



## Tiefentschwefelung von Flugturbinenkraftstoffen für die Anwendung in mobilen Brennstoffzellensystemen

Yong Wang

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)  
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

# Tiefentschwefelung von Flugturbinenkraftstoffen für die Anwendung in mobilen Brennstoffzellen- systemen

Yong Wang

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

Band / Volume 155

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-827-3

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Übersicht	4
<b>2</b>	<b>Brennstoffzellensystem</b>	<b>5</b>
2.1	Anwendungen der Brennstoffzellen für APU-Systeme	5
2.2	Mitteldestillate	5
2.2.1	Kraftstoffe aus Erdöl	5
2.2.2	Kerosinkraftstoff	6
2.2.3	Dieselmkraftstoffe und extra leichtflüssiges Heizöl	8
2.2.4	Schwefel in Kraftstoffen	9
2.3	Brenngaserzeugung	11
2.4	Anforderungen an die Entschwefelung	12
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Technik der Entschwefelungsverfahren</b>	<b>15</b>
3.1	Kommerzielle Prozesse	15
3.1.1	Hydrierende Entschwefelung	15
3.1.2	Der S-Zorb	18
3.2	Innovative Ansätze	20
3.2.1	Chemische Umwandlung	20
3.2.2	Biologische Umwandlung	23
3.2.3	Physikalische Trennung	24
3.2.4	Thermische Trennung	24
3.2.5	Zusammenfassung	27
<b>4</b>	<b>Entschwefelungsprozesse für mobile Anwendungen</b>	<b>29</b>
4.1	Membran	29
4.1.1	Grundlagen	29
4.1.2	Mathematische Modellierung	30
4.1.3	Pervaporation	31
4.1.4	Stand der Technik	33
4.1.5	Bewertung und Diskussion	36
4.2	Adsorption	37
4.2.1	Grundlagen	37

## Inhaltsverzeichnis

4.2.2	Thermodynamik der Adsorption . . . . .	38
4.2.3	Kinetik der Adsorption . . . . .	39
4.2.4	Dynamik der Adsorption . . . . .	39
4.2.5	Stand der Technik . . . . .	41
4.2.6	Bewertung und Diskussion . . . . .	44
4.3	Hydrierende Entschwefelung mit Vorsättiger . . . . .	45
4.3.1	Grundlagen . . . . .	45
4.3.2	Stand der Technik . . . . .	47
4.3.3	Bewertung und Diskussion . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Angewendete Analysemethoden</b>	<b>49</b>
5.1	Bestimmung der Gesamtschwefelkonzentration von Kraftstoffproben . . . . .	50
5.2	Identifizierung einzelner Schwefelkomponenten . . . . .	50
5.3	Charakterisierung der eingesetzten Kraftstoffe . . . . .	51
5.4	Statistische Versuchsplanung . . . . .	52
5.5	Fehlerrechnung und Konfidenzintervall . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zum Membranverfahren</b>	<b>55</b>
6.1	Aufbau der Versuchsanlage . . . . .	56
6.2	Versuchsdurchführung am Teststand . . . . .	57
6.3	Screening der unterschiedlichen Membranen . . . . .	58
6.4	Charakterisierung der Polymermembran M-6 . . . . .	61
6.4.1	Screening der unterschiedlichen Kraftstoffe . . . . .	61
6.4.2	Untersuchung zur Selektivität mit Modellkraftstoffen . . . . .	63
6.4.3	Optimierung der Versuchsbedingungen mit Jet A-1 . . . . .	64
6.4.4	Charakterisierung der Regenerierbarkeit und Dauerhaltbarkeit . . . . .	70
6.5	Charakterisierung der Polymermembran M-9 . . . . .	77
6.5.1	Screening der unterschiedlichen Kraftstoffe . . . . .	77
6.5.2	Modifizierte Membranmaterialien . . . . .	78
6.5.3	Charakterisierung der Dauerhaltbarkeit . . . . .	79
6.6	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur adsorptiven Entschwefelung</b>	<b>81</b>
7.1	Aufbau der Versuchsanlage zur Festbettadsorption . . . . .	81
7.2	Versuchsdurchführung und Darstellung der Durchbruchskurve . . . . .	83
7.3	Screening der unterschiedlichen Adsorbentien . . . . .	86
7.4	Charakterisierung der Entschwefelungsleistung des Adsorbens A-12 . . . . .	89
7.4.1	Thermodynamische und kinetische Untersuchungen . . . . .	89
7.4.2	Optimierung der Adsorptionsparameter . . . . .	94
7.4.3	Optimierung der Regenerationsparameter . . . . .	97
7.4.4	Regeneration der beladenen Adsorbentien mit unterschiedlichen Gasmedien	100
7.4.5	Optimierung der Reaktorgeometrie . . . . .	102
7.4.6	Screening von unterschiedlichen Kraftstoffen . . . . .	105
7.4.7	Charakterisierung der Dauerhaltbarkeit . . . . .	107

7.5 Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	108
<b>8 Experimentelle Untersuchungen zum Hydrofiner</b>	<b>111</b>
8.1 Aufbau der Versuchsanlage . . . . .	111
8.2 Versuchsdurchführung . . . . .	113
8.3 Löslichkeit von Reformatgas in Kerosin . . . . .	116
8.4 Charakterisierung der Entschwefelungsleistung der HDS-Anlage . . . . .	118
8.4.1 Optimierung der Betriebsbedingungen mit Jet A-1 . . . . .	118
8.4.2 Entschwefelung mit Wasserstoff und Reformatgas . . . . .	121
8.4.3 Einfluss der Raumgeschwindigkeit auf die Entschwefelung . . . . .	122
8.4.4 Entschwefelung von zwei unterschiedlichen Kraftstoffen . . . . .	123
8.4.5 Spülen des Produktes mit Stickstoff . . . . .	123
8.4.6 Bestätigung der Lageunabhängigkeit des HDS-Reaktors . . . . .	125
8.4.7 Charakterisierung der Dauerhaltbarkeit . . . . .	126
8.5 Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	128
<b>9 Modellierung und Simulation zur Berechnung des Energiebedarfs</b>	<b>131</b>
9.1 Pervaporation . . . . .	131
9.1.1 Eingangsparameter . . . . .	132
9.1.2 Massen- und Energiebilanz . . . . .	133
9.1.3 Simulation der Pervaporation mit PRO/II . . . . .	136
9.1.4 Thermischer und elektrischer Energiebedarf . . . . .	136
9.2 Adsorption . . . . .	137
9.2.1 Eingangsparameter . . . . .	138
9.2.2 Massenbilanz . . . . .	139
9.2.3 Energiebilanz des Teilschritts . . . . .	140
9.2.4 Modellierung und Simulation mit MATLAB/Simulink . . . . .	146
9.2.5 Thermischer und elektrischer Energiebedarf . . . . .	149
9.3 Hydrierende Entschwefelung mit Vorsättiger . . . . .	151
9.3.1 Eingangsparameter . . . . .	151
9.3.2 Massen- und Energiebilanz . . . . .	154
9.3.3 Simulationsrechnung des Energiebedarfs . . . . .	155
9.3.4 Thermischer und elektrischer Energiebedarf . . . . .	157
9.4 Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	158
<b>10 Verfahrenstechnische Analyse und Bewertung</b>	<b>161</b>
10.1 Prozessauslegung . . . . .	161
10.2 Vergleich und Bewertung des Gesamtprozesses . . . . .	163
10.2.1 Entschwefelungsleistung . . . . .	163
10.2.2 Zuzuführender Kraftstoffstrom . . . . .	164
10.2.3 Energieaufwand . . . . .	164
10.2.4 Baugröße . . . . .	167
10.2.5 Lebensdauer . . . . .	168
10.3 Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	169

Inhaltsverzeichnis

<b>11 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>171</b>
11.1 Übersicht . . . . .	171
11.2 Fazit und Ausblick . . . . .	172
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>187</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>193</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>195</b>
<b>Anhang</b>	<b>199</b>

**Kurzzusammenfassung:**

Aufgrund erhöhter Leistungsfähigkeit und geringer Schadstoffemissionen sind Brennstoffzellen betriebene Stromaggregate vielversprechend für die Bordstromversorgung in LKW, Schienenfahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen. Zum Betrieb der Brennstoffzellen mit dem an Bord verfügbaren Kraftstoff werden eine katalytische Reformierung und nachgeschaltete Gasaufbereitungsschritte verwendet. Dafür ist eine Entschwefelung des Kraftstoffs an Bord notwendige Voraussetzung. Das vorliegende Buch befasst sich mit theoretischen, experimentellen und analytischen Untersuchungen zur Entwicklung eines technisch relevanten Tiefentschwefelungsprozesses für Brennstoffzellensysteme mit einer elektrischen Leistung von 5 kW.

**Autor:**

**Yong Wang** studierte an der Universität Paderborn Maschinenbau mit der Studienrichtung Energie- und Verfahrenstechnik. Seit 2009 beschäftigt er sich am Institut für Energie- und Verfahrenstechnik (IEK-3) im Forschungszentrum Jülich mit der Tiefentschwefelung von Flugturbinenkraftstoffen für die Anwendung in mobilen Brennstoffzellensystemen. Der Inhalt dieses Buchs wurde von der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigt.

**Institut:**

Die Forschungsaufgaben des Instituts für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) sind auf die Realisierung von Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen sowie von entsprechenden Stacks und Systemen für stationäre oder mobile Anwendungen ausgerichtet. Ferner umfassen die verfahrens- und systemtechnischen Entwicklungen die Bereitstellung von Apparaten zur Brenngaserzeugung. Diese Arbeiten werden von physikalisch-chemischen Grundlagenuntersuchungen sowie systematischen Studien der Energieverfahrenstechnik begleitet.