



**Max Keller**

# Die Zukunft des PKW

---

Wettbewerbsfähigkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich zu Batteriefahrzeugen

**WIRTSCHAFT**

Academic *Plus*



# BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com) hochladen  
und kostenlos publizieren



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

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

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

## **Impressum:**

Copyright © 2021 GRIN Verlag  
ISBN: 9783346951885

## **Dieses Buch bei GRIN:**

<https://www.grin.com/document/1382100>

**Max Keller**

# **Die Zukunft des PKW. Wettbewerbsfähigkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich zu Batterie-fahrzeugen**

## **GRIN - Your knowledge has value**

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite [www.grin.com](http://www.grin.com) ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

### **Besuchen Sie uns im Internet:**

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

[http://www.twitter.com/grin\\_com](http://www.twitter.com/grin_com)

## Academic Plus – Aktuell, relevant, hochwertig

Mit Academic Plus bietet GRIN ein eigenes Imprint für herausragende Abschlussarbeiten aus verschiedenen Fachbereichen. Alle Titel werden von der GRIN-Redaktion geprüft und ausgewählt.

Unsere Autor:innen greifen in ihren Publikationen aktuelle Themen und Fragestellungen auf, die im Mittelpunkt gesellschaftlicher Diskussionen stehen. Sie liefern fundierte Informationen, präzise Analysen und konkrete Lösungsvorschläge für Wissenschaft und Forschung.



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
1. Einleitung und Problemstellung.....	1
1.1. Motivation und Zielsetzung .....	2
1.2. Methodisches Vorgehen.....	3
2. Theoretische Grundlagen .....	7
2.1. Betrachtung der Automobilindustrie – Ist-Zustand.....	7
2.2. Rolle des Sektors Verkehr im Klimawandel.....	11
2.3. Umfeldanalyse nach PESTEL.....	17
3. Durchführung der PESTEL-Analyse .....	20
3.1. Politische und rechtliche Einflussfaktoren.....	20
3.1.1. Vorgaben aus der Politik als Rahmenbedingung .....	21
3.1.2. Weitere politische und rechtliche Einflussfaktoren .....	24
3.2. Technische Einflussfaktoren .....	29
3.2.1. Beschreibung der Technologie.....	29
3.2.2. Nutzen und Reifegrad der Technologien .....	34
3.2.3. Betrachtung des Wirkungsgrads .....	37
3.2.4. Technischer Vergleich und Herausforderungen.....	44
3.2.5. Zwischenfazit – Technische Einflussfaktoren .....	50

3.3.	Ökologische Einflussfaktoren .....	52
3.3.1.	Ökologischer Vergleich anhand des CO <sub>2</sub> -Ausstoßs.....	52
3.3.1.1.	Bewertung der Technologien anhand des Well-to-Wheel CO <sub>2</sub> -Ausstoßes.....	53
3.3.1.2.	Erweiterte Betrachtung des CO <sub>2</sub> -Ausstoßes über den gesamten Lebenszyklus.....	56
3.3.2.	Energiebedarf für den Sektor Verkehr .....	61
3.3.3.	Rohstoffe und Recycling.....	63
3.3.4.	Zwischenfazit - Ökologische Einflussfaktoren .....	66
3.4.	Ökonomische Einflussfaktoren .....	69
3.4.1.	Marktanalyse und wirtschaftliche Einflussfaktoren.....	69
3.4.2.	Betrachtung der benötigten Infrastruktur .....	72
3.4.3.	Synergien durch den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft.....	76
3.4.4.	Zwischenfazit – Ökonomische Einflussfaktoren .....	79
3.5.	Sozio-kulturelle Einflussfaktoren.....	82
3.5.1.	Soziale Akzeptanz.....	82
3.5.2.	Nutzungsverhalten und Wandel im urbanen Raum .....	85
3.5.3.	Weitere zu benennende soziale Einflussfaktoren.....	88
3.5.4.	Zwischenfazit – Sozio-kulturelle Einflussfaktoren.....	89
4.	Abschließende Bewertung .....	91
5.	Kritische Reflexion .....	97
6.	Ausblick .....	100
7.	Anhang .....	103
	Literaturverzeichnis.....	109

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit verschiedenen alternativen Antriebsarten in der EU für die Jahre 2014-2019 .....	9
Abbildung 2: Anteile der verschiedenen Antriebsarten in Relation zur Gesamtzahl an zugelassenen Fahrzeugen in der EU im Jahr 2019.....	11
Abbildung 3: Betrachtung der größten Emittenten von Treibhausgasen im Jahr 2019 sowie pro-Kopf-Ausstoß an THG für die aufgezeigten Nationen .....	13
Abbildung 4: Kumulative CO <sub>2</sub> -Emission und zukünftiger Strahlungsantrieb durch andere Gase bestimmen die Wahrscheinlichkeit, die Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen.....	15
Abbildung 5: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen innerhalb der EU von 1990-2016 und Aufschlüsselung der Verursacher im Sektor Verkehr.....	16
Abbildung 6: Ebenen des Unternehmensumfelds .....	18
Abbildung 7: Vergleich NEFZ- und WLTP-Prüfzyklus.....	22
Abbildung 8: Entwicklungsbudget und Förderquoten im Rahmen des NIP.....	25
Abbildung 9: Schematischer Aufbau des Antriebsstrangs von Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeug .....	30
Abbildung 10: Funktionsprinzip einer Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle .....	31
Abbildung 11: Bündelung mehrere Brennstoffzellen zu einem Stack.....	32
Abbildung 12: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie .....	33
Abbildung 13: Wertschöpfungskette für Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge .....	38
Abbildung 14: Exemplarische Betrachtung des Gesamtwirkungsgrades .....	40
Abbildung 15: Ladezeiten eines Tesla Model S mit 85 kWh Batteriegröße in Abhängigkeit verschiedener Ladeverfahren .....	46
Abbildung 16: Antriebsstrangarchitektur des modularen Elektrifizierungsbaukastens (MEB) von Volkswagen .....	48
Abbildung 17: Antriebsstrangarchitektur eines Brennstoffzellenfahrzeugs .....	49
Abbildung 18: Durchschnittliche Emissionen der Wasserstoffproduktion.....	55
Abbildung 19: Überblick und Einordnung der Emissionen eines Fahrzeugs über den gesamten Lebenszyklus.....	57

Abbildung 20: Klimaauswirkung durch Herstellung und Entsorgungen verschiedener Fahrzeugkonzepte über den Lebenszyklus.....	58
Abbildung 21: Grafische Aufbereitung der Emissionen durch Herstellung und Recycling sowie während des Betriebs und Betrachtung der Amortisationslaufleistung .....	60
Abbildung 22: Plausible Bandbreite für die Wasserstoffnachfrage und die Elektrolysekapazität Europas für den Zeitraum 2030 bis 2050 .....	77
Abbildung 23: Hemmnisse beim Kauf eines Batteriefahrzeugs .....	83
Abbildung 24: Verstärkende Faktoren, die zum Kauf eines Elektrofahrzeugs beitragen können .....	84
Abbildung 25: Einordnung verschiedener Verkehrsarten.....	86
Abbildung 26: Prognose der Anzahl von PKW-Neuzulassungen in Europa nach Art der Fahrzeugnutzung im Zeitraum der Jahre 2018 bis 2030.....	87
Abbildung 27: Vergleich des Marktanteils von Elektrofahrzeugen und des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf innerhalb der verschiedenen Mitgliedsländer der EU .....	89
Abbildung 28: Auflistung der wesentlichen Erkenntnisse.....	92
Abbildung 29: Einsatzbereiche und Grenzen der Batterietechnologie im Transportsektor .....	100
Abbildung 30: Vereinfachtes Schema der Produktionskette zur Herstellung strombasierter synthetischer Kraftstoffe auf Grundlage der Wasserstoffelektrolyse ...	101
Abbildung 31: Eine umfassende Analyse des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks erfordert immer eine detaillierte Betrachtung aller Abschnitte des Lebenszyklus und aller Auswirkungen in vor- und nachgelagerten Sektoren.....	104
Abbildung 32: Erzeugter Strom aus erneuerbaren Energien und Stromverbrauch Deutschlands für die erste Januarwoche und die zweite Augustwoche im Jahr 2021 ..	106
Abbildung 33: Wasserstoff Roadmap für die Entwicklung im Sektor Verkehr .....	107
Abbildung 34: Wasserstoff Roadmap für die Entwicklung einer sektorübergreifenden Wasserstoffwirtschaft in Deutschland.....	108

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auflistung der Wirkungsgrade in verschiedenen Studien.....	41
Tabelle 2: Übersicht verschiedener Ladeschnittstellen für batterie- und hybridelektrische Fahrzeuge .....	45
Tabelle 3: Rohstoffbedarf verwendeter Komponenten für Elektrofahrzeuge und herkömmliche Antriebe.....	64
Tabelle 4: Spezifische Errichtungskosten für EE-Stromerzeugungsanlagen.....	75
Tabelle 5: Investitionsbedarf in verschiedenen Bereichen zur Umstellung der gesamten PKW- und LKW-Flotte Deutschlands auf FCEV bzw. BEV .....	76
Tabelle 6: Kosten und Wirkungsgrade für Energiespeicher im Stromnetz.....	79
Tabelle 7: Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit verschiedenen alternativen Antriebsarten in der EU für die Jahre 2014 - 2019 .....	103
Tabelle 8: Emissionen verschiedener Antriebskonzepte in Abhängigkeit der Laufleistung inklusive CO <sub>2</sub> -Belastung durch Herstellung und Recycling.....	105

## Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Referenzwert für Emissionsminderung ab 2025.....	23
Formel 2: Reaktionsgleichung der Brennstoffzelle.....	32
Formel 3: Berechnung des Wirkungsgrades .....	37
Formel 4: Berechnung des Primärenergiebedarfs pro 100 km und des jährlichen primären Strombedarfs eines Batteriefahrzeugs .....	43
Formel 5: Geradengleichung zur Berechnung der Emissionen in Abhängigkeit von Laufleistung.....	59

## Abkürzungsverzeichnis

ATR	Autotherme Reformierung
BEV	Battery Electric Vehicle
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CCS	Carbon Capture and Storage
GDP	Gross Domestic Product
CH <sub>4</sub>	Chemische Bezeichnung des Moleküls Methan
CNG	Compressed Natural Gas
CO <sub>2</sub>	Chemische Bezeichnung des Moleküls Kohlenstoffdioxid
ECV	Electrically Chargeable Vehicle
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
H	Chemische Bezeichnung des Atoms Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Chemische Bezeichnung des Moleküls Wasser
LKW	Lastkraftwagen
LNG	Liquid Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
N <sub>2</sub> O	Chemische Bezeichnung des Moleküls Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzeug-Test
NIP	Nationales Innovationsprogramm
O	Chemische Bezeichnung des Atoms Sauerstoff
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PTG	Power-to-Gas
PTH <sub>2</sub>	Power-to-Wasserstoff

PTL	Power-to-Liquid
SMR	Steam Reforming
SUV	Sports Utility Vehicles, Stadtgeländewagen
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level/ Technologie-Reifegrad
TtW	Tank-to-Wheel – Wirkungskette Kraftstofftank bis zum Rad
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verband deutscher Ingenieure
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
WtT	Well-to-Tank – Wirkungskette Quelle bis zum Kraftstofftank im Fahrzeug
WtW	Well-to-Wheel – Wirkungskette Quelle bis zum Rad
$\eta$	Wirkungsgrad

## 1. Einleitung und Problemstellung

Der Markt für Personenkraftwagen unterliegt zurzeit einem interessanten Wandel. Während in den vergangenen 100 Jahren die Fahrzeughersteller bei der Weiterentwicklung des Antriebsstrangs den Fokus größtenteils auf effizientere und leistungsstärkere Verbrennungsmotoren legten, reichen diese Entwicklungen bereits in den nächsten Jahren nicht mehr aus, um die strengen Emissionsvorgaben für Kohlenstoffdioxid der EU-Kommission zu erfüllen. Mit der im April 2019 verabschiedeten EU-Verordnung 2019/631 gelten seit Beginn des Jahres 2020 strengere Zielvorgaben für den Flottengrenzwerte der Schadstoffemissionen von PKW und leichten Nutzfahrzeugen, die innerhalb der EU zugelassen werden. Ziel der neuen Verordnung ist es, durch niedrigere CO<sub>2</sub>-Grenzwerte eine Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch PKW und leichte Nutzfahrzeuge zu erreichen und somit Klima und Umwelt zu schützen. Die zuvor gültige Verordnung von 2009 (EU-Verordnung 443/2009) schrieb einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von durchschnittlich 130 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer für das Jahr 2015 vor.<sup>1</sup> Während diese Vorgabe noch größtenteils mit technischen Verbesserungen des Verbrennungsmotors, wie z. B. einer Abgasrückführung zu realisieren waren, sind die verschärften Vorgaben, die seit Ende des Jahres 2020 gelten, kaum noch mit reinen Verbrennungsmotoren zu realisieren. Die Zielvorgabe von 95 g CO<sub>2</sub>/km erfordert neue, emissionsärmere Antriebskonzepte, andernfalls drohen den Herstellern empfindliche Strafzahlungen. So wird eine Überschreitung des Grenzwerts von lediglich einem Gramm CO<sub>2</sub> mit 95 €/PKW geahndet.<sup>2</sup> Bis zum Jahr 2030 sieht die EU-Verordnung eine weitere schrittweise Emissionsreduzierung um insgesamt 37,5 % vor. Selbst Kleinwagen, wie z. B. der Ford Fiesta, erreichen die EU-Vorgaben kaum. Auch der Benzinmotor mit dem geringsten CO<sub>2</sub>-Ausstoß, welcher als Mild-Hybrid zur Emissionsreduzierung anstatt einer Lichtmaschine über einen Riemengenerator und eine zusätzliche 48 Volt Batterie verfügt, erreicht die gesetzte Vorgabe mit einem Ausstoß zwischen 92 bis 99 g CO<sub>2</sub>/km nicht.<sup>3</sup> Weiter erschwert wird das Erreichen dieser Vorgaben unter dem Zielkonflikt, dass immer mehr Verbraucher\*innen vor allem SUVs kaufen. So betrug der Anteil der Stadtgeländewagen

---

<sup>1</sup> Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*, CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte, 2020, S. 1 ff.

<sup>2</sup> Vgl. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*, CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte, 2020, S. 5.

<sup>3</sup> Vgl. *Ford-Werke GmbH*, Broschüre Fiesta, 2020, S. 9 ff.