

Vormischtechniken für flüssige Brennstoffe

Verdampfung mittels Kalter Flammen

Dipl.-Ing. N. Steinbach,
Dr.-Ing. K. Lucka, OWI Aachen,
Prof. Dr.-Ing. H. Köhne,
EST RWTH Aachen, Dr.-Ing.
C. Küchen, IWO Hamburg

Die Gemischbildung stellt ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der Verbrennung dar. Durch Inhomogenitäten können sich verstärkt Schadstoffe bilden. Der Einsatz der Vormischtechnik vermeidet dies. Flüssige Brennstoffe, wie zum Beispiel Heizöl EL, müssen vor der Mischung in mikroskopisch kleine Tröpfchen zerstäubt und verdampft werden. Zudem besteht bei flüssigen Brennstoffen die Schwierigkeit, dass die zur vollständigen Verdampfung des Brennstoffs notwendige Temperatur die theoretische Zündtemperatur übersteigt. Daher steht zur Gemischbildung nur die Zündverzugszeit zur Verfügung.

Diese Zeitspanne ist oftmals nicht ausreichend, eine Vormischtechnik für flüssige Brennstoffe in die Praxis umzusetzen. Eine neuartige Technik, die die Selbstzündung sicher vermeidet und damit Vormischtechniken ermöglicht, liegt in der Nutzung des Phänomens der Kalten Flammen. Mit den Kalten Flammen

kann bei atmosphärischen Bedingungen eine Selbstzündung des Brennstoff-Luft-Gemisches sicher vermieden werden.

Kalte Flammen

Der Temperaturanstieg eines Gemisches bei der Zerstäubung eines Brennstoffs in einen vorgeheizten Luftstrom kann mit exothermen Reaktionen der Kohlenwasserstoffe mit dem Luftsauerstoff erklärt werden. Gleiche Effekte werden in der Literatur mit „Kalten Flammen“ beschrieben. So tritt bei einem n-Heptan-Gemisch, das durch ein beheiztes Rohr von 30 mm Durchmesser strömt, bei etwa 500 °C eine Selbstzündung ein. Unterhalb von 500 °C ist ein Anstieg der Gemischtemperatur in Strömungsrichtung um 10 K bis 150 K zu beobachten. Die Gemischtemperatur stabilisiert sich gegenüber den Eintrittsbedingungen auf einem erhöhten Niveau. Im verdunkelten Raum ist ein fahles blaues Leuchten zu erkennen. Dabei tritt kein Zünden in Form einer nahezu vollständigen Umsetzung des Brennstoffs auf.

Die Limitierung der stattfindenden chemischen Reaktionen

beruht auf komplizierten brennstoffspezifischen Mechanismen der Niedertemperaturoxidation. Hierbei ist die Gleichgewichtsreaktion von Kohlenwasserstoffradikalen mit Sauerstoff zu Peroxiradikalen entscheidend. Der Schlüssel für die Entstehung der Kalten Flammen liegt in der mangelnden thermischen Stabilität der durch die Sauerstoffaddition gebildeten Vorläufersubstanzen. Bei höheren Temperaturen verschiebt sich das chemische Gleichgewicht wieder auf die Seite der Kohlenwasserstoffradikale. Damit zerfallen die Peroxiradikale und die Selbstzündung wird verhindert.

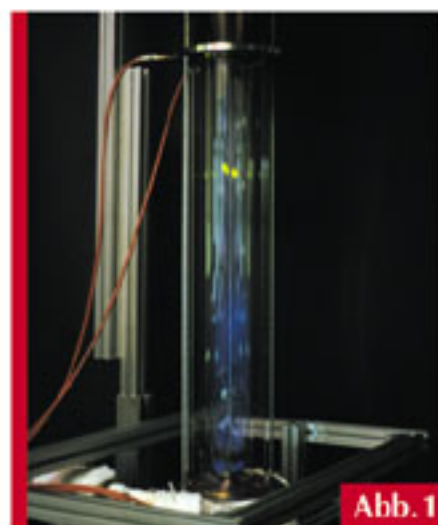


Abb. 1

Kalte Flamme in einem gläsernen Verdampfer

Verdampfungskonzepte für Heizöl EL

Es gibt verschiedene Ansätze, ein homogenes Gemisch aus Luft und Brennstoff zu erzeugen. Die Systeme arbeiten mit einer Zerstäubung der Flüssigkeit und/oder einer thermischen Aufbereitung, die zur teilweisen oder vollständigen Verdampfung in Luft oder Abgas führen.

Bei Mitteldestillaten, wie zum Beispiel Heizöl EL, führen Konzepte zur Verdampfung von Flüssigkeitsfilmen, die an heißen Oberflächen herablaufen, über längere Zeit zu Ablagerungen an den Oberflächen des Verdampfers.

Bei Konzepten der direkten Verdampfung wird der Brennstoff in einem vorgewärmten Luft-

strom zerstäubt und dort bei weiterer Wärmezufuhr vollständig verdampft. Ablagerungen an Oberflächen können so vermieden werden. Die notwendigen hohen Temperaturen im Bereich der Gemischbildung führen theoretisch jedoch zur Problematik der Selbstentzündung des Gemisches. Für die Verdampfung unter atmosphärischem Druck können 3 Fälle unterschieden werden.

Aufteilung der Verdampfung in Temperaturbereiche bei atmosphärischem Druck

Temperaturbereich	< 300 °C	300 °C bis 480 °C	> 500°C
Prozessführung	Endotherm	Exotherm	Endotherm
Vollständige Verdampfung	?	Ja	Ja
Zündfähigkeit	Fremdzündfähig	Fremdzündfähig	Selbstzündend
Produktbeeinflussung	Nein	Ja	Geringfügig
Modulation	Eingeschränkt	Frei	Eingeschränkt

Tab. 1

Aus Abbildung 2 ist ersichtlich, dass unterhalb einer Temperatur des Luftstroms von 300 °C keinerlei Vorreaktionen auftreten. Der Brennstoff wird nur teilweise verdampft. Hierzu muss dem Verdampfer von außen Energie zugeführt werden (endothermer Prozess), wodurch gleichzeitig auch die Leistungsmodulation eingeschränkt wird. Das entstehende Gemisch ist zu jeder Zeit fremdzündfähig.

Zerstäubung von Heizöl EL in einem heißen Luftstrom

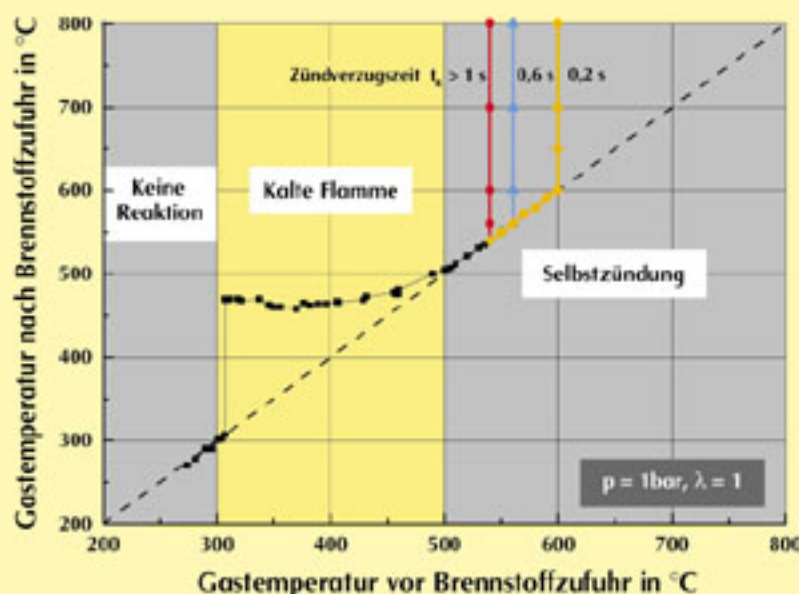


Abb. 2

In einem Temperaturbereich von 300 °C bis 480 °C treten die schon beschriebenen Kalten Flammen auf. Der Anstieg der Temperatur des Gemisches erklärt sich aus exothermen chemischen Reaktionen der Kohlenwasserstoffe mit dem Luftsauerstoff. Die Temperatur steigt in Strömungsrichtung um 10 K bis 150 K und stabilisiert sich bei einer Temperatur von 480 °C. Für Kohlenwasserstoff-Luft-Gemische stellt diese Temperatur einen Grenzwert dar, denn der weitere Anstieg der Lufttemperatur vor der Brennstoffzerstäubung erhöht die Gemischtemperatur nicht weiter. Hierdurch wird immer

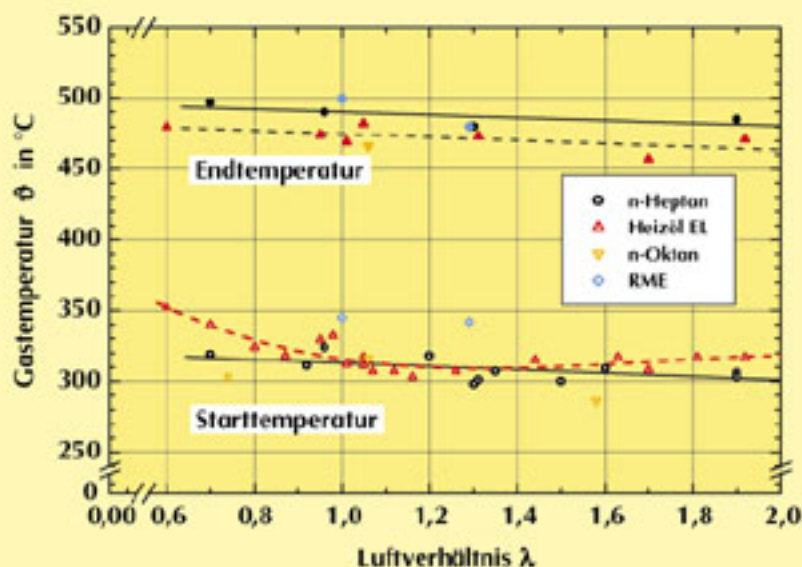
eine vollständige Verdampfung des flüssigen Brennstoffs erreicht. Gleichzeitig wird durch die exotherme Reaktionsführung ein sehr großer Modulationsbereich sowie eine Produktbeeinflussung erreicht. Das entstandene Gemisch ist durch eine Funkenzündung fremdzündfähig. Eine Selbstzündung tritt aber nicht ein.

Oberhalb von 480 °C ist die Temperaturerhöhung gering. Exotherme Reaktionen in Form der Kalten Flammen scheinen unter den gewählten Randbedingungen nicht mehr abzufließen. Der Bereich der Selbstzündungen wird erst für Temperaturen größer 500 °C erreicht. In diesem Fall steht für die Gemischaufbereitung dann nur die Zündverzugszeit t_z zur Verfügung. Aus diesem Grund ist die Leistungsmodulation eingeschränkt. Da in diesem Bereich nur vernachlässigbare Reaktionen zu beobachten sind, muss die zur Verdampfung notwendige Energie von außen zugeführt werden (endothermer Prozess).

Verdampfung mittels Kalter Flammen

Für den Betrieb von Verbrennungsanlagen ist der Einfluss des Luftverhältnisses auf die Gemischbildung von Interesse. Für die einleitenden Reaktionen der Kalten Flammen sind die Temperatur und die Partialdrücke der Edukte Kohlenwasserstoffradikale und Sauerstoff von Bedeutung.

Temperaturen der Kalten Flamme



Start- und Endtemperaturen der Kalten Flamme für unterschiedliche Brennstoffe ($p = 1 \text{ bar}$)

Abb. 3

In den durchgeführten Experimenten konnte die Ausbildung der Kalten Flammen mit dem Brennstoff Heizöl EL unter atmosphärischen Bedingungen bei Luftverhältnissen zwischen $\lambda = 0,3$ und $\lambda = 1,9$ gleichermaßen beobachtet werden, wenn die Temperatur des Luftstroms zu Beginn der Eindüsung zwischen 300 und 480 °C eingestellt wurde. Eine Erhöhung des Luftverhältnisses führt kaum zu Veränderungen der Endtemperatur des Gemisches nach der Brennstoffzufuhr. Für alle Einstellungen wird eine Endtemperatur zwischen 470 und 480 °C erreicht. Im Bereich der Temperaturen der Kalten Flammen (300 bis 480 °C) konnten keine Zündungen des Gemisches beobachtet werden. Damit ist es möglich, ein Gemisch aus Brennstoffdampf und Luft in einer Mischkammer zu

erzeugen und zu transportieren, ohne dass es zu einer unerwünschten Selbstzündung kommt.

Weiterhin sind Untersuchungen mit unterschiedlichen Brennstoffen durchgeführt worden, die in Abbildung 3 wiedergegeben sind. Es zeigte sich, dass die Start- und Endtemperaturen der sich einstellenden Kalten Flammen der verwendeten Brennstoffe nahezu identisch sind. Nur die Starttemperatur von Raps-Methyl-Ester (RME) ist aufgrund seines Siedebereiches von 330 bis 340 °C erhöht. Es konnte hiermit die Unabhängigkeit der Kalten Flamme vom Siedepunkt oder Siedeverlauf des Kohlenwasserstoffs bei den eingesetzten Brennstoffen gezeigt werden.

Die Güte des Verdampfungsprozesses unter Einsatz der Kalten Flammen ist weitgehend unabhängig von der Tropfengröße und -verteilung des verwendeten Sprays. Durch die Kalten Flammen wird ein Brennstoff-Luft-Gemisch mit neuen Eigenschaften erzeugt. Zwischen 5 und 15 Prozent der im Brennstoff gebundenen chemischen Energie, abhängig von den eingestellten Randbedingungen, werden bereits während der Gemischbildung umgesetzt. Dieser Umsatz ist steuerbar. Durch die Oxidations- und Zerfallsreaktionen kommt es zu einer Molekülkettenverkleinerung des Ausgangsbrennstoffs. Auch unter unterstöchiometrischen Bedingungen reagiert nur ein Teil des vorhandenen Sauerstoffs.

Gläserner Verdampfer für Heizöl EL

Zur Demonstration der Brennstoffverdampfung mittels kalter Flammen wurde ein gläserner Verdampfer für Heizöl EL entwickelt. Hier kann die rückstandsfreie Verdampfung von Heizöl EL mittels kalter Flammen und die Verbrennung des erzeugten gasförmigen Brennstoff-Luft-Gemisches an einer Drahtoberfläche mit verschiedenen Flammenformen unter atmosphärischem Druck gezeigt werden.

Der Verdampfer besteht aus einem senkrecht angeordneten 800 mm langen Glasrohr mit

Schemadarstellung des gläsernen Verdampfers für Heizöl EL

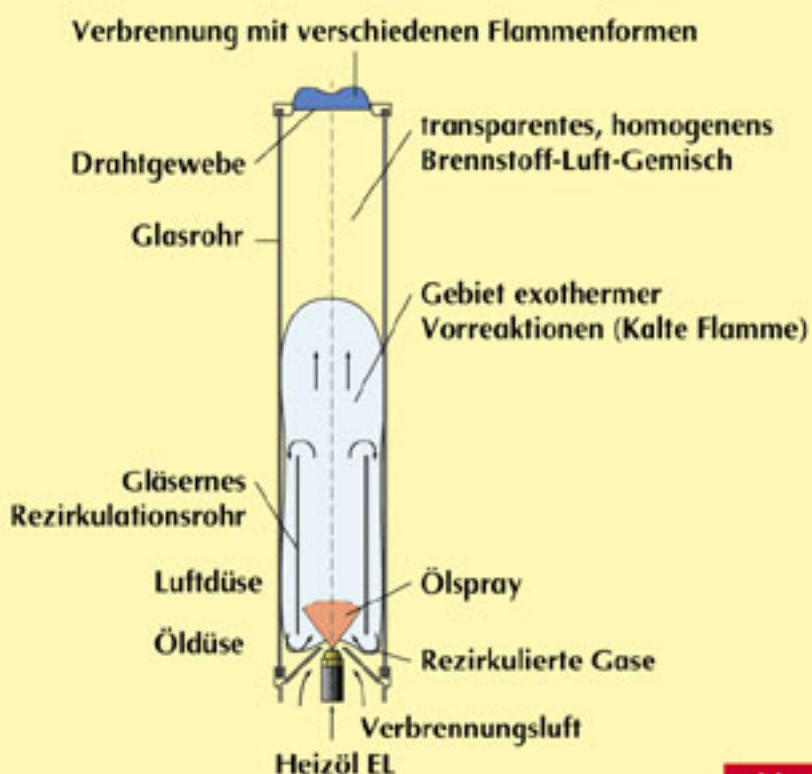


Abb. 4

einem Durchmesser von 90 mm. Am unteren Ende des Verdampfers wird durch eine handelsübliche, wassergekühlte Düse der flüssige Brennstoff (Heizöl EL) in einen auf etwa 300 °C vorgewärmten Verbrennungsluftstrom injiziert. Die Verbrennungsluft tritt durch einen Ringspalt zwischen der Öldüse und der konisch zulaufenden Luftdüse in den Verdampfer ein. Das Ölspray ist bereits nach etwa 10 mm nicht mehr als geschlossener Sprühkegel zu erkennen. Der Brennstoffdampf und die Verbrennungsluft strömen in ein gläsernes Rezirkulationsrohr, in dem die kalte Flamme einsetzt. Verbunden mit dem Einsetzen der kalten Flamme ist ein Temperaturanstieg auf bis zu 480 °C und

ein sehr schwaches blaues Leuchten, das nur in absoluter Dunkelheit zu sehen ist. Das Rezirkulationsrohr dient dazu, Gase aus dem Bereich, in dem die kalte Flamme abläuft, durch die Injektorwirkung der Verbrennungsluft in die Spraywurzel zu transportieren. Dadurch kann die Temperatur der zugeführten Luft gesenkt werden. Im Labor wurden bereits Versuche durchgeführt, bei denen auf eine Luftvorwärmung vollständig verzichtet werden konnte.

Das vollständig transparente, gasförmige Brennstoff-Luft-Gemisch tritt, nachdem es das 800 mm lange Glasrohr durchströmt hat, durch ein Edelstahldrahtgewebe, das den Ab-

schluss des Verdampfers bildet. Die Verbrennung des Gemisches kann dann an verschiedenen Flammenformen gezeigt werden. Es sind blau brennende Flammen direkt oberhalb des Drahtgewebes (Oberflächenverbrennung), eine vom Drahtgewebe abgehobene Flamme



Abb. 5a



Abb. 5b

Verbrennung des mittels kalter
Flammen erzeugten
Brennstoff-Luft-Gemisches
oberhalb eines Drahtgewebes
und in einer Keramik

und eine Verbrennung in einer porösen Keramik denkbar. In Abbildung 5a/b sind zwei Flammenformen exemplarisch dargestellt.

Es wird ein Heizölstrom von etwa 700g/h verdampft. Das entspricht einer Leistung von 7 kW. Das Luftverhältnis λ kann variiert werden. Die mittlere Aufenthaltszeit des Gemisches im Glasrohr von der Eindüsung am unteren Ende bis zur Verbrennung am oberen Ende des Glasrohres beträgt 1,5 s, ohne dass es zur Selbstzündung kommt.

Einsatzbereiche

Das durch kalte Flammen erzeugte Brennstoff-Luft-Gemisch kann als Grundlage diverser moderner Brennerkonzepte und als Ausgangsstoff für die Synthesegasherstellung angesehen werden.

Verbrennungskonzepte, die sonst nur mit gasförmigen Brennstoffen realisierbar sind, können nun auch mit flüssigen Brennstoffen genutzt werden. Hierzu zählen die Verbrennung direkt oberhalb einer Oberfläche (Strahlungsbrenner) und in porösen Körpern wie zum Beispiel im Porenbrenner. Diese Techniken ermöglichen eine deutliche Reduzierung des Schadstoffausstoßes und Vorteile bei der Wärmeübertragung von der Flamme an die Brennkammerwände.

Die Synthesegasherstellung aus flüssigen Brennstoffen

ermöglicht einen vielfältigen Einsatz im Bereich der Energietechnik, insbesondere in den zukunftssträchtigen Bereichen der Kraft-Wärme-Kopplung und der Brennstoffzellentechnologie. In Blockheizkraftwerken kann der Vorteil der niedrigen Schadstoffemission eines Gasmotors mit den niedrigeren Brennstoffkosten der flüssigen gegenüber den gasförmigen Brennstoffen verbunden werden. Neben einer vereinfachten Abgasnachbehandlung ist auch ein Inselbetrieb möglich.

Für einen Einsatz flüssiger Brennstoffe in Hoch- oder Niedertemperatur-Brennstoffzellen kann die Gemischaufbereitung als „Vergaser“ arbeiten. Die Anforderung der Versorgung mit einem homogenen Prozessgas mit hohem Heizwert wird erfüllt. Insbesondere für mobile Anwendungen besteht ein wesentlicher Vorteil in der einfachen Handhabung des ursprünglichen Brennstoffs in Bezug auf Lagerung und Sicherheit.

