

Berichte aus dem Maschinenbau

Matthias Helmich

**Thermodynamische Untersuchung des Einflusses
der Wassereinspritzung auf die Effizienz
des ottomotorischen Arbeitsprozesses**

Shaker Verlag
Düren 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Wassereinspritzung im Wandel der Zeit	5
1.2	Motivation und Zielsetzung	7
2	Grundlagen der Wassereinspritzung	9
2.1	Grenzen des $\lambda = 1$ -Konzepts	9
2.2	Wege zum $\lambda = 1$ -Konzept	11
2.2.1	Miller-Brennverfahren	11
2.2.2	Vorkammerzündkerze	12
2.2.3	Variable Verdichtung	14
2.2.4	Gekühlte externe Abgasrückführung	14
2.2.5	Wassereinspritzung	15
2.3	Einteilung Wassereinspritzungskonzepte	17
2.4	Einfluss einer sprunghaften Momentenanforderung	18
2.5	Tropfenzerfall und Tropfenverdunstung	20
2.6	Thermischer und chemischer Einfluss von Wasser	22
2.7	Stoffeigenschaften von Luft, Wasserdampf, Kraftstoffdampf und Rauchgas	25
2.8	Eigenschaften von Wasser-Kraftstoff-Emulsionen	28
2.8.1	Thermodynamik der Emulsion	29
2.8.2	Instabilitätserscheinungen	29
2.8.3	Tenside	31
3	Verdunstungskammer	33
3.1	Aufbau und Funktionsweise	34
3.1.1	Druckkammer und Konditionierung	36
3.1.2	Druckerzeuger	39
3.1.3	Injektoren	42
3.2	Verdunstungsmodul	44
3.2.1	Gasphase	46
3.2.2	Tropfeninneres	49

3.2.3	Wärme- und Stofftransport an der Tropfenoberfläche	53
3.2.4	Spraymodellierung und -initialisierung	59
3.3	Modell-Anwendung DWI-S und DWI-E	61
3.4	Ergebnisse des Verdunstungsmoduls	65
3.4.1	Reproduzierbarkeit der Verdunstungsmessungen	66
3.4.2	Port Water Injection - PWI	67
3.4.3	Direct Water Injection-Separate - DWI-S	79
3.4.4	Direct Water Injection-Emulsion - DWI-E	81
3.4.5	Vergleich der WI-Konzepte	84
4	Einsatz der Wassereinspritzung am Mehrzylinder-Motor	87
4.1	Prüfstand	87
4.2	WI-Konzepte	88
4.3	Klopfgrenze	89
4.4	Messergebnisse	91
4.4.1	Port Water Injection	92
4.4.2	Direct Water Injection-Emulsion und der Vergleich zu PWI	113
4.4.3	Theoretisches Potential der Wassereinspritzung	114
4.4.4	Effizienz der Wassereinspritzung	120
5	Thermodynamische Analyse der Wassereinspritzung	129
5.1	Thermodynamische Beschreibung	129
5.2	Aufbau des WI-Modells	130
5.2.1	Spray	132
5.2.2	Tropfenverdunstung	133
5.2.3	Wandfilm-Zerstäubung	136
5.2.4	Tropfen-Wand-Interaktion	138
5.2.5	Blowby	140
5.3	Ergebnisse des Modells	144
5.3.1	Sensitivitätsanalyse	144
5.3.2	Einfluss der Wassereinspritzung auf den Druck- und Temperaturverlauf	146
5.3.3	Verlustteilung	149
6	Fazit und Ausblick	155
	Literaturverzeichnis	162
A	Anhang	171
A.1	Verdunstungskammer	171
A.2	Mischungsregeln	174
A.3	Diffusionskoeffizient	174
A.4	Laminare Flammgeschwindigkeit	175
A.5	Wassereinspritzung für den Saab 900 turbo S. und Saab 99	177
A.6	Vibe Ersatzbrennverlauf	177
A.7	Sekundäre Zerstäubung und Wand-Tropfen-Interaktion	178

A.8 Zündwinkelschleife	179
A.9 Wandwärmestrom	179