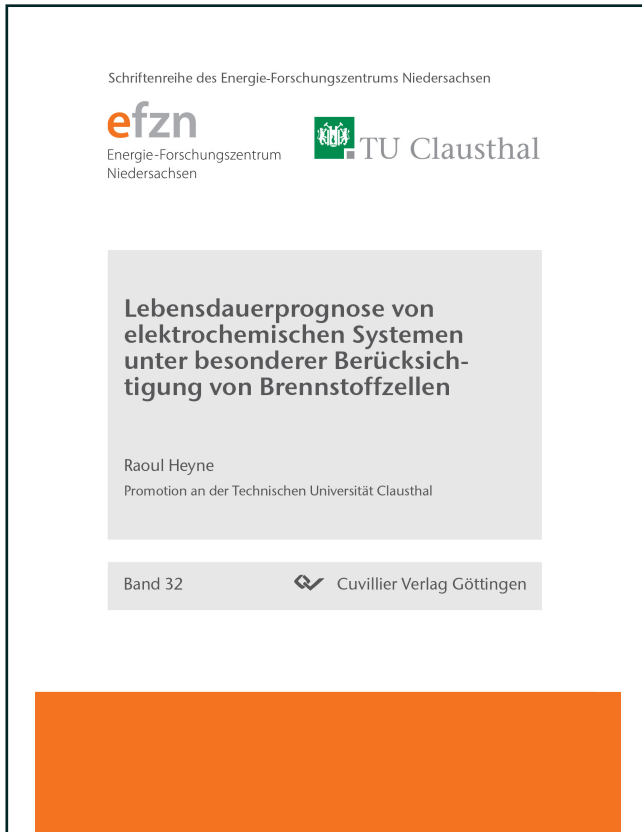




Raoul Heyne (Autor)

# Lebensdauerprognose von elektrochemischen Systemen unter besonderer Berücksichtigung von Brennstoffzellen



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7066>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Nernstgleichung . . . . .	6
2.2	Butler-Volmer-Gleichung . . . . .	7
2.3	Maxwellgleichungen . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Messtechnik und Darstellung</b>	<b>13</b>
3.1	Messtechnik . . . . .	13
3.1.1	Herkömmliches Brennstoffzellensystem . . . . .	14
3.1.2	Flächiges Strommesssystem . . . . .	17
3.1.3	Modifiziertes Brennstoffzellensystem . . . . .	19
3.2	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	22
3.2.1	Stromverteilungen bei maximalem Strom . . . . .	22
3.2.2	Darstellung des Flächensegmentes mit maximalem Strom . . . . .	24
3.2.3	Darstellung der Mittelwerte der Segmentzeile und Segmentspalte . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Strominhomogenitätsmessungen</b>	<b>27</b>
4.1	Variation der Parameter bei konstantem Strom . . . . .	28
4.2	Variation der Parameter bei veränderlichem Strom . . . . .	31
4.2.1	Temperaturverhalten bei veränderlichem Strom . . . . .	37
4.2.2	Stöchiometrieänderung bei veränderlichem Strom . . . . .	42
4.2.3	Rezirkulationsänderung bei veränderlichem Strom . . . . .	47
4.2.4	Zusammenfassende Betrachtung der Variation eines Parameters . . . . .	53



4.3	Variation zweier Parameter bei veränderlichem Strom . . . . .	54
4.3.1	Niedrige Rezirkulation und hohe Stöchiometrie . . . . .	55
4.3.2	Hohe Rezirkulation und niedrige Stöchiometrie . . . . .	58
4.3.3	Hohe Rezirkulation und hohe Stöchiometrie . . . . .	60
4.3.4	Zusammenfassende Betrachtung der Auswirkung zweier Parameter . . . . .	63
4.4	Strominhomogenitäten innerhalb der Brennstoffzelle bei Variation von nur einem Parameter . . . . .	64
4.4.1	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Temperatur . . . . .	64
4.4.2	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Purgedauer . . . . .	66
4.4.3	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation des Purgeintervalls . . . . .	68
4.4.4	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Stöchiometrie . . . . .	69
4.4.5	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation der Rezirkulation . . . . .	71
4.4.6	Zusammenfassung der Variation eines Parameters . . . . .	73
4.5	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei Variation von zwei Parametern . . . . .	74
4.5.1	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei niedriger Rezirkulation und hoher Stöchiometrie . . . . .	74
4.5.2	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei hoher Rezirkulation und hoher Stöchiometrie . . . . .	75
4.5.3	Strominhomogenitätsverlauf durch den Brennstoffzellenstack bei hoher Rezirkulation und niedriger Stöchiometrie . . . . .	76
4.6	Beständigkeit der Strominhomogenität bei Bezug von konstantem Strom . . . . .	77
4.7	Strominhomogenitäten bei Verwendung der Brennstoffzelle als Antrieb im Elektroauto . . . . .	81
4.8	Zusammenfassung der Strominhomogenitätsmessungen . . . . .	85



<b>5</b>	<b>Veränderte Medienführung zur Reduzierung der Strominhomogenitäten</b>	<b>87</b>
5.1	Einführung . . . . .	87
5.2	Verlauf des Strommaximums zwischen Zelle 3/4 des Brennstoffzellenstacks	88
5.3	Verlauf des Strommaximums durch den Brennstoffzellenstack hindurch . .	90
5.4	Stromverteilungen im Brennstoffzellenstack bei maximalen Strömen . . .	93
5.5	Vergleich von Strom, Spannung und Leistung . . . . .	104
5.6	Standardabweichung . . . . .	108
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse zur veränderten Medienführung . . . .	113
<b>6</b>	<b>3D Modell mit den fundamentalen Alterungsmechanismen</b>	<b>115</b>
6.1	Reaktionsgleichungen . . . . .	115
6.2	Ruhepotential . . . . .	116
6.3	Nernstspannung . . . . .	118
6.4	Durchtrittsüberspannung und Doppelschichtkapazität . . . . .	119
6.5	Druckabnahme durch Reibung . . . . .	120
6.6	Stoffmengenverbrauch der Reaktionen . . . . .	122
6.7	Diffusionsüberspannung . . . . .	122
6.8	Mischpotential . . . . .	123
6.9	Ergebnisse des 3D Modells . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Modell auf Grundlage des Larminie-Dicks-Modells</b>	<b>127</b>
7.1	Larminie-Dicks-Formel . . . . .	127
7.2	Zuordnung der einzelnen Parameter zu Alterungsprozessen . . . . .	130
7.2.1	Elektrodendegradation . . . . .	130
7.2.2	Membrandegradation . . . . .	132
7.2.3	Degradation der Gasdiffusionsschicht . . . . .	133
7.2.4	Tabellarische Zusammenfassung der Degradationen . . . . .	134
7.3	Sensitivitätsanalyse der Parameter der Larminiefunktion . . . . .	139
<b>8</b>	<b>Lebensdauerprognose für Brennstoffzellen unter Verwendung des Larminiemodells</b>	<b>149</b>
8.1	Aufbereitung der Daten . . . . .	150



8.2	Bestimmung der Parameter der Polarisationskurven . . . . .	152
8.3	Zeitverläufe der einzelnen Parameter . . . . .	155
8.3.1	Ruhespannung $E_0$ . . . . .	157
8.3.2	Koeffizient der Aktivierungsüberspannung $A$ . . . . .	157
8.3.3	Flächenspezifischer Widerstand $r$ . . . . .	159
8.3.4	Austauschstromdichte $i_0$ . . . . .	159
8.3.5	Fuel Crossover und interne Ströme $i_n$ . . . . .	160
8.3.6	Koeffizient $m$ des Massentransport- und Konzentrationsterms . . .	160
8.3.7	Exponentialkoeffizient $n$ des Massentransport- und Konzentrations- terms . . . . .	161
8.4	Evaluation der ermittelten Parameterverläufe . . . . .	161
8.5	Prognose der Lebensdauer . . . . .	165
8.6	Prognose der Lebensdauer aus einem Leistungsprofil . . . . .	171
8.7	Parameterverläufe weiterer Brennstoffzellen . . . . .	172
8.8	Vergleich zu anderen Modellen . . . . .	182
8.8.1	Semi-empirisches Diagnosemodell . . . . .	183
8.8.2	Theoretisches Diagnosemodell . . . . .	184
8.8.3	Empirische Prognosemodelle . . . . .	186
8.8.4	Semi-empirische Prognosemodelle . . . . .	187
8.8.5	Theoretische Prognosemodelle . . . . .	192
8.9	Fazit . . . . .	199
<b>9</b>	<b>Übertragung des Modells auf Batterien</b>	<b>201</b>
9.1	Direkte Anwendung des Lebensdauerprognosemodells . . . . .	201
9.2	Anpassung der Batteriedaten zur Verwendung des Lebensdauerprognose- modells und zugehörige Ergebnisse . . . . .	204
9.3	Prognose der Lebensdauer für Batterien . . . . .	207
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>211</b>
10.1	Zusammenfassung . . . . .	211
10.2	Ausblick . . . . .	214
<b>11</b>	<b>Nomenklatur</b>	<b>215</b>



---

<b>12 Anhang</b>	<b>231</b>
12.1 Weitere Parameteruntersuchungen bei variablem Strom . . . . .	231
12.1.1 Änderung der Purgedauer bei veränderlichem Strom . . . . .	231
12.1.2 Änderung des Purgeintervalls bei veränderlichem Strom . . . . .	234
12.2 Reproduzierte Messungen zur veränderten Medienführung . . . . .	236
12.3 Programmoberfläche zum 3D Modell in Matlab Simulink . . . . .	239