

# 1

## Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit der Untersuchung von Wasser-in-Benzin-Emulsionen. Allgemein handelt es sich bei Emulsionen um Dispersionen aus mindestens zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten. Eine der beiden Flüssigkeiten liegt dabei als innere Phase in Tropfenform vor, welche in der anderen Flüssigkeit, der so genannten äußeren Phase verteilt sind. Hauptanwendungsgebiete für Emulsionen finden sich in der Chemie- und Lebensmittelindustrie. Das wohl prominenteste Beispiel aus dem alltäglichen Leben ist Milch. Es handelt sich dabei letztlich um mikroskopisch kleine Fetttropfchen, verteilt in Wasser. Daraus resultiert auch die optisch intransparente, weißliche Erscheinung, als allgemeines Merkmal von Emulsionen. Wasser-Kraftstoff-Emulsionen finden Anwendung bei der Optimierung von Verbrennungsprozessen. Für die hier betrachtete ottomotorische Verbrennung führt die Verdampfung des flüssig zugeführten Wassers in den Brennraum zu einem günstigeren thermischen Zustand kurz vor der Verbrennung. Die Neigung des Gemischs, sich teilweise vorzeitig zu entzünden, das so genannte Klopfen, wird dadurch vermindert. Es lässt sich früher und damit Wirkungsgrad optimiert zünden. Durch die Temperaturreduktion und die frühere Zündung sinkt zudem die Abgastemperatur. Auf die in der Vergangenheit häufig genutzte Gemischanreicherung zum Schutz der Bauteile im Abgasstrang, wie Turbolader oder Katalysator, vor zu großer thermischer Belastung kann dadurch im Optimalfall verzichtet werden. Die Hauptmotivation zum Einspritzen einer Wasser-in-Benzin-Emulsion ist also das Kraftstoff- und das damit einhergehende CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial. Nicht zu vernachlässigen ist aber auch das Potenzial zur Verminderung der Stickoxidemissionen durch die verminderten Temperaturen im Verlauf der Verbrennung. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, den Stand der Wissenschaft zu solchen Emulsionen zu erweitern. Im Detail bedeutet dies zu verstehen, welche Emulsionseigenschaften für die Verwendung im Einspritzsystem des Motors relevant sind und wie sich diese letztlich gezielt beeinflussen lassen und zwar

unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette von der Emulsionserzeugung über die Einspritzung bis hin zur Verbrennung.

### 1.1 Motivation

Durch den immer weiter fortschreitenden Klimawandel sollte allen Menschen in den Industrieländern der Erde mittlerweile bewusst geworden sein, welchen Schaden der übermäßige Ausstoß von Treibhausgasen anrichtet. In 2022 war der Inlandtransportsektor für 24 % der Treibhausgasemissionen in der EU verantwortlich [1]. Damit besitzt dieser nach dem Bereich der Energieversorgung den zweitgrößten Anteil. Die Minimierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Mobilitätsbereich bietet daher großes Potenzial, die Treibhausgasemissionen zu senken. Die Klimaziele der EU sehen vor, bis 2030 eine Reduzierung der Netto-Treibhausgasemissionen um 55 % ausgehend von dem Niveau des Jahres 1990 zu erreichen [2]. Bis 2050 wird die vollständige Klimaneutralität angestrebt [2]. Für PKW und leichte Nutzfahrzeuge hat sich der EU-Umweltrat folglich darauf verständigt, dass ab 2035 nur noch CO<sub>2</sub>-neutrale Antriebsarten bei Neuzulassungen erlaubt sein werden. Dies beinhaltet allerdings auch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die ausschließlich mit regenerativen synthetischen Kraftstoffen, so genannten „eFuels“, betankt werden [3]. Nicht zuletzt durch diese klaren europäischen Ziele befindet sich die gesamte Automobilindustrie im Umbruch. Fahrzeug- und Antriebssystemhersteller forschen überwiegend an klimaneutralen Antriebstechnologien. Bei PKW wurde in den letzten Jahren vermehrt auf batterieelektrische Antriebe gesetzt, welche bereits einen nicht vernachlässigbaren Anteil bei den Zulassungszahlen erreicht haben. Bei den Neuzulassungen stieg deren Anteil in der EU ausgehend von 5 % im Jahr 2020 auf 12 % in 2022. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt sind Brennstoffzellen, vor allem mit dem Fokus auf Nutzfahrzeuge [4, 5]. Nichtsdestotrotz wird weiterhin am Potenzial des Verbrennungsmotors geforscht: sei es die Wasserstoffverbrennung [6], die Entwicklung flüssiger regenerativer Kraftstoffe [7] oder neue Brennverfahren, um die Effizienz weiter zu steigern, wie zum Beispiel die Vorkammerzündung bei Ottomotoren [8]. Diese technologieoffene Forschung ist überaus wichtig. Zum einen lassen sich die ehrgeizigen Klimaziele in Europa nicht alleine mit batterieelektrischen Fahrzeugen lösen, weil es noch an der fehlenden flächendeckenden Ladeinfrastruktur und der notwendigen zusätzlichen Kapazitäten im Stromnetz mangelt. Zum anderen ist es unwahrscheinlich, dass die Stromerzeugung bis 2035 auf ausschließlich regenerative Energien umgestellt werden kann. Global gesehen müssen zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden. Zum Beispiel sind in spärlicher besiedelten Regionen der Erde mit fehlender Infrastruktur flüssige Kraftstoffe, ob fossil oder regenerativ, als Energieträger mit hoher Energiedichte weiterhin alternativlos. Der Verbrennungsmotor als ausgereifte und robuste Technologie bietet hier das größte Potenzial.

Es ist daher wahrscheinlich, dass es in den nächsten Jahren zu einer Ergänzung verschiedener Antriebskonzepte und Verkehrsinfrastrukturen im Personen- und Warentransport kommen wird, um die lokal unterschiedlichen Anforderungen und Voraussetzungen einzelner Länder und Regionen berücksichtigen zu können. Darüber hinaus sind divergierende Antriebskonzepte für unterschiedliche Fahrzeugkategorien nötig, denn an schwere Nutzfahrzeuge werden andere Anforderungen gestellt als an einen City-PKW. Aus Kundensicht sind die aktuell noch langen Ladezeiten und die geringe Reichweite sowie die hohen Anschaffungskosten häufig ausschlaggebend, um sich gegen die Anschaffung eines batterieelektrischen Fahrzeugs zu entscheiden. Bei der Weiterentwicklung verbrennungsmotorischer Antriebe mit dem Fokus auf Effizienzsteigerung ist die Wassereinspritzung eine vielversprechende Technologie. Die Einspritzung einer Emulsion direkt in den Brennraum des Motors stellt dabei eines der effektivsten Konzepte dar, wie mehrfach in der Literatur nachgewiesen wurde, unter anderem in [9, 10, 11, 12]. Die Analyse der Erzeugung und Einspritzung solcher Emulsionen und deren Eigenschaften standen aber bisher nicht im Fokus der Forschungsaktivitäten. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, einen Beitrag zur Schließung dieser Lücke in der Literatur zu leisten.

## 1.2 Zielsetzung

Die Kenntnis der Eigenschaften von Wasser-in-Benzin-Emulsionen sowie die Möglichkeiten zu deren gezielten Beeinflussung sind von essenzieller Bedeutung für die Entwicklung von Emulsions-Einspritzsystemen, welche das gesamte Potenzial dieser Technologie ausschöpfen. Daher sollen im Rahmen dieser Arbeit zwei Prototyp-Einspritzsysteme gegenübergestellt werden, bei denen auf unterschiedliche Weise kurzzeitstabile Emulsionen ohne den Einsatz von Emulgatoren erzeugt werden, mit dem Ziel, eine ganzheitliche Analyse, ausgehend von der Erzeugung der Emulsion über die Einspritzung bis hin zur Verbrennung, durchzuführen. Dabei sollen die Erzeugung der Emulsion analysiert und mögliche Beeinflussungen der Emulsionsqualität auf Spray und Verbrennung aufgedeckt werden. Es wurden daher folgende Analyseschwerpunkte festgelegt:

Zur Erfassung der Emulsionseigenschaften sollen die Einspritzsysteme an einem eigens entwickelten Prüfstand betrieben werden, und die relevanten Eigenschaften der Emulsion sind direkt im Einspritzsystem ohne eine mögliche Verfälschung durch Entmischungsprozesse zu quantifizieren. Ferner steht das Einspritzverhalten im Fokus. Es ist nicht hinreichend bekannt, wie sich nichtstabilisierte Emulsionen in ihrem Einspritzverhalten von reinem Ottokraftstoff unterscheiden. Daher soll auch das Emulsionspray quantitativ bewertet werden. Die Funktionsfähigkeit beider Einspritzkonzepte zu analysieren ist von großer Bedeutung. Daher werden sie an einen Vierzylinder-Versuchsmotor adaptiert, sodass am Motorprüfstand ein Systemvergleich stattfinden

kann. Neben der Funktionsfähigkeit gilt es die Beeinflussung von Verbrennung und Emissionen durch die Emulsion zu untersuchen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in den Grundlagenteil und den Ergebnisteil. In ersterem werden die theoretischen Hintergründe zur ottomotorischen Verbrennung und zur Kraftstoffzerstäubung zusammengefasst. Dabei werden der Strahlerfall von Flüssigkeiten sowie der Stand der Technik von Benzineinspritzsystemen erläutert. Ferner wird die Wassereinspritzung im ottomotorischen Kontext umfangreich beleuchtet und deren Stand der Forschung vorgestellt. Es wird das grundlegende thermodynamische Wirkprinzip erläutert sowie auf den Einfluss des Wassers auf die reglementierten Emissionen eingegangen. Zudem werden die bisher aus der Forschung bekannten Einspritzkonzepte beschrieben und gegenübergestellt. Im weiteren Verlauf erfolgt eine Einführung in die Eigenheiten von Emulsionen, um dem Leser ein entsprechendes Grundverständnis zu vermitteln. Besprochen werden deren Definition, die Eigenschaften von Grenzflächen, die Rheologie sowie die zeitliche Stabilität. Ein besonderes Augenmerk wird zudem auf den Stand der Forschung von Wasser-in-Benzin-Emulsionen gelegt.

Zu Beginn des Hauptteils werden die beiden Prototyp-Einspritzsysteme, das On-Injector- und das Single-HPP-System vorgestellt, deren Aufbau geschildert und gegenübergestellt. Anschließend wird die Analyse der Emulsionsqualität im Einspritzsystem diskutiert. Der Fokus liegt hier auf dem Hauptqualitätsparameter einer Emulsion, der Tropfengrößenverteilung der inneren Phase, im hiesigen Falle Wasser. Untersucht wird, welche Einflüsse durch die Betriebsbedingungen sowie den Wasseranteil der Emulsion bestehen. Zudem werden beide Einspritzkonzepte miteinander verglichen. Außerdem erfolgt eine Gegenüberstellung der experimentellen Ergebnisse mit numerischen Simulationen, um deren Eignung für die Vorhersage der Emulgierung von Wasser und Benzin zu bewerten. Darüber hinaus wird eine Analyse der Emulsionsstabilität im Einspritzsystem mit Hilfe von Entmischungsversuchen durchgeführt. Anschließend werden die Untersuchungen zum Einspritzverhalten der Emulsion diskutiert. Auch hier liegt das Hauptaugenmerk auf den Einflüssen durch verschiedene Betriebsbedingungen und variierende Emulsionsqualität. In einer tiefergehenden Analyse wird außerdem untersucht, welche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen geeignet sind, um die experimentellen Verteilungen abzubilden und ob empirische Modelle aus der Literatur zur Vorhersage der vorliegenden Messergebnisse dienen können. Der dritte und letzte Untersuchungsschwerpunkt befasst sich mit dem Verhalten der beiden Einspritzsysteme im Motorbetrieb. Ziel ist es, die grundlegende Funktionsfähigkeit der Konzepte zu bewerten sowie die Einflüsse der Emulsion auf die Verbrennung und die resultierenden Emissionen zu untersuchen. Zum einen soll dies in der Vollast und zum anderen in

Betriebspunkten mit höherer Teillast, bei denen gerade noch ein stöchiometrisches Gemisch ohne Wassereinspritzung erreicht werden kann, erfolgen.



# 2

## Grundlagen und Stand der Forschung

### 2.1 Kraftstoffzerstäubung

Die Kraftstoffzerstäubung ist sowohl beim Otto- als auch beim Dieselmotor entscheidend für die Gemischbildung. Damit beeinflusst sie die Verbrennung sowie die Schadstoffbildung. Die Einspritzung stellt daher einen überaus relevanten Forschungsbereich dar. Ferner ist die Flüssigkeitszerstäubung allgemein von großer Relevanz: angefangen von medizinischen Sprays zur Applikation von Arzneimitteln, über die Zerstäubung von Pflanzenschutzmitteln bis hin zur Sprühtrocknung von Lebensmitteln, um nur einige Beispiele zu nennen. Der fluiddynamische Prozess der Flüssigkeitszerstäubung ist komplex. Neben der Interaktion der Flüssigkeit mit dem sie umgebenden Gas spielt der Energieaustausch in Form von Wärme und Bewegungsenergie allgemein eine wichtige Rolle. Darüber hinaus sind Stofftransporte sowie chemische Reaktionen zwischen den Fluiden bei bestimmten Anwendungen von Bedeutung.

#### 2.1.1 Strahlzerfall

Die überwiegende Anzahl an Kraftstoffeinspritzventilen ist mit Lochdüsen ausgestattet. Beim Einspritzen entsteht ein Flüssigkeitsstrahl, der mit hoher Geschwindigkeit in die Gasatmosphäre eindringt. Der Strahlzerfall läuft kaskadiert ab: Der Strahl zerfällt zunächst im Düsennahbereich in Primärtropfen. Im weiteren Verlauf der Strahlausbreitung tritt Sekundärzerfall auf. Dabei werden die aus dem Primärzerfall resultierenden Elemente auf Grund der Interaktion mit der Gasphase weiter aufgebrochen.

##### 2.1.1.1 Primärzerfall

Grundlagenuntersuchungen zeigten, dass sich der Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen in Abhängigkeit der Düsenaustrittsgeschwindigkeit in verschiedene Zerfallsbereiche einord-

## 2. Grundlagen und Stand der Forschung

---

nen lässt. Diese unterscheiden sich maßgeblich hinsichtlich der Strahl-Aufbruchlänge (Länge des zusammenhängenden Flüssigkeitsstrahls nach Austritt aus der Düse) sowie der Primärtropfengröße. Durchgesetzt hat sich die Einteilung in vier Zerfallsbereiche auf Basis der Arbeit von Ohnesorge [13] durch Reitz [14]. Mit Hilfe der dimensionslosen Kenngrößen Reynolds-Zahl und Ohnesorge-Zahl lässt sich der Zerfall in die vier Bereiche einordnen. Die Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften eines Fluids. Das charakteristische Längenmaß ist in diesem Fall der Düsenlochdurchmesser  $d_D$ :

$$Re = \frac{\rho_F u_0 d_D}{\eta_F}. \quad (2.1)$$

Die von Wolfgang von Ohnesorge eingeführte und nach ihm benannte Ohnesorge-Zahl beschreibt den Zusammenhang zwischen Zähigkeits- und Oberflächenkräften [13]:

$$Oh = \frac{\eta_F}{\sqrt{\sigma_O \rho_F d_D}}. \quad (2.2)$$

Die Ohnesorge-Zahl kann auch durch die Weber- und Reynolds-Zahl berechnet werden:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re}. \quad (2.3)$$

Die Weber-Zahl definiert das Verhältnis von Trägheits- zu Oberflächenkräften. Sie wird häufig als Maß für die Güte des Tropfen- oder Strahlzerfalls herangezogen:

$$We = \frac{\rho_F u_0^2 d_D}{\sigma_O}. \quad (2.4)$$

Das Ohnesorge-Diagramm ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Ohnesorge-Zahl ist auf der Ordinate des Diagramms aufgetragen und die Reynolds-Zahl auf der Abszisse. Bei konstanten Stoffeigenschaften und steigender Düsenaustrittsgeschwindigkeit ergibt sich eine lineare Verschiebung parallel zur Abszisse, welche die Zerfallsbereiche ausgehend vom Rayleigh-Bereich bis zur Atomisierung durchläuft. Dementsprechend wird die Zerfallsgüte maßgeblich durch die Strahlgeschwindigkeit am Düsenaustritt bestimmt. Die Strahlerscheinung unterscheidet sich deutlich in den einzelnen Zerfallsbereichen, siehe Abbildung 2.2. Des Weiteren unterscheiden sich die physikalischen Vorgänge teilweise:

**Rayleigh-Zerfall:** Der Bereich ist benannt nach dem Nobelpreis-Träger Lord Rayleigh, welcher Ende des 19. Jahrhunderts eine bedeutsame mathematische Analyse des Strahlzerfalls durchgeführt hat [17]. Sie kann als Grundstein aller folgenden theoretischen Analysen gesehen werden. Ausgehend vom Abtropfen einzelner Flüssigkeitselemente an der Düse bildet sich im Rayleigh-Bereich mit zunehmender Düsenaustrittsgeschwindigkeit ein länger werdender zusammenhängender



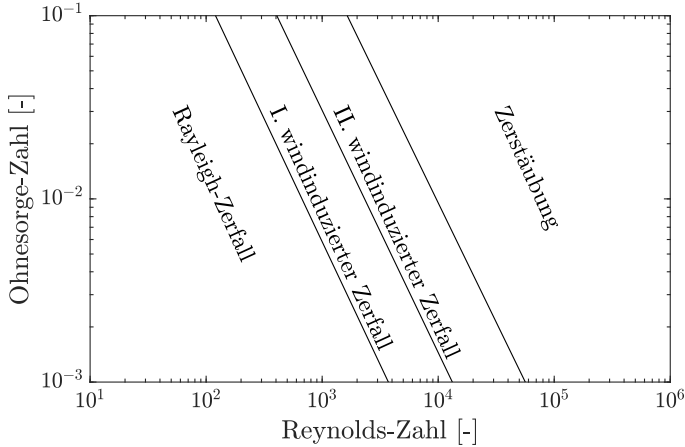
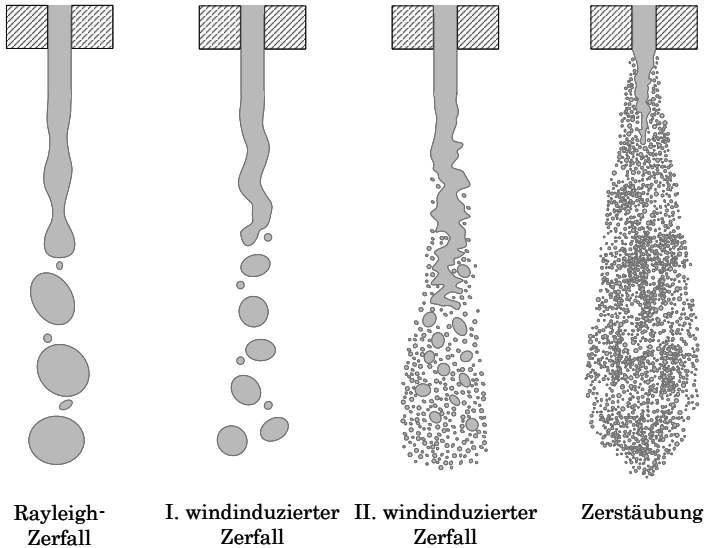


Abbildung 2.1: Ohnesorge-Diagramm nach [14]

Flüssigkeitsstrahl aus. Axialsymmetrische Schwingungen der Strahloberfläche führen zum Abschnüren von einzelnen Tropfen und damit zum Strahlzerfall. Dominierend für den Zerfall sind hier Oberflächenspanungskräfte [15, 18]. Der Durchmesserbereich der resultierenden Tropfen liegt oberhalb des ungestörten Strahl- respektive Düsenlochdurchmessers. Beim Abreißen des Flüssigkeitsfadens entstehen zudem einige deutlich kleinere Tochtertropfen.

**I. windinduzierter Zerfall:** Mit steigender Strahlgeschwindigkeit sinkt hier die Strahl-Aufbruchlänge. Der Flüssigkeitsstrahl weist eine sinusartige Wellenform auf. Der Einfluss aerodynamischer Kräfte durch die den Strahl umgebende Gasphase steigt. Die resultierenden Tropfendurchmesser entsprechen näherungsweise dem Strahldurchmesser am Austritt aus der Düse. Auch hier werden beim Abriss der Haupttropfen kleinere Tochtertropfen generiert [15, 18].

**II. windinduzierter Zerfall:** Der Strahlaufbruch wird stärker durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Strahl und Gasphase beeinflusst. Das Auftreten von Oberflächenwellen kurzer Wellenlänge führt zum Zerfall. Es resultieren überwiegend Tropfen mit Durchmessern deutlich kleiner als der Strahldurchmesser [18]. Auf Grund der Tatsache, dass der Strahlzerfall an dessen Oberfläche stattfindet, verhält sich die Aufbruchlänge dort anders als im Strahlkern [18]. Widersprüchliche Aussagen, was den Verlauf der Strahl-Aufbruchlänge in diesem Zerfallsbereich angeht, basieren höchstwahrscheinlich auf diesem Umstand. Bezogen auf den Strahlkern wird von einer Zunahme und an der Strahloberfläche von einer Abnahme der Aufbruchlänge mit steigender Strahlgeschwindigkeit ausgegangen.



**Abbildung 2.2:** Erscheinung des Strahlzerfalls in Abhängigkeit der Zerfallsbereiche, nach [15] und [16]

**Zerstäubung:** Hier wird auch häufig vom Atomisierungsbereich gesprochen. An der Strahloberfläche erreicht die Strahl-Aufbruchlänge einen Wert von null. Es treten direkt am Düsenaustritt Instabilitäten und damit Ablösung von Primärtropfen auf. Der Strahlkern kann aber durchaus noch eine gewisse Distanz intakt bleiben. Die Größenordnung der Primärtropfen liegt auch hier deutlich unterhalb des Düsenlochdurchmessers [18]. Die Atomisierung ist der technisch bedeutenste Zerfallsbereich. Zum Beispiel findet die Kraftstoffzerstäubung in Verbrennungsmotoren, bis auf die Öffnungs- und Schließvorgänge der Einspritzventile, ausschließlich in diesem Bereich statt [19]. Trotz der Relevanz und der damit einhergehenden regen Forschungsaktivität konnte bis heute nicht nachgewiesen werden, was genau den turbulenten Zerstäubungsvorgang auslöst. Nach ihrer detaillierten experimentellen Analyse kamen Reitz und Bracco [20] zu dem Schluss, dass eine Kombination verschiedener Mechanismen dafür verantwortlich ist, welche je nach gegebenem Fall variiert. Neben aerodynamischen Effekten schien Kavitation in der Düse eine wichtige Rolle zu spielen.