

Brenngeschwindigkeit und Verfahren zur Bestimmung

Beschreibung einer ebenen laminaren Vormischflamme

Der prinzipielle Verlauf der Temperatur und der Konzentrationen der auftretenden chemischen Spezies in einer vorgemischten laminaren Flamme ist in Abbildung 1 abgebildet. Zur Beschreibung einer Flamme ist eine Aufteilung in verschiedene Zonen hilfreich [4][5]:

- Die Anströmzone, in der das Gemisch zur Flamme transportiert wird.
- Die Vorwärmzone, in der die Temperatur des Gemisches ansteigt.
- Die Reaktionszone, in der der Brennstoffumsatz erfolgt.
- Die Gleichgewichtszone, in der das Abgas abströmt.

Die Temperatur steigt von der Ausgangstemperatur T_U des Brennstoff-Luft-Gemisches in der Anströmzone stetig bis auf die Flammentemperatur T_F , die im Abgas herrscht. In der Vorwärmzone ist der Wärmestrom, der durch Wärmeleitung von der Reaktionszone in die Vorwärmzone transportiert wird, größer als der in die Anströmzone abfließende Wärmestrom. Dadurch erfolgt ein Temperaturanstieg, ohne dass bereits eine Reaktion vorliegt. Der Temperaturanstieg in der Reaktionszone ist auf die freigesetzte Brennstoffenergie zurückzuführen, die deutlich größer als der in die Vorwärmzone abgeleitete Wärmestrom ist. Die Trennung der Vorwärmzone von der Reaktionszone wird durch den Wendepunkt des Temperaturverlaufs markiert.

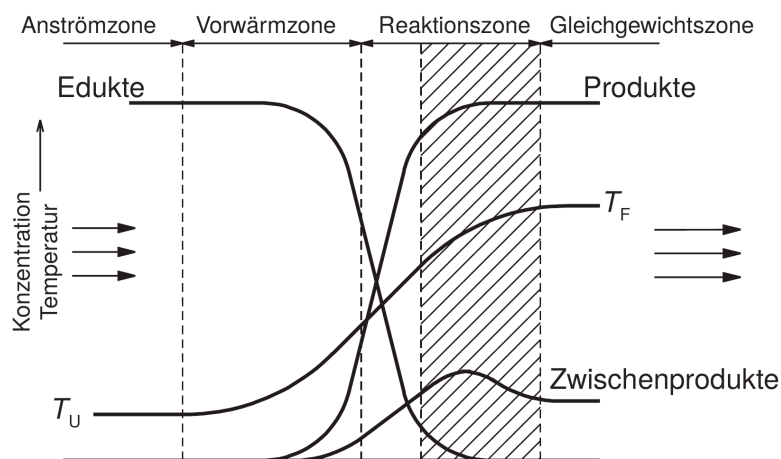


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer laminaren Vormischflamme [4]

Der Konzentrationsverlauf der Produkte ist dem Temperaturverlauf ähnlich. Der Konzentrationsanstieg in der Vorwärmzone wird vor allem durch Diffusion von Produkten aus der Reaktionszone bewirkt. Erst in der Reaktionszone kommt es zu einem drastischen Anstieg der Produkte.

Neben den Produkten treten in der Reaktionszone auch Zwischenprodukte in Form von Radikalen (CH, CN, C₂, CHO) auf, die für das charakteristische bläuliche Leuchten vorgemischter überstöchiometrischer Flammen verantwortlich sind.

Bei einer vollständigen Verbrennung werden die Zwischenprodukte verbraucht. Nur bei einer drastischen Wärmeabfuhr (Quenching) in der Reaktionszone kann der Verbrennungsvorgang eingefroren werden und es können Zwischenprodukte im Abgas auftreten. Liegt eine vollständige Verbrennung vor, stellt sich nach der Reaktionszone chemisches und thermodynamisches Gleichgewicht ein.

Die laminare Brenngeschwindigkeit

Die laminare Brenngeschwindigkeit u_l (laminar burning velocity) ist bei adiabater Verbrennung eine physikalisch-chemische Konstante eines brennbaren Gemisches. Es ist die Geschwindigkeit, mit der eine eindimensionale ebene Flammenfront relativ zum unverbrannten Gemisch fortschreitet. Das Fortschreiten der Flamme in das unverbrannte Gemisch wird durch Wärmeleitung und Diffusion von Radikalen in die Vorwärmzone hervorgerufen [6][7][8].

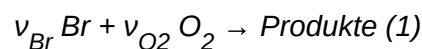
Die Brenngeschwindigkeit ist im Wesentlichen von der Temperatur, dem Druck, dem Luftverhältnis λ und der Brennstoffart abhängig [2][8]. Einen Einfluss haben auch die Wärmeleitfähigkeit des Brennstoff-Luft-Gemisches und das Diffusionsverhalten der Zwischenprodukte, die bei der Verbrennung entstehen. Da die chemischen Reaktionen in der Flamme auf Grund der hohen Temperaturen sehr schnell ablaufen, ist ihr Einfluss auf die Brenngeschwindigkeit im Vergleich zu den wesentlich langsameren Transportvorgängen von geringerer Bedeutung [8].

Die Brenngeschwindigkeit einer vorgemischten, nicht idealisierten Flamme hängt vor allem von der Flammentemperatur, d. h. von den Wärmeverlusten der Flamme durch Strahlung, Konvektion oder Wärmeleitung ab.

Des Weiteren darf die Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von der Art der Gemischaufbereitung nicht vernachlässigt werden. Erfolgt die Gemischaufbereitung bei Raumtemperatur, so tritt die Temperaturerhöhung des Gemisches erst in der Flammenfront auf und hat somit keinen Einfluss auf die Brenngeschwindigkeit. Bei einer Vorheizung des Gemisches, wie sie zum Beispiel für die Verdampfung flüssiger Brennstoffe notwendig wird, können, bei genügend langer Aufenthaltszeit in der Mischungszone, Vorreaktionen auftreten. Die Vorreaktionen bewirken bereits einen Teilumsatz, wodurch die Brenngeschwindigkeit reduziert werden kann [9]. Treten keine Vorreaktionen auf, so hat eine erhöhte Gemischtemperatur höhere Brenngeschwindigkeiten zur Folge, da die Temperatur in der Reaktionszone steigt und die ablaufenden Verbrennungsreaktionen beschleunigt werden. Eine Absenkung der Brenngeschwindigkeit kann durch Inertisierung des Gemisches, beispielsweise durch Abgasrezirkulation, erreicht werden.

Zur Berechnung der Brenngeschwindigkeit ist die Lösung der Erhaltungsgleichungen für Masse, Stoff, Energie und Impuls unter Berücksichtigung aller bei einer Verbrennung auftretenden Spezies notwendig [10]. Die Berechnung der Brenngeschwindigkeiten langkettiger Kohlenwasserstoffe oder Kohlenwasserstoffgemische auf der Basis einer chemischen Analyse des Brennstoffes ist nicht möglich. Die Analyse gibt nur Auskunft über die Zusammensetzung des Brennstoffes, nicht aber über die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen während der Verbrennung [4].

Deshalb wird in der Literatur zur Berechnung der Brenngeschwindigkeit häufig auf eine vereinfachte Beschreibung der Verbrennungsreaktion in Form einer Einschritt-Bruttoreaktion zurückgegriffen



und für die Reaktionsgeschwindigkeit ein Arrhenius-Ansatz gewählt:

$$dc_{Br}/dt = -k \cdot c_{Br}^{v_{Br}} \cdot c_{O_2}^{v_{O_2}} \cdot e^{-E/RT} \quad (2)$$

Die Einheit des vorexponentiellen Faktors k ist hiernach von den stöchiometrischen Koeffizienten für Brennstoff v_{Br} und Sauerstoff v_{O_2} abhängig.

Auf dieser Basis wurde von Zeldovich und Frank-Kamenetski die thermische Theorie der Flammenfortpflanzung entwickelt, die einen analytisch hergeleiteten Ausdruck für die Brenngeschwindigkeit bereitstellt [5][11][12]. Möglich wird dies durch einige Vereinfachungen. So wird davon ausgegangen, dass eine sehr dünne Reaktionszone vorliegt, in der die konvektiven gegenüber den diffusiven Wärme- und Stoffströmen und der Reaktionsgeschwindigkeit vernachlässigt werden können. In der Vorwärmzone wird dagegen die Reaktionsgeschwindigkeit nicht berücksichtigt. Zusätzlich werden in der Reaktionszone alle Stoffdaten als konstant angenommen und als Bezugstemperatur die Flammentemperatur eingesetzt. Wird außerdem die Gleichheit der Lewis-Zahlen von Brennstoff Le_{Br} und Oxidator Le_{O_2} vorausgesetzt, so ergibt sich für das Produkt aus der Dichte des Gemisches ρ_G bei Umgebungstemperatur und der laminaren Brenngeschwindigkeit u_l :

$$\rho_G \cdot u_l = [k \cdot \rho_F \cdot \lambda_F \cdot R^2 \cdot T_F^4 \cdot e^{-E/RT_F} \cdot A / (c_p \cdot (T_F - T_U)^2 \cdot E^2)]^{1/2} \quad (3)$$

Das Produkt der Dichte ρ_G und der Brenngeschwindigkeit u_l entspricht einem flächenbezogenen Massenstrom. Gleichung 3 gibt den starken Einfluss der Flammentemperatur T_F wieder und berücksichtigt die Gemischzusammensetzung durch die Massenanteile ξ_i im Abgas. Zur Bestimmung der Werte für die Wärmeleitfähigkeit λ_F , die spezifische Wärmekapazität c_p und die Dichte ρ_F wird die Flammentemperatur eingesetzt. Der vorexponentielle Faktor k sowie die Aktivierungsenergie E können nicht berechnet werden, sondern werden durch Anpassung an Messdaten oder Simulationsergebnisse ermittelt. Eine ausführliche Herleitung der Gleichung 3 ist bei Peters [5] zu finden.

In Abbildung 2 ist die unter Verwendung von Gleichung 3 berechnete Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von Methan als Funktion des Luftverhältnisses λ für drei verschiedene Gemischtemperaturen dargestellt. Die Anpassung der Aktivierungsenergie E und des vorexponentiellen Faktors k wurde von Lamm [13] durch Vergleich mit numerischen Ergebnissen durchgeführt.

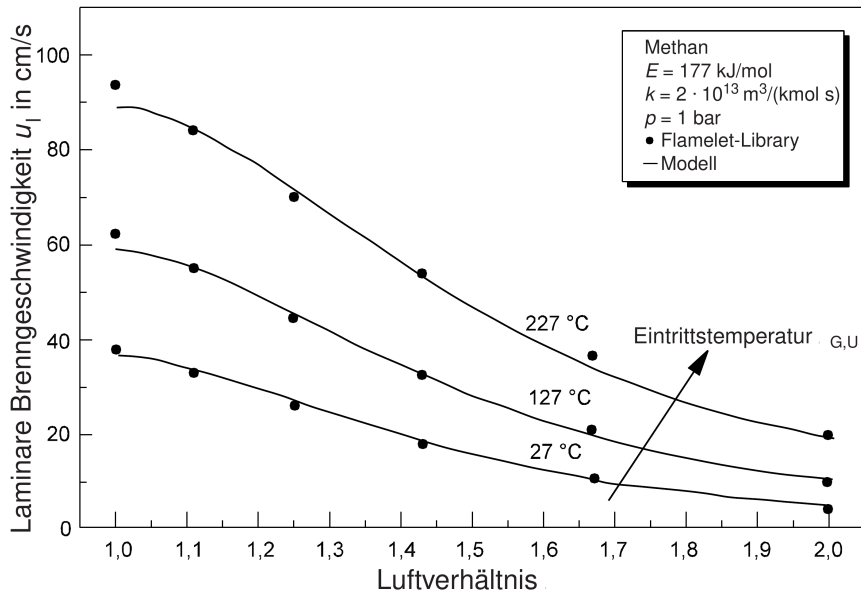


Abbildung 2: Berechnete Brenngeschwindigkeit von Methan nach Lamm [13]

Experimentelle Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeit

Die in der Vergangenheit eingesetzten Versuchsmethoden zur experimentellen Bestimmung der Brenngeschwindigkeit wurden von verschiedenen Autoren zusammenfassend beschrieben [1][6][14][15][16][17]. Eine Übersicht der Versuchsmethoden ist in Abbildung 3 dargestellt. Zwei Gruppen von Verfahren können grundsätzlich unterschieden werden:

1. Gefäßverfahren: Ausgangsgemisch ruht, Flamme wandert
2. Brenneverfahren: Gemisch strömt, Flamme steht fest im Raum

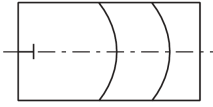
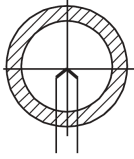
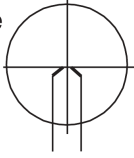
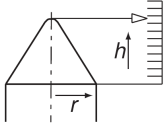
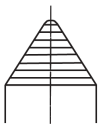

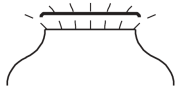
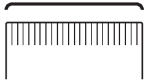
Methode	Beobachtung	Fehler
Rohr 	Laufzeit zwischen zwei Punkten Fotografisch Fotozellen Ionisationssonden	Druckanstieg Wandeinfluss
Bombe 	$V = \text{const.}$ Druckanstieg Fotografisch	3-dimensionale Ausbreitung erfordert genaue Zeitmessung Wandeinfluss Zündenergie
Seifenblase (Gummi-) 	$p = \text{const.}$ Durchmesserzunahme Fotografisch	3-dimensionale Ausbreitung erfordert genaue Zeitmessung
Kegelhöhe 	Höhenmessung $u_l = u_G \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}}$	Proportionalität h/u_l unsicher wegen Spitzenanomalie
Kegelfläche 	Flammenfläche aus Fotografie $A_F \cdot u_l = A_R \cdot u_G$	Verfahren liefert mittleres u_l über Gesamtfläche
Schlierenbild 	aus Schlierenbild u aus Teilchenspuren $u_l = u_G \cdot \sin \alpha$	Flammenkrümmung bei Düsendurchmesser < 12 mm
Flachflamme 	$u_G = u_l$ u_G aus Teilchenspuren	Stabilisierung schwierig keine Störung durch Krümmung, Wärmeverlust und Konzentrationsänderung
Flachflamme 	$u_G = u_l$ u_G aus Volumenstrom oder Teilchenspuren	Wärmeverlust an den Brenner

Abbildung 3: Verfahren zur Bestimmung der Brenngeschwindigkeit [17]

Gefäßverfahren

Bei den Gefäßverfahren breitet sich die Flamme in einem Rohr, einer Bombe oder einer Seifenblase aus.

Rohr

Bei dieser häufig zur Untersuchung von Detonationen, weniger dagegen zur Untersuchung von Unterschallflammen eingesetzten Methode wird das unverbrannte Gemisch in ein entweder geschlossenes oder an einem Ende offenes Rohr gefüllt und am Rohrende elektrisch gezündet.

Die Flamme bildet nach Erreichen des vollen Rohrdurchmessers idealerweise eine gleichmäßig gekrümmte Fläche aus. Ihre Fortpflanzung kann entweder fotografisch oder, bei geschlossenem Rohr, über den Druckanstieg verfolgt werden.

Bei sich schnell ausbreitenden Flammen ist die Flammenoberfläche näherungsweise halbkugelförmig und wird aus Fotografien bestimmt. Die Halbkugelform resultiert aus der niedrigeren Brenngeschwindigkeit nahe der Rohrwand, die eine Folge der Kühlung der Flamme in diesen Bereichen ist. Damit ergibt sich die Einschränkung, dass nur eine mittlere Brenngeschwindigkeit ermittelt werden kann. Der Fehler ist umso größer, je langsamer sich die Flamme ausbreitet und je kleiner der Rohrdurchmesser ist [1].

Auf Grund von Störungen, wie z. B. Druckschwankungen, ist die Flammenoberfläche häufig gestört. Durch eine Öffnung in der hinteren Rohrwand können diese Störeinflüsse verringert werden [6]. Allerdings wird damit zugelassen, dass sich das unverbrannte Gemisch in Bewegung setzt und durch die Öffnung entweicht.

Bombe

Bei Verwendung einer geschlossenen kugelförmigen Kammer (Bombe) wird das Gemisch durch einen Zündfunken im Mittelpunkt der Bombe gezündet. Theoretisch breitet sich die Flamme kugelförmig aus. Der Einfluss der Flammenkrümmung nimmt mit größerem Durchmesser ab. Ab Durchmessern größer 250 mm kann die Annahme einer sich eindimensional ausbreitenden Flamme getroffen werden [6]. Da die Änderung des Durchmessers zeitlich nicht direkt gemessen werden kann, muss der Flammenradius mit Hilfe von Fotos bestimmt werden. Dies führt auf Grund der Flammendicke zu Unsicherheiten.

Bei Fortschreiten der Flamme erhöht sich sowohl der Druck als auch die Temperatur in der Bombe. Zudem wird das unverbrannte Gemisch vor der Flamme in Bewegung gesetzt, da das Volumen des Abgases wesentlich größer als das des unverbrannten Gemisches ist. Die Messung des Druckes ist, gerade zu Beginn der Flammenausbreitung, mit Fehlern verbunden. Zudem ist eine adiabate Verbrennung, bedingt durch Wärmeabgabe an die Kammerwände, nicht möglich. Aus diesen Gründen folgt, dass dieses Verfahren seine Anwendung eher zur Brenngeschwindigkeitsmessung bei überhöhten Drücken findet [16].

Seifenblase

Die Druckerhöhung im unverbrannten Gemisch kann vermieden werden, wenn Seifenblasen eingesetzt werden, in deren Zentrum, wie bei der Bombe, das Gemisch gezündet wird. Die Seifenblase dehnt sich mit größer werdender Flamme aus. Neben den experimentellen Schwierigkeiten kann der wässrige Seifenblasenfilm Einfluss auf die Verbrennung haben.

Anfangs- und Enddurchmesser der Flamme und der Seifenblase sowie auch die Flammengeschwindigkeit werden fotografisch ermittelt.

Brennverfahren

Die Brennverfahren zeichnen sich durch eine stationäre Flamme aus. Dabei wird zwischen kegelförmigen und ebenen Flammen unterschieden.

Kegelförmige Flammen

Der Hauptteil der in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der Brenngeschwindigkeit ist an kegelförmigen Flammen durchgeführt worden.

Dabei wird bei allen Methoden davon ausgegangen, dass auf jedem Punkt der Flammenfront ein dynamisches Gleichgewicht zwischen der Anströmgeschwindigkeit des unverbrannten Gemisches und der Brenngeschwindigkeit herrscht. Damit ist die Brenngeschwindigkeit gleich dem Betrag der brennflächennormalen Geschwindigkeitskomponente.

$$u_l = u_G \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

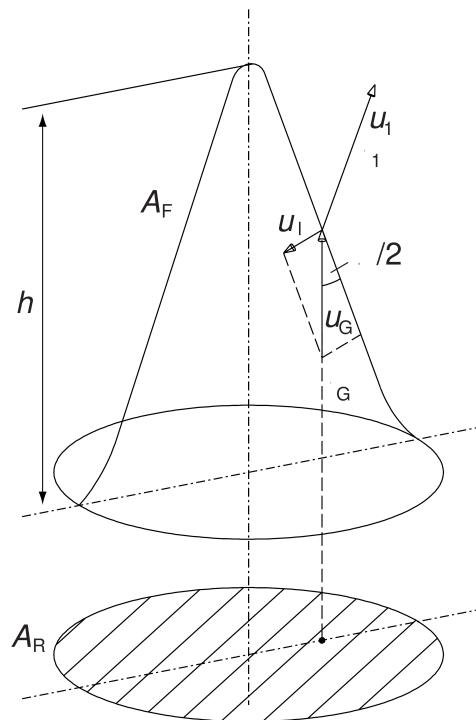


Abbildung 4: Kegelförmige Flamme

Unter der Annahme, dass die Brenngeschwindigkeit entlang der Flammenoberfläche A_F konstant ist, gilt für die Brenngeschwindigkeit:

$$u_l = u_G \cdot A_R / A_F \quad (5)$$

Darin wird die Ausströmgeschwindigkeit u_G des Gemisches als konstant über der Brenneröffnung angenommen. Unter der Annahme, dass die Flamme einen spitzen Kegel bildet, kann aus der Höhe der Flamme und der Ausströmgeschwindigkeit die Brenngeschwindigkeit bestimmt werden [15].

$$u_l = u_G \cdot D / \sqrt{D^2 + 4h^2} \quad (6)$$

Da die Spitze der Flamme gekrümmt ist, ist es zweckmäßiger, den Winkel der Flammenfront an der Flanke des Kegels zu bestimmen. Zur Bestimmung des Winkels wurden in der Vergangenheit häufig Schatten- oder Schlierenaufnahmen ausgewertet [16].

Flachflammenmethoden

Die zuerst von Powling [18] eingesetzte Flachflammenmethode eignet sich besonders zur Messung niedriger Brenngeschwindigkeiten (Abbildung 5).

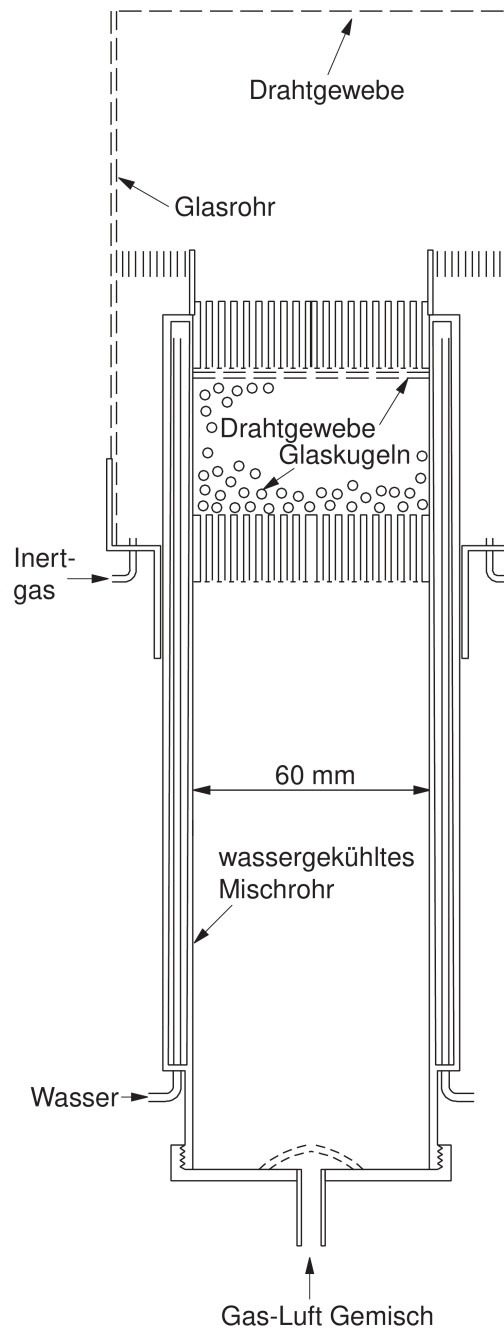


Abbildung 5: Powling Brenner

Dazu wird in der Brennermündung ein Strömungsgleichrichter eingesetzt, der eine ebene Flamme erzeugt [17]. Da damit die Gleichheit zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Brenngeschwindigkeit gegeben ist, kann die Brenngeschwindigkeit aus den zugeführten Brennstoff- und Luftvolumenströmen berechnet werden. Die größte Schwierigkeit dieser Methode liegt in der Wärmeabgabe der Flamme an die Strömungsgleichrichter. Durch den Wärmeverlust wird die Flammentemperatur gesenkt und die Brenngeschwindigkeit sinkt. Da die Wärmeabgabe vom Abstand der Flamme zu den Gleichrichtern abhängt und dieser

wiederum von dem Volumenstrom des Gemisches beeinflusst wird, ist eine Bestimmung der Brenngeschwindigkeit aus der Strömungsgeschwindigkeit ohne Kenntnis der Flammentemperatur nicht sinnvoll. Um dieses Problem zu beseitigen, arbeiteten Botha und Spalding [3] mit einer wassergekühlten porösen Platte, die sie auf konstanter Temperatur hielten. Durch Messung der Temperatur des ein- und ausfließenden Kühlwassers bestimmten sie den von der Flamme an die poröse Platte übertragenen Wärmestrom und damit die Flammentemperatur.

Eine direkte Messung der Flammentemperatur oberhalb eines feinen gekühlten Lochbleches wurde unter anderem von Kaskan [19], Friedman [20][21] und Rumminger [22] mit Hilfe eines Thermoelements durchgeführt. Ferguson und Keck [23] verwendeten die Hitzdraht-Pyrometrie zur Bestimmung der Flammentemperatur. Dzubiella [24] und Gerling [25] benutzten die CARS-Lasermesstechnik zur Bestimmung der Flammentemperatur an einem mit einem halbkugelförmigen Drahtgewebe ausgerüsteten Haushaltsbrenner.

Eine weitere Möglichkeit, eine ebene Flamme zu realisieren, bietet sich, wenn die Brennermündung als Düse ausgeführt wird. Durch eine geeignete Ausführung kann in der Düse ein kolbenförmiges Geschwindigkeitsprofil und damit eine ebene Flamme erzeugt werden. Allerdings verfälschen die Randeinflüsse die Messung der Brenngeschwindigkeit. Diese Schwierigkeiten werden vermieden, wenn eine Teilchenspurmethode verwendet und die Messung achsennah durchgeführt wird.

Einen modifizierten Aufbau der Düsenmethode bietet die Gegenstrom-Doppelflammen-Technik [26]. Bei diesem Aufbau brennen zwei Flammen gegeneinander, wobei das Gemisch aus zwei identischen, gegenüberliegenden Düsen strömt. Die Flammen sind durch eine Abgasschicht voneinander getrennt. Wird das Geschwindigkeitsfeld mit Lasertechniken (LDA, PIV) vermessen, kann damit der Einfluss der Flammendehnung auf die Brenngeschwindigkeit untersucht werden. Durch Extrapolation auf einen Zustand ohne Flammendehnung wird die laminare Brenngeschwindigkeit bestimmt. Die Verwendung der Flachflammdüsenmethoden wird dadurch eingeschränkt, dass es nur unter bestimmten Bedingungen gelingt, ebene Flammen zu erzeugen.

Laminare Brenngeschwindigkeiten von Kohlenwasserstoffen

Zur Bestimmung der laminaren Brenngeschwindigkeiten mit den in Kapitel 2.2.3 beschriebenen experimentellen Aufbauten wurden überwiegend bei Raumtemperatur gasförmige Brennstoffe eingesetzt. Der Einsatz gasförmiger Brennstoffe hat den Vorteil, dass die Vermischung mit der Verbrennungsluft zur Erzeugung eines homogenen Brennstoff-Luft-Gemisches einfach ist. Einen typischen Verlauf der Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von Methan-Luft-Gemischen vom Luftverhältnis λ gibt Abbildung 6 wieder. Das Maximum der Brenngeschwindigkeit liegt nahe der stöchiometrischen Mischung auf der luftarmen Seite. Die Unterschiede der Maxima bei stöchiometrischer

Zusammensetzung ergeben sich aus den eingesetzten Messmethoden. Der niedrigste Wert wurde an einem Powling-Brenner gemessen und kann durch die Wärmeabgabe der Flamme an den Strömungsgleichrichter erklärt werden [17].

In der unteren Hälfte des in Abbildung 6 dargestellten Diagramms ist die adiabate Flammentemperatur T_{ad} über dem Luftverhältnis λ aufgetragen. Die Berechnung der Flammentemperatur basiert auf einem Satz von Reaktionsgleichungen, der vom Gas-Research-Institute zusammengestellt wurde. Unter Berücksichtigung der exponentiellen Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von der Temperatur kann geschlossen werden, dass die Änderung der Brenngeschwindigkeit mit dem Luftverhältnis λ im Wesentlichen der Änderung der Flammentemperatur folgt [7].

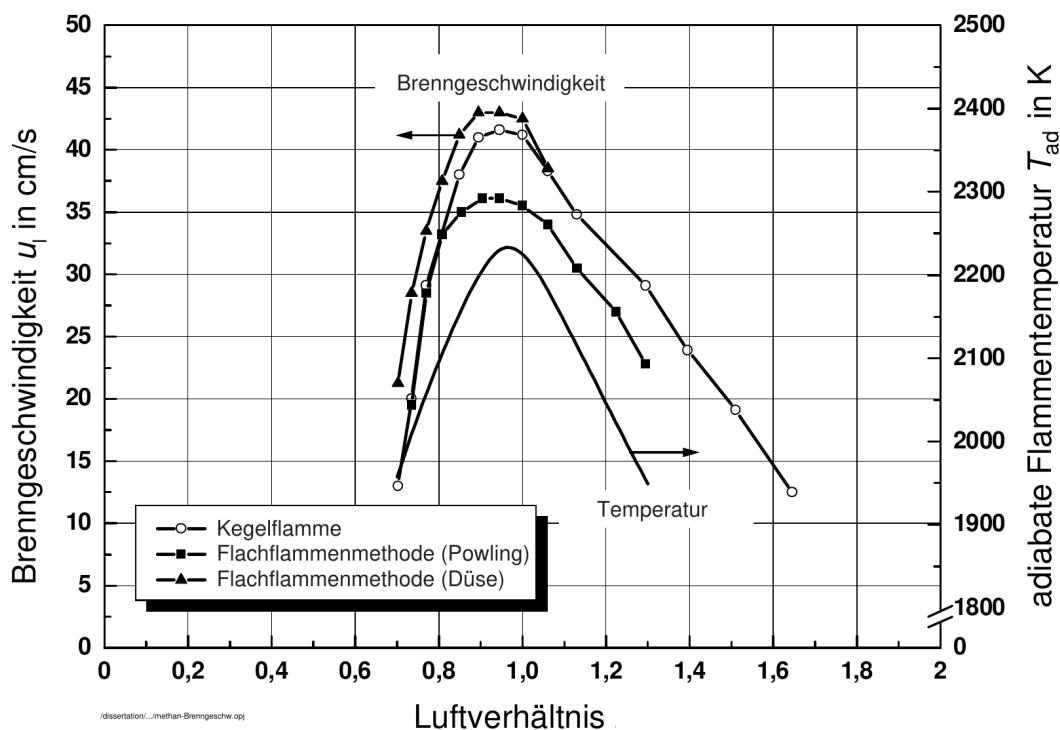


Abbildung 6: Brenngeschwindigkeit von Methan an unterschiedlichen Messapparaturen und berechnete adiabate Flammentemperatur [17]

Das Maximum der Flammentemperatur, und damit auch das Maximum der Brenngeschwindigkeit, befindet sich nahstöchiometrisch auf der luftarmen Seite. Die Erklärung hierfür ergibt sich bei Betrachtung der spezifischen Wärmekapazitäten der Verbrennungsprodukte. Bei einer luftarmen Verbrennung enthält das entstehende Produktgas höhere Konzentrationen zweiatomiger Moleküle als bei stöchiometrischer Verbrennung. Da die spezifischen Wärmekapazitäten zweiatomiger Moleküle (CO , H_2) niedriger als die dreiatomiger Moleküle (CO_2 , H_2O) sind, sinkt damit die mittlere spezifische Wärmekapazität des Produktgases. Daraus resultiert eine etwas höhere Flammentemperatur auf der luftarmen Seite [7].

Eine umfangreiche Übersicht über Brenngeschwindigkeitsmessungen von Methan-Luft-Gemischen unter Berücksichtigung der Versuchsapparaturen wurde von Andrews und Bradley [6] bereits 1972 zusammengestellt. Als Mittelwert für die maximale laminare Brenngeschwindigkeit geben sie einen Wert von $u_l = 45$ cm/s an. In neueren Veröffentlichungen wird für Methan von einer maximalen Brenngeschwindigkeit $u_l < 40$ cm/s ausgegangen [7]. Im Vergleich zu Alkanen höherer Ordnung ist Methan hinsichtlich der Brenngeschwindigkeit eine Ausnahme. Dies liegt vor allem an der niedrigen adiabaten Flammentemperatur (~ 2225 K). Daneben hat bei Methan die Molekülstruktur einen Einfluss, da auf Grund des stabilen CH_4 -Moleküls der Zerfall erst sehr spät in der Reaktionszone stattfindet. Dagegen ist der Zerfall von Propan zu Beginn der Reaktionszone charakteristisch für die meisten Kohlenwasserstoffe höherer Ordnung [7].

In Tabelle 1 sind experimentell ermittelte Brenngeschwindigkeiten verschiedener Kohlenwasserstoffe bei stöchiometrischen Bedingungen und die maximalen Brenngeschwindigkeiten mit den dazugehörigen Luftverhältnissen λ aufgeführt.

Brennstoff	u_l (stöch) in cm/s	u_l (max) in cm/s	λ bei u_l (max)
Methan	43,4	44,8	0,93
Ethan	44,5	47,6	0,88
Propan	45,6	46,4	0,94
n-Butan	44,8	44,9	0,97
n-Pentan	42,7	43	0,95
n-Heptan	42,2	42,8	0,95

Tabelle 1: Brenngeschwindigkeiten verschiedener Kohlenwasserstoffe [7]

Bei den aufgelisteten Brenngeschwindigkeiten wird vorausgesetzt, dass eine adiabate Verbrennung und damit auch die adiabate Flammentemperatur in der Flamme vorliegt. Die experimentelle Bestimmung von Brenngeschwindigkeiten bei niedrigeren Temperaturen ist entweder durch Kühlung des Brennstoff-Luft-Gemisches oder durch Kühlung der Flamme möglich. Durch eine Kühlung der Flamme können Temperaturen erreicht werden, die selbst bei einer theoretischen Kühlung des Gemisches auf den absoluten Nullpunkt und anschließender adiabater Verbrennung nicht möglich wären [3]. Bei flüssigen Brennstoffen ist eine Aufheizung des Brennstoffes oder der Verbrennungsluft, in die der Brennstoff eingebracht wird, zur Verdampfung unerlässlich. Die Messung von Brenngeschwindigkeiten bei nicht adiabaten Flammentemperaturen ist hier nur durch Kühlung in der Hochtemperaturzone, zum Beispiel durch Einsatz einer Flachflammentechnik, möglich.

In Abbildung 7 sind die Brenngeschwindigkeiten von Propan-Luft-Gemischen bei unterschiedlichen Luftverhältnissen über der Flammentemperatur aufgetragen. Die Messungen wurden von Kaskan [19] an einem Powling-Brenner durchgeführt. Die

Flammentemperatur wurde mit einem beschichteten Thermoelement gemessen. Deutlich zu erkennen ist die Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit von der Flammentemperatur. Die Anhebung der Flammentemperatur von 1600 K auf 1900 K hat bei einem Luftverhältnis $\lambda = 1,25$ fast eine Vervielfachung der Brenngeschwindigkeit zur Folge.

Bei gleicher Verbrennungstemperatur ist die Brenngeschwindigkeit des stöchiometrischen Gemisches am niedrigsten. Dieses Verhalten lässt sich vereinfacht anhand der Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von den Brennstoff- und Sauerstoffkonzentrationen erklären. Die Reaktionsgeschwindigkeit (Glg. 2) wird durch die Anzahl der reagierenden Moleküle bestimmt, da die Anzahl der Molekülstöße proportional zum Produkt der Konzentrationen in der Reaktionszone ist [11]. Da bei einer stöchiometrischen Verbrennung sowohl Brennstoff als auch Sauerstoff vollständig verbraucht werden, sind die Konzentrationen in der Reaktionszone sehr niedrig. Liegt ein Überschuss eines der Reaktanden vor, bleibt seine Konzentration endlich und damit ist auch das Produkt der Konzentrationen in der Reaktionszone größer [3].

Die Brenngeschwindigkeiten von Methan, Ethan und Propan weisen bei gleicher Flammentemperatur kaum Unterschiede auf (Abbildung 8). Allenfalls bei Methan ist eine leicht niedrigere Brenngeschwindigkeit zu beobachten.

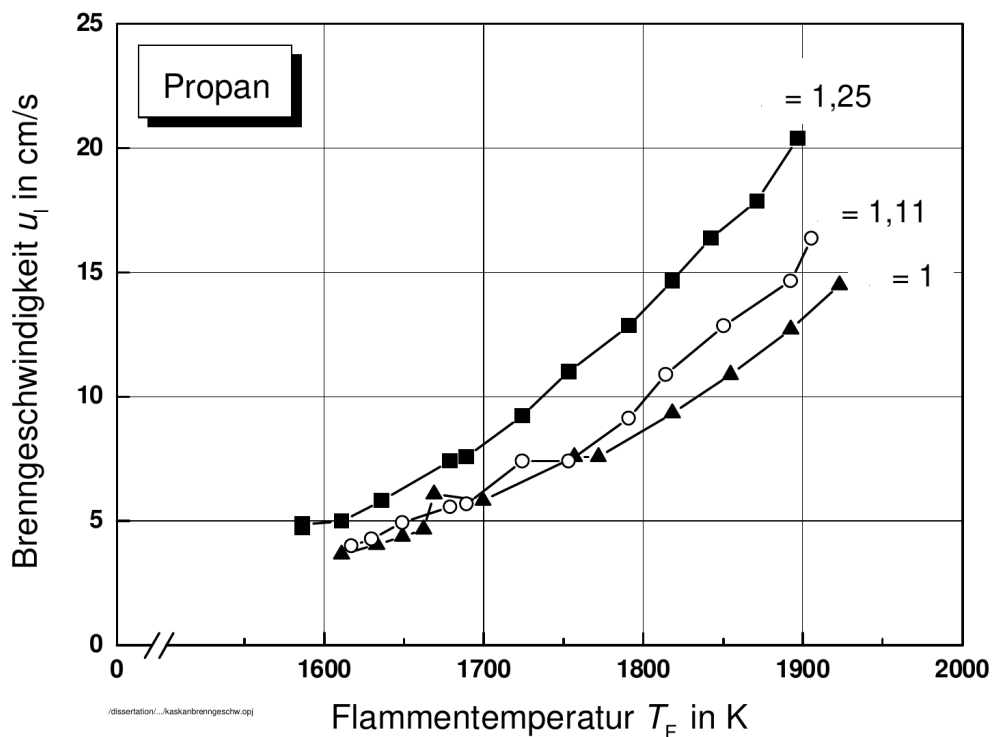


Abbildung 7: Gemessene Brenngeschwindigkeiten von Propan-Luft-Gemischen [19]

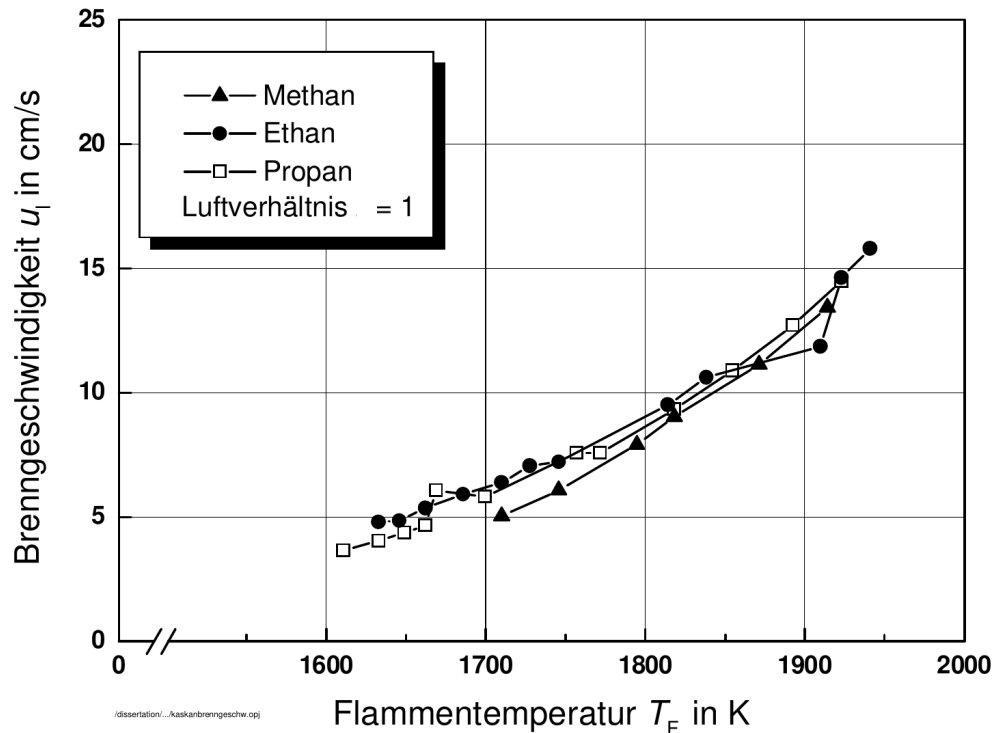


Abbildung 8: Vergleich gemessener Brenngeschwindigkeiten verschiedener Brennstoffe [19]

Literatur

- [1] Linnett J. W.: Methods of measuring burning velocities, Fourth (international) Symposium on Combustion, S.†20–35, The Williams & Wilkins Company Baltimore, 1953
- [2] Lenze B., Hillemanns R.: Abhängigkeit der Stabilität konzentrischer Drallflammen vom Turbulenzaustausch und von der Reaktionsdichte im brennernen Bereich, VDI-Berichte 645, 1987
- [3] Botha J. P., Spalding D. B.: The laminar flame speed of propane/air mixtures with heat extraction from the flame, Proceedings of the Royal Society London 225, S.†71–96, 1954
- [4] Griffiths J. F., Barnard J. A.: Flame and combustion, Blackie Academic & Professional Glasgow, 1995
- [5] Peters N.: Fifteen lectures on laminar and turbulent combustion, Ercoftac Summer School, Aachen, 1992
- [6] Andrews G. E., Bradley D.: Determination of burning velocities: A critical review, Combustion and Flame 18, S.†133–153, 1972
- [7] Glassman I.: Combustion, Academic Press San Diego, 1996
- [8] Pilling M. J.: Low-temperature combustion and autoignition, Elsevier Science B. V. Amsterdam, 1997
- [9] Dugger G. L., Weast R. C., Heimerl S.: Effect of preflame reaction on flame velocity of propane-air mixtures, Fifth (international) Symposium on Combustion, 589–595, 1955
- [10] Clavin P.: Premixed combustion and gasdynamics, Annual review of fluid mechanics 26, S.†321–352, 1994
- [11] Zeldovich Y. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M.: The mathematical theory of combustion and explosions, Consultants Bureau New York, 1985
- [12] Warnatz J., Maas U.: Technische Verbrennung, Springer Verlag Berlin, 1993

- [13] Lamm A.: Modellmäßige Beschreibung und Simulation eines Systems mit keramischem Strahlungsbrenner, Dissertation RWTH Aachen, 1995
- [14] Maier P.: Methoden der Flammengeschwindigkeitsmessung, Gaswärme International 11 (5), S.†170–176, 1962
- [15] Lindow R.: Entwicklung und Stand der Verfahren zur Bestimmung der laminaren Flammengeschwindigkeit, Gaswärme International 16 (8), S.†405–413, 1967
- [16] Lindow R.: Optische Methoden zur Bestimmung der Flammengeschwindigkeit, Gaswärme 12 (12), S.†453–463, 1963
- [17] Günther R.: Verbrennung und Feuerungen, Springer-Verlag, 1974
- [18] Powling J.: A new burner method for the determination of low burning velocities and limits of inflammability, Fuel 28, S.†25–28, 1949
- [19] Kaskan W. E.: The dependence of flame temperature on mass burning velocity, Sixth (international) Symposium on Combustion, S.†134–143, 1956
- [20] Friedman R.: Measurement of the temperature profile in a laminar flame, Fourth (international) Symposium on Combustion, S.†259–263, 1953
- [21] Friedman R., Burke E.: Measurement of temperature distribution in a low-pressure flat flame, The Journal of Chemical Physics 22 (5), S.†824–830, 1954
- [22] Rumminger M. D.: Gas temperature above a porous radiant burner: comparison of measurements and model predictions, Twenty-sixth (international) Symposium on Combustion, S.†1755–1762, 1996
- [23] Ferguson C. R., Keck J. C.: Stand-off distances on a flat flame burner, Combustion and Flame 34, S.†85–98, 1979
- [24] Dzubiella M., Haug M., Gerling D.: Untersuchung der katalytisch unterstützten Verbrennung von Erdgas – Laserdiagnostische Messungen an einem Strahlungsbrenner, VDI-Berichte (1193), S.†469–477, 1995
- [25] Gerling D., Haug M.: Laser diagnostic investigation of the catalytically stabilized combustion of methane in a small scale radiant burner, First European Conference on Small Scale Burner Technology and Heating Equipment 1, S.†135–143, 1996
- [26] Vagelopoulos C. M., Egolfopoulos F. N., Law C. K.: Further considerations on the determination of laminar flame speeds with the counterflow twin-flame technique, Twenty-fifth (international) Symposium on Combustion, S.†1341–1347, 1994