



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Brennstoffzellenforschung der Volkswagen AG in Isenbüttel. Meiner Doktormutter Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer, Leiterin des Instituts für Energie- und Systemverfahrenstechnik der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Betreuung meiner Arbeit und den wissenschaftlichen Austausch. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth, Leiter der Professur für Alternative Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Chemnitz, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Oliver Berger für die Anregungen und den Freiraum, die zum Vollenden dieser Arbeit geführt haben.

Den Mitarbeitern der Brennstoffzellenforschung der Volkswagen AG danke ich für die sehr gute Atmosphäre und das familiäre Verhältnis. Meiner Freundin Denise danke ich für die Unterstützung und Motivation in der letzten Phase dieser Arbeit.

Am Ende danke ich meinen Eltern Dieter und Ute Jenssen sowie meinem Bruder Jörg-Christian Jenssen für jegliche Unterstützung und Rückhalt auf dem Weg zur Anfertigung dieser Dissertation.

Braunschweig, Oktober 2018





Kurzfassung

Die Brennstoffzelle im Fahrzeug bietet eine aussichtsreiche Möglichkeit, die Elektromobilität für die Langstrecke ohne Nachteile bezüglich Reichweite und Betankungsdauer darzustellen. Für eine erfolgreiche Einführung dieser Technologie gilt es, die Wasserstoffinfrastruktur auszubauen und die derzeit noch hohen Kosten zu senken. Die Verfahrenstechnik zum Betreiben des Brennstoffzellenstapels erzeugt mehr als 50 % der Kosten des Brennstoffzellensystems.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Vereinfachung des Anodensystems ohne die Betriebsgrenzen des Brennstoffzellenstapels zu vernachlässigen. Das Anodenwassermanagement hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Betriebsstabilität und Lebensdauer des Brennstoffzellenstapels. Experimentelle Untersuchungen und Simulationen zeigen die Betriebsgrenzen des Brennstoffzellenstapels auf. Ein Stabilitätskriterium zur Beschreibung eines effektiven anodenseitigen Flüssigwasseraustrags auf Basis der dimensionslosen Reynoldszahl wird identifiziert und validiert.

Die Anodenkaskadierung dient dazu, die rezirkulierte Wasserstoffmenge absenken zu können ohne die Betriebsgrenzen des Brennstoffzellenstapels zu missachten. Dabei haben die Art der Teilung und die Anzahl der Stufen einen Einfluss auf die rezirkulierte Wasserstoffmenge und bieten somit Potential für eine Anodensystemvereinfachung. Es wird eine Methode zur Berechnung und Auslegung von Anodenkaskaden entwickelt und angewendet. Experimentelle Untersuchungen an einem kaskadierten Stapel dienen der Validierung der Berechnungen und bestätigen die Effektivität der Kaskadierung. Es stellte sich heraus, dass ein Stapel mit einer Teilung von 0,5:0,5 Vorteile im unteren Lastbereich für die Anodensystemauslegung hat.

Für eine Rezirkulation des Wasserstoffs werden meist elektrische Gebläse verwendet, welche unter anderem die Systemkomplexität und damit die Kosten erhöhen. Strahlpumpen können zur Vereinfachung des Anodensystems verwendet werden. Auf Basis der Erkenntnisse der Brennstoffzellenuntersuchungen werden neuartige Anodensystemkonzepte simuliert und deren Betriebsgrenzen ermittelt. Die Simulationen zeigten, dass eine Kombination aus geregelter Strahlpumpe und kaskadiertem Stapel mit einer Teilung von 0,5:0,5 den gesamten Betriebsbereich des untersuchten Brennstoffzellenstapels abdeckt. Mit dieser Kombination kann ein vereinfachteres Anodensystem gegenüber dem Stand der Technik dargestellt werden.



Abstract

Fuel cells in vehicles are a promising option for long range emobility without drawbacks in range and refueling times. For a successful introduction the infrastucture for hydrogen has to be roled out and the high costs of the technology has to be lowered. Process technology for operating the fuel cell stack produces more than 50 % of the costs of the fuel cell system.

The aim of this thesis is the simplification of the anode system without neglecting the operating boundaries of the fuel cell stack. Anode water management has strong influence on stability and lifetime of the fuel cell stack. Experimental work and simulations describe the operating boundaries of the fuel cell stack. A stability criterion for effective water removal based on the dimensionless Reynolds number is identified and validated.

Anode cascading is used for lowering the amount of recirculated hydrogen without neglecting the boundaries of the fuel cell stack. The number and location of stages influence the amount of recirculated hydrogen and thus have potential for simplification of the anode system. A method for design suitable anode cascades is developed and analysed. Experimental work on a fuel cell stack with anode cascade is used for validation und confirms the effectiveness of cascading. It is shown, that a cascaded stack with a division of 0.5:0.5 has advantages for anode system design at low fuel cell power output.

For anode recirculation, usually electrical blowers are used, which increase complexity and thereby the costs of the system. For system simplification ejectors can be used. Based on results of fuel cell analysis anode system concepts are simulated and their operational boundaries evaluated. Simulations show, that a combination of controlled ejector and anode cascaded fuel cell stack cover the whole operating boundaries of this stack. Using this combination a simplified anode system can be demonstrated.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vi
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Automobile Brennstoffzellensysteme	3
2.2 PEM-Brennstoffzelle	8
2.2.1 Thermodynamik und Aufbau	9
2.2.2 Wasserstoffunterversorgung und elektrochemische Betriebsgrenzen	13
2.2.3 Flüssigwassermanagement und Analyse	16
2.3 Konzepte für Anodensysteme	19
2.4 Motivation und Ziele der Arbeit	24
3 Wassermanagement der Anode	27
3.1 Motivation	27
3.2 Modellbildung	28
3.2.1 Stoffmengenbilanzen	29
3.2.2 Druckverlust	32
3.2.3 Zellspannung	34
3.2.4 Flüssigwasseraustrag	36
3.3 Experimentelles	39
3.3.1 Brennstoffzelle und Prüfvorrichtung	40
3.3.2 Durchführung der Messungen und Simulation	42



3.4	Ergebnisse und Diskussion	44
3.4.1	Druckverlust und Zellspannung	44
3.4.2	Feuchteinfluss auf die Stromdichteverteilung	49
3.4.3	Flüssigwasseraustrag und Stabilität	52
3.4.3.1	Einzelzelle	52
3.4.3.2	Brennstoffzellenstapel	62
4	Anodenkaskadierung	69
4.1	Motivation und Konzeptbeschreibung	69
4.2	Modellbildung	71
4.3	Experimentelle Untersuchungen	75
4.4	Ergebnisse und Diskussion	77
5	Anodensystemkonzepte	87
5.1	Motivation	87
5.2	Aktive Rezirkulation	88
5.2.1	Modellierung	89
5.2.2	Ergebnisse und Diskussion	91
5.3	Passive Strahlpumpe	94
5.3.1	Modellierung	95
5.3.2	Ergebnisse und Diskussion	99
5.4	Regelbare Strahlpumpe	104
5.4.1	Auslegung und Modellierung	105
5.4.2	Ergebnisse und Diskussion	107
5.4.2.1	Kombination mit klassischem Stapel	108
5.4.2.2	Kombination mit kaskadiertem Stapel	110
5.5	Bewertung der Anodenkonzepte	113
6	Zusammenfassung & Ausblick	115
	Literatur	119
	Abbildungsverzeichnis	129
	Tabellenverzeichnis	135
A	Anhang	137
A.1	Physikalische Grundgleichungen	137



A.2	Messungen zum Wasseraustrag	139
A.3	Navier-Stokes-Gleichungen	140
A.4	Veröffentlichungen	141





Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen und Indizes

Symbol	Einheit	Beschreibung
A		Antrieb
an		Anode
akt		Aktivierung
AR		Aktive Rezirkulation
aus		Austritt
BPP		Bipolarplatte
CL		Katalysatorschicht (engl.: catalyst layer)
diff		Diffusor
DC		Gleichstrom-Wandler
ein		Eintritt
el		elektrisch
Fara		Faraday
fl		flüssig
Fluid		Fluidisches Medium
g		gasförmig
GDL		Gasdiffusionslage (engl.: gas diffusion layer)
glob		global
H_2		Wasserstoff
H_2O		Wasser
i, j		Zählvariable
ka		Kathode
Kap		Kapillare
konz		Konzentration
L		Laufrad
max		maximal



Symbol	Einheit	Beschreibung
MEE		Membran-Elektroden-Einheit
Mem		Membran
min		minimal
mit		mittel
MPL		Mikroporöse Schicht (engl.: microporous layer)
nb		Düsenkörper
ni		Düseneingang
nt		Treibdüse
N_2		Stickstoff
O_2		Sauerstoff
Ohm		Ohmsch
OCV		Open Circuit Voltage
P		Primär
PEM		Polymer-Elektrolyt-Membran
prod		produziert
Re		Reynoldszahl
reak		Reaktion
rez		rezirkuliert
S		Stufengröße
SP		Strahlpumpe
sat		Sättigung
t		Mischrohr
theo		theoretisch
tr		trocken
trans		transferiert
Tropf		Tropfen
Verd		Verdichter
W		Widerstand
ZGI		Zellgüteindex

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
a		Aktivität des Wassers
A_C	mm^2	Seitenkanalfläche des Gebläses
A	mm^2	Fläche
b		Koeffizient für Membranfeuchte
c		Geometriefaktor
c_i	mol/m^3	Konzentration des Stoffes i
c_W		Widerstandsbeiwert
d_{Mem}	μm	Membrandicke
D	mm	Durchmesser
D_W		Diffusionskoeffizient für Wasser
e^-		Elektron
F	$96\,485,3\text{ C/mol}$	Faraday Konstante
f		Rollreibungsfaktor
F_i	N	Kraft i
g	$9,81\text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung
G		Freie Gibb'sche Energie
H		Enthalpie
i	A/cm^2	Stromdichte
I	A	Stromstärke
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	g/mol	Molare Masse
Ma		Mach Zahl
n	$1/\text{min}$	Drehzahl
n_{Zell}		Zellanzahl
K		Durchflusskoeffizient
K_p		Verlustkoeffizient
l	m	Länge
P	W	Leistung
p	Pa	Druck
\dot{Q}	W	Wärmestrom
r	m	Radius
r_C	m	Radius des Seitenkanals des Gebläses



Symbol	Einheit	Beschreibung
R	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	allgemeine Gaskonstante
R_s	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Gaskonstante
$r.F.$	%	relative Feuchte
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
u	m/s	Geschwindigkeit
\dot{u}	m/s^2	Beschleunigung
U	V	Spannung
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
x		Molanteil
y		Massenanteil
z		an Reaktion beteiligte Elektronen

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	°	Winkel
η	Pas	dynamische Viskosität
η	.	Wirkungsgrad
κ	.	Isentropenkoeffizient
λ_{Mem}	.	Membranfeuchte
λ	.	Überschussrate
Λ	.	Beschleunigungsfaktor
ν_{krit}	.	kritisches Druckverhältnis
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	N/m	Oberflächenspannung
φ	.	Durchflusszahl
ϕ	°	Kontaktwinkel
ϕ_{P}	.	Isentropenkoeffizient des Primärstroms
ϕ_{W}	.	Dimensionslose Zahl nach Wilke
ψ	.	Druckzahl
ψ_{P}	.	Isentropenkoeffizient des Primärstroms

