

Engler-Bunte-Institut Teilinstitut Verbrennungstechnik (EBI-vbt)

Kolloquium Verbrennungstechnik

Programm des "Kolloquium Verbrennungstechnik" für das WS-2019/20 ist verfügbar.

mehr ...

Chemischer Gleichgewichtsrechner

Probieren Sie auf dieser Seite unser Programm für die Berechnung des thermodynamischen Gleichgewichtes einer Gasmischung

mehr ...

Kontakt

Engler-Bunte-Ring 7

76131 Karlsruhe

Gebäude 40.13.I

Tel: +49(0)721 608-42571

Fax: +49(0)721 608-47770

E-Mail: Sekretariat

Link zur Seite:



Kooperationspartner:



Verbrennungstechnisches Seminar

Programm des "Verbrennungstechnischen Seminars" für das WS-2019/20 ist verfügbar.

mehr ...

Bachelor- und Masterarbeiten

Aktuelle Angebote für das Anfertigen von Bachelor- und Masterarbeiten finden sie auf der folgenden Seite.

mehr ...

"Modellierung des Verbrennungsverlaufs bei der Verbrennung von flüssigen Brennstoffen und Flüssigbrennstoff/Wasser-Emulsionen."

Die Arbeit ist ein Verbundprojekt unter der Leitung von Siemens. "Entwicklung von Verbrennungstechnologien für klimaschonende Energieerzeugung"

Im Rahmen der von der Bundesregierung und der Europäischen Union angestrebten Energiewende ist der Zuwachs des Anteils an erneuerbaren Energien entscheidend. Hiermit verbunden ist allerdings eine den natürlichen Ressourcen Wind und Sonne geschuldete fluktuierende Energieerzeugung, die nicht mit dem Strombedarf korreliert. Zum Ausgleich dieser Energieerzeugungslücke werden Kraftwerke benötigt, die in einem flexiblen Lastbereich betrieben werden können. In diesem Zusammenhang nehmen Gaskraftwerke eine wichtige Rolle ein, da sie schnelle Lastanpassungen ermöglichen und Energie bei höchsten Wirkungsgraden bereitstellen.

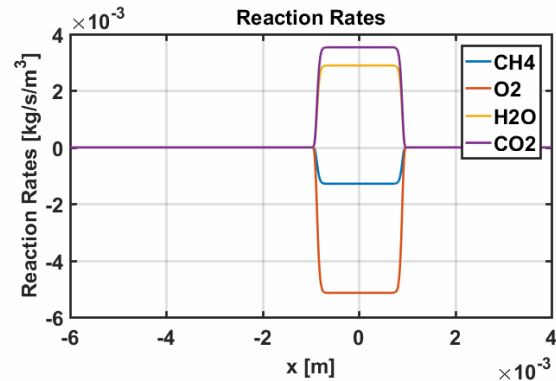
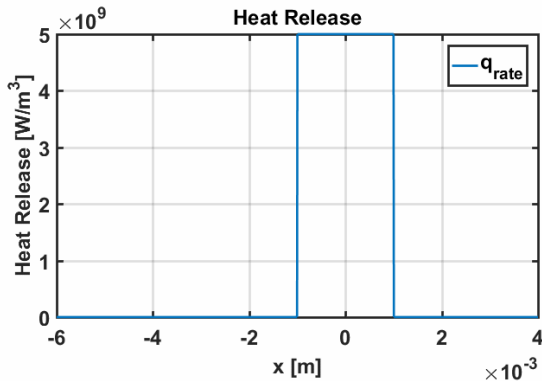
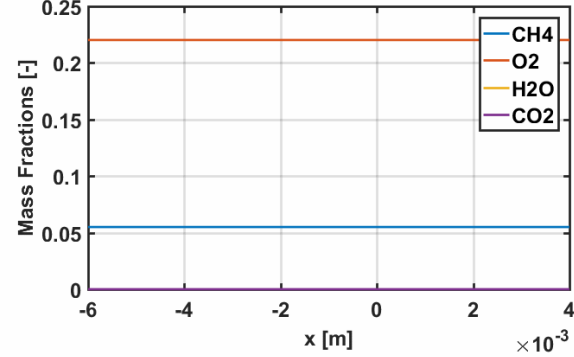
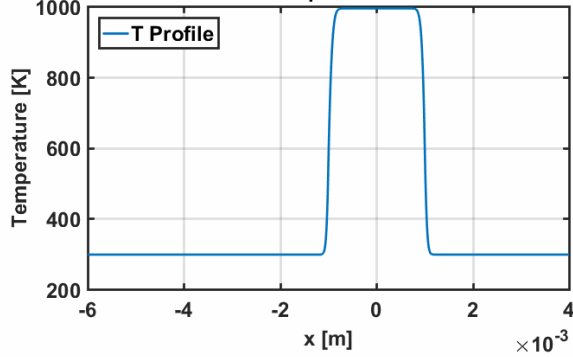
Ziel des Verbundvorhabens ist daher die Entwicklung von Verbrennungstechnologien für die klimaschonende Stromerzeugung. Die im Teilprojekt 3H geleistete Forschungsarbeit dient in diesem Zusammenhang der verbesserten Vorhersage des Verbrennungsverlaufs von Flüssigbrennstoffen und Flüssigbrennstoff/Wasser-Emulsionen. Die zu modellierende Prozesskette ist hierbei wesentlich komplizierter als bei der Verbrennung von gasförmigen Brennstoffen und besteht aus folgenden Teilprozessen:

- Eindüsung eines Brennstoffstrahls in den Vorvermischer
- Zerfall des Brennstoffstrahl in Fragmente (Primärzerfall)
- Weiterer Zerfall der Fragmente in kleinere Tropfen (Sekundärzerfall)
- Dispersion der Tropfen in der Gasströmung
- Interaktion der Tropfen mit der heißen Wand des Vorvermischers
- Verdampfung des Brennstoffs
- Verbrennung des Luft-Brennstoff-Gemisches in der Brennkammer

Für diese Teilprozesse werden im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes Modellierungsansätze entwickelt und erweitert.

Validierung von Reaktionsmechanismen für Flüssigbrennstoffe

Die Simulation von Verbrennungsprozessen beinhaltet neben der Beschreibung des Strömungsfeldes auch die chemische Reaktion und deren Interaktion mit der (in der Regel) turbulenten Strömung. Einfache frei brennende laminare vorgemischte Flammen können dabei numerisch auf ein eindimensionales Problem reduziert werden. Dabei werden Impuls-, Energie- und Speziestransportgleichungen auf einem 1D Gitter gelöst. Die Geschwindigkeit mit der sich die Flammenfront der Anströmung entgegen setzt, ist die sogenannten laminare Flammengeschwindigkeit. Die Abbildung zeigt vereinfacht eine solche Simulation. Dabei wird zunächst durch einen Wärmequellterm Zündenergie aufgebracht. Darauf hin beginnt der Abbau von Brennstoff (CH_4) und Sauerstoff (O_2), was selbst eine Wärmefreisetzung bewirkt. Es entstehen zunächst zwei Reaktionszonen, wobei eine konvektiv von der Strömung aus der Rechendomäne transportiert wird. Die anderen Reaktionsfront stabilisiert sich als laminare Flamme zu einer stationären Lösung des Differentialgleichungssystems.



Die Modellierung der Oxidation von Brennstoffen stellt ein eigenes Forschungsgebiet dar. Dabei wird der Pfad der Oxidation durch eine Abfolge von Reaktionen und Zwischenspezies beschrieben. In Abhängigkeit der Komplexität des Brennstoffes wächst der numerische Aufwand (Teilreaktionen und Zwischenspezies), da die Reaktionen ein nichtlineares Gleichungssystem aufspannen, welches numerisch gelöst werden muss.

Eine Herausforderung stellt dabei jedoch der numerische Aufwand dar. Die Simulation eines realen Problems erfordert in der Regel eine hohe Auflösung in vier Dimensionen (drei Raumrichtungen und in der Zeit). Die Berechnung der Chemie analog zur laminaren Flamme innerhalb eines dreidimensionalen Strömungsproblems, ist heute nur auf Großrechnern und nur für einfache Brennstoffe wie Methan oder Wasserstoff möglich.

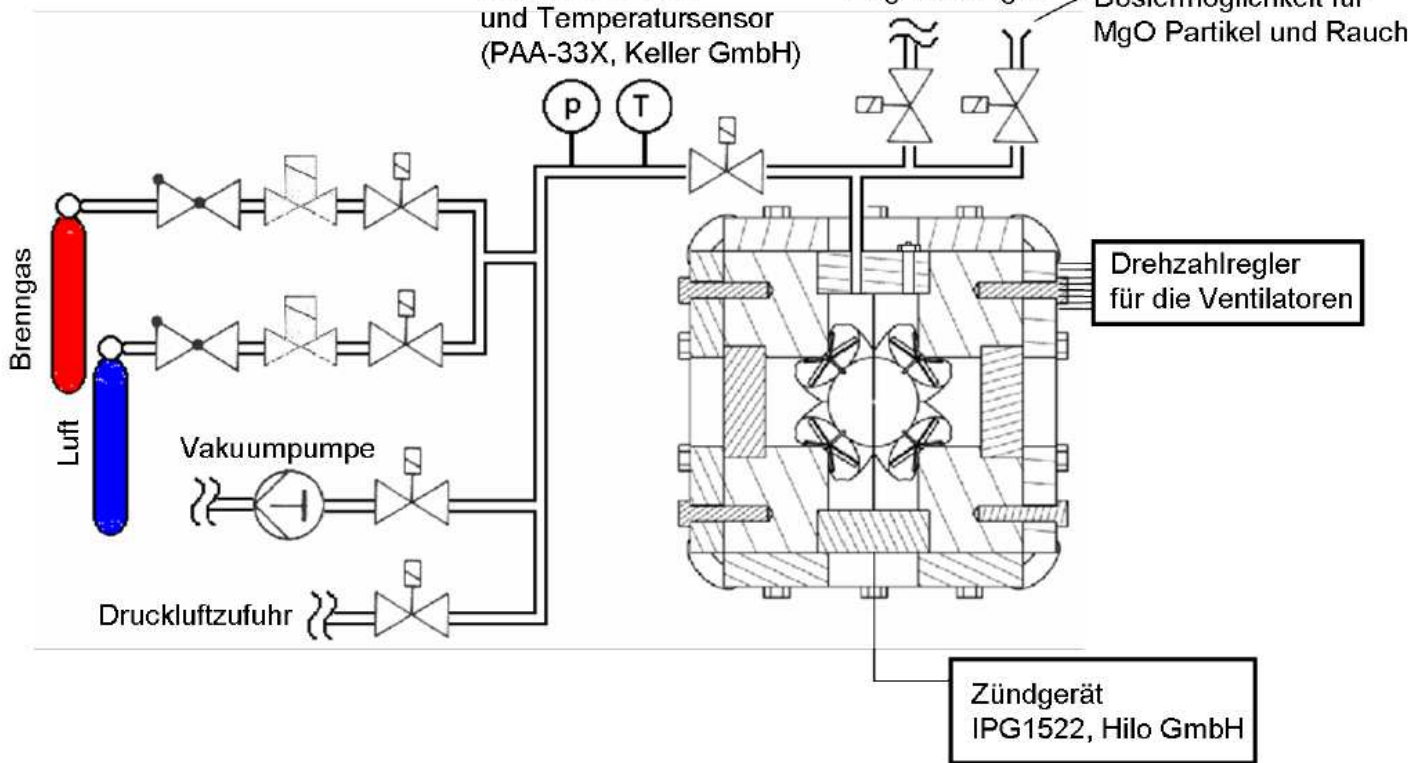
Unter bestimmten Voraussetzungen, kann eine turbulente Flamme (wie sie zum Beispiel in der Brennkammer einer Gasturbine auftritt), lokal durch laminare Flammen beschrieben werden. In diesem Fall, können laminare 1D Flammen im Voraus berechnen und tabelliert werden. Dadurch kann man während der Simulation über zwei Parameter (Reaktionsfortschritt und Mischungsbruch) den Quellterm der Spezies auslesen.

Für die Oxidation komplizierter Brennstoffe wie Diesel sind jedoch keine Reaktionsmechanismen verfügbar. Bereits für langkettige Alkane ist die Verfügbarkeit von Reaktionsmechanismen stark eingeschränkt und deren Eignung zur Simulation von 1D Flammen weitestgehend unerforscht.

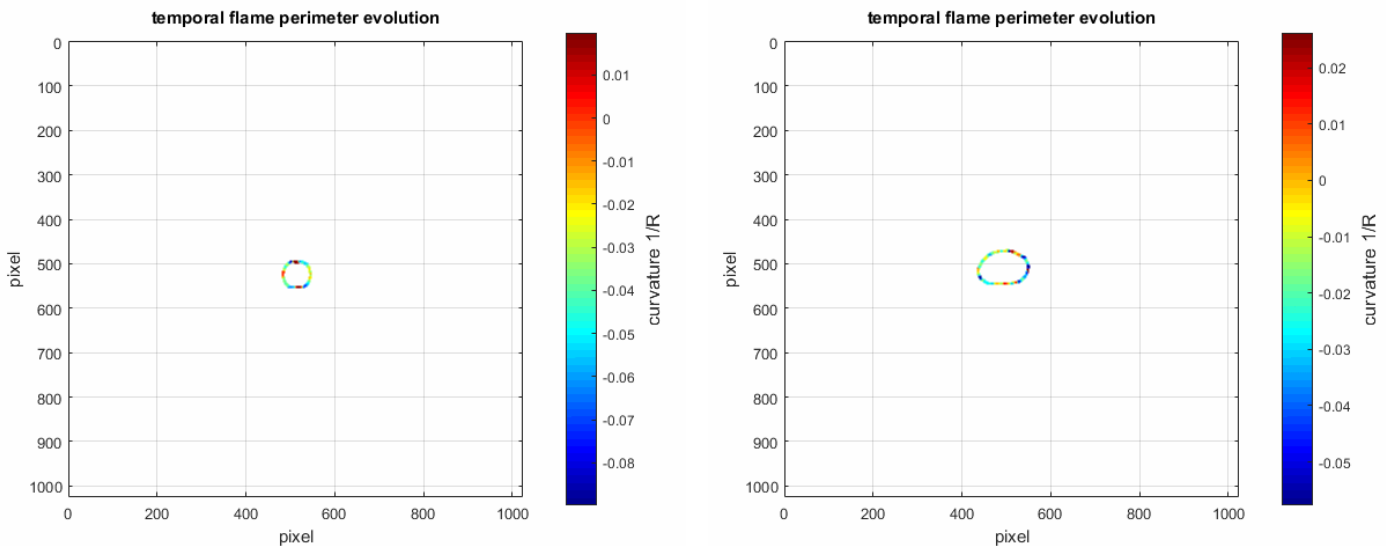
Aus diesem Grund müssen für komplexe Flüssigbrennstoffe vereinfachte Ersatzstoffe gefunden werden, für welche Reaktionsmechanismen existieren und deren Eignung zur Simulation der Brenngeschwindigkeit untersucht werden. Aus diesem Grund müssen Messungen der Brenngeschwindigkeit vorgenommen werden, um die Reaktionsmechanismen für diesen Zweck validieren zu können.

Bestimmung von Brenngeschwindigkeiten mit der Bombenmethode

Eine Methode zur Messung laminarer Brenngeschwindigkeiten ist die Bombenmethode. Dabei werden Luft und Brennstoff vorgemischt in einem geschlossenen Behälter gezündet. Die Ausbreitung der sphärischen Flamme wird dann über zwei unabhängige Messsysteme verfolgt. Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau:



Eines der Messsysteme basiert auf der optischen Erfassung der Flamme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Aus den Aufnahmen lässt sich der Flächeninhalt und der Umfang eines Schnittbildes der Flamme erfassen. Diese Methode erlaubt auch die Korrektur der infolge der Krümmung auftretenden Einflüsse auf die Brenngeschwindigkeit zu korrigieren. Die folgenden Abbildungen zeigen die zeitliche Entwicklung des Umfangs einer laminaren Flamme (links) und einer turbulenten Flamme (rechts).



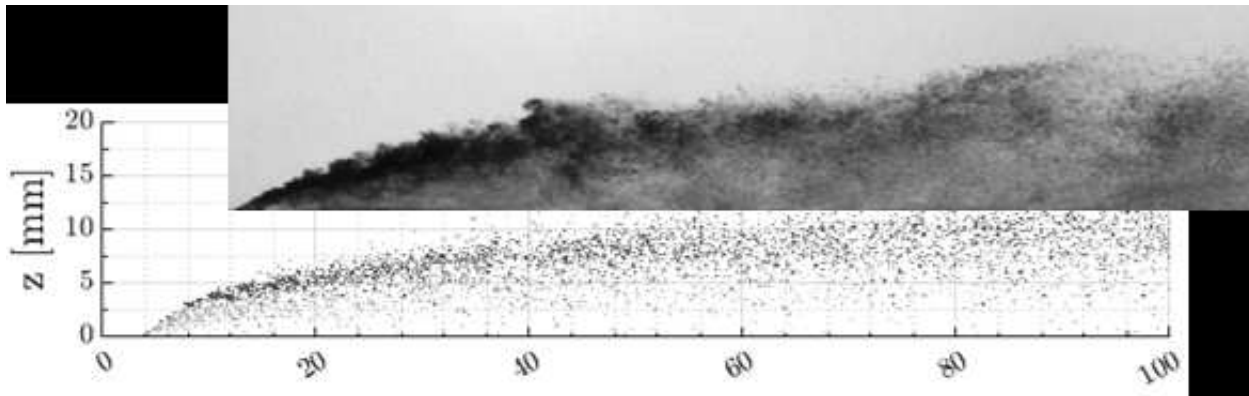
Modellierung und Simulation einer Gasturbinenbrennkammer

Die Simulationsplattform OpenFOAM wird als Basis für die Modellierung und Simulation des Verbrennungsprozesses verwendet. OpenFOAM ist ein in C++ geschriebenes, quelloffenes Programmpaket, welches bereits standardmäßig einen großen Funktionsumfang bietet und durch seinen modularen Aufbau benutzerdefinierte Erweiterungen ermöglicht.

Da instationäre Effekte bei der Verbrennung in Gasturbinenbrennkammern eine große Rolle spielen, müssen diese in der Simulation mit erfasst werden. Deshalb werden Grobstruktursimulationen durchgeführt, bei denen die durch die Turbulenz erzeugten großskaligen Fluktuationen räumlich und zeitlich aufgelöst werden und nur

Strahlerfall

Die Modellierung des Flüssigkeitsstrahls erfolgt nach dem Modell von Rachner et al. (1). Dabei wird von einer zylindrischen Form der lagrangeschen Partikel ausgegangen. Durch aerodynamische Wechselwirkungen mit der Gasphase kommt es neben einer Ablenkung des Strahls auch zu einer Verformung des Strahlquerschnitts, wodurch der Impulsaustausch zwischen Strahl und Gasphase beeinflusst wird. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass der verformte Strahl einen elliptischen Querschnitt hat. Zusätzlich beschreibt das Modell das Abscheren von kleineren Tropfen von der Strahloberfläche. Nach Erreichen einer charakteristischen Zerfallszeit werden die Strahlelemente in Gruppen kleinerer Tropfen umgewandelt, die mit den Standardwerkzeugen von OpenFOAM behandelt werden können. Das beschriebene Modell wurde für Fälle entwickelt, in denen eine Eindüsung rechtwinklig zur Gasströmung erfolgt. Derzeit werden Anpassungen an dem Modell vorgenommen, die für die Simulation eines schräg eingedüsten Flüssigkeitsstrahls notwendig sind.

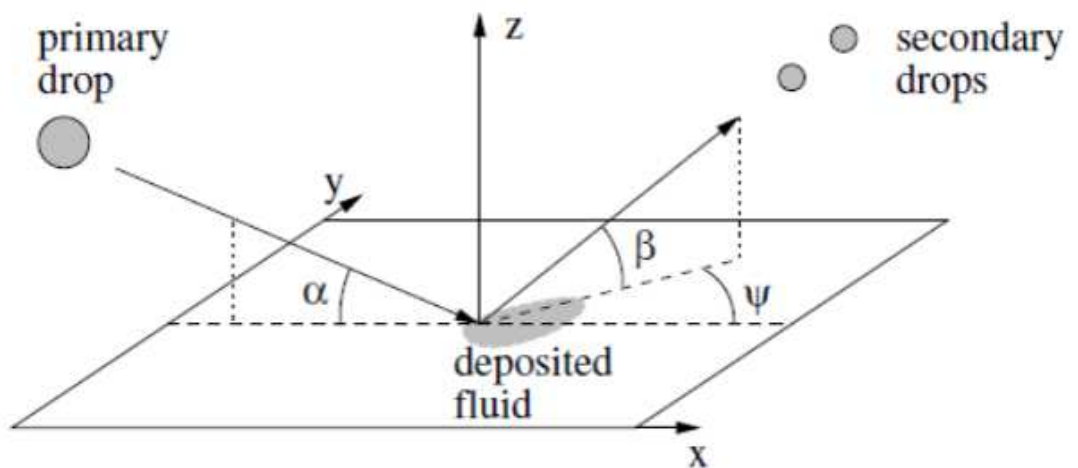


Schräg eingedüster Flüssigkeitsstrahl. Experiment und Simulation.

Tropfen-Wand-Interaktion

Bedingt durch den hohen Impuls des Flüssigkeitsstrahls können die bei Strahlerfall entstehenden Tropfen weit in die Strömung eindringen und sogar auf der Wand des Vorvermischers auftreffen. Das Verhalten eines Tropfens beim Aufprall auf eine Wand ist im Allgemeinen abhängig von den kinematischen und thermischen Eigenschaften von Tropfen und Wand. So kann es zur Reflexion oder zum Zerfall des Tropfens kommen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Ablagerung des Tropfens an der Wand.

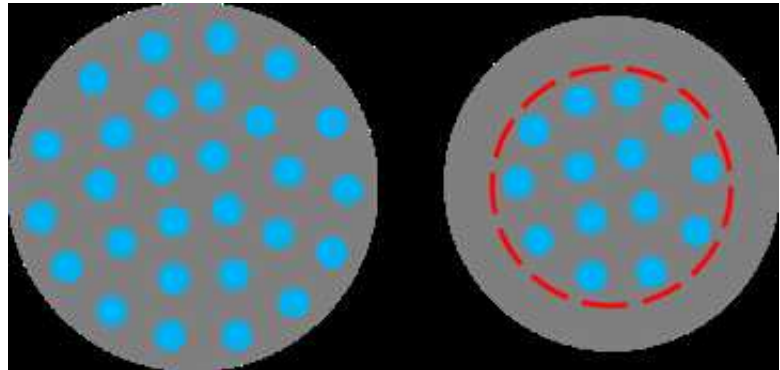
Solche Ablagerungen sind in der Regel unerwünscht, da sie zu Verkokungen an der Wand führen können und die Verteilung des Brennstoff-Luft-Gemischs beeinflussen. Da insbesondere die Schadstoffbildung stark von der lokalen Stöchiometrie abhängt, ist die korrekte Beschreibung der Tropfen-Wand-Interaktion und der Wandfilmströmung ein wichtiger Bestandteil einer Brennkammersimulation.



Schematische Darstellung des Tropfenaufpralls auf einer Wand (Nocivelli et al. 2016).

Um die Verbrennungstemperatur und somit die NO_x Bildung in der Flamme zu senken, werden anstatt reiner Flüssigbrennstoffe häufig Flüssigbrennstoff/Wasser-Emulsionen eingesetzt. Die Verdampfungsmodellierung dieser Emulsionen erfolgt nach der Modellvorstellung, dass es sich bei den entstehenden Tropfen um Öltropfen ($d=10-100\ \mu\text{m}$) handelt, in denen sehr viel kleinere Wassertropfen ($d\approx 1\ \mu\text{m}$) dispergiert sind.

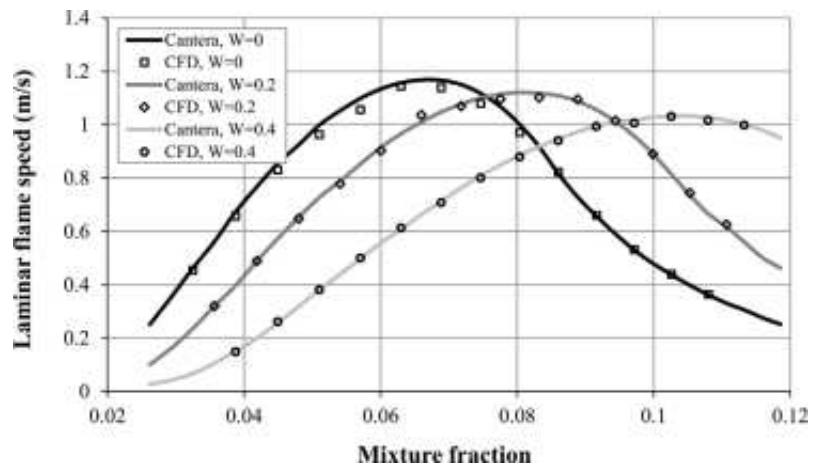
Das Verdampfungsmodell muss somit die unterschiedliche Fugazität der verschiedenen Phasen, sowie die Verfügbarkeit der einzelnen Phasen an der Tropfenoberfläche berücksichtigen. Hierfür haben sich sogenannte Schalenmodelle bewährt (vgl. Abbildung rechts). Die in blau dargestellten Wassertropfchen verdampfen dabei auf Grund der höheren Fugazität des Wassers zuerst. Nach einer gewissen Zeit ist der Anteil an Wasser in der äußeren Schale des Tropfens nur noch sehr gering, sodass von da an nur noch Öl verdampfen kann. Es ergibt sich eine gestufte Verdampfung.



Schematische Darstellung eines Emulsionstropfens.

Verbrennung

Detaillierte Reaktionsmechanismen für höherkettige Kohlenwasserstoffe umfassen hunderte oder gar tausende Spezies und können für anwendungsnahe Simulationen nicht eingesetzt werden, da der Bedarf an Rechenleistung die verfügbaren Ressourcen weit übersteigt. Die Simulation eines einfachen Modellreaktors mit einem detaillierten Reaktionsmechanismus ist hingegen deutlich weniger aufwändig. Deswegen werden Modellreaktoren, wie z.B. die eindimensionale laminare Vormischflamme eingesetzt, um eine Tabellierung der Chemie zu erzeugen. Die Tabellen stellen wichtige thermo-physikalische Größen wie z.B. die Umsatzrate des Brennstoffs in Abhängigkeit des Mischungsbruchs, der Enthalpie und des Reaktionsfortschritts zu Verfügung. Als zusätzlicher Parameter tritt bei der Simulation von Flüssigbrennstoff/Wasser-Emulsionen noch der Massenanteil an Wasser im Gemisch auf. Somit können Ergebnisse aus der detaillierten Simulation einer eindimensionalen Flamme im Rahmen einer weitaus komplexeren Simulation genutzt werden. Die Abbildung rechts verdeutlicht, dass die tabellierte Chemie eine gute Übereinstimmung mit der detaillierten Simulation aufweist.



Validierung des Verbrennungsmodells für verschiedene Wasseranteile (Illana Mahiques et al. 2017).

- (1) Rachner, M. et al.: "Modelling of the atomization of a plain liquid fuel jet in crossflow at gas turbine conditions", A
- (2) Le Clercq, P. et al.: "Modeling Evaporation and Microexplosion of Water-in-Alkane Emulsion Droplets", AIChE A
- (3) Nocivelli, L. et al.: "Modeling of multi-component spray impingement and wall film development in cross flow cond
- (4) Illana Mahiques, E. et al.: "Coupling multicomponent droplet evaporation and tabulated chemistry combustion mo

[IMAGE]
Update Page

Nach oben
KIT - Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

- Heruntergeladen am Sat Dec 7 05:34:54 CET 2019 ; eine aktuelle Version finden Sie unter: