

Alexander Kreck; Marco Maibach; Jan-Sem Nillmaier;  
Wolfgang Schulz-Nigmann; Lena Weber

## **Elektroauto gleich „Nullemissionsauto“?**

Eine Bewertung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von  
Elektrofahrzeugen unter realen Bedingungen



### **WI-[Reports]**

– Arbeitspapiere des Fachbereichs Wirtschaftsingenieurwesen –

---

Nr. 005

ISSN: 2568-0803

## Impressum

**Reihe:** WI-[Reports] – Arbeitspapiere Wirtschaftsingenieurwesen

**Herausgeber:** Fachbereich 14 der THM

vertreten durch den

**Herausgeberbeirat:** Prof. Dr. rer. oec. Claus Hüselmann  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz-Nigmann  
THM Technische Hochschule Mittelhessen  
Fachbereich 14 Wirtschaftsingenieurwesen  
Wilhelm-Leuschner-Straße 13  
61169 Friedberg  
<https://www.thm.de/wi/>

Die Arbeitspapiere der Reihe WI-[Reports] sind einschließlich aller Abbildungen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urhebergesetzes ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmung, Einspeicherung sowie Be- und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Copyright FB 14 THM

---

---

## WI-[Report] Nr. 005

---

- Autoren:** Alexander Kreck; Marco Maibach; Jan-Sem Nillmaier; Wolfgang Schulz-Nigmann; Lena Weber
- Titel:** Elektroauto gleich „Nullemissionsauto“?  
Eine Bewertung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Elektrofahrzeugen unter realen Bedingungen
- Zitation:** Kreck, A.; Maibach, M.; Nillmaier, J.-S.; Schulz-Nigmann, W.; Weber, L. (2019): Elektroauto gleich „Nullemissionsauto“?. Eine Bewertung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Elektrofahrzeugen unter realen Bedingungen, WI-[Report] Nr. 005, Friedberg, THM 2019, ISSN 2568-0803
- Kurzfassung:** Das Thema Mobilität wird derzeit öffentlich stark diskutiert. Einen besonderen Schwerpunkt stellt dabei die Wahl der Antriebstechnik dar. Konventionelle Arten der Mobilität werden infrage gestellt. Seit dem sog. „VW-Abgasskandal“ ist insbesondere der Dieselmotor öffentlich in Verruf geraten. Umweltverbände suggerieren, Dieselmotoren seien „dreckig“ und eine schnelle Abkehr von dieser Technologie sei notwendig. Vor allem der Ausstoß von Stickoxiden und Feinstaub wird dem Dieselmotor dabei angelastet. Politisch als zukunftsweisende Alternative zum Verbrenner postuliert, wird das Elektroauto in der Werbung häufig als „Null-Emissions-Auto“ beworben. Elektroautos seien quasi CO<sub>2</sub>-emissionsfrei, wenn der elektrische Strom zum „Betanken“ der Fahrzeuge nur aus erneuerbaren Energien stamme. Doch gilt dieser „Umweltvorteil“ des Elektroautos gegenüber Fahrzeugen mit klassischen Verbrennungsmotoren auch beim heutigen Strommix in Deutschland? Diesen Sachverhalt nehmen die Autoren dieser Arbeit zum Anlass, die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die ein Elektroauto während seines Lebenszyklus verursacht, zu untersuchen und mit den Emissionen von benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeugen zu vergleichen.
- Die Autoren ziehen ein Resümee mit Empfehlungen zur Führung der öffentlichen Diskussion. Es wird ein Ausblick zu den energiepolitischen Konsequenzen eines ausschließlich auf Elektromobilität basierenden Individualverkehrs gegeben.
- Schlagwörter (dt.):** **Elektromobilität, Mobilität der Zukunft, CO<sub>2</sub>-Emission, Abgasskandal, Dieselgate**
- Schlagwörter (en.):** **Electromobility, mobility of the future, CO<sub>2</sub>-emission, exhaust scandal, diesel gate**
-

---

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	iv
Einleitung.....	1
Vergleich der Prüfverfahren.....	2
Erstellung des Fahrzyklus und Vorgehen bei der Messung.....	5
Messergebnisse und Auswertung.....	7
Elektrofahrzeug.....	7
Diesel und Benzinler.....	10
Vergleich der Messergebnisse.....	12
Fazit der Untersuchungen.....	13
Ausblick.....	15
Literaturverzeichnis.....	17

---

## Einleitung

Aufgrund des Klimawandels, verursacht durch den erhöhten CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch die Industrialisierung, wird gerade in den letzten 20 bis 25 Jahren nach Wegen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gesucht. Nachdem der Fokus zu Beginn auf dem Gebäudesektor gelegen hat, rückt in der letzten Zeit vor allem der Verkehr in den Fokus der Bemühungen. Verstärkt durch den Dieselskandal, auch als VW-Abgasskandal oder Dieselgate bezeichnet, bei dem durch manipulierte Abgaswerte die Emissionssituation verschleiert werden sollte, wird vor allem das Elektrofahrzeug als Alternative diskutiert.

Prominente Naturwissenschaftler, wie Ernst Ulrich von Weizsäcker, Präsident der auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Organisation „Club of Rome“, warnen vor vorschnellem Aktionismus und einer übereilten Verteufelung des Verbrennungsmotors.<sup>1</sup> Weizsäcker warnt vor den Folgen, wenn Elektroautos nicht ausschließlich mit Ökostrom, sondern mit Energieformen des aktuellen deutschen Strommix betrieben werden.<sup>2 3</sup>

In der Werbung der Autokonzerne wird das Elektroauto als „Nullemissionsauto“ beworben. In den Datenblättern der Fahrzeuge wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß mit 0 g/km angegeben.

Stimmen diese Werbeaussagen, oder wird trotz der negativen Erfahrungen beim Dieselskandal hier wieder über die tatsächliche Emissionssituation hinweggetäuscht?

Eine Gruppe von Masterstudierenden der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM), Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen ist dieser Frage im Rahmen ihrer Case-Study nachgegangen. Dazu ist nicht nur die Betrachtung des Fahrzeugbetriebes relevant, sondern der gesamte Lebenszyklus, um auch eine Aussage zur Nachhaltigkeit machen zu können. Die Ergebnisse basieren auf Literaturrecherchen und einem realen Feldtest, um den realen Energiebedarf im Betrieb und bei der Herstellung zu ermitteln und damit eine Aussage zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß vornehmen zu können.

Es wurde daher ein Feldtest mit einem Elektro-, Benzin- und Dieselpersonenkraftwagen mit einer vergleichbaren Masse und Luftwiderstand durchgeführt. Die zu erwartenden Emissionen bei Herstellung inkl. Akkuherstellung, Betriebszeit und Entsorgung werden auf Basis von Studien ermittelt, damit eine Betrachtung des gesamten Lebenszykluses möglich wird.

Ziel dieser Arbeit ist es jedoch nicht, exakte Werte der CO<sub>2</sub>-Emission angeben zu können, sondern die Größenordnungen und das Verhältnis der Emissionen zueinander darzustellen.

---

<sup>1</sup> vgl. dpa, 2017.

<sup>2</sup> vgl. dpa, 2017.

<sup>3</sup> vgl. Decker, 2017

## Vergleich der Prüfverfahren

Um das Ziel der vorliegenden Arbeit erreichen zu können, ist die Entwicklung eines Fahrzyklus notwendig, anhand dessen Kraftstoff- beziehungsweise Strombedarf ermittelt werden sollen. Um möglichst realitätsnahe Messergebnisse zu ermitteln, wird ein Fahrzyklus präferiert, der die Bedingungen im realen Straßenverkehr möglichst präzise abbildet. Um einen solchen Fahr- bzw. Prüfzyklus zu erstellen, werden nachfolgend die in Europa verbreiteten und zugelassenen Fahrzyklen vorgestellt.

Ein offizieller Fahrzyklus in Europa ist der sogenannte „**Neue Europäische Fahr-Zyklus**“ (**NEFZ**). Anhand dieses Fahrzyklus werden seit 1996 Emissions- und Verbrauchsmessungen an Fahrzeugen durchgeführt. Dabei kann das Verfahren sowohl bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren als auch bei Elektrofahrzeugen Anwendung finden.<sup>4</sup> Der genormte Fahrzyklus, der auf dem Prüfstand abgefahren wird, dauert insgesamt 1180 Sekunden. Seine Strecke beträgt etwa elf Kilometer. Er setzt sich zusammen aus einem Stadtfahrzyklus und einem außerstädtischen Fahrzyklus. Ersterer nimmt 780 Sekunden in Anspruch, was etwa zwei Drittel der Zeit entspricht. Der außerstädtische Fahrzyklus dauert 400 Sekunden und stellt das letzte Drittel der gesamten Zeit dar. Sowohl während der gesamten Messzeit als auch mindestens sechs Stunden vorher müssen 20 bis 30°C Umgebungstemperatur um das zu prüfende Fahrzeug vorliegen. Außerdem gibt die Richtlinie einen Kaltstart des Fahrzeugs vor.<sup>5</sup> Der Stadtfahrzyklus setzt sich zusammen aus vier einzelnen, aber identischen Grund-Stadtfahrzyklen, die neben konstanten Fahrphasen auch konstante Beschleunigungen beinhalten.<sup>6</sup> Die maximale Beschleunigung wird mit 1,04 m/s<sup>2</sup> vorgegeben, während die mittlere Beschleunigung 0,53 m/s<sup>2</sup> betragen sollte.<sup>7</sup> Die Höchstgeschwindigkeit während des Stadtfahrzyklus liegt bei 50 km/h, wobei die mittlere Geschwindigkeit etwa 34 km/h beträgt. Für Fahrzeuge mit Handschaltgetrieben wird im NEFZ auch die Wahl des zu wählenden Ganges vorgeschrieben. So soll bei der genannten Höchstgeschwindigkeit im Stadtfahrzyklus der dritte Gang gewählt werden. Die maximale Geschwindigkeit im außerstädtischen Fahrzyklus ist mit 120 km/h vorgeschrieben.<sup>8</sup>

Der NEFZ galt bislang für alle Personenkraftwagen in Europa. Seit dem 01. September 2017 wird er jedoch vom „**Worldwide harmonized Light Duty Test Procedure**“ (**WLTP**) abgelöst, der nun für neue Fahrzeugtypen verbindlich ist. Ab September 2018 soll der WLTP für alle Personenkraftwagen gelten.<sup>9</sup> Der WLTP basiert auf gesammelten Daten von Realfahrten aus 14 Ländern, die für eine durchschnittliche Autofahrt als repräsentativ angesehen werden. Dies soll die neue Verbrauchsprozedur im Vergleich zum NEFZ realitätsnaher machen.<sup>10</sup> Das Testverfahren unterscheidet Fahrzeuge nach dem Leistungsgewicht „power to mass-Ratio“ (PMR) in Kilowatt je Tonne. So entstehen drei Fahrzeugklassen, denen jeweils ein eigener Fahrzyklus zuzuordnen ist, der sogenannte „Worldwide light-duty test cycle“ (WLTC). Der Fahrzyklus für die Klasse 1 gilt für Fahrzeuge mit einem Leistungsgewicht bis zu 22 kW/t. Der Klasse 3 lassen sich Hochleistungsfahrzeuge mit über 34 kW/t zuordnen und der Fahrzyklus der Klasse 2 beinhaltet alle Fahrzeuge, deren Leistungsgewicht sich dazwischen bewegt.<sup>11</sup> Da die meisten Fahrzeuge in Deutschland der

---

<sup>4</sup> vgl. Appel, 2018.

<sup>5</sup> vgl. Europäische Union (Hrsg.), 2010.

<sup>6</sup> vgl. Appel, 2018.

<sup>7</sup> vgl. Neudorfer/Binder/Wicker, 2006.

<sup>8</sup> vgl. Appel, 2018.

<sup>9</sup> vgl. Günnel, 2017.

<sup>10</sup> vgl. VDA, VDIK, TÜV NORD (Hrsg.), 2014.

<sup>11</sup> vgl. UNECE (Hrsg.), 2017.

dritten Klasse zuzuordnen sind, wird lediglich diese näher betrachtet.<sup>12</sup> Der Zyklus wird auf dem Rollenprüfstand gefahren und dauert 30 Minuten. Seine Strecke beträgt etwa 23 Kilometer. Er setzt sich zusammen aus einer Stadtfahrt („Low“), einer Überlandfahrt („Medium“) und einer Autobahnstrecke, die jedoch mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten („High“ und „Extra High“) abgefahren wird.<sup>13</sup> Die Stadtfahrt nimmt etwa ein Drittel der gesamten Zeit in Anspruch, was etwa zehn Minuten entspricht. Die Überlandfahrt dauert etwa ein Viertel der gesamten Zeit, was etwa sieben Minuten entspricht. Die Autobahnfahrt „High“ dauert etwa 20 Sekunden länger als die Überlandfahrt und „Extra High“ beträgt zwar die kürzeste Dauer, gleichzeitig aber die längste Strecke.<sup>14</sup> Während der gesamten Zyklusdauer beträgt die Umgebungstemperatur allgemein 23°C, in Europa gelten zusätzlich 14°C. Findet der Fahrzyklus bei 23°C statt, so muss die Umgebungstemperatur des zu prüfenden Fahrzeugs zwölf Stunden vor der Messung ebenfalls 23°C betragen. Bei einer Prüfung mit 14°C Umgebungstemperatur gilt dies analog für neun Stunden vor der Messung. Der Start der Messung erfolgt mit kaltem Motor.<sup>15</sup> Die maximalen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten unterscheiden sich je nach Streckenabschnitt. Die höchsten Beschleunigungen sind während der Überlandfahrt sowie der Autobahnfahrt „High“ erlaubt, während bei „Extra High“ 1 m/s<sup>2</sup> nicht überschritten werden dürfen.<sup>16</sup>

Der WLTP wird ergänzt durch den Fahrzyklus „**real driving emissions**“ (RDE). Dieser Fahrzyklus wird, im Gegensatz zum NEFZ und dem WLTP selbst, auf der realen Straße gefahren.<sup>17</sup> Die Emissionen werden während der Fahrt anhand eines portablen Emissionssystems, des sogenannten Portable Emission Measurement System (PEMS) gemessen.<sup>18</sup> Der RDE soll ab dem Jahr 2019 für alle Personenkraftwagen verbindlich gelten.<sup>19</sup> Die Zyklusdauer beträgt zwischen eineinhalb und zwei Stunden. Der Zyklus besteht aus drei Streckenabschnitten: der Stadtfahrt, einer Überlandfahrt und einer Autobahnfahrt. Die Streckenabschnitte sollen so gewählt werden, dass sie jeweils mindestens 16 Kilometer lang sind. Darüber hinaus müssen die Bedingungen für die jeweiligen Anteile dieser Abschnitte an der Gesamtstrecke eingehalten werden. Der Richtwert für den Stadtfahrt-Anteil liegt bei etwa 34 Prozent, jedoch sind mindestens 29 Prozent vorgeschrieben. Die Überland- sowie die Autobahnfahrt sollten jeweils etwa 33 Prozent betragen. Bei diesen Angaben wird eine Toleranz von plus-minus zehn Prozent gestattet, um der erschwerten Auswahl eines Fahrzyklus auf der realen Straße mit wechselnden Verkehrsbedingungen entgegen zu kommen.<sup>20</sup> Die Stadtfahrt soll den Anfang der Strecke darstellen und der Betrieb auf den einzelnen Streckenabschnitten darf nicht unterbrochen werden. Eine Ausnahme stellt eine Unterbrechung des Betriebs auf der Landstraße durch eine kurzzeitige Stadtfahrt dar, wenn dies nicht vermeidbar ist. Außerdem kann die Autobahnfahrt im Falle von Maut- oder Baustellen kurzzeitig durch Stadt- oder Landstraßen unterbrochen werden.<sup>21</sup> Wird von gemäßigten Bedingungen der Umgebungstemperatur ausgegangen, soll die Temperatur während der Messung zwischen null und 30°C liegen.<sup>22</sup> Der Start der Messung erfolgt mit kaltem Motor.<sup>23</sup> Die vorgegebenen Geschwindigkeiten unterscheiden sich je nach Streckenabschnitt. Während der Stadtfahrt darf die Geschwindigkeit bis zu 60 km/h betragen.

---

<sup>12</sup> vgl. nh, 2017.

<sup>13</sup> vgl. Günnel, 2017.

<sup>14</sup> vgl. UNECE (Hrsg.), 2017.

<sup>15</sup> vgl. Günnel, 2017.

<sup>16</sup> vgl. DieselNet (Hrsg.), 2018.

<sup>17</sup> vgl. Günnel, 2017.

<sup>18</sup> vgl. Europäische Union (Hrsg.), 2016.

<sup>19</sup> vgl. Günnel, 2017.

<sup>20</sup> vgl. Daimler Communications (Hrsg.), 2018.

<sup>21</sup> vgl. Europäische Union (Hrsg.), 2016.

<sup>22</sup> vgl. Europäische Union (Hrsg.), 2016.

<sup>23</sup> vgl. Günnel, 2017.

Dieser Wert ist gleichzeitig die Mindestgeschwindigkeit der Überlandfahrt. Diese darf 90 km/h nicht überschreiten. Auf der Autobahn soll die Geschwindigkeit zwischen 90 und 145 km/h betragen. Die Höchstgeschwindigkeit von 145 km/h darf um 15 km/h überschritten werden, wobei dieser Anteil drei Prozent der gesamten Dauer der Autobahnfahrt nicht überschreiten darf.<sup>24</sup> Während der Messung darf die Gesamtmasse des Fahrzeugs bis zu 90 Prozent der in der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 definierten Summe des Gewichts der sich im Fahrzeug befindlichen Personen und der Nutzlast betragen. Außerdem schreibt die Verordnung den Betrieb der Nebenverbraucher während der Messung vor, damit dieser normalen Fahrbedingungen entspricht.<sup>25</sup>

In **Tabelle 1** werden die zuvor beschriebenen Prüfzyklen gegenübergestellt und anhand der für diese Arbeit relevanter Kriterien miteinander verglichen.

	NEFZ	WLTP	RDE
Dauer [min]	19,67	30	90 - 120
Standzeitanteil [%]	23,7	13,4	6 - 30
Strecke [m]	11.000	23.262	Mind. 48.000
Umgebungstemperatur [°C]	20 - 30	23	0 - 30
Starttemperatur	Kaltstart	Kaltstart	Kaltstart
Max. Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	1	1,6	Keine Vorgabe
Max. Geschwindigkeit [km/h]	120	131,3	145

**Tabelle 1:** Vergleich der ausgewählten Prüfverfahren nach ausgewählten Kriterien

Auf den ersten Blick sind wesentliche Unterschiede in den Rahmenbedingungen der einzelnen Fahrzyklen zu erkennen. Während der NEFZ eine Gesamtdauer von etwa 20 Minuten aufweist, nimmt der RDE das fünf- bis sechsfache der Zeit in Anspruch. Dies spiegelt sich in der Gesamtstrecke der Fahrzyklen wider, wobei für den RDE keine verbindliche Gesamtstrecke vorgegeben ist. Ein weiterer Unterschied liegt in der Umgebungstemperatur. Während der NEFZ und der WLTP bei einer Umgebungstemperatur über 20°C stattfinden müssen, kann die Umgebungstemperatur bei dem RDE bis auf null Grad Celsius herunter gehen. Eine Gemeinsamkeit der drei Fahrzyklen ist die Starttemperatur, die als Kaltstart definiert ist. Diese Definition ist jedoch nicht wörtlich zu nehmen, da sowohl der NEFZ als auch der WLTP eine Vorwärmung auf 25°C erlauben. Der NEFZ und der WLTP werden auf dem Rollenprüfstand gefahren, während es sich beim RDE um eine Messung im realen Straßenverkehr handelt. Darüberhinausgehend kann beim NEFZ durch Modifikationen am zu prüfenden Fahrzeug Einfluss auf die Messungen genommen werden, was zu einer weiteren Verfremdung der Realität führt. Als Beispiele sind abgeklebte Fugen an der Karosserie, eine abgeklemmte Lichtmaschine zur Vermeidung der Nachladung der Fahrzeugbatterie sowie eine veränderte Spureinstellung der Räder zu nennen.<sup>26</sup> Außerdem finden beim NEFZ die Einflüsse der Zusatzverbraucher auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen keine Berücksichtigung. Im WLTP finden zumindest Einflüsse von Sonderausstattungen hinsichtlich Gewicht, Aerodynamik und Bordnetzbedarf Berücksichtigung

<sup>24</sup> vgl. Daimler Communications (Hrsg.), 2018.

<sup>25</sup> vgl. Europäische Union (Hrsg.), 2016.

<sup>26</sup> vgl. Transport and Environment (Hrsg.), 2013.

## Erstellung des Fahrzyklus und Vorgehen bei der Messung

Aus dem Vergleich der drei Fahrzyklen geht hervor, dass der RDE-Zyklus von diesen Verfahren aufgrund der Messung im Straßenverkehr die wohl realistischsten Messergebnisse liefert. Durch die im Vergleich längere Messdauer und -strecke wird davon ausgegangen, dass Spitzen in den Messungen besser geglättet und harmonisiert werden. Aus diesen Gründen wird der RDE-Zyklus als Basis für die zu erstellende Messstrecke herangezogen. Ein weiterer Vorteil, den der RDE-Zyklus bietet, ist die größere Spannweite der zulässigen Umgebungstemperatur, sodass die Messung weitestgehend unabhängig von der aktuellen Witterung durchgeführt werden kann. In nachfolgender Tabelle 2 sind die wesentlichen relevanten Randbedingungen des RDE-Zyklus dargestellt.

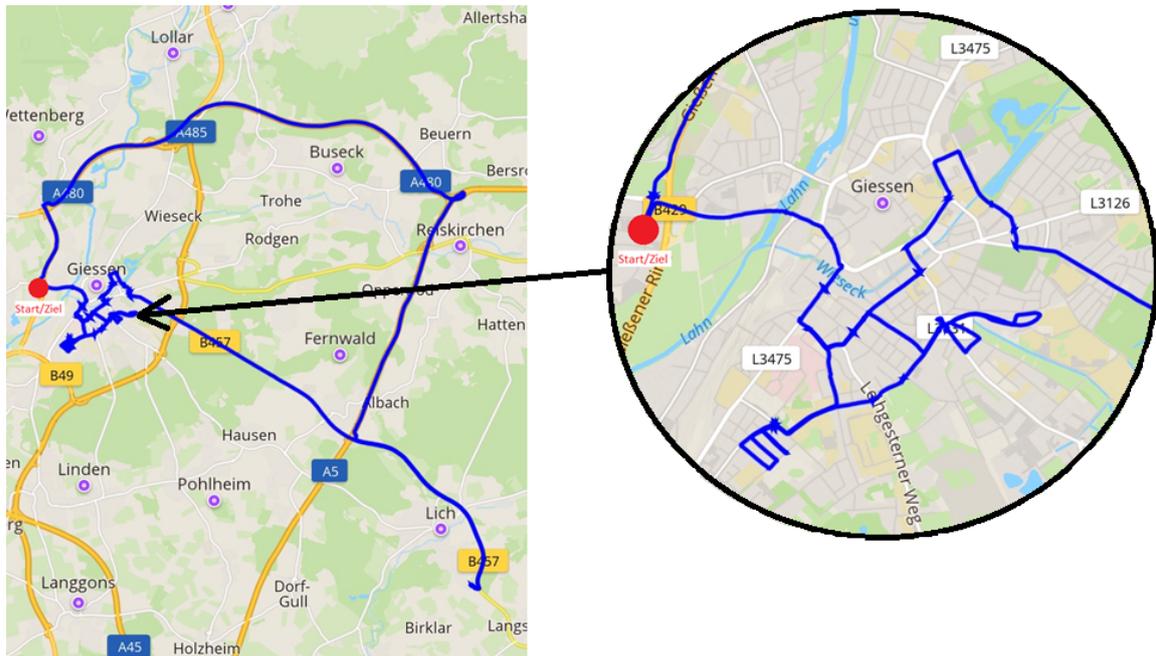
	RDE			
	Stadtfahrt	Überlandfahrt	Autobahnfahrt	Gesamt
Dauer [min]	Ergibt sich durch die Strecke	Ergibt sich durch die Strecke	Ergibt sich durch die Strecke	90 - 120
Anteil an Gesamtstrecke [%]	Min. 29% Mittel: 34% Max. 44%	Min. 23% Mittel: 33% Max. 43%	Min. 23% Mittel: 33% Max. 43%	100%
Standzeitanteil [%]	Min. 10	Keine Vorgabe	Keine Vorgabe	6 - 30
Strecke [m]	Mind. 16.000	Mind. 16.000	Mind. 16.000	
Umgebungstemperatur [°C]	0 - 30	0 - 30	0 - 30	0 - 30
Starttemperatur <sup>27</sup>	Kaltstart	Kaltstart	Kaltstart	Kaltstart
Max. Beschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	Keine Vorgabe	Keine Vorgabe	Keine Vorgabe	Keine Vorgabe
Geschwindigkeitsbereich [km/h]	0 - 60	60 - 90	90 - 145	
Mittlere Geschwindigkeit [km/h]	15 - 30	Keine Vorgabe	Keine Vorgabe	

**Tabelle 2:** Randbedingungen des RDE-Zyklus

Darüber hinaus wurden seitens der Autoren weitere Bedingungen an die Teststrecke gestellt. In unmittelbarer Nähe zum Start sowie Ziel der Strecke musste sich eine Gelegenheit zum Aufladen des Elektrofahrzeugs sowie idealerweise eine Tankstelle zum Betanken von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren befinden. Um hier möglichst aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, wurde darauf Wert gelegt, vor und nach der Testfahrt an der gleichen Ladesäule beziehungsweise der gleichen Zapfsäule die Fahrzeuge zu laden beziehungsweise zu betanken. Daraus wurde die Bedingung abgeleitet, dass sich Start- und Ziel am selben Punkt befinden müssen. Da das Autohaus ASW Wahl GmbH & Co. KG in Gießen im Vorfeld seine Unterstützung zu dieser Arbeit zugesagt hatte und ein Elektrofahrzeug für den Test sowie die Möglichkeit das Fahrzeug aufzuladen bereitstellte, musste dies bei der Streckenfindung berücksichtigt werden. Da sich praktischerweise in unmittelbarer Nachbarschaft zum Autohaus (ca. 50 m Distanz) eine Tankstelle befindet, wurde der Standort des Autohauses als Start und Ziel der Teststrecke definiert. Vom

<sup>27</sup> vgl. Günnel, 2017.

Startpunkt wurde eine Route durch das Stadtgebiet von Gießen sowie das Gießener Umland gewählt, welche im Folgenden dargestellt ist.



**Abbildung 1:** Teststrecke

In Abbildung 1 ist die gewählte Teststrecke dargestellt (rechts der Stadtbereich in Detailansicht). Ausgehend vom Startpunkt in der Gottlieb-Daimler-Straße 1 in 35398 Gießen führt die Strecke über die Heuchelheimer Straße (L3020) zunächst in die Innenstadt von Gießen. Dort wird der Stadtanteil absolviert, welcher auf der Licher Straße verlassen wird. Es folgt der Überlandanteil, welcher über die B457 bis nach Lich führt. An der Kreuzung B457 / Hungener Straße erfolgt eine Wende. Die Strecke führt zunächst zurück in Richtung Gießen. An der Anschlussstelle „Fernwald“ der A5 wird die Überlandfahrt beendet. Es beginnt der Autobahnanteil auf der A5 in Fahrtrichtung Kassel. Am Reiskirchener Dreieck erfolgt der Wechsel auf die A480, welche bis zu ihrem Ende in der Nähe von Heuchelheim befahren wird. Über die B429 geht es zurück zum Start/Ziel in der Gottlieb-Daimler-Straße. Dieser kurze Abschnitt der B429 wird zum restlichen Überlandanteil hinzuaddiert.

Es ergibt sich folgende Streckenzusammensetzung:

- Stadtanteil: 27,42 %
- Überlandanteil: 37,10 %
- Autobahnanteil: 35,48 %

Damit erfüllt die gewählte Messstrecke die Vorgaben des RDE-Zyklus nicht zu einhundert Prozent. Der Stadtanteil liegt mit 27,42 Prozent minimal unter der Mindestvorgabe von 29 Prozent. Aufgrund von örtlichen Gegebenheiten wie Einbahnstraßenregelungen und Straßensperrungen konnte keine entsprechende logische Route gewählt werden. Ein höherer Stadtanteil könnte mit Richtungswechseln realisiert werden, was allerdings eine deutliche Erhöhung der Standzeiten und damit gegebenenfalls eine Überschreitung der Standzeitvorgaben aus dem RDE zur Folge hätte. Dieser Sachverhalt wurde von den Autoren diskutiert, mit dem Ergebnis, dass eine geringfügige Verringerung des Stadtanteils im Gegensatz zu einer Erhöhung der Standzeiten keinen gravierenden Einfluss auf das Messergebnis hat. Darüber hinaus sind sich die Autoren dieser Arbeit einig, dass eine Erhöhung der Wendemanöver zugunsten einer längeren Strecke innerhalb der Stadt keinen

realistischen Bedingungen entspricht. Folglich wurde ein an den RDE-Zyklus angelehnter, eigener Fahrzyklus erstellt, der nach Ansicht der Autoren ein realistisches und alltägliches Fahrszenario widerspiegelt.

## Messergebnisse und Auswertung

### Elektrofahrzeug

Als Testfahrzeug wurde ein BMW i3 94 Ah zur Verfügung gestellt. Das Fahrzeug verfügt über eine Nennleistung von 75 kW und weist eine Leermasse von 1.320 kg auf. Bei dem getesteten Fahrzeug handelt es sich um das Modell ohne Range Extender. Der cw-Wert des Fahrzeugs beträgt 0,29 und die Stirnfläche 2,38 m<sup>2</sup>, sodass sich gemäß der Formel  $c_w * A$  ein Wert von 0,690 m<sup>2</sup> ergibt. Durch Multiplikation dieses Wertes mit der quadrierten Geschwindigkeit  $v$  und der Dichte  $\rho$  der Luft geteilt durch 2 ergibt das die Widerstandskraft  $F_w$ . Kurzfristig kann das Fahrzeug eine Spitzenleistung von 125 kW abrufen. Der Hersteller gibt den Stromverbrauch des Fahrzeugs im EU-Zyklus mit einem Wert zwischen 13,1 kWh / 100 km und 13,6 kWh / 100 km, je nach Bereifung, an. Für die elektrische Reichweite des Fahrzeugs existieren Angaben nach NEFZ sowie WLTP. Nach NEFZ erreicht das Fahrzeug eine Reichweite von bis zu 300 km. Nach WLTP wird die „Reichweite im Alltagsbetrieb“ mit bis zu 200 km angegeben.<sup>28</sup> Vor Beginn der Fahrt wurde die Batterie des Fahrzeugs vollständig geladen. Nach vollständiger Ladung der Batterie wurde die Leistung für den Betrieb des Ladegerätes ermittelt. Das Ladegerät war bis zum unmittelbaren Start der Testfahrt am Fahrzeug angeschlossen, sodass der vollständige Ladezustand sichergestellt war. Nach dem „Abklemmen“ des Ladegerätes wurde die Testfahrt unverzüglich gestartet. Die Testfahrt fand bei einer Außentemperatur von 24,8°C auf der zuvor beschriebenen Messstrecke statt. Während der Fahrt war das Fahrzeug mit vier Personen besetzt. Die Testfahrt fand bei einem durchschnittlichen Verkehrsaufkommen statt. Die Gesamtfahrzeit betrug eine Stunde und 24 Minuten. Nach Beendigung der Testfahrt wurde der Ladezyklus unmittelbar gestartet. Während des Ladevorgangs wurde die aufgenommene Leistung ermittelt. Es zeigte sich das folgende Ergebnis:

<b>Dauer des Ladevorgangs [h]:</b>	5,5639
durchschn. aufgenommene Wirkleistung ( <b>Gesamtwirkleistung</b> ) [W]:	2.081,66
<b>durchschn. Wirkleistung für das Ladegerät [W]:</b>	1,32
durchschn. aufgenommene Wirkleistung zur Ladung der Batterie abzgl. Wirkleistung für Betrieb des Ladegerätes ( <b>Nettowirkleistung</b> ) [W]:	2.080,34

**Tabelle 3:** Messergebnisse Elektrofahrzeug

Nach dem Grundsatz  $W = P * t$  lässt sich die zugeführte Menge an elektrischer Energie und damit der Strombedarf bei der Testfahrt bestimmen.

$$W = P * t = \text{Nettowirkleistung} * \text{Ladezeit} = 2.080,34 \text{ W} * 5,5639 \text{ h} = \mathbf{11.574,80 \text{ Wh}}$$

<sup>28</sup> vgl. BMW (Hrsg.), 2017, S.1

Das Testfahrzeug benötigt auf der 62 km langen Messstrecke rund 11,6 kWh elektrischen Strom. Skaliert man diesen Wert auf eine Distanz von 100 km, so entspricht dies einem Strombedarf von 18,68 kWh.

Zur Bewertung des daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Ausstoßes werden die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Strommix aus dem Jahr 2015 herangezogen. Das Umweltbundesamt beziffert den CO<sub>2</sub>-Ausstoß für die Bereitstellung einer Kilowattstunde elektrischen Stroms mit durchschnittlich 534 g.<sup>29</sup>

Mit Hilfe dieser Daten lässt sich nun der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Testfahrzeugs, der sich beim Betrieb des Fahrzeugs ergibt, bestimmen.

$$\begin{aligned} CO_2 - \text{Ausstoß} &= W * CO_2 - \text{Emissionsfaktor} \\ &= 18,68 \frac{kWh}{100km} * 534 \frac{g CO_2}{kWh} \approx 9.975 \frac{g CO_2}{100 km} = \mathbf{99,75 \frac{g CO_2}{km}} \end{aligned}$$

Pro Kilometer, den das Elektrofahrzeug zurücklegt, werden 99,75 g Kohlenstoffdioxid durch die Bereitstellung des zum Antrieb benötigten elektrischen Stroms emittiert.

Für die Herstellung der Fahrzeugbatterie wird eine Studie des IVL Swedish Environmental Research Institute aus dem Jahr 2017 zugrunde gelegt. In dieser Studie wird der Energieverbrauch für die Batterieherstellung mit einem Wert von 350-650 MJ elektrischer Energie pro kWh Batteriekapazität angegeben.<sup>30</sup> Das getestete Fahrzeug, ein BMW i3, verfügt über eine Batteriekapazität von 33,2 kWh.<sup>31</sup> Es lässt sich folgender Energiebedarf zur Batterieherstellung ableiten:

$$500 \frac{MJ_{elektr.}}{kWh_{Batt.-Kap.}} * 33,2 kWh_{Batt.-Kap.} = 16.600 MJ_{elektr.} \approx 4.611 kWh_{elektr.}$$

Es wurde an dieser Stelle der Mittelwert der Energieverbrauchswerte für die Batterieherstellung verwendet.

Unter Annahme, dass die Produktion der Batterie ausschließlich in Deutschland erfolgt, ergibt sich unter Heranziehung des deutschen Strommix aus dem Jahr 2015 eine CO<sub>2</sub>-Emission bei der Batterieherstellung von:

$$4.611 kWh_{elektr.} * 534 \frac{g CO_2}{kWh_{elektr.}} = 2.462.274 g CO_2$$

Die Batterie für den BMW i3 stammt vom koreanischen Zulieferer Samsung SDI, welcher Fahrzeugbatterien vermutlich in Südkorea und China produziert. In China dominiert die Kohlekraft bei der Stromerzeugung.<sup>32 33</sup> Eine Quelle spricht im günstigsten Fall von einem

<sup>29</sup> vgl. Icha, 2017 (vorläufiger Wert).

<sup>30</sup> vgl. Romare/Dahllöf, 2017., S. III – V

<sup>31</sup> vgl. BMW (Hrsg.), o. J.

<sup>32</sup> vgl. Finger, 2016.

<sup>33</sup> vgl. Grave/Blücher, 2015.

Wert von 836,7 g CO<sub>2</sub> / kWh<sub>elektr.</sub><sup>34</sup>. Die o.g. IVL-Studie geht von einem Strommix in China von 1.000 gCO<sub>2</sub> / kWh<sub>elektr.</sub> aus.<sup>35</sup> Dies bedeutet für die Produktion der Batterie einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 4.234.512 g CO<sub>2</sub>, wenn man vom Mittelwert ausgeht.

Verlässliche Daten zur Lebensdauer einer Fahrzeugbatterie existieren nicht. Der Hersteller BMW garantiert eine Lebensdauer der Batterie des i3 von acht Jahren oder 100.000 km<sup>36</sup>. In einem Langzeit-Test kommt der österreichische ADAC zu dem Ergebnis, dass die Batterie-Kapazität von Elektrofahrzeugen nach drei Jahren Betrieb um durchschnittlich 17 Prozent geringer ausfällt als im Neuzustand.<sup>37</sup> Im Folgenden wird in dieser Arbeit angenommen, dass eine Fahrzeugbatterie im Durchschnitt nach 100.000 km, was dem Garantiezeitraum von BMW entspricht, ausgetauscht werden muss. Basierend auf den Angaben des Kraftfahrt-Bundesamt, welches die durchschnittliche Fahrleistung von PKW in Deutschland auf 13.922 km pro Jahr beziffert, entsprechen acht Jahre Fahrzeugnutzung einer Laufleistung von 111.376 km.<sup>38</sup>

Werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Batterieherstellung auf die Lebensdauer der Batterie umgelegt, zeigt sich folgender Sachverhalt:

$$\frac{4.234.512 \text{ g CO}_2}{100.000 \text{ km}} = 42,35 \frac{\text{g CO}_2}{\text{km}}$$

Als vergleichender Emissionswert für das Fahrzeug wird die Summe aus der betriebsbedingten CO<sub>2</sub>-Emission des Fahrzeugs und der CO<sub>2</sub>-Emission aus der Batterieherstellung (bezogen auf die Lebensdauer in Kilometer) angenommen. Dieser Wert beträgt somit **142,10 g CO<sub>2</sub> / km**.

Das Institut für Energie- und Umweltforschung gibt als Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emission für Herstellung und Entsorgung eines Elektrofahrzeugs der Kategorie „Mittleres Auto“, welcher das Testfahrzeug entspricht, 10,2 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent an.<sup>39</sup>

Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 18 Jahren<sup>40</sup>, ergibt sich so eine Gesamt-Durchschnittsfahrleistung auf Basis der durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung des Kraftfahrt-Bundesamtes von 250.596 km bis ein Fahrzeug verschrottet wird.

Werden die o.g. 10,2 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent zur Berechnung des vergleichenden Emissionswertes herangezogen, so muss die Herstellung der Batterie aufgrund kürzerer Lebensdauer gesondert betrachtet werden. Es gilt:

$$\left( \frac{10,2 \text{ t CO}_2 - 4,235 \text{ t CO}_2}{250.596 \text{ km}} + \frac{4,235 \text{ t CO}_2}{100.000 \text{ km}} \right) * 1.000.000 \frac{\text{g}}{\text{t}} = 66,15 \frac{\text{g CO}_2}{\text{km}}$$

In der Addition ergibt sich ein vergleichender Emissionsfaktor von **165,90 g CO<sub>2</sub> / km**.

<sup>34</sup> vgl. Breitinger, 2012.

<sup>35</sup> vgl. Romare/Dahllöf, 2017, S.25

<sup>36</sup> vgl. Viehmann, 2014.

<sup>37</sup> vgl. Viehmann, 2014.

<sup>38</sup> vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.), 2018.

<sup>39</sup> vgl. Seibt, 2015.

<sup>40</sup> vgl. t-online.de (Hrsg.), 2014.

## Diesel und Benziner

Um den ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des Elektrofahrzeugs einschätzen zu können, wurden Vergleichsmessungen mit je einem Diesel- und Benzinfahrzeug durchgeführt. Bei der Auswahl der Fahrzeuge wurde darauf geachtet, dass Fahrzeugmasse sowie Produkt aus Stirnfläche  $A_{\text{Stirn}}$  und cw-Wert, vergleichbar mit dem Elektrofahrzeug sind. In nachfolgender Tabelle 4 sind die ausgewählten Testfahrzeuge mit ihren relevanten technischen Daten dargestellt.

	<b>Benziner</b>	<b>Diesel</b>
Fahrzeugtyp	Mini Cooper S	Mini Cooper S Diesel
Kraftstoff	Super Plus	Diesel
Leistung	125 kW	125 kW
Leermasse	1.215 kg	1.265 kg
cw-Wert	0,36	0,33
Stirnfläche	1,97 m <sup>2</sup>	2,09 m <sup>2</sup>
$A_{\text{Stirn}} \cdot c_w$	0,709 m <sup>2</sup>	0,690 m <sup>2</sup>
Normverbrauch nach NEFZ	8,6 l / 100 km	4,0 l / 100 km

Tabelle 4: Technische Daten der Testfahrzeuge<sup>41 42 43 44</sup>

Die Messfahrt mit dem Benzinfahrzeug hatte einen kombinierten Kraftstoffverbrauch von 6,71 l/100km zum Ergebnis. Das Dieselfahrzeug erzielte einen Verbrauch von 5,6 l/100km. Um den ermittelten Kraftstoffverbrauch aus CO<sub>2</sub>-Emissionsgesichtspunkten bewerten zu können, wurde der Kraftstoffherstellungsprozess mit allen Schritten, die nötig sind, um aus Rohöl Kraftstoffe herzustellen, analysiert. Diese Analyse brachte einen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 3,144 t<sub>CO2</sub> / t<sub>Super Plus</sub><sup>45</sup> bzw. 3,165 t<sub>CO2</sub> / t<sub>Diesel</sub><sup>46</sup> hervor. Durch Umrechnung der volumenbezogenen Verbrauchswerte in massebezogene Werte wurden die Emissionsfaktoren für den Betrieb der Fahrzeuge ermittelt. In Tabelle 5 sind die Emissionsfaktoren dargestellt.

	<b>Benziner</b>	<b>Diesel</b>
Verbrauch [l/100km]	6,71	5,60
Dichte [kg/l]	0,748	0,820
Verbrauch [kg/100kg]	5,019	4,592
spez. Emissionsfaktor [t <sub>CO2</sub> /t <sub>Kraftstoff</sub> ]	3,144	3,165
CO <sub>2</sub> -Ausstoß [g/km]	<b>157,79</b>	<b>145,33</b>

Tabelle 5: Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Testfahrzeuge

Ausgehend von den Angaben des Instituts für Energie- und Umweltforschung wird für die Produktion und Entsorgung des getesteten Benzinfahrzeugs eine Treibhausgasemission

<sup>41</sup> vgl. BMW (Hrsg.), 2004.

<sup>42</sup> vgl. Cordes, o. J.

<sup>43</sup> vgl. BMW (Hrsg.), 2004.

<sup>44</sup> vgl. Mini (Hrsg.), 2015

<sup>45</sup> vgl. Jurich, 2016.

<sup>46</sup> vgl. Jurich, 2016.

von 6,3 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent angenommen.<sup>47</sup> Für die Produktion und Entsorgung des getesteten Dieselfahrzeugs werden Emissionen von 6,4 Tonnen CO<sub>2</sub> angenommen.<sup>48</sup>

Bei gleicher Gesamt-Durchschnittsfahrleistung wie beim Elektrofahrzeug gilt für die Produktion und Entsorgung des **Benzinfahrzeugs** folgender Zusammenhang:

$$\frac{6,3 \text{ t CO}_2 * 1.000.000 \frac{\text{g}}{\text{t}}}{250.596 \text{ km}} = 25,14 \frac{\text{g CO}_2}{\text{km}}$$

Analog gilt für das **Dieselfahrzeug**:

$$\frac{6,4 \text{ t CO}_2 * 1.000.000 \frac{\text{g}}{\text{t}}}{250.596 \text{ km}} = 25,54 \frac{\text{g CO}_2}{\text{km}}$$

Werden die Emissionsfaktoren für Produktion und Entsorgung zu den jeweiligen Emissionsfaktoren für den Fahrzeugbetrieb addiert, ergibt sich der kilometerbezogene CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor der Fahrzeuge. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 6 dargestellt.

	<b>Benziner</b>	<b>Diesel</b>
CO <sub>2</sub> -Ausstoß [g/km] im Betrieb	157,79	145,33
CO <sub>2</sub> -Ausstoß [g/km] bei Produktion und Entsorgung	25,14	25,54
<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß [g/km] kombiniert</b>	<b>182,93</b>	<b>170,87</b>

**Tabelle 6:** kombinierter CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Testfahrzeuge

<sup>47</sup> vgl. Seibt, 2015.

<sup>48</sup> vgl. Seibt, 2015.

## Vergleich der Messergebnisse

In nachfolgender Tabelle 7 sind die Ergebnisse für den Betrieb der betrachteten Fahrzeuge zusammengefasst dargestellt.

	Elektrofahrzeug	Benzinfahrzeug	Dieselfahrzeug
Kraftstoffverbrauch auf 100 km laut Herstellerangaben	13,1 bis 13,6 kWh	8,6 l	4,0 l
Ermittelter Kraftstoffverbrauch auf 100 km	18,68 kWh	6,71 l	5,6 l
Ermittelter CO <sub>2</sub> -Emission während der Fahrt [gCO <sub>2</sub> / km]	99,75	157,79	145,33
Ermittelter Gesamt-CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor [gCO <sub>2</sub> / km]	<b>165,90</b>	<b>182,93</b>	<b>170,87</b>

**Tabelle 7:** Vergleich der Ergebnisse

Das Elektrofahrzeug geht aus der Untersuchung unter Beachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Beachtung von Betrieb, Herstellung und Entsorgung als vermeintlich „sauberstes“ Fahrzeug mit einer kombinierten CO<sub>2</sub>-Emission von 165,90 gCO<sub>2</sub> / km hervor. Knapp dahinter liegt das Dieselfahrzeug mit 170,87 gCO<sub>2</sub> / km. „Schlusslicht“ bildet das Benzinfahrzeug mit 182,93 gCO<sub>2</sub> / km. Es zeigt sich aber ein insgesamt sehr knappes Ergebnis.

Es fallen gravierende Unterschiede zwischen den von Herstellern angegebenen und ermittelten Kraftstoffverbräuchen auf. Eine dänische Studie aus dem Jahr 2016 geht von einer durchschnittlichen Abweichung des tatsächlichen Verbrauchs von Elektrofahrzeugen von über 45 Prozent gegenüber den Herstellerangaben aus. Diese Angabe ähnelt den ermittelten Ergebnissen der Testfahrt, die eine positive Abweichung, je nach Bereifung, zwischen 42,6 und 37,4 Prozent zeigen (18,68 kWh / 100 km statt 13,1 kWh / 100 km oder 13,6 kWh / 100 km). Somit kann die Messung als realistisch eingeschätzt werden, sodass keine Zweifel an den ermittelten Werten der Testfahrt mit dem Elektrofahrzeug erhoben werden. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird von durchschnittlichen Abweichungen von den Herstellerangaben von 20 bis 30 Prozent unter dem realen Verbrauch ausgegangen.<sup>49</sup> Dies deckt sich jedoch nicht mit den Ergebnissen der durchgeführten Testfahrten. Würden die Abweichungen dem Durchschnitt entsprechen, sollte ein realer Verbrauch des Benzinfahrzeugs beziehungsweise des Dieselfahrzeugs zwischen 10,75 l / 100 km und 12,3 l / 100 km beziehungsweise zwischen 5 l / 100 km und 5,7 l / 100 km erwartet werden. Bei der Fahrt mit dem Benzinfahrzeug konnte die Herstellerangabe von 8,6 l / 100 km jedoch um fast 1,9 Liter unterschritten werden, was einer negativen Abweichung von etwa 22 Prozent entspricht. Da der stark abweichende, ermittelte Kraftstoffverbrauch des Benzinfahrzeugs nicht ohne Begründung nachvollzogen werden kann, wird das Ergebnis im Folgenden diskutiert.

<sup>49</sup> vgl. Jeß/Schade, 2018.

Das verwendete Benzinfahrzeug für diese Ausarbeitung stammt aus dem Jahr 2004, sodass der angegebene Kraftstoffverbrauch ebenfalls in dem genannten Jahr nach dem NEFZ ermittelt wurde. Eine Untersuchung vom International Council on Clean Transportation Europe (ICCT) zeigt jedoch, dass die Abweichungen zwischen den nach dem NEFZ ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen, und damit einhergehend den ermittelten Kraftstoffverbräuchen, und den real gemessenen Emissionen beziehungsweise Verbräuchen seit dem Jahr 2001 kontinuierlich gestiegen sind. Während die Abweichungen im Jahr 2001 bei etwa acht Prozent lagen, waren es im Jahr 2013 bereits 38 Prozent.<sup>50</sup>

## Fazit der Untersuchungen

Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Frage gestellt, ob ein Elektroauto tatsächlich ein „Null-Emissionsauto“ ist, wie es in den Medien häufig dargestellt wird. Ziel dieser Arbeit war es durch die Ermittlung der tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Elektrofahrzeugs und den Vergleich mit klassischen Verbrennungsfahrzeugen unter Beachtung des Lebenszykluses eine realistische Einschätzung zu dieser Thematik zu geben.

Durch den Vergleich gängiger Prüfverfahren zur Verbrauchs- und Emissionsmessung von Fahrzeugen konnte ein geeigneter Prüfzyklus zur Ermittlung der Kraftstoff- beziehungsweise Stromverbräuche erstellt werden. Anhand dieses Testzyklus wurden drei Fahrzeuge, jeweils ein Elektro-, ein Benzin- und ein Dieselfahrzeug hinsichtlich ihres Verbrauchs untersucht.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde deutlich, dass die realen Verbräuche vom Elektrofahrzeug ebenso wie die von Diesel- oder Benzinfahrzeugen teils deutlich von den Herstellerangaben abweichen.

Bei der Bewertung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes des Elektrofahrzeuges zeigt sich deutlich, dass das Elektroauto beim aktuellen deutschen Strommix keinesfalls ein „Null-Emissionsauto“ darstellt. Selbst unter der Annahme, dass ein Elektrofahrzeug ausschließlich mit CO<sub>2</sub>-neutralem Ökostrom betrieben würde, verbleibt immer noch ein nicht unerheblicher CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Fahrzeugherstellung und -entsorgung. Dieser Punkt ist besonders kritisch zu betrachten, gibt es doch keine verlässlichen Daten diesbezüglich. Vor allem die Herstellung der Batterie ist an dieser Stelle herauszuheben. Die größten Batteriezulieferer stammen aus Fernost und machen keine Angaben zu ihren Produktionsstandorten. Es ist zu vermuten, dass die meisten Batterien für Elektrofahrzeuge in China produziert werden, wo der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des Strommix teils dem doppelten Wert von Deutschland entspricht.

Weiter ist anzumerken, dass keine der bisher durchgeführten Studien die Lebensdauer der Fahrzeugbatterien berücksichtigt. Zur Berechnung der „Emissions-Amortisation“ werden dort teilweise Fahrleistungen von bis zu 270.000 km angenommen.<sup>51</sup> Ob Elektrofahrzeuge diesen Wert in der Realität erreichen können, ohne dass es einem Austausch der Batterie bedarf, ist mehr als fraglich.

Daneben fällt auf, dass der Dieselmotor aus CO<sub>2</sub>-Emissionsgesichtspunkten gar nicht so schlecht ist, wie er medial dargestellt wird. Im direkten Vergleich erzielt er einen vergleichbaren Ausstoß wie das Elektroauto, wobei die Emissionen bei Herstellung und Entsorgung des Fahrzeugs, im Gegensatz zum Elektroauto, auf gesicherten Daten beruhen.

---

<sup>50</sup> vgl. Mock, 2014.

<sup>51</sup> vgl. McGee, 2017, S.2

Wird zu Bewertung des Energieaufwandes bei der Batterieherstellung anstelle des Mittelwerts der obere Grenzwert verwendet, fällt das Elektroauto hinter den Diesel zurück.

Aufgrund der Knappheit des Ergebnisses zeigt sich, dass das Elektrofahrzeug (wenn überhaupt) den konventionellen Antriebsformen nicht in dem Maße überlegen ist, wie oft behauptet wird. Hier müssten allein schon aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten Wiederholungsmessungen stattfinden, um Messungenauigkeiten herausfiltern zu können. Auch die Genauigkeit der Verbrauchsmessungen der Verbrennungsfahrzeuge über Nachtanken ist an dieser Stelle zu überdenken.

Daneben sollten, um Aussagen über „Null-Emissionen“ treffen zu können auch die Punkte Stickoxide und Feinstaub mit in die Betrachtungen aufgenommen werden.

Weiter ist anzumerken, dass diese Arbeit beim Herstellungsprozess des Elektrofahrzeugs abgesehen vom Antriebsstrang von einem gegenüber den Verbrennungsmotoren unveränderten Verfahren ausgeht. Das getestete Fahrzeug, ein BMW i3, besteht zu einem großen Teil aus Aluminium und Kohlefaser, welche hinsichtlich des Energieaufwandes bei Herstellung und Verarbeitung anders zu bewerten sind als konventioneller Stahl. Angemerkt sei hier außerdem, dass bestehende Studien die Effektivität von Leichtbaukonzepten bei Elektrofahrzeugen anzweifeln.

Während der Messfahrten zeigte sich ein unterschiedlich starkes Verkehrsaufkommen, welches die Messungen beeinflusst haben könnte. Das Dieselfahrzeug geriet während der Messfahrt in einen Stau, was einen massiven Anstieg der Standzeiten zur Folge hatte. Hier wird an dieser Stelle an die Politik appelliert, die Diskussion, den RDE-Zyklus als mögliches Normverfahren zu etablieren, zu überdenken. Der RDE-Zyklus erzielt zwar realistische Werte aus dem realen Straßenverkehr, es stellt sich aber die Frage, wie reproduzierbar und vor allem vergleichbar diese Messergebnisse aufgrund wechselnder Randbedingungen bei den Tests sind.

Abschließend bleibt festzustellen, dass das Elektroauto definitiv kein „Null-Emissionsfahrzeug“ ist. Die Autoren teilen an dieser Stelle die eingangs erwähnte Ansicht von Ernst Ulrich von Weizsäcker, dass der Verbrennungsmotor nicht verteufelt werden sollte. Die öffentliche Debatte sollte nach Ansicht der Autoren weniger emotional und stärker auf Fakten basierend geführt werden. Es kann festgestellt werden, dass es nicht das „perfekte“ Antriebskonzept gibt. Die Realität stellt unterschiedliche Anforderungen an Fahrzeuge, die alle drei betrachteten Antriebskonzepte unterschiedlich gut (oder schlecht) erfüllen. Eine pauschale Aussage, darüber, welches Konzept das Beste aus Emissionssicht ist, ist daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich.

---

## Ausblick

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass das Elektroauto zurzeit unter den vorhandenen Rahmenbedingungen zu keiner signifikanten CO<sub>2</sub>-Reduktion beitragen kann.

Vielmehr muss in diesem Zusammenhang der Anteil der erneuerbaren Energien im Bereich der Stromerzeugung deutlich erhöht und ausgebaut werden. Der derzeitige Anteil an erneuerbarer Energie von 36,2 % (2017)<sup>52</sup> bei der Stromerzeugung ist, wenn der Sektor Verkehr auf Elektroantriebe umgestellt wird, nicht ansatzweise ausreichend. Der Anteil des Energieverbrauchs der Energieform Strom betrug im Jahr 2017 20,1 %<sup>53</sup> des gesamten Endenergieverbrauchs.

Der Endenergieverbrauch im Bereich Verkehr lag im Jahr 2017 bei 29,5 %<sup>54</sup>. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass ein Verbrennungsmotor einen Wirkungsgrad von ca. 18 %<sup>55</sup> und ein Elektromotor/-antrieb bei Elektrofahrzeugen von 94 %<sup>56</sup> besitzt, wäre, basierend auf den Werten aus Tabelle 6.1 und 6.4 der AGEB, mit einer Erhöhung des Stromverbrauchs um 26,7 % ohne Speicherverluste zu rechnen.

Bei dem derzeitigen Anteil erneuerbarer Energie an der Stromerzeugung würde der Anteil unter Hinzunahme des Verkehrssektors auf 28,6 % sinken. Auch ist der Einsatz von Hausmüll als erneuerbare Energiequelle im Hinblick auf die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei der Stromerzeugung zu hinterfragen.

Um eine vollständige Abdeckung durch erneuerbare Energien bei der Stromerzeugung zu erreichen, ist unter der Annahme eines linearen Zubaus eine ca. 4-fache Leistung der jetzigen Kraftwerksleistung im Bereich der erneuerbaren Energien erforderlich. Um diesen Zubau in den nächsten 32 Jahren bis zum Jahr 2050 zu erreichen, benötigen wir eine Steigerung der installierten Leistung von 8,6 % jährlich, basierend auf einem Anteil von erneuerbarer Energie von 28,6 % am Stromverbrauch unter Berücksichtigung des Verkehrssektors. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Politik in Verbindung mit der Wissenschaft gefragt, wie diese Aufgabe umgesetzt werden soll.

Sollte die Elektromobilität die zukünftige Technik darstellen, so müssen ab dem Jahr 2032 (in 13 Jahren) nur noch Elektrofahrzeuge zugelassen werden. Diese Aussage begründet sich in der durchschnittlichen Nutzungsdauer von 18 Jahren<sup>57</sup> für Fahrzeuge, um ab dem Jahr 2050 nur noch Elektrofahrzeuge betreiben zu können. In diesem Zusammenhang sind aber viele Fragen, gerade im Bereich der Speichertechnologien und die Versorgung mit den notwendigen Rohstoffen ungeklärt.

Darüber hinaus müsste das Thema Infrastruktur mit einer ganz anderen Intensität angegangen werden. In Deutschland sind 64 Mio. Fahrzeuge zum 01.01.2018 zugelassen.<sup>58</sup> Ein großer Teil dieser Fahrzeuge parken am Straßenrand und haben bisher nahezu keine Möglichkeit aufgeladen zu werden. Leider konnten keine konkreteren Zahlen auf Basis von Versicherungsdaten hierzu ermittelt werden. Dieser Aspekt betrifft aber auch Fahrzeuge in

---

<sup>52</sup> vgl. UBA AGE-Stat, 2018

<sup>53</sup> vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz, 2016, Tab. 6.1

<sup>54</sup> vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz, 2016, Tab. 6.1/6.4

<sup>55</sup> vgl. Marx, 2013

<sup>56</sup> vgl. Marx, 2013

<sup>57</sup> vgl. Statista, 2014 (Statista, 2014), Lebensdauer von Autos in Deutschland 2014

<sup>58</sup> vgl. tagesschau.de, 2018

Gargagenparks, die über keine Stromversorgung verfügen, aber über Versicherungsdaten nicht erfasst werden können.

Beachtet man, dass der Ausbau beim Internet schon 29 Jahre in Anspruch genommen hat - die ersten deutschen Internetanschlüsse wurden im Jahr 1989 in Betrieb genommen - und bisher immer noch nicht überall zufriedenstellende Versorgungsgeschwindigkeiten erreicht hat, kann kaum damit gerechnet werden, dass es bei einer Erweiterung der Stromversorgung schneller geht, da zum Teil Genehmigungen und andere Leitungsquerschnitte erforderlich sind.

Es darf also ernsthaft bezweifelt werden, das gesteckte Ziel einer Reduzierung der Klimaerwärmung um 2 K erreichen zu können, genauso wie in der Elektromobilität den zukünftigen Problemlöser gefunden zu haben.

Vielmehr wäre eine ehrliche Diskussion, vor allem basierend auf Tatsachen und Fakten hilfreich, ein tatsächlich realisierbares Ziel vorzugeben, um die Weichen für die Zukunft richtig stellen zu können.

## Literaturverzeichnis

Appel, Holger (2018): Diesel-Fahrverbot: Fahrt ins Blaue, 2018, <http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/motor/diesel-fahrverbote-fuer-innenstaedte-fahrt-ins-blaue-15403944.html>, 28.08.2018

ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN e.V. (2018). Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2017. Berlin.

BMW (Hrsg.) (11/2017): Der neue BMW i3: Technische Daten, November 2017

BMW (Hrsg.) (29.12.2004): Fahrzeugdaten MINI, <http://www.bmw-inside.de/fzg-daten/dat-mini.html>, 29.08.2018

BMW (Hrsg.) (o. J.): BMW i3: Technische Daten, o. J., <https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2017/technische-daten.html#tab-0>, 05.09.2018

Breitinger, Matthias (2012): Automesse Peking: Hohe indirekte Emissionen, 2012, <https://www.zeit.de/auto/2012-04/china-elektroauto/seite-2>, 29.08.2018

Cordes, Rüdiger (o. J.): Opel GT: cw-Werte von 1462 Fahrzeugen, o. J., <http://rc.opelgt.org/indexcw.php>, 29.08.2018

Daimler Communications (Hrsg.) (Januar 2018): WLTP und RDE im Fokus: Mehr Transparenz für den Kunden, Januar 2018

Decker, Hanna (2017): Vergleich zu Verbrennern: Wie klimafreundlich ist das Elektroauto wirklich?, 2017, <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/diesel-affaere/wie-klimafreundlich-ist-das-elektroauto-wirklich-15273918.html>, 28.08.2018

DieselNet (Hrsg.) (03.07.2018): Emission Test Cycles: WLTC, <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/wltp.php>, 28.08.2018

dpa (2017): Klimaschädliches E-Auto?: Umweltschützer warnt: Verbrennungsmotor nicht verteufeln!, 2017, <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/club-of-rome-warnt-gruene-vor-verteufelung-des-verbrennungsmotors-15273687.html>, 28.08.2018

Finger, Tobias (2016): Kohle gegen Wind: Chinas gefährlicher Energiemix, 2016, <https://www.wiwo.de/technologie/green/kohle-gegen-wind-chinas-gefaehrlicher-energiemix/14616220.html>, 29.08.2018

Grave, Katharina/Blücher, Felix von (Juni 2015): Strommärkte im internationalen Vergleich, Juni 2015

Günzel, Thomas (2017): Von NEFZ zu WLTP und RDE – ein Überblick, 2017, <https://www.automobil-industrie.vogel.de/von-nefz-zu-wltp-und-rde-ein-ueberblick-a-657992/>, 28.08.2018

<http://www.autobild.de/artikel/abgas-neue-messverfahren-wltp-und-rde-5676039.html>, 28.08.2018

---

Icha, Petra (Mai 2017): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2016, Dessau-Roßlau, Mai 2017

Jeß, Christian/Schade, Maike (2018): Verbrauch und Abgaswerte: Neue Messverfahren WLTP und RDE, AutoBild, 2018,

Jurich, Kristina (Juni 2016): CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe, Juni 2016

Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.) (2018): Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2017: Erneut mehr Gesamtkilometer bei geringerer Jahresfahrleistung je Fahrzeug, 2018, [https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr\\_in\\_kilometern\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html), 29.08.2018

Marx, P. D. mx-electronic.com. <http://www.mx-electronic.com>, 05. 11 2013

McGee, Patrick (2017): Electric cars' green image blackens beneath the bonnet: Research into the lifecycle of electric vehicles is a wake-up call for an industry geared up to promote 'zero emission cars', Frankfurt, 2017, <https://www.ft.com/content/a22ff86e-ba37-11e7-9bf9-4a9c83ffa852>, 30.07.2018

Mini (Hrsg.) (03/2015): Mini Cooper SD 3-Türer, Mini Cooper SD Automatik 3-Türer: Technische Daten, März 2015

Mock, Peter (2014): From laboratory to road: A 2014 update, 2014, <https://www.theicct.org/publications/laboratory-road-2014-update>, 30.08.2018

Neudorfer, H./Binder, A./Wicker, N. (2006): Analyse von unterschiedlichen Fahrzyklen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen, in: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 123, 2006, Nr. 7-8, S. 352–360

nh (2017): WLTP statt NEFZ - Neuer Fahrzyklus und Verbrauchsermittlung von Pkw, green car magazine Ausgabe V / 2017, 2017, <https://greencarmagazine.de/wltp-statt-nefz-neuer-fahrzyklus-und-verbrauchsermittlung-von-pkw/>, 28.08.2018

Romare, Mia/Dahllöf, Lisbeth (2017): The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles, in: , 2017, S. , [https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243+The+life+cycle+energy+consumption+and+CO<sub>2</sub>+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf](https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243+The+life+cycle+energy+consumption+and+CO2+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf)

Seibt, Philipp (2015): Interaktiver Klima-Rechner: Neues Auto kaufen oder nicht?, 2015, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/auto-kauf-berechnen-sie-die-klima-bilanz-ihres-neuwagens-a-1066558.html>, 29.08.2018

Statista. Lebensdauer von Autos in Deutschland 2014. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/>, 07/2014

tagesschau.de. Autos in Deutschland. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/autos-in-deutschland-101.html>, 05.03.2018

---

t-online.de (Hrsg.) (2014): Autoverschrottung in Deutschland: Nach 18 Jahren geht es in die Presse, 2014, [https://www.t-online.de/auto/id\\_70357254/autoverschrottung-in-deutschland-nach-18-jahren-geht-es-in-die-presse.html](https://www.t-online.de/auto/id_70357254/autoverschrottung-in-deutschland-nach-18-jahren-geht-es-in-die-presse.html), 29.08.2018

Transport and Environment (Hrsg.) (März 2013): Mind the Gap! Why official car fuel economy figures don't match up to reality, März 2013.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (März 2018): Erneuerbare Energien in Deutschland: Daten zur Entwicklung im Jahr 2017, März 2018

VDA, VDIK, TÜV NORD (Hrsg.) (04.08.2014): Fakten und Argumente zum Kraftstoffverbrauch, 04.08.2014

Viehmann, Sebastian (2014): Elektroauto mit 17 Prozent Kapazitäts-Verlust: Zeitbombe Akku: Verlieren Elektroautos schon nach drei Jahren an Reichweite?, 2014, [https://www.focus.de/auto/elektroauto/elektroauto-mit-17-prozent-kapazitaets-verlust-zeitbombe-akku-verlieren-elektroautos-schon-nach-drei-jahren-an-reichweite\\_id\\_4305025.html](https://www.focus.de/auto/elektroauto/elektroauto-mit-17-prozent-kapazitaets-verlust-zeitbombe-akku-verlieren-elektroautos-schon-nach-drei-jahren-an-reichweite_id_4305025.html), 29.08.2018

Viehmann, Sebastian (2017): Todesurteil für deutsche Autobauer? Das Elektroauto macht Motoren-Technik zur Randnotiz, 2017, [https://www.focus.de/auto/elektroauto/elektroauto-analyse-die-sonderausstattungs-falle-autobauern-droht-mit-e-autos-gewaltiger-einnahme-verlust\\_id\\_7781595.html](https://www.focus.de/auto/elektroauto/elektroauto-analyse-die-sonderausstattungs-falle-autobauern-droht-mit-e-autos-gewaltiger-einnahme-verlust_id_7781595.html), 15.08.2018

---

## Über die Autoren

---

**Alexander Kreck, B.Sc.**

ist Masterstudent am Fachbereich WI der Technischen Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg. Während seines Bachelorstudiums des Wirtschaftsingenieurwesens war er zuletzt in der Forschung & Entwicklung eines internationalen Heizungs- und Klimatechnikherstellers tätig. Dort verfasste er auch seine Bachelorarbeit, die sich mit Kostensenkungspotenzialen an produktinternen technischen Schnittstellen von Gas-Brennwert-Geräten befasst.

**Marco Maibach, B.Sc.**

ist Masterstudent am Fachbereich WI der Technischen Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg. Während seines Bachelorstudiums des Wirtschaftsingenieurwesens war er zuletzt in der Entwicklungsabteilung eines Technologiekonzerns im Bereich Faserverbundwerkstoffe tätig. Im Rahmen seiner Bachelorarbeit befasste er sich mit Faserverbundwerkstoffen aus keramischen Aluminiumoxid Materialien.

**Jan-Sem Nillmaier, B.Sc.**

ist Masterstudent am Fachbereich WI der Technischen Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg. Nach seinem Bachelorstudium des Wirtschaftsingenieurwesens mit dem Schwerpunkt im Maschinenbau, war er zuletzt als Qualitätsingenieur bei einem deutschen Schweißdrahthersteller tätig. Dort befasste er sich mit der Bearbeitung von Kundenreklamationen, sowie der Messung und Validierung von Produktneuheiten.

**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz-Nigmann**

ist Professor für Thermodynamik und Energietechnik an der Technischen Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg. Er befasst sich in der Forschung und Lehre mit Fragen zur Energieoptimierung in der Energieversorgung, von Gebäuden und deren Anlagen sowie Fragestellung der Energiewirtschaft.

**Lena Weber, B.Sc.**

ist Masterstudentin am Fachbereich WI der Technischen Hochschule Mittelhessen, Campus Friedberg. Während ihres Bachelor- sowie Masterstudiums des Wirtschaftsingenieurwesens war sie als wissenschaftliche Hilfskraft schwerpunktmäßig im Bereich des Operations Research tätig. Zusätzliche Erfahrungen sammelte sie in der Unternehmensentwicklung eines internationalen Flughafens, wo sie auch ihre Bachelorarbeit verfasste.

---

Der vorliegende Arbeitsbericht fußt auf einer Casy-Study welche im Sommersemester 2018 am Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der THM, Fachgebiet Thermodynamik und Energietechnik entstanden ist.

Unser besonderer Dank gilt dem Autohaus ASW Wahl GmbH & Co. KG, Niederlassung Gießen und seinem Niederlassungsleiter Herrn Meikel Eley, die uns beim Feldtest durch die Bereitstellung des Testfahrzeuges und der Infrastruktur zur Ladung des Fahrzeuges tatkräftig unterstützt haben.

---

## Zu den WI-[Reports]

Die WI-[Reports] entstehen aus Forschungs-, Abschluss-, Studien- und Projektarbeiten im Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der THM am Campus Friedberg.

Als Zielgruppen der WI-[Reports] werden Forschende, Lehrende und Lernende sowie Praktiker der Disziplin Wirtschaftsingenieurwesen gesehen.

Die Arbeitspapiere befassen sich tiefgehend mit ausgewählten, speziellen WI-Themenbereichen. Ziel ist die verständliche Vermittlung theoretischer Grundlagen und deren Transfer in praxisorientiertes Wissen.

Bitte wenden Sie sich mit Anregungen und Kritik zu den WI-[Reports] an den Herausgeberbeirat. Dies gilt insbesondere, wenn Sie selbst ein Arbeitspapier in der Reihe veröffentlichen wollen (Kontaktdaten auf Seite 2).

Informationen über die bisher erschienenen WI-[Reports] erhalten Sie unter der Adresse <https://www.thm.de/wi/>.