, S. 12)

<sup>52</sup> vgl. Eurotransport (2018 online)

50 g Kohlendioxid pro Kilometer ausstoßen und müssen über eine Mindestreichweite von 30 km verfügen.<sup>53</sup> Allerdings sind heute die meisten Elektrofahrzeuge keine reinen E-Fahrzeuge, sondern Hybridfahrzeuge. Diese Fahrzeuge verfügen neben dem Verbrennungsmotor über einen leistungsfähigen Elektromotor mit einer Batterie und einem Ladestromanschluss. Diese Fahrzeuge werden als Plug-in-Hybridfahrzeuge bezeichnet. Demgegenüber stehen batterieelektrische Fahrzeuge, die nur über einen Elektromotor verfügen und vollkommen elektrifiziert sind. Die rein batterieelektrischen Fahrzeuge werden vorrangig bei Kurier- und Expressdienstleister im regionalen Verteilerverkehr eingesetzt. Bei Fahrzeugen über 3,5 t gab es in der Vergangenheit einige Prototypen, die im Rahmen des Verteilerverkehrs in Städten getestet wurden. Dabei kann der genutzte Fahrstrom für beide Fahrzeugarten zur Speicherung direkt in Batterien bzw. über Oberleitungen zugeführt werden.<sup>54</sup>

Obwohl es bereits im 19. Jahrhundert erste batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge gab, liegt die Schwierigkeit dieser Antriebsart in der mangelnden volumen- und gewichtsspezifischen Speicherfähigkeit der Batterien. So sind z. B. Bleiakkus zwar enorm zuverlässig, aber auch groß und schwer.<sup>55</sup>

In den 1980er Jahren kam es im Rahmen von Umweltdiskussionen aufgrund der ökologischen Vorteile zum Comeback dieser Antriebsart. Denn der große Vorteil der Elektrofahrzeuge liegt darin, dass sie keine lokalen Abgasemissionen verursachen, was allerdings nicht bedeutet, dass sie zu 100 % emissionsfrei sind. Die Emissionen fallen vorrangig bei der Stromerzeugung an und sind von der Energiequelle abhängig, aus der der Strom erzeugt wurde. Ein weiterer Vorteil von Elektrofahrzeugen sind darüber hinaus zumindest bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten die geringeren Lärmemission. Nachteilhaft ist dagegen die im unteren dreistelligen Kilometerbereich liegende Reichweite.<sup>56</sup> Moderne Batterien verfügen im Vergleich zu Bleibatterien zwar über eine höhere Energiedichte, sind allerdings entsprechend kostenintensiver. Allerdings kann die Lebensdauer der Batterie mit zwei bis vier Jahren deutlich geringer ausfallen. Basierend auf Forschung und Entwicklung können Lithium-Metall-Polymer-Batterien, Zink-Sauerstoff bzw. Zink-Luft- und Lithium-Luft-Batterien zukünftig im Falle einer Serienproduktion zu Kosteneinsparungen und höherer Lebensdauer beitragen.<sup>57</sup>

Zurzeit sind die Kosten für Elektrofahrzeuge verglichen mit konventionellen Fahrzeugen deutlich höher. Des Weiteren stammen die seltenen Erden, die für die Herstellung der Elektromotoren benötigt werden aus China. Hier sind etwa 90 % der Rohstoffvorkommen

---

<sup>53</sup> vgl. Schröder (2017, S. 29)

<sup>54</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 47f.)

<sup>55</sup> vgl. Puls (2006, S. 68f.)

<sup>56</sup> vgl. Puls (2006, S. 68f.)

<sup>57</sup> vgl. Stan (2012, S. 275)

vorzufinden. Eine künstliche Verknappung, steigende Preise und politische Abhängigkeiten sind daher nicht auszuschließen.<sup>58</sup>

Ein großer Vorteil des Elektromotors stellt die Tatsache dar, dass kein Getriebe verbaut werden muss und daher keine Kupplung erforderlich ist. Das Drehmoment des Elektromotors kann daher bereits ab der Drehzahl Null annähernd das maximale Drehmoment erreichen. Deshalb übertrifft das Elektrofahrzeug bezogen auf die Beschleunigung die Vergleichswerte von modernsten Diesel- und Ottomotoren.<sup>59</sup> Elektromotoren verfügen über einen Wirkungsgrad von etwa 90 %.<sup>60</sup>

#### 2.2.4 Elektroantrieb (Brennstoffzelle)

Häufig werden Wasserstoff und Brennstoffzelle als Paketlösung betrachtet, genau genommen handelt es sich bei der Brennstoffzelle jedoch nicht um einen Antrieb, sondern um einen elektrochemischen Energiewandler, der aus fossilen oder regenerativen Kraftstoffen Strom erzeugt. Die Brennstoffzelle kann ihre Energie mit weniger Wärmeemissionen produzieren als ein Verbrennungsmotor.<sup>61</sup>

Die Grundlage des Fahrzeugantriebs eines Fahrzeugs auf Basis der Brennstoffzelle ist ein konventioneller Elektromotor, der durch eine oder mehrere Brennstoffzellen mit der nötigen Energie versorgt wird. Die Brennstoffzelle ist im Fahrzeug integriert und das zentrale Antriebsaggregat der Energieumwandlung. Dabei wird der in Tanks gespeicherte Wasserstoff in komprimierter bzw. verflüssigter Form durch die Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt.<sup>62</sup> Es gibt unterschiedliche Varianten der Brennstoffzelle, jedoch beruhen alle auf dem gleichen Funktionsprinzip. Es verfügen alle Brennstoffzellentypen über eine Anode und eine Kathode, die durch einen Elektrolyten getrennt sind.<sup>63</sup> Für den Einsatz im Straßenverkehr eignet sich u. a. die PEMFC Brennstoffzelle. In dieser läuft eine chemische Umkehrung der Wasserstoffherstellung per Elektrolyse ab, indem molekularer Wasserstoff ( $H_2$ ) durch eine Membran von dem in der Umgebungsluft enthaltenen Sauerstoff getrennt wird. An der Kathode treffen diese dann wieder aufeinander und reagieren mit dem vorhandenen Sauerstoff zu Wasser, wobei Energie in Form von Wärme frei wird. Dadurch entsteht schließlich Strom. Da das Brennstoffzellenfahrzeug mit molekularem Wasserstoff betrieben wird, ist es frei von

---

<sup>58</sup> vgl. Wagner et al. (2013, S. 7f.)

<sup>59</sup> vgl. Stan (2012, S. 268)

<sup>60</sup> vgl. Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 49)

<sup>61</sup> vgl. Puls (2006, S. 82f.)

<sup>62</sup> vgl. Rüdiger (2014, S. 25)

<sup>63</sup> vgl. Puls (2006, S. 83f.)

lokalen Emissionen. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 60 bis 70 % bzw. bei Abwärmenutzung bei bis zu 90 %.<sup>64</sup>

Es bleibt zukünftig abzuwarten, ob sich für Brennstoffzellen ein Massenmarkt entwickeln kann. In Deutschland gibt es zwar Programme zur Förderung der Brennstoffzellentechnologie, allerdings wird die Technologie bezogen auf den Brennstoffzellen-LKW bisher kaum von der Industrie wahrgenommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass allen voran die Infrastruktur für Wasserstoff in Deutschland fehlt.<sup>65</sup>

### 2.2.5 Wasserstoff (Verbrennungsmotor)

Wasserstoff kann als Ressource nie knapp werden, denn atomarer Wasserstoff (H) ist eines der am häufigsten vorkommenden Elemente der Erde. Allerdings ist der atomare Wasserstoff hochreaktiv, weshalb dieser in der Regel nur in gebundener Form vorliegt. Als Treibstoff für den Verbrennungsmotor oder die Brennstoffzelle kommt vorrangig der molekulare Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in Frage. Da es kaum natürliche Vorkommen an molekularem Wasserstoff gibt, muss dieser industriell hergestellt werden.<sup>66</sup> Weltweit werden jedes Jahr Millionen Kubikmeter Wasserstoff produziert, allerdings wird lediglich ein Teil davon für bestimmte Prozesse benötigt. Damit fällt ein Großteil des Wasserstoffs als Abfallprodukt an und wird vorrangig als Brennstoff genutzt.<sup>67</sup>

Zur Herstellung von H<sub>2</sub> eignen sich unterschiedliche Verfahren, zu deren Herstellungsprozess jedoch Energie in Form von Wärme oder Elektrizität benötigt wird.<sup>68</sup> Die Herstellung von Wasserstoff ist aus regenerativen Energiequellen möglich. So könnte beispielsweise für die Herstellung von Wasserstoff der Strom verwendet werden, der in Deutschland bereits heute durch Windkraft und Solarzellen regenerativ erzeugt wird, aber nicht gebraucht wird.<sup>69</sup>

Der Vorteil des Wasserstoffs liegt vorrangig in der Unabhängigkeit von einzelnen Herkunftsgebieten, im Gegensatz zum Öl oder der seltenen Erden aus China. Dafür gestaltet sich die Speicherung des Wasserstoffs als Treibstoff herausfordernd, denn Wasserstoff ist das kleinste und damit leichteste Element im Periodensystem. Daher kann es die meisten Materialstrukturen leicht durchdringen.<sup>70</sup> Des Weiteren ist das Raumangebot zur Speicherung des Wasserstoffs am Fahrzeug gering. Im Falle des flüssigen Wasserstoffs

---

<sup>64</sup> vgl. Puls (2006, S. 85f.)

<sup>65</sup> vgl. Gnann et al. (2017, S. 47f.)

<sup>66</sup> vgl. Puls (2006, S. 70-74)

<sup>67</sup> vgl. VDA (2009 online, S. 24)

<sup>68</sup> vgl. Puls (2006, S. 70-74)

<sup>69</sup> vgl. VDA (2009 online, S. 24)

<sup>70</sup> vgl. Puls (2006, S. 70-74)

ergeben sich bezogen auf das Volumen ähnliche Schwierigkeiten. Eine Speicherung ist außerdem eine technische Herausforderung, da der Wasserstoff auf  $-252\text{ °C}$  gekühlt werden muss, um flüssig zu bleiben. Darüber hinaus ist eine mehrschichtige, komplexe Bauweise eines Wasserstofftanks mit entsprechender Isolierung notwendig, um dem hohen Druck des Wasserstoffs standhalten zu können.<sup>71</sup>

Insgesamt ist ein Wasserstofffahrzeug in einer Tank-to-Wheel-Betrachtung zwar emissionsfrei, da beim Verbrennen von Wasserstoff sowohl im Verbrennungsmotor als auch in einer Brennstoffzelle nur Wasserdampf entsteht. Somit hat Wasserstoff zwar eine vorteilhafte Ökobilanz, da keine direkten Emissionen ausgestoßen werden, jedoch müssen die indirekten Emissionen der Wasserstoffbereitstellung dabei stets berücksichtigt werden.<sup>72</sup>

## 2.3 ALTERNATIVE ANTRIEBE IM VERGLEICH

### 2.3.1 Kosten-Analyse

Beim Thema Wirtschaftlichkeit schneiden alle alternativen Antriebe im Vergleich schlecht ab, da sind sich die befragten Experten einig. Dies ist vor allem auf geringe Reichweiten, die fehlende Nutzlast sowie die fehlende Serienreife zurückzuführen. Darüber hinaus sollte die Wirtschaftlichkeit anhand der einzelnen Gewichtsklassen in Relation zur Fahrleistung betrachtet werden. Schließlich können staatliche Förderungen bzw. Subventionen die Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe positiv beeinflussen.

Zur Betrachtung der Kosten alternativer Antriebe werden die Parameter Investitionen, Tankgröße, Verbrauch sowie die Kosten für Wartung- und Instandhaltung bewertet. Ausgehend vom Jahr 2015 sollen die potenziellen Veränderungen der Parameter für das Jahr 2030 prognostiziert und beide Werte miteinander verglichen werden. Den Ausgangspunkt bilden jeweils die Nettolistenpreise der Fahrzeuge.

Die Kraftstoffkosten können wie bereits erwähnt, bei einer Jahresfahrleistung von etwa 100.000 km pro Jahr bis zu 30 % der Gesamtkosten beitragen und stellen somit den zweitgrößten Anteil an den Gesamtkosten dar. Der Kraftstoffverbrauch im LKW-Segment ist primär von der Auslastung, sowie der Nutzlast des Fahrzeugs abhängig. Da nicht immer von einer vollen Auslastung der Nutzlast ausgegangen werden kann, wird für die nachfolgende Berechnung eine Auslastung von 50 % angenommen. Die in der Prognose veranschlagten Wartungskosten beinhalten Pflege- und Reparaturkosten und werden nachfolgend für eine Nutzungsdauer von sechs Jahren bestimmt. Die Verbrauchswerte für

---

<sup>71</sup> vgl. Stan (2012, S. 240f.)

<sup>72</sup> vgl. Puls (2006, S. 70-74)

die jeweiligen Gewichtsklassen stammen aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren des Ifeu-Instituts.<sup>73</sup>

| Diesel 2015                  |         | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
|------------------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Attribut                     | Einheit | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                | Euro    | 30.000              | 40.000              | 50.000              | 65.000              | 102.000             |
| Tankgröße                    | Liter   | 75                  | 120                 | 120                 | 570                 | 570                 |
| Verbrauch                    | KWh/km  | 0,74                | 1,32                | 1,82                | 2,39                | 3,11                |
| Wartung u.<br>Instandhaltung | Euro/km | 0,0914              | 0,1718              | 0,1643              | 0,1565              | 0,1427              |
| Diesel 2030                  |         | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
| Attribut                     | Einheit | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                | Euro    | 37.470              | 49.960              | 62.450              | 81.998              | 128.673             |
| Tankgröße                    | Liter   | 75                  | 120                 | 120                 | 570                 | 570                 |
| Verbrauch                    | KWh/km  | 0,61                | 1,09                | 1,50                | 1,69                | 2,46                |
| Wartung u.<br>Instandhaltung | Euro/km | 0,0914              | 0,1718              | 0,1643              | 0,1565              | 0,1427              |

**Tabelle 1: Dieselsechnologie - Entwicklung der Parameter bis 2030**<sup>74</sup>

Die Nettolistenpreise im Jahr 2015 für Dieselfahrzeuge betragen 30.000 Euro für leichte Nutzfahrzeuge und steigen bei Sattelzugmaschinen auf bis zu 100.000 Euro an. Im Jahr 2030 wird im Vergleich dazu mit steigenden Anschaffungskosten gerechnet, wie anhand der Tabelle dargestellt ist. Dies ist auf Effizienzmaßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrads zurück zu führen.<sup>75</sup>

Bei schweren Nutzfahrzeugen wird davon ausgegangen, dass eine Kraftstoffverbrauchsreduktion um 21 % zu einer Steigerung der Kosten, abhängig von der Gewichtsklasse, von etwa 26 % führt. Damit würden beispielsweise für Sattelzugmaschinen die Preise bis 2030 von 102.000 Euro auf 129.000 Euro ansteigen. Die

<sup>73</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 78f.)

<sup>74</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, S. 78f.)

<sup>75</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 79f.)

Effizienzmaßnahmen führen bei Betrachtung der Sattelzugmaschine gleichzeitig gegenüber dem Jahr 2015 zu einem Rückgang des Kraftstoffverbrauchs von 31 l auf 100 km auf ca. 25 l auf 100 km.<sup>76</sup>

| CNG/LNG 2015                 |         | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
|------------------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Attribut                     | Einheit | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                | Euro    | 33.500              | 61.538              | 76.923              | 100.000             | 137.000             |
| Tankgröße                    | kg      |                     |                     |                     |                     |                     |
| Verbrauch                    | KWh/km  | 0,82                | 1,46                | 2,01                | 2,66                | 3,46                |
| Wartung u.<br>Instandhaltung | Euro/km | 0,1064              | 0,1998              | 0,1890              | 0,1799              | 0,1647              |
| CNG/LNG 2030                 |         | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
| Attribut                     | Einheit | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                | Euro    | 42.311              | 77.723              | 97.154              | 143.000             | 195.910             |
| Tankgröße                    | kg      |                     |                     |                     |                     |                     |
| Verbrauch                    | KWh/km  | 0,60                | 1,07                | 1,47                | 2,14                | 2,78                |
| Wartung u.<br>Instandhaltung | Euro/km | 0,0914              | 0,1718              | 0,1643              | 0,1565              | 0,1427              |

**Tabelle 2: Erdgastechnologie - Entwicklung der Parameter bis 2030**<sup>77</sup>

Die Anschaffungskosten fallen beim Erdgasfahrzeug in allen Gewichtsklassen wie bereits erwähnt höher aus als beim Diesel-LKW. Diese Kostenerhöhung ist primär auf die komplexe Tanktechnologie und die Anpassung des Motors zurückzuführen. In der Summe sind die Gesamtkosten, abhängig der Gewichtsklasse, etwa 30 % höher als beim Diesel-LKW. Darüber hinaus fallen die Wartungskosten gegenüber dem Diesel LKW ebenso etwa 15 % höher aus, wie in der Tabelle aufgezeigt.<sup>78</sup>

Ebenso wie bei der Diesel-Technologie führt der technische Fortschritt bis zum Jahr 2030 zu einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei LNG-/CNG-Fahrzeugen. Durch die

<sup>76</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 80f.)

<sup>77</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, S. 94)

<sup>78</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 93)

Verbesserung von Aerodynamik bzw. die Optimierung der Kraftstoffverbrennung, sinkt der spezifische Energieverbrauch bis zum Jahr 2030 um ca. 20 %. Gleichzeitig führen die Effizienzmaßnahmen zu steigenden Investitionen, im Vergleich zum Jahr 2015 um etwa 40 %. Dieser überdurchschnittliche Anstieg ist auf die komplexe Antriebstechnologie zurückzuführen, deren Anpassung z. B. aufgrund des Tanksystems im Vergleich zum Diesel-LKW kostenintensiver ist. Im Gegensatz dazu sinken die Wartungskosten um 13 %, womit Skaleneffekte bei Wartung- und Reparatur realisiert werden können. Die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter zeigen, dass die Betriebskosten entscheidend durch die steigenden Investitionskosten und dem sinkenden Energieverbrauch beeinflusst werden.<sup>79</sup>

Da elektrisch angetriebene Fahrzeuge bis auf wenige Ausnahmen in der leichten Gewichtsklasse nicht in den Produktportfolios der Hersteller auftauchen, gibt es keine Erkenntnisse zu dessen Listenpreisen. Basierend auf der Annahme, dass sich Elektrofahrzeuge im Wesentlichen in ihrem Antriebsstrang von einem Diesel-LKW unterscheiden, wird von vergleichbaren Investitionskosten zuzüglich Batteriekosten und Kosten für den Antriebsstrang ausgegangen.

Der Elektroantrieb hat insgesamt den niedrigsten Energieverbrauch aller Antriebsarten, was auf den hohen Wirkungsgrad zurückzuführen ist. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung d. h. Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten sind wesentlich geringer als beim Diesel-LKW. Allerdings sind die Kosten für die Batterie auf den einzelnen Kilometer heruntergerechnet, den Wartungs- und Instandhaltungskosten zuzurechnen. Damit tragen die Batteriekosten etwa 80 % der Gesamtkosten für Wartung und Instandhaltung im Jahr 2015 bei, wie in Tabelle 3 dargestellt wird.<sup>80</sup>

Im Jahr 2030 ist hingegen mit Kostensenkungen bei den Komponenten zu rechnen. Diese wirken sich jedoch nicht so stark aus, wie die sinkenden Preise für Batterien, die bis zum Jahr 2030 erwarten lassen. Damit sinken die Gesamtinvestitionen und die Wartungs- und Instandhaltungskosten. Bezogen auf den Energieverbrauch besteht beim elektrischen Antriebsstrang kaum nennenswertes Optimierungspotenzial.<sup>81</sup>

---

<sup>79</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 94)

<sup>80</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 96)

<sup>81</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 97)

| BEV 2015                     |         | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
|------------------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Attribut                     | Einheit | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                | Euro    | 72.534              | 109.439             | 141.982             | 184.617             | 250.704             |
| Tankgröße                    | kg      | 60                  | 110                 | 150                 | 190                 | 240                 |
| Verbrauch                    | KWh/km  | 0,35                | 0,63                | 0,88                | 1,09                | 1,4                 |
| Wartung u.<br>Instandhaltung | Euro/km | 0,091               | 0,168               | 0,221               | 0,256               | 0,306               |
| BEV 2030                     |         | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
| Attribut                     | Einheit | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                | Euro    | 56.141              | 78.211              | 99.066              | 130.176             | 185.177             |
| Tankgröße                    | kg      | 60                  | 110                 | 150                 | 190                 | 240                 |
| Verbrauch                    | KWh/km  | 0,308               | 0,5544              | 0,7744              | 0,9592              | 1,232               |
| Wartung u.<br>Instandhaltung | Euro/km | 0,046               | 0,087               | 0,108               | 0,117               | 0,126               |

**Tabelle 3: Elektroantrieb (Batterie) - Entwicklung der Parameter bis 2030<sup>82</sup>**

Demgegenüber verfügen Brennstoffzellenfahrzeuge über deutlich höhere Anschaffungskosten, da sich die Technologie noch in der Entwicklung befindet. Aufgrund höherer Wirkungsgrade ist der Energieverbrauch der Brennstoffzelle ca. 17 % niedriger als bei einem vergleichbaren Diesel-Fahrzeug. Im Gegensatz zu allen anderen alternativen Antriebstechnologien ist davon auszugehen, dass bis zum Jahr 2030 die Kosten mit steigendem technologischem Fortschritt sinken werden, sodass die Mehrkosten zum Diesel noch etwa 45.000 Euro betragen würden. Bei den Instandhaltungskosten ist davon auszugehen, dass die Kosten in etwa auf einem vergleichbaren Niveau zum Dieselfahrzeug liegen werden. Ein großes Kostensenkungspotenzial wird vorrangig in den Nebenkomponten gesehen. Die Lebensdauer der Brennstoffzelle wird im Jahr 2015 mit 240.000 km und im Jahr 2030 mit ca. 400.000 km angegeben, siehe Tabelle 4.<sup>83</sup>

<sup>82</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, S. 96f.)

<sup>83</sup> vgl. Wietschel et al. (2017, S. 101)

| FCEV 2015                         |              | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
|-----------------------------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Attribut                          | Ein-<br>heit | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                     | Euro         | 157.300             | 203.718             | 248.307             | 318.089             | 696.070             |
| Tankgröße                         | kW/h         | 182,08              | 326,47              | 598,41              | 804,41              | 1046,58             |
| Verbrauch                         | kWh/k<br>m   | 0,61                | 1,09                | 1,50                | 2,01                | 2,62                |
| Wartung u. In-<br>standhaltung    | Euro/<br>km  | 0,239               | 0,291               | 0,370               | 0,503               | 0,704               |
| FCEV 2030                         |              | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse | Gewichts-<br>klasse |
| Attribut                          | Einheit      | 0 - 3,5 t           | 3,51 - 7,5 t        | 7,51 - 12 t         | > 12 t              | SZM                 |
| Investitionen                     | Euro         | 54.050              | 70.000              | 94.500              | 121.057             | 174.000             |
| Tankgröße                         | kW/h         | 156,59              | 280,77              | 514,63              | 691,79              | 900,06              |
| Verbrauch                         | kWh/km       | 0,52                | 0,94                | 1,29                | 1,73                | 2,25                |
| Wartung u.<br>Instandhal-<br>tung | Euro/km      | 0,054               | 0,083               | 0,102               | 0,118               | 0,137               |

**Tabelle 4: Elektrofahrzeug (Brennstoffzelle) - Entwicklung der Parameter bis 2030<sup>84</sup>**

### 2.3.2 SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse ist eine vielseitig einsetzbare Analysemethode. Zunächst werden auf Basis der internen Analyse die Stärken und Schwächen ermittelt, bevor basierend auf einer externen Analyse die Chancen und Risiken bewertet werden. In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass zwischen den Stärken und Schwächen sowie den Chancen und Risiken nicht zwingend ein Kausalverhältnis besteht. Die SWOT-Analyse stellt ein geeignetes Verfahren dar, um die aus unterschiedlichen Erhebungsmethoden gewonnenen Erkenntnisse detailliert zusammen zu stellen.

Im Rahmen dieses Beitrags wurde zunächst für die ausgewählten alternativen Antriebe eine SWOT-Analyse basierend auf Sekundärliteratur erstellt. Darauf aufbauend wurden die anhand der Experteninterviews gewonnenen Erkenntnisse ebenfalls in eine SWOT-Analyse

<sup>84</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wietschel et al. (2017, 101f.)

eingearbeitet. Im nächsten Schritt wurden diese beiden SWOT-Analysen in zusammenfassenden Tabellen (Tabelle 4-9) dargestellt.

Die nachfolgenden SWOT-Analysen umfassen die praktischen und theoretischen gewonnen Erkenntnisse und betrachten anhand der beiden Dimensionen die untersuchten Antriebstechnologien. Bei der Auseinandersetzung mit dem Thema alternative Antriebe können diese Erkenntnisse für Unternehmen herangezogen werden und abhängig von der gewählten Untersuchung entsprechend bewertet werden.

| <b>Dieselseltechnologie</b>  |   |
|--|---|
| Stärken  | Schwächen   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zuverlässigkeit und Reichweite</li> <li>- Ausgereifte und massentaugliche Technik</li> <li>- Erfahrungswerte der Mitarbeiter zur Technologie vorhanden</li> <li>- Antriebsart, die sich am wirtschaftlichsten darstellt</li> <li>- Instandhaltung/Reparatur zum Großteil hausintern möglich</li> <li>- Hohe Zuladung möglich</li> <li>- Hohe Verfügbarkeit und Verlässlichkeit sowie große Vielfalt an unterschiedlichen Fahrzeugtypen und Konfigurationen</li> <li>- Energiedichte des Kraftstoffs: kleiner und leichter Tank = hohe Reichweite (ca. 1000 km)</li> <li>- Standardantriebstechnik für alle Nutzfahrzeuge</li> <li>- Flächendeckendes Versorgungsnetz sowie Infrastruktur z. B. Tankstellen vorhanden</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrverbote in den Innenstädten führen heute bereits zu Einschränkungen/ zukünftig ist mit weiteren Ausweitungen der Fahrverbote zu rechnen</li> <li>- Schadstoffemissionen und Lärm</li> <li>- Alle Komponenten am Fahrzeug sind auf den Dieselantrieb ausgerichtet wie z. B. die Kühlung</li> <li>- Weitere motorseitige Optimierung begrenzt bzw. sehr kostenintensiv</li> <li>- Kraftstoffpreise vom internationalen Rohölpreis abhängig</li> <li>- Wirkungsgrad liegt bei 40 bis 45 %</li> <li>- Aufwendige Abgasnachbehandlung notwendig um aktuelle Grenzwerte einhalten zu können</li> </ul>   |
| Chancen  | Risiken   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Durch Forschung bzw. Weiterentwicklung könnte der Diesel-Antrieb emissionsarmer werden</li> <li>- Alternative Antriebe bisher nicht ausgereift bzw. konkurrenzfähig im Alltag</li> <li>- Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus</li> <li>- Nutzung von Effizienzpotenzialen u. a. Hybridisierung oder Abwärmenutzung zur Effizienzverbesserung</li> <li>- Beimischung von synthetischen Kraftstoffen zur Minderung der THG-Emissionen (Well-to-Wheel)</li> <li>- Starkes Interesse der OEMs an einer wichtigen Rolle des Diesels in Zukunft, aufgrund umfangreichen Know-Hows und hoher Wertschöpfung bei Motorenproduktion</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dieselfahrverbote in den Innenstädten bzw. Verschärfung der zulässigen Schadstoffemissionen</li> <li>- Abhängigkeit vom Öl – endliche Ressource</li> <li>- Effiziente Technologie, die in Verruf geraten ist, aufgrund der Fahrverbote</li> <li>- Endlichkeit fossiler Energieträger bzw. Einschränkungen basierend auf wirtschaftlichen und politischen Restriktionen</li> <li>- Energiesteuern und schwankender Ölpreis</li> <li>- Fahrverbote für Dieselfahrzeuge sowie verschärfte Umweltauforderungen</li> <li>- Wirtschaftliche Nutzung von alternativen Antrieben</li> <li>- Einführung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten für schwere Nutzfahrzeuge</li> </ul> |

**Tabelle 5: SWOT-Analyse Dieselseltechnologie <sup>85</sup>**

<sup>85</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 41 / ifeu (2017 online, S. 19f.) sowie Experteninterviews

| <b>Elektroantrieb (Batterie)</b>  |   |
|---|---|
| <b>Stärken</b>  | <b>Schwächen</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geräuscharm und geringe Schadstoffemissionen</li> <li>- Energierückgewinnung durch Bremsvorgang</li> <li>- Vorteilhaft im Nahverkehr</li> <li>- Zukunftsweisende Technologie</li> <li>- Unmittelbare Kraftübertragung und hoher Wirkungsgrad sowie Rekuperation von Bremsenergie</li> <li>- Zuverlässigkeit des Elektromotors siehe den Einsatz bei Straßenbahnen</li> <li>- Positives Image</li> <li>- Geringe Wartungskosten / niedrige variable Kosten pro Kilometer</li> <li>- Hohes Drehmoment und gute Fahrdynamik</li> <li>- Potenzial zur effizienten Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Ausfallzeiten aufgrund fehlender Serienreife</li> <li>- Hohe Anschaffungskosten, da keine Serienproduktion</li> <li>- Fast die gleichen Betriebskosten wie ein Sattelzug jedoch deutlich geringere Nutzlast aufgrund des Batteriegewichts</li> <li>- Kurze Reichweite von ca. 300 bis 400 Km daher im Fernverkehr schwer einzusetzen</li> <li>- Lange Ladezeit der Akkus daher lange Betankungszeit</li> <li>- Die Kosten eines Batteriesatzes sehr hoch (etwa 145.000 Euro)</li> <li>- Seltene Erden werden in den Batterien verbaut</li> <li>- Geringe Lebensdauer der Akkus</li> <li>- Marktreife fehlt, daher vorrangig Prototypen auf dem Markt</li> </ul> |
| <b>Chancen</b>  | <b>Risiken</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Neue Batteriegeneration, um Gewicht zu reduzieren und höhere Reichweiten zu erzielen sowie die Ladezeit zu reduzieren</li> <li>- Infrastrukturausbau: Ladestationen an Be- bzw. Entladestationen</li> <li>- Oberleitungen im Stadtverkehr bzw. auf Autobahnen, um die Fahrzeuge dauerhaft mit Strom zu versorgen</li> <li>- Durch Serienproduktion können die Kosten gesenkt werden</li> <li>- Potenzial bei planbaren, täglichen Fahrleistungen in festgelegten Einsatzgebieten</li> <li>- Mögliches Potenzial zur Einsparung von THG-Emissionen bei entsprechendem oberleitungselektrischen Fahranteil auf der Langstrecke</li> <li>- Einfahrt in zukünftig evtl. emissionsbeschränkte Bereiche z. B. Innenstädte möglich</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Strom aus fossilen Energieträgern wird als Grünstrom angeboten</li> <li>- Wirtschaftliche Abhängigkeit von seltenen Erden, die zur Herstellung der Batterien benötigt werden</li> <li>- Batterie muss unter Gefährdungsgesichtspunkten betrachtet werden – ist ein brennen oder überhitzen möglich?</li> <li>- Abhängigkeit der Technologieverbreitung von der Weiterentwicklung der Batterienabhängig</li> <li>- Dynamisches Marktumfeld in der Logistik erschwert langfristige Einsatzplanung der Fahrzeuge durch potenzielle Nutzer</li> <li>- Anreize für Investitionen in alternative Antriebe derzeit noch begrenzt</li> </ul>                                 |

**Tabelle 1: SWOT-Analyse Elektroantrieb (Batterie)**<sup>86</sup>

<sup>86</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 53 / ifeu (2017 online, S. 26f.) sowie Experteninterviews

| <b>Elektroantrieb (Brennstoffzelle)</b>  |  |
|--|--|
| <b>Stärken</b>   | <b>Schwächen</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kann Nah- und Fernverkehr abdecken</li> <li>- Geräuscharm und emissionsfrei</li> <li>- Schnelle Betankung</li> <li>- Reichweite höher als beim reinen E-LKW</li> <li>- CO<sub>2</sub>-neutral</li> <li>- Können Beitrag zu emissionsfreier Mobilität leisten / lokal emissionsfrei</li> <li>- Hohe Reichweite (mehrere 100 km) sowie geräuscharmer Antrieb</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alltagstauglichkeit unter den alternativen Antrieben bisher nicht erreicht -trotz langer Forschungszeit</li> <li>- Lebensdauer einer Brennstoffzelle beträgt etwa 5 Jahre</li> <li>- Austausch der Brennstoffzelle sehr kostenintensiv</li> <li>- Reichweite beträgt etwa 250 km</li> <li>- Hohe Kilometerleistung notwendig, um wirtschaftlich zu sein</li> <li>- Schlecht ausgebaute Tankstelleninfrastruktur</li> <li>- Neben hohen Anschaffungskosten fallen hohe Betriebskosten an</li> <li>- Im LKW-Segment kaum erprobt und weit vom wirtschaftlichen Einsatz im Straßengüterverkehr entfernt</li> <li>- Kosten der Brennstoffzelle signifikant höher im Vergleich zu anderen Antriebsarten</li> <li>- Fehlende Betankungsinfrastruktur</li> </ul> |
| <b>Chancen</b>   | <b>Risiken</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mögliche Alternative, sofern positive Testfahrten in der Praxis vorliegen</li> <li>- Erhebliches technologisches Verbesserungspotenzial, um langfristig wettbewerbsfähig zu werden</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abhängig von seltenen Erden bzw. Metallen</li> <li>- Verfügbarkeit und Kosten von Edelmetallen am Weltmarkt</li> <li>- Fehlende Anreize für Investitionen</li> </ul>  |

Tabelle 7: SWOT-Analyse Elektroantrieb (Brennstoffzelle)<sup>87</sup>

<sup>87</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 54 / ifeu (2017 online, S. 24f.) sowie Experteninterviews

| <b>Erdgastechnologie</b>  |   |
|---|---|
| <b>(CNG und LNG werden nachfolgend gemeinsam betrachtet)</b>  |   |
| Stärken   | Schwächen   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen und weniger Lärm</li> <li>- LNG hat eine hohe Reichweite (ca. 1500 Km) und ist daher mit dem Diesel vergleichbar</li> <li>- Vorhandene Tankstelleninfrastruktur bei CNG</li> <li>- Kraftstoffgewinnung aus Biogasen möglich</li> <li>- Steuerbefreiung und Fördermöglichkeiten z. B. Mautbefreiung</li> <li>- Greifbare Alternative zum Diesel im Fernverkehr</li> <li>- „günstigste“ Alternative Antriebsvariante bezogen auf die Reinvestitionen</li> <li>- Marktreife bereits erreicht</li> <li>- Bis zu 20% weniger CO<sub>2</sub> Ausstoß im Vergleich zum fossilen Diesel und damit weniger Aufwand der Abgasnachbehandlung</li> <li>- Beimischung von Biogas verbessert die CO<sub>2</sub>-Bilanz (Well-to-Wheel)</li> <li>- THG-Emissionen ca. 5 bis 20 % geringer als beim Diesel (Well-to-Wheel)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Infrastruktur des Tankstellennetzes (LNG) im In- und Ausland kaum vorhanden / aktuell nur drei LNG Tankstellen in Deutschland</li> <li>- Höherer Verschleiß vorrangig im Vergleich zum Diesel-LKW, daher höhere Instandhaltungskosten</li> <li>- Höhere Anschaffungskosten als beim Diesel</li> <li>- wenige Fahrzeugkategorien vorhanden, Entwicklung nimmt Zeit in Anspruch</li> <li>- Reichweite niedrig (300 bis 400 Km bei CNG)</li> <li>- Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Diesel geringer</li> <li>- Druckprobleme beim Tanken im LKW-Segment</li> <li>- Hoher Energieaufwand, der zur Verflüssigung des Gases benötigt wird</li> <li>- Größere Tanks im CNG Bereich erforderlich für höhere Reichweite, führt letztlich zu fehlender Wirtschaftlichkeit aufgrund fehlender Nutzlast</li> <li>- Abhängigkeit des Gaspreises am Weltmarkt</li> <li>- Bisher nur wenige Hersteller mit verhältnismäßig teuren Fahrzeugen auf dem Markt</li> <li>- Kosten der Antriebstechnik und Wartungskosten fallen höher aus im Vergleich zum Diesel</li> <li>- Reduktion der Nutzlast durch schwere Tanks</li> </ul> |
| Chancen   | Risiken   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausbau Infrastruktur z. B. Bau von LNG-Tankstellen</li> <li>- Einführung von Dual-Fuel-Technik für schwere Nutzfahrzeuge</li> <li>- Geringere Kraftstoffkosten im Vergleich zum Diesel</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unter Umweltgesichtspunkten etwa 20 % vorteilhafter gegenüber dem Diesel, jedoch nicht wirklich nachhaltiger</li> <li>- Wenn der Dieselantrieb noch „sauberer“ werden sollte hinfällig</li> <li>- Steuervergünstigungen könnten nach 2020 wegfallen</li> <li>- Verfügbarkeit vorhandener Erdgasreserven</li> <li>- Einsatz im Sinne des Klimaschutzes nur bei stärkerer Dekarbonisierung der Vorkette möglich z. B. durch die Gaserzeugung aus erneuerbaren Energien</li> </ul>  |

**Tabelle 2: SWOT-Analyse Erdgastechnologie <sup>88</sup>**

<sup>88</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ (2019) / Shell Nutzfahrzeug-Studie (2016 online, S. 47 / ifeu (2017 online, S. 21f.) sowie Experteninterviews

| <b>Wasserstoffverbrennungsmotor</b>   |   |
|---|---|
| Stärken   | Schwächen   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Verbrennungsmotor mit einer Reichweite von bis zu 800 km</li> <li>- Verbrennungsmotor hat sich in der Vergangenheit bereits bewährt</li> <li>- Wasserstoff steht reichlich zur Verfügung</li> <li>- Kann als Speichermedium regenerativer Energieträger genutzt werden</li> <li>- Umweltverträglichkeit und „saubere Energie“</li> <li>- Umbau bestehender Motoren möglich</li> <li>- Niedrige Lärmemissionen</li> <li>- Der Dieselantrieb ist als Benchmark zum Wasserstoffmotor zu sehen, da sich beide Fahrzeuge sehr ähnlich sind</li> <li>- Kurze Betankungszeit</li> <li>- Gesamtumweltbilanz am „saubersten“, da keine seltenen Erden / Stoffe benötigt werden</li> <li>- Inklusive Mautkosten insgesamt günstiger als der Diesel</li> <li>- Lokal emissionsfrei, da keine Abgase, nur Wasserdampf entsteht</li> <li>- Rohstoff Wasser ist reichlich vorhanden</li> <li>- Hoher Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Technik im LKW-Segment noch nicht erprobt und daher auch nicht vollständig ausgereift</li> <li>- Bisher nur Prototypen vorhanden</li> <li>- Sicherheitskomponenten zur Lagerung</li> <li>- Anschaffungskosten etwas höher als beim Diesel – etwa jedoch auf dem Niveau eines Erdgasfahrzeugs</li> <li>- Neue zukunftsweisende Technologie mit einem Mehrpreis</li> <li>- Etwas mehr Bauraum als beim Diesel wird benötigt, jedoch weniger als beim E-LKW</li> <li>- Sehr energieaufwändige Herstellung</li> <li>- Keine flächendeckende Infrastruktur vorhanden z. B. fehlende Tankstellen</li> <li>- Hohe Kosten für Drucktanks zur Speicherung des Wasserstoffs</li> </ul> |
| Chancen   | Risiken   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vielversprechender alternativer Antrieb, der noch praxisnah getestet werden muss</li> <li>- Einsatz auch im Schiff- und Luftverkehr möglich, daher Synergieeffekte zu erwarten</li> <li>- Technologie kann mittel- bis langfristig wettbewerbsfähig werden</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bisher in der Praxis nicht erprobt, daher keine verlässlichen Daten zum Kraftstoffverbrauch, Lebensdauer etc.</li> <li>- Fehlende Anreize für Investitionen</li> <li>- Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur</li> </ul>  |

**Tabelle 9: SWOT-Analyse Wasserstoff<sup>89</sup>**

<sup>89</sup> Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: DVZ 2019 / Shell Nutzfahrzeug-Studie 2016 online:5 / ifeu 2017 online: 24f. sowie Experteninterviews

### 3 Schlussfolgerungen

Der Bestand in den verschiedenen Gewichtsklassen ist unterschiedlich. Zusammenfassend lässt sich festhalten, je höher das Gesamtgewicht eines LKWs, desto weniger verbreitet sind alternative Antriebe. Die verschiedenen alternativen Antriebe wurden im Rahmen des vorliegenden Beitrags anhand eines Stärken-Schwächen- bzw. Chancen-Risiken-Profiles betrachtet.

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keinen „Königsweg“ bezogen auf alternative Antriebe, vielmehr müssen dem Bedarf entsprechende Antriebsvarianten für Unternehmen gefunden werden. Die Frage der Wahl der Antriebsart ist abhängig vom Einsatzgebiet, der Reichweite sowie der vorhandenen Tankstelleninfrastruktur und letztlich von der Marktreife der Technik. Aus heutiger Sicht kann Unternehmen nur geraten werden, alternative Antriebe unter realen Bedingungen zu testen, um sich das benötigte Know-How im Umgang mit alternativen Antrieben aneignen zu können.

Gegenwärtig liegt der Anteil an alternativen Antrieben bei etwa 4%. In Zukunft ist davon auszugehen, dass sich dieser deutlich erhöhen und sich der Mobilitätssektor der schweren und leichten Nutzfahrzeuge innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahren verändern wird. Dabei wird der Dieselantrieb mittelfristig sicherlich eine wichtige Rolle spielen, es bleibt daher abzuwarten, welche Antriebsart sich für welches Unternehmen in welchen Einsatzgebiet gegenüber dem Benchmark durchsetzen wird. Erdgas stellt bereits heute eine Art Brückentechnologie dar, während sich der Elektroantrieb auf dem besten Weg zur Serienreife befindet. Demgegenüber ist Wasserstoff als Antriebsvariante zumindest in der Praxis noch wenig erforscht. Erste Prototypen befinden sich aktuell in Planung. Während der Elektroantrieb über einen hohen Wirkungsgrad verfügt, hat sich der Dieselantrieb die letzten 100 Jahre bewährt. Der Wasserstoffverbrennungsmotor basiert auf dieser Technologie, ist hingegen lokal emissionsfrei. Die Brennstoffzelle überzeugt durch die höhere Reichweite im Vergleich zum E-Antrieb.

Schließlich verfügt jede Antriebstechnologie über Stärken und Schwächen, sowie daraus resultierende Chancen und Risiken. Daher ist in Zukunft von einem Technologiemix auszugehen. Die wesentlichen Argumente, ob sich eine Technologie am Markt etablieren kann ist primär von der Infrastruktur sowie der Marktreife abhängig. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Anspruchsgruppen die Marktreife durch staatliche Förderungen wie z.B. Mauteinsparungen positiv bzw. negativ beeinflussen können. Gerade diese Subventionen stellen für Unternehmen einen Anreiz dar, auf alternative Antriebe zu setzen. Denn durch Förderungen, Anreize oder geringe Kraftstoffkosten können sich Fahrzeuge mit alternativen Antrieben über die entsprechende Laufzeit schon heute, trotz der höheren Anschaffungskosten amortisieren, sofern eine entsprechende Marktreife vorhanden ist.

## Quellenverzeichnis

- Amtsblatt der EU (2014 online): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0253> (aufgerufen am 06.04.2019).
- AMZ (2017 online): [https://www.amz-sachsen.de/wp-content/uploads/20170513\\_Studie.pdf](https://www.amz-sachsen.de/wp-content/uploads/20170513_Studie.pdf) (aufgerufen am 10.04.2019).
- AZE (o.J. online): <https://www.autoteile-aze.de/guter-stoffwechsel.html> (aufgerufen am 11.04.2019).
- BAG (2018 online): [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/kurzfristprognose-sommer-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/kurzfristprognose-sommer-2018.pdf?__blob=publicationFile) (aufgerufen am 06.04.2019).
- Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (1997): *Alternative Antriebstechnologien: ein Beitrag zur Luftreinhaltung*, 1.Auflage, München, 1997.
- Berekoven, Ludwig (1995): *Erfolgreiches Einzelhandelsmarketing: Grundlagen und Entscheidungshilfen*, 2.Auflage, München, 1995.
- BMU (o.J. online): [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutz\\_in\\_zahlen\\_klimaziele\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_in_zahlen_klimaziele_bf.pdf) (aufgerufen am 04.04.2019).
- BMVI (2014 online): <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2014/044-dobrindt-verkehrsprognose2030.htm> (aufgerufen am 06.04.2019).
- Corradini, Roger / Krimmer, Alex (2003): *Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien: Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zu konventionellen Systemen für den PKW-Bereich*, 1.Auflage, München, 2003.
- Dingel, Oliver (2004): *Gasfahrzeuge: Die passende Antwort auf die CO<sub>2</sub>-Herausforderung der Zukunft?*, 1.Auflage, Essen, 2004.
- DEUTZ (2019 online): <https://www.deutz.com/media/pressemitteilungen/deutz-bereitenden-weg-fuer-co2-freie-mobilitaet-mit-wasserstoffantrieben/> (aufgerufen am 19.04.2019).
- DVZ (2018): Nr. 31-35 vom 31.08.2018: 4-7.
- DVZ (2019): Nr. 5 vom 30.01.2019.
- Europäisches Parlament (2014 online): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0285&from=DE> (aufgerufen am 06.04.2019).
- Eurotransport (2018 online): <https://www.eurotransport.de/artikel/keine-maut-fuer-gasfahrzeuge-verkehrsausschuss-korrigiert-mautgesetz-10476094.html> (aufgerufen am 06.04.2019).

- Fraunhofer (2018 online): [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2018/Thesen\\_Zukunft\\_StrG%C3%BCterverkehr.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2018/Thesen_Zukunft_StrG%C3%BCterverkehr.pdf) (aufgerufen am 11.04.2019).
- Global Truck Study (2016 online): <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/operations/articles/global-truck-study-2016.html#> (aufgerufen am 08.04.2019).
- Gnann, Till / Wietschel, Martin / Kühn, Andre / Thielmann, Axel / Sauer, Andeas / Plötz, Patrick / Moll, Cornelius (2017): Teilstudie "Brennstoffzellen-Lkw: Kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential": wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie / Autorinnen und Autoren: Fraunhofer ISI; 1. Auflage, Karlsruhe, 2017.
- Ifeu (2017 online): [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw\\_SWOT-Analyse.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_SWOT-Analyse.pdf) (aufgerufen am 08.04.2019).
- IHK (2013 online): [https://www.frankfurt-holm.de/sites/default/files/managed/daten\\_und\\_fakten\\_zu\\_staedtischen\\_wirtschaftsverkehren\\_holm.pdf](https://www.frankfurt-holm.de/sites/default/files/managed/daten_und_fakten_zu_staedtischen_wirtschaftsverkehren_holm.pdf) (aufgerufen am 30.10.2018).
- Keuschen, Thomas / Klumpp, Matthias (2011): Green Logistics Qualifikation in der Logistikpraxis, Band 16, Essen, 2011.
- Lange, Volker / Auffermann, Christiane (2016): Technologie-Screening Handelslogistik: Perspektiven erkennen – Effizienz steigern, 1. Auflage, München, 2016.
- NOW (2017 online): [https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/3-Publikationen/6-urbaner-wirtschaftsverkehr/180206\\_21x21\\_broschüre\\_wirtschaftsverkehr\\_ansicht-1.pdf](https://www.starterset-elektromobilitaet.de/content/3-Infothek/3-Publikationen/6-urbaner-wirtschaftsverkehr/180206_21x21_broschüre_wirtschaftsverkehr_ansicht-1.pdf) (aufgerufen am 09.04.2019).
- Percy, Michalak (2009): Ökologische Logistik: Analyse von Wirkungszusammenhängen und Konzeption von ökologischen Wettbewerbs- und Logistikstrategien, 1. Auflage, Hamburg, 2009.
- Puls, Thomas (2006): Alternative Antriebe und Kraftstoffe: Was bewegt das Auto von Morgen?, 1. Auflage, Köln, 2006.
- Rüdiger, David (2014): Studie zu alternativen Antriebsformen im Straßengüterverkehr: Status Quo und Entwicklungsperspektiven, 1. Auflage, Stuttgart, 2014.
- Shell Nutzfahrzeugstudie (2016 online): <https://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-nutzfahrzeug-studie.html> (aufgerufen am 05.04.2019)
- Schröder, Dustin (2017): Technisch-wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen in der Distribution von Konsumgütern, Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin, Band 37, Berlin, 2017.
- Schulte, Christof (2017): Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain, 7. Auflage, München, 2017.

- Stan, Cornel (2012): *Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*, 3.Auflage, Berlin, 2012.
- Umweltbundesamt (2018 online): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1> (aufgerufen am 08.04.2019).
- VDA (o.J. online): <https://www.vda.de/de/themen/wirtschaftspolitik-und-infrastruktur/verkehr/gueterverkehr.html> (aufgerufen am 05.04.2019).
- VDA (2009 online): <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/antriebe-und-kraftstoffe-der-zukunft.html> (aufgerufen am 09.04.2019).
- Vry, Wolfgang (2008): *Beschaffung und Logistik im Handelsbetrieb*, 1.Auflage, Ludwigshafen, 2008.
- Wachter, Katharina (2016): *Wettbewerbsstrategien zur erfolgreichen Markteinführung mit Fahrzeugen mit innovativen Antriebstechnologien*, 1.Auflage, Hamburg, 2016.
- Wagner, Henning / Maier, Reinhard / Schubert, Jürgen (2013): *Alternative Antriebe – E-Mobilität: Wie wird man Fachkundiger für Arbeiten an Hochvolt-Systemen im Kraftfahrzeug?*, 1.Auflage, Konstanz, 2013.
- Wietschel, Martin (2017): *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potenziale des Hybrid-Oberleitungs-LKW: Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie Fraunhofer ISI/IML*, 1.Auflage, Karlsruhe, 2017.
- zf-zukunftsstudie (2012 online): [https://www.zf-zukunftsstudie.de/wp-content/uploads/2012/08/ZF\\_LKW\\_Studie\\_A.pdf](https://www.zf-zukunftsstudie.de/wp-content/uploads/2012/08/ZF_LKW_Studie_A.pdf) (aufgerufen am 04.04.2019).

**Kommentar zu dem Beitrag:  
Grüne Logistik: Eine Untersuchung ausgewählter  
alternativer Antriebstechnologien im Güterverkehr  
(von Patrick Siegfried und Daniel Strak)\***

VON CHRISTIAN ARNOLD

Der Beitrag behandelt ein aktuelles und praxisrelevantes Themengebiet, das eine erkennbar relevante Verbindung zu dem Bereich des Nachhaltigkeitsmanagements aufweist. Als Ziel wird von den Autoren angegeben, die Stärken und Schwächen sowie die Chancen und Risiken alternativer Antriebstechnologien aus verschiedenen Perspektiven zu beleuchten.

Es finden sich ausführlich abgefasste und gelungene Überblicke zu den Themengebieten Güterverkehr und Antriebstechnologien, die den Einstieg in die Thematik erleichtern und als Grundlage für einen weiterführenden Diskurs dienen.

Der Vergleich der Antriebstechnologien erfolgt mithilfe von Kosten- und SWOT-Analysen. Die Auswahl der Analysemethoden ist intuitiv nachvollziehbar und ordentlich begründet. Gleiches gilt für die Auswahl der Parameter (lt. Verfasser) im Rahmen der Kosten-Analyse.

Die Kosten- Analysen sind verständlich aufbereitet und gestatten einen zügigen Überblick der betrachteten Problemstellung. Die Ergebnisse der SWOT-Analysen werden tabellarisch dargestellt und dokumentieren die Erkenntnisse aus multiplen Quellen in adäquater Form.

Die Schlussfolgerungen sind prägnant abgefasst. Es finden sich Anregungen und Prognosen, die Folgediskurse stimulieren.

Ich empfehle eine Veröffentlichung und beglückwünsche die Autoren zur vorliegenden Ausarbeitung.

---

\* Die Qualitätsprüfung / -sicherung des Beitrags „Grüne Logistik: Eine Untersuchung ausgewählter alternativer Antriebstechnologien im Güterverkehr“ von Patrick Siegfried und Daniel Strak erfolgte gemäß dem auf der Homepage der Zeitschrift für Verkehrswissenschaft dargestellten (Alternativ-)Ansatz zur transparenten Qualitätsprüfung und -diskussion (siehe [www.z-f-v.de](http://www.z-f-v.de) → „Einreichung von Beiträgen und Begutachtung / Qualitätsprüfung“). Dabei wird von einem fachkundigen Wissenschaftler eine zustimmende Stellungnahme zur Veröffentlichung des Beitrags eingeholt und zusammen mit dem Beitrag veröffentlicht.

*Anschrift des Verfassers:*

Prof. Dr. Christian Arnold  
hwtk Baden-Baden  
Jägerweg 8  
76532 Baden-Baden  
E-Mail: christian.arnold@hwtk.de