



Doctoral Thesis

Verdunstung monodisperser, frei beweglicher Brennstoff-Tropfen in einer turbulenten Heissluftströmung

Author(s):

Ochs, Markus

Publication Date:

1999

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-002093117> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Verdunstung monodisperser, frei beweglicher Brennstoff-Tropfen in einer turbulenten Heissluftströmung

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Markus Ochs

Dipl. Phys. ETH
geboren am 8. September 1963
von Wiesendangen, ZH

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. L. Reh, Referent
Prof. Dr. D. Poulikakos, Korreferent

Zusammenfassung

Bei der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen in Haushaltsfeuerungen, Gasturbinen und Motoren ist die Verdunstung der durch Zerstäubung erzeugten Tropfen ein wichtiger Teilprozess. Ein quantitativ abgesichertes Modell für die Verdunstung von Brennstofftropfen verbessert die Möglichkeiten zur Entwicklung von schadstoffarmen Brennern und Motoren.

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals die Verdunstung von frei beweglichen, kleinen Tropfen bestehend sowohl aus reinen Stoffen als auch aus einem realen Brennstoff unter dem Einfluss von Konvektion (anfängliche Tropfen-Re-Zahl etwa 10) und Stefan-Strom (Massentransportzahl maximal um 3) bis zu einer Tropfenrestmasse kleiner als 2 % experimentell untersucht. Die Tropfenverdunstung unter diesen Bedingungen ist für die oben genannten Anwendungen besonders wichtig. Sie wurde in der Literatur trotz ihrer Bedeutung bisher kaum oder nur unvollständig experimentell untersucht. Mit der gewonnenen Messdatenbasis war es möglich, verschiedene in der Literatur vorgeschlagene Modellansätze zu überprüfen und das Modell mit der besten Übereinstimmung zu bestimmen. Zudem wurde ein neues Verdunstungsmodell für Tropfen bestehend aus Erdöl entwickelt.

Es wurde ein Versuchsstand aufgebaut, bei dem unter Umgebungsdruck kontinuierlich monodisperse Tropfen (Tropfen einheitlicher Grösse) quer in einen Freistrahls heisser Luft eingedüst werden. Tropfendurchmesser und -geschwindigkeit sowie die räumliche Verteilung der Tropfen infolge der Strömungsturbulenz (Dispersion) wurden mit einem Phasen Doppler Anemometer (PDA) gemessen. Die Tropfenanfangsgrössen (Durchmesser, Temperatur, Geschwindigkeit, Tropfenrate) und die Strömungsrandbedingungen (Temperatur-, Geschwindigkeits- und Turbulenz-Felder) wurden für jeden Versuch bestimmt. Mit den in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Messdaten können beliebige Bahn-, Dispersions- und Verdunstungs-Modelle überprüft werden.

Die Messungen wurden durchgeführt mit Tropfen aus n-Oktan, n-Tetradekan und Heizöl extraleicht mit je zwei Anfangsdurchmessern (etwa 45 μm und 62 μm) bei je zwei Lufttemperaturen (um 300 °C und 500 °C). Es zeigt sich, dass Heizöltropfen erheblich langsamer verdunsten als Tetradekantropfen.

Zur Modellierung wurde für Tropfen aus den reinen Stoffen Oktan und Tetradekan das Uniform-Temperature-Modell und ein deterministisches Bahnmodell verwendet und für die Gasphase das Filmmodell mit den beiden Varianten konstanter bzw. variabler Filmdicke. Für die im Filmmodell

benötigten mittleren Nusselt- und Sherwood-Zahlen wurden zahlreiche in der Literatur vorgeschlagene Korrelationen getestet. Die Stoffeigenschaften des Luft-Brennstoffdampf-Gemisches im Film wurden mit Hilfe eines Referenzzustandes berechnet, der mittels einer Gewichtung bestimmt wurde. Als Gewichtungsregeln wurden die 1/3- und die 1/2-Regel geprüft.

Der Vergleich der Modellierungen mit den Messungen ergibt unter Verwendung des Uniform-Temperature-Tropfen-Modells eine gute Übereinstimmung für das Filmmodell mit variabler Filmdicke (Abramzon und Sirignano (1987)), kombiniert mit einer Nu- und Sh-Korrelation, welche das Verhalten für Tropfen-Re-Zahlen gegen 0 berücksichtigt (Clift et al. (1978)), und der 1/3-Regel. Gegen das Ende der Verdunstung hin ergibt das Modell eine zu schnelle Verdunstung. Die Hauptursache dafür dürfte die Überlappung von Filmen benachbarter Tropfen sein, in geringerem Masse spielen bereits molekulare Effekte eine Rolle. Es wurde ein neues halbempirisches Modell entwickelt zur Berücksichtigung dieser Filmüberlappung. Sie könnte bei der Verdunstung von Tropfenkollektiven in Sprays wegen kleinerer Tropfenabstände eine noch ausgeprägtere Verlangsamung der Tropfenverdunstung bewirken.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnte für Tropfen des Vielstoffgemisches Erdöl ein neues, rechenzeitgünstiges Verdunstungsmodell entwickelt werden. Dazu wurde das vorbeschriebene Modell (homogene Tropfentemperatur, variable Filmdicke, Nu- und Sh-Korrelation von Clift, 1/3-Regel) auf den komplexen Vorgang der Verdunstung von Mehrkomponenten-Tropfen angewendet, wobei das Heizöl als Gemisch von aus Pseudokomponenten zusammengesetzten SCN-Fractionen beschrieben wurde (SCN: Single Carbon Number). Die Zusammensetzung dieses Heizöl-Modellgemisches wurde aus dem Siedeverlauf des Heizöls bestimmt. Mit Hilfe des Modellgemisches konnten die während der Verdunstung sich laufend ändernden Stoffeigenschaften des Tropfens, insbesondere der Dampfdruck, sowie der flüssigseitige Molenanteil an der Tropfenoberfläche der momentan verdunstenden SCN-Fractionen berechnet werden.

Der Vergleich der berechneten mit der gemessenen Verdunstung von Heizöltropfen ergab eine gute Übereinstimmung.

Summary

Droplet vaporization is an important process in the combustion of liquid fuels in atmospheric oil burners, gas turbines, and engines. An experimentally verified droplet vaporization model supports the development of low emission burners and engines.

In the present work the vaporization of freely moving, small droplets of pure liquids as well as a real fuel under the influence of convection (initial droplet Reynolds number about 10) and Stefan flow (mass transfer number up to 3) down to a remaining mass of less than 2 % was investigated experimentally. Droplet vaporization under these conditions is important in the above mentioned applications, but until now it has rarely been investigated experimentally. With the acquired experimental data it was possible to verify several models proposed in the literature, and to determine the model with the best agreement. For the vaporization of petroleum droplets a new model was developed.

An experimental setup was designed in which monodisperse droplets (droplets of the same size) were injected laterally into a circular free jet of heated air at atmospheric pressure. The droplet diameter, velocity, trajectory, and dispersion was measured with a phase Doppler anemometer (PDA). The initial droplet values (diameter, temperature, velocity, droplet rate) and the flow boundary conditions (temperature, velocity, and turbulence fields) were determined. With this information any model of droplet trajectory, dispersion, and vaporization can be tested.

Measurements were performed with droplets of n-octane, n-tetradecane, and a light heating oil with two initial droplet diameters (about 45 μm and 62 μm) and two air temperatures (about 300 $^{\circ}\text{C}$ and 500 $^{\circ}\text{C}$). It was found that droplets of light heating oil vaporize considerably slower than tetradecane droplets.

The vaporization modelling of the pure liquids octane and tetradecane was done with the uniform temperature model and a deterministic trajectory model for the droplets and with two variations of the film model for the gas phase. For the Nusselt and Sherwood numbers required in the film model several correlations proposed in the literature were tested against the experimental data. The physical properties of the air-vapor-mixture were calculated with a reference state, which was determined by a weighting rule. The 1/3- and the 1/2-rules were tested.

Good agreement with the measurements was achieved using the film model with variable film thickness (Abramzon and Sirignano (1987)) combined with the 1/3-rule and a Nu- and Sh-correlation considering the behaviour as the droplet Re number tends toward zero (Clift et al. (1978)). In the final stage of vaporization the model over-predicts the vaporization rate. The main reason may be the overlapping of films of neighbouring droplets. Molecular effects also play a role, but to a lesser extent. A new semi-empirical model was developed to take into account the overlapping films. For droplet collectives in sprays the overlapping of films could result in an even greater decrease of vaporization rate due to smaller droplet spacings.

Based on these results a new, computer time saving vaporization model for droplets consisting of petroleum was developed. The model described above (uniform droplet temperature, variable film thickness, Nu- and Sh-correlation of Clift, 1/3-rule) was applied to the complex process of the vaporization of a multi-component droplet. The light heating oil was described as a mixture of SCN (Single Carbon Number) groups, which themselves are a mixture of pseudocomponents. The composition of this model mixture of the light heating oil was determined from the distillation curve of the oil. With this model mixture it was possible to calculate the continually changing physical properties of the droplet (namely the vapor pressure) and the liquid side mole fraction at the droplet surface of the vaporizing SCN groups.

The agreement of this model with the experimental data was good.