

Inhaltsverzeichnis

1	Klimaneutraler Verkehr – Erdgas und Methan als Teil der Lösung	1
	Lars Mönch, Katrin Dziekan, Martin Lange und Kirsten Adlunger	
1.1	Einleitung	1
1.2	Verkehr: Sorgenkind des Klimaschutzes?	5
1.3	Nichttechnische Maßnahmen für einen klimaverträglichen Verkehr	8
1.3.1	Ökonomische Maßnahmen	8
1.3.2	Siedlungsstruktur	9
1.3.3	Maßnahmen, die auf Verhaltensänderung abzielen	11
1.3.4	Infrastrukturmaßnahmen	11
1.4	Energieversorgung des Verkehrs – nachhaltige, klimaverträgliche Kraftstoffe für den Verkehr	12
1.5	Infrastruktur für die Energieversorgung des Verkehrs	16
1.6	Zusammenfassung	18
	Literatur	20
2	Geschichtlicher Rückblick	23
	Reinhold Bauer	
2.1	Geschichte des Erdgases	23
2.2	Geschichte des Erdgasfahrzeugs	28
	Literatur	44
3	E-Fuels/Kraftstoffe	47
	Ulrich Kramer, Stephan Stollenwerk und Ralf Thee	
3.1	FVV-Studie: Defossilisierung des Transportsektors	47
3.2	Annahmen und Vorgehensweise	54
3.2.1	Betrachtete Kraftstoff-Antriebsstrangoptionen	55
3.2.2	Annahmen für 100%-Szenarien zur Stromverfügbarkeit aus erneuerbaren Quellen	60
3.2.3	Investitionskosten für den Ausbau der Strominfrastruktur	62
3.2.4	Ansatz zur Abschätzung des Kraftstoffbedarfs 2050	64
3.2.5	Tank-to-Wheel-Bewertung	64

3.2.6	Annahmen zum Energiebedarf und zu den Kosten der Herstellung synthetischer Kraftstoffe	70
3.2.7	Annahmen zur Infrastruktur der Kraftstoffverteilung	77
3.2.8	Weitere Bewertungskriterien	85
3.3	Ergebnisse	86
3.3.1	Elektrischer Energiebedarf	86
3.3.2	Kosten (Kraftstoff, Infrastruktur, Fahrzeug, Betriebskosten)	96
3.3.3	Erreichbarkeit TtW-CO ₂ -Emissionen	111
3.3.4	Erreichbarkeit Zero-Impact-Emissions	113
3.3.5	Sicherheit in Transport und Handhabung	116
3.3.6	Markteinführungspotenzial, „Customer Acceptance“ und „Lead Time to Market“	119
3.3.7	Investitionsbedarf	125
3.4	Schlussfolgerungen	136
3.4.1	Identifizierter Forschungsbedarf	142
3.4.2	Politische Handlungsempfehlungen aus diversen Studien	147
3.5	Anhang	148
3.5.1	Detaillierte Betrachtung der Sicherheit einzelner Kraftstoffe	148
3.5.2	Abkürzungsverzeichnis	157
	Projektbegleitung	159
	Literatur	160
4	Erdgas und erneuerbares Methan	165
	Jörg Neugärtner, Adalbert Wolany, Michael Bargende, Siegfried Bajohr, Frank Graf, Nantje T. Zimmermann, Janet Hochi, Reinhard Schultz, Franziska Müller-Langer, Marco Klemm, Michael Schlüter, Reinhard Otten, Tobias Block, Elias Hammer, Michael Specht, Jochen Brelochs, Volkmar Frick, Bernd Stürmer, Ulrich Zuberbühler, Joachim Krassowski und Oliver Jochum	
4.1	Grundlagen und Eigenschaften	166
4.1.1	Physikalische Eigenschaften	168
4.1.2	Chemische Eigenschaften	178
4.1.3	Thermodynamische Eigenschaften	184
4.1.4	Sonstiges	195
4.2	Erdgasvorkommen und Erdgasgewinnung	196
4.2.1	Brenngasarten	197
4.2.2	Erdgasvorkommen – Reserven und Ressourcen	199
4.2.3	Erdgasförderung	204
4.2.4	Erdgasaufbereitung	208
4.3	Erdgastransport und Erdgasspeicherung	213

4.3.1	Erdgastransport über LNG	213
4.3.2	Rohrleitungsgebundener Erdgastransport	215
4.3.3	Gasspeicher	222
4.3.4	Gasmarkt	226
4.4	Nachhaltige Erdgas- bzw. Methanerzeugung	232
4.4.1	Biomethan aus der Vergärung: organische Abfälle, nachwachsende Rohstoffe	232
4.4.2	Synthetisches Methan aus Biomasse	261
4.4.3	Synthetisches Methan aus regenerativer elektrischer Energie	266
	Literatur	323
5	Gemische aus Methan und Wasserstoff	335
	Helmut Eichlseder	
5.1	Verbrennung	345
	Literatur	350
6	Fahrzeugentwicklung für gasförmige und flüssige Kraftstoffe	353
	Jörg Neugärtner, Adalber Wolany, Michael Bargende, Mahir-Tim Keskin, David Lejsek, Winfried Langer, Andreas Kufferath, Manfred Adolf, Alexander Schenk, Matthias Budde, Rolf Sauerstein, Sascha Weiske, Michael Becker, Helge Wollenhaupt, Klaus Wunderlich, Albert Ebner, Peter Heine, Peter Volz, Eduard Köhler, Ulrich Philipp, Andreas Jauss, Holger Winkelmann, Thorsten B. Bender, Ayhan Sarikaya und Florian Winke	
6.1	Pkw-Ottomotoren für gasförmige oder flüssige Kraftstoffe (bivalent/monovalent)	354
6.1.1	Bivalente und monovalente Betriebskonzepte	354
6.1.2	Historische Entwicklung – PKW mit Erdgasmotor	357
6.2	Notwendige Anpassungen und Optimierung für den Betrieb mit Erdgas	360
6.2.1	Anpassung der Gemischbildung	360
6.2.2	Anpassung des Verdichtungsverhältnisses	365
6.2.3	Spitzendruck und Spitzendruckniveaus	367
6.2.4	Anpassung des Zündsystems	367
6.2.5	Notwendige Komponentenänderungen	370
6.3	Systemkomponenten und Motorsteuerung	372
6.3.1	Komponenten zur Gemischbildung	372
6.3.2	Bifuel-Motorsteuerung	384
6.3.3	Aufladung für Erdgasbetrieb	402
6.4	CO ₂ und Wirkungsgrade	414
6.4.1	Thermodynamik und Brennverfahren	416

6.4.2	Klopfestigkeit	417
6.4.3	Downsizing und Downspeeding	420
6.5	Abgasemissionen, Kaltstart und Warmlauf	423
6.5.1	Abgaskatalysator und Abgasnachbehandlung	424
6.5.2	Schademissionen und Abgastemperatur	426
6.6	Thermische und mechanische Beanspruchung von Pkw-Motoren für Erdgas	433
6.6.1	Stationäre und mobile Einsatzbereiche von Gasmotoren	433
6.6.2	Pkw-Motorenkonzepte für Erdgas	435
6.6.3	Einfluss der Kraftstoffqualität	436
6.6.4	Nachträgliche Umrüstung von Pkw-Serienmotoren auf Erdgasbetrieb	437
6.6.5	Veränderte Betriebsbedingungen bei Erdgasbetrieb	437
6.7	Akustik von Erdgasfahrzeugen	467
6.7.1	Besondere Anforderungen von Erdgasmotoren	467
6.7.2	Verbrennungsgeräusch	470
6.7.3	Geräusche Auflade- und Ladeluftsystem	474
6.7.4	Injectorgeräusche	476
6.7.5	Gesamtfahrzeug	478
6.8	Erdgasspeicher- und Handlingsysteme	481
6.8.1	Systemübersicht und gesetzliche Anforderungen	483
6.8.2	Systemkomponenten	486
6.8.3	Fahrzeug-Integration	499
6.9	Hybridisierung beim Pkw	518
6.9.1	Allgemeine CO ₂ -Potenziale	520
6.9.2	Hybridspezifische Motormodifikationen	521
6.9.3	Schadstoffemissionen und Kaltstart	523
6.9.4	Ausgeführte Beispiele	527
6.9.5	Zusammenfassung	528
	Literatur	530
7	Zweistoffverbrennung von gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen	537
	Rudolf Flierl, Andreas Wegmann, Christoph Hörhammer und Thorsten Fuchs	
7.1	Zweistoffverbrennung von Erdgas und Benzin in Ottomotoren	543
7.1.1	Zweistoffverbrennung an der Volllast	543
7.1.2	Gasgemischverbrennung in der Teillast	548
7.2	Zweistoffverbrennung von Methan und Ethanol (E85) in Ottomotoren	554
7.2.1	Obere Teillast im Erdgas-Ethanol-Mischbetrieb	555
7.2.2	Volllast im Erdgas-Ethanol-Mischbetrieb	555

7.2.3	Vorschlag für ein Kennfeld für einen Ethanol-CNG/Erdgas Mischbetrieb	556
7.3	Zweistoffverbrennung im Dieselmotor	559
7.3.1	Gasmischverbrennung von Erdgas und Diesel mit zentraler Gaseindüsung und Diesel-Reiheneinspritzpumpe ...	560
7.3.2	Gasmischverbrennung von Erdgas und Diesel mit zentraler Gaseindüsung und Common-Rail-Einspritzung	563
7.3.3	Zweistoffverbrennung von LPG (<i>Flüssiggas</i> , auch <i>Autogas</i>) und Diesel mit sequentieller, zylinderselektiver Gaseindüsung	570
	Literatur	571
8	Motorenkonzepte für LKW mit gasförmigen Kraftstoffen	573
	Günter Figer	
8.1	Einleitung	573
8.2	Thermodynamische Grundlagen	577
8.2.1	Volllastpotenzial	577
8.2.2	Wirkungsgrad	578
8.2.3	Analyse der Emissionen	583
8.2.4	LNG-Tanktechnologie	585
8.3	Erdgasmotoren mit Fremdzündung	588
8.3.1	Gemischbildungen	589
8.3.2	Zündung	592
8.3.3	Verbrennung und Abgasnachbehandlung	594
8.4	Erdgasmotoren mit Selbstzündung	597
8.4.1	Dual-Fuel-Motorkonzept	597
8.4.2	Hochdruck-Gasdirekteinblasung	599
8.5	Sonderverfahren	600
	Literatur	603
9	Off-Highway-Gasmotoren	605
	Christian Trapp, Robert Böwing und Georg Tinschmann	
9.1	Großgasmotoren für industrielle und maritime Anwendungen	605
9.1.1	Einsatzbereiche	605
9.1.2	Emissionsgesetzgebung und Kraftstoffpreise	606
9.1.3	Gasmotoren in der Schifffahrt	608
9.1.4	Gasmotoren für Lokomotivantriebe	610
9.2	Gemischbildung und Verbrennung bei Großgasmotoren	611
9.2.1	Einleitung	611
9.2.2	Aufladung und Ladungswechsel	611
9.2.3	Gemischbildung	612
9.2.4	Brennverfahren	614

9.2.5	Regelung	617
9.3	Einsatz von Sondergasen in Kraftwerksmotoren	617
9.3.1	Einleitung	617
9.3.2	Gasarten	617
9.3.3	Nutzung	620
	Literatur	624
10	Gesamtsystemvergleich: Mobilität mit Methan im Vergleich zu anderen Antriebskonzepten und Energieträgern	627
	Reinhard Otten und Hendrik Gosda	
10.1	SWOT-Analyse Methan als Kraftstoff	627
10.2	Kriterien zur Bewertung unterschiedlicher Antriebe	629
10.3	Straßenmobilität mit regenerativer Energie: Das CNG-Fahrzeug in Kombination mit erneuerbarem Methan aus Power-to-Gas-Anlagen als Benchmark	632
10.3.1	Der Vergleich zum Batterie-Elektrofahrzeug (BEV)	634
10.3.2	Der Vergleich zum Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV).	638
10.4	Zusammenfassung, Ausblick und mögliche Synergien	645
	Literatur	648
11	Der Markt für den Kraftstoff Erdgas	651
	Timm Kehler, Florian Feix, Claudia Petersen und Michael Schaarschmidt	
11.1	Erdgas als Kraftstoff: Vorteile und Marktentwicklung	
	Tankstellennetz	651
11.1.1	Vorteile von Erdgas als Kraftstoff Politische Vorteile	652
11.1.2	Marktentwicklung Erdgastankstellen	653
11.2	Businesscase Erdgastankstelle: Markthindernisse und Chancen	655
11.2.1	Aufbau und Funktion von Erdgastankstellen	655
11.2.2	Geschäftsmodell Erdgastankstellenbetrieb	659
11.2.3	Markthindernisse in Deutschland	661
11.2.4	Chancen	665
11.3	Erdgasmobilität weltweit – ausgewählte Märkte	668
11.3.1	Italien	668
11.3.2	Schweden	668
11.3.3	Frankreich	669
11.3.4	Iran	670
11.3.5	Argentinien	670
11.3.6	Russland	670
11.3.7	USA	671
11.3.8	China	672
	Literatur	673

12 Ausblick	675
Rudolf Flierl	
Stichwortverzeichnis	679