

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Stand des Wissens	5
2.1 Theoretische Grundlagen	5
2.1.1 Elektrochemische Verfahrenstechnik	5
2.1.2 Stofftransport	9
2.1.3 Verweilzeit	12
2.1.4 Numerische Strömungsmechanik	15
2.1.5 Statistische Versuchsplanung	19
2.2 Stand des Wissens	22
2.2.1 Energiespeicher	23
2.2.2 Redox-Flow-Batterie	23
2.2.3 Vanadium-Redox-Flow-Batterie	25
2.2.4 Elektrodenbeschreibung	27
2.2.5 Strömungsfelder	31
2.2.6 Kosten eines VFB-Systems	37
2.2.7 Charakterisierungsmethoden	39
3. Modell- und Versuchsaufbau	41
3.1 CFD-Modell	41
3.1.1 Modellaufbau	41
3.1.2 Vernetzung	44
3.1.3 Grundmodelle	47
3.1.4 Stofftransport	49
3.1.5 Verweilzeit	50
3.2 Variation und Auslegung von Strömungsfeldern	51
3.2.1 Vorgehensweise bei Untersuchung der Strömungsfelder	52
3.2.2 Definition der Kostenfunktion	56
3.2.3 Einfluss des Strömungsfeldes auf Verweilzeitverteilung	66
3.3 Parameterauswahl und Effekte	67

3.3.1	Parameterauswahl	68
3.3.2	Versuchsplan und Berechnung der Effektdiagramme.....	71
3.3.3	Auswahl ANOVA und Bewertung der Effektgröße	72
3.4	Experimentelle Charakterisierung.....	73
3.4.1	Optische Messungen	74
3.4.2	Vollzellcharakterisierung.....	80
3.4.3	Hydrodynamische Charakterisierung	84
3.4.4	Elektrochemische Charakterisierung.....	94
4.	Modellbasierte und experimentelle Ergebnisse.....	101
4.1	Analyse von Strömungsfeldern	101
4.1.1	Durchströmung mit Strömungsfeld	102
4.1.2	Variation der Strömungsfelder	108
4.1.3	Gesamtkosten für das VFB System	118
4.1.4	Verweilzeitverhalten und Totvolumina	126
4.2	Parameterstudie der zentralen Modellparameter.....	133
4.2.1	Effektdiagramme.....	134
4.2.2	ANOVA	137
4.2.3	Effektgröße.....	141
4.3	Modellvalidierung anhand von experimentellen Messergebnissen	144
4.3.1	Validierung der Strömungsverteilung - optische Messungen.....	145
4.3.2	Validierung des hydrodynamischen Verhaltens.....	151
4.3.3	Validierung des elektrochemischen Verhaltens	165
5.	Zusammenfassung und Ausblick	179
Anhang.....	I	
A.1	Randbedingungen CFD-Modell.....	I
A.2	Extrapolierter relativer Fehler durch Rechnernetz.....	II
A.3	Parameterdiagramm	IV
A.4	Schmidt-Zahl bei optischen Messungen	V
A.5	Parameter poröses Elektrodenfilz	V
A.6	Druckmessung je Halbzelle mit Fehlerbalken.....	VI

A.7 Einfluss Kanallänge auf Simulationsergebnis	VII
A.8 Anfangsbedingungen CFD-Modell.....	IX
A.9 Elektrolyttemperatur bei Polarisationskurve	X
A.10 Verweilzeitsummenverteilung	XII
A.11 Simulationsergebnisse Parameterstudie.....	XIII
A.12 Ergebnisse Strömungsfeld abhängige Druckdifferenzen	XVIII
A.13 Ergebnisse Optimierung hydrodynamische Eindringtiefe.....	XXVI
A.14 Ergebnisse elektrochemische Vollzellmessungen	XXXI
Abkürzungsverzeichnis	XXXIX
Symbolverzeichnis	XLI
Literaturverzeichnis	XLVII