Charakterisierung der Tropfen-Wand-Interaktion im Parameterbereich von Ottomotoren mit Direkteinspritzung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Boyke Richter
aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Oktober 2006
Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Sigmar Wittig
Korreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen III

Tabellen VII

Symbole VIII

1 Einleitung 1

2 Kenntnisstand und Zielsetzung 3

2.1 Grundlagen der physikalischen Prozesse der Tropfenbildung 5

2.1.1 Zerfall eines Strahls 5

2.1.2 Zerfall einer Lamelle 8

2.2 Aufprall von einzelnen Tropfen 10

2.2.1 Trockene Wand 11

2.2.2 Benetzte Wand 19

2.2.3 Heiße Wand 28

2.2.4 Weitergehende Phänomene des Tropfenaufpralls 35

2.3 Aufprall von Sprays 36

2.4 Grenzen der bisherigen experimentellen Analyse des Tropfenaufpralls 38

2.5 Numerische Simulation der Tropfen-Wand-Interaktion 40

2.5.1 Rechnungen mit einzelnen Tropfen 40

2.5.2 Modellierung des Sprayaufpralls 43

2.6 Zielsetzung der Arbeit 45

3 Versuchsaufbau und Messtechnik 47

3.1 Tropfenerzeugung 47

3.1.1 Tropfengenerator für Einzeltropfen 48

3.1.2 Beschleunigungsvorrichtung für Einzeltropfen 49

3.1.3 Selektionseinheit zur Kontrolle der Einzeltropfen 50

3.1.4 Erzeugung von Tropfenketten und monodispersen Sprays 52

3.2 Wandelement 53

3.3 Messtechnik 55

3.3.1 Bildaufnahmesysteme 58
3.3.2 Objektiv 61
3.3.3 Beleuchtung 63
3.3.4 Bildauswertung 65

4 Experimente zum Tropfenaufprall **69**
4.1 Wandaufprall eines realen DI-Sprays 69
4.2 Wandaufprall von einzelnen Tropfen 74
4.2.1 Dynamisches Verhalten 74
4.2.2 Thermisches Verhalten 79
4.3 Zeitliche Interaktion von Aufprallereignissen 88
4.3.1 Auswirkung auf die Regimeeinteilung 89
4.3.2 Eigenschaften der Sekundärtropfen 93
4.4 Räumliche und zeitliche Interaktion von Aufprallereignissen 99
4.5 Zusammenfassende Betrachtung der experimentellen Ergebnisse 107

5 Zusammenfassung **109**

Literatur **111**

A Anhang **129**
A.1 Stoffwerte der verwendeten Flüssigkeiten 129
A.2 Randbedingungen der durchgeführten Experimente 130

Abbildungsverzeichnis

1.1 Gemischbildung bei Direkt- und Saugrohreinspritzung (Rottenkolber, 2001) . . 2

2.1 Sprayaufprall auf die Kolbenoberfläche im Verbrennungsmotor 3
2.2 Skizzen möglicher zeitlicher Abläufe des Tropfenaufpralls auf eine feste Wand 4
2.3 Schematische Darstellung der Mechanismen der Tropfenbildung (Walzel, 1990) 7
2.4 Schematische Darstellung der allgemeinen Zerfallsarten einer Lamelle (Fraser et al., 1962) 8
2.5 Bildung und Zerfall von Jets beim Tropfenaufprall (Edgerton und Killian, 1979) 9
2.6 Verschiedene Zustände der Oberfläche beim Aufprall von Tropfen auf feste Wände 11
2.7 Unterteilung der Tropfenausbreitung in verschiedene Phasen - die verschiedenen Linien repräsentieren mögliche Verläufe (Kim und Chun, 2001, Rioboo et al., 2002) 12
2.8 Definition des Kontaktwinkels in der Ausbreitungs- und Rückzugsphase 13
2.9 Kronenbildung bei der Destruktion (Edgerton und Killian, 1979) 15
2.10 Schwellenwert zwischen Deposition und Destruktion abhängig von der Wandrauigkeit (Cossali et al., 1997) 18
2.11 Numerische Berechnung der Kronenbildung beim Aufprall auf einen dünnen Film, $\delta = 0{,}116$ (Rieber und Frohn, 1999) 20
2.12 Qualitative Skizze verschiedener Aufprallereignisse auf tiefe Flüssigkeiten (Rein, 2002b) 26
2.13 Abgrenzung der Aufprallereignisse auf tiefe Flüssigkeiten (Liow, 2001) 27
2.14 Wärmestrom von einer Wand in einen Film und Verdampfungszeit von Tropfen, jeweils abhängig von der Überhitzung (Bernardin, 1996) 29
2.15 Ablauf des Aufprallvorgangs für verschiedene Wandtemperaturen (Bernardin et al., 1997b) 30
2.16 Einteilung der Aufprallereignisse von Tropfen auf heiße Wände (Chaves et al., 2000) 33
2.17 Einteilung der Aufprallereignisse von Tropfen auf heiße Wände (Rein, 2002a) . 34
2.18 Numerische Berechnung der Ausbreitungsphase im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen (Pasandideh-Fard et al., 1996) 42

3.1 Schematische Darstellung der angestrebten Experimente 47
3.2 Aufbau eines piezoelektrischen Einzeltropfengenerators 48

3.3 Konstruktion der aerodynamischen Tropfenbeschleunigung 49
3.4 Kernelemente des Versuchsaufbaus und ihre Funktionsweise 50
3.5 Vollständiger Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einzeltropfenaufpralls . . 51
3.6 Schematische Darstellung des Tropfenkettengenerators 52
3.7 Skizze der Mehrlochblende zur Erzeugung eines monodispersen Sprays 53
3.8 Beschaffenheit der Kolbenoberfläche 54
3.9 Aufbau und variable Einsetzbarkeit des Wandelements (vgl. Abb. 3.4) 55
3.10 Entstehung von fokussierten und defokussierten Bildern eines sphärischen Partikels bei optischer Abbildung (Damaschke et al., 2002) 57
3.11 Funktionsprinzip der *Global Phase Doppler* Messtechnik (Damaschke et al., 2002) 58
3.12 Funktionsprinzip der *Shadowgraphy* (LaVision, 2003) 58
3.13 Die Hochgeschwindigkeitskamera *HSFC-Pro* 61
3.14 Strahlengang des Fernfeldmikroskops *QM100* von *Questar* 62
3.15 Aufbau der *HSFC-Pro* Kamera mit dem Fernfeldmikroskop 62
3.16 Verwendung eines Lasers als Hintergrundbeleuchtung mit Hilfe einer fluoreszierenden Flüssigkeit 65
3.17 Ablauf bei der Auswertung von Schattenbildern mit Hilfe des *SizingMaster* . . 66
3.18 Identifikation von Partikeln in der Intensitätsfunktion 67
3.19 Vermessung der gefundenen Partikel bezüglich Form und Größe 67
3.20 Identifikation von unscharfen Partikelbildern anhand der Intensitätsfunktion . . 67

4.1 Vergleich der Anzahl- und Massenhäufigkeit in einem DI-Spray (Nauwerck et al., 2005) 70
4.2 Vergleich der Spraybildung bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, jeweils als Absolutdruck und -temperatur angegeben ($\approx 250\,\mu$s nach Aufprall, Ausschnitt $32 \times 21\,\text{mm}^2$) 71
4.3 Visualisierung der globalen Ausbreitung eines realen DI-Sprays (Benzin, $p_{DK} = 8\,\text{bar}$, $T_{DK} = 20\,^\circ\text{C}$, $v_{tip} \approx 20\,\text{m/s}$, Ausschnitt $35 \times 26\,\text{mm}^2$) . . . 71
4.4 Aufprall einzelner Tropfen des Sprays an der Sprayspitze (Benzin, $v_{PT} \approx 20\,\text{m/s}$, Ausschnitt $2{,}3 \times 1{,}9\,\text{mm}^2$) 72
4.5 Überlagerung der einzelnen Aufprallereignisse durch das extrem dichte Spray (Benzin, $v_{PT} \approx 28\,\text{m/s}$, Ausschnitt $1{,}7 \times 1{,}35\,\text{mm}^2$) 73
4.6 Visualisierung des Ausbreitungsverhaltens eines kleinen Isooktantropfens ($d_{PT} = 67\,\mu$m, $v_{PT} = 15{,}4\,\text{m/s}$, Ausschnitt $290 \times 230\,\mu\text{m}^2$) 75
4.7 Ausbreitungsverhalten bei unterschiedlichen Primärtropfengeschwindigkeiten . 76

4.8 Ausbreitungsverhalten abhängig von der *We*-Zahl (geschlossene Symbole) und Vergleich mit Daten von millimetergroßen Tropfen (offene Symbole (Rioboo et al., 2002)) 78

4.9 Auftreten von prompter Destruktion (Isooktan, $d_{PT} = 50\,\mu$m, $v_{PT} = 34\,$m/s, $We = 2188$, Ausschnitt $432 \times 346\,\mu$m^2) . 78

4.10 Einfluss der Wandtemperatur (Isooktan, $d_{PT} = 80\,\mu$m, $v_{PT} = 7{,}8\,$m/s, Ausschnitt $750 \times 600\,\mu$m^2) 80

4.11 Blasensieden (links) und Filmsieden (rechts) von millimetergroßen Tropfen (Cossali et al., 2002b) (Destilliertes Wasser, $d_{PT} = 2100\,\mu$m, $v_{PT} = 3{,}13\,$m/s, $t_{nA} = 7400\,\mu$s, Ausschnitt $\approx 27800 \times 9900\,\mu$m^2) 81

4.12 Einfluss der Aufprallgeschwindigkeit (Isooktan, $d_{PT} = 80\,\mu$m, $T^* = 1{,}17$, Ausschnitt $750 \times 600\,\mu$m^2) 82

4.13 Aufprall von Tropfen mit $d_{PT} = 50\,\mu$m (Isooktan, $v_{PT} = 7{,}5\,$m/s, Ausschnitt $375 \times 300\,\mu$m^2) 82

4.14 Einfluss der Primärtropfen auf den Vorgang der Thermischen Reflexion (Isooktan, $T^* = 1{,}31$, Ausschnitt $375 \times 323\,\mu$m^2) 84

4.15 Einfluss der Wandtemperatur bei Ethanoltropfen ($d_{PT} = 80\,\mu$m, $v_{PT} = 4{,}2\,$m/s, Ausschnitt $750 \times 600\,\mu$m^2) 85

4.16 Thermische Reflexion bei Ethanoltropfen ($d_{PT} = 54\,\mu$m, $v_{PT} = 3{,}9\,$m/s, Ausschnitt $375 \times 300\,\mu$m^2) 87

4.17 Variation von Wandtemperatur und Primärtropfengeschwindigkeit – Einfluss auf Regime sowie Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen (Isooktan) 90

4.18 Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen in Abhängigkeit der Aufprallfrequenz 92

4.19 Tropfengrößenspektrum 93

4.20 Überblick über Aufprallereignisse bei $T^* = 1{,}31$ 95

4.21 Variation der *We*-Zahl bei konstanter Aufprallfrequenz (Isooktan, $f_{PTK} = 25\,$kHz, $T^* = 1{,}31$) 96

4.22 Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen in Abhängigkeit der *We*-Zahl 97

4.23 Variation der Aufprallfrequenz (Isooktan, $We \approx 250$, $T^* = 1{,}31$) 97

4.24 *We*-Zahl der Sekundärtropfen 98

4.25 Interaktion der Lamellen beim Aufprall (Isooktan, $d_{PT} = 73\,\mu$m, $v_{PT} = 23{,}4\,$m/s, $\Delta s_{PT} = 108\,\mu$m, Ausschnitt $578 \times 462\,\mu$m^2) 99

4.26 Einfluss der Wandtemperatur (Isooktan, $\Delta s_{PTK} = 300\,\mu$m, $d_{PT} = 91\,\mu$m, $v_{PT} = 8\,$m/s, $f_{PTK} = 12\,$kHz) 100

4.27 Aufprall einer einzelnen und mehrerer Tropfenketten bei $T^* = 1{,}17$ (Isooktan, $\Delta s_{PTK} = 300\,\mu$m, $d_{PT} = 91\,\mu$m, $v_{PT} = 8\,$m/s, $f_{PTK} = 12\,$kHz) 101

4.28 Aufprall einer einzelnen Tropfenkette (Isooktan, $d_{PT} = 72\,\mu$m, $v_{PT} = 7{,}8\,$m/s, $f_{PTK} = 25\,$kHz) 102

4.29 Aufprall von drei Tropfenketten mit einem Abstand von $\Delta s_{PTK} = 300\,\mu$m (Isooktan, $d_{PT} = 72\,\mu$m, $v_{PT} = 7{,}8\,$m/s, $f_{PTK} = 25\,$kHz) 103

4.30 Aufprall von drei Tropfenketten mit einem Abstand von $\Delta s_{PTK} = 200\,\mu$m (Isooktan, $d_{PT} = 72\,\mu$m, $v_{PT} = 7{,}8\,$m/s, $f_{PTK} = 25\,$kHz) 104

4.31 Aufprall von drei Tropfenketten mit einem Abstand von $\Delta s_{PTK} = 150\,\mu$m (Isooktan, $d_{PT} = 72\,\mu$m, $v_{PT} = 7{,}8\,$m/s, $f_{PTK} = 25\,$kHz) 105

4.32 Quantitativer Vergleich von Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen . 105

4.33 Tropfengrößenverteilungen bei einer Wandtemperatur von $T^* = 1{,}24$ 106

4.34 Randbedingungen der durchgeführten Experimente im Vergleich zu den realen Bedingungen des DI-Ottomotors 108

Tabellenverzeichnis

2.1 Überblick über Grenzliniengleichungen für trockene Wände 18
2.2 Überblick über Grenzliniengleichungen für benetzte Wände (bei $\delta = 0{,}1$) . . . 24

A.1 Stoffeigenschaften der eingesetzten Flüssigkeiten im Vergleich zu Wasser und Superbenzin 129
A.2 Thermische Eigenschaften der eingesetzten Flüssigkeiten 129
A.3 Randbedingungen für die Untersuchungen mit Einzeltropfen 130
A.4 Randbedingungen für die Untersuchungen mit Tropfenketten 130
A.5 Randbedingungen für die Untersuchungen zur räumlichen Interaktion 131