

# **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 Fahrantrieb .....	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
-------	---	-----