

Martin Zapf
Hermann Pengg
Thomas Büttler
Christian Bach
Christian Weindl

Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile

Bewertung der realen Klimabelastung und
der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft

2. Auflage

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile

Martin Zapf • Hermann Pengg
Thomas Bütler • Christian Bach
Christian Weindl

Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile

Bewertung der realen Klimabelastung und
der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft

2., aktualisierte Auflage

 Springer Vieweg

Martin Zapf
Institut für Hochspannungstechnik,
Energiesystem- und Anlagendiagnose (IHEA)
Hochschule Coburg
Coburg, Deutschland

Thomas Büttler
Empa – Material Science and Technology
Dübendorf, Schweiz

Christian Weindl
Institut für Hochspannungstechnik,
Energiesystem- und Anlagendiagnose (IHEA)
Hochschule Coburg
Coburg, Deutschland

Hermann Pengg
e-gas GmbH
Kösching, Deutschland

Christian Bach
Empa – Material Science and Technology
Dübendorf, Schweiz

ISBN 978-3-658-33250-1 ISBN 978-3-658-33251-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-33251-8>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019, 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Inhaltsverzeichnis

1	Systemtheoretische Grundlagen zur Klimawandel-Problematik mit spezieller Berücksichtigung von PKW	1
1.1	Einführung	1
1.2	Systemwissenschaft und ihre Bedeutung für die Problemstellung	3
1.2.1	System	4
1.2.2	Komplexe Systeme	5
1.2.3	Modelle	8
1.2.4	Systemische Modelle und nicht-systemische Modelle – Eine Veranschaulichung anhand der CO ₂ -Regulierung für PKW in Europa	10
1.3	Eine Methodik für systemorientiertes Vorgehen	17
1.3.1	Beschreibung des Vorgehens	17
1.3.2	Festlegung von Systemgrenzen des größten involvierten Systems	18
1.4	Modelle und Forschungsergebnisse zum Klimawandel	19
1.4.1	Metaphorisches Modell – Reis-Metapher	19
1.4.2	Was sind die Ursachen und Folgen des Klimawandels? Ergebnisse von gesamtsystemischen Analysen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	22
1.4.3	Global Carbon Law – Wie stark müssen die jährlichen THG-Emissionen reduziert werden, um den Klimawandel wirksam zu reduzieren?	30
1.5	Abgrenzung und Messgrößen des Transportsektors – als Teilsystem der Anthroposphäre	35
1.5.1	Abgrenzung relevanter Teilsysteme	35
1.5.2	Abgrenzung von Wirtschafts- und Technologiesystemen innerhalb der Anthroposphäre	37
1.5.3	Qualität und Preis als zentrale Messgrößen von Wirtschafts- und Technologiesystemen	40
1.5.4	Externe Effekte	40
1.5.5	Total Cost of Ownership (TCO)	42

1.6	Lebenszyklusanalyse als Werkzeug zur Analyse der Umweltwirkungen von Technologien	44
1.6.1	Was ist eine Lebenszyklusanalyse?	46
1.6.2	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens.	47
1.6.3	Erstellung einer Sachbilanz	47
1.6.4	Wirkungsabschätzung – Klimaänderung	48
1.6.5	Nicht berücksichtigte Wirkungskategorien – u. a. Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Ressourcenbewertung	49
1.6.6	Exkurs: Planetary Boundaries	55
1.6.7	Exkurs: Sustainable Development Goals.	55
1.7	Modelle zum Personenverkehrssektor sowie für PKW	56
1.7.1	Personenverkehr als kleinste Einheit (Zelle) des betrachteten Systems	56
1.7.2	Rigoroses Modell für die Gesamtemissionen des Personenverkehrssektors	59
1.7.3	Rigoroses Modell für repräsentative Technologievergleiche und Sensitivitätsanalysen für PKW	61
1.8	Messgrößen für PKW-Vergleiche	68
1.8.1	Spezifische THG-Emissionen und Gesamtkosten	69
1.8.2	Bewertungsmethode für die Kompatibilität von Teilsystemen des Wirtschafts- und Technologiesystems mit dem Global Carbon Law	70
1.8.3	CO ₂ -Vermeidungskosten und sektorübergreifende Technologievergleiche	73
	Literatur.	79
2	Auswahl und Modellierung repräsentativer Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und Energieträgern	87
2.1	Antriebskonzepte und Energieträger	87
2.2	Arten und Potenziale von erneuerbaren Kraftstoffen.	90
2.3	Referenzfahrzeuge	96
2.4	Standardfahrzeuge	99
2.4.1	Konfiguration eines Standard-Benzinfahrzeuges.	99
2.4.2	Konfiguration von Standardfahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien	103
2.4.3	Plausibilitätsprüfung der Standardfahrzeugkennzahlen.	111
	Literatur.	119
3	Treibhausgasemissionen nach einer Life-Cycle-Analysis (LCA)	123
3.1	Well-to-Tank Emissionsfaktoren fossiler Kraftstoffe	124
3.2	Well-to-Tank Emissionsfaktoren von Biokraftstoffen	127

3.2.1	Gesetzgebung zur Minderung der THG-Emissionen von Kraftstoffen	127
3.2.2	Emissionsfaktoren von Biokraftstoffen	132
3.2.3	Beimischung erneuerbarer Kraftstoffe	134
3.3	Well-to-Tank Emissionsfaktoren von SNG und Wasserstoff	135
3.4	Well-to-Tank Emissionsfaktoren von Strom	137
3.4.1	Erneuerbarer Anteil der Stromerzeugung	140
3.4.2	Erneuerbarer Anteil des individuellen Strombezugs aus Systemperspektive	141
3.4.3	THG-Emissionen beim individuellen Strombezug	148
3.4.4	Emissionsfaktoren für strombasierte Antriebskonzepte	160
3.5	Well-to-Wheel Emissionsfaktoren je Energieträger	162
3.6	Treibhausgasemissionen bei der Herstellung und dem Recycling von Fahrzeugen	165
3.6.1	Referenzfahrzeuge	165
3.6.2	Studien bezüglich synthetischer Fahrzeuge	165
3.6.3	Spezifische THG-Emissionen der Batterieherstellung	167
3.6.4	Standardfahrzeuge	172
3.6.5	Fahrzeuggewicht je nach Leistungsklasse	174
	Literatur	175
4	Tank-to-Wheel-Verbrauchswerte gemäß Prüfstandsmessungen sowie aus Kundensicht – der Willans-Ansatz	183
4.1	Das Reglementarische Messverfahren	183
4.1.1	Verbrauchsberechnung verbrennungsmotorischer Fahrzeuge	185
4.1.2	Energiebedarfsberechnung elektrischer Fahrzeuge	188
4.1.3	Verbrauchsberechnung von Plug-in-Hybrid Fahrzeugen	190
4.2	Prüfstandsmessungen als Basis der Verbrauchsberechnung nach dem Willans-Ansatz	193
4.3	Ableitung des Kundenverbrauchs	194
4.3.1	Berechnung des Kundenverbrauchs anhand des Willans-Ansatzes	194
4.3.2	Realverbrauchsermittlung gemäß ADAC EcoTest	198
4.3.3	Realverbrauchsdaten von Spritmonitor	199
4.3.4	Referenzfahrzeuge – Kundenverbrauchsfaktor	200
4.3.5	Synthetische Standardfahrzeuge	204
4.3.6	Energiefluss am Beispiel des synthetischen BEV	207
4.3.7	Einfluss von unterschiedlichen Autobahngeschwindigkeiten	208
	Literatur	210
5	Gesamtkosten nach der Total Cost of Ownership Methodik (TCO) – Differenzierung nach antriebspezifischen Kosten	213
5.1	Annuitätenmethode	214

5.2	Anschaffungskosten	216
5.3	Energiekosten	217
5.3.1	Fossile Kraftstoffe	217
5.3.2	Biokraftstoffe	219
5.3.3	SNG und Wasserstoff	222
5.3.4	Stromkosten für Elektrofahrzeuge	226
5.3.5	Gegenüberstellung der Marktpreisbestandteile einzelner Kraftstoffe	237
5.4	Versicherungskosten	238
5.5	Wartungskosten	239
5.6	Nationale Steuern	240
	Literatur	243
6	Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener Technologien	249
6.1	Optimierung des Kundenverbrauchs	249
6.1.1	Fahrwiderstände	249
6.1.2	Verbrennungsmotorische Fahrzeuge	252
6.1.3	Batterie-elektrische Fahrzeuge	253
6.1.4	Hybridfahrzeuge	256
6.1.5	Wasserstofffahrzeuge	256
6.1.6	Kundenverbrauch je Betrachtungsjahr und Fahrprofil	257
6.2	Potenziale der CNG-Mobilität	259
6.2.1	Verbrauchsoptimierung	259
6.2.2	Erhöhung des Wasserstoffanteils	261
6.2.3	Anschaffungspreise	262
6.2.4	CNG-Tankstellenbetrieb und -Bereitstellungskosten	263
6.3	Fossile Kraftstoffpreise	267
6.4	Strombezug durch die Elektromobilität	270
6.4.1	Netzbelastungen und -kosten durch die Elektromobilität	270
6.4.2	Infrastrukturkosten	273
6.4.3	Strombereitstellungskosten	276
6.5	Kosten synthetischer Kraftstoffe	278
6.5.1	National	279
6.5.2	International	281
6.6	Wasserstoffbereitstellungskosten	294
6.7	Produktbeschaffungskosten sowie Kosten für Verteilung und Verkauf je Energieträger	298
6.8	Anschaffungspreise bzw. Herstellkosten	300
6.8.1	Batterie-elektrische Fahrzeuge sowie HEV und HFCEV	300
6.8.2	Verbrennungsmotorische Fahrzeuge	302
6.8.3	Listenpreise sowie monatliche Gesamtkosten je Betrachtungsjahr	304
	Literatur	305

7	Treibhausgasemissionen und Gesamtkosten je Antriebstechnologie und Energieträger für repräsentative Fahrzeuge	311
7.1	Referenzfahrzeuge	314
7.1.1	Kosten und THG-Emissionen 2016	315
7.1.2	CO ₂ -Vermeidungskosten	321
7.1.3	Zusammenfassende Erkenntnisse	324
7.2	Standardfahrzeuge	326
7.2.1	Betrachtungsjahr 2016	327
7.2.2	Betrachtungsjahr 2030 – Zukunftsszenario Low Oil Price	343
7.2.3	Betrachtungsjahr 2050 – Zukunftsszenario Low Oil Price	355
7.2.4	Entwicklung der spezifischen Gesamtkosten und THG-Emissionen zwischen 2016 und 2030 – Zukunftsszenario Low Oil Price	363
7.2.5	Entwicklung der spezifischen Gesamtkosten und THG-Emissionen zwischen 2030 und 2050 – Zukunftsszenario Low Oil Price	368
7.2.6	Standardfahrzeuge mit fossilen Kraftstoffen – Zukunftsszenario New Policies	371
7.2.7	Analyse der Energiekosten je Betrachtungsjahr	373
7.3	Fazit und Empfehlungen an Politik und Wirtschaft	377
7.3.1	Zusammenfassende Erkenntnisse	377
7.3.2	Zukünftige Individualmobilität mittels PKW	383
7.3.3	Gasinfrastrukturen für den PKW-Sektor	386
7.3.4	Optimierungsmöglichkeiten regulatorischer Eingriffe	387
	Literatur	396
8	Executive Summary	401
8.1	Notwendige THG-Einsparungen und das Global Carbon Law	402
8.2	Realer Energieverbrauch im Vergleich zum am Prüfstand gemessenen Verbrauch	404
8.3	Technologievergleiche nach einer Life-Cycle-Analysis (LCA) sowie nach der Total Cost of Ownership Methode (TCO)	405
8.4	Empfehlungen an Politik und Wirtschaft	413
8.5	Optimierungsmöglichkeiten regulatorischer Eingriffe	416
	Literatur	419
	Anhang	421
	Literatur	445
	Stichwortverzeichnis	447

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AEA	Annual Emission Allowances
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.
B7	Diesel mit 7 Vol.% an Biodiesel
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BECCS	Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (engl.: Bioenergy with Carbon Capture and Storage)
BEV	Batterie-elektrisches Fahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle)
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
Biokraft-NachV	Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung
BioSt-NachV	Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Capex	Investitionsausgaben (engl.: Capital Expenditure)
CCS	CO ₂ -Abscheidung und Speicherung (engl.: Carbon Capture and Storage)
CNG	Komprimiertes Erdgas (engl.: Compressed Natural Gas)
CTG	Von der Wiege bis zur Bahre (engl.: Cradle-to-Grave)
DAC	Direct Air Capture
DAT	Deutsche Automobil Treuhand
DC	Gleichstrom (engl.: Direct Current)
DE	Deutschland
DEA	Dezentrale Erzeugungsanlagen
DME	Dimethylether
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
E5 bzw. E10	Benzin mit 5 bzw. 7 Vol.% an Ethanol
EC	Energieverbrauch (engl.: Energy Consumption)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EF	Emissionsfaktor

EGIX	Erdgaspreisindex (engl.: European Gas Index)
EinsMan	Einspeisemanagement
E-Motor	Elektromotor
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EO	Eigenverbrauchsoptimierer
Erdgas H	Erdgas mit höherem Methangehalt und Brennwert (engl.: High Calorific Gas)
EtOH	Ethanol
EU-ETS	European Union Emissions Trading System
EV	Eigenversorger
FAME	Fettsäuremethylester (engl.: Fatty Acid Methyl Ester)
fob ARA	free-on-board (fob) ab Raffinerie/Lager in Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen (ARA)
FOLU	Forestry and Other Land Use
FQD	Fuel Quality Directive
FT	Fischer-Tropsch
Fzg.	Fahrzeuge
GCL	Global Carbon Law
GMST	Global Mean Surface Temperature
GWP	Treibhausgaspotenzial (engl.: Global Warming Potential)
H&R	Herstellung und Recycling
HEV	Hybridfahrzeug (engl.: Hybrid Electric Vehicle)
HFCEV/FCV/FCEV	Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeug (engl.: Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle)
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HkRNDV	Herkunfts- und Regionalnachweis-Durchführungsverordnung
HVO	Hydrierte Pflanzenöle (engl.: Hydrotreated Vegetable Oils)
IC-CPD	In-Cable-Control-and-Protection-Device
ICEV	Verbrennungsmotorisches Fahrzeug (engl. Internal Combustion Engine Vehicle)
ILUC	Indirekte Landnutzungsänderung (engl.: Indirect Land Use Change)
iMSys	Intelligentes Messsystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IT	Informationstechnik
JEC	Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE Collaboration
Kfz	Kraftfahrzeug
KraftStG	Kraftfahrzeugsteuergesetz
KV	Kundenverbrauch
KVF	Kundenverbrauchsfaktor

KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
LCA	Lebenszyklusanalyse bzw. Ökobilanz (engl.: Lifecycle Analysis)
LH2	Flüssigwasserstoff
LI	Ladeinfrastruktur
LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (engl.: Liquid Organic Hydrogen Carrier)
LPG	Autogas (engl.: Liquefied Petroleum Gas)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl.: Land Use, Land Use Change and Forestry)
MeOH	Methanol
Nabisy	Nachhaltige-Biomasse-System
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NDC	Nationally Determined Contributions
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NEP	Netzentwicklungsplan
OEM	Fahrzeughersteller (engl.: Original Equipment Manufacturer)
PHEV	Plug-in-Hybrid-Fahrzeug (engl.: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
PHEV-BEV	Plug-in Hybridfahrzeug im batterie-elektrischen Modus
PHEV-HEV	Plug-in Hybridfahrzeug im Hybridmodus mit Verbrennungsmotor
PKW	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik
PV-EV	Photovoltaik-Eigenversorgung
RED	Renewable Energy Directive
Schuko	Schutzkontakt
SDG	Sustainable Development Goals
SET Plan	Strategic Energy Technology Plan – European Commission
SINTEG	Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende
SLF	Synthetische Flüssigkraftstoffe (engl.: Synthetic Liquid Fuel)
SNG-CH4	Synthetisches Methan (engl.: Synthetic Natural Gas – Methane)
SNG-H2	Synthetischer Wasserstoff (engl.: Synthetic Natural Gas – Hydrogen)
StromStG	Stromsteuergesetz
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
TTW	Tank-to-Wheel
UCE-ME	Rest- und abfallstoffbasierter Biodiesel (engl.: Used Cooking Oil Methyl ester)

UER	Upstream-Emissionsminderungen (engl.: Upstream-Emissions-Reductions)
UF	Utility Factor
UFOP	Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.
UNEP	United Nations Environment Program
UNO/UN	United Nations Organization
WACC	Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten (engl.: Weighted Average Cost of Capital)
WLTP	Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure
WMO	World Meteorological Organization
wt.%	Gewichtsprozent (engl.: Weight Percent)
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel

Chemische Formelzeichen

CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO _{2eq}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (engl.: Carbon Dioxide Equivalent)
H ₂	Wasserstoff
N ₂ O	Lachgas

Kennzahlen

H_i bzw. LHV	Heizwert (engl.: Lower Heating Value) [kWh/Nm ³]
H_S bzw. HHV	Brennwert (engl.: Higher Heating Value) [kWh/Nm ³]
i_{real}	Realer kalkulatorischer Zinssatz [%]
R ²	Bestimmtheitsmaß [-]
λ	Verbrennungsluftverhältnis [-]

Symbole

/	Keine Angabe
[-]	Ohne Einheit



Systemtheoretische Grundlagen zur Klimawandel-Problematik mit spezieller Berücksichtigung von PKW

1

1.1 Einführung

Im Rahmen des Abkommens von Paris (2015) haben bislang 185 von 197 Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) einer Verpflichtung zur Begrenzung der Temperaturanomalie¹ auf deutlich unter 2 °C zugestimmt (Stand der Ratifikation 06/2019). Es wurde auch vereinbart, Anstrengungen zur Limitierung der Temperaturanomalie auf 1,5 °C zu unternehmen [1]. Dazu ist eine rasche und starke Reduktion von anthropogenen Treibhausgas-Emissionen (kurz: THG-Emissionen) notwendig [2].

Den größten Beitrag zu diesen Emissionen leistet durch menschliche Aktivitäten bzw. von menschlichen Technologien verursachtes CO₂. Weltweit wurden im Jahr 2015 etwa 32,3 Gt_{CO₂} durch die Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Der Transportsektor trug ca. 24 % (ca. 7,7 Gt_{CO₂}) zu diesen CO₂-Emissionen bei, was im Vergleich zum Stand im Jahr 1990 einem Anstieg um 68 % entspricht. In der EU ist der Transportsektor der einzige Sektor mit steigenden CO₂-Emissionen seit 1990 [3].

Zahlreiche Positionen bezüglich Prognosen über soziotechnische Entwicklungen v. a. in den Energiesektoren werden von unterschiedlichen Akteuren eingenommen, wobei sich diese für den Transportsektor u. a. zwischen den folgenden Extrempositionen bewegen:

1. Fossile Energieträger werden auch zukünftig eine dominante Rolle spielen, z. B. [4]
2. Straßenverkehr sollte zukünftig dominant elektrisch stattfinden, z. B. [5]

¹ Siehe Abschn. 1.4.2.

Folgendes kann anhand der Ergebnisse dieser Abhandlung festgehalten werden – das Erreichen der Klimaziele nach dem Abkommen von Paris und eine Dominanz fossiler Energieträger bis zum Jahr 2050 schließen sich aus. Grund dafür ist der hohe Emissionsfaktor² fossiler Energieträger im Vergleich zu erneuerbaren Energieträgern. Daher ist auch bei sehr starker Effizienzsteigerung von Antrieben (z. B. durch Elektrifizierung) die Verwendung erneuerbarer Energieträger in allen Sektoren des Energiesystems notwendig, um die Klimaziele zu erreichen. Dieses Faktum wird in Studien und Publikationen rund um Extremposition 1 häufig nicht angesprochen. Es ist daher zu vermuten, dass einige Vertreter der Extremposition 1 die Notwendigkeit des Erreichens der Klimaziele anzweifeln. Manchmal findet man diese Vermutung in recht direkter Weise bestätigt. „While the benefits of carbon dioxide are proven, the alleged risks of climate change are contrary to observed data, are based on admitted speculation, and lack adequate scientific basis,“ schrieb Peabody, der größte Kohleminenbetreiber der USA, an den White House Council on Environmental Quality im Jahr 2015 [6].

Im Gegensatz zum vorangegangenen Zitat hat die intensive und interdisziplinäre Forschung jedoch hervorgebracht, dass anthropogene THG-Emissionen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die ausschlaggebende Ursache des Klimawandels darstellen und signifikante globale Auswirkungen auf die Umwelt und Lebensbedingungen damit einhergehen [7, 8]. Die Erkenntnisse der Klimaforschung zeigen eindeutig auf, dass eine massive THG-Reduktion in kurzer Zeit notwendig ist [9].

Es wird in diesem Buch die Frage untersucht, ob diese THG-Reduktion im PKW-Sektor mit heute verfügbaren Technologien möglich ist und welche heute bekannten Technologien Teil des Lösungsmixes in der Zukunft sein könnten. Ziel dieser Arbeit ist es, THG-Emissionen und Gesamtkosten der Mobilität mittels PKW vorzustellen. Es werden die folgenden Forschungsfragen untersucht:

1. Warum ist es notwendig, THG-Emissionen rasch zu reduzieren? Welche THG-Einsparungen sind gegenüber dem aktuellen Stand notwendig, um irreversible Änderungen des Klimas zu verhindern?
2. Wie unterscheiden sich Energieverbräuche bzw. CO₂-Emissionen im PKW-Sektor in Prüfzyklen (z. B. NEFZ-Verfahren) von realen Werten und wie wird dies durch das jeweilige Fahrprofil der Nutzer beeinflusst?
3. Welche Gesamtkosten (engl.: Total Cost of Ownership, TCO) und welche THG-Emissionen (nach einer Lebenszyklusanalyse, LCA) sind mit welcher Antriebstechnologie verbunden?
4. Welche heute bekannten Technologien können wie viel dazu beitragen, die notwendige THG-Emissionsreduktion im PKW-Sektor zu erreichen?
5. Wie hoch sind die Mehrkosten einer alternativen Technologie gegenüber einem Benzinfahrzeug mit fossilem Kraftstoff (Benzin-Referenz) in Relation zur eingesparten

²Siehe Kap. 3.

THG-Menge gemäß einer Lebenszyklusanalyse (CO₂-Vermeidungskosten)? Sind die CO₂-Vermeidungskosten in allen Sektoren gleich?

6. Welche Empfehlungen an Politik und Wirtschaft lassen sich aus den Erkenntnissen ableiten?

Um diese Fragen zu beantworten, wird eine systemtheoretisch begründete Methodik entwickelt. Dadurch können auch Erkenntnisse gewonnen werden, die über den PKW-Sektor hinausgehen.

Es wird zum einen der Ist-Zustand anhand von Daten aus dem Jahr 2016 erfasst. Zum anderen werden Szenarien für die Zukunft dargelegt, bei dem unterstellt wird, dass absehbare Optimierungspotenziale bezüglich Qualität und Kosten erschlossen werden, die aus einer Vielzahl an Quellen abgeleitet werden. Betrachtet werden die Jahre 2030 und 2050. Aufgrund der verwendeten Daten gelten die Ergebnisse speziell für PKW in Deutschland. Die zur Beantwortung der Forschungsfragen eingesetzten und entwickelten Methoden können jedoch auf andere Länder und Technologien angewendet werden.

Über den PKW-Sektor hinaus werden politische Handlungsempfehlungen abgeleitet. Es wird ein Instrument vorgestellt, mit dem die notwendige THG-Reduktion gegenüber dem aktuellen Stand, welche für die Einhaltung der Vereinbarungen des Pariser Abkommens notwendig ist, kosteneffizient und treffsicher umgesetzt werden kann.

Um komprimiert bedeutende Aussagen zugänglich zu machen, haben die Autoren im Laufe des Buches Hervorhebungen vorgenommen – wie es auch an dieser Stelle der Fall ist. Somit können die wesentlichen Inhalte dieses Buches in Kürze erfasst werden.

1.2 Systemwissenschaft und ihre Bedeutung für die Problemstellung

Die Systemwissenschaft beschäftigt sich mit den Zusammenhängen und Wechselwirkungen sogenannter Systeme mit dem Ziel, Aussagen über die zukünftige Entwicklung dieser Systeme machen zu können. Dabei ist folgendes zu beachten:

„Systems science is not a science in the ordinary sense, but rather a new dimension in science. Each system developed as a model of some phenomenon in any traditional science represents knowledge pertaining to that science. Knowledge in systems science is not of this kind. Rather, it is knowledge regarding knowledge structures, i. e. certain specific categories of systems“ [10].

Systemwissenschaften

► Der Begriff *Systemwissenschaft* ist nicht einheitlich definiert. In dieser Abhandlung wird darunter sehr allgemein der Einsatz interdisziplinärer Methoden verstanden. Diese

sollen dazu dienen, Probleme zu beschreiben und Lösungen zu suchen, die sich innerhalb einer einzelnen wissenschaftlichen Disziplin und mit deren Werkzeugen weder beschreiben noch lösen lassen.

Die Ursprünge der Systemwissenschaft werden u. a. in Arbeiten von Bertalanffy (1948) gesehen [11]. Einen umfassenden Überblick über Ursprünge und Entwicklung der Systemwissenschaft als Teil der *Complexity Science* bietet [12]. In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst einige Begriffe definiert, die für die systemtheoretisch begründete Methodik in dieser Abhandlung erforderlich sind. Diese lehnen sich an Definitionen in [13, 14] an.

1.2.1 System

► Unter dem Begriff *System* wird ein Teil der zu beschreibenden Realität³ verstanden, der typischerweise in weitere Teile zerlegbar ist, die untereinander in Wechselwirkung stehen. Die *Systemgrenze* trennt das Innere (dem System Zugehörige) eines Systems von dessen Äußerem (dem System nicht Zugehörigen). Ein Teil eines Systems wird *Teilsystem* genannt. Teilsysteme können wiederum selbst weitere Teilsysteme enthalten. Ein *Element* eines Systems ist ein Teilsystem, das nicht in weitere Teilsysteme zerlegt wird. Die Grenzen eines Systems, Teilsysteme, Elemente und Wechselwirkungen können sich zeitabhängig ändern.

Ein System kann mathematisch auch als *Menge* definiert werden. Das Äußere des Systems ist dann das Komplement der Menge, die das System repräsentiert.

► Um eine bestimmte Forschungsfrage zu beantworten, muss zunächst der betroffene Teil der zu beschreibenden Realität vom Rest der Welt abgegrenzt werden. Das dadurch entstehende System wird das *größte involvierte System* genannt. Es wird römisch nummeriert mit System I, kurz: S(I) oder S I. Allgemein: Wenn Elemente eines Teilsystems von S(k), k = I, II ..., Eigenschaften haben, die mit Methoden, die innerhalb des Systems S(k) zur Anwendung kommen, nicht vollständig untersucht werden können, wird dieses System S(k + 1) genannt.

Das größte involvierte System S I ist in Bezug auf Forschungsfragen bezüglich der Begrenzung des durch anthropogene Einflüsse verursachten Klimawandels das System *Planet Erde* (siehe Abschn. 1.3.2). Die Anthroposphäre (Definitionen im Abschn. 1.2.2 und 1.5.1) ist davon ein Teilsystem. An dieser Stelle wird die Anthroposphäre daher als System II (S II) bezeichnet. Menschen sind Elemente des Systems *Planet Erde* in ihrer Eigenschaft als Säugetiere, aber auch Elemente der Anthroposphäre als Akteure. Die Anthro-

³In dieser Arbeit wird der in der Naturwissenschaft übliche Standpunkt des *Realismus* eingenommen, d. h. der Standpunkt, dass es eine vom Beobachter unabhängig existierende Realität gibt, auch wenn die Wahrnehmung der Realität durch den Beobachter beeinflusst wird, siehe z. B. [15].

sphäre kann nicht verstanden werden, soweit nur die Methoden angewendet werden, die Menschen als Lebewesen untersuchen.

► Zwischen zwei Teilsystemen (oder Elementen) eines Systems bestehen *Wechselwirkungen*, wenn eine Änderung des ersten Teilsystems eine Änderung im zweiten Teilsystem hervorruft. Eine Wechselwirkung heißt *nicht linear*, wenn sie nicht durch einen *linearen* Zusammenhang beschrieben werden kann.⁴

► Ein System wird als *offen* bezeichnet, wenn es relevante Wechselwirkungen über seine Systemgrenze hinaus mit seiner Umwelt hat. Ein *abgeschlossenes System* hat keine relevanten Wechselwirkungen über seine Systemgrenze hinaus.

Lebende Organismen sowie die Anthroposphäre sind offene Systeme. Würde man diese Systeme von ihrer Umgebung abschließen, können diese nicht weiter existieren und die Systemgrenze würde sich auflösen. Offenheit ist daher eine notwendige Bedingung für die Existenz bestimmter Systeme – Beispiele dazu sind u. a. in [16] zu finden.

1.2.2 Komplexe Systeme

Es gibt eine Vielzahl von Vorschlägen, wie komplexe Systeme zu klassifizieren sind, z. B. beschrieben in [14, 16]. Für die Zwecke dieser Arbeit werden Systeme ausgehend von den Definitionen im Abschn. 1.2.1 nach folgenden drei Kategorien klassifiziert:

- Anzahl Teilsysteme (Elemente),
- Anzahl Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen (Vernetzungsgrad des Systems),
- Art der Wechselwirkung: komplex (z. B. nicht linear) oder einfach (z. B. linear).

Für komplexe Systeme wird aufbauend auf diesen Kategorien Folgendes definiert.

► Ein *komplexes System* erfüllt mindestens zwei der folgenden Merkmale:

- es kann nur mittels einer großen Zahl (>10) von Teilsystemen beschrieben werden,
- der Vernetzungsgrad ist hoch,
- die Wechselwirkungen sind nichtlinear.

Beispiele

- Ein ideales Gas in einem abgeschlossenen Volumen ist ein einfaches System. Es besteht zwar aus sehr vielen Teilsystemen (Teilchen), der Vernetzungsgrad der Teilchen ist aber gering. Physikalische Modelle beschreiben das System ausreichend genau.

⁴Siehe Abschn. 7.2.1.2 bzgl. lineare und nichtlineare Sensitivitäten.

- Das Klimasystem ist ein komplexes System, in dem unterschiedliche sehr komplexe Teilsysteme interagieren. Die Anzahl an Teilsystemen ist sehr hoch, ebenso der Vernetzungsgrad. Es gibt nichtlineare Wechselwirkungen.
- Die Anthroposphäre und Teilsysteme davon, z. B. der Energie- und Transportsektor, sind ebenfalls komplexe Systeme.

In einem komplexen System sind sowohl die Struktur der Teilsysteme als auch die Wechselwirkungen untereinander nicht konstant, sondern können sich zeitabhängig ändern. Weitere typische Eigenschaften von komplexen Systemen sind (vgl. z. B. [13, 19–21]):

- Sie haben eine komplexe Unterstruktur – sie bestehen aus verschachtelten Teilsystemen.
- Sie weisen häufig Selbstähnlichkeit auf, d. h. die Struktur eines Systems wiederholt sich in Teilsystemen.
- Anders als bei einfachen Systemen kann die Abgrenzung von Teilsystemen nicht eindeutig vorgenommen werden, sondern erfolgt abhängig von der Forschungsfrage.
- Häufig treten selbstverstärkende und stabilisierende Rückkopplungen auf.
- Beim Überschreiten von Grenzwerten bestimmter Parameter – sogenannten Kippunkten – kann es dazu kommen, dass das System zumeist irreversibel in einen anderen Zustand gebracht wird.
- Die Reaktion auf Änderungen einzelner Parameter kann stark zeitverzögert erfolgen (*engl.: Time Lags*).
- Sie können ein nichtlineares (chaotisches) Verhalten zeigen, d. h. das zeitliche Verhalten hängt empfindlich von den Anfangsbedingungen ab.
- Sie können das Phänomen der Selbstorganisation aufweisen.

Gemäß [14] kann zwischen natürlichen komplexen Systemen – d. h. solchen, die nicht von Menschen erschaffen sind – und sogenannten *Engineering Systems* unterschieden werden: „Engineering System: a system designed by humans having some purpose; large scale and complex engineering systems which are of interest to the Engineering Systems Division, will have a management or social dimension as well as a technical one“ [14, S. 472]. In Anlehnung an diese Publikation werden folgende Definitionen formuliert.

► *Natürliche Systeme* sind solche, die ohne menschlichen Einfluss entstanden sind oder entstehen könnten. Man unterscheidet ferner *unbelebte natürliche Systeme* (als Teilmenge des Planeten Erde z. B. Atmosphäre, Gesteine, Wassersysteme, etc.) und *lebende⁵ natürliche Systeme* (die *Biosphäre*), d. h. alle Formen von Leben inkl. Menschen in ihrer Rolle als Säugetiere.

⁵Es gibt keine eindeutige, allgemeine Definition von Leben; für die Zwecke dieser Definition werden die unter [17] genannten Schlüsselmerkmale herangezogen.

BELEBT	BIOSPHÄRE	SOZIOTECHNISCHES SYSTEM DER ANTHROSPHÄRE	BELEBT	BIOLOGIE, MEDIZIN, PALÄONTOLOGIE	PHYSIK, CHEMIE, PSYCHOLOGIE, SOZIOLOGIE, MEDIZIN, ANTHROPOLOGIE, WIRTSCHAFTS- UND POLITIK- WISSENSCHAFTEN ...
UNBELEBT	HYDROSPHÄRE, LITHOSPHÄRE, ATMOSPHÄRE		UNBELEBT	PHYSIK, CHEMIE ...	
	NATÜRLICH	ANTHROPOGEN		NATÜRLICH	ANTHROPOGEN

Abb. 1.1 Kategorisierung von komplexen Systemen sowie zur Beantwortung von Forschungsfragen vorrangig eingesetzte Forschungsdisziplinen

► *Anthropogene Systeme*⁶ bestehen aus Menschen als Akteure von selbstgeschaffenen Systemen, z. B. von Werkzeugen (Technologien), mit Wechselwirkungen untereinander. Diese Systeme, bestehend aus Menschen als Erschaffer, bilden das soziotechnische System Anthroposphäre.⁷ Eine davon nicht immer gut abgrenzbare Teilmenge stellen technische Systeme dar.

Für die Beantwortung der Forschungsfragen aus Abschn. 1.1 ist ein interdisziplinäres Vorgehen notwendig. Die vorgeschlagene Kategorisierung in Abb. 1.1 ermöglicht es, Problemstellungen in bestimmten Systemen wissenschaftlichen Methoden zuzuordnen. Physikalische und chemische Modelle, die für die Beschreibung von natürlichen unbelebten Systemen zum Einsatz kommen, liefern beispielsweise präzisere Aussagen als Modelle aus den Wirtschaftswissenschaften, die für soziotechnische Systeme verwendet werden.

Aufgrund der zuvor genannten Eigenschaften eines komplexen Systems ist zu vermuten, dass eine vollständige und eindeutige Modellierung eines derartigen Systems sowie präzise und eindeutige Aussagen über dessen Entwicklung in der Zukunft nicht möglich sind. Dass dennoch Aussagen über komplexe Systeme gemacht werden können, ist u. a. wie folgt begründet:

- Teile von komplexen Systemen zeigen trotz ihrer Komplexität unter bestimmten Umständen quasideterministische Muster, die qualitative Aussagen über die mögliche Systemdynamik erlauben.

⁶Heute spricht man bereits von der geochronologischen Epoche des Anthropozän.

⁷Der Begriff des *soziotechnischen Systems*, wie hier definiert, entspricht etwa auch dem der *Technosphäre* in [18]: „Das funktionale Umweltmodell stellt eine Definition der Umwelt ex contrario dar: die Technosphäre ist definiert als alles, was vom Menschen kontrolliert ist, und die Umwelt ist alles, was nicht Technosphäre ist“.

- Für komplexe Systeme, die physikalischen Gesetzen gehorchen, können bei genügender Rechengenauigkeit abhängig von der Forschungsfrage validierbare quantitative Aussagen gemacht werden.

Systemtheoretische Erkenntnisse über stationäre Systemzustände alleine ermöglichen es nicht, eine exakte Prognose über die zeitliche Entwicklung eines untersuchten Systems zu machen. Allerdings ist es möglich, die Anzahl und die Art möglicher Zukunftsentwicklungen einzuzugrenzen. In vielen Fällen genügen diese Erkenntnisse, um daraus Handlungsempfehlungen für Verantwortliche in Politik und Wirtschaft abzuleiten. Dieser Weg wird auch in dieser Arbeit beschrrieben. Auf Basis systemtheoretischer Grundlagen wird eine Methodik entwickelt, die zur Bewertung von Technologien im PKW-Sektor im Hinblick auf THG-Emissionen und Kosten eingesetzt werden kann.

1.2.3 Modelle

Die folgenden Definitionen und Beschreibungen lehnen sich [20] an.

► Ein *Modell* ist ein Abbild eines Teils der zu beschreibenden Realität. Ein *metaphorisches Modell* beschreibt den untersuchten Ausschnitt der Realität stark vereinfacht und bildlich. Ein *konzeptionelles Modell* beschreibt den untersuchten Ausschnitt der Realität genauer, im Falle eines Systems z. B. die Systemgrenze, wesentliche Wechselwirkungen und die Art der Wechselwirkungen. Ein *rigoroses Modell* ist ein Abbild, das sich in formaler Sprache, z. B. mathematisch, ausdrücken lässt.

Modelle werden üblicherweise nicht deduktiv, sondern induktiv und iterativ entwickelt. Die Vorgehensweise bei der Modellentwicklung ist in Abb. 1.2 illustriert. Der untersuchte Ausschnitt der Realität (AR) ist links in der Abbildung durch eine asymmetrische geometrische Form repräsentiert. Es wird zunächst ein metaphorisches Modell (M) entwickelt. Dieses enthält notwendigerweise weniger Informationen als der Ausschnitt der Realität und vernachlässigt Komplexität, daher ist die entsprechende geometrische Form – ein Kreis – kleiner und einfacher als AR. Mithilfe des metaphorischen Modells und detaillierteren Informationen über AR wird das konzeptionelle Modell (K) gebildet. Es ist AR

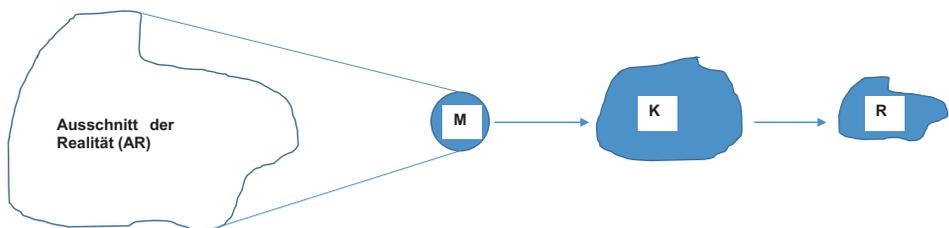


Abb. 1.2 Entwicklung von Modellen in drei Schritten: Metaphorisches Modell M, konzeptionelles Modell K und rigoroses Modell R

ähnlicher als M, enthält mehr Information und ist daher durch eine größere Form dargestellt, die AR ähnlicher ist als M. Mithilfe weiterer Informationen über AR sowie unterschiedlicher theoretischer Konzepte und Methoden wird schließlich das rigorose Modell (R) gebildet. Bei diesem Schritt wird das Modell auf die wesentlichen Elemente reduziert, daher ist die geometrische Form kleiner als bei K. Es beschreibt AR besser und rigoroser als K, daher ist die R repräsentierende geometrische Form der geometrischen Form von AR ähnlicher. Für ein rigoroses Modell gilt Folgendes:

- Es gibt die wesentlichen Systemeigenschaften von AR wieder – es wird dann ein im Hinblick auf die Forschungsfrage geeignetes Modell genannt.
- Wenn mehrere geeignete Modelle verfügbar sind, ist das einfachste Modell zu bevorzugen.

Wie kann man beurteilen, ob ein Modell geeignet zur Beantwortung einer Forschungsfrage ist oder nicht? Wie kann man die Eignung von Modellen vergleichen? Die Frage der Eignung von Modellen und Theorien zur Beantwortung von Forschungsfragen wird u. a. in der Wissenschaftstheorie eingehend untersucht, siehe z. B. [22, S. 77 ff.]. Für die Zwecke dieser Arbeit werden das Falsifikationsprinzip⁸ und daraus abgeleitete Prinzipien herangezogen, die in den Naturwissenschaften als wissenschaftstheoretische Grundsätze akzeptiert sind.

► Ein Modell $M1$ eines Systems ist *geeigneter* zur Beantwortung einer Forschungsfrage als ein anderes Modell $M2$, wenn es den untersuchten Ausschnitt der Realität so beschreibt, dass wesentliche Teile oder Wechselwirkungen erfasst werden und das im Fall von $M2$ nicht oder in geringerem Maße der Fall ist. In diesem Fall können aus Ergebnissen der Modellanwendungen des Modells $M2$ Aussagen abgeleitet werden, die im Widerspruch zu Beobachtungen stehen. Aus $M1$ abgeleitete Aussagen stehen entweder nicht oder in weniger hohem Maße im Widerspruch zu Beobachtungen.

Die Eignung eines Modells ist nach dieser Definition erstens nur im Hinblick auf eine Forschungsfrage und zweitens nur relativ zu einem anderen Modell festgelegt.

Das zweite Kriterium wird auch *Ockhams Rasiermesser* oder Kriterium der Einfachheit genannt. Es folgen zwei exemplarische Zitate, mit denen die Sinnhaftigkeit von Kriterium 2 aus unterschiedlichen Gesichtspunkten begründet wird. Aus Sicht der Statistik lautet eine mögliche Begründung: „Ockham’s razor, far from being merely an ad hoc principle, can under many practical situations in science be justified as a consequence of Bayesian inference“ [23, S. 9]. Aus wissenschaftstheoretischer Sicht kann das *Kriterium der Einfachheit* wie folgt begründet werden: „Einfachere Sätze sind (wenn wir erkennen wollen) deshalb höher zu werten als weniger einfache, weil sie mehr sagen, weil ihr empirischer Gehalt größer ist, weil sie besser überprüfbar sind“ [22, S. 92].

Das Modell des Systems und seine Systemgrenze sind nicht naturgegeben, sondern werden vom Beobachter im Hinblick auf die Forschungsfrage, die er untersucht, definiert:

⁸Das Falsifikationsprinzip wird in [22] detailliert beschrieben.

„A system is not something given in nature, but something defined by intelligence“ [20, S. 242]. Ein System ist also einerseits ein Teil der Realität, andererseits kann auch das Abbild des Systems – das Modell – ein System sein. Im Folgenden wird der betrachtete Teil der Realität als System bezeichnet und das Abbild als Modell.

1.2.4 Systemische Modelle und nicht-systemische Modelle – Eine Veranschaulichung anhand der CO₂-Regulierung für PKW in Europa

Ein häufiger Fehler bei der Erstellung von Modellen für komplexe Systeme ist, dass der betroffene Ausschnitt der Realität nicht als komplexes System erkannt wird und dass Systemgrenzen nicht korrekt gezogen werden. Das Vorgehen, bei dem die Eigenschaften komplexer Systeme berücksichtigt werden, wird im Folgenden *systemisches Vorgehen* genannt, und entsprechende Modelle *systemische Modelle*. Systemische Modelle sind zur Beschreibung von komplexen Systemen geeigneter als nicht-systemische Modelle.

Zwei Illustrationen mit Fokus auf Elektro- und Wasserstofffahrzeuge sind in Abb. 1.3 dargestellt. Sowohl die Karikatur als auch der Werbespruch für Wasserstofffahrzeuge stellen metaphorische Modelle für die betrachtete Problemstellung – THG-Emissionen im PKW-Sektor – dar. Beide Modelle sind nicht-systemisch, denn beide betrachten nicht die gesamten THG-Emissionen von PKW. Die Karikatur betont und überhöht in satirischer Weise den Effekt der indirekten Emissionen bzw. Vorkettenemissionen, die bei der Herstellung des Stroms für das Laden der Elektroautos entstehen. Der Werbespruch unten betrachtet nur die Auspuffemissionen und blendet die indirekten Emissionen aus. Ein systemisches Modell berücksichtigt die gesamten THG-Emissionen eines Fahrzeugs.

In ähnlicher Weise wie in Abb. 1.3 erfolgt eine Fokussierung auf bestimmte Emissionen ohne systemisches Vorgehen bei der Verordnung (EU) Nr. 443/2009, welche CO₂-Emissionen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge regulieren soll.

Im Folgenden wird zunächst die historische Entwicklung der Emissions-Gesetzgebungen im Automobil-Sektor beschrieben. Im Jahr 1970 wurde erstmals eine Richtlinie innerhalb der europäischen Wirtschaftsgemeinschaft eingeführt, welche die Messung von Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs zum Thema hatte. Ziel der Richtlinie war eine Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung [25]. Lokale Schadstoffemissionen standen im Zentrum der Richtlinie. Auch aufgrund der Ölkrise rückte der Kraftstoffverbrauch in den Fokus einer Richtlinie aus dem Jahr 1980 [26]. Ab dem Jahr 1991 wurde der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) zum Zweck der Verbrauchsmessung eingeführt [27]. THG-Emissionen als Problem bezüglich des Klimawandels wurden erstmals im Beschluss des Rates 94/69/EG (siehe [28]) erwähnt und in der Richtlinie 93/116/EG umgesetzt [29]. Zunächst erfolgte die Umsetzung nach einer sogenannten 3-Säulen-Strategie. Selbstverpflichtungen der Automobilindustrie, ver-

Abb. 1.3 Karikatur zum Thema Elektroautos (oben, © Til Mette) sowie Werbespruch für Brennstoffzellenfahrzeuge (unten, [24])



besserte Verbraucher-Information und steuerliche Anreize sollten zur Reduktion von THG-Emissionen im PKW-Sektor führen.

Im Jahr 2009 wurde mit der Verordnung (EU) Nr. 443/2009 ein verbindliches Ziel für CO₂-Emissionen im PKW-Sektor der EU eingeführt, dessen Nichterreichen mit Sanktionen belegt wurde. Ziel dieser Verordnung ist es, die CO₂-Emissionen im Transportsektor zu regulieren. Die wesentlichen Elemente der CO₂-Regulierung für PKW und leichte Nutzfahrzeuge für 2020 bzw. 2021 sind in Abb. 1.4 dargelegt.

„Der durchschnittliche Ausstoß aller neu zugelassenen Fahrzeuge eines Herstellers darf demnach einen gesetzlich fixierten Grenzwert in Gramm CO₂ pro Kilometer in einem Jahr nicht überschreiten. [...] Die Regulierung setzt keinen europäischen Einheitswert, sondern berücksichtigt grundsätzlich die unterschiedlichen Produktpaletten der Konzerne. So muss nicht jeder einzelne Hersteller den europäischen Gesamtflottenwert von 95 g/km bei PKW bzw. 147 g/km bei leichten Nutzfahrzeugen einhalten. Vielmehr wird für jeden Hersteller ein spezifischer Grenzwert errechnet, der auf dem durchschnittlichen Fahrzeuggewicht der Herstellerflotten beruht. Im Durchschnitt aller Hersteller ist damit statistisch sichergestellt, dass der europäische Flottenwert erreicht wird“ [30].

Definition	Pkw		Leichte Nutzfahrzeuge	
	Ziel 2012	Ziel 2021	Ziel 2014	Ziel 2020
Gewichtbasierter Ansatz Herstellerindividueller CO ₂ - Grenzwert orientiert sich am Gewicht des Fahrzeugs und wird individuell berechnet	130 g CO ₂ /km (Verordnung EU 443/2009) Berechnungsformel: CO ₂ = 130 + a (M - M ₀) • a = 0,0457 • M = Gewicht des fahrbereiten Pkw in kg • M ₀ = 1.372 kg (ø-Gewicht), seit 2016 M ₀ = 1.392 kg • Anpassung des ø-Gewichts ab 2016 an dreijährigen gleitenden Durchschnitt	95 g CO ₂ /km (Verordnung EU 443/2009, angepasst 2014) Berechnungsformel: CO ₂ = 95 + a (M - M ₀) • Abflachung der Geradensteigung auf a = 0,0333	175 g CO ₂ /km (Verordnung EU 510/2011) Berechnungsformel: CO ₂ = 175 + a (M - M ₀) • a = 0,093 • M = Gewicht des fahrbereiten Pkw in kg • M ₀ = 1.706 kg (ø-Gewicht) • Anpassung des ø-Gewichts ab 2018 an dreijährigen gleitenden Durchschnitt	147 g CO ₂ /km (Verordnung EU 510/2011, angepasst 2014) Berechnungsformel: CO ₂ = 147 + a (M - M ₀) a = 0,096
Strafzahlungen Falls Hersteller vorgesehene CO ₂ -Ziele nicht erreicht, muss gestaffelt je nach Zielüberschreitung eine Strafe gezahlt werden	Zielüberschreitung für 1. Gramm CO ₂ : 5 € 2. Gramm CO ₂ : 15 € 3. Gramm CO ₂ : 25 € 4. Gramm CO ₂ : 95 € je Fahrzeug	95 € je Gramm Zielverfehlung je Fahrzeug	Analog Pkw	Analog Pkw
Phasing-in Gestaffelte Einführung; steigender Anteil an Fahrzeugen, welche die neuen Vorgaben (bis 2015 bzw. ab 2020) erfüllen müssen.	Neuwagenflotte, die Grenzwert einhalten muss: • 2012 – 65 % • 2013 – 75 % • 2014 – 80 % • 2015 – 100 %	Neuwagenflotte, die Grenzwert einhalten muss: • 2020 – 95 % • 2021 – 100 %	Neuwagenflotte, die Grenzwert einhalten muss: • 2014 – 70 % • 2015 – 75 % • 2016 – 80 % • 2017 – 100 %	Kein Phasing-in
Super-Credits Förderung hocheffizienter Fahrzeuge durch Mehrfachanrechnung in der CO ₂ - Bilanz	Fahrzeuge mit weniger als 50 g CO ₂ /km werden in 2012/2013 3,5-fach • 2014 2,5-fach • 2015 1,5-fach • ab 2016 einfach angerechnet ohne Limitierung	Fahrzeuge mit weniger als 50 g CO ₂ /km werden in • 2020 2-fach • 2021 1,67-fach • 2022 1,33-fach • ab 2023 einfach angerechnet mit Limitierung auf max. 7,5 g über Periode 2020-2023	Fahrzeuge mit weniger als 50 g CO ₂ /km werden in • 2014/2015 3,5-fach • in 2016 2,5-fach • in 2017 1,5-fach • ab 2018 einfach angerechnet ohne Limitierung	Keine Super-Credits
Öko-Innovationen Technologien, die im offiziellen Testverfahren (NEFZ) nicht messbar sind, aber eindeutiges CO ₂ - Einsparpotenzial haben	Können bis max. 7g CO ₂ auf den Flottendurchschnitt angerechnet werden (Beispiele sind Solardächer, Abgaswärmerückgewinnung)		Analog Pkw	
Ausnahmeregelungen Um die wirtschaftliche Existenz von Herstellern mit kleiner Flotte sicherzustellen, werden Ausnahmeregelungen gewährt	<ul style="list-style-type: none"> Hersteller mit Zulassungen unter 1.000 Einheiten werden nicht betrachtet. Hersteller mit Zulassungen zwischen 1.000 und 10.000 Einheiten bekommen ein individuell mit der EU-Kommission vereinbartes Ziel. 		<ul style="list-style-type: none"> Hersteller mit Zulassungen unter 1.000 Einheiten werden nicht betrachtet. Hersteller mit Zulassungen zwischen 1.000 und 22.000 Einheiten bekommen ein individuell mit der EU-Kommission vereinbartes Ziel. 	
Pooling Zusammenfassung versch. Hersteller von Fzg. in einem Konzern	Möglich		Möglich	

Abb. 1.4 Elemente der CO₂-Regulierung für PKW und leichte Nutzfahrzeuge für 2020 bzw. 2021 [31]

Der fixierte Grenzwert trifft entsprechend nicht auf einzelne Fahrzeuge zu. Grundlage für die Grenzwertfestlegung bildete bis Ende 2020 die Verbrauchsmessung nach dem NEFZ-Verfahren.

„Die Europäische Kommission hat mit Blick auf ihre CO₂-Gesetzgebung bis Ende 2020 entschieden, nicht den CO₂-Grenzwert für neue PKW-Modelle gemäß dem Testzyklus WLTP anzupassen, sondern deren im WLTP ermittelte Emissionen jeweils zurückzurechnen, als wären sie NEFZ-Werte. Dies wird mithilfe einer Software geschehen, die vom EU-Forschungszentrum Joint Research Centre (JRC) entwickelt wurde. Da diese zurückgerechneten NEFZ-Werte jedoch auf den strengeren Rahmenbedingungen des WLTP-Testverfahrens basieren, werden sie leicht höher⁹ ausfallen als gemäß dem ursprünglichen Testablauf“ [30].

Die Strafzahlungshöhe ab 2021 von 95 €/g entspricht einem CO₂-Preis von 475 €/t unter der Annahme, dass der Lebenszyklus eines Fahrzeuges im Durchschnitt 200.000 km beträgt. Diese Umrechnung gilt für ein Fahrzeuggewicht von 1372 kg.¹⁰

Mit der Verordnung (EU) 2019/631 wurden die Verordnungen (EU) Nr. 443/2009 (Vorgängerregelung für Pkw) als auch Nr. 510/2011 (Vorgängerregelung für leichte Nutzfahrzeuge) abgelöst und neue CO₂-Flottengrenzwerte festlegt, die ab 2025 bzw. 2030 greifen. Zielvorgabe ab 2030 ist für PKW eine CO₂-Minderung von 37,5 % gegenüber dem Flottengrenzwert im Jahr 2021.

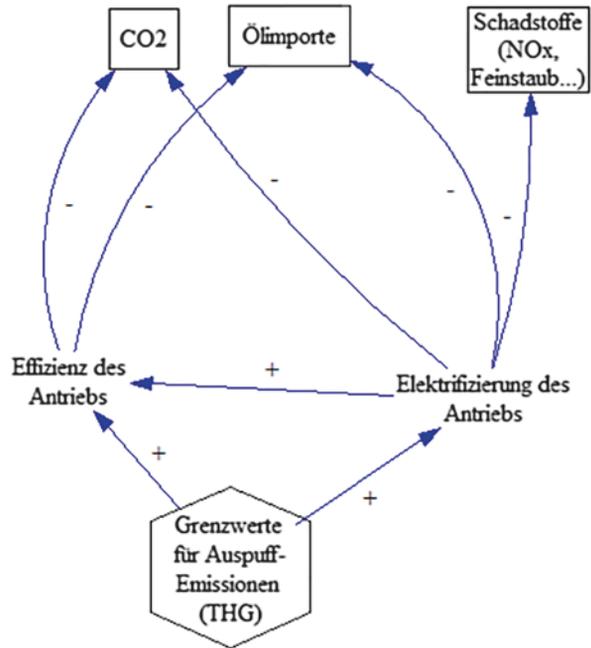
Bei der Ausgestaltung der Emissions-Gesetzgebungen im Automobil-Sektor ist erkennbar, dass indirekte Emissionen keine Berücksichtigung finden. Dies gilt sowohl in Bezug auf THG-Emissionen, als auch in Bezug auf Schadstoffemissionen und weitere Nachhaltigkeitskriterien. *Nullemissionsfahrzeuge* stellen entsprechend Fahrzeuge dar, ohne Emissionen am Auspuff, wie Elektro- und Wasserstofffahrzeuge.

Ein konzeptionelles Modell, das der Verordnung (EU) Nr. 443/2009 zugrunde liegt, könnte vereinfacht gemäß Abb. 1.5 aussehen. Bei dieser Darstellung werden Wechselwirkungen zwischen den Elementen durch Pfeile repräsentiert. Ein „+“ bedeutet Verstärkung, ein „-“ bedeutet Abschwächung. Blau gefärbte Pfade sind positiv im Hinblick auf die Zielgrößen CO₂, Ölimporte und Schadstoffe – rot gefärbte sind negativ (siehe Abb. 1.7). Durch CO₂-Limits für Auspuffemissionen wird die Effizienz der Motoren gefördert. Dadurch wird weniger CO₂ emittiert. Zudem werden weniger Ölimporte erforderlich. Allerdings könnte die höhere Effizienz von Diesel- und Otto-Antrieben – aufgrund von *mager* betriebenen Motoren und höheren Brennkammertemperaturen – zu höheren Schadstoffemissionen (*Engine-out Emissions*) führen. Dies muss zur Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte ggf. durch Abgasnachbehandlungssysteme kompensiert werden. Neben einer Effizienzsteigerung konventioneller Antriebe kann durch einen Antriebs-

⁹Vgl. [32] bzgl. Abweichungen gegenüber NEFZ.

¹⁰Berechnungsformel aus Abb. 1.4: Grenzwert CO₂ = 95 g + a(M - M₀); M₀ = 1375 kg, a = 0,0333. Pro Gramm Überschreitung hat der Fahrzeughersteller für das betroffene Fahrzeug 95 € zu bezahlen. Daraus folgt: 1 g/km × 200.000 km = 0,2 t pro Fahrzeug-Lebenszyklus → 95 €/0,2 t = 475 €/t.

Abb. 1.5 Modell zur Verordnung (EU) Nr. 443/2009 – Schematische Darstellung ohne Anspruch auf Vollständigkeit



wechsel zu Elektrofahrzeugen ohne Emissionen am Auspuff eine besonders hohe CO₂-Einsparung gemäß der Verordnung (EU) Nr. 443/2009 erzielt werden. Im Vergleich zu Effizienzsteigerungen bei konventionellen Fahrzeugen werden wiederum Ölimporte reduziert, jedoch auch lokale Schadstoffemissionen verringert.

Das Modell in Abb. 1.5 zur Verordnung (EU) Nr. 443/2009 berücksichtigt mehrere Elemente und Wechselwirkungen. Es ist allerdings nicht systemisch, denn es berücksichtigt keine Emissionen der Energieträgerherstellung – Kraftstoffe oder Strom – und keine Emissionen der Fahrzeugherstellung. In Summe stellen diese die indirekten Emissionen dar. Dies führt zu sogenannten *Trade-offs*, d. h. zu Verschiebungen von Umweltwirkungen aus dem betrachteten Sektor in andere Sektoren. Diese *Trade-offs* sind aus Sicht der Lebenszyklusanalyse unbedingt zu vermeiden.¹¹

Die Maximierung der Effizienz des Antriebes eines Fahrzeuges führt nicht notwendigerweise zu geringeren THG-Emissionen, wenn das Gesamtsystem nicht berücksichtigt wird. Die Karikatur in Abb. 1.6 illustriert diesen Sachverhalt anhand einer Analogie aus dem Wärmesektor. Eine hocheffiziente Heizung reduziert nicht notwendigerweise CO₂-Emissionen, wenn der Verbrauch anderweitig zunimmt und weiterhin fossile Energieträger zum Einsatz kommen.

Ein konzeptionelles Modell, das zur Beschreibung der Problemsituation geeigneter ist, als das in Abb. 1.5 gezeigte, ist in Abb. 1.7 dargestellt. Die Systemgrenze ist größer ge-

¹¹Vgl. [18].

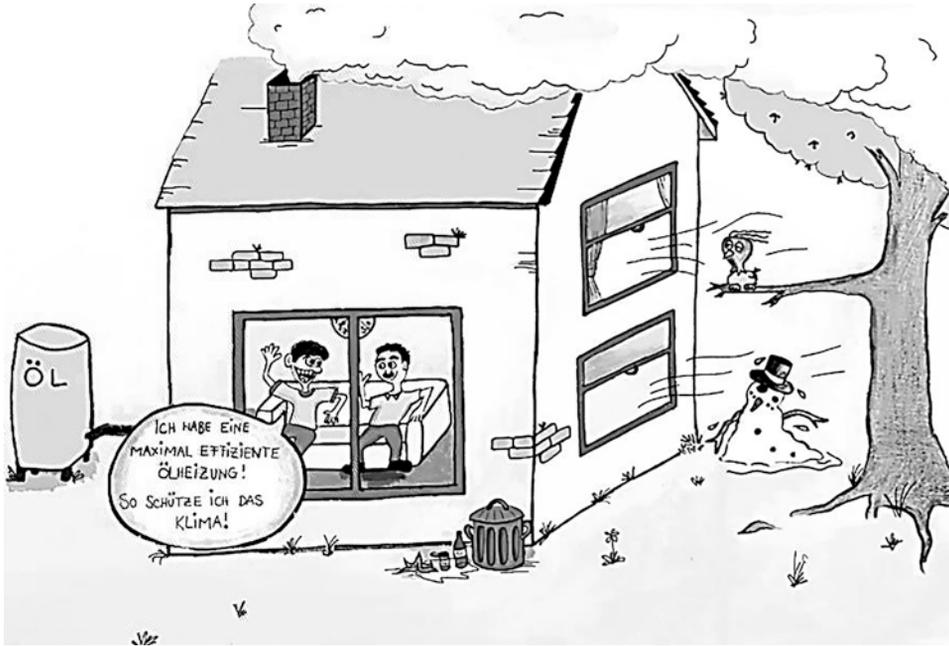


Abb. 1.6 Karikatur: Das Maximieren der Effizienz eines Teilsystems führt nicht zum Erfolg, wenn das Gesamtsystem nicht berücksichtigt wird. (© Anna Bomhard, 2019)

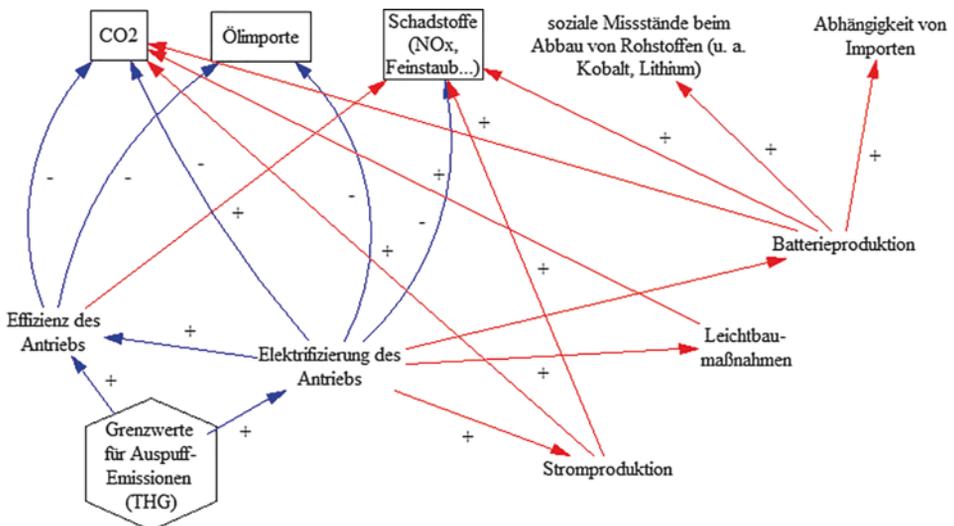


Abb. 1.7 Systemisches Modell zur Problemstellung der CO₂-Emissionen im Automobilssektor – ohne Anspruch auf Vollständigkeit

zogen und beinhaltet indirekte Emissionen sowie Themen bezüglich sozialer Nachhaltigkeit. Wie in Abb. 1.5 sind blaue Pfeile positiv im Hinblick auf die Zielgrößen. Die roten Pfeile verdeutlichen, dass die Strombereitstellung für elektrische Fahrzeuge erhöhende Einflüsse auf CO₂-Emissionen und andere Faktoren haben kann. Strom muss beispielsweise zum Betrieb der Autos und zur Fertigung der Batterien bereitgestellt werden. Wenn Batterien nicht innerhalb der EU produziert werden, kann dies die Importabhängigkeit erhöhen. Rohstoffe für Batterien, v. a. Kobalt, werden z. T. unter Bedingungen abgebaut, die den Menschenrechten widersprechen. Zudem können indirekte Schadstoffemissionen, z. B. bei der Stromproduktion, vorliegen.

Aus dieser Gegenüberstellung eines systemischen und eines nicht-systemischen Modells einer Problemsituation wird Folgendes ersichtlich. Ein systemisches Modell ist einem nicht-systemischen Modell vorzuziehen, wenn es um Fragestellungen im Bereich komplexer Systeme geht, denn ein nicht-systemisches Modell erfasst nur einen Teil der relevanten Einflussgrößen und Wechselwirkungen. Es können aus dem nicht-systemischen Modell Aussagen abgeleitet werden, die durch einen Vergleich mit Messungen widerlegt werden können. Beispielsweise folgt aus dem nicht-systemischen Modell die Aussage, dass eine Reduktion der CO₂-Emissionen am Auspuff auf null, auch die gesamten CO₂-Emissionen auf null reduziert. Diese Aussage trifft nicht zu, da bei der Herstellung der Fahrzeuge sowie bei der Herstellung des Stroms für den Betrieb der Fahrzeuge CO₂ freigesetzt werden kann.

Des Weiteren beruht die CO₂-Regulierung für PKW auf Verbrauchswerte nach einem festgelegten Prüfzyklus. Zum Energieverbrauch unter realen Bedingungen bestehen grundsätzlich Abweichungen. Diese Abweichungen können bei identischen realen Bedingungen je Antriebstechnologie unterschiedlich stark ausfallen (siehe Kap. 4). Darüber hinaus wird beim Prüfzyklus z. T. der Energieverbrauch von Nebenverbrauchern, z. B. für die Klimatisierung, nicht berücksichtigt, welcher jedoch in der Realität einen beträchtlichen Einfluss hat.

Die Vernachlässigung der indirekten Emissionen (Energieträgervorkette und Herstellung des Fahrzeugs) sowie der Unterschied zwischen dem Verbrauch nach Testzyklus und realen Betrieb führt zu hohen Abweichungen zwischen gemessenen und realen CO₂-Emissionen bei PKW. Dies wird für ausgewählte Referenzfahrzeuge im Abschn. 7.1.1 detailliert dargelegt. In Abb. 1.8 sind Emissionen unterschiedlicher Referenzfahrzeuge mit fossilen Kraftstoffen oder Strommix, nach der im Jahr 2016 gültigen Gesetzgebung und dem Prüfzyklus (NEFZ), sowie die gemäß einer Lebenszyklusanalyse berechneten Emissionen gemäß dem Kundenverbrauch¹² dargelegt. Es ist Folgendes ersichtlich:

- Alle realen Emissionen, d. h. alle indirekten und direkten Emissionen, sind größer als die im Prüfzyklus gemessenen Emissionen.
- Die relative Abweichung zwischen den LCA- und Prüfzyklus-Emissionswerten ist für alle Antriebsarten unterschiedlich.

¹²Einheitlich ermittelter Verbrauch, der dem realen Energieverbrauch nahekommt.

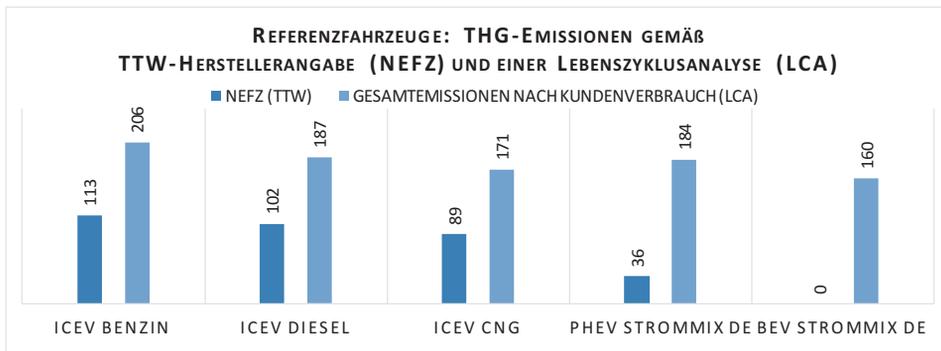


Abb. 1.8 THG-Emissionen für Referenzfahrzeuge im Jahr 2016 nach geltender Gesetzgebung (linke Säulen), sowie reale Emissionen derselben Fahrzeuge (rechte Säulen) nach einer Lebenszyklusanalyse und dem Kundenverbrauch

Die Methodik der Verordnung (EU) Nr. 443/2009 bzw. das ihr zugrunde liegende Modell ist weniger geeignet als das Modell, das der Lebenszyklusanalyse unter Berücksichtigung des Kundenverbrauchs zugrunde liegt. Die Methodik stellt daher kein systemisches Vorgehen dar, um PKW im Hinblick auf die gesamten resultierenden THG-Emissionen zu beurteilen. Dem kann auch nicht durch immer genauere Messverfahren Abhilfe geschaffen werden – ein nicht-systemisches Modell eines Systems wird nicht geeigneter durch immer genauere Messungen eines Teilsystems. Da die realen THG-Emissionen von PKW wesentlich vom Einsatz erneuerbarer Energieträger abhängen, ist daher eine Gesetzgebung erforderlich, welche die indirekten Emissionen berücksichtigt. Ein diesbezüglicher Vorschlag wird im Abschn. 7.3.4 beschrieben.

Die vorangegangenen Erläuterungen illustrieren die folgenden grundlegenden Aussagen über Modelle:

- Die Erstellung eines korrekten metaphorischen Modells ist nicht trivial. Bereits das metaphorische Modell sollte möglichst viele Eigenschaften des zu beschreibenden Teils der Realität abbilden.
- Wenn das metaphorische Modell ungeeignet zur Beschreibung der Problemsituation ist, wird es auch das daraus abgeleitete konzeptionelle Modell und rigorose Modell sein.
- Durch eine Verfeinerung von nicht-systemischen rigorosen Modellen – z. B. verfeinerte Messverfahren bei der Abgasmessung – werden diese nicht zu systemischen Modellen.

1.3 Eine Methodik für systemorientiertes Vorgehen

1.3.1 Beschreibung des Vorgehens

Unter Berücksichtigung der Definitionen im Abschn. 1.2 werden folgende Schritte zur Beantwortung der Forschungsfragen durchgeführt: