

Inhaltsverzeichnis

Grußwort	1
Einleitung: CO₂, Energie- und Verkehrswende	3
1. Marktübersicht Antriebstechnologien	7
1.1 Systematisierung nach Funktionsweise	8
1.1.1 Verbrennungsmotor	8
1.1.2 Elektromotor	10
1.1.3 Brennstoffzelle	11
1.2 Systematisierung nach Energiebereitstellung und Kraftstoffart	13
1.2.1 Konventioneller Antrieb	13
1.2.1.1 Benzin	15
1.2.1.2 Diesel	23
1.2.2 Alternativer Antrieb	24
1.2.2.1 Flüssiggas	25
1.2.2.2 Erdgas	27
1.2.2.3 Biogas	29
1.2.2.4 Bioethanol	29
1.2.2.5 Biodiesel	30
1.2.2.6 Bivalente Antriebe	30
1.2.3 (Teil-)Elektrischer Antrieb	31
1.2.3.1 Batterieelektrisch	34
1.2.3.2 Brennstoffzelle (Wasserstoff)	36
1.2.3.3 Schienen- und leitungsführt	37
1.2.3.4 Hybridantrieb	37
1.3 Well-to-Wheel-Analyse verschiedener Antriebstechnologien	42
1.3.1 Betrachtungsumfang	42
1.3.2 Hintergrund und Zielsetzung	44
1.3.3 Methodik und Vorgehensweise	46
1.3.4 Terminologie	51
1.3.5 Übersicht der Ergebnisse	52
1.3.6 Detaillierte Ergebnisse nach Antriebstechnologie und Kraftstoffart	61
1.3.6.1 Benzin & Diesel (incl. HEV & MHEV)	61
1.3.6.2 CNG, CBM & SNG (incl. MHEV)	67
1.3.6.3 BEV	70
1.3.6.4 PHEV (Benzin & Diesel)	73
1.3.6.5 FCEV (incl. PHEV)	77

1.3.7 Fazit	81
2. Infrastrukturvergleich verschiedener Kraftstoffarten	83
2.1 Hintergrund und Zielsetzung	83
2.2 Betrachtungsumfang	84
2.3 Herstellung, Transport und Verteilung verschiedener Kraftstoffe	86
2.3.1 Benzin & Diesel	86
2.3.2 Autogas (LPG)	89
2.3.3 Erdgas (CNG & LNG)	92
2.3.4 Biogas (BioCNG & BioLNG)	97
2.3.5 Biodiesel	99
2.3.6 Wasserstoff	101
2.3.7 Elektrische Energie	109
2.4 Elektromobilität: Moving Demand vs. Fixe Infrastruktur	119
2.4.1 Hintergrund und Zielsetzung	119
2.4.2 Methodik und Vorgehensweise	120
2.4.3 Verkehrsverhalten Deutschland	124
2.4.4 Szenarien des zukünftigen PKW-Bestandes	138
2.4.5 Struktur der Kalkulationen	142
2.4.5.1 Szenario 1 (10 % BEV-Anteil)	143
2.4.5.2 Szenario 2 (30 % BEV-Anteil)	154
2.4.5.3 Szenario 3 (90 % BEV-Anteil)	157
2.4.6 Fazit	162
3. Vergleich verschiedener Antriebe mithilfe des Life-Cycle-Assessments (LCA)	163
3.1 Das Life Cycle Assessment (LCA) als Vergleichsmethode	164
3.1.1 Vorbemerkung	164
3.1.2 Ziel und Untersuchungsrahmen, Definition der funktionellen Einheit (FE)	165
3.1.3 Sachbilanz	166
3.1.4 Wirkungsabschätzung	167
3.1.5 Auswertung	168
3.1.6 Betrachtungsgrößen	169
3.1.6.1 Funktionale Einheit (FE)	169
3.1.6.2 Kumulierter Energieaufwand (KEA), kWh/FE	169
3.1.6.3 Global Warming Potential (GWP), kg / FE CO ₂ e	170
3.1.6.4 Acidification (Versauerung), g/FE SO ₂ e	170
3.1.6.5 Eutrophication (Eutrophierung, Überdüngung), g/FE PO ₄	171
3.1.6.6 Summersmog (TOPP Equivalent, Tropospheric Ozone Precursor Potential, Non-Methane volatile organic compounds, NMVOC)	171

3.1.7	Die Phasen der Lebensdauer der betrachteten Einheit	171
3.1.7.1	Herstellphase	171
3.1.7.2	Betriebsphase.....	172
3.1.7.3	End of Life	172
3.1.8	Sensitivität.....	172
3.1.9	Datenbasis	172
3.2	Ergebnisse der LCA-Berechnungen – Wirkungsabschätzungen und Auswertungen	172
3.2.1	Vorbemerkung	172
3.2.1.1	Treibstoffabhängige Antriebe.....	172
3.2.1.2	Netzstromabhängige Antriebe.....	173
3.2.2	Materialien und Zusammensetzung der betrachteten Antriebe	174
3.2.2.1	Stationäre Elektroantriebe IE2 und IE3.....	174
3.2.2.2	PKW-Antriebe	174
3.2.2.3	LKW-Antriebe	177
3.2.2.4	Stadtbusantriebe	180
3.2.3	Wirkungsabschätzung.....	182
3.2.3.1	Elektromotoren, stationär, Effizienzklassen IE2 und IE3	182
3.2.3.2	PKW-Antriebe	186
3.2.3.3	LKW	200
3.2.3.4	Stadtbusse.....	205
3.2.4	Bewertungen	213
3.2.4.1	Vergleich der spezifischen LCA-Werte aller Antriebe (ohne stationäre Elektroantriebe)	213
3.2.4.2	Spezifische LCA-Daten aller Gruppen von Antrieben, geordnet nach aufsteigendem KEA, anschließend nach aufsteigender GHG.....	213
3.2.4.3	Bewertung der einzelnen Antriebe.....	222
4.	Praxisbericht: Der Einsatz alternativer Antriebskonzepte am Flughafen München	233
4.1	Der Flughafen München.....	233
4.1.1	Klimastrategie 2030	234
4.1.2	Nächster Schritt: „Net Zero Carbon“.....	234
4.1.3	Reduktion von CO ₂ -Emissionen seit 2005.....	234
4.2	Kraftstoffe am Flughafen München	235
4.2.1	Aktueller Stand	236
4.2.2	Wasserstoff	238
4.2.3	Pflanzenölkraftstoff	240
4.2.4	Bioethanol; E85.....	243
4.2.5	Erdgas/Biomethan	245
4.2.6	Bio-Diesel	247

4.2.7	Flüssiges Biomethan	249
4.2.7.1	Alternative Post-EEG-Nutzung bestehender Biogasanlagen	251
4.2.8	Elektromobilität	252
4.2.8.1	Stromversorgung Elektrofahrzeuge	252
4.2.8.2	Einsatz elektrischer Antriebe	253
4.3	Zwischenergebnis	259
4.4	Herausforderungen zukünftiger Mobilitätskonzepte	260
4.4.1	Optimierung von Mobilitätskonzepten für Mitarbeiter am Flughafen München	260
4.4.2	ShuttleMe	263
4.4.3	CMF drive	265
4.4.3.1	Der generator-elektrische Antrieb	267
4.4.3.2	Vorteile von Verbrenner und Elektroantrieb vereint.	269
4.4.3.3	Emissionsarm	269
4.4.3.4	Sauber.	269
4.4.3.5	Praktisch.	270
4.4.3.6	Wirtschaftlich	270
4.4.4	Autonomes Fahren am Flughafen München	271
4.4.4.1	Argo AI	276
4.4.5	Ausbau Straße und Schiene	276
4.4.6	Transport System Bögl	279
4.4.7	Elektromobilitätsstrategie	282
4.5	Zusammenfassung, Ausblick und Fazit	285
5.	Elektromobilität im Spannungsfeld von Automobilwirtschaft, Nachfrage und politischen Rahmenbedingungen	287
5.1	Zusammenhang, Fragen, Grundverständnis Automobilwirtschaft	287
5.2	Rahmenbedingungen und Marktdarstellung	291
5.2.1	Wohlfahrt – externe Effekte – Regulierung	291
5.2.1.1	Automobilmarkt – Umweltbelastung – Wohlfahrtsverluste.	291
5.2.1.2	Relevanz Emissionen Automobil Deutschland und staatliche Regulierungsmaßnahmen	293
5.2.1.3	Messung und Bewertung Emissionen PKW.	298
5.3	Automobilwirtschaft – Automobile Wertschöpfungskette – Automobilherstellung – Automobilmarkt	301
5.3.1	Historischer Rückblick.	303
5.3.2	Die Rolle des Autos als Basis und Element der Erweiterung menschlicher Handlungsräume und -felder	304
5.3.3	Wirtschaftliche Dimension der Welt-Automobiindustrie	309
5.3.4	Deutscher Automobilmarkt	310
5.3.5	Hauptnachfragegruppen Gesamtmarkt	313

5.3.5.1 Private Nachfrager.	314
5.3.5.2 Gewerbliche Nachfrager	318
5.4 Schlussfolgerungen und Ausblick.	326
6. Ökologisch-ökonomische Gesamtbewertung unterschiedlicher Antriebsoptionen am Beispiel Linienbus	333
6.1 Die „EU Clean Vehicles Directive“ als Maßgabe	333
6.2 Gewählter Systemansatz für die ganzheitliche ökologisch-ökonomische Analyse	335
6.3 Anwendung auf eine Linienbus-Musterflotte und ihre Einsatzcharakteristik.	336
6.4 Ökologischer Vergleich konventioneller und alternativer Antriebsoptionen	338
6.4.1 Ergebnisse des ökologischen Vergleichs für den Zeithorizont „heute“	340
6.4.2 Ergebnisse des ökologischen Vergleichs auf dem Zeithorizont „mittelfristig“	343
6.5 Ökonomischer Vergleich konventioneller und alternativer Antriebsoptionen	344
6.5.1 Ergebnisse des ökonomischen Vergleichs für den Zeithorizont „heute“	348
6.5.2 Ergebnisse des ökonomischen Vergleichs auf dem Zeithorizont „mittelfristig“	350
7. Migrationsstrategie CH₄ und H₂ bis 2050	353
7.1 Einleitung	353
7.2 Klimaziele in Deutschland	354
7.3 Gase als Energieträger	356
7.3.1 Methan	357
7.3.2 Erdgas	357
7.3.2.1 LNG – Liquefied Natural Gas	357
7.3.2.2 CNG – Compressed Natural Gas	358
7.3.3 Grüne Gase	358
7.3.3.1 Biogas und Biomethan	358
7.3.3.2 Wasserstoff	359
7.3.3.3 Synthetisches Erdgas	361
7.3.4 Power-to-X (PtX)	361
7.3.4.1 Power-to-Gas (PtG)	362
7.3.4.2 Power-to-Heat (PtH)	362
7.3.4.3 Power-to-Liquids (PtL)	362
7.4 Stromerzeugung und Gasnetz in Deutschland	363
7.4.1 Markthochlauf Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ...	364
7.4.2 Gasnetz und Gasspeicher in Deutschland	365

7.4.3 Wasserstoffverteilnetz	366
7.4.4 Integration von Wasserstoff und Methan.	367
7.5 Gebäudesektor	368
7.5.1 Gebäudestruktur und Energieeffizienz in Deutschland.....	369
7.5.2 Beheizungsstruktur in Deutschland	371
7.5.3 Einsparungspotenziale in der Wärmeversorgung	372
7.5.3.1 CO ₂ -Einsparungspotenzial durch Sanierungen	373
7.5.3.2 Ölheizungssubstitution und Energieträgerwechsel. ...	376
7.5.4 Wärmebereitstellung mit Dekarbonisierungspotenzial	377
7.5.4.1 Gasheizungen.....	378
7.5.4.2 Nah- und Fernwärme	379
7.5.4.3 Wärmepumpen	380
7.5.4.4 Hybridheizungen	381
7.5.5 Dekarbonisierung im Gebäudesektor: Historie, Ziele und Prognosen.....	381
7.6 Verkehrssektor	383
7.6.1 Status quo PKW-Sektor	384
7.6.1.1 CO ₂ -Bilanz der Antriebstechnologien im Vergleich. ...	385
7.6.2 Status quo LKW-Sektor	387
7.6.3 Exkurs CO ₂ -Flottenziele	388
7.6.4 Referenzszenario im Verkehrssektor	389
7.6.5 Elektromobilität im Verkehrssektor	390
7.6.6 Einsatzbereiche und Infrastruktur gasbasierter Alternativen ...	391
7.6.6.1 Exkurs Liquefied Petroleum Gas.....	391
7.6.6.2 LNG-Mobilität	392
7.6.6.3 CNG-Mobilität.....	397
7.6.6.4 Wasserstoffmobilität.....	400
7.6.6.5 CO ₂ -Einsparungspotenzial durch Wasserstoff.....	405
7.6.7 Wasserstoff: Status quo und Strategienvergleich.....	406
7.7 Fazit	408
Literatur	411
Literatur Einleitung	411
Literatur Kapitel 1	411
Literatur Kapitel 2	418
Literatur Kapitel 3	424
Literatur Kapitel 4	428
Literatur Kapitel 6	430
Literatur Kapitel 7	433
Autoren	443