

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

## Niedrigstmissionskonzept für einen wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor

Marcel Christian Thomas Fouquet

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
2. Univ.-Prof. Dr. techn. Helmut Eichlseder,  
Technische Universität Graz / Österreich

Die Dissertation wurde am 07.11.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 15.03.2012 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

## Kurzfassung / Abstract

## Vorwort

Inhaltsverzeichnis .....	I
<b>0 Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Wasserstoff als Treibstoff von Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>3</b>
2.1 Kraftfahrzeuge.....	3
2.2 Brennverfahren bei Wasserstoff-Verbrennungsmotoren .....	5
2.2.1 Dichte des angesaugten Gemischs .....	5
2.2.2 Gemischbildung .....	5
2.2.3 Zündverfahren .....	6
2.2.4 Verbrennungsluftverhältnis .....	6
<b>3 Emissionsbildung von Wasserstoffmotoren .....</b>	<b>7</b>
3.1 Kohlenmonoxid .....	7
3.2 Kohlenwasserstoffe .....	8
3.3 Stickoxide .....	9
3.3.1 Stickstoffmonoxid.....	9
3.3.2 Stickstoffdioxid.....	10
3.4 Ammoniak .....	11
3.5 Reaktionskinetik und chemisches Ungleichgewicht .....	12
<b>4 Gesetzliche Rahmenbedingungen .....</b>	<b>14</b>
4.1 Abgasgesetzgebung in der Europäischen Union .....	14
4.2 Abgasgesetzgebung in Japan .....	15
4.3 Abgasgesetzgebung in den Vereinigten Staaten .....	17
4.4 Vergleich der Geschwindigkeitsprofile der Testzyklen .....	20
4.5 Lastpunkte des Hydrogen7 in den Fahrzyklen .....	20
4.5.1 Lastpunkte im NEFZ.....	21
4.5.2 Lastpunkte im FTP-75 und US Highway-Cycle.....	21
4.5.3 Lastpunkte im Japan 10-15 und Japan 11-Mode.....	22
<b>5 Ziele des Niedrigstmissionskonzepts .....</b>	<b>24</b>
5.1 Motor und Fahrzeug zur Umsetzung des Konzepts .....	24
5.2 Emissionsniveau des Hydrogen7 zu Projektbeginn .....	25
5.2.1 Unverbrannte Kohlenwasserstoffe.....	25
5.2.2 Kohlenmonoxid.....	26
5.2.3 Stickoxide .....	27
5.3 Vergleich der Kennfelder und Lastpunkte aus den Fahrzyklen .....	29
5.4 Herausforderungen an das Niedrigstmissionskonzept .....	29
<b>6 Ansätze zur Reduzierung von Schadstoffen im Abgas .....</b>	<b>31</b>
6.1 Innermotorische Maßnahmen .....	31
6.1.1 Verbrennungsluftverhältnis .....	32
6.1.2 Aufladung im überstöchiometrischen Motorbetrieb.....	33
6.1.3 Abgasrückführung.....	34
6.1.4 Miller-Cycle .....	35
6.1.5 Verdichtungsverhältnis .....	36
6.1.6 Zündung und Zündzeitpunkt .....	36
6.1.7 Gemischbildung .....	37
6.2 Abgasnachbehandlung für Ottomotoren im Wasserstoffbetrieb .....	37
6.2.1 Katalysator für den (unter-)stöchiometrischen Wasserstoffbetrieb .....	38

6.2.2	DeNOx-Katalysatoren .....	39
6.2.3	Selektive Katalytische Reduktion .....	41
6.2.3.1	Passive SCR-Katalysatoren .....	41
6.2.3.2	Aktive SCR-Katalysatoren .....	42
6.2.4	Weitere Konzepte zur NO <sub>x</sub> -Reduktion im Abgas .....	42
6.3	Technologieauswahl für das Niedrigstmissionskonzept .....	42
<b>7</b>	<b>Werkzeuge zur Simulation und Modellierung .....</b>	<b>44</b>
7.1	Thermodynamische Modellierung .....	44
7.1.1	Arbeitsprozeßrechnung .....	44
7.1.2	Druckverlaufsanalyse .....	46
7.2	Eindimensionale Ladungswechselrechnung .....	46
<b>8</b>	<b>NZEV auf Basis des E68 .....</b>	<b>48</b>
8.1	Optimierungsmaßnahmen am Abgasrollenprüfstand .....	48
8.2	Abgasemissionsniveau nach Optimierungsmaßnahmen .....	48
<b>9</b>	<b>Einzylinder-Prüfstand .....</b>	<b>51</b>
9.1	Motorenprüfstand und Meßtechnik .....	51
9.1.1	Aufbau des Motorenprüfstands .....	51
9.1.2	Hardwareanpassungen und -erweiterungen .....	52
9.1.2.1	Zylinderkopf .....	52
9.1.2.2	AGR-Turbine .....	52
9.1.2.3	Nockenwellen für das Miller-Verfahren .....	53
9.1.3	Einzylinder-Versuchsmotor .....	54
9.2	Motorsteuerung .....	55
9.3	Meßtechnik am Prüfstand .....	56
9.3.1	Abgasmeßtechnik .....	56
9.3.2	Temperaturmessung .....	56
9.3.3	Luftmengenmessung .....	56
9.3.4	Kraftstoffmessung .....	56
9.3.5	Verbrennungsluftverhältnis .....	57
9.3.6	Abgasrückführrate .....	57
9.3.7	Wirkungsgrad der Abgasturboaufladung .....	57
9.3.8	Indiziermeßtechnik .....	58
9.4	Meßdatenerfassung und Auswertung .....	58
9.5	Matlab-basiertes Auswertetool zur Druckverlaufsanalyse .....	59
<b>10</b>	<b>Meßergebnisse der Versuche am Einzylinder-Motor .....</b>	<b>63</b>
10.1	Meßreihenübersicht .....	64
10.2	Aufladung im überstöchiometrischen Bereich .....	65
10.3	Messungen mit Miller-Cycle .....	66
10.4	Abgasrückführung im überstöchiometrischen Bereich .....	69
10.4.1	Messungen bei n = 2000 U/min .....	70
10.4.2	Messungen bei n = 3000 U/min .....	78
10.4.3	Messungen bei n = 4000 U/min .....	79
10.5	Abgasrückführung während der Betriebsartumschaltung .....	80
10.6	Vergleich der Strategien zur Emissionsminderung .....	81
<b>11</b>	<b>Thermodynamische Analyse der Messungen .....</b>	<b>83</b>
11.1	Einfluß des Verbrennungsluftverhältnisses .....	83
11.2	Einfluß der AGR-Rate .....	85
11.3	Einfluß des Mitteldrucks .....	86
11.4	Einfluß der Drehzahl .....	87
11.5	Einfluß des Miller-Cycles .....	88
11.6	Zweizonige Arbeitsprozeßrechnung zur Vorausberechnung .....	89

<b>12</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse der Einzylinder-Versuche .....</b>	<b>91</b>
<b>13</b>	<b>Simulation des Konzepts mit einem Vollmotor-Modell .....</b>	<b>92</b>
<b>14</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>94</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>96</b>
A1	Formeln model based calibration .....	96
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>97</b>
<b>Formel- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>101</b>
<b>Lebenslauf von Marcel Fouquet</b>	<b>.....</b>	<b>105</b>