

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Untersuchung der Flammenstruktur an Tropfen brennbarer Substanzen in Luft ist Gegenstand zahlreicher theoretischer, numerischer und experimenteller Untersuchungen und hat zu einer großen Anzahl von Veröffentlichungen geführt. Da sich Verbrennungsvorgänge in der Technik und in der Natur unter sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen abspielen können, gibt es ein weites Spektrum von Problemen, die sowohl vom strömungstechnischen als auch vom physiko-chemischen Standpunkt aus unter ganz speziellen Gesichtspunkten behandelt werden. Alle Verbrennungsvorgänge tropfbarer Fluide, die sich beispielsweise in Brennkammern abspielen, vollziehen sich an zerstäubten Substanzen. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt dabei im Schwarmverhalten von vielen statistisch verteilten Tropfen, deren Größe im Mikrometerbereich liegt. Trotzdem kommt der Untersuchung der Flammenstruktur am Einzeltropfen eine fundamentale Bedeutung zu, denn ohne das Verständnis der Wechselwirkung von Flammenbildung, Verdunstung und Umströmung am Einzeltropfen ist eine Modellierung des Verbrennungsvorgangs nicht möglich und demzufolge auch eine Beschreibung des Verhaltens von vielen Einzeltropfen im Schwarm nur schwer zugänglich.

Die Umströmung eines beschleunigt bewegten brennenden Einzeltropfens in der Atmosphäre ist ein sehr komplexer Vorgang, der unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Strömung und Verbrennung bisher weder experimentell noch analytisch oder numerisch in vollem Umfang erfasst wurde. Daher weisen alle Veröffentlichungen zu diesem Problem Vereinfachungen des Verbrennungsvorgangs auf oder umfassen nur Teilaspekte des Gesamtvorgangs, der aus den Einzelbereichen Flamme, Tropfenverdunstung und Tropfenumströmung besteht. In den Gesamtvorgang gehen eine Vielzahl von Ähnlichkeitsparametern ein, wie z.B. die Reynoldszahl ( $Re$ ), die Weberzahl ( $We$ ), die Ohnesorgezahl ( $Oh$ ), die Nusseltzahl ( $Nu$ ), die Prandtlzahl ( $Pr$ ), die Péceletzahl ( $Pe$ ), die Sherwoodzahl ( $Sh$ ), die Schmidtzahl ( $Sc$ ), die Damköhlerzahl ( $Da$ ), die Grashofzahl ( $Gr$ ), die Lewiszahl ( $Le$ ), die Strouhalzahl ( $St$ ) und die Froudezahl ( $Fr$ ). In der vorliegenden Arbeit wurde das Augenmerk auf die makroskopisch messbaren strömungsmechanischen Vorgänge am beschleunigt bewegten brennenden Tropfen gelegt.

Wie man aus den Arbeiten von Dietrich et al. [1], [2] weiß, besitzt ein ruhender brennender Einzeltropfen unter Mikrogravitation eine ihn umhüllende sphärische Flamme. Experimentell wurde dieser Zustand u.a. durch Versuche im Spacelab realisiert (siehe Abb. 3.4, S. 30). Einen theoretischen Ansatz zur Beschreibung der entsprechenden Vorgänge liefert die sog. „spherically symmetric theory“, mit deren Hilfe die komplexe Kopplung aus chemischer Reaktion, Zweiphasenströmung und Phasenwechsel untersucht bzw. beschrieben werden kann.

Werden ruhende brennende Tropfen im Schwerkraftfeld der Erde untersucht, so stellt sich eine Konvektionsströmung im Außenbereich des Tropfens ein. Diese zerstört nicht nur die Kugelsymmetrie der Flamme um den Tropfen, sondern sie verursacht durch die Wirkung von strömungsbedingten Scherkräften an der Tropfenoberfläche eine zusätzliche innere Zirkulation im Tropfen. Diese Zirkulation wirkt sich auf die Verdunstungsrate des Tropfens aus. Theoretische Ansätze zur Beschreibung des Einflusses der Verdunstungsrate auf den Verbrennungsvorgang stammen von Lung-Weei-Huang und Chiun-Hsun Chen [3].

Wird ein brennender Tropfen zusätzlich angeströmt, so erhöht sich die Komplexität des Problems. Für eine stationäre Umströmung haben Jog et al. [4] analytische Lösungen geliefert. Numerische Ergebnisse wurden von Dwyer und Sanders [5, 6] erbracht.

In der vorliegenden Arbeit steht ein Phänomen des Verbrennungsvorgangs am Einzeltropfen im Mittelpunkt der Betrachtung, das bislang nicht näher untersucht wurde: Es handelt sich dabei um die Abstrahlung akustischer Energie im niederfrequenten Bereich bei beschleunigt bewegten brennenden Tropfen in Luft. Außer bei reinen tropfbaren Substanzen wie Dodekan oder tropfbaren Gemischen brennbarer Substanzen tritt das Phänomen auch bei aufgeschmolzenen festen Materialien wie z.B. Polyethylen auf. Beobachtet wurde das „Singen“ brennender Tropfen zuerst beim Polyethylen. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen vor allem an brennend fallenden Tropfen aus Dodekan in Luft haben schließlich zur Klärung des Phänomens der Schallabstrahlung beigetragen. Zur Überprüfung der Ergebnisse und zur Erlangung weiterführender Erkenntnisse wurden Modellversuche mit Kugeln aus porösem Material wie Watte oder Kreide durchgeführt.

Eine vollständige Berücksichtigung aller an einem frei fallenden Tropfen auftretenden aerodynamischen Kräfte müsste bei wachsenden Reynoldszahlen die Wechselwirkung von abgelösten Wirbeln und Tropfen einbeziehen, die zu einer instationären Taumelbewegung des Tropfens führen, wie K. Kuwahara [7] durch eine numerische Simulation gezeigt hat. Darüber hinaus konnte er zeigen, dass bereits die reine Konvektion um eine heiße Kugel ohne Anströmung zu einer unsymmetrischen, instationären Wirbelablösung und damit zu einer sich zeitlich verändernden Kraftwirkung auf die Kugel führt.

Längs eines Fallwegs von mehreren Metern Länge treten unterschiedliche Anströmzustände in den verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen auf. Zu Beginn der Fallbewegung ist die Reynoldszahl noch niedrig, die Umströmung laminar, und die Kugel wird von der Flamme vollständig umhüllt. In diesem Reynoldszahlbereich ist die natürliche Konvektion dominant gegenüber der Anströmung. Dies führt zu einer Stabilisierung der Flammenstruktur des Systems.

Mit weiter steigender Fallgeschwindigkeit der verdunstenden, angeströmten Kugel bzw. des Tropfens kommt es zu einer charakteristischen Änderung: Die Flamme wird abgestreift, sie geht in eine Nachlaufflamme über. Dieser Übergang lässt sich durch den festen Wert einer modifizierten Froudezahl charakterisieren, und längs des weiteren Tropfenfallwegs - wenn die Flamme abgestreift ist - spielt die Aerodynamik die Hauptrolle bei der Ausbildung einer typischen Flammenstruktur. Dabei wirkt die Flamme im Nachlauf des Tropfens im Falle der vollständigen Verbrennung als Senke für die an der Tropfenoberfläche als Quelle ausgetretenen Brennstoffe. Übrig bleiben nach vollständiger Verbrennung heiße Verbrennungsgase. Wie die vorliegenden experimentellen Untersuchungen gezeigt haben, handelt es sich entgegen den Ausführungen von Dwyer und Sanders [5] bei der den Übergang zur abgehobenen Flamme charakterisierenden Kennzahl nicht um die Reynoldszahl. Ein Versuch mit drei Kugeln unterschiedlicher Durchmesser  $D$ , die brennend an einem vertikalen Schlitten simultan beschleunigt nach unten bewegt wurden, hat gezeigt, dass die kleinste Kugel ihre umhüllende Flamme zuerst, also bei der relativ geringsten Geschwindigkeit, abstreift. Das aber belegt, dass sich dieser Übergang nicht durch einen charakteristischen Wert einer Reynoldszahl beschreiben lässt.

Der Übergang der Flammenstruktur von umhüllter Kugel zur Flamme im Nachlauf kann demgegenüber anhand einer modifizierten Froudezahl beschrieben werden. Das Phänomen hängt von dem Durchmesser  $D$ , der Fallgeschwindigkeit  $u$  und der Beschleunigung  $b$  wie folgt ab:

$$Fr = u^2/(b D). \quad (1)$$

Dies entspricht einer Froudezahl, die mit der Momentanbeschleunigung  $b$  statt der Erdbeschleunigung  $g$  gebildet wird.

Im weiteren Verlauf der Bewegung eines fallenden brennenden Tropfens hängt das Verhalten der Nachlaufflamme von dem angebotenen Brennstoff-Luft-Gemisch ab. Je größer die Verdunstungsrate am Tropfen ist, umso weiter rückt die Flamme im Nachlauf vom hinteren Staupunkt weg. Sie sucht sich einen Abstand relativ zum Tropfen, der einem Gleichgewichtszustand zwischen der Anströmgeschwindigkeit des Brennstoff-Luft-Gemischs und der lokalen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront entspricht. Erreicht der Tropfen eine Fallgeschwindigkeit, bei der sich in seinem aufgeheizten Nachlauf ein ringförmiger Wirbel ausbildet, so bestimmt sein Abstand zum Tropfen das Verhalten der Flamme entscheidend: Fallen die Lage des sich zu bilden beginnenden Wirbels und die Lage der Flammenfront zusammen, so verhindert die Flamme die Ausbildung eines größeren Wirbels. Liegt die Flammenfront stromabwärts des sich bildenden Wirbels, so kann dieser anwachsen. Mit zunehmender Größe des Wirbels, erfährt der Wirbel - bedingt durch Rotation und Auftrieb - eine Veränderung der Lage relativ zum Tropfen, auf die Flammenfront zu. Erreicht die Flammenfront den Wirbel, so brennt dieser schlagartig auf. Die damit verbundene starke Expansion der Verbrennungsgase führt zu einem kurzzeitigen Druckanstieg im Strömungsfeld. Wie die Experimente gezeigt haben, verbrennt der Flammenwirbel raumfest, während sich zwischen Tropfen und Flammenwirbel erneut ein abgelöster Wirbel aus dem brennbaren Gemisch bildet. Es handelt sich bei diesem periodischen Vorgang um einen Prozess der Selbstorganisation des Systems aus Tropfen und Flamme, bei dem die Wirbelbildung und nachfolgende Verbrennung des Brennstoff-Luft-Gemischs zu einer periodischen Druckschwankung im Strömungsfeld und damit zu einer Schallabstrahlung führt. Charakterisieren lässt sich dieser Strömungszustand durch eine über einen weiten Bereich der Reynoldszahl konstante Strouhalzahl.

Mit zunehmender Fallgeschwindigkeit ändert sich die Form der Flamme im Nachlauf. Aus der anfangs ringförmigen Flammenfront entsteht durch eine Amplitudenmodulation in Umfangsrichtung ein wellenförmiges Profil bzw. eine Kronenform (siehe Abb. 1.1). Grund hierfür ist eine sekundäre Instabilität, bedingt durch eine hohe Geschwindigkeit der Außenströmung, verglichen mit einer niedrigen Geschwindigkeit im Inneren des Tropfenachlaufs. Laut Lugt [8] nimmt die Anzahl der „Wellen“ - die zwischen 5 und 13 liegt - zu, wenn der Wirbelkern dünner wird. Bilder, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden, bestätigen dies.



Abb. 1.1: Sekundäre Instabilität einer ringförmigen Nachlaufflamme

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Aussage über das Verhalten des Wirbelsystems im Nachlauf des Tropfens bei Verbrennung des mit Luft vorgemischten, abgedampften Tropfenmaterials zu gewinnen und die Ursache für die Schallabstrahlung zu klären. Die Arbeit umfasst drei Hauptkapitel:

- Erzeugung brennender Einzeltropfen,
- Beobachtungen an brennenden Einzeltropfen und
- Messungen und Berechnungen für beschleunigt bewegte und ruhende Systeme.