

## UNTERSUCHUNG DER EIGENSCHAFTEN VON SEKUNDÄR- TROPFEN BEIM TROPFENAUFPRALL AUF HEIßE WÄNDE

**B. Richter, K. Dullenkopf und H.-J. Bauer**

Lehrstuhl und Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS)  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

### **Abstract**

Der Aufprall von Tropfen auf heiße Wände ist neben einer Vielzahl von technischen Anwendungsfällen auch für die Gemischbildung in modernen direkteinspritzenden Ottomotoren von großer Bedeutung. Insbesondere in den Bereichen des Motors, in denen der Einspritzstrahl mit einer Wand kollidiert, trifft eine große Zahl an schnellen, kleinen Tropfen, deren Durchmesser (SMD) typischerweise unter 20 µm beträgt, auf heiße Oberflächen auf. Obwohl diese Vorgänge bereits seit langem untersucht werden, sind die physikalischen Ursachen der auftretenden, komplexen Phänomene noch immer nicht komplett verstanden, was insbesondere an den großen Schwierigkeiten einer detaillierten, experimentellen Erfassung liegt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich speziell mit der zeitlichen Interaktion von Tropfenaufprallvorgängen unter möglichst realitätsnahen Bedingungen, wie sie für direkteinspritzende Ottomotoren typisch sind. Mit Hilfe einer bildbasierten Auswertung werden die Größen und Geschwindigkeiten der entstehenden Sekundärtropfen analysiert. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Einfluss der Wandtemperatur und dem zeitlichen Abstand aufeinander folgender Aufprallereignisse. Dadurch sollen die Kenntnisse der Interaktionsvorgänge beim Tropfenaufprall vertieft werden, die für die Vorhersage vom Aufprall von realen Sprays essentiell wichtig sind. Es hat sich in den letzten Jahren gezeigt, dass eine reine Überlagerung der Aufprallereignisse von Einzeltropfen zur Charakterisierung des Spray-Aufpralls nicht zielführend ist (siehe Tropea et al. 2000).

### **Einleitung**

Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der direkteinspritzenden Ottomotoren weisen ein erhebliches Potential zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und somit der CO<sub>2</sub> Emissionen auf. Auf der anderen Seite ist es bislang noch nicht gelungen, hierbei auftretende erhöhte Emissionen von unverbranntem Kraftstoff zu vermeiden. Sie treten hauptsächlich aufgrund einer schlechten Homogenisierung des Gemisches mit lokal sehr fetten Bereichen und verstärkter Anlagerung von flüssigem Kraftstoff an den Brennraumwänden auf. Diese wiederum sind auf Wechselwirkungen der Kraftstofftropfen im Einspritzstrahl mit den Brennraumwänden zurückzuführen. Um die Schadstoffbildung beim DI-Ottomotor zu begrenzen ist eine genaue Kenntnis der auftretenden Phänomene erforderlich, sowie der Einsatz fortschrittlicher numerischer Werkzeuge.

In den letzten Jahren sind diverse Untersuchungen zum Wandaufprall von Einzeltropfen veröffentlicht worden. Rioboo et al. 2001 haben den Einfluss der Wandrauigkeit und der Benetzung des flüssig/fest/gas Systems auf den Tropfenaufprall untersucht. Die einzelnen Tropfen mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern wurden mit Hilfe einer Spritze und verschiedener Präzisionsnadeln erzeugt. Die Geschwindigkeit der Primärtropfen beim Aufprall wurde durch unterschiedliche Fallhöhen variiert und das Ergebnis des Aufpralls wurde mit

Hilfe einer CCD-Kamera erfasst. Die Analyse von Einzelbildern erlaubte eine Einteilung in Regimes und eine Erfassung sehr kleiner Sekundärtropfen, während mehrfachbelichtete Bilder einen Überblick über den Gesamtprozess lieferten. Auf diese Weise wurden sechs mögliche Regimes identifiziert und in Deposition, Reflexion und partielle Reflexion, sowie verschiedene Formen des Splash eingeteilt. Die Auswirkung und die Empfindlichkeit des Vorgangs auf eine Änderung verschiedener Parameter der Primärtropfen, sowie der Umgebungsbedingungen wurden vorgestellt.

Um die Wechselwirkung aufeinander folgender Aufprallereignisse zu untersuchen, setzten Yarin et al. 1995 einen Tropfenkettengenerator ein und visualisierten den Aufprallprozess mit Hilfe einer Kamera und eines computergestützten Bildverarbeitungssystems. Durch die Verwendung verschiedener Blenden konnte der Primärtropfendurchmesser zwischen 70 und 340  $\mu\text{m}$  variiert werden. Die Geschwindigkeit der Tropfen war vom Flüssigkeitsvordruck abhängig und konnte bis zu 30 m/s betragen. Anhand der durchgeführten Experimente formulierten die Autoren eine Grenzlinie zwischen Deposition und Splashing, die abhängig von Aufprallfrequenz und -geschwindigkeit aber unabhängig von der Primärtropfengröße ist. Weiterhin haben sie ein Modell entwickelt, das die Kronenbildung als Diskontinuität in der Geschwindigkeits- und Filmdickenverteilung beschreibt.

Für den Aufprall von Tropfen auf einen Film haben Cossali et al. 1997 eine Grenzlinie entwickelt, oberhalb derer Sekundärtropfen auftreten (Splash). In diesem Fall ist der Splash durch die Bildung einer Krone mit der Ausbildung von Jets, die in Sekundärtropfen zerfallen, charakterisiert. Die Autoren identifizierten und beschrieben wechselseitige Abhängigkeiten zwischen der Anzahl der Jets und der Anzahl an gebildeten Sekundärtropfen. Samenfink et al. 1998 analysierten die Eigenschaften der Sekundärtropfen, die beim Tropfenaufprall auf einen schubspannungsgetriebenen Wandfilm entstehen. Von diesen Untersuchungen leiteten sie Korrelationen zur Berechnung des Sekundärtropfenverhaltens ab.

Bezüglich des Tropfenaufpralls auf heiße Wände befassen sich die meisten Veröffentlichungen mit der Untersuchung der „Leidenfrosttemperatur“. Bernardin et al. 1996 analysierte beispielsweise detailliert die Prozesse beim Tropfenaufprall nahe der Leidenfrosttemperatur. Oberhalb der Leidenfrosttemperatur berühren auftreffende Tropfen die Oberfläche nicht mehr sondern es bildet sich ein stabiles Dampfpolster zwischen Flüssigkeit und Wand aus. Bernardin stellte das Auftreten der Reflexion als charakteristisches Resultat für einen Tropfenaufprall oberhalb der Leidenfrosttemperatur fest.

Einige Autoren haben Korrelationen veröffentlicht, mit Hilfe derer das Ergebnis eines Tropfenaufpralls auf eine feste Wand vorhergesagt werden soll (z.B. Mundo 1996, Samenfink 1997, Weiss 1993). Nahezu alle wurden mit Hilfe von großen Tropfen aus Gemischen entwickelt um die Kraftstoffeigenschaften zu simulieren. Im Parameterbereich des DI Ottomotors zeigt ein Vergleich der Resultate der verschiedenen Korrelationen erhebliche Unterschiede. Daraus muss gefolgert werden, dass immer noch nicht alle Einflussparameter korrekt identifiziert und genügend berücksichtigt sind. Aus diesem Grund sind Experimente unter realitätsnahen Bedingungen weiterhin unbedingt notwendig.

Neben der Feststellung, dass noch keine umfassende Korrelation gefunden wurde, die alle Einflussgrößen berücksichtigt und auch unter den Bedingungen eines DI Ottomotors einsetzbar ist, zeigen u.a. auch Untersuchungen am Institut für Thermische Strömungsmaschinen, dass eine Vorhersage der Spray Wand Interaktion aus einer Überlagerung von vielen Einzeltropfenaufprallereignissen zu beträchtlichen Fehlern führt (siehe auch Tropea et al. 2000). Aus diesem Grund ist eine detaillierte, experimentelle Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Interaktion mehrerer Aufprallereignisse notwendig. Hierbei bedeutet eine zeitliche Interaktion, dass Tropfen zeitlich kurz nacheinander auf dieselbe Stelle an der

Wand treffen, bevor das Ereignis des ersten Tropfens beendet ist (Yarin et al. 1995). Eine räumliche Interaktion tritt auf, wenn die Flüssigkeitslamellen von benachbarten Aufprallereignissen in der Ausbreitungsphase aufeinander treffen (Barnes et al. 1999).

Gegenwärtig werden am ITS Sekundärtropfeneigenschaften unter realitätsnahen Bedingungen eines DI Ottomotors mit Hilfe speziell adaptierter Messtechnik untersucht. Hierbei sollen Untersuchungen zur Interaktion von Aufprallereignissen Einzeltropfenexperimente ergänzen und vervollständigen, um im Gesamtergebnis einen Beitrag zur Vorhersage der Spray Wand Interaktion leisten zu können. Diese Untersuchungen waren teilweise in ein europäisches Verbundprojekt eingebunden (5<sup>th</sup> framework program, „Droplet Wall Interaction Phenomena of Relevance to Direct Injection Gasoline Engines“ (DWDIE)) in dem das Problem der Spray-Wand-Interaktion an verschiedenen Forschungsstellen experimentell und numerisch untersucht wurde. Im vorliegenden Beitrag soll vornehmlich die zeitliche Interaktion von aufeinander folgenden Aufprallereignissen näher beleuchtet werden.

### **Versuchsaufbau**

Die zentralen Elemente des Versuchsaufbaus zur Untersuchung der zeitlichen Interaktion von Tropfenaufprallereignissen bildeten der Tropfenkettengenerator und ein beheizbares Wandelement. Der Tropfengenerator arbeitet nach dem Prinzip des „Vibrating Orifice“, bei dem mit Hilfe eines Piezokristalls ein Flüssigkeitsstrahl zum regelmäßigen Zerfall angeregt wird. Hierbei ist die kleinste erreichbare Tropfengröße hauptsächlich durch die Fertigung der Blende und die Stabilität der Zerfallsanregung beschränkt. Die eingesetzte Blende hat einen Durchmesser von 25  $\mu\text{m}$  und die damit realisierte Tropfengröße liegt zwischen 60 und 100  $\mu\text{m}$ , abhängig von Flüssigkeitsdruck und Anregungsfrequenz. Da diese Tropfengrößen schon eher den oberen Bereich der im realen Spray auftretenden Größen markieren und eine Variation nur in Richtung größerer Tropfen möglich war, kam nur diese Blende zum Einsatz. Der Piezokristall wird mit einem rechteckigen Spannungssignal beaufschlagt, dessen Frequenz für einen regelmäßigen Zerfall optimiert wurde. Der Generator wird aus einem druckbeaufschlagten Tank mit Flüssigkeit versorgt, dessen Druckniveau die Tropfengeschwindigkeit bestimmt.

Abb. 1 zeigt schematisch den beschriebenen Versuchsaufbau. Im rechten Teil der Abbildung ist beispielhaft ein Bild der weiteren Umgebung der Aufprallstelle dargestellt. Die Tropfenkette, die auf die Wand auftrifft, nachdem sie das Messvolumen eines LDA passiert hat, ist deutlich erkennbar. Das Bild zeigt den senkrechten Aufprall von Isooktan Tropfen mit einem Durchmesser von 80  $\mu\text{m}$  und einer Geschwindigkeit von 8,5 m/s auf einer fein gedrehten Oberfläche, die eine Temperatur von 489K hat.

Zur genauen Justage der Aufprallstelle und zur kontinuierlichen Überprüfung von Geschwindigkeit und Regelmäßigkeit der Primärtropfenkette ist das Messvolumen eines 1D LDA direkt 2-3 mm oberhalb der Wand platziert. Zusätzlich bietet dieses Gerät die Möglichkeit der Synchronisierung des hochauflösenden Messsystems mit dem Aufprallereignis und erlaubt somit eine phasenaufgelöste Charakterisierung des Prozesses. Das Wandelement selbst besteht aus einem zylindrischen Ausschnitt eines realen Kolbenbodens, um Oberflächenrauigkeit und Material so realitätsnah wie möglich zu gestalten. Es ist auf einem Kupferblock fixiert, der von einem geregelten Heizelement erhitzt wird, wobei die Temperatur der Wandoberfläche mit Hilfe eines Thermoelementes, das direkt unterhalb der Auftreffstelle in der Wand angebracht ist, geregelt wird.

Die Untersuchung von Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen stellt hohe Anforderungen an den experimentellen Aufbau und das Messsystem. Um den Ablauf des Aufprallprozesses zu untersuchen und um das Resultat korrekt zu interpretieren, ist ein visueller

Eindruck unbedingt notwendig. Der Aufprallvorgang wurde mit Hilfe einer geeigneten Hintergrundbeleuchtung und einer CCD Kamera, die mit einem Fernfeldmikroskop ausgestattet war, visualisiert. Die Kamera (FlowMaster3, LaVision) weist eine hohe Auflösung von 1280x1024 Pixel und die Möglichkeit der Doppelbelichtung auf getrennten Bildern auf (DoubleShutter). Um eine möglichst homogene Hintergrundbeleuchtung auch für die extrem große Vergrößerung zu erreichen wurde eine fluoreszierende Flüssigkeit (Sulforhodamin gelöst in Ethylenglykol) im Bildhintergrund platziert und mit einem Doppelpuls Nd:YAG-Laser (Spectron Dual SL400, 120mJ/Puls) angeregt. Auf diese Weise können qualitativ hochwertige Bildpaare in einem sehr kurzen Zeitintervall aufgenommen werden. Aus diesen Bildpaaren wurden Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen automatisiert mit Hilfe einer Bildanalysesoftware auf einem PC ausgewertet.

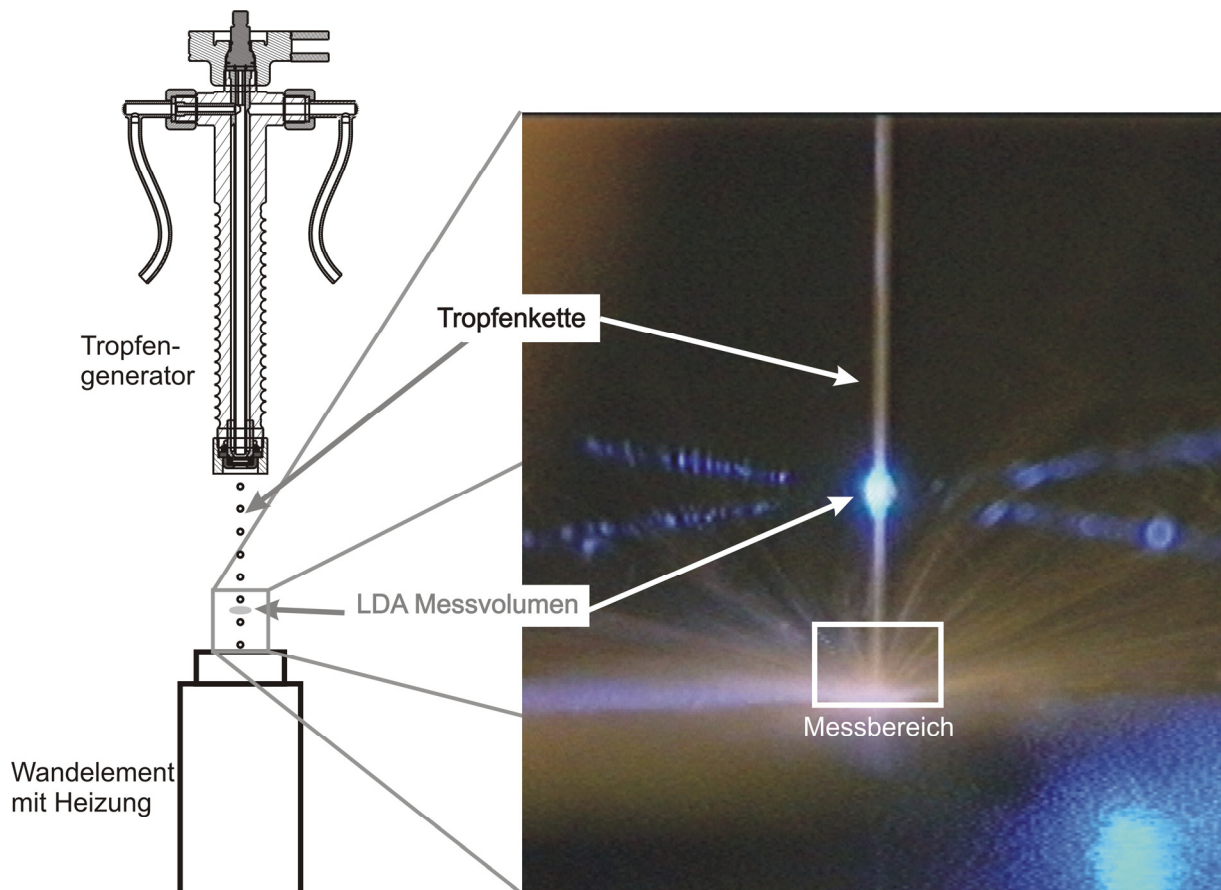


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Aufpralls von Tropfenketten

Die computergestützte Bildauswertung bietet die Möglichkeit, bei geeigneter Wahl des Bildausschnitts und der Auflösung eine koinzidente Vermessung von Tropfengrößen und -geschwindigkeiten vorzunehmen. Außerdem können die Bilder hinsichtlich des Ablaufs der Aufprallvorgänge und des jeweiligen Aufprallregimes gesichtet und bewertet werden. Die automatische Auswertung analysiert jeden Tropfen individuell, weshalb keine Begrenzung durch Größenunterschiede oder Geschwindigkeitsgradienten gegeben sind, wie sie für andere Algorithmen typisch sind. Allerdings ist der Algorithmus auf einen möglichst guten Kontrast in der Abbildung der Partikel angewiesen und seine Genauigkeit leidet unter unscharfen Tropfenbildern. Auch eine Überlappung von Tropfen sollte vermieden werden, was zu einer maximalen auswertbaren Tropfendichte führt. Schließlich ist die detektierte Tropfengröße in geringem Maße von einem Schwellwert abhängig, der im Vorfeld den Gegebenheiten angepasst werden muss und auf alle Tropfen in allen Bildern anwendbar sein muss. Der kleinste

detektierbare Tropfendurchmesser liegt bei ca. 2-3 Pixel, wobei die zugehörigen realen Abmessungen vom Abbildungsmaßstab abhängen. Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich die automatisierte Bildauswertung als hilfreiches Tool erwiesen hat, das unter den vorliegenden Umständen sehr gut geeignet ist.

## Ergebnisse

Wie bereits erwähnt lag der Schwerpunkt der vorgestellten Untersuchungen auf der zeitlichen Interaktion zwischen aufeinander folgenden Aufprallereignissen bezüglich ihrer Auswirkung auf die Sekundärtropfenbildung. Abb. 2 zeigt Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen, sowie ein Bild des Aufpralls für verschiedene Wandtemperaturen und Primärtropfengeschwindigkeiten.

Die Abbildung ist hinsichtlich der Eigenschaften der Primärtropfen vertikal unterteilt, wobei auf der linken Seite eine hohe Geschwindigkeit von 7,8 m/s und auf der rechten eine niedrige von 3,9 m/s dargestellt ist. Weiterhin ist die Abbildung in Zeilen eingeteilt, die das Aufprallereignis bei einer bestimmten Wandtemperatur zeigen. Die niedrigste untersuchte Wandtemperatur lag bei 107°C und liegt damit nur 2% oberhalb der Siedetemperatur von Isooktan und entspricht 70% der kritischen Temperatur. Bei dieser niedrigen Wandtemperatur war für beide Primärtropfengeschwindigkeiten keine Bildung von Sekundärtropfen feststellbar, weshalb auch keine Ergebnisse in die Abbildung aufgenommen wurden. Dies zeigt aber, dass die dynamischen Gegebenheiten des Aufpralls zur Deposition führen, wenn kein Einfluss des Wärmeübergangs von der Wand in die Flüssigkeit vorhanden ist. Bereits eine Erhöhung der Wandtemperatur auf 134°C führt zum Auftreten von sehr kleinen Sekundärtropfen, was in den beiden Bildern der ersten Zeile von Abb. 2 dargestellt ist. Die weiteren Zeilen zeigen jeweils eine Erhöhung der Wandtemperatur in Schritten von 5% der kritischen Temperatur. Die unterste Zeile zeigt schließlich den Tropfenaufprall bei der kritischen Temperatur.

Bei der höheren Geschwindigkeit war die Tropfenkette durch eine Tropfengröße von 91 µm im Durchmesser und eine Frequenz von 12 kHz charakterisiert, was einem räumlichen Abstand von 650 µm und einem zeitlichen von 83 µs entspricht. Bei der niedrigeren Geschwindigkeit lag die Tropfengröße bei 79 µm und die Frequenz bei 10 kHz, was einem räumlichen Abstand zwischen den Tropfen von 380 µm und einem zeitlichen Abstand von 100 µs entspricht. Links von jedem Bild in Abb. 2 ist jeweils ein Vektorplot dargestellt, der die Bewegung der Sekundärtropfen repräsentiert, wobei der Farbverlauf im Hintergrund dem Sauterdurchmesser der Tropfen entspricht. Die dargestellten Ergebnisse sind jeweils aus 500 Einzelmessungen gemittelt. Bei der Wandtemperatur von 134,8°C entstehen bei einer niedrigeren Primärtropfengeschwindigkeit etwas kleinere Tropfen (SMD von 11 µm) als bei der höheren (SMD von 14 µm, linke Seite). In beiden Fällen tritt Blasensieden auf, was bedeutet, dass Dampfblasen innerhalb der Flüssigkeit gebildet werden, die zerplatzen und dabei kleine Sekundärtropfen bilden. Die höhere Aufprallenergie im letzteren Fall verursacht größere Störungen in der Flüssigkeit und die Bildung von Wellen, die zu einer verstärkten Bewegung der Sekundärtropfen parallel zur Wand führt, da sie durch den Aufprall der nachfolgenden Tropfen von der Aufprallstelle weggedrängt werden. Dieser Vorgang tritt bei einer höheren Wandtemperatur von 162°C noch deutlicher zu Tage, die in der zweiten Zeile von Abb. 2 gezeigt ist. Bei niedriger Aufprallgeschwindigkeit (rechte Seite) bewegen sich die Sekundärtropfen hauptsächlich vertikal von der Wand weg. Beim Platzen von Dampfblasen werden eigentlich die Sekundärtropfen gleichmäßig in alle Richtungen verteilt, allerdings wird die wandparallele Komponente durch die restliche Flüssigkeit behindert, was zur senkrechten Vorzugsbewegung der Tropfen führt. Im Fall der höheren Aufprallgeschwindigkeit treten vereinzelt größere Sekundärtropfen auf, die aufgrund der intensiven Wellenbewegung im Film direkt aus der Flüssigkeit gerissen werden. Diese Vorgänge führen in diesem Fall zu einer stärkeren Be-

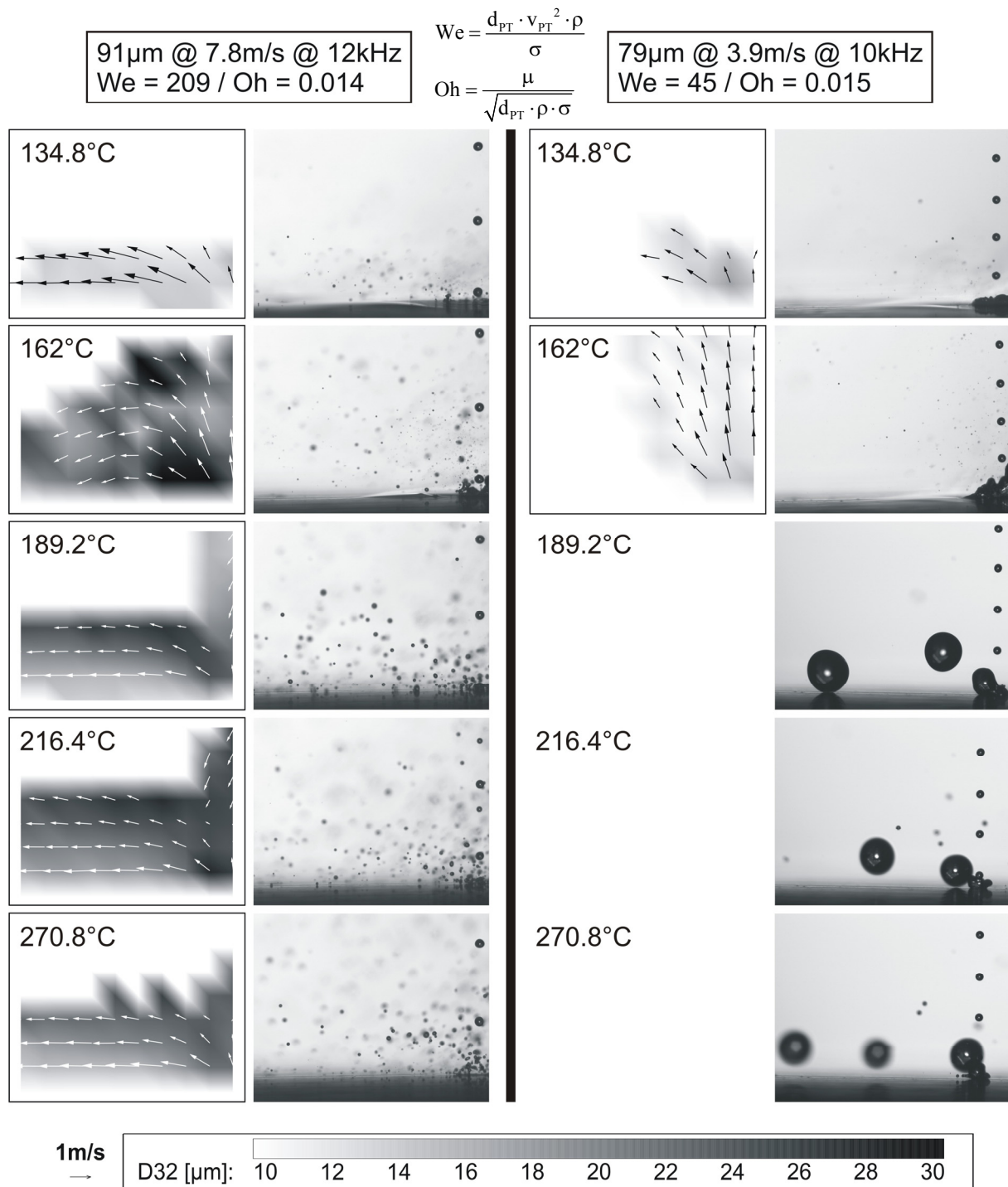


Abb. 2: Variation von Wandtemperatur und Primärtropfengeschwindigkeit – Einfluss auf Regime und Sekundärtropfengröße und –geschwindigkeit

wegung parallel zur Wand, der auch die kleineren Tropfen teilweise folgen.

Eine weitere Erhöhung der Wandtemperatur auf 189,2°C führt speziell im Fall der geringeren Primärtropfengeschwindigkeit zu einer drastischen Änderung des Prozesses (Abb. 2, rechte Seite). Es treten keine kleinen Sekundärtropfen mehr auf, dafür entstehen einzelne sehr große (300 µm und größer). Dieser Effekt kann auf das Leidenfrost Phänomen zurückgeführt werden, woraus geschlossen werden kann, dass die Leidenfrosttemperatur für die gezeigten Verhältnisse einer Primärtropfengeschwindigkeit von 3,8 m/s und –größe von 79 µm zwischen 162°C und 189°C liegt. Oberhalb der Leidenfrosttemperatur findet kein direkter Kontakt der Flüssigkeit mit der Wand mehr statt. Es entstehen auch keine Dampfblasen mehr in

der Flüssigkeit, da der Wärmeübergang von der Wand durch ein Dampfpolster zwischen Flüssigkeit und Wand stark behindert wird. Ohne platzende Dampfblasen werden auch keine kleinen Sekundärtropfen mehr gebildet, dafür sammelt sich die Flüssigkeit der Primärtropfen an der Ausprallstelle und es bilden sich die gezeigten großen Tropfen. Übersteigt die angesammelte Flüssigkeit einen kritischen Wert, löst sich dieser Tropfen und entfernt sich langsam. Auf dieses Phänomen haben Wandtemperaturen oberhalb der Leidenfrosttemperatur keinen Einfluss mehr, weshalb sich bei einer Steigerung der Wandtemperatur auch keine Änderung des Ablaufs mehr zeigt (siehe die drei unteren Zeilen der rechten Seite von Abb. 2).

Bei höherer Primärtropfengeschwindigkeit tritt im untersuchten Parameterbereich ein solcher Prozess der Bildung von großen Sekundärtropfen nicht auf (siehe Abb. 2, linke Seite). Aufgrund des höheren Impulses breitet sich die Flüssigkeit beim Aufprall weiter auf der Wand aus und zerteilt sich dabei in mehrere Tropfen anstatt zu einem großen Tropfen anzuwachsen. Infolgedessen kann die Leidenfrosttemperatur in diesem Fall nicht direkt anhand des Prozesses aus den Bildern bestimmt werden, wie es im zuerst diskutierten Fall möglich war. Dennoch lassen sich einige Änderungen im Prozess feststellen, wenn die Wandtemperatur von  $162^{\circ}\text{C}$  auf  $189^{\circ}\text{C}$  erhöht wird. Es treten einzelne größere Sekundärtropfen auf und die Geschwindigkeitskomponente parallel zur Wand dominiert nun deutlich. Diese dominierende, wandparallele Bewegung der Sekundärtropfen ist auch bei den noch höheren Wandtemperaturen deutlich erkennbar. Dies kann als Anhaltspunkt angesehen werden, dass die Leidenfrosttemperatur auch in diesem Fall zwischen  $162^{\circ}\text{C}$  und  $189^{\circ}\text{C}$  liegt. Außerdem ist aus den Geschwindigkeitsverteilungen der drei höchsten Wandtemperaturen eine konstante Vergrößerung der wandparallelen Geschwindigkeitskomponente erkennbar, was mit einer geringeren Reibung aufgrund eines geringer werdenden Kontaktes zwischen Flüssigkeit und Wand mit stärker werdendem Dampfpolster erklärt werden kann.

Nachdem Abb. 2 die Abhängigkeit der Sekundärtropfencharakteristik von der Primärtropfengeschwindigkeit und der Wandtemperatur aufgezeigt hat, stellt Abb. 3 auf ähnliche Art und Weise eine Variation der Aufprallfrequenz für niedrige Frequenzen vor, ohne Änderung der Primärtropfengeschwindigkeit. Da die Tropfenbildung des Tropfengenerators von der Anregungsfrequenz abhängt, war es nicht möglich, bei der Variation der Tropfenfrequenz die Primärtropfengröße konstant zu halten, weshalb sich neben der Frequenz auch die We-Zahl leicht ändert. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die dynamischen und Frequenz-Einflüsse überlagern. Der Ablauf der Aufprallprozesse deutet allerdings darauf hin, dass der Einfluss der Aufprallfrequenz dominiert. Trotz einer Änderung der Tropfengröße bleibt der Flüssigkeitsmassenstrom, der auf die Wand auftrifft, jedoch konstant. Für alle dargestellten Aufprallfrequenzen lag die Wandtemperatur bei  $216,4^{\circ}\text{C}$  und somit sicher oberhalb der Leidenfrosttemperatur.

Die erste Zeile von Abb. 3 zeigt eine Aufprallfrequenz von 10 kHz, was einem räumlichen Abstand zwischen aufeinander folgenden Tropfen von  $820\text{ }\mu\text{m}$  und einem zeitlichen von  $100\text{ }\mu\text{s}$  entspricht. Auf dem Bild ist eine flache Flüssigkeitsscheibe an der Auftreffstelle direkt oberhalb der Wand zu erkennen, die vom kurz zuvor aufgeprallten Tropfen gebildet worden ist und die dabei ist, sich in mehrere Fragmente zu teilen, die sich dann als Sekundärtropfen von der Wand wegbewegen. Dies bedeutet, dass im gezeigten Fall der einzelne Aufprallprozess beendet ist, bevor der folgende Tropfen die Wand erreicht und somit keine Interaktion zwischen aufeinander folgenden Aufprallereignissen stattfindet. Eine Steigerung der Aufprallfrequenz auf 17 kHz, was einem räumlichen Abstand zwischen den Tropfen von  $470\text{ }\mu\text{m}$  und einem zeitlichen von  $59\text{ }\mu\text{s}$  entspricht, verkürzt den Zeitabstand zwischen den Aufprallprozessen erheblich, führt aber noch nicht zu einer erkennbaren Interaktion (vgl. Abb. 3).



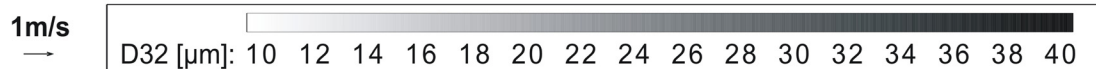
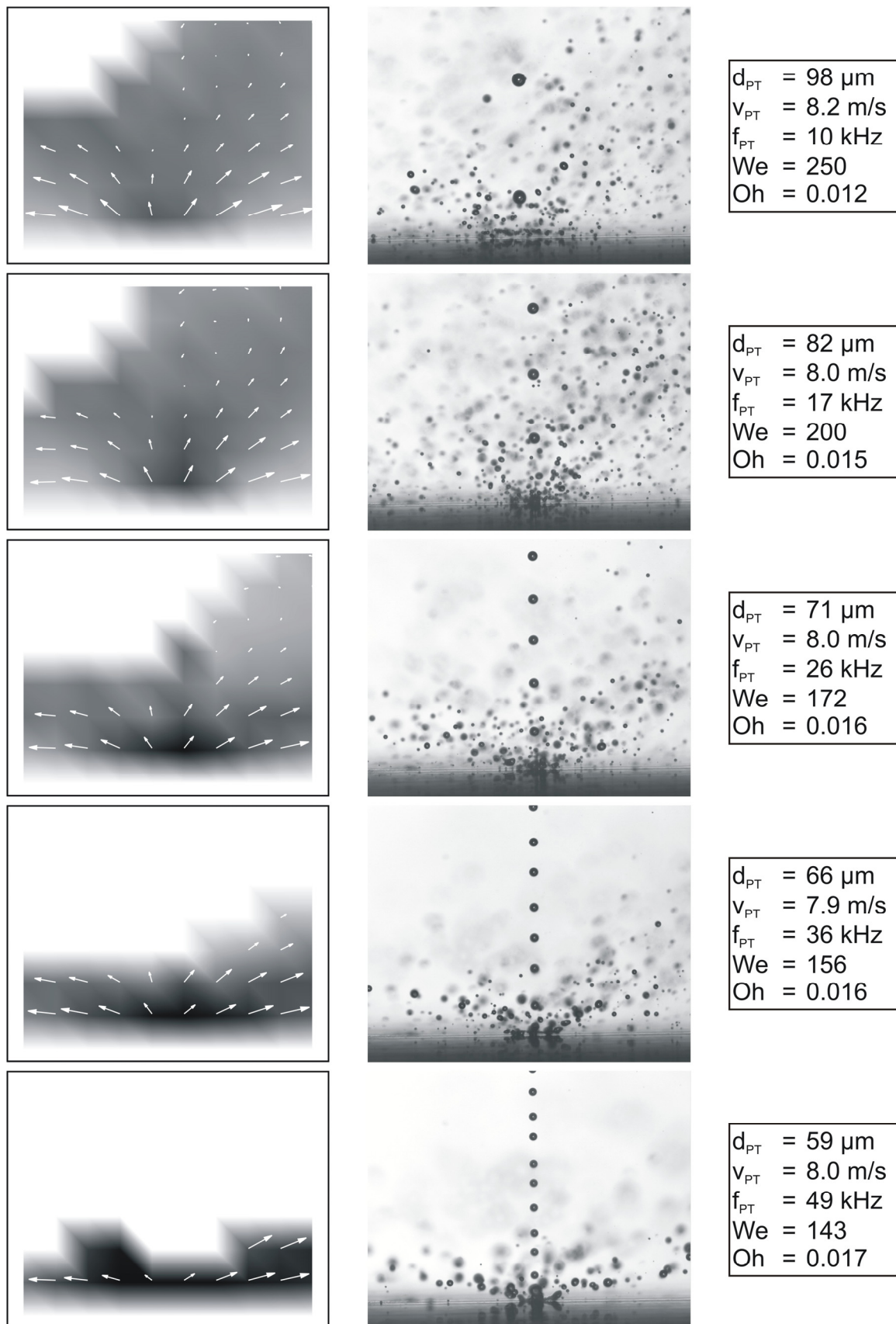


Abb. 3: Variation des Zeitabstandes zwischen aufeinander folgenden Aufprallereignissen



Erst eine Frequenz von 26 kHz ( $307\text{ }\mu\text{m}$  /  $38\text{ }\mu\text{s}$ ) verkürzt den Abstand zwischen den Tropfen derart, dass der einzelne Aufprallprozess nicht beendet ist, bevor der folgende beginnt. Die weitere Steigerung der Aufprallfrequenz auf 36 kHz ( $220\text{ }\mu\text{m}$  /  $28\text{ }\mu\text{s}$ ) und 49 kHz ( $160\text{ }\mu\text{m}$  /  $20\text{ }\mu\text{s}$ ) bewirkt eine intensiver werdende Interaktion. Ein Vergleich der Sekundärtropfencharakteristiken der verschiedenen Aufprallfrequenzen zeigt einen kontinuierlichen Anstieg der Sekundärtropfengrößen. Wie in Abb. 4 zusammengefasst steigt der Sauterdurchmesser, der in diesem Fall global im gesamten Bereich gebildet wurde, von  $25\text{ }\mu\text{m}$  bei 10 kHz auf  $42\text{ }\mu\text{m}$  bei 49 kHz. Gleichzeitig steigt die Geschwindigkeit der Tropfen parallel zur Wand von  $0,4\text{ m/s}$  auf  $0,75\text{ m/s}$ . Außerdem ändert sich das Bild des Aufpralls dahingehend, dass bei höheren Frequenzen nur in der Nähe der Wand Sekundärtropfen auftreten, wohingegen sie bei niedriger Frequenz auch im wandfernen Bereich zu finden sind. Mit steigender Aufprallfrequenz und somit intensiver werdender Interaktion konzentrieren sich die Sekundärtropfen immer mehr in der Nähe der Wand, wobei gleichzeitig auch die Geschwindigkeitskomponente parallel zur Wand ansteigt. Dies lässt sich mit einer stärkeren Interaktion im Falle der höheren Aufprallfrequenz erklären, die eine Wellenbildung in der Flüssigkeit hervorruft, die schließlich am Rand der Lamelle zum Abreißen von Tropfen führt. Diese Tropfen sind etwas größer und bewegen sich nahezu parallel zur Wand. Auf diese Art und Weise bewirkt die zeitliche Interaktion der Tropfen ein erzwungenes Abtrennen von Sekundärtropfen. Im Fall der niedrigen Aufprallfrequenzen in Abb. 3 dagegen zerteilt sich die Flüssigkeitslamelle am Ende des Ausbreitungsvorgangs aufgrund des Wärmeeintrags von der Wand.

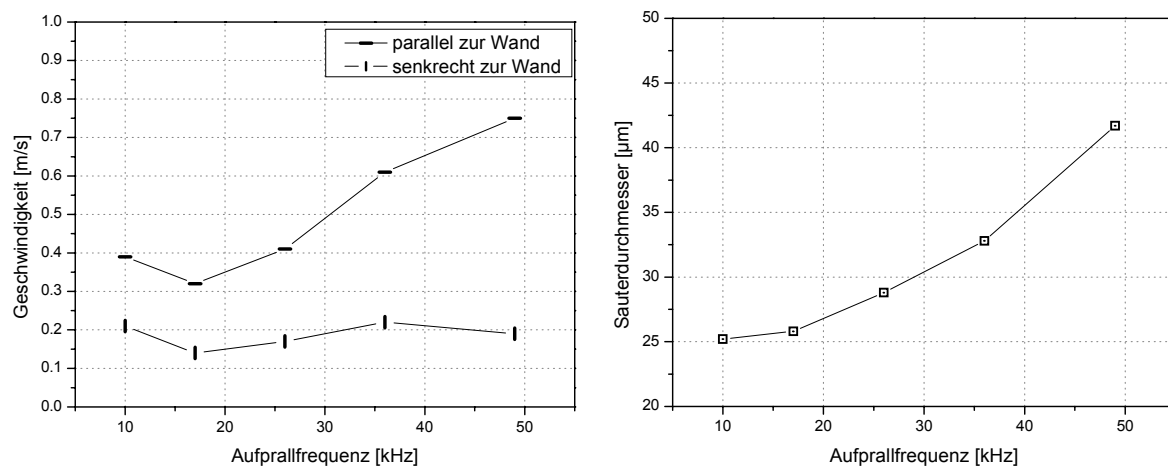


Abb. 4: Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen in Abhängigkeit der Aufprallfrequenz

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Berechnung der Gemischbildung in direkteinspritzenden Ottomotoren erfordert verlässliche Modelle bezüglich der Interaktion von Kraftstofftropfen mit heißen Brennraumwänden. Als Teilproblem hiervon wurde die zeitliche Interaktion von aufeinander folgenden Aufprallergebnissen unter möglichst realitätsnahen Bedingungen detailliert untersucht. Hierbei stellen die extrem kleinen Tropfen hohe Anforderungen an die Messtechnik, sowie den Aufbau und die Steuerung des Experiments. Zur Analyse der ablaufenden Prozesse beim Aufprall ist eine bildbasierte Untersuchung unerlässlich. Es hat sich gezeigt, dass eine geeignete Hintergrundbeleuchtung mit Hilfe eines Doppelpuls Lasers und eine Bildaufnahme durch eine hoch auflösende DoubleShutter Kamera die Erfassung von qualitativ hochwertigen Bildern des Aufpralls ermöglicht. Weiterhin stellte sich die computergestützte Bildauswertung als sehr wertvolles und vielseitig einsetzbares Hilfsmittel bei der Untersuchung von Tropfencharakteristiken heraus, die eine koinzidente Vermessung von Tropfengrößen und -geschwindigkeiten ermöglicht.

Der Schwerpunkt der vorgestellten Untersuchungen lag auf der Auswirkung der Wandtemperatur, der Primärtropfengeschwindigkeit und der Aufprallfrequenz auf Größe und Geschwindigkeit der Sekundärtropfen bei der zeitlichen Interaktion von aufeinander folgenden Aufprallereignissen. Es hat sich gezeigt, dass unter den untersuchten Bedingungen beim Aufprall unterhalb 134°C keine Bildung von Sekundärtropfen feststellbar war. Für eine niedrige Primärtropfengeschwindigkeit von 3,8 m/s konnte die Leidenfrosttemperatur zwischen 162°C und 189°C identifiziert werden. Weiterhin konnten einige Anzeichen gefunden werden, die darauf hindeuten, dass die Leidenfrosttemperatur auch für eine höhere Primärtropfengeschwindigkeit in einem ähnlichen Bereich liegt. Zusätzlich konnte eine deutliche Abhängigkeit der Bewegung und der Größe der Sekundärtropfen von der Aufprallfrequenz festgestellt werden. Mit steigender Aufprallfrequenz und somit stärker werdender Interaktion zwischen aufeinander folgenden Aufprallereignissen werden größere Sekundärtropfen gebildet, die sich verstärkt parallel zur Wand ausbreiten. Insgesamt lässt sich feststellen, dass ein deutlicher Einfluss der zeitlichen Interaktion von Aufprallereignissen auf die Charakteristik der gebildeten Sekundärtropfen vorhanden ist. Gegenwärtig werden die vorgestellten Arbeiten fortgesetzt, um zusätzlich den Einfluss einer räumlichen Interaktion zu charakterisieren.

### Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens "Droplet Wall Interaction Phenomena of Relevance to Direct Injection Gasoline Engines (DWDIE)" durchgeführt und von der Europäischen Union unterstützt, wofür sich die Autoren bedanken. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich und er repräsentiert nicht die Auffassung der Europäischen Union.

### Literatur

- Barnes, H.A., Hardalupas, Y., Taylor, A.M.K.P. und Wilkins, J.H., 1999: "An investigation of the interaction between two adjacent impinging droplets", 15<sup>th</sup> ILASS Conference, Toulouse, France
- Bernardin, J.D., 1996: "Leidenfrost Point and Film Boiling Heat Transfer of Single Droplets and Sprays", PhD-Thesis, Purdue University
- Cossali, G. E., Coghe, A. und Marengo, M., 1997: "The Impact of a Single Drop on a Wetted Solid Surface", Experiments in Fluids, Vol. 22, pp. 463-472
- Cossali, G.E., Marengo, M., Santini, M. und Watanabe, J., 2002: "Secondary Droplet Atomisation from Single Drop Impact on Heated Surfaces", ILASS-Europe, Zaragoza
- Cossali, G.E., Marengo, M. und Santini, M., 2003: "Multiple drop impact on heated surface", 9<sup>th</sup> ICLASS, Sorrento, Italy
- Mundo, C., 1996: "Zur Sekundärzerstäubung newtonscher Fluide an Oberflächen", University of Erlangen-Nürnberg, PhD-Thesis
- Richter, B., Dullenkopf, K. and Wittig, S., 2002: "Wandaufprall von Einzeltropfen unter motornahen Bedingungen von Di-Ottomotoren", Spray Conference, Freiberg, Germany
- Richter, B., Dullenkopf, K. and Wittig, S., 2003: "Wall impact of single droplets under conditions of DISI-Engines", 9th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems; Sorrento, Italy
- Rioboo, R., Tropea, C. und Marengo, M., 2001: "Outcomes from a Drop Impact on Solid Surfaces", Atomization and Sprays, Vol. 11, pp. 155-165
- Samenfink, W., 1997: "Grundlegende Untersuchungen zur Tropfeninteraktion mit schubspannungsgetriebenen Wandfilmen", University of Karlsruhe, PhD-Thesis
- Samenfink, W., Elsässer, A., Dullenkopf, K. und Wittig, S., 1998: "Droplet Interaction with Shear-Driven Liquid Films: Analysis of the Secondary Droplet Characteristics", ILASS-Europe, Manchester
- Tropea, C. und Roisman, I.V., 2000: "Modeling of spray impact on solid surfaces", Atomization and Sprays, Vol. 10, pp. 387-408
- Weiss, D.D., 1993: "Periodischer Aufprall monodisperser Tropfen gleicher Geschwindigkeit auf feste Oberflächen", University of Göttingen, PhD-Thesis
- Yarin, A.L. und Weiss, D.A., 1995: "Impact of drops on solid surfaces: self-similar capillary waves, and splashing as a new type of kinematic discontinuity", J. of Fluid Mechanics, Vol. 283, pp. 141-173