

Auslegung und Energiemanagement von hybriden Brennstoffzellenfahrzeugen

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Martin Florian Johannaber

Berichter:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Henning Wallentowitz

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Detlef Stolten

Inhalt

1	Einleitung	9
2	Die Brennstoffzellentechnologie im Antriebsstrang	11
2.1	Funktionsweise der Brennstoffzelle	11
2.2	Das Brennstoffzellensystem	16
3	Der hybride Brennstoffzellenantriebsstrang	20
3.1	Energiebedarf für den Fahrzeugantrieb	21
3.2	Energiemanagement im hybriden Brennstoffzellenantriebsstrang	22
3.3	Dimensionierung von Brennstoffzellensystem und Batterie	28
4	Vorstellung des verwendeten Simulationsmodells	30
4.1	Simulationsansatz	30
4.2	Simulationssoftware	32
4.3	Verwendete Fahrzeugdaten	35
4.4	Elektromotor für den Fahrtrieb	36
4.5	Getriebeauslegung	38
4.6	Brennstoffzellenstack	40
4.7	Luftversorgung des Brennstoffzellenstacks	44
4.8	Batteriesystem	50
4.9	Spannungswandler	52
4.10	Fahrzeugnebenaggregate und Kühlsystem	54
4.11	Berücksichtigung des Batterieladegrads bei der Energieverbrauchsbestimmung	56

5	Einfluss der Hybridisierung und des Energiemanagements.....	58
5.1	Einfluss der Hybridisierung.....	58
5.2	Einfluss der Dimensionierung von Brennstoffzelle und Batterie	64
5.3	Varianten des Energiemanagements	68
5.3.1	Range Extender Betriebsweise.....	70
5.3.1.1	Einfluss der Methode der Verbrauchsermittlung bei der Range Extender Betriebsweise	75
5.4	Start/Stopp Betrieb	76
5.4.1	Begrenzung der minimalen Leistungsabgabe	80
5.4.2	Konstanter Betriebspunkt des Brennstoffzellensystems	84
5.4.3	Phlegmatisierung der Leistungsanforderung	87
5.4.4	Leistungsabhängige Batterieladestrategien	92
6	Einfluss weiterer Systemparameter auf den Verbrauch.....	98
6.1	Einfluss der Fahrzeugparameter	98
6.2	Einfluss des Brennstoffzellenstack-Betriebsdrucks	104
6.3	Einfluss der Wassereinspritzung in den Kompressor	108
6.3.1	Berechnung der Verdichtung mit Wassereinspritzung	109
6.3.2	Einfluss der Wassereinspritzung im Fahrzyklus.....	114
6.4	Einfluss des Stacks	117
6.5	Einfluss der Batterie	119
6.6	Einfluss der Spannungswandler	121
6.7	Einfluss des Elektromotors	124
6.8	Einfluss weiterer Energieverbraucher.....	126
6.9	Einfluss des Radschlupfes	127
6.10	Vergleich mit dem Simulationsprogramm Advisor	133

6.11	Vergleich mit Messungen des Wasserstoffverbrauchs an Fahrzeugen	136
7	Sensitivitätsanalyse und Optimierung der Systemdimensionierung.....	140
7.1	Sensitivitätsanalyse	140
7.2	Optimierung der Systemdimensionierung.....	146
8	Zusammenfassung	150
9	Formelzeichen und Indizes	154
10	Literatur.....	157
11	Anhang	161
11.1	Fahrzyklen.....	161
11.1.1	NEDC.....	161
11.1.2	FTP75	162
11.1.3	HyZEM.....	163
11.2	Verwendete Stoffdaten	163
11.3	Simulink Modelle	164
11.4	Getriebedaten aus Advisor	169
11.5	Weitere Stackdaten	169
11.6	Kompressordaten	170
11.7	Wirkungsgradmessungen eines Spannungswandlers.....	170
11.8	Einfluss der Entladetiefe auf die Batterielebensdauer	171
11.9	Lastprofile für den Elektromotor	171
11.10	Parameteränderungen um 5 %	173
11.11	Einfluss von Parameteränderungen auf den Verbrauch.....	175

11.12	Parametereinflüsse bei einem System mit 40 kW Nettoleistung des Brennstoffzellensystems	176
-------	---	-----