Inhalt

Sy	Symbolverzeichnis xix						
Abkürzungsverzeichnis xxv							
1	1 Einleitung						
2	Übe 2.1 2.2 2.3 2.4 2.4	ersicht über Modellierung und Simulation von PEM-Brennstoffzellen Grundlagen der PEM-Brennstoffzelle Übersicht bestehender Modelle Wasserhaushalt in der Zelleinheit 2.3.1 Wassertransport in der Gasphase 2.3.2 Transport von Flüssigwasser in der GDL 2.3.2.1 Mechanismen 2.3.3 Transport von Flüssigwasser in den Gaskanälen 2.3.4 Wassertransport im Ionomer Modellierung der Katalysatorschichten in makroskopischen Modellen Thermische Widerstände	3 5 8 9 9 9 13 14 14 15 17				
3	Мос	dellbildung	21				
3	Moc 3.1	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase	21 22				
3	Moc 3.1 3.2	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase	21 22 26				
3	Moc 3.1 3.2 3.3	dellbildungStrömungsgleichungen in der GasphaseFlüssigwassertransportWassertransport im Ionomer	21 22 26 33				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4	dellbildungStrömungsgleichungen in der GasphaseFlüssigwassertransportWassertransport im IonomerPhasenwechsel des Wassers	21 22 26 33 34				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4	dellbildungStrömungsgleichungen in der GasphaseFlüssigwassertransportWassertransport im IonomerPhasenwechsel des Wassers3.4.1Verdunstung und Kondensation	21 22 26 33 34 34				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4	dellbildungStrömungsgleichungen in der GasphaseFlüssigwassertransportWassertransport im IonomerWassertransport im IonomerPhasenwechsel des Wassers3.4.1Verdunstung und Kondensation3.4.1.1Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells	21 22 26 33 34 34 34 35				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4	dellbildungStrömungsgleichungen in der GasphaseFlüssigwassertransportWassertransport im IonomerWassertransport im IonomerPhasenwechsel des Wassers3.4.1Verdunstung und Kondensation3.4.1.1Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells3.4.1.2Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen	21 22 26 33 34 34 35				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4	dellbildungStrömungsgleichungen in der GasphaseFlüssigwassertransportWassertransport im IonomerWassertransport im IonomerPhasenwechsel des Wassers3.4.1Verdunstung und Kondensation3.4.1.1Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells3.4.1.2Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen Modell	 21 22 26 33 34 34 35 38 				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase Flüssigwassertransport Wassertransport im Ionomer Wassertransport im Ionomer Phasenwechsel des Wassers 3.4.1 Verdunstung und Kondensation 3.4.1.1 Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells 3.4.1.2 Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen Modell	 21 22 26 33 34 34 35 38 40 				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase Flüssigwassertransport Wassertransport im Ionomer Wassertransport im Ionomer Phasenwechsel des Wassers 3.4.1 Verdunstung und Kondensation 3.4.1.1 Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells 3.4.1.2 Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen Modell 3.4.2 Absorption und Desorption Wasserstoff-Crossover	 21 22 26 33 34 34 35 38 40 43 44 				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase Flüssigwassertransport Wassertransport im Ionomer Wassertransport im Ionomer Phasenwechsel des Wassers 3.4.1 Verdunstung und Kondensation 3.4.1.1 Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells 3.4.1.2 Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen Modell 3.4.2 Absorption und Desorption Wasserstoff-Crossover Ladungstransport und Potentiale	21 22 26 33 34 34 35 38 40 43 44				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4 3.4	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase Flüssigwassertransport Wassertransport im Ionomer Wassertransport im Ionomer Phasenwechsel des Wassers 3.4.1 Verdunstung und Kondensation 3.4.1 Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells 3.4.1.1 Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells 3.4.1.2 Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen Modell Modell Modell Sterstoff-Crossover Ladungstransport und Potentiale 3.6.1 Ladungsbilanzen 3.6.2 Elektrodenpotential im Gleichgewicht	 21 22 26 33 34 34 35 38 40 43 44 44 45 				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase Flüssigwassertransport Wassertransport im Ionomer Wassertransport im Ionomer Phasenwechsel des Wassers 3.4.1 Verdunstung und Kondensation 3.4.1 Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells 3.4.1.2 Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen Modell 3.4.2 Absorption und Desorption Wasserstoff-Crossover Ladungstransport und Potentiale 3.6.1 Ladungsbilanzen 3.6.2 Elektrodenpotential im Gleichgewicht	 21 22 26 33 34 34 35 38 40 43 44 44 45 48 				
3	Moc 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7	dellbildung Strömungsgleichungen in der Gasphase Flüssigwassertransport Wassertransport im Ionomer Wassertransport im Ionomer Phasenwechsel des Wassers 3.4.1 Verdunstung und Kondensation 3.4.1.1 Theoretische Analyse anhand eines idealisierten Modells 3.4.1.2 Berechnung der Phasenwechselrate im makrohomogenen Modell Modell Strämsport und Desorption 3.4.2 Absorption und Desorption Strämsport und Potentiale 3.6.1 Ladungsbilanzen 3.6.2 Elektrodenpotential im Gleichgewicht 3.6.3 Elektrodenpotential im Ungleichgewicht	 21 22 26 33 34 34 35 38 40 43 44 45 48 48 				

		3.7.2 Kathode	9
		3.7.2.1 Idealisiertes Partikelmodell	9
		3.7.2.2 Diskussion und Vereinfachung des Partikelmodells 5	5
	3.8	Energiebilanz	8
	3.9	Randbedingungen	3
	3.10	Numerisches Verfahren zum Lösen der Modellgleichungen 6	64
4	Erm	ittlung thermischer Eigenschaften von Gasdiffusionsschichten 6	5
	4.1	Aufbau des stationären Heatfluxmeters	5
	4.2	Vorgehen zur Datenauswertung 6	57
	4.3	Unsicherheitsbetrachtung	9
		4.3.1 Vorgehen	9
		4.3.2 Angenommene Unsicherheiten	0
	4.4	Messergebnisse der thermischen Widerstände	'1
		4.4.1 Wärmeleitfähigkeit des Heatfluxmeters	'1
		4.4.2 Thermischer Widerstand des GDL-Substrats	'1
		4.4.3 Kontaktwiderstand zwischen GDL-Substrat und Bipolarplatte 7	2
		4.4.4 Thermischer Widerstand der MPL	'4
		4.4.5 Temperaturabhängigkeit	6
		4.4.6 Einfluss der Messunsicherheiten	6
	4.5	Dicke und Porosität von GDL-Substrat und MPL	8
	4.6	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL	'9
5	4.6 Sim	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8	'9 3
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8	9 3 3
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8	9 3 3 5
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8	9 3 3 5 5
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9	9 3 3 5 5 3
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.1.3 Einfluss der Druckdifferenz 9	9 3 3 5 5 3 7
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.2 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9	9 3 3 5 5 3 7 9
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.3 Effekt einer MPL 10	(9) (3) (3) (5) (5) (5) (7) (9) (1)
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10	(9 (3) (3) (5) (5) (5) (7) (9) (1) (4)
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10	9 3355379 9 10 407
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10	9 3355379 104 78
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Effekt einer MPL 10 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 Analyse am 3D-Modell 10	9 3 355 379 14 78 9 14 78 9
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 5.2.1 Abschätzung der Zustandsänderung in Kanalrichtung 11	9 3 3 5 5 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 5.2.1 Abschätzung der Zustandsänderung in Kanalrichtung 11 5.2.1.1 Druckverlust des Kathodengases 11	9 3355379 10 10 10
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Effekt einer MPL 10 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 5.2.1 Abschätzung der Zustandsänderung in Kanalrichtung 11 5.2.1.2 Feuchteverlauf des Kathodengases 11	9 3 35 53 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 ulation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 5.2.1 Abschätzung der Zustandsänderung in Kanalrichtung 11 5.2.1.2 Feuchteverlauf des Kathodengases 11 5.2.2 Simulationsergebnisse Gleichstrom 11	9 3 3 5 3 7 9 1
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 5.2.1 Abschätzung der Zustandsänderung in Kanalrichtung 11 5.2.1.2 Feuchteverlauf des Kathodengases 11 5.2.1.2 Simulationsergebnisse Gleichstrom 11	9 3 3 5 3 7 9 1
5	4.6 Sim 5.1	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 5.2.1 Druckverlust des Kathodengases 11 5.2.1.1 Druckverlust des Kathodengases 11 5.2.2 Simulationsergebnisse Gegenstrom 11 5.2.3 Simulationsergebnisse Gegenstrom 11	9 3 3 5 5 3 7 9 1
5	4.6 Sim 5.1 5.2 Valie	Wärmeleitfähigkeit von GDL-Substrat und MPL 7 Jlation 8 Analyse am 2D-Modell 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Wasserhaushalt 8 5.1.1 Einfluss auf die Zellleistung 8 5.1.1.2 Einfluss auf den Sauerstofftransport in den porösen Schichten 9 9 5.1.2 Einfluss der Druckdifferenz 9 5.1.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des GDL-Substrats 9 5.1.4 Geringe Katalysatorbeladung 10 5.1.5 Kanalgeometrie 10 5.1.6 Zusammenfassung 10 5.1.1 Druckverlust des Kathodengases 11 5.2.1 Abschätzung der Zustandsänderung in Kanalrichtung 11 5.2.1.2 Feuchteverlauf des Kathodengases 11 5.2.1.2 Feuchteverlauf des Kathodengases 11 5.2.2 Simulationsergebnisse Gegenstrom 11 5.2.3 Simulationsergebnisse Gegenstrom 11 5.2.4 Zusammenfassung 12	9 3 3 5 3 7 9 1

	6.2 6.3 6.4	Aufbau des Experiments	. 124 . 125 . 131			
	6.5	Vergleich	. 135			
7	Disł	kussion	137			
	7.1	Modell und Simulationsergebnisse	. 137			
		7.1.1 Phasenwechsel	. 137			
		7.1.2 Flüssigwasser	. 138			
		7.1.3 Thermische Widerstände	. 140			
		7.1.4 Anisotropie des GDL-Substrats	. 140			
		7.1.5 Einfluss einer MPL	. 141			
		7.1.6 Stofftransport in der Mikrostruktur	. 141			
		7.1.7 Einfluss der Kanalgeometrie	. 142			
		7.1.8 Zustandsänderungen entlang der Kanalrichtung	. 142			
	7.2	Schlussfolgerungen aus dem Validierungsexperiment	. 143			
	7.3	Diskussion der ermittelten thermischen Widerstände	. 146			
8	Zus	ammenfassung	149			
Lit	Literaturverzeichnis 153					
At	Abbildungsverzeichnis					
Та	Tabellenverzeichnis					
A Parameter des Basisfalls						