

**Vergleichende Gesamtkostenanalyse
von 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

Bruno Gnörich

Berichter:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Henning Wallentowitz
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Detlef Stolten

Inhalt

1	Einleitung	9
2	Wasserstoff als Treibstoff.....	15
2.1	Technologie.....	15
2.1.1	Herstellungsverfahren	16
2.1.2	Transport und Speicherung.....	44
2.1.3	Fahrzeugbetankung	48
2.1.4	Energiewandlung	51
2.1.5	Wasserstoff-Sicherheitssysteme	53
2.2	Bereitstellungskosten für Wasserstoff	54
2.3	Gesellschaftliche Aspekte	56
2.3.1	Akzeptanz von Wasserstoff.....	56
2.3.2	Politischer Wille.....	56
3	Wasserstoffbetriebene Kraftfahrzeuge.....	58
3.1	Antriebsstrangkomponenten	58
3.1.1	Wasserstoff-Verbrennungsmotor	58
3.1.2	Brennstoffzelle	60
3.1.3	Elektromaschine.....	66
3.1.4	Elektrischer Energiespeicher.....	69
3.1.5	Wasserstoff-Speicher	76
3.2	Einzel- und Hybridantriebe	79
3.2.1	Verbrennungsmotorische Fahrzeuge	80
3.2.2	Brennstoffzellenfahrzeuge ohne zusätzliche Energiespeicher	81
3.2.3	Hybrid-Brennstoffzellenfahrzeuge	82
3.2.4	Doppelhybrid-Brennstoffzellenfahrzeuge	84
3.3	Fahrzeugkosten.....	85
3.3.1	Herstellungskosten.....	85
3.3.2	Betriebskosten	86

4	Modellierung und Analyse von Hybrid-Brennstoffzellenfahrzeugen	90
4.1	Fahrzeug-Simulationsmodell	90
4.1.1	Brennstoffzellensystem	91
4.1.2	Elektromaschine und Spannungswandler	94
4.1.3	Lithium-Ion-Batterie	94
4.1.4	Doppelschichtkondensator	96
4.1.5	Momentenwandler	98
4.1.6	Energiemanagement	98
4.2	Sensitivitätsanalyse	101
4.2.1	Masse und Fahrleistungen	103
4.2.2	Energieverbrauch und Kosten	106
5	Vergleichende Gesamtkostenanalyse	121
5.1	Methodik der Kostenanalyse	121
5.1.1	Äquivalenz der Leistungsfähigkeit	121
5.1.2	Gesamtkosten der konventionell angetriebenen Fahrzeuge	124
5.1.3	Bestimmung der zulässigen Kosten für Wasserstoff	125
5.1.4	Grenzkostengerade der Gesamtkosten	127
5.2	Referenzfahrzeuge mit konventionellem Antrieb	128
5.3	Gesamtkostenvergleich in der Kompaktklasse	131
5.4	Gesamtkostenvergleich in der Mittelklasse	137
5.5	Gesamtkostenvergleich in der Oberklasse	140
5.6	Anwendung der Methodik auf Vergleiche von Linienbussen	143
5.7	Fazit der Gesamtkostenvergleiche	145
6	Zusammenfassung	147
7	Formelzeichen und Indizes	150
8	Literatur	154
9	Anhang: Kostenmodelle für die Wasserstoffproduktion	163
9.1	Erdgas-Dampfreformierung	164

9.2	Biomasse-Dampfreformierung.....	168
9.3	Stromproduktion und Elektrolyse.....	172
9.3.1	Elektrolyse.....	172
9.3.2	Kohlekraftwerke mit und ohne CCS	174
9.3.3	Onshore-Windkraft-Anlagen.....	178
9.3.4	Offshore-Windkraft-Anlagen.....	179
9.3.5	Photovoltaik-Anlagen auf Dächern und in Solarparks	180
10	Anhang: Antriebstrang- und Kostendaten der Brennstoffzellenfahrzeuge.....	182
10.1	Kompaktklasse-Fahrzeuge.....	182
10.1.1	Kompaktklasse-Fahrzeuge ohne Hybridantrieb	182
10.1.2	Kompaktklasse-Fahrzeuge mit Batterie	182
10.1.3	Kompaktklasse-Fahrzeuge mit Kondensator	183
10.1.4	Kompaktklasse-Fahrzeuge mit Batterie und Kondensator	184
10.2	Mittelklasse-Fahrzeuge	185
10.2.1	Mittelklasse-Fahrzeuge ohne Hybridantrieb.....	185
10.2.2	Mittelklasse-Fahrzeuge mit Batterie.....	185
10.2.3	Mittelklasse-Fahrzeuge mit Kondensator.....	186
10.2.4	Mittelklasse-Fahrzeuge mit Batterie und Kondensator.....	187
10.3	Oberklasse-Fahrzeuge.....	188
10.3.1	Oberklasse-Fahrzeuge ohne Hybridantrieb	188
10.3.2	Oberklasse-Fahrzeuge mit Batterie	188
10.3.3	Oberklasse-Fahrzeuge mit Kondensator	189
10.3.4	Oberklasse-Fahrzeuge mit Batterie und Kondensator	190