

Inhaltsverzeichnis

1 Systemtheoretische Grundlagen zur Klimawandel-Problematik mit spezieller Berücksichtigung von PKW	1
1.1 Einführung	1
1.2 Systemwissenschaften 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	19
1.3.1 Beschreibung des Vorgehens	19
1.3.2 Festlegung von Systemgrenzen des größten involvierten Systems	19
1.4 Modelle und Forschungsergebnisse zum Klimawandel	20
1.4.1 Metaphorisches Modell – Reis-Metapher	20
1.4.2 Was sind die Ursachen und Folgen des Klimawandels? Ergebnisse von gesamtsystemischen Analysen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	23
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	34
1.5.1 Abgrenzung von für die Fragestellung relevanten Teilsystemen	34
1.5.2 Abgrenzung von Wirtschafts- und Technologiesystemen innerhalb der Anthroposphäre	36

1.5.3	Qualität und Preis als zentrale Messgrößen von Wirtschafts- und Technologiesystemen	38
1.5.4	Externe Effekte.	39
1.5.5	Total Cost of Ownership (TCO).	41
1.6	Lebenszyklusanalyse als Werkzeug zur Analyse der Umweltwirkungen von Technologien	43
1.6.1	Was ist eine Lebenszyklusanalyse?	44
1.6.2	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens.	45
1.6.3	Erstellung einer Sachbilanz	46
1.6.4	Wirkungsabschätzung – Klimaänderung	47
1.6.5	Nicht berücksichtigte Wirkungskategorien – u. a. Stickoxid- und Feinstaubemissionen sowie Ressourcenbewertung	48
1.6.6	Exkurs: Planetary boundaries.	54
1.6.7	Exkurs: Sustainable Development Goals	54
1.7	Modelle zum Passagiertransportsektor sowie für PKW	55
1.7.1	Passagiertransport als kleinste Einheit (Zelle) des betrachteten Systems	55
1.7.2	Rigoroses Modell für die Gesamtemissionen des Passagierverkehrs-Sektors	58
1.7.3	Rigoroses Modell für repräsentative Technologievergleiche und Sensitivitätsanalysen für PKW.	61
1.8	Messgrößen für PKW-Vergleiche	67
1.8.1	Spezifische THG-Emissionen und Gesamtkosten	67
1.8.2	Bewertungsmethode für die Kompatibilität von Teilsystemen des Wirtschafts- und Technologiesystems mit dem Global Carbon Law	69
1.8.3	CO ₂ -Vermeidungskosten und Sektorübergreifende Technologievergleiche	72
	Literatur.	77
2	Auswahl und Modellierung repräsentativer Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und Energieträgern	83
2.1	Antriebskonzepte und Energieträger	83
2.2	Arten und Potentiale von erneuerbaren Kraftstoffen	86
2.3	Referenzfahrzeuge	92
2.4	Standardfahrzeuge	95
2.4.1	Konfiguration eines Standard-Benzinfahrzeuges	95
2.4.2	Konfiguration von Standardfahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien	99
2.4.3	Plausibilitätsprüfung der Standardfahrzeugkennzahlen.	107
	Literatur.	116

3 Heutige und zukünftige Treibhausgasemissionen nach einer Life-Cycle-Analysis (LCA)	119
3.1 Well-to-Tank Emissionsfaktoren fossiler Kraftstoffe	121
3.2 Well-to-Tank Emissionsfaktoren von Biokraftstoffen	123
3.2.1 Gesetzgebung zur Minderung der THG-Emissionen von Kraftstoffen	123
3.2.2 Emissionsfaktoren von Biokraftstoffen	128
3.2.3 Beimischung erneuerbarer Kraftstoffe	130
3.3 Well-to-Tank Emissionsfaktoren von SNG und Wasserstoff	132
3.4 Well-to-Tank Emissionsfaktoren von Strom	134
3.4.1 Erneuerbarer Anteil der Stromerzeugung	136
3.4.2 Erneuerbarer Anteil des individuellen Strombezugs aus Systemperspektive	137
3.4.3 THG-Emissionen beim individuellen Strombezug	145
3.4.4 Emissionsfaktoren für strombasierte Antriebskonzepte	157
3.5 Well-to-Wheel Emissionsfaktoren je Energieträger	159
3.6 Treibhausgasemissionen bei der Herstellung und dem Recycling von Fahrzeugen	162
3.6.1 Referenzfahrzeuge	162
3.6.2 Studien bezüglich synthetischer Fahrzeuge	163
3.6.3 Spezifische THG-Emissionen der Batterieherstellung	165
3.6.4 Standardfahrzeuge	168
3.6.5 Differenzierung nach der Fahrzeugklasse bzw. dem -gewicht	171
Literatur	172
4 Tank-to-Wheel-Verbrauchswerte gemäß Prüfstandsmessungen sowie aus Kundensicht – der Willans-Ansatz	179
4.1 Das Reglementarische Messverfahren	179
4.1.1 Verbrauchsberechnung verbrennungsmotorischer Fahrzeuge	182
4.1.2 Energiebedarfsberechnung elektrischer Fahrzeuge	184
4.1.3 Verbrauchsberechnung von Plug-in-Hybrid Fahrzeugen	186
4.2 Prüfstandsmessungen als Basis der Verbrauchsberechnung nach dem Willans-Ansatz	189
4.3 Ableitung des Kundenverbrauchs	190
4.3.1 Berechnung des Kundenverbrauchs anhand des Willans-Ansatzes	190
4.3.2 Realverbrauchsermittlung gemäß ADAC EcoTest	194
4.3.3 Realverbrauchsdaten von Spritmonitor	195
4.3.4 Referenzfahrzeuge – Kundenverbrauchsfaktor	196
4.3.5 Synthetische Standardfahrzeuge	200

4.3.6	Energiefluss am Beispiel des synthetischen BEV	203
4.3.7	Einfluss von unterschiedlichen Autobahngeschwindigkeiten	204
	Literatur	207
5	Gesamtkosten nach der Total Cost of Ownership Methodik (TCO) – Differenzierung nach Antriebsspezifischen Kosten	209
5.1	Annuitätenmethode	210
5.2	Anschaffungskosten	212
5.3	Energiekosten	213
5.3.1	Fossile Kraftstoffe	213
5.3.2	Biokraftstoffe	216
5.3.3	SNG und Wasserstoff	219
5.3.4	Stromkosten für Elektrofahrzeuge	223
5.3.5	Gegenüberstellung der Marktpreisbestandteile einzelner Kraftstoffe	233
5.4	Versicherungskosten	234
5.5	Wartungskosten	235
5.6	Nationale Steuern	236
	Literatur	239
6	Kosten- und Verbrauchsentwicklung zukünftiger Fahrzeugmodelle	245
6.1	Optimierung des Kundenverbrauchs	245
6.1.1	Fahrwiderstände	245
6.1.2	Verbrennungsmotorische Fahrzeuge	248
6.1.3	Batterie-elektrische Fahrzeuge	249
6.1.4	Hybridfahrzeuge	252
6.1.5	Wasserstofffahrzeuge	252
6.1.6	Kundenverbrauch je Betrachtungsjahr und Fahrprofil	253
6.2	Potentiale der CNG-Mobilität	255
6.2.1	Verbrauchsoptimierung	255
6.2.2	Erhöhung des Wasserstoffanteils	257
6.2.3	Anschaffungspreise	258
6.2.4	CNG-Tankstellenbetrieb und -Bereitstellungskosten	259
6.3	Fossile Kraftstoffpreise	263
6.4	Strombezug durch die Elektromobilität	266
6.4.1	Netzbelastungen und -kosten durch die Elektromobilität	266
6.4.2	Infrastrukturkosten	268
6.4.3	Strombereitstellungskosten	271
6.5	Kosten synthetischer Kraftstoffe	274
6.5.1	Erzeugung im Inland	275
6.5.2	Erzeugung im Ausland	276

6.6	Wasserstoffbereitstellungskosten	290
6.7	Produktbeschaffungskosten sowie Kosten für Verteilung und Verkauf je Energieträger	294
6.8	Anschaffungspreise bzw. Herstellkosten	295
6.8.1	Batterie-elektrische Fahrzeuge sowie HEV und HFCEV	295
6.8.2	Verbrennungsmotorische Fahrzeuge	297
6.8.3	Listenpreise sowie monatliche Gesamtkosten je Betrachtungsjahr	299
	Literatur.	301
7	Reale Treibhausgasemissionen und Gesamtkosten je Antriebstechnologie und Energieträger für repräsentative Fahrzeuge.	307
7.1	Referenzfahrzeuge	310
7.1.1	Kosten und THG-Emissionen 2016	310
7.1.2	CO ₂ -Vermeidungskosten	316
7.1.3	Zusammenfassende Erkenntnisse	320
7.2	Standardfahrzeuge	321
7.2.1	Betrachtungsjahr 2016	322
7.2.2	Betrachtungsjahr 2030 – Zukunftsszenario Low Oil Price	338
7.2.3	Betrachtungsjahr 2050 – Zukunftsszenario Low Oil Price	350
7.2.4	Entwicklung der spezifischen Gesamtkosten und THG- Emissionen zwischen 2016 und 2030 – Zukunftsszenario Low Oil Price	357
7.2.5	Entwicklung der spezifischen Gesamtkosten und THG- Emissionen zwischen 2030 und 2050 – Zukunftsszenario Low Oil Price	360
7.2.6	Standardfahrzeuge mit fossilen Kraftstoffen – Zukunftsszenario New Policies	362
7.2.7	Analyse der Energiekosten je Betrachtungsjahr	363
7.3	Fazit und Empfehlungen an Politik und Wirtschaft.	369
7.3.1	Zusammenfassende Erkenntnisse	369
7.3.2	Zukünftige Individualmobilität mittels PKW	375
7.3.3	Gasinfrastrukturen für den PKW-Sektor	377
7.3.4	Optimierungsmöglichkeiten regulatorischer Eingriffe.	378
	Literatur.	388
8	Executive Summary	391
8.1	Notwendige THG-Einsparungen und das Global Carbon Law	392
8.2	Realer Energieverbrauch im Vergleich zum am Prüfstand gemessenen Verbrauch.	394

8.3	Technologievergleiche nach einer Life-Cycle-Analysis (LCA) sowie nach der Total Cost of Ownership Methode (TCO)	395
8.4	Empfehlungen an Politik und Wirtschaft	404
8.5	Optimierungsmöglichkeiten regulatorischer Eingriffe	407
	Literatur	411
Anhang		415
Stichwortverzeichnis		439