

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Nomenklatur	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Kraftstoffzerstäubung	7
2.1.1 Strahlzerfall	7
2.1.1.1 Primärzerfall	7
2.1.1.2 Sekundärzerfall	11
2.1.2 Kraftstoffeinspritzsysteme für Ottomotoren	11
2.1.2.1 Hochdruckpumpe (HDP)	11
2.1.2.2 Kraftstoffspeicher (Rail)	12
2.1.2.3 Einspritzventile	13
2.2 Ottomotorische Verbrennung	13
2.3 Wassereinspritzung	15
2.3.1 Thermodynamisches Wirkprinzip	16
2.3.2 Einspritzkonzepte	18
2.3.2.1 Einspritzung in die Ansaugstrecke	18
2.3.2.2 Zylinderselektive Saugrohreinspritzung	19
2.3.2.3 Direkte Wassereinspritzung	20
2.3.2.4 Einspritzung langzeitstabiler Emulsionen	21
2.3.2.5 Einspritzung kurzzeitstabiler Emulsionen	22

2.3.3	Einfluss auf die Emissionen	23
2.3.3.1	Stickoxide	23
2.3.3.2	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe	24
2.3.3.3	Kohlenmonoxid	25
2.3.3.4	Partikel	25
2.4	Emulsionen	26
2.4.1	Grenzflächeneigenschaften	27
2.4.2	Rheologie	28
2.4.3	Emulsionsstabilität	31
2.4.3.1	Sedimentation und Aufrahmen	32
2.4.3.2	Aggregation	32
2.4.3.3	Ostwald-Reifung	33
2.4.3.4	Koaleszenz	33
2.4.4	Tropfenzerkleinerung beim Emulgierprozess	35
2.4.4.1	Tropfenzerkleinerung in laminarer Strömung	35
2.4.4.2	Tropfenzerkleinerung in turbulenter Strömung	36
2.4.5	Wasser-in-Benzin-Emulsionen	38
3	Ausgeführte Konzepte der direkten Benzin-Wasser-Einspritzung	41
3.1	Single-HPP-System	41
3.2	On-Injector-System	43
4	Emulsionsqualität im Einspritzsystem	47
4.1	Größenverteilungen	47
4.2	Experimentelle Methodik	49
4.2.1	Shadow-Imaging-System	52
4.2.2	Emulsion-Durchflusszelle	55
4.2.3	Funktionsprüfstand	57
4.2.4	Versuchsdurchführung	59
4.3	Ergebnisse und Diskussion	61
4.3.1	Einfluss der Betriebsparameter auf die Tropfengröße	62
4.3.1.1	Wasser-Kraftstoff-Verhältnis	62
4.3.1.2	Massenstrom	64
4.3.1.3	Pumpendrehzahl	65
4.3.1.4	Raildruck	67
4.3.2	Einfluss der Strömung in der Einspritzleitung	69
4.3.3	Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung	72
4.3.4	Eigenheiten des Single-HPP-Systems	73
4.3.4.1	Entwicklung der Tropfengröße	73
4.3.4.2	Tropfenzerkleinerung in der Hochdruckpumpe	76
4.3.5	Tropfenzerkleinerung in der On-Injector-Mischkammer	77

4.3.6	Approximation der Tropfengrößenverteilungen mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen	80
4.3.6.1	Grundlegende Eignung der Funktionen	83
4.3.6.2	WKV-Einfluss	88
4.3.6.3	Raildruck-Einfluss	93
4.3.6.4	Abschließende Bewertung	98
4.3.7	Emulsionsstabilität	98
4.3.7.1	Entmischung	98
4.3.7.2	Redispersgierung	105
4.4	Vergleich mit direkten numerischen Simulationen	110
4.4.1	Aufbau der Simulation	110
4.4.2	Vergleichsbasis Simulation-Experiment	112
4.4.3	Vergleichsergebnisse	114
4.4.3.1	Qualitativer Bildvergleich	114
4.4.3.2	Vergleich der Größenverteilungen	115
5	Sprayuntersuchungen	119
5.1	Experimentelle Methodik	119
5.1.1	Spraykammer	121
5.1.2	Messaufbau	124
5.1.3	Versuchsdurchführung	126
5.2	Ergebnisse und Diskussion	128
5.2.1	Einfluss des Einspritzdrucks	128
5.2.2	Einfluss des Wasser-Kraftstoff-Verhältnisses	134
5.2.3	Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung	146
5.2.4	Einfluss der Emulsionsqualität	148
5.2.5	Radiale Entwicklung der Tropfengröße	150
5.2.6	Axiale Entwicklung der Tropfengröße	158
5.2.7	Approximation der Tropfengrößenverteilungen mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen	162
5.2.7.1	Eignung verschiedener Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen	162
5.2.7.2	Einfluss der Emulsionszusammensetzung	168
5.2.7.3	Einfluss des Einspritzdrucks	171
5.2.8	Eignung empirischer Modelle zur Vorhersage der Spraytropfengröße	174
5.2.8.1	Sauterdurchmesser von Ottokraftstoff und Wasser . . .	176
5.2.8.2	Sauterdurchmesser des Emulsionssprays	177
6	Versuche am Vollmotor	179
6.1	Experimentelle Methodik	179
6.1.1	Adaption der Einspritzkonzepte an den Versuchsmotor	180

6.1.1.1	On-Injector-System	180
6.1.1.2	Single-HPP-System	182
6.1.2	Motorprüfstand	182
6.1.3	Emissionsmesstechnik	184
6.1.3.1	Abgasmessanlage (AMA)	184
6.1.3.2	Particle Counter	185
6.1.4	Versuchsdurchführung	186
6.2	Ergebnisse und Diskussion	187
6.2.1	Volllast-Betrieb	187
6.2.1.1	On-Injector-System	188
6.2.1.2	Single-HPP-System	195
6.2.2	Teillast-Betrieb ($\lambda = 1$)	201
6.2.2.1	On-Injector-System	201
6.2.2.2	Single-HPP-System	207
6.2.3	Reaktionsdauer der Systeme	207
7	Zusammenfassung und Ausblick	209
	Literatur	217
Anhang A	Emulsionsuntersuchungen	233
A.1	Messunsicherheiten Funktionsprüfstand	233
A.2	Einstell- und Filterwerte ParticleMaster	233
A.3	Wiederholbarkeit Tropfengrößenmessungen	234
A.3.1	Single-HPP-System	234
A.3.2	On-Injector-System	235
A.4	Zusätzliche Messergebnisse	236
A.4.1	Massenstromeinfluss Single-HPP-System Messort 1	236
A.4.2	WKV-Einfluss Single-HPP-System Messort 1	237
A.4.3	Quantitative Bewertung der Approximation mit WDF bei unterschiedlichen WKV und Raildrücken	237
Anhang B	Sprayuntersuchungen	239
B.1	Einstell- und Filterwerte ParticleMaster	239
B.2	Wiederholbarkeit	240
B.3	Einspritzung der Emulsion in Benzin	243
B.4	Zusätzliche Messergebnisse	244
B.4.1	Quantitative Bewertung der WDF-Approximation bei unterschiedlichen WKV und Raildrücken	244

Anhang C Motorversuche	247
C.1 Messabweichungen	247
C.2 Wiederholbarkeit	248
C.3 Berechnete Größen Ergebnisdarstellung	249
C.4 Berechnung Kraftstoffeinsparpotenzial	250