



# Erneuerbares Methanol als Ausgangsstoff für die Bereitstellung von flüssigen Kraftstoffen für den Transportsektor

Felix Schorn

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 636

ISBN 978-3-95806-769-1

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)  
Jülicher Systemanalyse (IEK-3)

# **Erneuerbares Methanol als Ausgangsstoff für die Bereitstellung von flüssigen Kraftstoffen für den Transportsektor**

Felix Schorn

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 636

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-769-1

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	I
Abstract .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	IV
1 Einleitung und Ziel der Arbeit.....	1
1.1 Motivation und Hintergrund der Forschungsfragen .....	1
1.2 Methodisches Vorgehen und Aufbau der Arbeit .....	3
2 Literatur .....	7
2.1 Synthetische Kraftstoffproduktion .....	7
2.2 Techno-ökonomische Analysen der erneuerbaren Methanolsynthese .....	12
2.3 Methanol-zu-Kohlenwasserstoffe Synthese.....	15
2.3.1 Reaktionsmechanismus.....	16
2.3.2 Folgeprodukte von Methanol .....	19
2.3.2.1 Methanol-zu-Benzin .....	20
2.3.2.2 Methanol-zu-langkettigen-Kohlenwasserstoffen .....	23
2.3.2.3 Methanol-zu-höheren-Alkoholen .....	26
2.3.3 Zwischenfazit Methanol-zu-Kohlenwasserstoffen .....	28
2.4 Kraftstoffeigenschaften und -normung.....	28
2.4.1 Benzinkraftstoff .....	29
2.4.2 Kerosinkraftstoff.....	32
2.5 CO <sub>2</sub> -Bereitstellung für die Kraftstoffsynthese.....	37
2.5.1 Industrie.....	37
2.5.2 Biomasse .....	40
2.5.3 CO <sub>2</sub> -Abtrennung aus der Luft .....	44
2.5.4 Gegenüberstellung der Energiebedarfe der CO <sub>2</sub> -Abtrennung .....	52
2.5.5 CO <sub>2</sub> -Abscheidekosten.....	53
2.5.6 Zwischenfazit der CO <sub>2</sub> -Bereitstellung.....	55
2.6 Ökonomische Bewertung von Kraftstoffgestehungskosten.....	56
3 Methodik .....	59
3.1 Systemgrenzen und allgemeines Vorgehen .....	59
3.2 Vorgehen Prozessmodellierung.....	60
3.3 Definition techno-ökonomischer Randbedingungen.....	61
3.3.1 Größenordnung Kraftstoffpfade .....	61

---

3.3.2 Verfahrenstechnische Bauteilauslegung.....	62
3.3.3 Investitions- und Betriebskostenrechnung .....	66
3.4 Leistungskennzahlen.....	71
3.4.1 Kategorie I: Energetische Kennzahlen .....	72
3.4.2 Kategorie II: Ökonomische Kennzahlen .....	75
4 Der Einfluss der CO <sub>2</sub> -Abtrennung auf die erneuerbare Methanolsynthese.....	79
4.1 Biogas-Oxyfuel-Verfahren.....	79
4.1.1 Verfahrenstechnische Simulation.....	81
4.1.2 Energetische Auswertung .....	85
4.1.3 Bestimmung der CO <sub>2</sub> -Abscheidekosten.....	88
4.1.4 Diskussion und Zwischenfazit des Biogas-Oxyfuel-Verfahrens.....	94
4.2 Luft als Kohlenstoffquelle.....	96
4.2.1 Aufbau des Simulationsmodelles.....	97
4.2.2 Energetische Auswertung .....	104
4.2.3 Diskussion und Zwischenfazit der Luft als Kohlenstoffquelle.....	109
4.3 Diskussion und Fazit: Auswertung der ersten Forschungsfrage.....	110
5 Evaluierung von Methanol-Folgeprodukten für den Einsatz im Verkehrssektor .....	113
5.1 Methanol-zu-Benzin.....	113
5.1.1 Verfahrenstechnische Simulation.....	113
5.1.1.1 MtG mit isothermem Festbettreaktor.....	113
5.1.1.2 MtG mit Cu-Bea-12 Katalysator und Wasserstoffzugabe.....	116
5.1.2 Energetischer Auswertung und Vergleich .....	119
5.1.3 Gegenüberstellung der produzierten Kraftstoffe zur geltenden Norm .....	122
5.2 Methanol-zu-Kerosin .....	124
5.2.1 Verfahrenstechnische Simulation.....	125
5.2.1.1 Alken-Synthese .....	125
5.2.1.2 Alken-Oligomerisierung.....	127
5.2.1.3 Alken-Hydrierung.....	129
5.2.1.4 Aromaten-Synthese .....	131
5.2.2 Stoffliche und energetische Auswertung des Gesamtprozesses .....	132
5.2.3 Gegenüberstellung des produzierten Kraftstoffs zur geltenden Norm .....	134
5.3 Methanol-zu-höheren-Alkoholen .....	137
5.3.1 Verfahrenstechnische Simulation.....	138
5.3.1.1 Oxo-Synthese .....	138

---

5.3.1.2 Buten Hydratisierung.....	140
5.3.2 Stoffliche und energetische Auswertung des Gesamtprozesses.....	140
5.3.3 Gegenüberstellung der produzierten Kraftstoffe zur geltenden Norm.....	143
5.4 Fazit und Zusammenführung der Modellierungsergebnisse .....	145
5.4.1 Diskussion der Prozessmodellierung von Methanol-Folgeprodukten .....	145
5.4.2 Kopplung der Ergebnisse aus Kapitel 4 und 5.....	148
6 Ökonomische Analyse der Kraftstoffrouten.....	151
6.1 Analyse der Methanolgestehungskosten .....	151
6.2 Umwandlungskosten von Methanol-zu-Verkehrskraftstoffen.....	154
6.2.1 Benzinsynthese .....	155
6.2.2 Kerosin- und Butanolsynthese.....	158
6.3 Produktgestehungskosten methanolbasierter Verkehrskraftstoffe.....	160
6.4 Diskussion und Fazit der ökonomischen Analyse .....	163
7 Diskussion .....	165
7.1 Vergleich zu alternativen Kraftstoffsyntheserouten.....	165
7.1.1 Power-to-Fuel Wirkungsgrad.....	165
7.1.2 Ökonomie.....	169
7.2 Schlussfolgerungen .....	171
8 Zusammenfassung der Dissertation .....	175
Literaturverzeichnis.....	179
Anhang .....	197
A. Anhang zu Kapitel 2.....	198
B. Anhang zu Kapitel 3.....	210
C. Anhang zu Kapitel 4.1.....	212
D. Anhang zu Kapitel 4.2.....	213
E. Anhang zu Kapitel 5.1.....	224
F. Anhang zu Kapitel 5.2.....	230
G. Anhang zu Kapitel 5.3.....	238
H. Anhang zu Kapitel 6.2.....	241
Abbildungsverzeichnis.....	259
Tabellenverzeichnis .....	267
Abkürzungsverzeichnis .....	270
Symbolverzeichnis .....	272

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 636  
ISBN 978-3-95806-769-1

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

