

Inhaltsverzeichnis

1 Grußworte	1
1.1 Grußwort des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur	1
1.2 Grußwort des VDA	3
2 Klimaneutraler Verkehr – Erdgas und Methan als Teil der Lösung	7
2.1 Einleitung	7
2.2 Verkehr: Sorgenkind des Klimaschutzes?	11
2.3 Nichttechnische Maßnahmen für einen klimaverträglichen Verkehr	13
2.4 Energieversorgung des Verkehrs – nachhaltige, klimaverträgliche Kraftstoffe für den Verkehr	17
2.5 Infrastruktur für die Energieversorgung des Verkehrs	21
2.6 Zusammenfassung	23
3 Geschichtlicher Rückblick	27
3.1 Geschichte des Erdgases	27
3.2 Geschichte des Erdgasfahrzeugs	31
4 Erdgas und erneuerbares Methan	51
4.1 Grundlagen zum Erdgas	51
4.1.1 Physikalische Eigenschaften	53
4.1.2 Chemische Eigenschaften	58
4.2 Erdgasvorkommen und Erdgasgewinnung	66
4.2.1 Brenngasarten	67
4.2.2 Erdgasvorkommen – Reserven und Ressourcen	71
4.2.3 Erdgasförderung	74
4.2.3.1 Konventionelle Erdgasförderung	74
4.2.3.2 Nicht-konventionelle Erdgasförderung	76
4.2.4 Erdgasaufbereitung	78
4.2.4.1 Zusammensetzung und Vorgaben	78
4.2.4.2 Aufbereitungsprozesse	80

4.3 Erdgastransport und Erdgasspeicherung	83
4.3.1 Erdgastransport über LNG	83
4.3.2 Rohrleitungsgebundener Erdgastransport	87
4.3.3 Gasspeicher	91
4.3.4 Gasmarkt	97
4.4 Nachhaltige Erdgas- bzw. Methanerzeugung	101
4.4.1 Biomethan aus der Vergärung: organische Abfälle, nachwachsende Rohstoffe	101
4.4.1.1 Einleitende Zusammenfassung	101
4.4.1.1.1 Marktentwicklung, Absatzmärkte und Trends	102
4.4.1.2 Organische Abfälle	104
4.4.1.2.1 Was sind organische Abfälle?	106
4.4.1.2.2 Reststoffströme (Erschließung)	109
4.4.1.3 Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo)	109
4.4.1.3.1 Was sind (ertragreiche) NawaRo?	109
4.4.1.3.2 Nachhaltigkeitsaspekte	111
4.4.1.4 Vergärung insgesamt	111
4.4.1.4.1 Aufbereitung zu Biomethan	114
4.4.1.4.2 Biomethanhandel	114
4.4.1.5 Biomethan als Kraftstoff	115
4.4.1.5.1 Erdgasfahrzeuge und Infrastruktur	116
4.4.1.6 Rahmenbedingungen	117
4.4.1.6.1 Stand in Europa	117
4.4.1.6.2 Ausblick regulatorische Initiativen der EU	122
4.4.1.6.3 Stand in Deutschland	125
4.4.2 Synthetisches Methan aus Biomasse	128
4.4.2.1 Einleitung	128
4.4.2.2 Grundlagen	129
4.4.2.3 Technologische Einordnung	131
4.4.2.4 Ökologische und ökonomische Einordnung	132
4.4.2.5 Fazit und Ausblick	133
4.4.3 Synthetisches Methan aus regenerativer elektrischer Energie	133
4.4.3.1 Technische Umsetzung der Power-to-Gas-Technologie (P2G [®])	143
4.4.3.1.1 Motivation	143
4.4.3.1.2 Die Power-to-Gas-Technologie zur Erzeugung von Erdgassubstitut	144
4.4.3.1.2.1 Besonderheiten bei der Methanisierung eines CO ₂ -basierten Synthesegases und verwendete Reaktorbauarten	145
4.4.3.1.2.2 Auslegung von Power-to-Gas-Anlagen in den Leistungsklassen 25 kW _{el} , 250 kW _{el} und 6000 kW _{el}	151

4.4.3.1.3 Ergebnisse	154
4.4.3.1.3.1 Methanisierungs-Katalysatoren: Screening und Zyklen-Resistenz	154
4.4.3.1.3.2 Ergebnisse der 25-kW _{el} -P2G [®] -Anlage	158
4.4.3.1.3.3 Ergebnisse der 250-kW _{el} -P2G [®] -Anlage	160
4.4.3.1.3.4 Ergebnisse der 6000-kW _{el} -e-gas-Anlage von Audi	162
4.4.3.1.4 P2G [®] -Prozesseffizienz	164
4.4.3.1.5 Kosten von strombasiertem Erdgassubstitut	166
4.4.3.1.5 Fazit	169
4.4.3.2 Biologische Methanisierung – Methanerzeugung durch mikrobielle Umwandlung von H ₂ und CO ₂	171
4.4.3.2.1 Einleitung	171
4.4.3.2.2 Biologische Grundlagen	171
4.4.3.2.3 Entwicklungsstand	173
4.4.3.2.4 Biologische Methanisierung als zentraler Baustein der Power-to-Gas-Technologie	176
4.4.3.2.4.1 CO ₂ -Bereitstellung aus Umgebungsluft	178
4.4.3.2.4.2 CO ₂ -Bereitstellung aus CO ₂ -emittierenden Industrieprozessen	178
4.4.3.2.4.3 CO ₂ -Bereitstellung aus Biogas- beziehungsweise Kläranlagen	178
4.4.3.2.5 Biologische Methanisierung in Kombination mit Biogasan- lagen	179
4.4.3.2.5.1 Biologische Methanisierung direkt im Gärbehälter	179
4.4.3.2.5.2 Biologische Methanisierung in einem separaten Reaktor	180
4.4.3.2.5.3 Biologische Methanisierung in einem separaten Reaktor an Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung	181
4.4.3.2.5.4 In-situ-Elektrolyse und biologische Methanisierung	181
4.4.3.2.6 Produktionskosten der biologischen Methanisierung ..	182
4.4.3.2.6.1 Wasserstofferzeugung aus elektrischem Strom	183
4.4.3.2.6.2 Biologische Methanisierung	183
4.4.3.2.6.3 Wasserstoff und CO ₂ -Abtrennung	184
4.4.3.2.6.4 Annahmen für die Berechnung der Produktionskosten	184
4.4.3.2.6.5 Ermittlung der Produktionskosten	185
4.4.3.2.7 Zusammenfassende Betrachtung der biologischen Methanisierung	186

4.5 Gemische aus Methan und Wasserstoff	187
4.6 Gesamtsystemvergleich: Mobilität mit Methan im Vergleich zu anderen Antriebskonzepten und Energieträgern	200
4.6.1 SWOT-Analyse Methan als Kraftstoff	200
4.6.2 Kriterien zur Bewertung unterschiedlicher Antriebe	201
4.6.3 Straßenmobilität mit regenerativer Energie: Das CNG-Fahrzeug in Kombination mit erneuerbarem Methan aus Power-to-Gas-Anlagen als Benchmark	204
4.6.3.1 Der Vergleich zum Batterie-Elektrofahrzeug (BEV)	206
4.6.3.2 Der Vergleich zum Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV)	209
4.6.4 Zusammenfassung, Ausblick und mögliche Synergien	216
5 Fahrzeugentwicklung für Erdgas und erneuerbares Methan	233
5.1 Erdgasspeicher- und Handlingsysteme	233
5.1.1 Systemübersicht und gesetzliche Anforderungen	234
5.1.2 Systemkomponenten	237
5.1.2.1 Füllanschluss	237
5.1.2.2 Hochdruckleitungen und -verbinder	238
5.1.2.3 Tankventil	238
5.1.2.4 Tank	240
5.1.2.5 Thermische Sicherung (T-PRD)	246
5.1.2.6 Druckregler	247
5.1.2.7 Filter- und Ölabscheider	248
5.1.2.8 Niederdruckleitungen	249
5.1.3 Fahrzeug-Integration	250
5.1.3.1 Packaging	250
5.1.3.2 Crash-Sicherheit	250
5.1.3.3 Brandabsicherung	254
5.1.3.3.1 Lokale Brandlast	254
5.1.3.3.2 Gesamtfahrzeugbrand	258
5.1.3.4 Korrosionsschutz	259
5.1.3.5 Steuerung, Regelung und Diagnosen des Erdgassystems	264
5.2 Pkw-Ottomotoren für Erdgas	267
5.2.1 Bivalente und monovalente Systeme	267
5.2.2 Thermodynamik	275
5.2.2.1 Grundlagen der Thermodynamik für Verbrennungskraftmaschinen	275
5.2.2.2 Primäre Einflüsse des Erdgasbetriebs	275
5.2.2.2.1 Idealer Vergleichsprozess	276
5.2.2.2.2 Vollkommener Motor	279
5.2.2.2.3 Reale Prozessrechnung	281

5.2.2.3	Sekundäre Einflüsse des Erdgasbetriebs	285
5.2.2.3.1	Verdichtungsverhältnis	285
5.2.2.3.2	Schwerpunktlage	286
5.2.2.3.3	Spitzendruck	287
5.2.2.3.4	Abgastemperatur	290
5.2.2.3.5	Gemischbildung	292
5.2.2.4	Simulation von Gasmotoren	294
5.2.2.5	Gesamtbetrachtung	297
5.2.3	Gemischbildung und Motorsteuerung	298
5.2.3.1	Gemischbildung	298
5.2.3.1.1	Einleitung	298
5.2.3.1.2	Komponenten zur Einblasung von Erdgas	298
5.2.3.1.3	Gemischbildung bei Saugrohreinblasung	300
5.2.3.1.4	Gemischbildung bei Erdgas-Direkteinblasung	303
5.2.3.1.5	Motorischer Vergleich von Gemischbildungsverfahren	304
5.2.3.2	Bifuel-Motorsteuerung	307
5.2.3.2.1	Einleitung	307
5.2.3.2.2	Funktionen des Motorsteuergeräts	307
5.2.4	Zündung	311
5.2.4.1	Einleitung: Anforderung an die Zündsysteme im Erdgasbetrieb	311
5.2.4.2	Einteilung der Zündsysteme für Gasmotoren	312
5.2.4.3	Funktion und Aufbau verschiedener Zündsysteme	314
5.2.4.4	Zusammenfassung und Ausblick	322
5.2.5	Aufladung für Erdgasbetrieb	322
5.2.5.1	Einleitung: Kraftstoffeigenschaften – Auswirkungen auf Brennverfahren	322
5.2.5.2	Turboladerauslegung für den Gasbetrieb	323
5.2.5.3	Werkstoffe	332
5.2.5.4	Zusammenfassung und Ausblick	332
5.2.6	CO ₂ und Wirkungsgrade	333
5.2.6.1	Stoffeigenschaften	335
5.2.6.2	Thermodynamik und Brennverfahren	337
5.2.6.3	Klopfestigkeit	339
5.2.6.4	Downsizing und Downspeeding	341
5.2.7	Abgasemissionen, Kaltstart und Warmlauf	344
5.2.7.1	Abgaskatalysator und Abgasnachbehandlung	345
5.2.7.2	Schademissionen und Abgastemperatur	347
5.2.7.3	HC-Emission	347
5.2.7.4	NO _x -Emission	348
5.2.7.5	Abgastemperatur	350
5.2.7.6	Kaltstart und Katalysatorheizen	350
5.2.7.7	Partikel	352

5.2.8 Thermische und mechanische Beanspruchung von Pkw-Motoren für Erdgas	353
5.2.8.1 Stationäre und mobile Einsatzbereiche von Gasmotoren	353
5.2.8.2 Pkw-Motorenkonzepte für Erdgas	355
5.2.8.3 Einfluss der Kraftstoffqualität	355
5.2.8.4 Bivalenter und monovalenter Betrieb	356
5.2.8.5 Nachträgliche Umrüstung von Pkw-Serienmotoren auf Erdgasbetrieb	357
5.2.8.6 Veränderte Betriebsbedingungen bei Erdgasbetrieb	357
5.2.8.7 Aus verschärften Betriebsbedingungen resultierende thermische und mechanische Beanspruchung	358
5.2.8.7.1 Thermische Beanspruchung	358
5.2.8.7.2 Mechanische Beanspruchung	361
5.2.8.8 Beanspruchungsgerechte Auslegung des Pkw-Ottomotors für Erdgasbetrieb	363
5.2.9 Akustik von Erdgasfahrzeugen	384
5.2.9.1 Erdgasmotoren	384
5.2.9.2 Verbrennungsgeräusch	387
5.2.9.3 Auflade- und Ladeluftsystem	391
5.2.9.4 Injektorgeräusche	392
5.2.9.5 Gesamtfahrzeug	395
5.3 Motorkonzepte für Lkw	397
5.3.1 Einleitung	397
5.3.2 Thermodynamische Grundlagen	400
5.3.2.1 Vollastpotenzial	400
5.3.2.2 Wirkungsgrad	401
5.3.2.3 Analyse der Emissionen	405
5.3.2.4 LNG-Tanktechnologie	407
5.3.3 Erdgasmotoren mit Fremdzündung	410
5.3.3.1 Gemischbildungen	411
5.3.3.2 Zündung	414
5.3.3.3 Verbrennung und Abgasnachbehandlung	415
5.3.4 Erdgasmotoren mit Selbstzündung	418
5.3.4.1 Dual-Fuel-Motorkonzept	419
5.3.4.2 Hochdruck-Gasdirekteinblasung	420
5.3.5 Sonderverfahren	422
5.4 Hybridisierung beim Pkw	424
5.4.1 Allgemeine CO ₂ -Potenziale	425
5.4.2 Hybridspezifische Motormodifikationen	427
5.4.3 Schadstoffemissionen und Kaltstart	429
5.4.4 Ausgeführte Beispiele	432
5.4.5 Zusammenfassung	433

5.5 Der Markt für den Kraftstoff Erdgas	434
5.5.1 Erdgas als Kraftstoff: Vorteile und Marktentwicklung Tankstellennetz ..	434
5.5.1.1 Vorteile von Erdgas als Kraftstoff	435
5.5.1.2 Marktentwicklung Erdgastankstellen	436
5.5.2 Businesscase Erdgastankstelle: Markthindernisse und Chancen	438
5.5.2.1 Aufbau und Funktion von Erdgastankstellen	438
5.5.2.2 Geschäftsmodell Erdgastankstellenbetrieb	442
5.5.2.3 Markthindernisse in Deutschland	443
5.5.2.4 Chancen	447
5.5.3 Erdgasmobilität weltweit – ausgewählte Märkte	450
5.5.3.1 Italien	450
5.5.3.2 Schweden	450
5.5.3.3 Frankreich	451
5.5.3.4 Iran	451
5.5.3.5 Argentinien	452
5.5.3.6 Russland	452
5.5.3.7 USA	453
5.5.3.8 China	454
6 Off-Highway-Gasmotoren	465
6.1 Großgasmotoren für industrielle und maritime Anwendungen	465
6.1.1 Einsatzbereiche	465
6.1.2 Emissionsgesetzgebung und Kraftstoffpreise	466
6.1.3 Gasmotoren in der Schifffahrt	468
6.1.4 Gasmotoren für Lokomotivantriebe	469
6.2 Gemischbildung und Verbrennung bei Großgasmotoren	469
6.2.1 Einleitung	469
6.2.2 Aufladung und Ladungswechsel	470
6.2.3 Gemischbildung	471
6.2.4 Brennverfahren	473
6.2.5 Regelung	475
6.3 Einsatz von Sondergasen in Kraftwerksmotoren	475
6.3.1 Einleitung	475
6.3.2 Gasarten	476
6.3.3 Nutzung	478
7 Ausblick	485
Sachwortverzeichnis	489