

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde der Aufprall eines Kraftstoffstrahls auf eine ölbenetzte Wand experimentell untersucht, um die innermotorische Interaktion des Kraftstoffs mit der Zylinderwand zu simulieren. Das Ziel war, eine optische, bildgebende Erfassung der Vorgänge zu realisieren, um Teileffekte beschreiben und Rückschlüsse auf deren Entstehungsmechanismen gewinnen zu können. Die Relevanz der Kraftstoff-Ölfilm-Interaktion für die heutige Forschung beruht auf dem bekannten Zusammenhang zu dem Phänomen der Vorentflammung. Dieser Einfluss und die Entstehungsmechanismen von Vorentflammungen sind noch nicht vollständig verstanden, weshalb die Ergebnisse dieser Arbeit dazu beitragen sollen, das Verständnis dieser komplexen Phänomene zu verbessern. Dafür wurde ein Versuchsaufbau entwickelt der motorrelevante Randbedingungen darstellen kann. Dieser wurde so konzipiert, dass eine Einzelkeule an einem konstruktiv definierten Punkt auf einen initial ruhenden und gleichmäßigen Ölfilm trifft. Mit diesem Aufbau konnten zahlreiche Eingangsparameter variiert und deren Sensitivitäten bewertet werden. Zur Visualisierung der zeitlich und räumlich hochaufzulösenden Vorgänge wurde ein zwei-Farben-LIF Setup erarbeitet. Dies ermöglicht die belastbare Separierung der Fluide Kraftstoff und Öl, sodass qualitative Rückschlüsse auf die lokale Zusammensetzung gewonnen werden konnte. Die Prozesse konnten zeitlich auf 30 μs und räumlich auf bis zu 6 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ aufgelöst werden.

Der Vorgang eines Kraftstoffaufpralls konnte in fünf charakteristische Teilbereiche unterteilt werden. Es konnten zwei Arten von Sekundärtröpfchen beobachtet werden, aber auch eine deutliche Verformung des initial gleichmäßigen Ölfilms, eine Anreicherung von Kraftstoff an der Ölfilmoberfläche und eine Verschäumung des Ölfilms im Interaktionsbereich. Diese Teileffekte können den verbrennungsmotorischen Prozess direkt beeinflussen. Die Übertragung dieser Erkenntnisse wurde auf theoretischen Überlegungen durchgeführt. Alle Teileffekte haben negative Auswirkungen auf verbrennungsmotorische Prozesse, weshalb die Interaktion eines Kraftstoffstrahls auf eine Zylinderwand so gering wie möglich ausgeprägt sein sollte. Sekundärtröpfchen, vor allem solche die durch Splashing entstehen, können kritische Eigenschaften hinsichtlich der Auslösung einer Vorentflammung aufweisen. Diese sind ölhaltig, klein und entstehen zu einem zu frühen Zeitpunkt. Den größten Einfluss auf die Interaktionsprozesse haben die Parameter Auftreffwinkel und Ölfilmstärke. Es ist also zu empfehlen, den Auftreffwinkel im Brennraum so gering wie möglich zu gestalten und eine möglichst gleichmäßige Ölverteilung zu realisieren. Außerdem konnte identifiziert werden, dass der Aufprall einer gasförmigen Kraftstoffkeule einen zuvor ruhenden Ölfilm ebenfalls signifikant beeinflussen kann, wenn auch in geringerer Ausprägung im Vergleich zur flüssigen Kraftstoffkeule.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Unterschiedliche Entwicklungstreiber, wie das Leistungsvermögen oder die wirtschaftliche und motorische Effizienz, waren in den letzten Jahrzehnten für die Ausrichtung der Motorenentwicklung verantwortlich. Aktuell steht vor allem die Defossilisierung, was mit einer weiteren Effizienzsteigerung einhergeht, im Fokus. Die Verkleinerung des Hubraums bei konstanter Motorleistung wird Downsizing genannt und hat sich als effektive Maßnahme zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durchgesetzt. Es führt im zertifizierungsrelevanten Betrieb zu einer Steigerung der spezifischen Leistung und der Effizienz. Die innere Gemischbildung kann die Klopfneigung reduzieren und damit einen wirkungsvollen Beitrag zur Realisierung des Downsizings leisten, weshalb sich die Direkteinspritzung (DI) mittlerweile auch beim Ottomotor durchgesetzt hat. Wenn der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingespritzt wird, kann der Kraftstoff in noch flüssiger Form die Zylinderwand, die aus tribologischen Gründen mit Öl benetzt ist, erreichen und mit dieser interagieren. Für die Forschung ergibt sich daraus eine gesteigerte Relevanz zur Untersuchung der Interaktion eines Kraftstoffstrahls mit einer ölbenetzten Zylinderwand. Außerdem ist der ottomotorische Prozess prinzipbedingt durch unterschiedliche Formen von Verbrennungsanomalien begrenzt. Neben den gut erforscht und verstandenen Phänomenen Klopfen und Glühzündungen, treten vor allem bei DI-Motoren vermehrt Vorentflammungsereignisse auf, die noch nicht vollständig verstanden sind. In der Literatur sind einige Abhängigkeiten und Einflussfaktoren beschrieben, die in Verbindung zum Auftreten solcher Vorentflammungen (VE) stehen. Dabei wird auch mehrfach der Einfluss der Kraftstoff-Wand-Interaktion auf VE beschrieben, die durch bestimmte Einspritzparameter beeinflusst und verändert werden kann. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit das Auftreffverhalten eines Kraftstoffstrahls auf eine ölbenetzte Wand optisch untersucht und beschrieben. Die Prozesse wurden generisch, aber unter motorrelevanten Bedingungen durchgeführt und analysiert.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Ursachenforschung für VE in homogenen, hochaufgeladenen Benzin-DI-Motoren zu liefern. Dafür soll die Interaktion eines Kraftstoffstrahls und einer ölbenetzten Wand räumlich und zeitlich hochaufgelöst analysiert werden. An einem generischen Versuchsstand, welcher motorrelevante Randbedingungen ermöglicht, soll diese Interaktion beobachtet werden. Dafür ist eine Vorrichtung notwendig, die motorähnliche Ölfilme generieren kann. Es soll ein gleichmäßiger Ölfilm mit der Dicke von 20 μm und eine Öltemperatur von 90 $^{\circ}\text{C}$ reproduzierbar erzeugt werden können. Außerdem sollen weitere relevante Auftreffparameter wie Kraftstoffdruck, Auftreffwinkel oder Umgebungsdruck eingestellt und verändert werden können. Auch der Abstand zwischen der Injektorspitze und dem Auftreffpunkt, soll variierbar sein. Um die Interaktionsprozesse im Detail analysieren und deren Entstehungsmechanismus beschreiben zu können, ist es notwendig die beiden Fluide Kraftstoff und Öl optisch voneinander differenzierbar darzustellen. Es sollen in dieser Arbeit explizit keine (meist einkomponentigen) Surrogate

für den Kraftstoff oder das Motorenöl verwendet werden, sondern real eingesetzte, mehrkomponentige und additivierte Fluide. Für die optische Visualisierung solcher Prozesse bietet die Laser-Induzierte-Fluoreszenz (LIF) geeignete Eigenschaften. Zur spektralen Separierung beider Komponenten ist ein geeignetes LIF-Setup mit zwei Emissionsspektren notwendig. Um die Interaktionsprozesse vollständig beobachten und erklären zu können, sind unterschiedliche Perspektiven, Kamera- und Tracersetups anzuwenden. Neben der Beobachtung und Beschreibung der Interaktionsprozesse soll außerdem durch eine geeignete Parametervariation die Sensitivität einzelner Parameter auf Teil-Prozesse charakterisiert werden. Der Fokus soll dabei auch auf auftretenden Sekundärtröpfchen liegen, die durch den Aufprall abgelöst werden. Außerdem soll untersucht werden, welche Mechanismen zur Bildung dieser Sekundärtröpfchen führen. Darüber hinaus sollen weitere Effekte untersucht werden, die bei der Interaktion eines Kraftstoffsprays mit einer ölbenetzten Wand beobachtet werden und den motorischen Betrieb beeinflussen können. Abschließend soll der Bezug dieser Beobachtungen zum motorischen Betrieb, vor allem aber zu VE-Ereignisse erarbeitet werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit werden die relevanten, motorischen Grundlagen zum Verständnis von Verbrennungsanomalien und deren Ursachen dargestellt. Anschließend werden die strömungsmechanischen Grundlagen, die zum Verständnis von Interaktionsprozessen notwendig sind, beschrieben. Dabei werden die in der Literatur dokumentierten Sensitivitäten relevanter Randbedingungen auf den Interaktionsprozess erarbeitet. Zusätzlich werden dimensionslose Kennzahlen vorgestellt, mit deren Hilfe Aufprallereignisse mit unterschiedlichen geometrischen Skalen, z.B. Tröpfchengröße oder Filmdicken, miteinander verglichen werden können. Bereits bekannte qualitative Einflüsse können damit die Belastbarkeit der beobachteten Zusammenhänge steigern. Anschließend werden das Prinzip und die notwendigen Grundlagen der LIF erläutert und die verwendete Methodik beschrieben. Dazu wird in Kapitel 3 die Entwicklung des spektralen Setups dargestellt. Neben dem Tracersetup wird dafür auch das Setup der optischen Filter, die Auslegung der Lichtquelle und der Kalibriervorgang zur spektralen Trennung vorgestellt. In Kapitel 4 wird anschließend die Entwicklung des Versuchsaufbaus beschrieben. Es wird die Ölfilm- und Kraftstoffsprayerzeugung aber auch die Auslegung des Kamersetups inklusive der verschiedenen Ansichten beschrieben. Auch die Konstruktion der Druckkammer welche das Herzstück des Versuchstandes ist, wird in diesem Kapitel dokumentiert. Nachfolgend werden die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente beschrieben und charakterisiert. In Kapitel 5 wird neben der Versuchsplanung, vor allem der Einfluss einzelner Eingangsparameter theoretisch beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 6 Randbedingungen für ein Experiment mit ausgewählten Referenzbedingungen eingeführt. Dieses wird vollumfänglich beschrieben und in charakteristische Teil-Phänomene unterteilt. In Kapitel 7 werden dann die Sensitivitäten der einzelnen Parameter auf die charakteristischen Teil-Prozesse erarbeitet, wodurch Rückschlüsse auf Entstehungsmechanismen gezogen werden können. In Kapitel 8 wird die Interaktion mit weiteren Kraftstoffen, Dimethylcarbonat (DMC) als flüssige und Helium als gasförmige Alternative, durchgeführt und die Unterschiede zum konventionellen Kraftstoff dargestellt. Kapitel 9 fasst die Ergebnisse der Experimente zusammen und zieht Schlussfolgerungen, insbesondere hinsichtlich des Einflusses auf die motorische Verbrennung. Abschließend werden in Kapitel 10 die wichtigsten Beobachtungen dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Verbrennungsmotorische Grundlagen

2.1.1 Verbrennungsanomalien im ottomotorischen Prozess

Beim ottomotorischen Prozess wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch, durch eine externe Quelle gezündet, um die chemisch gebundene Energie in thermische Energie umzusetzen. Dabei liegt das Gemisch meist homogen vermischt vor. Von der Zündquelle breitet sich eine Flammenfront aus und teilt den Brennraum in eine verbrannte und unverbrannte Zone, die als Endgas bezeichnet wird. Diese Art von Verbrennung bzw. Kraftstoffumsetzung ist beherrschbar und kann gezielt beeinflusst und gesteuert werden. Allerdings liegt, prinzipbedingt durch die homogene Vormischung, ein zündfähiges Gemisch bereits vor der Zündung und während der Verbrennung im Endgas vor. In ungünstigen Fällen kann sich dieses Gemisch ungewollt und unkontrolliert entzünden, was als Verbrennungsanomalie bezeichnet wird. Es sind unterschiedliche Arten von Anomalien bekannt, die sich in Ihren Entstehungsmechanismen wesentlich unterscheiden. Als Klopfen wird eine Selbstzündung im Endgasbereich bezeichnet. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass Sie erst nach der Zündung auftritt. Sie kann durch hochfrequente, charakteristische Schwingungen z.B. im Zylinderdrucksignal detektiert werden. Starkes Klopfen kann zu einer Erhöhung des maximalen Zylinderdrucks oder des Zylinderdruckgradienten und damit zu einer erhöhten Motorbelastung bis hin zum Motorschaden führen. Im Betrieb lassen sich diese Anomalien mit einfachen Maßnahmen wie einer Verschiebung des Zündzeitpunktes oder einem überstöchiometrischem Gemisch einfach vermeiden. Neben dem Klopfen können bei Ottomotoren auch sogenannte Glühzündungen beobachtet werden. Dabei entzündet sich das vorgemischte Gemisch an heißen Teilen des Brennraums. Das können z.B. heiße Ventile oder Bauteile der Zündvorrichtung sein. Die Glühzündung tritt meist vor dem eigentlichen Zündzeitpunkt auf, was zu einer früheren Kraftstoffumsetzung und damit auch zu deutlich höheren Zylinderdrücken führen kann. Auch diese Anomalien sind nicht kontrollierbar und führen zu einer höheren Bauteilbelastung bis hin zum Motorschaden. Im Betrieb können Glühzündungen lediglich durch eine Unterbrechung der Kraftstoffbereitstellung unterbrochen werden. Beide vorgestellten Arten von Verbrennungsanomalien vereint, dass Sie beim Auftreten durch Gegenmaßnahmen reduziert oder unterbrochen werden können. Falls keine Maßnahme ergriffen wird, würden diese Ereignisse fortlaufend auftreten und so zu einer überkritischen Belastung führen. Zusätzlich können vor allem bei hochaufgeladenen DI-Benzin-Motoren eine weitere Art von Verbrennungsanomalien beobachtet werden, die als Vorentflammung bezeichnet werden.

2.1.2 Charakterisierung von Vorentflammungsereignissen

Es handelt sich hierbei um stochastisch auftretende Entflammungen die vor dem eigentlichen Zündzeitpunkt auftreten. Diese sind, als Einzelereignis betrachtet, den Vorgängen einer Glühzündung vergleichbar. In Abb. 2.1 (links) aus [73] ist ein beispielhafter Zylinderdruckverlauf eines solchen Ereignisses dargestellt. Der wesentliche Unterschied beider Effekte liegt in der Zündquelle. Während die Zündenergie bei Glühzündungen durch heiße Bauteile kontinuierlich

bereitgestellt wird, ist dies bei VE nicht der Fall. In der Literatur sind verschiedene potentielle Zündquellen für VE-Ereignisse beschrieben. Neben der Zündung an festen Partikeln, die schon durch optische Untersuchungen nachgewiesen werden konnten [57], [73], werden in der Literatur auch flüssige, ölhaltige Tröpfchen als mögliche Zündquellen beschrieben.

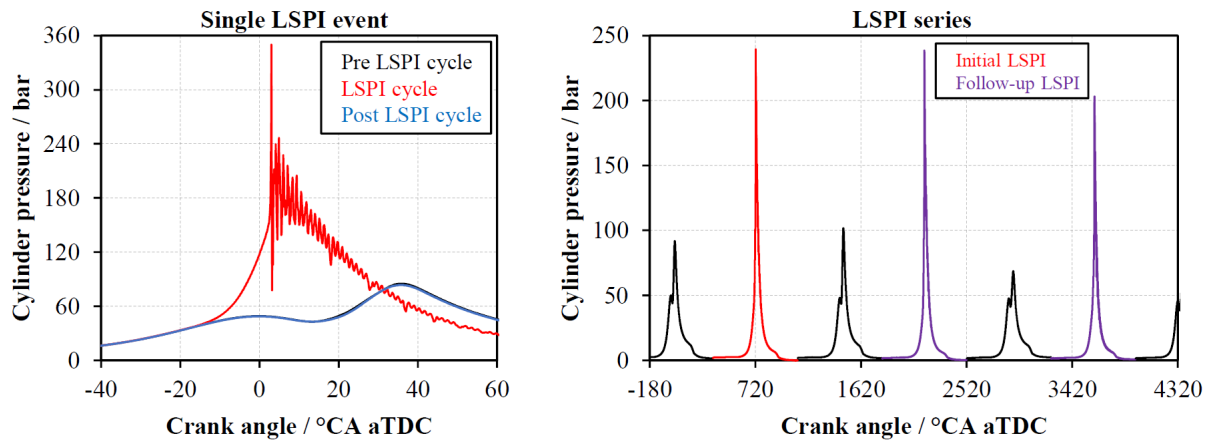


Abbildung 2.1: Beispiel einer Vorentflammungsserie [73]

Feste Partikel als Zündquellen sind bisher besser beschrieben und verstanden. So ist bekannt, dass diese Ereignisse als einzelne aber auch als Reihe aufeinander folgender Einzelevents beobachtet werden können [73], [57], [58]. Dabei wechseln sich Zyklen mit einer VE und einer normalen, durch die Zündkerze gezündeten Verbrennung ab. Dieses Verhalten wird damit erklärt, dass die Druckgradienten eines VE-Events Partikel aus Brennraumablagerungen auslösen, die sich im folgenden Zyklus durch die Verbrennung aufheizen und im darauf folgenden Zyklus dann selbst als Zündquelle fungieren und weitere Partikel ablösen. Dies kann sich so lange wiederholen, bis sich die Ablagerungen soweit abgebaut haben, dass keine weiteren Partikel ausgelöst werden. Abb. 2.1 (rechts) zeigt eine solche Anreihung mehrerer VE [73]. Außerdem zeigen neueste Untersuchungen, dass vor allem Partikel, als ungewollte Zündquelle fungieren. In [73] konnte gezeigt werden, dass sich die Zusammensetzung und dadurch auch der Bildungsmechanismus der Ablagerungen im Brennraum unterscheiden können. Es konnte nachgewiesen werden, dass vor allem ölbasierten Feststoffe eine erhöhte Reaktivität aufweisen. Im Vergleich zu kraftstoffbasierten Ablagerungen, die fast ausschließlich aus organischen Bestandteilen bestehen, setzen sich reaktivierte Ablagerungen zu einem Teil aus anorganischen Stoffen wie z.B. Calcium, Zink oder Phosphor zusammen. Diese Ablagerungen entstehen vor allem in den Brennraumbereichen, in der eine Interaktion zwischen dem Kraftstoffstrahl und der ölbenetzten Zylinderwand auftritt. Die Zündung an flüssigen, ölhaltigen Tröpfchen basiert auf einem anderen Mechanismus, der vor allem für Einzel-VE als Erklärung dienen kann. Die Grundlage bildet das unterschiedliche Entflammungsverhalten von Motoröl und Ottokraftstoff. Öl, und damit auch ölhaltige Tröpfchen, weisen eine erhöhte Zündwilligkeit im Vergleich zu ROZ95 auf. Wenn solche Tröpfchen als Folge einer Kraftstoff-Zylinderwand-Interaktion im Brennraum entstehen, könnten diese unter entsprechenden thermodynamischen Zuständen selbst als Zündquelle dienen und damit eine VE auslösen. Dieser Mechanismus könnte anschließend auch die zuvor beschriebene VE-Reihe initiieren. Nach [100] kämen unter motorrelevanten Randbedingungen jedoch nur sehr kleine Tröpfchen für diesen Mechanismus in Frage, da die Tröpfchen zunächst in die Gasphase über gehen müssen und dabei der Umgebung Enthalpie entziehen. Dieser Effekt ist bei kleineren Tröpfchen geringer und führt bei Tröpfchengrößen von kleiner als 50 μm zu einer verkürzten Zünddauer [100], die motorrelevanten Zeitskalen entsprechen kann. Allerdings konnte diese Form der Zündquelle für VE-Ereignisse experimentell bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Entstehung von

Öltröpfchen kann durch unterschiedliche Effekte hervorgerufen werden, wie zum Beispiel hohe Beschleunigungen am Kolben oder den Kolbenringen. Diese Effekte bilden tendenziell große Öltröpfchen aus. Außerdem müssten diese Mechanismen maßgeblich von der Viskosität des Motoröls beeinflusst sein. Eine Reduktion der Viskosität des Motoröls wurde in [36] untersucht, wobei kein Einfluss auf die Auftrittswahrscheinlichkeit von VE beobachtet werden konnte. Zudem konnte [58] zeigen, dass ein Absenken der Motorkühlwassertemperatur, was die Viskosität des Öls im Brennraum anhebt, zu einer höheren VE-Neigung führt, was der Hypothese der reinen Öltröpfchenzündung auf Grund von trägheitsbedingten Öltröpfchenbildung widerspricht. In unabhängigen Arbeiten konnte allerdings der Einfluss der Kraftstoff-Wand-Interaktion auf die VE gezeigt werden [80]. Demnach führt eine erhöhte Interaktion des Kraftstoffstrahls mit der Zylinderwand zu einer höheren Auftrittswahrscheinlichkeit von VE.

Diese unterschiedlichen und vielfältigen Beobachtungen, die den VE-Mechanismus beeinflussen, weisen darauf hin, dass die Entstehung komplex und vielschichtig ist [73]. Da mehrfach beobachtet werden konnte, dass die Kraftstoff-Wand-Interaktion das VE-Verhalten direkt beeinflusst, müssen die Prozesse, die während eines solchen Aufpralls von statten gehen, detailliert und anwendungsbezogen untersucht werden.

2.2 Beschreibung von Tropfenaufrallereignissen

Um den Aufprall eines Tropfens oder eines Sprays auf einen Flüssigkeitsfilm beschreiben zu können, ist es wichtig, grundlegende strömungsmechanische Phänomene zu verstehen. Generisch sind solche Interaktionen gut zu beobachten, und bereits vielfältig erforscht und beschrieben [53]. Die relevanten Phänomene und Einflussparameter, sollen hier ausgearbeitet und beschrieben werden, um die durchgeführten Versuche vollständig zu beschreiben und die Belastbarkeit der Bewertung zu erhöhen.

2.2.1 Einzeltropfenaufrall

Der einfachste Aufprall ist der eines sich senkrecht zur Auftreffebene bewegenden Einzeltropfens auf einen Flüssigkeitsfilm. Dabei kann ein Teil des Tropfens abprallen, was als Reflexion bezeichnet wird. Außerdem kann sich ein Teil in Form von Sekundärtropfen wieder von der Wand ablösen, was als Destruktion bezeichnet wird. Ein anderer Teil des Tropfens kann sich an der Aufprallfläche ablagern und haften bleiben, was Deposition genannt wird [64] und in 2.2 a) dargestellt ist. Beim Aufprall eines Tropfens auf einen Flüssigkeitsfilms kommt es zu ver-

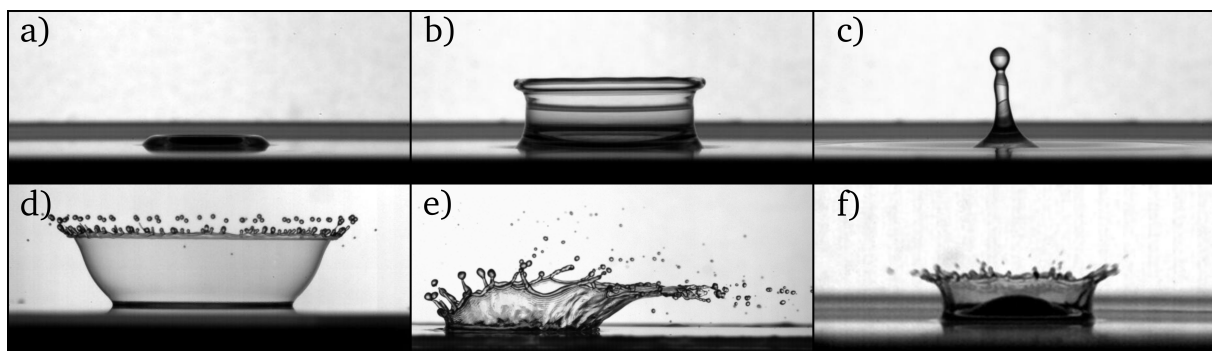


Abbildung 2.2: Generische Untersuchungen eines Einzeltropfenaufralls [47]: Deposition eines Tropfens (a), Ausbildung einer Krone (b), Teil-Reflexion (c), Splashing (d), Schräger Tropfenaufrall (e), spontanes Splashing (f)

schiedenen Teil-Phänomenen. Wie bereits erwähnt kann sich ein Teil anreichern und sich ein anderer Teil wieder ablösen. Außerdem wird durch den Impuls des Tropfens der Flüssigkeitsfilm lokal verformt. Das kann zur Bildung einer rotationssymmetrischen Krone führen, wie in Abb. 2.2 b) dargestellt [66]. Im weiteren Verlauf kann die Kronenspitze instabil werden und Lamellen bilden, die in der Literatur als "Finger" bezeichnet werden. Aus diesen Lamellen können sich anschließend kleine Tröpfchen ablösen, wenn die Massenträgheit die Oberflächenspannung der Flüssigkeit übersteigt, was in Abb. 2.2 d) abgebildet ist. Dieser Ablösevorgang wird in der Literatur als „Splashing“ oder „Corona Splashing“ bezeichnet [65], [43], [97], [31], [53]. Die Sekundärtröpfchen zeichnen sich dadurch aus, dass sie wesentlich kleiner sind als der primäre Tropfen. Außerdem kann unter bestimmten Umständen ein „spontanes Splashing“ beobachtet werden, das sich dadurch kennzeichnet, dass die Sekundärtröpfchen sich von der Krone ablösen, bevor diese ihre maximale Höhe erreicht. Diese Tröpfchen sind kleiner und haben eine höhere Geschwindigkeit als Tropfen, die durch „Corona Splashing“ erzeugt werden und sind in Abb. 2.2 f) dargestellt [43]. Oft können „spontanes Splashing“ und das zuvor beschriebene „Corona Splashing“ nacheinander im gleichen Aufprallvorgang beobachtet werden. Zusätzlich kann, vor allem beim Aufprall auf dicken Flüssigkeitsfilm, eine weitere Form von Sekundärtröpfchen beobachtet werden. Dabei handelt es sich um eine Teil-Reflexion die im Auftreffursprung entsteht. Dieser Vorgang ist in Abb. 2.2 c) abgebildet. Diese Tropfen sind im Vergleich zu den Splashingtropfen groß und langsam [64]. Die Bildung dieser Phänomene sind abhängig von zahlreichen Randbedingungen wie zum Beispiel Aufprallgeschwindigkeit. Um die Ereignisse normiert beschreiben und miteinander vergleichen zu können, werden dimensionslose Kennzahlen eingeführt. Anhand dieser Kennzahlen können zum Beispiel Grenzbedingungen für Splashingereignisse bestimmt werden.

2.2.2 Kennzahlen zur Bewertung von Aufprallereignissen

Die in der Literatur beschriebenen Experimente zum Tropfenaufprall sind oft generische Versuche die einen hohen analytischen Detaillierungsgrad ermöglichen. Damit können die Prozesse sehr genau beobachtet und einzelne Einflussgrößen und Sensitivitäten charakterisiert werden. Reale Anwendungen wie zum Beispiel Sprays haben den Nachteil, dass sie unzureichend optisch zugänglich und sehr komplex sind. Um die grundlegenden Erkenntnisse trotzdem anzuwenden und übertragen zu können, werden üblicherweise dimensionslose Kennzahlen verwendet, die neben dem Einwirken äußerer Kräfte auch die vorherrschenden Stoff- und Geometrieigenschaften berücksichtigen. Für die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche sind lediglich die Weberzahl we , Reynoldszahl Re und der K-Faktor K relevant.

Weberzahl: Die Weberzahl beschreibt das Verhältnis der kinetischen Energie und der Oberflächenenergie. Wenn die Weberzahl eines Tropfens eine kritische Schwelle überschreitet, so kann die Oberflächenspannung des Fluids überwunden werden und der Tropfen in kleinere Sekundärtröpfchen zerfallen [64]. Aus diesem Grund wird die Weberzahl oft zur Beschreibung von Zerfallsprozessen verwendet. Die Kennzahl berechnet sich aus der Dichte ρ , der Geschwindigkeit u , dem Durchmesser d und der Oberflächenspannung σ nach Gleichung 2.1.

$$We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma} \quad (2.1)$$

Reynoldszahl: Die Reynoldszahl beschreibt die Trägheitskräfte im Verhältnis zu der kinematischen Viskosität. Damit kann eine Aussage über die Stabilität einer Strömung getroffen werden, was als wichtige Kennzahl für Kronenspitze oder sich bildende Ligamente ist [64],[43]. Sie be-

rechnet sich aus der Geschwindigkeit u , dem Durchmesser d und der kinematischen Viskosität ν nach 2.2.

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (2.2)$$

K-Faktor: Hierbei handelt es sich um eine Kennzahl die aus der Reynolds- und der Weberzahl berechnet wird. In der Literatur wird diese empirisch eingeführte Größe verwendet, um Splashing-Effekte vorherzusagen. Es kann eine kritische Grenze K_{krit} gefunden werden, bei deren Überschreitung die Auftretenswahrscheinlichkeit für Splashing zunimmt. Die Kennzahl berechnet sich nach 2.3.

$$K = \sqrt{ReWe} \quad (2.3)$$

Neben der Berechnungsmethodik des K-Faktors ist auch die Bestimmung des Grenzwertes K_{krit} entscheidend. Hierfür sind in der Literatur unterschiedliche Werte beschrieben [32], [11]. Bestimmte Randbedingungen wie die relative Filmdicke oder die Fluideigenschaften können den Grenzwert jedoch verändern, weshalb ein exakter Grenzwert für einen konkreten Anwendungsfall vorbestimmt werden kann. In der Ergebnisdiskussion liegt deshalb der Fokus darauf, das tendenzielle Verhalten, welches in der Literatur beschrieben ist, nachzuweisen. Außerdem wird in Kapitel 5 jeweils ein Grenzwert mit einer möglichst hohen Relevanz aus der Literatur herangezogen, um die Beobachtungen einordnen zu können.

2.2.3 Geometrische Aufprallbedingungen

Die geometrischen Eigenschaften, die die Interaktionen beeinflussen, sind die Größe und der Auftreffwinkel der einfallenden Tröpfchen, aber auch die Dicke des vorhandenen Ölfilms. In zahlreichen Studien hat sich die relative Filmdicke H als normierte Kennzahl zur Bewertung der Größenverhältnisse bewährt. Dabei wird die Dicke des Flüssigkeitsfilmes in Relation zur Tropfengröße betrachtet, was durch Gleichung 2.4 aus dem Quotient zwischen der Filmdicke h und dem Tropfendurchmesser d berechnet wird.

$$H = h/d \quad (2.4)$$

In verschiedenen Arbeiten [64],[91] wird zwischen dem Aufprall eines Tropfens auf einen dünnen ($H < 1$) und einen tiefen, dicken Flüssigkeitsfilm ($H > 1$) unterschieden. Physikalisch ist diese Unterscheidung damit zu erklären, dass der Aufprall eines Tropfens auf einen dünnen Flüssigkeitsfilm wesentlich von der steifen Wand beeinflusst wird. Dieser Einfluss ist für den Aufprall auf einen dicken Flüssigkeitsfilm stark reduziert und nimmt mit steigender relativen Filmdicke weiter ab. Auf Splashingphänomene hat die relative Filmdicke ebenfalls einen deutlichen Einfluss. Nach [31] und [11] nimmt die Splashingwahrscheinlichkeit mit zunehmender relativer Filmdicke ab. Außerdem beeinflusst die Tröpfchengröße sowohl die Weber- als auch die Reynoldszahl direkt proportional (siehe Gl. 2.1 und 2.2).

Ein weiterer Parameter, der den Aufprall und auch das Splashingverhalten beeinflussen kann, ist der Auftreffwinkel [2], [55]. Bewegt sich der Tropfen senkrecht zu der Oberfläche der Flüssigkeit so bildet sich eine rotationssymmetrische Krone aus. Ist der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Tropfens und der Oberfläche kleiner als 90° spricht man vom schrägen Tropfenaufprall. Dies sorgt für eine unsymmetrische Ausbildung der Krone und ist in Abb. 2.2 e) dargestellt. Dies betrifft vor allem die Höhe der sich ausbildenden Krone. Während beim senkrechten Aufprall die Kronenhöhe konstant ist, kann sie beim schrägen Aufprall variieren. Dies beeinflusst die Stabilität der Krone und damit auch die Ausbildung von Splashingeffekten [42]. Der Auftreffwinkel beeinflusst außerdem den beim Aufprall übertragenen Impuls, weshalb dieser Parameter für die vollständige Beschreibung berücksichtigt werden muss. Die bisher vorgestellten, dimensionslosen

Kennzahlen müssen deshalb um einen winkelabhängigen Faktor erweitert werden. In [42] und [79] werden die Kennzahlen We' und K' hergeleitet, die nach den Gleichungen 2.5 und 2.6 berechnet werden. Da der Faktor $\sin^2 \phi$ lediglich Werte kleiner oder gleich 1 annehmen kann, sinkt demnach mit dem Auftreffwinkel die Auftrittswahrscheinlichkeit von Splashingeffekten. Außerdem konnte [79] zeigen, dass mit großem Auftreffwinkel die Deposition vergrößert, während bei kleinem Auftreffwinkel eine verstärkte Reflexion beobachtet werden kann.

$$We' = We \sin^2 \phi \quad (2.5)$$

$$K' = K \sin^2 \phi \quad (2.6)$$

2.2.4 Einfluss der Stoffeigenschaften

Außerdem können die Interaktionsprozesse durch die Fluide selbst beeinflusst werden. Interagieren unterschiedliche Fluide miteinander, spielen die unterschiedlichen Viskositäten, Dichten oder Oberflächenspannungen eine wichtige Rolle. Einige Studien beschreiben den Aufprall von unterschiedlichen Flüssigkeiten und weisen auf komplexe Einflüsse hin [31], [32]. Die Stoffeigenschaften haben demnach einen wesentlichen Einfluss auf das Splashingverhalten [42]. Dies führt dazu, dass der nach Gl. 2.3 berechnete K-Faktor den Grenzbereich von Splashingeffekten nur unzureichend beschreibt. Um den Einfluss der Fluideigenschaften zu berücksichtigen, wurde die Berechnungsmethodik des K-Faktors zur Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Splashing in [31] und [32] angepasst (K''). In [31] ist die Herleitung dieser empirischen Anpassung im Detail beschrieben. Für den Aufprall von Fluiden mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften sollte demnach der K-Faktor nach Gl. 2.7 berechnet werden.

$$K'' = \frac{\sqrt{d^3} \rho \sqrt{u^5}}{\sqrt{\bar{\nu} \bar{\sigma}}} \quad (2.7)$$

Die effektive Viskosität wird nach 2.8 berechnet.

$$\bar{\nu} = \frac{\sqrt{\nu_d^3} + \sqrt{\nu_f^3}}{\sqrt{\nu_d} + \sqrt{\nu_f}}, \quad (2.8)$$

Die effektive Oberflächenspannung wird nach 2.9 berechnet.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_d + \sigma_f}{2} \quad (2.9)$$

Mit dieser Berechnungsmethodik konnten die Vorhersagen für Splashingeffekte in [31], [32] wesentlich besser getroffen werden, weshalb diese Gleichung in dieser Arbeit verwendet wurde. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Auftrittswahrscheinlichkeit von Splashingeffekten für ein Viskositätsverhältnis $\bar{\nu}$ von ca. 1 maximal ist. Mit steigendem aber auch sinkendem $\bar{\nu}$ konnte ein reduziertes Splashingverhalten beobachtet werden. Um Stoffeigenschaften und geometrische Eigenschaften zu berücksichtigen, wird die zusammenfassende Größe K_{ges} eingeführt, welche sich nach Gl. 2.10 berechnet. Diese wird in Kapitel 6 und 7 verwendet, um Splashingeffekte vorherzusagen.

$$K_{ges} = K'' \sin^2 \phi \quad (2.10)$$

Neben den einzelnen Flüssigkeitseigenschaften beeinflusst auch die Mischbarkeit der Fluide den Aufprall. [84] untersuchte den Aufprall von nicht mischbaren Flüssigkeiten experimentell. Es konnte nachgewiesen werden, dass Sekundärtropfen sowohl Anteile vom Fluid des Tropfens als

auch des Films beinhalten, was in Abb. 2.3 dargestellt ist. Ähnliche Einflüsse konnten simulativ bereits von [32] beobachtet werden.



Abbildung 2.3: Tropfenaufprall auf Flüssigkeitsfilm mit unterschiedlichen, nicht mischbaren Fluiden [84]

Neben den Eigenschaften der flüssigen Phase, kann auch der Umgebungszustand das Aufprallverhalten beeinflussen. In verschiedenen Arbeiten wurde dieser Einfluss detailliert untersucht. In simulativen Untersuchungen konnte [41] keinen Einfluss des Umgebungsdrucks auf das Splashingverhalten feststellen, was von [98] bestätigt wurde. Andere Untersuchungen beobachteten jedoch, dass mit abnehmendem Umgebungsdruck ein reduziertes Splashingverhalten zu beobachten ist [96], [95], [14].

2.2.5 Mehrfachtropfen

Der Aufprall kann außerdem durch die Anzahl der Tropfen und dem zeitlichen Versatz zwischen den Einzelauftreffereignissen beeinflusst werden. Dieser Einfluss ist hier von entscheidender Bedeutung, da in dieser Arbeit ein Kraftstoffspray untersucht werden soll, welches aus einer Vielzahl an Tropfen besteht. Grundlegend kann unterschieden werden zwischen einem zeitlich simultanen und einem zeitlich versetzten Tropfenaufprall. [9] untersucht und vergleicht den Einzel- und Zwei-Tropfen-Aufprall. Cossali et al. [12] erweiterte die Anzahl der simultan auftreffenden Tropfen auf drei. Diese Experimente konnten in [17] simulativ nachgebildet und deren Erkenntnisse bestätigt werden. In [16] konnte der zeitliche Versatz zweier benachbarter, auftreffender Tropfen variiert und der Einfluss auf das Auftreffverhalten charakterisiert werden.

Treffen zeitgleich zwei Tropfen auf einen Flüssigkeitsfilm ist der Abstand beider Auftreffpunkte d_{2Tr} entscheidend. Jeder Aufprall erzeugt eine sich ausbreitende Krone, die anschließend aufeinandertreffen. Dieses Auftreffen wirkt als äußere Störung auf die zuvor stabile Krone und führt zu einer erhöhten Instabilität und damit zu einer Entstehung von Sekundärtropfen. Alle erwähnten Berichte zu Mehrfach-Tropfen-Aufprall konnten eine deutliche Erhöhung der Splashingwahrscheinlichkeit beobachten. Bestätigt werden diese Untersuchungen von weiteren Arbeiten [43], [81], [66]. Auch ein zeitlicher Versatz zwischen benachbartem Tropfenaufprall erhöht die Splashingeffekte. Auch hier wird die Krone eines Aufpralls durch die benachbarte und zeitlich versetzte Krone gestört und die Instabilitäten erhöht [16]. Reale Sprays sind jedoch deutlich komplexer, als die generischen Vergleichsexperimente. Das in dieser Arbeit verwendete Spray zum Beispiel besteht aus einer Vielzahl an Tröpfchen mit unterschiedlichen Größen und Geschwindigkeiten [45]. Das Spray, welches in dieser Arbeit verwendet wurde, verfügt über eine hohe Tröpfchendichte und damit eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass benachbarte Tröpfchen sich gegenseitig beeinflussen.