

Der Fahrzeugantrieb
Reihenherausgeber: Helmut List

Power-to-Gas

Richard van Basshuysen *Hrsg.*

Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb

Wege zur klimaneutralen Mobilität

Der Fahrzeugantrieb
Reihenherausgeber: Helmut List



Richard van Basshuysen *Hrsg.*

Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb

Wege zur klimaneutralen Mobilität

Der Fahrzeugantrieb

Herausgegeben von

H. List, Graz, Austria

Der Fahrzeugantrieb

herausgegeben von Helmut List

Die von Hans List herausgegebene Reihe „Die Verbrennungskraftmaschine“ diente über Jahrzehnte den Ingenieuren in der Praxis und den Studierenden an Universitäten als unentbehrlicher Ratgeber. Mit Rücksicht auf die Schnelllebigkeit der Technik habe ich mich im Jahr 2002 entschlossen, die Reihe neu zu konzipieren und unter dem Titel „Der Fahrzeugantrieb“ herauszugeben. Dies brachte zum Ausdruck, dass die Verbrennungskraftmaschinen vermehrt als Bestandteile von Antriebssystemen zu sehen sind. Inzwischen wurde das Anliegen der Reihe weiter diskutiert und schließlich in diesem Jahr beschlossen, die Reihe unter dem gleichen Titel „Der Fahrzeugantrieb“, jedoch mit neuem Layout weiter zu führen und auch einen neuen Wissenschaftlichen Beirat zu etablieren. Wie bisher bleibt es oberstes Ziel der Reihe, die ganzheitlichen Zusammenhänge der einzelnen unterschiedlichen Komponenten eines Fahrzeugantriebes aufzuzeigen. Neu ist der Wunsch, die englischsprachigen Ausgaben neben den deutschsprachigen Ausgaben verstärkt zu forcieren.

Ausgehend von den Grundlagen mit Beschreibung der notwendigen Hintergrundinformation ist Zielsetzung der Reihe, auch die neuen Elemente der zukünftigen Antriebssysteme und deren gegenseitige Beeinflussung in einer Systembetrachtung anzusprechen. Neben den technischen Inhalten werden auch Werkzeuge, Methoden und Prozesse für die Entwicklung der Komponenten dargestellt. Die Gegebenheiten der unterschiedlichen Wirtschaftsräume und ihre jeweiligen Anforderungen an Konzepte werden darin dargelegt.

Diese Buchserie bietet sich sowohl den Studierenden an Universitäten und Fachhochschulen als auch den Praktikern in der Industrie als Ratgeber an, um sich aus dem aufbereiteten Erfahrungsschatz der Autoren das erforderliche Fachwissen anzueignen.

Ich bedanke mich recht herzlich beim Wissenschaftlichen Beirat, der mir sowohl bei der Unterteilung des sehr umfassenden Themengebietes als auch bei der Auswahl der Autoren zur Seite steht. Die Mitglieder des Beirats sind:

Rémi Bastien, Vice President, Renault

Christian Beidl, Professor, Technische Universität Darmstadt

Helmut Eichlseder, Professor, Technische Universität Graz

Herbert Kohler, Vice President, Daimler

Jun Li, Vice President, FAW

Rolf D. Reitz, Professor, University of Wisconsin-Madison

Ich danke den Autoren, die sich bereit erklärt haben, ihr Wissen in diese Buchreihe einzubringen, und ihre Arbeitskraft hierfür einsetzen. Ebenso möchte ich dem Springer-Verlag danken.

Helmut List

Richard van Basshuysen
Herausgeber

Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb

Wege zur klimaneutralen Mobilität

Michael Bargende und 55 Mitautoren

Mit 283 Abbildungen und 572 Literaturstellen

 Springer Vieweg

Herausgeber

Dr. Richard van Basshuysen
Bad Wimpfen, Deutschland

ISBN 978-3-658-07158-5
DOI 10.1007/978-3-658-07159-2

ISBN 978-3-658-07159-2 (eBook)

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 2015

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Einbandabbildung: AUDI AG (2013): Audi Corporate Responsibility Report 2012. Ingolstadt.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

*Der Krug
geht so lange
zum Brunnen,
bis er bricht**

Vorwort des Herausgebers

Der Energiebedarf der Menschheit wächst weiter. Die fossilen Ressourcen jedoch sind endlich. Ökonomie und Ökologie stehen im Widerstreit miteinander. Daher hat das Ringen um Alternativen begonnen. Sonnenenergie durch Strahlung, Wind und Wasserkraft, biologische Rohstoffe und Geothermie stehen zur Verfügung. Es bedarf jedoch jahrzehntelanger Forschung und Entwicklung und erheblicher gesellschaftlicher und politischer Veränderungen, um von den fossilen Energien unabhängig zu werden. Für die Übergangszeit steht vor allem Erdgas zur Verfügung, das zu einem sehr hohen Prozentsatz aus Methan besteht. Erdgas ist nach Kohle der am häufigsten vorkommende fossile Energieträger, hat bei der Energienutzung das günstigste H/C-Verhältnis und verursacht somit bei der Verbrennung die geringste CO₂-Belastung der Atmosphäre. Außerdem ist es auf dem Weltmarkt relativ preiswert. Darüber hinaus lässt sich Methan auf vielfältige Weise biologisch und synthetisch aus nachhaltigen Quellen herstellen, was schon heute in zunehmendem Maße praktiziert wird und bei Nutzung der vorhandenen Infrastrukturen den angesprochenen Übergang zu einem nicht-fossilen Energiesystem erleichtert.

Wenn in Zukunft mehr und mehr regenerative Energieträger in Form von chemisch gespeicherter Energie – zum Beispiel als gasförmige und auch flüssige Kohlenwasserstoffe – zur Verfügung stehen werden, besteht keine Notwendigkeit mehr, den Verbrennungsmotor durch den Elektromotor zu ersetzen, denn die Verbrennung ist dann CO₂-neutral – nicht so beim Elektromotor – und sein Energieverbrauch (Well to Wheel) ist gleich hoch oder niedriger als der des Elektromotors je nach Strommix. Darüber hinaus ist er im Gegensatz zum Elektromotor in der Lage, bei entsprechender Auslegung und Abgasnachbehandlung belastete Luft beispielsweise in Megastädten zu entgiften (Sub-Zero-Emission-Vehicle). **Das sichert dem Hubkolbenmotor ein „ewiges Leben“.** Der Politik ist der Vorwurf zu machen, dass sie trotz dieser Erkenntnisse die Elektromobilität einseitig fördert. Stattdessen sollte der Gesetzgeber ausschließlich Grenzwerte festlegen. Für die Technologien kann auf Grund der komplexen Zusammenhänge nur Wissenschaft und Technik (R & D) Lösungswege aufzeigen.

Inspiziert durch den Fahrzeughersteller Audi, der nicht nur Erdgasfahrzeuge produziert, sondern seit 2014 als erster Automobilhersteller weltweit seinen Kunden auch künstlich erzeugtes Methan aus seiner „Power-to-Gas“-Anlage anbietet, ist bei mir die Idee gereift, dieses Buch zu gestalten.

* Weisheit unbekannter Herkunft

Mehr als fünfzig Autoren und Koautoren aus Wissenschaft, Industrie und Politik sind an diesem Werk beteiligt. Dadurch hat sich Redundanz nicht immer vermeiden lassen. Sie dient jedoch beim Lesen der einzelnen Kapitel der Verständlichkeit, da nicht in anderen Kapiteln nachgeschlagen werden muss. Schlimmer: An einigen Stellen ergeben sich Widersprüche, zum Beispiel bei der Frage, wie viel Prozent Wasserstoff das Erdgasnetz verträgt. In solchen Fällen ist noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten, bis endgültige Antworten vorliegen.

Das Buch richtet sich vor allem an Produktentwickler für die Erdgas- und Methananwendung und Fertigungsverantwortliche der Automobil- und Zulieferindustrie und deren Ingenieurdienstleister. Wissenschaft, Forschung und Lehre, aber auch der Politik soll es ein wichtiger Ratgeber sein. Es soll eine Lücke auf dem Buchmarkt schließen.

Für den Inhalt danke ich den hochkompetenten Autoren aus der Automobilindustrie, aber auch von Universitäten, wissenschaftlichen Instituten, Verbänden und, nicht zu vergessen, der Politik. Stellvertretend für alle Autoren seien die Herren Prof. Michael Bargende von der Universität Stuttgart, Dr. Michael Specht vom Zentrum für Solarenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW), Reiner Mangold und Reinhard Otten der Firma Audi sowie Prof. Helmut Eichseder von der Technischen Universität Graz genannt, die den größten Anteil am Inhalt dieses Buches erarbeitet haben. Fast 300 Bilder sorgen für anschauliche Inhalte und 572 Literaturstellen laden zu erweitertem Studium ein.

Dank gilt auch der Firma AVL, die den Inhalt mitgestaltet hat und das Erscheinen des Buches in der Reihe „Der Fahrzeugantrieb“, Reihenherausgeber Helmut List, ermöglichte.

Schließlich ist es dem Verlag Springer Vieweg gelungen, und hier im Besonderen Herrn Ewald Schmitt und Frau Elisabeth Lange, in kürzester Zeit überzeugende Arbeit zu leisten, weshalb das Buch aktueller nicht hätte sein können. Auch Frau Gisela Großmann von der Universität Stuttgart sei für die umfangreiche Unterstützung gedankt.

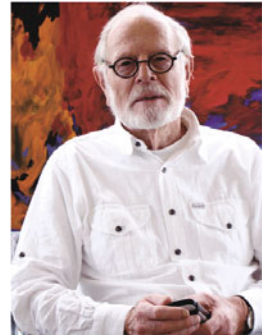
Und nun wünsche ich dem Werk die verdiente Aufmerksamkeit.

Bad Wimpfen, im März 2015

Richard van Basshuysen, VDI

Über den Herausgeber

Dr. Richard van Basshuysen gilt seit seiner Industrietätigkeit bei Audi als Vater des Pkw-Dieselmotors mit Direkteinspritzung. Unter seiner Verantwortung als Entwicklungsleiter der Fahrzeug-Komfortklasse und der Motor- und Getriebeentwicklung entstand der erste abgasentgiftete Pkw-Dieselmotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung. Damit revolutionierte er weltweit den Dieselmotor in Richtung drastischer Verbrauchsreduzierung bei gleichzeitigem Leistungs- und Drehmomentenanstieg.



Seine langjährigen fachwissenschaftlichen Arbeiten als Autor und Herausgeber brachten ihm den Ruf als visionären Vordenker der Antriebstechnik mit Verbrennungsmotoren ein.

Über viele Jahre hin verbinden ihn seine Arbeiten bis zum heutigen Tag auch mit den Verlagen Franckh-Kosmos, Vieweg, Springer, SAE International Text Books und China Machine Press. Ihm wurden u. a. die Benz-Daimler-Maybach-Ehrenmedaille 2001 des VDI für die Serieneinführung des Pkw-Dieselmotors mit Direkteinspritzung verliehen sowie der hochdotierte Ernst-Blickle-Preis 2000. Außerdem wurde er mit der Ehrendoktorwürde der Universität Magdeburg für sein Lebenswerk ausgezeichnet.

Mit diesem neuen Buchprojekt beweist er sein Gespür für die klimaneutrale Mobilität und stellt unter Beweis, dass schadstoff- und verbrauchsarmes Fahren mit heutiger Großserientechnik bereits möglich ist und einen signifikanten Beitrag für die Nachhaltigkeit in der Mobilität leisten kann.

Autorenverzeichnis

1	Grußworte	
1.1	Grußwort des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur	Rainer Bomba Staatssekretär, Berlin
1.2	Grußwort des VDA	Dr. Ulrich Eichhorn, Dr. Jakob Seiler / VDA, Berlin
2	Klimaneutraler Verkehr – Erdgas und Methan als Teil der Lösung	Dipl.-Ing. Lars Mönch, Dr. Katrin Dziekan, Dr. Martin Lange, Dipl.-Geogr. Kirsten Adlunger
3	Geschichtlicher Rückblick	Prof. Dr. Reinhold Bauer / Universität Stuttgart, Historisches Institut, Professur für Wirkungs- geschichte der Technik, Stuttgart
4	Erdgas und erneuerbares Methan	
4.1	Grundlagen zum Erdgas	Dipl.-Ing. Adalbert Wolany, Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende / Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart
4.2	Erdgasvorkommen und Erdgasgewinnung	Dr.-Ing. Siegfried Bajohr / Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe
4.3	Erdgastransport und Erdgasspeicherung	Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Frank Graf / DVGW-Forschungsstelle am KIT, Karlsruhe
4.4	Nachhaltige Erdgas- bzw. Methanerzeugung	
4.4.1	Biomethan aus der Vergärung: organische Abfälle, nachwachsende Rohstoffe	Nantje T. Zimmermann, M. A., Dipl.-Wirtschaftsjur. Janet Hochi, Reinhard Schultz, M. A. / Schultz projekt consult GbR, Berlin
4.4.2	Synthetisches Methan aus Biomasse	Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer, Dr.-Ing. Marco Klemm, Dipl.-Chem. Michael Schlüter / Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig

- 4.4.3 Synthetisches Methan aus regenerativer elektrischer Energie** Reinhard Otten, Tobias Hammer / Audi AG, Ingolstadt
- 4.4.3.1 Technische Umsetzung der Power-to-Gas-Technologie (P2G[®]): Erzeugung von Erdgas-substitut durch katalytische Methanisierung von H₂/CO₂** Dr. Michael Specht, Dipl.-Ing. Jochen Brellochs, Dr.-Ing. Volkmar Frick, Dipl.-Ing. (FH) Bernd Stürmer, Dr.-Ing. Ulrich Zuberbühler / Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart
- 4.4.3.2 Biologische Methanisierung – Methan-erzeugung durch mikrobielle Umwandlung von H₂ und CO₂** Joachim Krassowski, Oliver Jochum / Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen
- 4.5 Gemische aus Methan und Wasserstoff** Prof. Dr. techn. Helmut Eichlseder / Technische Universität Graz, Graz, Österreich
- 4.6 Gesamtsystemvergleich: Mobilität mit Methan im Vergleich zu anderen Antriebskonzepten und Energieträgern** Reinhard Otten, Hendrik Gosda / Audi AG, Ingolstadt
- 5 Fahrzeugentwicklung für Erdgas und erneuerbares Methan**
- 5.1 Erdgasspeicher- und Handlingsysteme** Andreas Jauss, Holger Winkelmann, Thorsten B. Bender, Ayhan Sarikaya / Adam Opel AG, Rüsselsheim
- 5.2 Pkw-Ottomotoren für Erdgas**
- 5.2.1 Bivalente und monovalente Systeme** Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende / Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart
- 5.2.2 Thermodynamik** Dipl.-Ing. Mahir Tim Keskin, Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende / Universität Stuttgart, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK), Stuttgart
- 5.2.3 Gemischbildung und Motorsteuerung** Dr. David Lejsek, Dr. Winfried Langer, Dr. Andreas Kufferath / Robert Bosch GmbH, Stuttgart
- 5.2.4 Zündung** Dr. Manfred Adolf, Alexander Schenk / BorgWarner Inc., Ludwigsburg; Dr. Matthias Budde, Dr. Michael Becker / BorgWarner Inc., Ludwigsburg

- 5.2.5 Aufladung für Erdgasbetrieb** Rolf Sauerstein, Dr. Sascha Weiske / BorgWarner Turbo Systems, Kirchheimbolanden; Dr. Matthias Budde, Dr. Michael Becker / BorgWarner Inc., Ludwigsburg
- 5.2.6 CO₂ und Wirkungsgrade** Dipl.-Ing. Helge Wollenhaupt, Dipl.-Ing. (FH) Klaus Wunderlich, Dipl.-Ing. (FH) Albert Ebner / Daimler AG, Stuttgart
- 5.2.7 Abgasemissionen, Kaltstart und Warmlauf** Dipl.-Ing. (FH) Klaus Wunderlich, Dipl.-Ing. Helge Wollenhaupt, Dipl.-Ing. (FH) Albert Ebner, Dipl.-Ing. Peter Heine, Peter Volz / Daimler AG, Stuttgart
- 5.2.8 Thermische und mechanische Beanspruchung von Pkw-Motoren für Erdgas** Honorarprofessor Dr.-Ing. habil. Eduard Köhler / ehemals KSPG AG, Neckarsulm
- 5.2.9 Akustik von Erdgasfahrzeugen** Dr.-Ing. Ulrich Philipp, Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende / Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart
- 5.3 Motorkonzepte für Lkw** Dr. Günter Figer / AVL List GmbH, Graz, Österreich
- 5.4 Hybridisierung beim Pkw** Dipl.-Ing. Florian Winke, Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende / Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart
- 5.5 Der Markt für den Kraftstoff Erdgas** Dr. Timm Kehler, Florian Feix, M.A., Claudia Petersen (VWA), Dipl.-Ing. Michael Schaarschmidt, MBA / erdgas mobil GmbH, Berlin
- 6 Off-Highway-Gasmotoren** Dr.-Ing. Christian Trapp, Dr.-Ing. Robert Böwing, Dr.-Ing. Georg Tinschmann / GE Jenbacher GmbH & Co. OG, Jenbach, Österreich
- 7 Ausblick** Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende / Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Stuttgart

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. Methanherzeugung	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	Wasserstoffherzeugung 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