

Brennstoffverbrennung

Typologisierung der Verbrennungen

Verbrennungsreaktionen

Globalreaktionen

Elementarschritte

Reaktion und Dissoziation, Reaktionsrichtung

Einführung in die Brennerkonstruktion

Flammentemperatur, Verbrennungstemperatur

Zündtemperatur und Flammenstabilität

**Flammengeschwindigkeit, Flammenhalterung,
Rückschlagsicherung**

Flammenverbrennung

Schadstoffarme Gasbrennerkonstruktionen

Schadstoffarme Ölbrennerkonstruktionen

Lösung der Aufgaben

3 – Brennstoffverbrennung

Einführung in die Brennerkonstruktion

Flammentemperatur, Verbrennungstemperatur

Verbrennungswärme: Die bei der Verbrennung freiwerdende Wärme nennt man Verbrennungswärme. Sie wird auch Brennwert oder Verbrennungsenergie genannt, in der Literatur wird sie häufig mit ΔH bezeichnet und wird oft als Bestandteil der Globalreaktion betrachtet, wie in Gl. (21).



Ist die Reaktion **exotherm**, wird ΔH mit negativem Vorzeichen notiert. Verläuft die Reaktion **endotherm**, wird ΔH mit positivem Vorzeichen versehen. In der Chemie wird ΔH als Enthalpie bezeichnet. Der Terminus für Enthalpie ist in der Feuerungstechnik **Brennwert** oder oberer Heizwert. Mit Hilfe der Reaktionswärme kann die

Kalorische Flammentemperatur berechnet werden.

$$\Delta H = m_{\text{Reaktionsprodukt}} \cdot c_{p \text{ Reaktionsprodukt}} \cdot \Delta T. \quad (22)$$

$m_{\text{Reaktionsprodukt}}$ die Masse der Reaktionsprodukte, also nach Gl. (21) die Masse von $2n \text{CO}_2 + (2n+2) \text{H}_2\text{O}$,

$c_{p \text{ Reaktionsprodukt}}$ die spezifische Wärme der Reaktionsprodukte und

ΔT die Temperaturerhöhung der Reaktionsprodukte.

Die kalorische Flammentemperatur ist demnach

$$T_{\text{Reaktion}} = T_{\text{Anfangstemperatur}} + \Delta T. \quad (23)$$

Die kalorische Flammentemperatur kann so hoch sein, dass dabei schon eine Dissoziation stattfindet, d.h. die Reaktion (in diesem Beispiel nach Gl. (21)) läuft gar nicht vollständig ab. Daher ist die kalorische Flammentemperatur ein theoretischer Wert, der in der Flamme nie erreicht werden kann.

3 – Brennstoffverbrennung

Bei der Bestimmung der adiabatischen Flammentemperatur wird die Verbrennungswärme um die Verbrennungsenergie der Dissoziationsprodukte gemindert.

Die **adiabate Flammentemperatur** berücksichtigt also die Dissoziation in der Flamme. Zu ihrer Berechnung werden demnach auch die Dissoziationsgleichgewichtskonstanten und die Stoffdaten der Dissoziationsprodukte benötigt.

Bei starker Dissoziation ist die adiabate Flammentemperatur niedriger als die kalorische. Die kalorische und die adiabatische Flammentemperatur sind unabhängig von der Flammengröße und von der Brennerleistung.

Die **Verbrennungstemperatur** berücksichtigt neben der Dissoziation die Wärmeabgabe der Flamme, die vorwiegend durch Flammenstrahlung stattfindet. Die Verbrennungstemperatur hängt demnach nicht nur von den Stoffdaten des Brennstoffes und des Abgases sondern auch von der Konstruktion des Brenners und des Feuerraumes ab.

Die Verbrennungstemperatur wird von der Flammengröße (Brennerleistung) stark beeinflusst: Bei sonst gleichen Bedingungen vermindert sich die Verbrennungstemperatur mit abnehmender Brennerleistung. Die Verbrennungstemperatur ist stets niedriger als die Flammentemperatur.

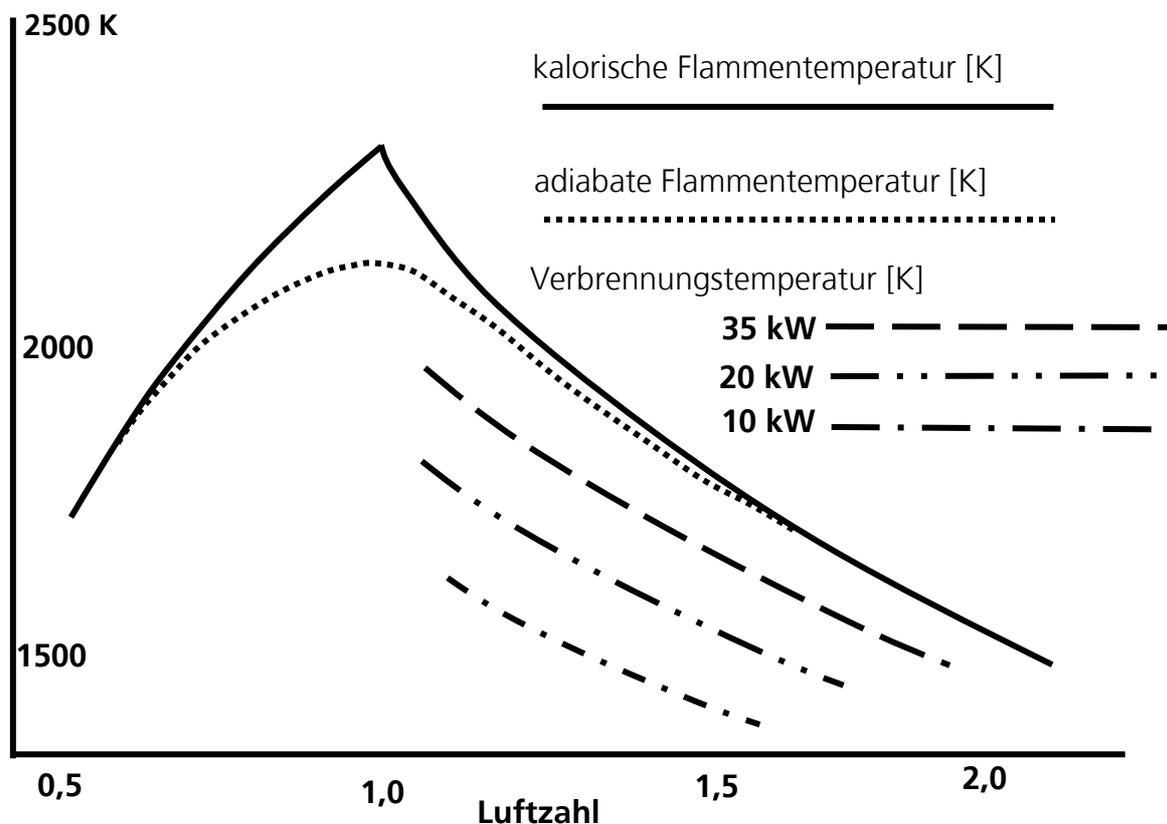


Abbildung 6: Gerechnete kalorische und adiabate Flammentemperatur einer Heizölflamme und gemessene Verbrennungstemperatur eines Blaubrenners bei 10, 20 und 35 kW Brennerleistung in einem 35 kW Stahl – Heizkessel mit 70 °C Wassertemperatur.

3 – Brennstoffverbrennung

Aufgabe 11: Bei einer Verkleinerung der Brennerleistung wird der Luftzahlbereich, in dem eine zufrieden stellende Verbrennung möglich ist, bei Heizölfeuerung insbesondere bei der Leistung unterhalb ca. 15 kW immer kleiner, siehe Abbildung 7. Wie erklären Sie es?

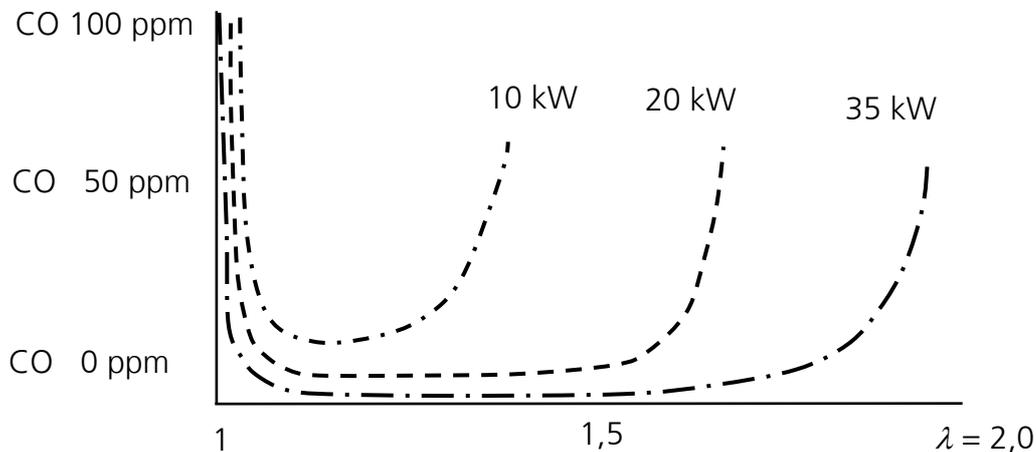


Abbildung 7: Einfluss der Luftzahl auf die Kohlenmonoxid-Konzentration im Abgas bei der Verbrennung von Heizöl EL für verschiedene Brennerleistungen

Zündtemperatur und Flammenstabilität

Zündtemperatur Die Zündtemperatur eines Stoffes ist die Temperatur, auf die der Stoff mindestens erwärmt werden muss, um sich bei Berührung mit Sauerstoff (Luft) von selbst zu entzünden (Dieselmotor). Die Zündung eines brennbaren Stoffes erfolgt, wenn die Oxydation so beschleunigt wird, dass sie unter Feuererscheinung weiter verläuft. Bei der Zündtemperatur liegen durch thermische Effekte (z.B. durch Dissoziation) Radikale vor, die eine Kettenreaktion ermöglichen.

Flammenverbrennung: Beim Verbrennen muss die Verbrennungs-Temperatur einen signifikant höheren Wert als die Zündtemperatur erreichen, die zum Fortbestehen einer eingeleiteten Verbrennung erforderlich ist. In diesem Fall verläuft die Verbrennung nach dem Muster im Kasten A in Abbildung 1 (siehe auch Abbildung 8).

Flammenloser Verbrennung: Liegt die Verbrennungstemperatur nur unwesentlich über der Zündtemperatur, wird die Verbrennung instabil. Die Verbrennung kann jedoch durch strömungstechnische oder durch konstruktive Maßnahmen stabilisiert werden (siehe Kasten E in Abbildung 1 und Abbildung 8).

Katalytische Verbrennung: Liegt die Verbrennungstemperatur niedriger als die Zündtemperatur, erlischt die Flamme. Die Verbrennung kann jedoch durch geeignete Katalysatoren weiterlaufen (Kasten F in Abbildung 1 und Abbildung 8)

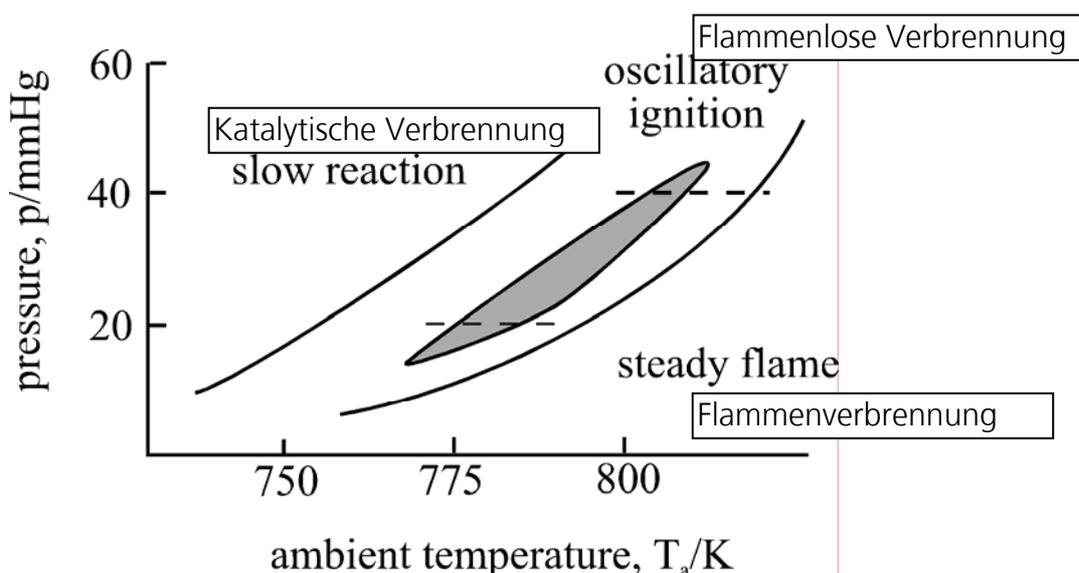
3 – Brennstoffverbrennung

Mischungsverhältnis: Das Mischungsverhältnis φ ist des Mengenverhältnis von brennbarem Stoff und Sauerstoff der Brennstoff-Oxydator-Mischung. Zahlenmäßig ist es der Reziprokwert der Luftzahl, $\varphi = 1 / \lambda$. Je mehr das Mengenverhältnis von brennbarem Stoff und Sauerstoff das stöchiometrische Verhältnis annähert, desto rascher verläuft die Verbrennung.

Flammpunkt: d.h. die Temperatur, bei der eine Flüssigkeit so viele brennbare Dämpfe zu entwickeln beginnt, dass diese bei Annäherung einer Zündquelle entflammen, bei Wegnahme jedoch erlöschen. Der Flammpunkt ist in der Regel deutlich niedriger als die Zündtemperatur.

	°C		°C
Alkohol C ₂ H ₅ OH	550	Holzkohle	300
Anthrazit	400	Krepppapier	270
Baumwolle	450	Kohlenmonoxid CO	605
Benzin	500	Methan CH ₄	550
Benzol C ₆ H ₆	570	(iso) Oktan C ₈ H ₁₈	410
Buchenholz	300	(n) Oktan C ₈ H ₁₈	210
(n) Butan C ₄ H ₁₀	400	(n) Pentan C ₅ H ₁₂	285
Dieselöl, Heizöl	350	Propan C ₃ H ₈	450
Eichenholz	330	Seidenpapier	250
Ethan C ₂ H ₆	515	Steinkohle	350
Ethen (Ethylen) C ₂ H ₄	425	Schmieröl	530
Ethin(Acetylen) C ₂ H ₂	305	Wasserstoff H ₂	590
Fichtenholz	280	Zeitungspapier	180

Tabelle 6: Zündtemperatur einiger Brennstoffe [°C]



Quelle: *Chemical Kinetics of Complex Systems* Professor S.K. Scott ©

Abbildung 8: Verschiedene Bereiche der Flammenstabilität der stöchiometrischen H₂-O₂-Verbrennung.

3 – Brennstoffverbrennung

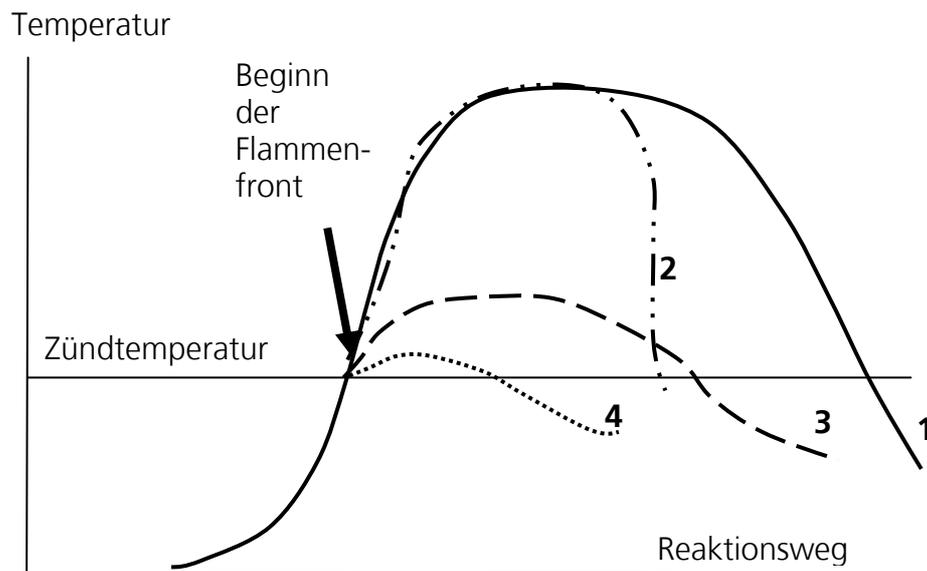


Abbildung 9: Verschiedene Möglichkeiten der Verbrennung:

Nach Eintritt der Luft und des Brennstoffs in den Brennraum wird die Mischung zuerst durch Flammenstrahlung, Flammenzirkulation, Wärmeleitung etc. vorgewärmt. In diesem Bereich kann das zerstäubte Heizöl verdampfen (Blaubrenner) und eine Pyrolyse des Brennstoffes stattfinden. Beim Erreichen der Zündtemperatur erfolgt eine starke Temperaturerhöhung (Beginn der Flammenfront). Kurve 1: Hohe Flammentemperatur, langsame Flammenabkühlung: wenig CO, wenig Russ, eventuell viel NO; Kurve 2: Rasche Temperaturabkühlung der Flamme: eventuell CO und Russbildung, wenig NO; Kurve 3: bei Flammenverbrennung CO und Russbildung, bei flammenloser Verbrennung gute Werte; Kurve 4: nur katalytische Verbrennung möglich.

Zündgrenze: Die Zündung von Brenngas-Luft oder Brenngas-Sauerstoff-Gemischen ist nur innerhalb begrenzter Mischungsverhältnisse möglich. Die Grenzen, zwischen denen sich Gasgemische entzünden, werden als Zündgrenze bezeichnet. Die obere Zündgrenze ist die maximale und die untere Zündgrenze die minimale noch zündbare Konzentration eines Brenngases in Luft oder Sauerstoff. Die Zündgrenzen sind druck- und temperaturabhängig. Eine der Voraussetzungen für die Zündbarkeit ist, dass die kalorische Flammentemperatur der Brenngas-Oxidator-Mischung höher liegt als die Zündtemperatur. Eine weitere Voraussetzung ist, dass die brennbare Mischung die zu der Startreaktion notwendigen Radikale aufweist. Tabelle 7 zeigt Werte für die untere und obere Zündgrenze einiger Brenngase.

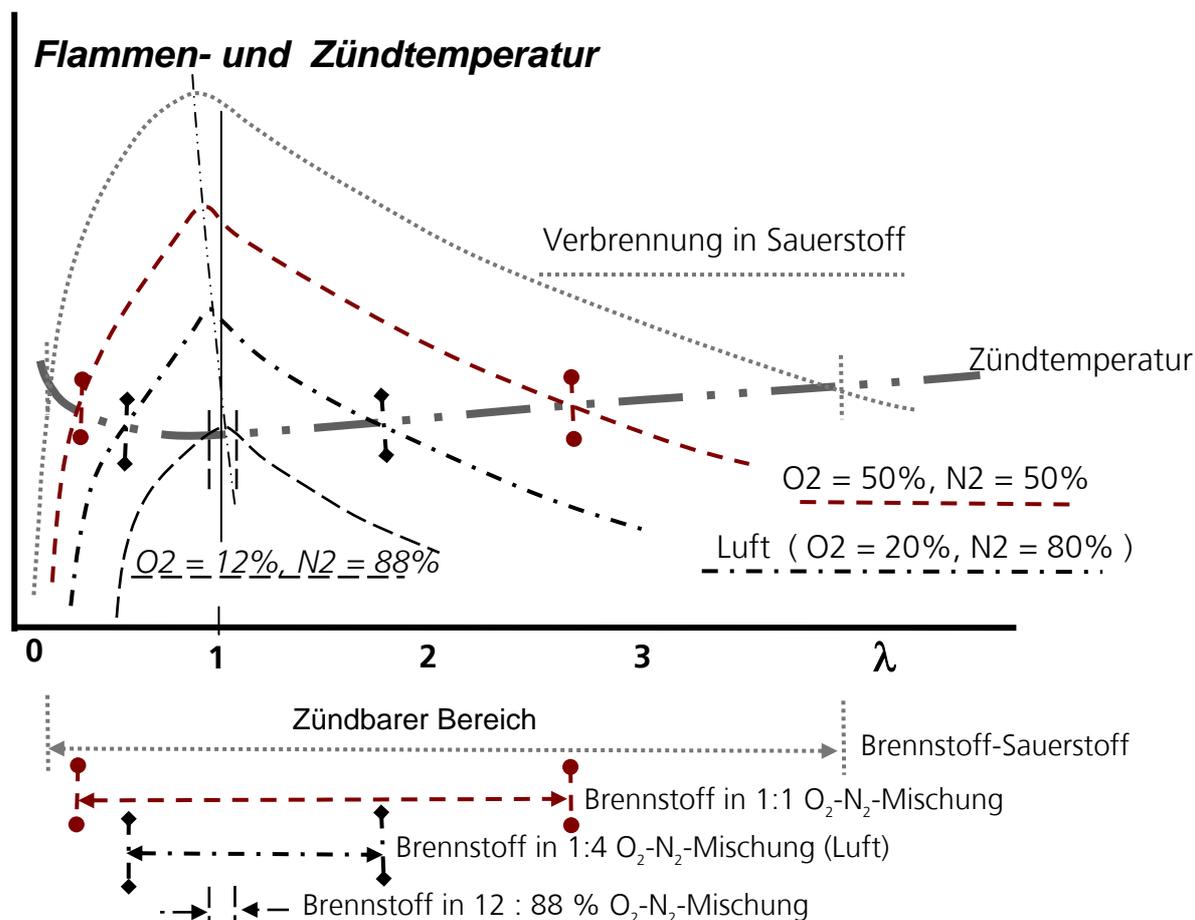


Abbildung 10: Flammentemperatur und Zündgrenzen einer Brennstoff-Oxydator-Mischung bei verschiedenen Mischungsverhältnissen (siehe auch Abb. 6)

Abbildung 10 zeigt die Flammentemperatur, die Zündtemperatur und den zündfähigen Mischungsbereich an. Die Zündtemperatur ist luftzahlabhängig, der niedrigste Wert ergibt in der Regel bei schwachem Luftmangel. Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur, bei der sich Radikale bilden, die die Startreaktion der Verbrennung ermöglichen (siehe „Elementarschritte“). Wird eine Zündflamme außerhalb des zündfähigen Bereiches betätigt, erlischt die Verbrennung nach Abschalten der Zündflamme.

Die Verbrennung ist stabil, wenn der zündbare Mischungsbereich breit ist und die Verbrennungstemperatur um mehrere hundert Kelvin über der Zündtemperatur liegt. In diesem Fall findet die Flammenverbrennung statt. Je größer der Unterschied zwischen Zünd- und Verbrennungstemperatur ist, umso stabiler ist die Verbrennung und umso leichter ist die Zündung der Flamme.

Die Verbrennung ist instabil, wenn der zündbare Mischungsbereich schmal ist und/oder die Verbrennungstemperatur nur geringfügig über der Zündtemperatur liegt. In diesem Fall ist jedoch bei entsprechender Brennerkonstruktion eine flammenlose Verbrennung möglich.

3 – Brennstoffverbrennung

Die Verbrennung erlischt, wenn die Verbrennungstemperatur die Zündtemperatur nicht übersteigt. In diesem Fall kann nur eine katalytische Verbrennung durchgeführt werden.

Bei der Flammenverbrennung liegt die Verbrennungstemperatur zwischen der Zündtemperatur und der Flammentemperatur. Während die Flammentemperatur aus den globalen Reaktionsgleichungen berechnet werden kann, wird die Verbrennungstemperatur von dem Flammenvolumen und der Feuerraum-Wandtemperatur mit beeinflusst.

Die Zündtemperatur kann nicht aus den Stoffwerten der brennbaren Mischung berechnet werden. Sie ist die Mindesttemperatur, bei der gleichzeitig zwei Bedingungen erfüllt werden müssen:

- 1) Es müssen so viele Radikale in der Mischung vorhanden sein, dass eine Kettenreaktion stattfindet. Die Konzentration der Radikale steigt mit steigender Temperatur, wird aber von anderen Parametern wie Wandstruktur und -temperatur, Licht- und elektromagnetische Strahlung, etc. beeinflusst.
- 2) Die Temperaturzunahme durch Reaktion muss höher liegen als die Wärmeableitung. Diese Bedingung wird u. A. von Feuerraumgeometrie, Wandtemperatur, Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst.

Da die Messwerte der Zündtemperatur von Versuchsbedingungen abhängen, ist ihre Aussagekraft begrenzt. Bei der Zündung wird die Zündtemperatur der Mischung nur lokal in der unmittelbaren Umgebung der Zündquelle überschritten. Für eine stabile Zündung müssen mehrere Bedingungen erfüllt sein:

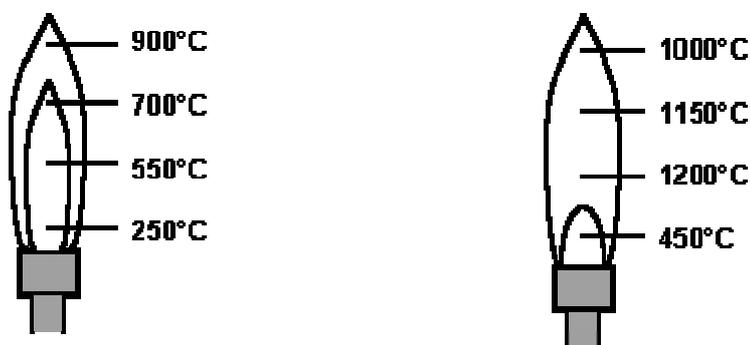
- 1) Die **Zündenergie** muss die Mindestzündenergie übersteigen. Die Mindestzündenergie hängt vom Brennstoff, Luftzahl und Strömungsgeschwindigkeit ab. Typische Werte liegen zwischen 0,1 und 10 Joule.
- 2) Die Zündquelle muss von der Feuerraumwand weit genug entfernt sein. Der Abstand, innerhalb dessen keine Reaktion stattfindet, heißt **Löschabstand**. Für Atmosphärendruck, Raumtemperatur und stöchiometrisches Gemisch mit Luft beträgt der Löschabstand für Wasserstoff 0,7 mm, für Methan 2 mm. Der Löschabstand steigt mit steigender Luftzahl und mit sinkender Wandtemperatur.
- 3) Das Mischungsverhältnis liegt im Bereich der Zündgrenzen (siehe Abbildung 10 und Tabelle 7)
- 4) Die Strömungsgeschwindigkeit ist niedriger als die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit, oder der Brenner ist mit einem Flammenhalter ausgestattet.

Aufgabe 12: Warum ist das Starten eines Verbrennungsmotors schwieriger im Winter als im Sommer?

3 – Brennstoffverbrennung

Aufgabe 13: Wie gehen Sie vor, wenn bei der Inbetriebnahme einer Heizungsanlage der Brenner nicht zündet?

Aufgabe 14: Beschreiben Sie einen Gedankenexperiment, die Temperaturprofilen in der Flamme eines Bunsenbrenners, wie z.B. gezeigt in Abbildung 11, zu ermitteln.



leuchtende Flamme

nicht leuchtende Flamme

Abbildung 11: Temperaturen in der Flamme eines Bunsenbrenners

Leuchtende Flamme: Diffusionsflamme, Nicht leuchtende Flamme: Vormischflamme

Tabelle 7 zeigt die **Zündgrenzen** einiger Brenngase. Die unterschiedlichen Literaturwerte der Zündgrenzen erklären sich aus dem Einfluss der Versuchsparameter (Wandtemperatur, Bewegung des Gemisches, etc.).

Brenngas	Brennwert MJ /m ³	Untere Zündgrenze		Obere Zündgrenze	
		Volumen % Brenngas bei $t_{\text{Mischung}} = 20^\circ\text{C}$			
Kohlenmonoxid CO ⁺	12,7	12,5 ⁺		74 ⁺	
Wasserstoff H ₂	12,6	4		77	
Methan CH ₄	39,8	5		15	
Ethan C ₂ H ₆	70,3	2,8		15,5	
Ethylen C ₂ H ₄	63,4	2,7		32	
Acetylen C ₂ H ₂	56,5	2,3		82	
Propan C ₃ H ₈	101,2	2,1		9,3	
n- Butan C ₄ H ₁₀	133,0	1,9		8,4	

Tabelle 7: Zündgrenzen von Brenngasen; Werte für CO⁺ gelten für 50 – 70 % relative Luftfeuchte. Der Zündbereich für CO-Luft-Mischung wird breiter mit steigender Feuchtigkeit.

3 – Brennstoffverbrennung

Aufgabe 15: Berechnen Sie die CO-Konzentration im stöchiometrischen CO-Luft-Gemisch (Luftzusammensetzung $H_2O = 1 \%$, $O_2 = 21 \%$, $N_2 = 78 \%$)

Brennstoff \ Mischung	Adiabate Flammentemperatur bei der		
	unteren Zündgrenze	stöchiometrischen Verbrennung	oberen Zündgrenze
Kohlenmonoxid CO	1050	2130	1070
Wasserstoff H_2	1050	2130	
Methan CH_4	1050	1970	920
Acetylen C_2H_2		2250	

Tabelle 8: Adiabate Flammentemperatur [°C] einiger Brenngase bei Verbrennung mit Luft mit verschiedenen Luftzahlen

Brennstoff	Flammentemperatur	Brennstoff	Flammentemperatur
Kohlenmonoxid CO	2950	Methan CH_4	2860
Wasserstoff H_2	3080	Acetylen C_2H_2	3030

Tabelle 9: Adiabate Flammentemperatur [°C] einiger Brenngase bei der stöchiometrischen Verbrennung in **Sauerstoff**

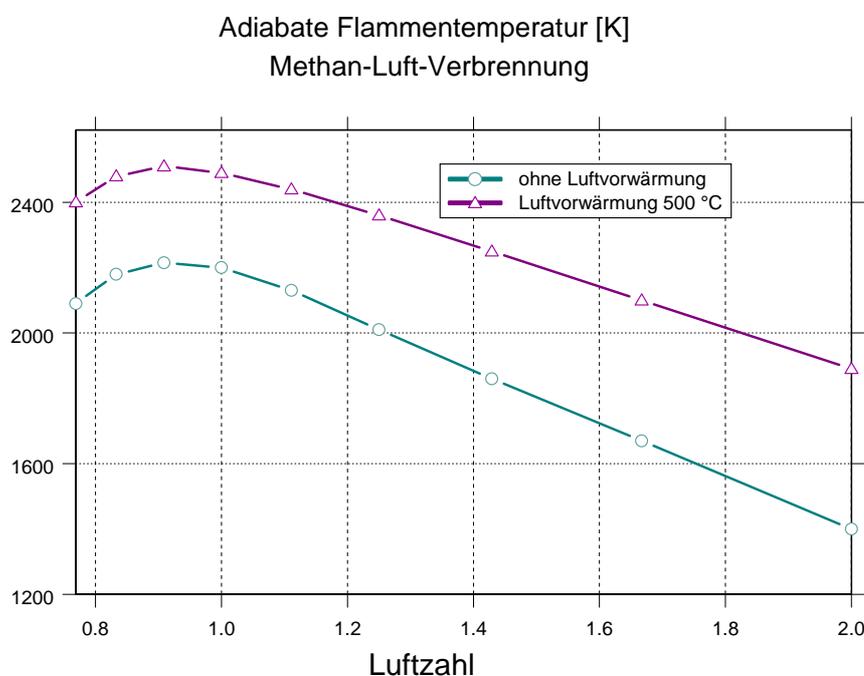


Abbildung 12: Adiabate Flammentemperatur [K] der Methanverbrennung – die höchste Temperatur tritt bei ca. 10 % Luftmangel auf.

3 – Brennstoffverbrennung

Abbildung 12 zeigt die adiabaten Flammentemperatur der Methanverbrennung mit Luft als Funktion der Luftzahl. Man sieht, dass die höchste Flammentemperatur, ob mit oder ohne Luftvorwärmung, bei knappem Luftmangel auftritt. Dieses Phänomen gilt für die meisten Brennstoffe (Gichtgas bildet eine Ausnahme). Da die höchste Flammentemperatur meist mit der höchsten Flammgeschwindigkeit und der höchsten Flammenstabilität einhergeht, verläuft die Zündung eines Brenners bei knappem Luftmangel am sichersten.

Aufgabe 16: Warum muss der Choke bei Vergasermotoren für den Kaltstart betätigt werden?

Die Zündgrenzen von Gasgemischen können überschlägig nach der Formel von Le Chatelier berechnet werden, mit α_G als die (obere oder untere) Zündgrenze des Gasgemisches bzw. mit α_i und c_i als die entsprechenden Zündgrenzen und Konzentration des Gaskomponenten i :

$$\alpha_G = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{\frac{c_1}{\alpha_1} + \frac{c_2}{\alpha_2} + \dots + \frac{c_n}{\alpha_n}} \quad (24)$$

Für **Gasgemische mit Inertgas ohne Sauerstoff** gilt:

Untere Zündgrenze:

Im Zähler werden alle Gaskomponenten, im Nenner nur die brennbaren Komponenten berücksichtigt:

$$\alpha_G = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n \quad \text{ALLE KOMPONENTEN} \quad \sum c_i = 100\%}{\frac{c_1}{\alpha_1} + \frac{c_2}{\alpha_2} + \dots \quad \text{NUR DIE BRENNBAREN KOMponentEN} \quad \sum c_i < 100\%}} \quad (25)$$

Obere Zündgrenze:

Sowohl im Zähler als auch im Nenner der Gleichung (24) werden nur die brennbaren Komponenten berücksichtigt.

$$\alpha_G = \frac{c_1 + c_2 + \dots \quad \text{NUR DIE BRENNBAREN KOMponentEN} \quad \sum c_i < 100\%}{\frac{c_1}{\alpha_1} + \frac{c_2}{\alpha_2} + \dots \quad \text{NUR DIE BRENNBAREN KOMponentEN} \quad \sum c_i < 100\%}} \quad (26)$$

3 – Brennstoffverbrennung

Aufgabe 17: Berechnen Sie die obere und die untere Zündgrenze des Wassergases bestehend aus 50 % Wasserstoff, 38 % Kohlenmonoxid und 12 % Stickstoff nach der Formel von Le Chatelier (Gl. (24 bis 26)). Vergleichen Sie den berechneten Wert mit dem in der Fachliteratur bekannten Wert von:

Brenngas		Untere Zündgrenze	Obere Zündgrenze
Wassergas	H ₂ = 50%, CO= 38%, N ₂ = 12%,	6 %	72 %

Flammengeschwindigkeit, Flammenhalterung und Rückschlagsicherung

Die „laminare“ Flammengeschwindigkeit ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Flammenfront in einer laminaren Brenngas-Oxidator-Strömung. Aus der sichtbaren Flammenfront und der Strömungsgeschwindigkeit kann die Flammengeschwindigkeit abgeschätzt werden, wie gezeigt in Abbildung 17. Die Flammengeschwindigkeit hängt vom Brennstoff, Mischungsverhältnis, Temperatur und Druck ab. Ist die Strömung turbulent, so wird die Flammengeschwindigkeit durch die Turbulenz deutlich erhöht. Eine Näherung für die turbulente Flammengeschwindigkeit zeigt Gleichung (27) mit Λ_t als die turbulente, Λ_l als die laminare Flammengeschwindigkeit, d_0 (in cm) als Flammrohrdurchmesser und Re_0 als die Reynoldszahl der Brennstoff-Luft-Mischung vor der Verbrennung.

$$\frac{\Lambda_t}{\Lambda_l} = 0,18 \cdot d_0^{0,28} \cdot Re_0^{0,24} \quad (27)$$

Ist die Flammengeschwindigkeit höher als die Strömungsgeschwindigkeit, erlischt die Flamme durch Flammenabheben. Ist die Flammengeschwindigkeit niedriger als die Strömungsgeschwindigkeit, kann die Flamme durch Flammenrückschlag erlöschen. Erlischt die Flamme nicht beim Flammenrückschlag, so führt die Wärmefreisetzung der zurückgeschlagenen Flamme zur Zerstörung des Brenners. Zur stabilen Verbrennung muss beides, Abheben und Rückschlag vermieden werden.

Zu Stabilisierung der Flammen-Front dienen Flammenhalter. In der Ebene des Flammenhalters (Engstelle) ist die Strömungsgeschwindigkeit höher als die Flammengeschwindigkeit: Die Flamme kann nicht zurückschlagen. Hinter dem Flammenhalter liegt eine Querschnittserweiterung, Hier ist die Strömungsgeschwindigkeit niedriger als die Flammengeschwindigkeit: Die Flamme sitzt direkt am Flammenhalter. Die Rückströmzone an dieser Stelle stabilisiert zusätzlich die Flamme. Das Prinzip der Flammenhalterung ist gezeigt in Abbildung 13.

3 – Brennstoffverbrennung

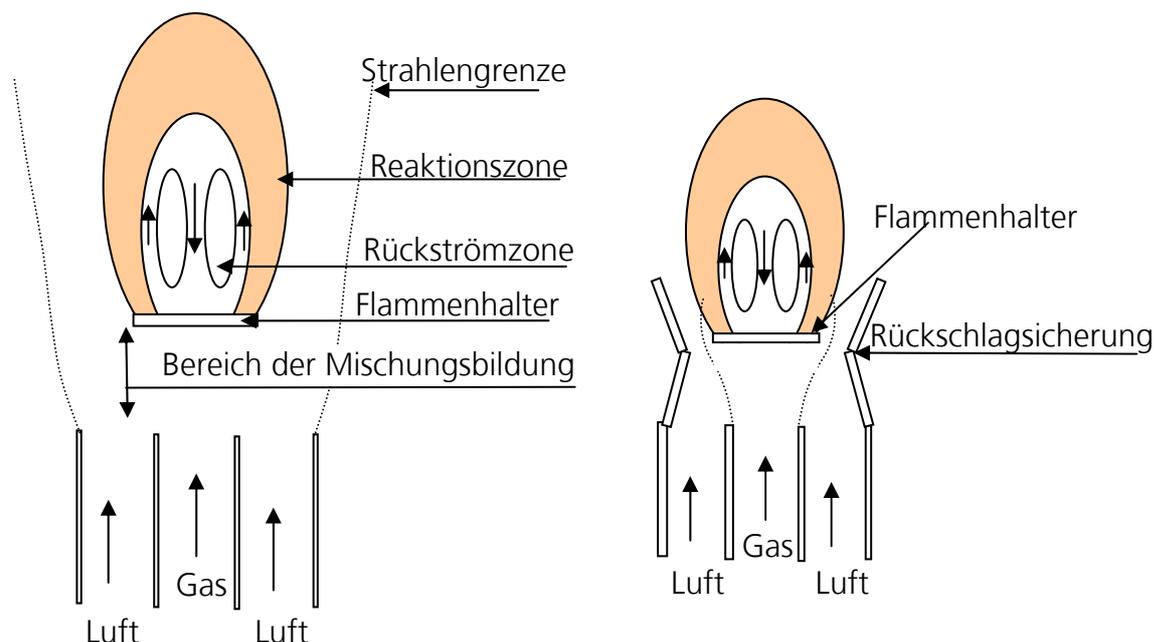
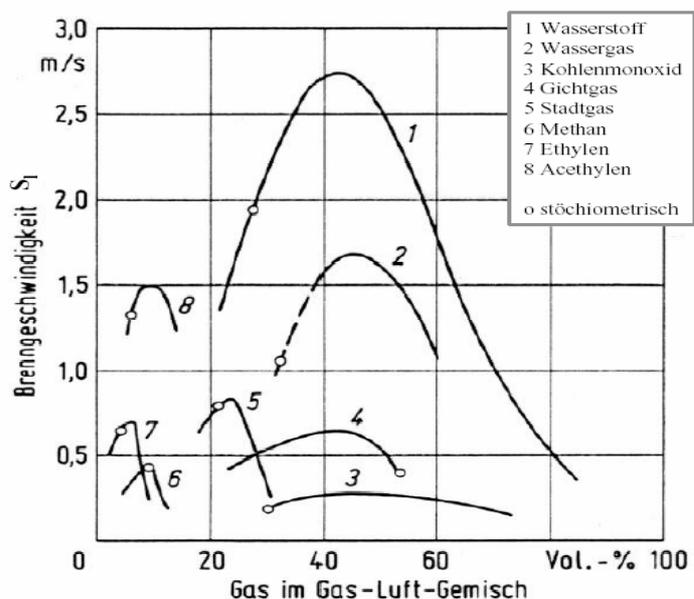


Abbildung 13: Prinzipskizze der Stabilisierung durch Flammenhalter

Abbildung 14 stellt die laminare Flammengeschwindigkeit einiger Brenngase bei verschiedenen Mischungsverhältnissen dar. Der stöchiometrische Punkt der jeweiligen Gase ist mit einem Kreis markiert. Die Abbildung zeigt, dass bei fast allen Brenngasen das Maximum der Flammengeschwindigkeit im Luftmangelbereich auftritt. Die Verbrennung verläuft daher im Luftmangelbereich am stabilsten.

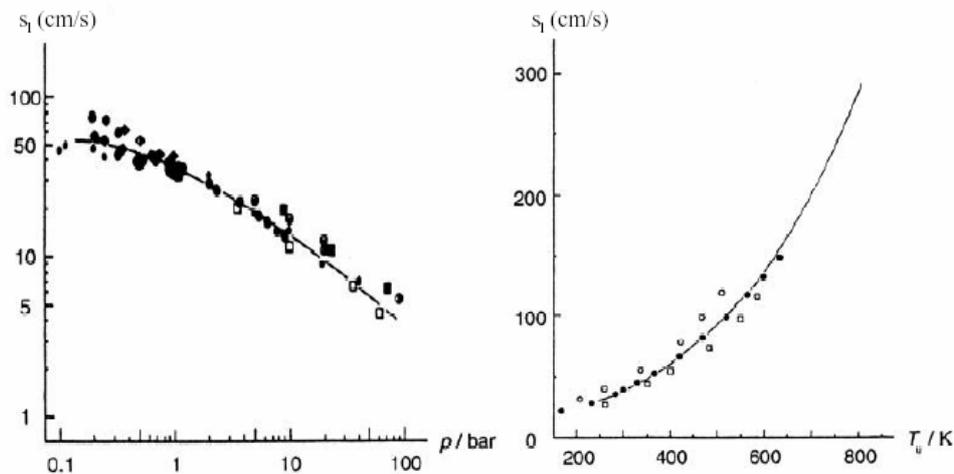


- 1 Wasserstoff H_2
- 2 Wassergas ca. 50% H_2 ,
40% CO ,
 $CO_2 + N_2 + CH_4$ 10%
- 3 Kohlenmonoxid CO
- 4 Gichtgas ca. 60% N_2
+ 30% CO + 10% CO_2
- 5 Stadtgas ca. 50% H_2 ,
+30% $CH_4 + C_2H_4 + CO$
+ $CO_2 + N_2$
- 6 Methan CH_4

Ref.: Stephan + Mayinger: Thermodynamik

Abbildung 14: Laminare Flammengeschwindigkeit als Funktion des Mischungsverhältnisses bei atmosphärischem Druck und Raumtemperatur. – Die größte Flammgeschwindigkeit, wie auch die höchste Flammentemperatur, tritt bei den Gasen 1, 2, 3, 5, 6, 7 und 8 im fetten Bereich, bei 4 im mageren Bereich auf.

3 – Brennstoffverbrennung



Ref.: Warnatz, Maas und Dibble: Combustion

Abbildung 15: Einfluss des Druckes und der Temperatur der Brennstoff-Luft-Mischung auf die laminare Flammgeschwindigkeit bei der Methanverbrennung.

Der Einfluss des Druckes und der Temperatur der Brennstoff-Luft-Mischung auf die laminare Flammgeschwindigkeit wird in Abbildung 15 gezeigt. Eine Vorwärmung der Brennbaren Mischung erhöht die Brenngeschwindigkeit wie auch die Flammentemperatur. Eine Druckerhöhung des Brennstoff-Luft-Gemisches vermindert zwar die Flammgeschwindigkeit, erhöht aber die Reaktionsgeschwindigkeit und die Flammentemperatur. Eine Äderung, die bei einer brennbaren Gasmischung zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit und der Flammentemperatur bewirkt, erhöht zugleich die Stabilität der Verbrennung.

Flammenverbrennung

Diffusionsflammen

In vielen technischen Verbrennungsprozessen werden Brennstoff und Sauerstoff dem Brennraum getrennt zugeführt. Bekannte Beispiele sind die Verbrennung im Dieselmotor, in vielen industriellen Feuerungen, in Strahltriebwerken, etc. Da die Brennstoff-Luft-Mischung durch Diffusion entsteht, spricht man von Diffusionsflammen. Ist das Strömungsfeld laminar, so spricht man von laminaren Diffusionsflammen. Bekannte Beispiele für Diffusionsflammen sind die Kerzenflamme, die Tropfenverbrennung (Heizöl-Sprayverbrennung) und die Verbrennung der Entgasungsprodukte fester Brennstoffe.

3 – Brennstoffverbrennung

Die Wärmeabgabe der Kerzenflamme lässt das Paraffin (Kerzenwachs) zunächst schmelzen und schließlich am Docht der Kerze verdampfen. Das gasförmige Paraffin kann dann in die umgebende Luft diffundieren. Abbildung 16 zeigt schematisch die Temperatur- und Konzentrationsverläufe in der Nähe der Flammenfront. Das typische gelbe Leuchten der Flamme resultiert aus der Strahlung, die von kleinen Russpartikeln emittiert wird. Diese werden im fetten Bereich der Flamme gebildet und anschließend durch die Fläche stöchiometrischer Mischung in den mageren Bereich der Flamme transportiert, wo sie unter sauerstoffreichen Bedingungen verbrennen. Das bekannte Rußen von Kerzenflammen tritt auf, wenn die Verweilzeit der Russpartikel im Bereich hoher Temperaturen und ausreichend hoher Sauerstoffkonzentrationen zu kurz ist, um sie vollständig zu verbrennen.

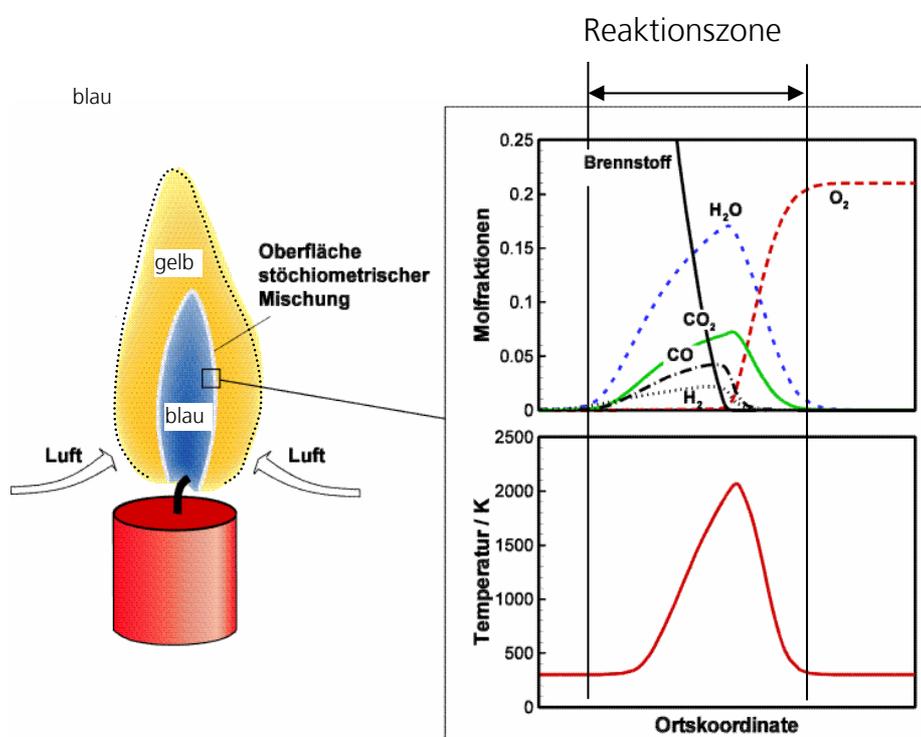


Abbildung 16: Kerzenflamme als laminare Diffusionsflamme

Quelle: Uni Karlsruhe, ICT-EBI

Abbildung 17 zeigt das Prinzip der Diffusionsflamme. In der Flammenmitte findet immer eine fette Verbrennung (Luftmangel) und am Flammenrand eine Magerverbrennung (zu hoher Luftüberschuss) statt. Die Verbrennung einer Brennstoff-Luft-Mischung weit entfernt von der Stöchiometrie ist mit einer hohen Schadstoffbildung verbunden. Im Luftmangelbereich neigt die Flamme zur Russ- und CO-Bildung, im Luftüberschussbereich zu CO- und Aldehydbildung. Die Mischungsbildung von Brennstoff und Luft entsteht durch die Diffusion. Die intensivste Verbrennung findet an der Linie der örtlichen Stöchiometrie statt, wo Diffusions- und Flammengeschwindigkeit im Gleichgewicht stehen.

3 – Brennstoffverbrennung

Der Halbkegelwinkel der laminaren Diffusionsflamme wird von der axialen Strömungsgeschwindigkeit und der laminaren Flammengeschwindigkeit u_{Flamme} beeinflusst:

$$\alpha = \arcsin (u_{\text{Flamme}} / u_{\text{Strömung}}) \quad (28)$$

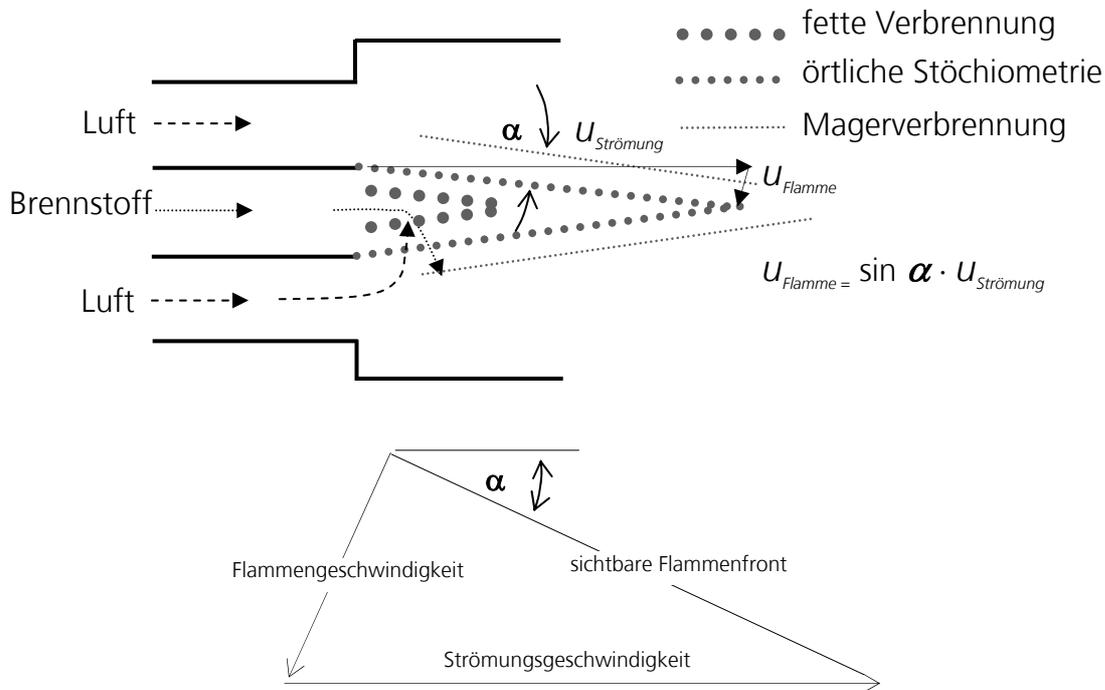


Abbildung 17: Laminare Diffusionsflamme

Bei der turbulenten Diffusionsflamme ändert sich die augenblickliche Flammenfront in Bruchteilen der Sekunde. Die momentane Flammenfront kann durch im Nanosekundenbereich liegender Visualisierung sichtbar gemacht werden (siehe Abb. 18). Da die turbulente Flammengeschwindigkeit die laminare um ein vielfaches übersteigt, ist die turbulente Diffusionsflamme kürzer als die laminare.

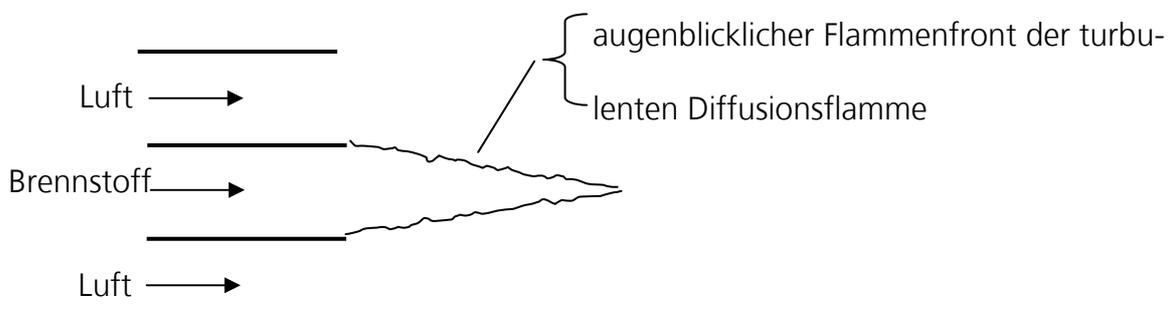


Abbildung 18: Turbulente Diffusionsflamme

Vormischflammen

Bekannte Beispiele für **laminare Vormischflammen** sind **Bunsenbrenner** und **Gasherdflammen**. Ein Beispiel für **turbulente Vormischflammen** sind ebenfalls der **Bunsenbrenner** und die Verbrennung im **Otto-Motor**, wo ein vorverdampftes, vorge-mischtes Benzin-Luft Gemisch aus dem Vergaser in den Zylinder gesaugt und durch einen Zündfunken gezielt gezündet wird. Gegenüber der Verbrennung in Diffusionsflammen hat die Vormischverbrennung den Vorteil, dass sie weitgehend ruffrei verläuft, da der Mischungsvorgang in der Verbrennungszone bereits abgeschlossen ist. Die räumliche Trennung zwischen Mischung und Verbrennung ist deshalb vorteilhaft, weil die Mischungszeit im Vergleich zur Verbrennungszeit sehr lang ist. Bei der räumlichen Trennung kann man beide Vorgänge unabhängig voneinander optimieren. Andererseits setzt die Vormischung erhöhte Sicherheitsvorkehrungen voraus, um zu vermeiden, dass das explosionsfähige Gemisch bereits im Mischaum verbrennt (Flammenrückschlag).

In Abbildung 3 (in Zusammenhang mit Aufgabe 5) sind eine Bunsenbrennerflamme sowie der Verlauf von Temperatur und Konzentrationen durch die Flammenfront schematisch dargestellt. Die dort dargestellte Flamme ist eine Vormischflamme.

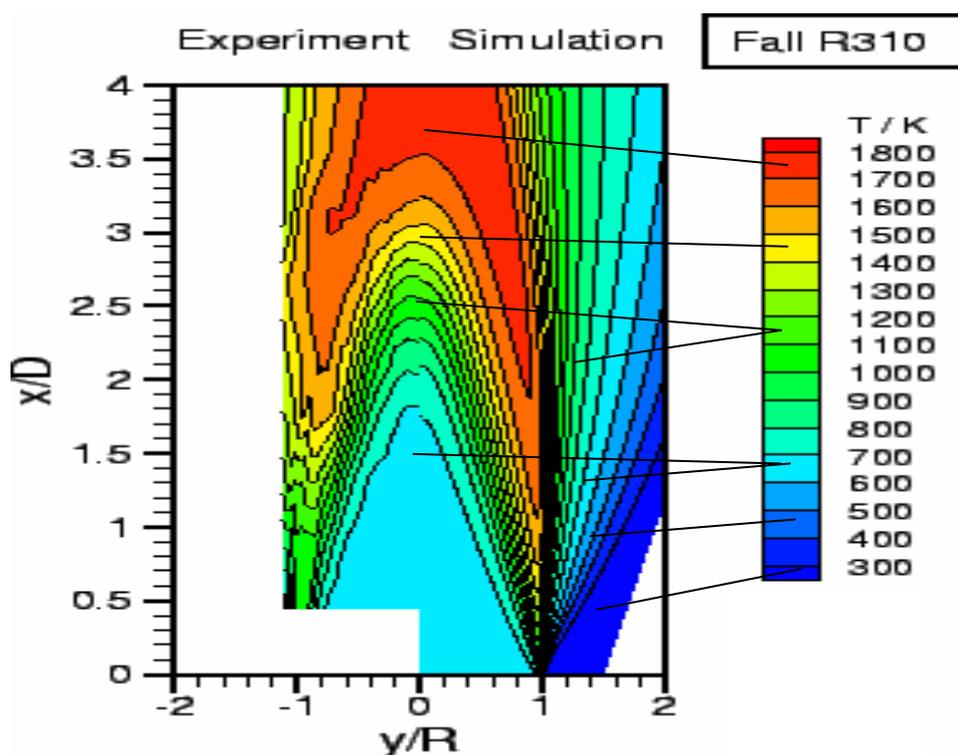


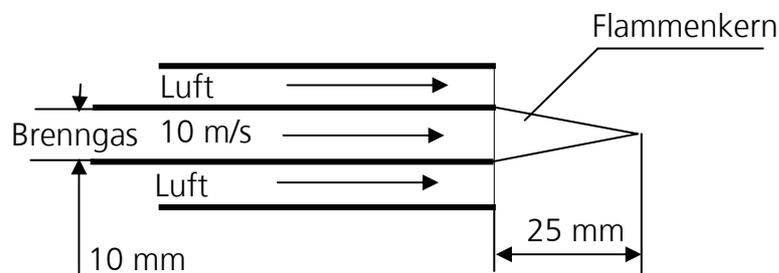
Abbildung 19: Methanverbrennung, $\lambda = 2,2$, Vorwärmtemperatur 400 °C
 Hochturbulente Vormischflamme – Ein Vergleich zwischen Experiment (linke Bildhälfte)
 und Rechenmodell (rechte Bildhälfte);

Quelle: Uni Karlsruhe, <http://www.vbt.uni-karlsruhe.de/index.pl/themen/turbvorm/TASCflowModelle/node7.html>

Abbildung 19 zeigt gemessene und gerechnete Temperaturen einer turbulenten Vormischflamme eines Bunsenbrenners.

3 – Brennstoffverbrennung

Aufgabe 18: In einem Koaxialrohr strömt innen Brenngas (Innendurchmesser 10 mm), außen die Verbrennungsluft. Die Brenngasgeschwindigkeit beträgt 10 m/s. Das Brenngas verbrennt mit einer laminaren Diffusionsflamme und weist eine Flammenlänge von 25 mm auf. Wie hoch ist die Flammengeschwindigkeit?



Zwischenformen zwischen Diffusions- und Vormischflamme

Tabelle 10 zeigt Beispiele für Diffusionsbrenner, Vormischbrenner und Zwischenformen zwischen Diffusions- und Vormischbrenner aus der Praxis. Die Zwischenformen sind in der Tabelle mit → gekennzeichnet.

	Diffusionsflammen	Vormischflammen
Kerze	X	
Bunsenbrenner	X →	← X
Otto-Motor		X
Dieselmotor	X →	
Atmosphärischer Gasbrenner		← X
Gas-Gebläsebrenner		X
Ölbrenner Sprayverbrennung (Gelbbrenner)	X	
Vorverdampfte Ölverbrennung (Blaubrenner)		← X
Strahlungsheizung		X
Gasturbinen	X →	← X
Feststoffverbrennung	X	

Tabelle 10: Beispiele für Diffusionsflammen und Vormischflammen

3 – Brennstoffverbrennung

Einige Brenner, wie z.B. der Bunsenbrenner, können sowohl als Diffusions- als auch als Vormischbrenner betrieben werden. Eine in der Praxis häufig angewandte Flammenform ist die partiell vorgemischte Diffusionsflamme. Sowohl Diffusions- als auch Vormischflammen können turbulent wie auch laminar sein.

Die Mischung von Brennstoff und Sauerstoff ist der langsamste Teilvorgang der Verbrennung, d.h. die Mischung ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Dieser Umstand wird häufig mit dem Begriff "gemischt – verbrannt" beschrieben. Unter Verwendung dieser Annahme können viele wichtige Eigenschaften von **Diffusionsflammen**, z.B. die Flammenlänge, sehr gut beschrieben werden, ohne Einzelheiten der chemischen Kinetik zu berücksichtigen.

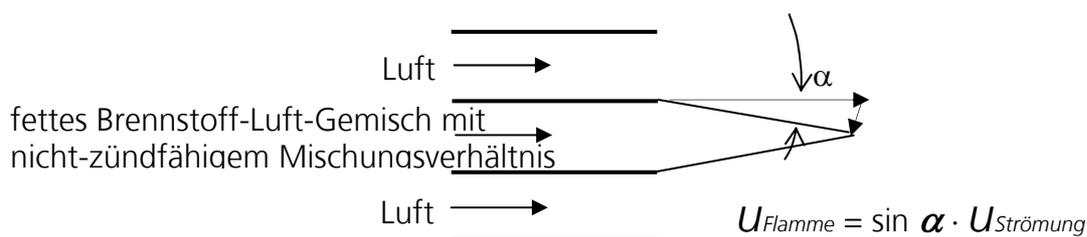


Abbildung 20: Partiiell vorgemischte laminare Diffusionsflamme

Bei der **partiell vorgemischten Diffusionsflamme** (Abbildungen 20 und 21) ist ein Teil der Verbrennungsluft bereits vor der Verbrennung dem Brennstoff beigemischt. Da hierdurch weniger Luft in den Brennstoff diffundieren muss, erhöht sich die Flammengeschwindigkeit.

Die Reaktionszone verkürzt sich, die Flammentemperatur wird höher, die Verbrennung wird intensiver und die Reaktionsmechanismen der fetten Verbrennung schwächen sich ab.

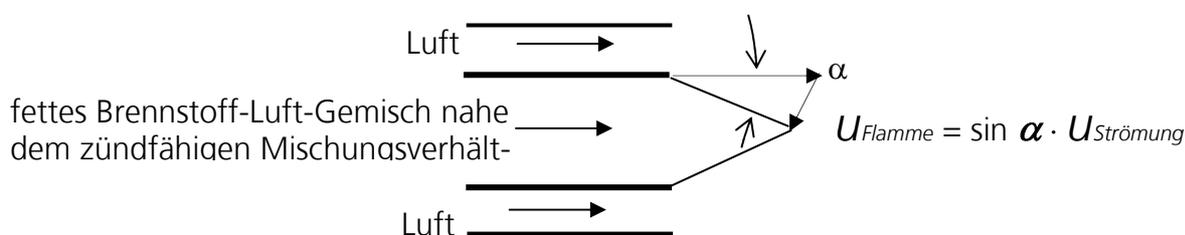


Abbildung 21: Partiiell vorgemischte laminare Diffusionsflamme nahe dem zündfähigen Mischungsverhältnis: Die Grenze zwischen Diffusionsflamme und Vormischflamme.

3 – Brennstoffverbrennung

Liegt das Mischungsverhältnis zwischen Brennstoff und Luft im mageren Bereich, entsteht die reine **Vormischflamme**. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Brennstoffleitung muss höher sein als die Flammengeschwindigkeit, um Flammenrückschlag zu vermeiden. Die aus Sicherheitsgründen notwendige Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt meist zu einer turbulenten Strömung, daher wird die Vormischflamme meist mit turbulenten Vormischbrennern verwirklicht. Am Ende der Brennstoffleitung steht eine Flammenhalterung. In Abbildung 13 dient die Zirkulation nach der Querschnittsänderung als Flammenhalter.

Liegt das Mischungsverhältnis zwischen Brennstoff und Luft im fetten zündfähigen Bereich, bezeichnet man die zur vollständigen Verbrennung benötigte zusätzliche Luft als Sekundärluft und den Brenner als **gestuften Brenner** (Abbildung 22). Das Verhältnis von Primär- und Sekundärluft entscheidet über Flammenvolumen und Flammentemperatur des Brenners. Die Flammenhalterung erfüllt oft zugleich die Rolle einer Rückschlagsicherung.

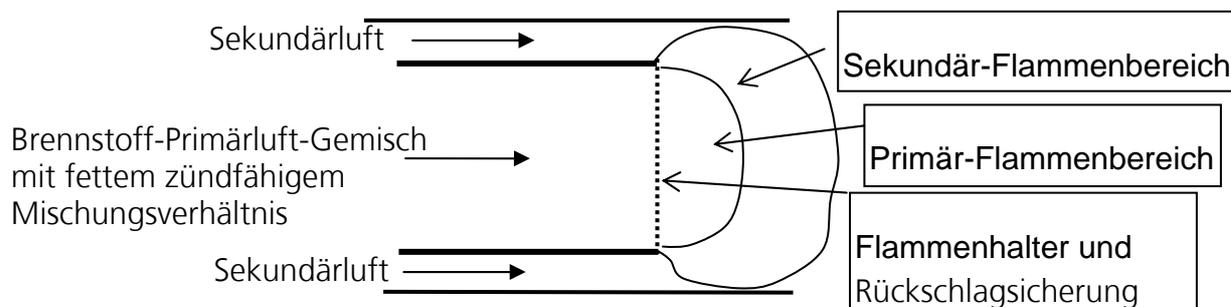


Abbildung 22: Gestufte Feuerung

Bei sonst gleichen Bedingungen führt eine Erhöhung des Flammenvolumens zu einer Verminderung der Flammentemperatur. Da die Reaktionsgeschwindigkeit der in Gl. (19) beschriebenen **thermischen Stickoxidbildung** (Zeldovich-Mechanismus) sehr stark temperaturabhängig ist, leistet diese Reaktion erst bei Verweilzeiten über 1/100 Sekunde und Flammentemperaturen über 1600 K einen nennenswerten Beitrag zur NO-Bildung. Bei entsprechender Optimierung bietet die gestufte Feuerung eine Möglichkeit zur Reduktion der Stickoxidbildung und der Russbildung.

Aufgabe 19: Welches Gas ist das Brenngas der in der Aufgabe 18? Wie hoch ist die Luftzahl der Verbrennung? Betrachten Sie zur Lösung dieser Aufgabe die Lösung der Aufgabe 18 and Abbildung 14!

3 – Brennstoffverbrennung

Schadstoffarme Gasbrennerkonstruktionen

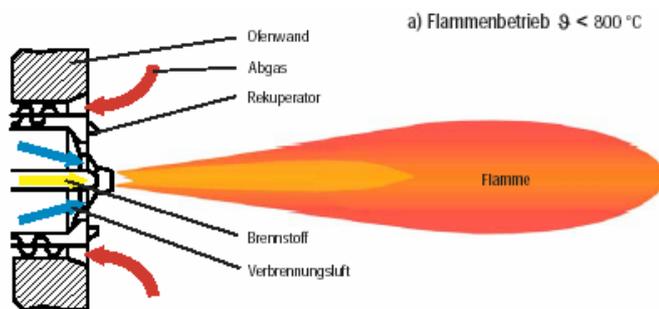


Abbildung 23 Herkömmliche Flammenverbrennung – Diffusionsflamme (Gelbbrenner)
 Quelle: Erdgas Report 1/03

Brennstoff und Luft werden in den Feuerraum zugeführt. In diesem Beispiel wird die restliche Abgaswärme zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt. Die Flammentemperatur beträgt in der Regel 1) bei kleinen Leistungen mehr als 1500 K, 2) im Leistungsbebereich von 20 kW mehr als 1800 K, 3) im Leistungsbereich über 100 kW mehr als 2000 K. Dieser traditionelle Diffusionsbrenner ist nicht schadstoffarm: Die unerwünschte Verbrennungsprodukte sind: Russ, Kohlenmonoxid, Stickoxid

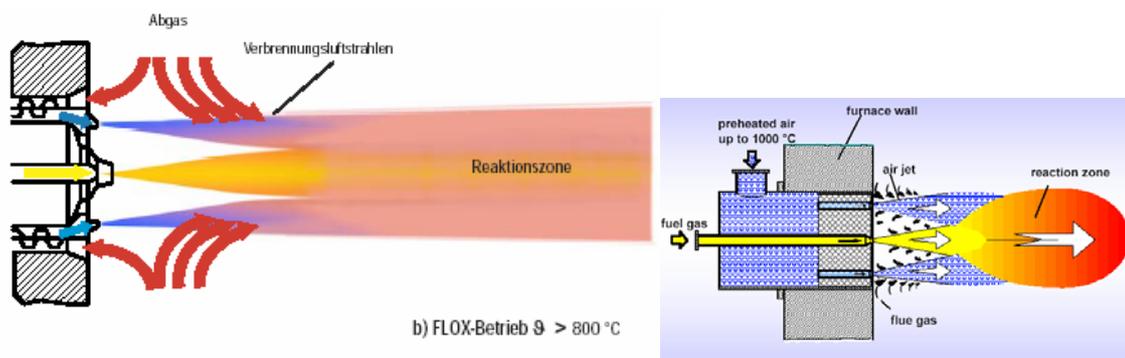


Abbildung 24 Flammenlose Verbrennung, Quelle: Erdgas Report 1/03

Die Abgaszirkulation ist derartig intensiv, dass hierdurch die Flammentemperatur unter 800 °C gekühlt wird. Somit ist die Verbrennungstemperatur kaum höher als die Zündtemperatur der Brennstoffes (in diesem Fall Erdgas). Die Strömungsführung der Abgaszirkulation in der Reaktionszone („Flamme“) wird so gestaltet, dass die Verbrennung stabil bleibt. Die Verbrennung verläuft sehr schadstoffarm. Die Brennerkonstruktion ist aufwändig, daher unüblich in der Heizungstechnik. Anwendungsgebiete: Gasturbinen, Müllverbrennung, Schwachgasverbrennung, Industrie.

3 – Brennstoffverbrennung

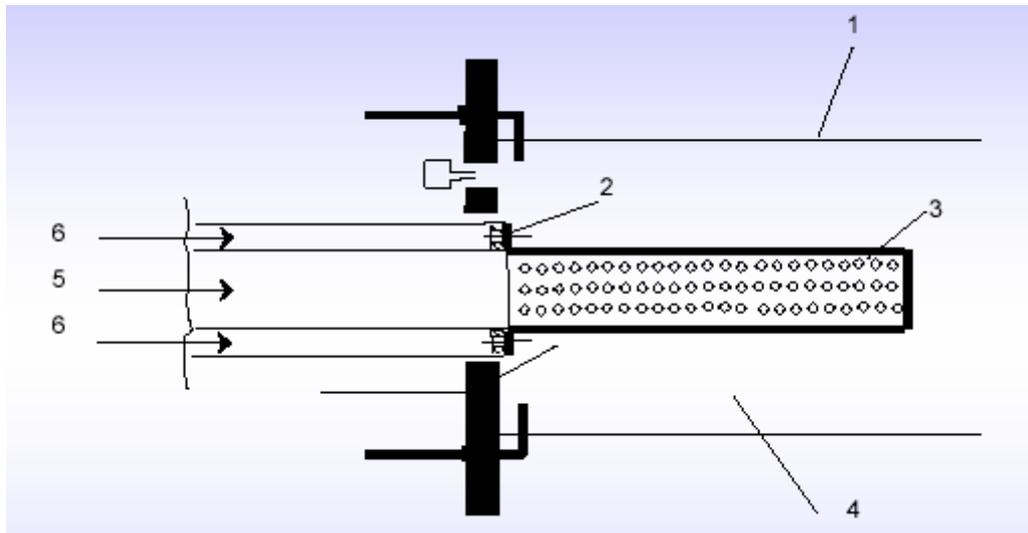


Abbildung 25: COSTAIR Brenner, eine neu entwickelte Form der flammenlosen Verbrennung. Die Verbrennungsluft wird in den Luftverteiler geführt, der Brennstoff wird außen in die Brennkammer gefördert. Die Größe und Form der Luftverteiler bestimmt das Flammenvolumen. Der Luftverteiler wird so groß ausgelegt, dass die Verbrennungstemperatur in der Regel unter 1000 °C bleibt. Die Flammenstabilisierung erfolgt durch die Strömungsführung der Luftaustritt aus dem Luftverteiler. Das Verfahren ist neu, die Brennerkonstruktion ist sehr einfach, die Verbrennung ist schadstoffarm. Es bestehen gute Chancen für eine baldige Einführung in die Praxis.

Quelle: GWI – NGT GT-Workshop, Brüssels, 2001; 1) Flammrohr 2) Brennstoffdüse 3) Luftverteiler 4) Brennraum 5) Luftzufuhr 6) Brennstoffzufuhr

3 – Brennstoffverbrennung



Abbildung 26: Der Matrix-Strahlungsbrenner ist ein Übergang zwischen der flammenlosen Oxidation und der katalytischen Verbrennung;

Quelle: Viessmann

Kernstück des Matrix-Strahlungsbrenners ist ein Edelmetallgewebe, geformt zu einer Halbkugel. An der Oberfläche des Gewebes wird das Gas-Luft-Gemisch gezündet und nahezu flammenlos verbrannt, d. h. ohne sichtbare blaue Flammen. Das Gewebe aus speziellem hochhitzebeständigem Edelmetall glüht und gibt dadurch direkt aus der Reaktionszone einen hohen Anteil der Wärme als Strahlung ab. Die Folge ist eine niedrige Verbrennungstemperatur im Gegensatz zu der bislang üblichen Diffusionsflamme. Der Matrix-Strahlungsbrenner ermöglicht eine schadstoffarme Gasverbrennung.

Schadstoffarme Ölbrennerkonstruktionen

Vorverdampfte Heizölverbrennung, Blaubrenner

Beim Blaubrenner wird die Diffusionsflamme der Sprayverbrennung (Gelbbrenner) in eine Gas-Vormischflamme umgewandelt, indem Brennstoffaufbereitungszone (Zerstäubung, Verdampfung und Mischungsbildung) und Reaktionszone durch thermofluidynamische (strömungstechnische und wärmetechnische) Maßnahmen voneinander getrennt werden: Die homogene Mischungsbildung ist abgeschlossen, bevor die Verbrennung beginnt. Die Merkmale der fetten Verbrennung (Russbildung, erhöhte Stickoxid-, Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentration im Abgas) werden vermieden. Durch das Blaubrenner-Verfahren kann die Luftzahl der Verbrennung deutlich reduziert werden: Hierdurch werden höhere Wirkungsgrade und ein höherer Abgastaupunkt (bessere Brennwertnutzung) erreicht. Nachteilig sind die erhöhten Verbrennungsgeräusche bzw. die höhere Anforderung an geräuschkämpfenden Maßnahmen. Bei blaubrennenden Heizölbrennern ist die Eintrittsgeschwindigkeit der Mischung aus Heizöltropfen und Verbrennungsluft deutlich höher als die Flammengeschwindigkeit: Im Eintrittsbereich in das Flammrohr findet deshalb keine Verbrennung statt.

3 – Brennstoffverbrennung

In der Verdampfungszone verdampfen die Tröpfchen, und der Brennstoffdampf vermischt sich mit der Verbrennungsluft (Vormischflamme).

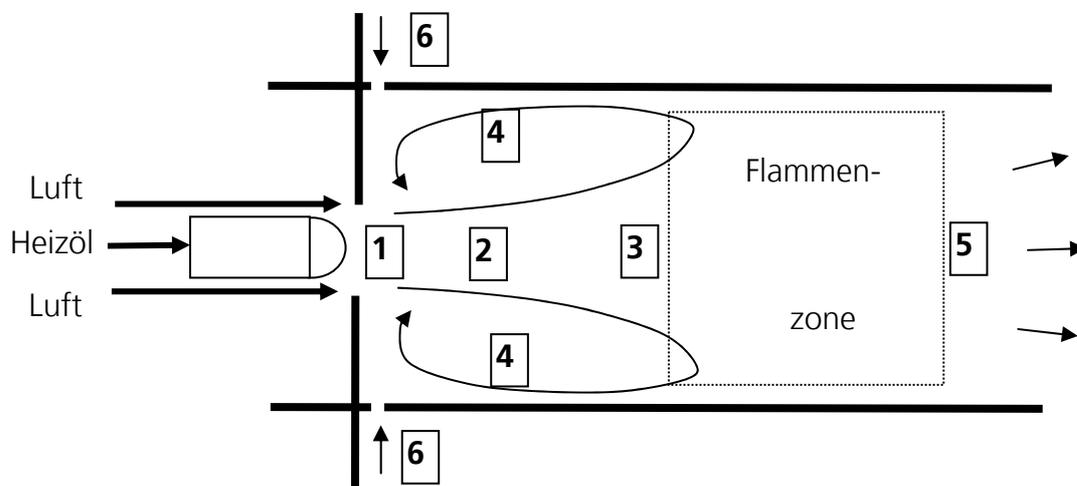


Abbildung 27: Prinzip von Heizöl-Blaubrennern: 1) Eintritt der Mischung aus Heizöltropfen und Verbrennungsluft, 2) Verdampfungszone und Vermischung des Brennstoffdampfes mit der Verbrennungsluft, 3) Beginn der Flammenzone, 4) Zirkulation heißer Verbrennungsprodukte aus der Flamme für die Tropfenverdampfung, 5) Ende der Flammenzone. 6) Bei größeren Brennerleistungen können kleinere Bohrungen den Feuerraum des Kessels und das Flammrohr miteinander verbinden, um durch das Einströmen von Abgasen aus dem Feuerraum die Flammentemperatur zu reduzieren und so z.B. die thermische Stickoxidbildung zu verhindern.

Die zur Verdampfung nötige Energie wird durch die Zirkulation heißer Verbrennungsprodukte aus der Flamme in die Verdampfungszone transportiert. Die Flammenzone beginnt dort, wo die durch die Strahlenausbreitung verminderte Strömungsgeschwindigkeit des Brennstoff-Luft-Gemisches und die Flammengeschwindigkeit gleich sind. Nach abgeschlossener Verbrennung verlassen die Verbrennungsprodukte das Flammrohr.

Ist die Temperatur in der Verdampfungszone zu niedrig (unter 700 K), wird die Verdampfung unvollständig: Tropfen gelangen in die Flamme, der Blaubrenner schlägt in Gelbbrenner um. Ist die Temperatur zu hoch (über 1000 K), so schlägt die Flamme zurück in die Verdampfungszone, was wiederum zur Tropfenverbrennung (Gelbbrenner) führt. Die Einstellung der optimalen Temperatur in der Verdampfungszone und der Flammentemperatur wird als Temperaturmanagement bezeichnet. Eine Voraussetzung der vollständigen Tropfenverdampfung vor der Flammenzone ist, dass der Durchmesser der größten Tropfen im Spray, D_{\max} , unterhalb ca. $80 < D_{\max} < 100 \mu\text{m}$ liegt. Die verschiedenen Blaubrennertypen unterscheiden sich in der Flammenstabilisierung und im Temperaturmanagement. Beides erfolgt in der Regel durch strömungstechnische Maßnahmen.

3 – Brennstoffverbrennung

Kalte Ölbrennerflamme

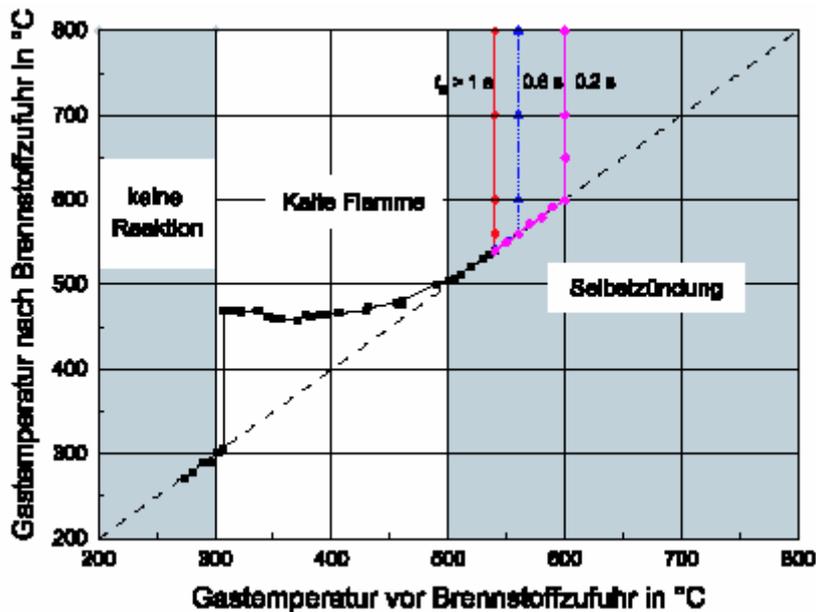


Abbildung 28: Prinzip der kalten Ölbrennerflamme,
 Quelle: OWI

Bei Zerstäubung von flüssigen Brennstoffen in einen vorgewärmten Luftstrom bei Temperaturen unter 300 °C lässt sich keine signifikante Temperaturerhöhung des Gemisches feststellen. Wird hingegen die Luft auf 300 °C vorgewärmt, erfolgt bei der Ölzerstäubung in der vorgewärmten Luft ein Temperaturanstieg, wie dargestellt in Abbildung 28. Der Anstieg der Temperatur des Gemisches bei der Zerstäubung in den vorgeheizten Luftstrom ist bedingt durch chemische Reaktionen der Kohlenwasserstoffe mit dem Luftsauerstoff, bei denen Wärme abgegeben wird. Diese werden als Kalte Flammen bezeichnet. Es kommt aber nicht zu einer Selbstzündung des Gemisches. Die Temperatur steigt in Strömungsrichtung um 10 bis 150 K und stabilisiert sich auf dem erhöhten Niveau. Die Zusammensetzung des Brennstoffes ändert sich aufgrund der chemischen Reaktionen mit der Verbrennungsluft vor der Zündung. Eine Analyse der Versuche zeigt, dass bis zu 10 % der im Brennstoff gebundenen chemischen Energie bereits während der Gemischbildung umgesetzt wird. Durch Oxidations- und Zerfallsreaktionen reagieren dabei hauptsächlich lange Kohlenwasserstoffketten zu kurzen Molekülen. Das entstandene Gemisch ist fremdzündfähig. An der Entwicklung dieses Verfahrens wird gegenwärtig am Oel-Waerme-Institut (OWI) gearbeitet.