

# Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Kolbenmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir gebotene Freiheit bei der Gestaltung und Durchführung der Arbeit. Ich danke Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Dreizler für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher danke ich dafür, dass er mir den Weg ins Forschungsumfeld ermöglicht hat.

Für sein Verständnis, seinen Zuspruch und die immerwährende Unterstützung möchte ich mich bei meinem Gruppenleiter Herrn Jürgen Pfeil bedanken. Die vielen Gespräche rund um die Themen Optik, Brennkammerprüfstand, Öldosiereinheit und weit darüber hinaus haben zu einer angenehmen Schaffensatmosphäre beigetragen und somit einen großen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet. Dr.-Ing. Heiko Kubach, Dr.-Ing. Uwe Wagner und Dr.-Ing. Sören Bernhardt haben mich in ihren Funktionen als Gruppenleiter, Mentor und Betriebsleiter bei meinem Vorhaben unterstützt. Vielen Dank dafür!

Mein Dank gilt zudem allen ehemaligen Kollegen des Instituts für Kolbenmaschinen für die spannende, lehrreiche sowie zugleich humorvolle und kollegiale Zusammenarbeit. Persönlich bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei Dr.-Ing. Wolfgang Zulehner. Er ist mir bis heute ein Vorbild durch seine ruhige und sachliche Art. Vermittelt hat er mir den unerschütterlichen Glauben, dass es immer eine technische Lösung gibt, der zugleich die Basis für dieses Forschungsvorhaben ist. Bei Dr.-Ing. Helge Dageförde bedanke ich mich für seine Unterstützung und seinen Rat rund um das Thema Injektoren. Mit Dr.-Ing. Philipp Hügel, Dr.-Ing. Markus Bertsch, Dr.-Ing. Christian Disch und mit Kai Scheiber konnte man sich gut beim Kaffee über verbrennungsmotorische Themen und weit darüber hinaus austauschen. Gleiches gilt für den Austausch mit Dr.-Ing. Gerald Banzhaf. Allerdings stand man dabei eher an der frischen Luft, da er Kaffee ja nicht so mag. Zudem bedanke ich mich bei der Frohnatur Christoph Wesche für beinahe 5 Jahre Bürogemeinschaft. Jeden Morgen radelte er „mang den Gärten“ zur Arbeit und erschien frisch und fröhlich im Büro, um jedem, der nicht wie er dauerhaft ein Lachen auf dem Gesicht trug, augenscheinlich schlechte Laune zu unterstellen. Meinen Kollegen aus MOT-Zeiten Dr.-Ing. Clemens Hampe, Dr.-Ing. Thomas Matousek, Dr.-Ing. Marius Neurohr, Panagiotis Maniatis und Michael Rößler danke ich für die gemeinsame Zeit. Dazu zählen auch die Aktivitäten außerhalb des Institutsalltags, insbesondere die anfänglichen, gemeinsamen Donnerstagabende in Karlsruher Kneipen und die Kap-Abende, für die ich später auf Grund meiner familiären Situation leider immer weniger Zeit hatte. Gerne denke ich an diese willkommene Abwechslung vom Alltag zurück. Für den gut ausgeführten Prüfstands Aufbau bedanke ich mich bei Helge Rosenthal, mit dem man auch

gemeinsam mit Dr.-Ing. Sören Bernhardt in der „Neubau-Mittagspause“ allerlei technische und auch private Themen besprechen konnte. Eduard Oberländer und Dr.-Ing. Sören Bernhardt sorgten dafür, dass zusätzlich zur Installation der Schutzwand die Prüfstandstüren verstärkt wurden. Christian Stahl, Hendrik Schmied, Ernst Hummel und Ruben Klumpp standen mir bezüglich des Brennkammerprüfstands und der Fertigung der Öldosiereinheit mit Rat und Tat sowie mit ihren Teams zur Seite. Vielen Dank hierfür! Im Laufe meiner Institutszeit durfte ich mit einer Vielzahl an Studenten zusammenarbeiten. Deren gesamtheitliche Auflistung würde den Rahmen dieses Vorwortes sprengen. Einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Arbeit haben die ehemaligen Studenten Patrick Härdtner, Martin Prinzen, Tobias Bezner, Fabian Weitz, Thomas Gal, Yannik Abelmann und Theodor Wikström geleistet.

Stellvertretend für alle Mitarbeiter der Mercedes-Benz Group AG, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben, bedanke ich mich besonders bei Herrn Dr.-Ing. Frank Altenschmidt für die Betreuung und den fachlichen Rat. Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Anton Waltner dafür bedanken, dass er das Projekt ermöglicht hat sowie für sein offenes Ohr und für sein fortwährendes Interesse am Projekt. Auch bei meinen aktuellen Teamkolleginnen und -kollegen möchte ich mich für ihre Unterstützung bedanken. Insbesondere mein ehemaliger Teamleiter Herr Dr.-Ing. Daniel Hertler hat mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln dafür gesorgt, dass ich das Vorhaben erfolgreich zu Ende bringen konnte.

Großer Dank gilt auch unseren Freunden aus dem privaten Umfeld, die mit diversen Treffen am Wochenende die Laune hoch hielten. Besonders herzlich möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Meine Eltern haben zu Lebzeiten meine Neugierde gefördert, mir verschiedene Perspektiven auf die Welt vermittelt sowie vielfältige Interessen mitgegeben. Sie haben mir meine Ausbildung ermöglicht und vor allem die Freiheit gelassen, meinen eigenen Lebensweg zu gehen. Wie gerne hätte ich in den letzten Jahren noch das ein oder andere mit ihnen diskutiert oder mir ihren Rat geholt. Außerdem bedanke ich mich bei meiner Tante und meinem Onkel für ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht. Ohne Tante Ilses Kuchen hätte ich wahrscheinlich so manche spätabendliche Bürosession während der Schreibphase völlig unterzuckert und ohne erkennbaren Fortschritt beenden müssen. Vielen Dank an meine Schwiegereltern, dass sie mich wie selbstverständlich in ihre Familie aufgenommen haben und seit jeher Unterstützung geben, wo auch immer diese gerade notwendig ist. Aus tiefstem Herzen danke ich meinem Mann Daniel für sein Verständnis, den Rückhalt auch in schwierigen Zeiten, seine Geduld und die Unterstützung mit Rat und Tat. Du und unser kleiner Sohn, Ihr schafft es in jeglicher Situation, ein Lächeln auf mein Gesicht oder in meine Sinne zu zaubern! Vielen Dank dafür! Fühlt Euch umarmt!

Rheinstetten, im Juni 2023

Ina Volz

# 1 Einleitung

In der Gesellschaft ist eine intensive Diskussion über die Ursachen und Folgen des Klimawandels entstanden, die die politischen Entscheidungsträger der Europäischen Union zum Handeln auffordert. Daraus ergibt sich ein Zielkonflikt aus den Mobilitätswünschen der modernen Gesellschaft, technisch sehr ehrgeizigen CO<sub>2</sub>-Zielen und immer stringenteren Emissionsvorschriften. In Zukunft wird nur ein vertieftes Verständnis der Verbrennungsprozesse eine weitere Verringerung der Schadstoffemissionen und eine Erhöhung der Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren ermöglichen.

Bei Ottomotoren wird mit dem Ziel der Effizienzsteigerung auf die Prinzipien des Downsizing und Downspeeding gesetzt und bei deren Realisierung auf das Mittel der Aufladung zurückgegriffen. Unter dem Begriff „Aufladung“ werden alle Verfahren zusammengefasst, bei denen die dem Motor zugeführte Frischluft eine Dichte höher als die der Umgebungsluft aufweist [67]. Bei Downsizing und konsequentem Downspeeding erfolgt eine Betriebspunktverlagerung zu niedrigeren Drehzahlen und höheren spezifischen Leistungen. Bei gleicher Leistungsanforderung kann der Verbrennungsmotor somit mit besserem thermischem Wirkungsgrad und somit geringerem spezifischem Kraftstoffverbrauch betrieben werden. Dies gilt insbesondere für Turbomotoren mit Direkteinspritzung, da diese durch die verbesserte Innenkühlung auf Grund der Direkteinspritzung bei hohen Verdichtungsverhältnissen betrieben werden können [82]. Nachteil dieses Technologiepakets ist jedoch das mögliche Auftreten von Vorentflammungen. Als Vorentflammung wird eine Selbstzündung des Benzin-Luft-Gemischs vor dem applizierten Zündzeitpunkt bezeichnet [15]. Diese unerwünschten Verbrennungsphänomene treten insbesondere in niedrigen Drehzahlbereichen bei hohen Lasten auf [25] und zeichnen sich durch ihr stochastisches Auftreten und ihr hohes Zerstörungspotenzial aus.

In der Vergangenheit fanden bereits zahlreiche Vorentflammungsuntersuchungen für unterschiedlichste Randbedingungen und Motorkonfigurationen statt. Die daraus abgeleiteten Hypothesen sind nicht zwingend allgemeingültig und die Details zu den Ursachen initialer Vorentflammungen bis heute nicht vollständig geklärt. Die Anzahl grundlagenorientierter, motorunabhängiger Untersuchungen ist dagegen deutlich geringer.

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten, grundlagenorientierten Untersuchungen von Selbstzündprozessen soll ein Beitrag zur Analyse möglicher Ursachen initialer Vorentflammungen und somit indirekt zu deren Vermeidung erbracht werden.

Insbesondere die Stochastik im Auftreten von Vorentflammungen macht diese und ihre Ursachen schwer greifbar. So stellt sich in jeder Fachdiskussion zum Thema Vorentflammungen früher oder später die zentrale Frage, warum in manchen Arbeitsspielen des entsprechenden Verbrennungsmotors Vorentflammungen auftreten und in anderen Zyklen desselben Betriebspunkts nicht.

## *1 Einleitung*

Um zur Beantwortung dieser Frage einen Beitrag leisten zu können, standen zu Beginn der Arbeit Überlegungen, wie die Ursachen initialer Vorentflammungen möglichst ohne Motorversuch und damit grundlagenorientiert und reproduzierbar untersucht werden können.

Wie im Grundlagenteil ersichtlich, existieren im Wesentlichen drei Haupt-Hypothesen zu möglichen Ursachen der initialen Vorentflammung. So gelten heiße Partikel, Öltröpfen oder Kraftstoff-Öl-Tropfen als die wahrscheinlichsten Auslöser einer vorzeitigen Entflammung des sie umgebenden, weitestgehend gasförmigen Benzin-Luft-Gemischs. Dieser Mechanismus wird im Folgenden als Selbstzündung bezeichnet.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Gestaltung eines experimentellen Modellversuchs zur Untersuchung schmierölinduzierter Selbstzündungsprozesse und deren wissenschaftlicher Analyse. Dabei wird auf die Hypothese der Öltröpfen sowie auf die Hypothese der Kraftstoff-Öl-Tropfen als potenzielle Ursachen einer Selbstzündung eingegangen.

Für die systematische Untersuchung der schmierölinduzierten Selbstzündung werden im Rahmen der Arbeit ein optisch zugängliches Hochdruck-Hochtemperatur-Brennkammersystem, die „Combustion Cell“, und zusätzlich eine Dosierkomponente für kleine Mengen sehr heißen Motorenöls entwickelt. Zusammen mit der Analyse der Selbstzündprozesse bilden diese beiden Neuentwicklungen die Schwerpunkte dieser Arbeit. Als Besonderheit ist die grundlagenorientierte, wissenschaftliche Herangehensweise zu nennen, die sich wesentlich von derjenigen bei motorischen Vorentflammungsuntersuchungen unterscheidet. Mit dem Ziel einer hohen Reproduzierbarkeit wurde bewusst die Entscheidung getroffen, eine Konstantvolumenbrennkammer zu entwickeln, um die Komplexität zu reduzieren und die Interaktion von Teilprozessen, wie sie aus dem Verbrennungsmotor bekannt sind, gezielt zu minimieren.

Nach einem Überblick über die breit gefächerten, zu berücksichtigenden Grundlagen werden die Ableitung des Modellversuchs und die Entwicklung des optisch zugänglichen Hochdruck-Hochtemperatur-Brennkammerprüfstandes samt der Entwicklung der hochdruck- und hochtemperaturfähigen Öldosierung und Ölkonditionierung beschrieben. Anschließend wird nach einem kurzen Abriss über die Analysemethoden auf die Analyse der Selbstzündung und der Dosierung von Motoröl-Surrogat eingegangen.

Am neuentwickelten Brennkammerprüfstand kann eine Vielzahl optischer Methoden realisiert werden. Bei Voruntersuchungen wurden beispielsweise Highspeed-Chemilumineszenz-Aufnahmen im Homogenbetrieb aufgenommen. Zur Analyse der Selbstzündung wurde das Highspeed-Schattenverfahren in unterschiedlichen Konfigurationen realisiert, je nach Fokussierung auf den maximalen Sichtbereich, die Detailanalyse einzelner Tropfen oder die Selbstzündereignisse. Bei der Analyse der Selbstzündung wird sowohl auf den Einfluss des Kalziumanteils im Motoröl-Surrogat auf die Randbedingungen für die Selbstzündung als auch auf den Zündverzug eingegangen. Der Einfluss des Kraftstoffanteils im Motoröl wird ebenfalls analysiert. Den Abschluss bildet eine Detailanalyse der Öldosierung und der Selbstzündung.

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das breite Feld der Grundlagen, das sich vor dem Hintergrund des neuen Ansatzes zur Analyse schmierölinduzierter Selbstzündungen ergibt. Die Grundlagen zum Zerfall von Flüssigkeiten und zu den Eigenschaften von Motoröl werden in aller Kürze beschrieben, um das Kapitel mit einer Literaturrecherche zu Vorentflammungsuntersuchungen zu beschließen. Für weiterführende Informationen sei auf die jeweils angegebenen Literaturquellen verwiesen.

### 2.1 Zerfall von Flüssigkeiten

Beim Austritt eines Flüssigkeitsstrahls aus einer Düse zerfällt dieser auf Grund fehlender Wandbegrenzungen und der inneren Turbulenz in Tropfen [24].

Der Strahlzerfall ist im Wesentlichen abhängig von der Relativgeschwindigkeit und beherrscht von verschiedenen Aufbruchsmechanismen, welche in der Regel charakterisiert werden durch den Abstand zwischen Düse und dem Punkt der ersten Tropfenbildung („break-up length“) sowie durch die entstehenden Tropfengrößen [8].

Abhängig von der Reynoldszahl und der Ohnesorge-Zahl gibt es unterschiedliche Bereiche des Strahlzerfalls. Diese sind in Abbildung 2.1 links im Ohnesorge-Diagramm dargestellt. Rechts ist die Phänomenologie des jeweiligen Zerfallsregimes veranschaulicht.

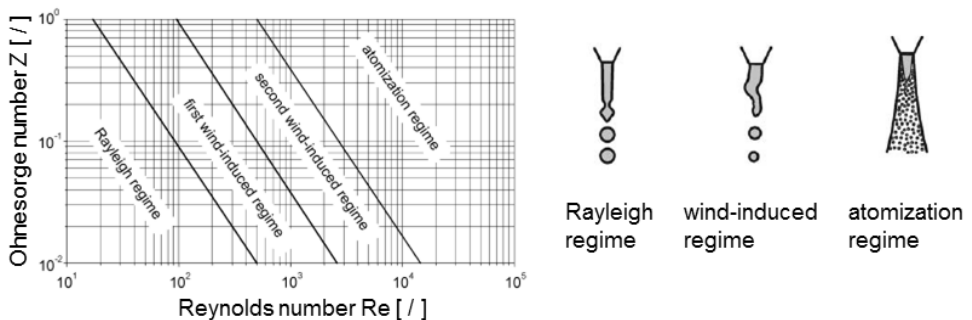


Abbildung 2.1: *links:* Zerfallsbereiche eines Flüssigkeitsstrahls [8];

*rechts:* Schematische Beschreibung der Strahlauflösungs-Regime [8]

Es gelten für die Strahlauflösung und Zerstäubung das Webersche Ähnlichkeitsgesetz der Kapillarität und das Reynoldssche Ähnlichkeitsgesetz der Zähigkeitsreibung [56].

Hierbei spiegelt die Flüssigkeits-Weberzahl  $W_e$  das Verhältnis aus Trägheit und Oberflächenspannung wider:

$$W_e = \frac{\rho_{fl} v_{Aus}^2 d}{\sigma_{fl}} \quad (2.1)$$

Die Reynoldszahl ist definiert als das Verhältnis aus Trägheit und Scherwirkung:

$$R_e = \frac{\rho_{fl} v_{Aus} d}{\dot{\eta}} \quad (2.2)$$

Ohnesorge definiert schließlich für das Zusammenwirken der beiden o.g. Ähnlichkeitsgesetze die später nach ihm benannte dimensionslose Zahl  $Z$ :

$$Z = Oh = \frac{\sqrt{W_e}}{R_e} = \frac{\dot{\eta}}{\sigma_{fl} d \rho_{fl}} \quad (2.3)$$

Mit Blick auf die Geschwindigkeit der Tropfenfolge unterscheidet Ohnesorge [56] vier Fälle:

- Ohne Strahlbildung tritt ein langsames Abtropfen von der Düse auf. Ursächlich hierfür ist die Gewichtswirkung [56].
- Im Rayleigh-Regime erfolgt die Auflösung des Flüssigkeitsstrahls unterhalb der Düse durch Zertropfen [56], [24].
- Schließlich gibt es einen wellenartigen Zerfall [24], in Abbildung 2.1 links durch die beiden mittleren Regime veranschaulicht.
- Die Zerstäubung des Strahls [56], die in der Regel bei der Benzindirekteinspritzung von Relevanz ist [24].

Das Abtropfen der Flüssigkeit von der Düse ohne Strahlbildung ist die Vorstufe des Rayleigh-Zerfalls [24]. Diese Zerfallsform tritt bei sehr niedrigen Austrittsgeschwindigkeiten auf [8].

Der sich bildende Tropfen vergrößert sich so lange bis die Gewichtskraft größer ist als die Oberflächenkraft, infolgedessen er sich schließlich von der Düse ablöst [24].

Beim sog. Rayleigh-Zerfall bildet sich bei einer Steigerung der Austrittsgeschwindigkeit unterhalb der Düse zunächst eine ungebrochene Flüssigkeitssäule aus. Die Flüssigkeit beginnt zu zertropfen infolge eines Ansteigens der achsensymmetrischen Schwingungen des kompletten Strahlvolumens. Dies wird ausgelöst durch die Trägheits- und Oberflächenkräfte der Flüssigkeit. Wird die Austrittsgeschwindigkeit weiter gesteigert, so vergrößert sich in diesem Regime zunächst die Flüssigkeitssäule [8]. Die Flüssigkeitssäule ist deutlich länger als der Düsendurchmesser. Die entstehenden Tropfen sind ebenfalls größer als der Durchmesser der Düse [24].

Im ersten windinduzierten Regime werden die Kräfte des Rayleigh-Zerfalls durch aerodynamische Kräfte verstärkt und die Weber-Zahl zur Beschreibung der umgebenden Gasphase wird relevant. Wird die Geschwindigkeit des Strahls weiter gesteigert, verkürzt sich die sog. break-up length wieder, beträgt aber dennoch ein Vielfaches des Düsendurchmessers. Die durchschnittliche Tropfengröße sinkt und liegt nun im Bereich des Düsendurchmessers [8].

Beim zweiten windinduzierten Zerfall wird die Strömung innerhalb der Düse turbulent. Der Durchmesser der entstehenden Tropfen ist kleiner als der Düsendurchmesser [8].

Wird die Austrittsgeschwindigkeit noch weiter gesteigert, so beginnt das Spray direkt an der Düse. Der Strahlaufbruch in diesem Zerstäubungsregime ist deutlich komplexer als in den anderen Regimen und hängt von den Strömungsbedingungen im Düseninneren ab. Diese sind meist unbekannt und von chaotischer Natur. Die so entstandenen Tropfen sind deutlich kleiner als der Düsendurchmesser. Dieses Regime ist in der Regel relevant für Kraftstoffsprays in Verbrennungsmotoren und war daher bereits Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. So wird beispielsweise die Düseninnenströmung von Sitzlochinjektoren für die Benzindirekteinspritzung mit Hilfe von optischer Messtechnik in [24] untersucht. In [37] erfolgt die detaillierte, numerische Untersuchung von Gemischbildung und Verbrennung in einem Ottomotor mit strahlgeführter Direkteinspritzung.

Reitz [71] bezieht das Verhältnis aus Gasdichte zu Flüssigkeitsdichte mit ein und leitet daraus das folgende Diagramm zur Beschreibung des Strahlzerfalls ab (vgl. Abbildung 2.2). Aus diesem Diagramm wird ersichtlich, dass eine Zerstäubung des Strahls bereits bei niedrigeren Einspritzgeschwindigkeiten erreicht werden kann, indem in verdichtetes Gas eingespritzt wird [71].

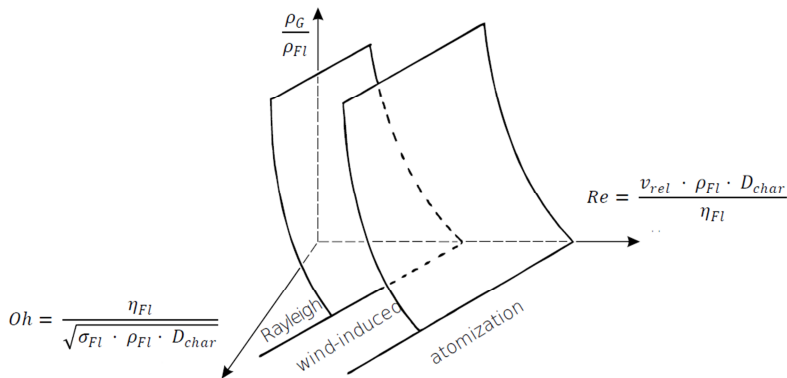


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Einflusses der Gasdichte auf den Strahlzerfall nach Reitz [9], [71]