

1 Einleitung

Auch in den kommenden Jahren wird ein weiterer kontinuierlicher Anstieg des Luftverkehrsaufkommens prognostiziert. Dieses geht einher mit einer vorhergesagten Zunahme der Kohlendioxid-Emissionen und Emissionen, die die lokale Luftqualität beeinflussen können (ICAO, 2016). Um diese Emissionen zu verringern, werden neue Technologien benötigt. Hierbei spielt der Entwurf von Triebwerksbrennkammern eine entscheidende Rolle.

Die Brennkammerentwicklung wird für zukünftige Triebwerke größtenteils durch die Anforderung an geringere Stickoxid-Emissionen getrieben (Lazik et al., 2008). Die Bemühungen, den spezifischen Brennstoffverbrauch zu reduzieren, führen zu steigenden Druckverhältnissen und Turbineneintrittstemperaturen. Durch diese Anstiege sinkt zwar die Bildung von unverbrannten Kohlenstoffen und Kohlenmonoxid, aber die Entstehung von Stickoxiden wird dahingegen begünstigt (Bauer, 2004).

Daher wird für zukünftige Triebwerke die Magerverbrennung betrachtet. Die Verbrennung erfolgt mit einem Luftüberschuss, um die Verbrennungstemperaturen zu reduzieren (Bauer, 2004). Dadurch wird die Bildung von Stickoxid-Emissionen verringert. Allerdings besteht bei einigen Betriebspunkten die Gefahr des Flammverlöschens. Um die Stabilität bei allen Betriebspunkten zu garantieren, wird eine Brennstoffstufung verwendet. Bei allen Betriebspunkten ist eine lokal fett verbrennende Pilotstufe in Betrieb. Bei den höheren Lastpunkten wird die magere Hauptstufe dazugeschaltet.

Zur Anwendung der Brennstoffstufung in modernen Triebwerksbrennkammern wurde die magere Direkteinspritzung (*engl.: lean direct injection*) konzipiert. In Abbildung 1.1 ist die Funktionsweise dieser Technologie anhand einer schematischen Schnittdarstellung illustriert. Das Stufungskonzept besteht aus einer Haupt- und einer Pilotstufe. Der Kraftstoff wird durch den am äußeren Umfang liegenden Hauptstufenzerstäuber (1) und den konzentrischen Pilotzerstäuber (2) eingebracht und zerteilt. Es resultieren eine Pilot- (3) und Hauptstufenflamme (4).

Da der Brennstoff in Flugtriebwerken in flüssiger Form bereitgestellt wird, muss dieser zunächst verdunsten. Hierzu muss die Oberfläche der Flüssigkeit deutlich erhöht werden. Daher wird die Flüssigkeit zerstäubt. Die Güte der Zerstäubung ist von immenser Bedeutung für die Kraftstoffaufbereitung, da die Verdunstung und Position des Kraftstoffes beeinflusst wird, und damit die Verbrennung und resultierenden Emissionen. In Luftfahrttriebwerken werden häufig luftgestützte Zerstäuber (*engl.: pre-filming airblast atomizer*) eingesetzt. Ein Vorteil dieser Zerstäuber ist, dass die Zerstäubungsgüte vom Kraftstoffmassenstrom entkoppelt ist (Bauer, 2007), und daher über einen weiten Betriebsbereich konstante Tropfengrößenverteilungen erzielt werden.

Die typischen Vorgänge der Zerstäubung sind in Abbildung 1.2 anhand eines luftgestützten Zerstäubers dargestellt. Ein Flüssigkeitsfilm zerfällt, es entstehen Ligamente und größere tropfen-

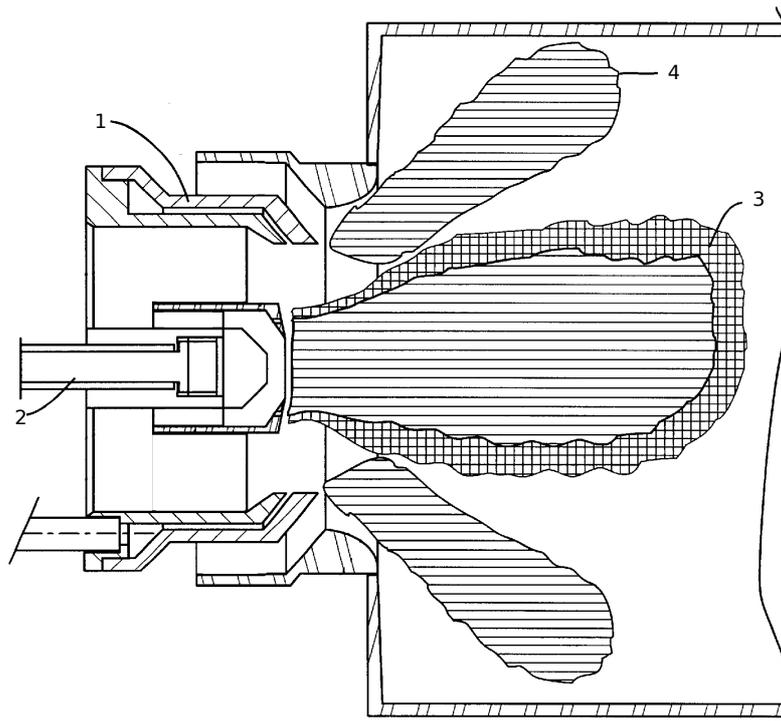


Abbildung 1.1: Prinzip der mageren Direkteinspritzung, nach Crocker et al. (2001).

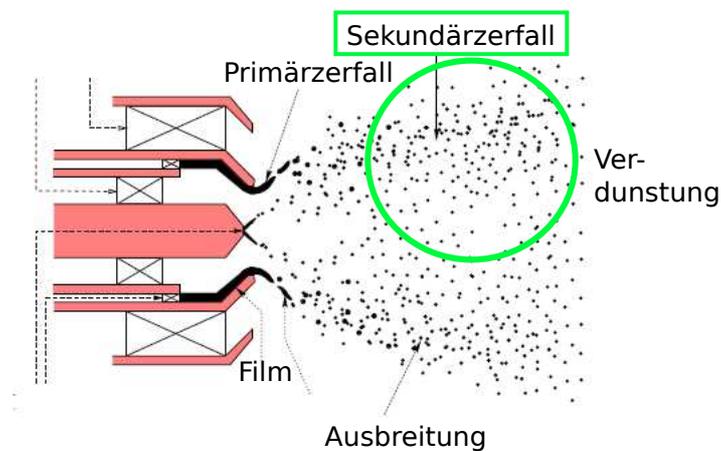


Abbildung 1.2: Phänomene bei der Einspritzung, nach Cha et al. (2005).

förmige Strukturen. Dieser Vorgang wird als Primärzerfall bezeichnet. Anschließend zerfallen diese tropfenförmigen Strukturen nochmals, was als Sekundärzerfall bezeichnet wird. Das so entstandene Spray breitet sich in der vorliegenden turbulenten Drallströmung aus und verdunstet.

Momentan erfolgt die Auslegung von Triebwerksbrennkammern größtenteils mit experimentellen Methoden, wobei gemäß Lazik et al. (2008) CFD-Methoden stärker in die Vorauslegung ein-

fließen. Experimentelle Methoden sind sehr aufwändig, da viele verschiedene Geometrien untersucht werden müssen und diese Messungen kostspielig sind. Um den Anteil der CFD-Methoden an der Auslegung zu erhöhen, muss die Zuverlässigkeit dieser Methoden steigen. Von fundamentaler Bedeutung ist hierbei die akkurate Vorhersage der Zerstäubung.

Das Ziel dieser Arbeit ist die numerische Beschreibung der Zerstäubung in industriellen Triebwerksbrennkammern. Der Schwerpunkt liegt auf der Modellierung des Sekundärzerfalls. Durch den Sekundärzerfall werden die Bewegung, Position und Verdunstung der resultierenden Kraftstofftropfen maßgeblich beeinflusst. Es soll daher der Frage nachgegangen werden, inwiefern die Wahl des Sekundärzerfallsmodells die vorhergesagte Sprühstrahlausbreitung und Gemischbildung beeinflusst.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist die vorliegende Arbeit wie folgt strukturiert: in Kapitel 2 werden der Stand der Forschung sowie die Zielstellung dieser Arbeit vorgestellt. Um Sekundärzerfallsmodelle zu vergleichen und Modelle zu verbessern, wurde ein Experiment durchgeführt. Diese Untersuchung wird in Kapitel 3 dargestellt. Anschließend erfolgt in Kapitel 4 die Darstellung des in dieser Arbeit erarbeiteten Modells zur Beschreibung des Sekundärzerfalls. Um nun die Bedeutung der Modellierung des Sekundärzerfalls hervorzuheben, wird in Kapitel 5 der Einfluss der Wahl dieser Modelle auf die vorhergesagte Sprühstrahlausbreitung und Gemischbildung in einer industriellen Triebwerksbrennkammer dargestellt.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung der Zerstäubung und der Sprühstrahlausbreitung in Triebwerksbrennkammern. Der Zerstäubungsprozess teilt sich in den Primärzerfall und den Sekundärzerfall auf (vgl. Abbildung 1.2). Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Modellierung des Sekundärzerfalls. In diesem Kapitel wird ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben. Der Sekundärzerfall wird idealisiert als Zerfall von Einzeltröpfen dargestellt. Im Abschnitt 2.1 sind die Grundlagen des Tropfenzerfalls erläutert. Um die Zerstäubung und Bewegung von Sprühstrahlen in Triebwerksbrennkammern zu bestimmen, werden Modelle zur Beschreibung dieser Phänomene benötigt. Bereits vorhandene Modelle werden in Abschnitt 2.2 vorgestellt und offener Forschungsbedarf wird identifiziert. Abschließend erfolgt die Zielstellung dieser Arbeit.

2.1 Tropfenzerfall

In Abhängigkeit der aerodynamischen Beaufschlagung von Tropfen ergeben sich verschiedene Zerfallsmechanismen, die zu Unterschieden in den resultierenden Tropfendurchmessern und Geschwindigkeiten führen und einen großen Einfluss auf die Ausbreitung der resultierenden Tropfen besitzen. Im Folgenden werden die Zerfallsmechanismen, relevante dimensionslose Kennzahlen und charakteristische Zeiten erläutert. Nach der Beschreibung der Einflussparameter werden der zeitliche Verlauf des Zerfalls und die Zerfallsprodukte dargestellt.

2.1.1 Klassifizierung der Tropfenzerfallsmechanismen

Der Zerfall von flüssigen Tropfen tritt ein, wenn die aerodynamischen Kräfte am Tropfen die zusammenhaltende Kraft aufgrund der Oberflächenspannung übersteigen. Dieses Verhältnis wird durch die dimensionslose Weber-Zahl,

$$\text{We} = \frac{\rho_g u_{rel}^2 D_0}{\sigma}, \quad (2.1)$$

ausgedrückt. Hierbei bezeichnet ρ die Dichte und der Index g steht für das Gas. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Gas und Tropfen wird durch u_{rel} und die Oberflächenspannung durch σ ausgedrückt. Der volumenäquivalente initiale Durchmesser wird als D_0 bezeichnet. Dieser wird anhand des Volumens des Tropfens bestimmt. Falls die kritische Weber-Zahl, We_c , überschritten wird, tritt Zerfall ein. Die kritische Weber-Zahl hängt maßgeblich vom zeitlichen Verlauf der aerodynamischen Kräfte auf den Tropfen und der Viskosität der Flüssigkeit ab.

Laut Guildenbecher et al. (2009) verlangsamt die Flüssigkeitsviskosität die Tropfenverformung und dissipiert die Energie der aufgeprägten aerodynamischen Kräfte. Dadurch müssen höhere Kräfte auf den Tropfen aufgeprägt werden, um den Tropfenzerfall hervorzurufen. Der Einfluss der Viskosität auf den Zerfall wird durch die Ohnesorge-Zahl,

$$\text{On} = \frac{\mu_d}{\sqrt{\rho_d D_0 \sigma}}, \quad (2.2)$$

beschrieben. μ bezeichnet die dynamische Viskosität, der Index d repräsentiert die disperse (Tropfen-) Phase.

Verschiedene Zerfallsformen treten auf, die für Flüssigkeiten geringer Viskosität anhand der Weber-Zahl klassifiziert werden können. Bei geringen Ohnesorge-Zahlen ($\text{On} < 0,1$) kann der Einfluss der Viskosität auf die Grenzweberzahlen vernachlässigt werden (Guildenbecher et al., 2009). Als Grenzweberzahlen werden die Weber-Zahlen bezeichnet, die als Abgrenzung der Zerfallsmechanismen dienen. Die Grenzen zwischen den Zerfallsformen sind fließend und hängen neben der Weber- und Ohnesorge-Zahl auch vom zeitlichen Verlauf der aerodynamischen Kräfte am Tropfen ab.

Bei geringen aerodynamischen Kräften kann der Vibrationszerfallsmechanismus (*engl.: vibrational breakup*) eintreten. Laut Guildenbecher et al. (2009) reichen die aerodynamischen Kräfte nicht aus, um den Tropfenzerfall zu induzieren. Die Tropfen können aber in ihrer Eigenfrequenz oszillieren, wodurch sich diese im instabilen Falle in wenige große Fragmente teilen können. Da dieser Zerfallsmechanismus nicht immer auftritt und dessen Zeitskalen größer als die der anderen Zerfallsmechanismen sind, wird dieser Mechanismus nach Pilch und Erdman (1987) oft nicht untersucht. Daher wird diese Zerfallsart in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Falls nun die aerodynamischen Kräfte erhöht werden, und die kritische Weber-Zahl, We_c , überschritten wird, tritt Blasenzerfall (*engl.: bag breakup*) auf. Zuerst verformt sich der sphärische Tropfen in eine scheibenähnliche Form. Anschließend bildet sich ein Ring und an dem Ring eine dünne Blase in Strömungsrichtung. Die dünne Blase zerfällt in viele kleine Tropfen, der Ring zerfällt anschließend in einige größere Fragmente. Dieser Vorgang ist in Abbildung 2.1 dargestellt, wobei die Zeit t von links nach rechts ansteigt. Blasenzerfall tritt nach Guildenbecher et al. (2009) für geringe Viskositäten, charakterisiert durch $\text{On} < 0,1$, ab $\text{We}_c \approx 11$ ein. Dieser Wert und die in diesem Abschnitt nachstehend genannten Werte sind für sprunghafte Beaufschlagungen des Tropfens in Stoßwellenrohren gültig. Hierbei erfährt der Tropfen zu Beginn der Exposition eine maximale Weber-Zahl, die im folgenden Verlauf absinkt.

Ab $\text{We} \approx 80$ setzt der Scheibenzerfall (*engl.: sheet-thinning*) ein. Nach Erreichen der Scheibenform bilden sich an den Außenbereichen des Tropfens Flüssigkeitsstrukturen, die in Strömungsrichtung orientiert sind. Diese bilden Ligamente, die in kleine Tropfen zerfallen. Dieses geschieht so lange, bis der Zerfall abgeschlossen ist, oder der Resttropfen eine stabile Größe