

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

Aufgabe 1: Ermitteln Sie den Abgastaupunkt der Verbrennungsprodukte der Reaktionen nach Gl (10) und (11) mit Hilfe von Tabelle 1 oder Abbildung 2!

Abgas der Verbrennung nach Gl (10): 66.67% N₂ + 33.33 % H₂O

Abgas der Verbrennung nach Gl (11): 9,1 % CO₂ + 18,2 % H₂O + 72,7% N₂

Sättigungstemperatur °C	Sättigungsdruck Pa	Sättigungskonzentration % H ₂ O
50	12334	12,3
60 - 0,612 = 59,388		18,2 Gl. (10)
60	19919	19,1
70	31161	31,2
70 + 1,3 = 71,3		33,33 Gl. (11)
80	47359	47,4

$$18,2 = 19,1 - 0,9 \qquad 19,1 - 6,8 = 12,3$$

$$\qquad \qquad \qquad 60^{\circ}\text{C} \qquad \qquad \qquad 50^{\circ}\text{C}$$

$$10,0\text{K} \quad 6,8$$

$$0,9\text{K} \quad X \qquad X = (0,9 * 6,8) / 10,0 = 0,612\text{K}$$

$$2,13 \quad 16,4$$

$$X \quad 10 \qquad X = 21,3 / 16,4 = 1,3$$

Aufgabe 2: Ermitteln Sie die Zusammensetzung der „trockenen“ Abgase der Reaktionen nach Gl (10) und (11)!

Abgas der Verbrennung nach Gl (10): 66.67% N₂ + 33.33 % H₂O

Abgas der Verbrennung nach Gl (11): 9,1 % CO₂ + 18,2 % H₂O + 72,7% N₂

Gl. (10)	Trocken:	100 % N ₂			
Gl. (11)	Trocken:	9,1 CO ₂	+	72,7 N ₂	= 81,8
		9,1 / 81,8		72,7 / 81,8	
		11,1 % CO ₂	+	88,9 % N ₂	= 100 %

Aufgabe 3: Ermitteln Sie die Zusammensetzung der trockenen Abgase nach Tabelle 3!

Luftzahl	Abgas	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Σ	Taupunkt
λ=1,0	Volumenanteil (feucht)	0,95	1,9	7,65	0	10,5	58 [°C]
	[%] (feucht)	9,05	18,1	72,86	0	100	
λ=1,1	Volumenanteil (feucht)	0,95	1,9	8,41	0,19	11,45	55 [°C]
	[%] (feucht)	8,3	16,52	73,13	1,65	100	
λ=1,3	Volumenanteil (feucht)	0,95	1,9	9,93	0,57	13,35	52 [°C]
	[%] (feucht)	7,11	14,23	74,38	4,27	100	
λ=1,5	Volumenanteil (feucht)	0,95	1,9	11,45	0,95	15,25	49 [°C]
	[%] (feucht)	6,23	12,46	75,08	6,23	100	

Tabelle 3: Berechnung der Abgastaupunkt nach Beispiel Nr. 1

3 – Brennstoffverbrennung

Luftzahl	Abgas	CO ₂	N ₂	O ₂	Σ
λ=1,0	Volumen (trocken)	0,95	7,65	0	8,6
	[%] (trocken)	11,05	88,95	0	100
λ=1,1	Volumen (trocken)	0,95	8,41	0,19	9,55
	[%] (trocken)	9,95	88,06	1,99	100
λ=1,3	Volumen (trocken)	0,95	9,93	0,57	11,45
	[%] (trocken)	8,3	86,72	4,98	100
λ=1,5	Volumen (trocken)	0,95	11,45	0,95	13,35
	[%] (trocken)	7,17	86,42	7,17	100

Aufgabe 4: Berechnen Sie die fehlenden Werte in Tabelle 5 unter Zugrundelegung der Tabellen 1, 2 und 4 und der Abbildung 2!

Zusammensetzung	Heizöl	Erdgas L	Erdgas H
	Gew.-%	Vol.-%	Vol.-%
Kohlenstoff (C)	86		
Wasserstoff (H)	13		
Stickstoff (N)	0,5	14	1
Schwefel (S)	0,3		
Methan (CH ₄)		82	93
Kohlenwasserstoffe (C _n H _{2n})		3	5
ABGASWERTE			
CO _{2, max.}	%	15,5	10,3
L _{min.}	m ³ /kg	11,1	8,37
V _{min, trocken}	m ³ /kg	10,4	7,64
V _{min, feucht}	m ³ /kg	11,8	9,37
Abgastaupunkt λ = 1,05	°C	48,6	57,8
Abgastaupunkt λ = 1,1	°C	47,8	56,9
Abgastaupunkt λ = 1,2	°C	46	54,9
Abgastaupunkt λ = 1,4	°C	43	51,9

Tabelle 5 Feuerungstechnische Kennzahlen von Erdöl und Erdgas

Heizöl:

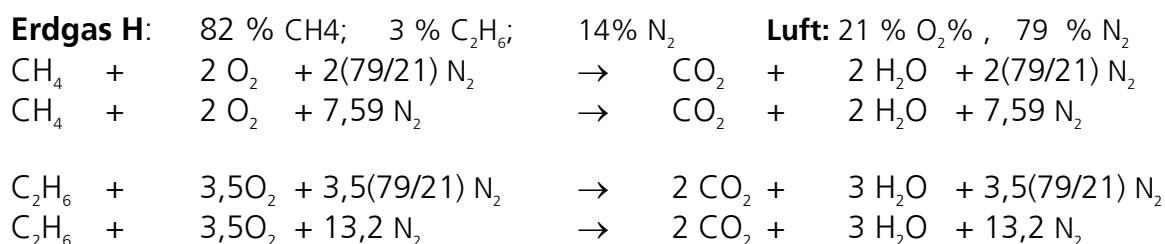
Brennstoff-Komponente	Anteil	Luftbedarf m ³ / kg	Abgas m ³ / kg	
C	0,86	7,65	1,61	CO ₂
H	0,13	3,44	1,44	H ₂ O
S	0,005	0,01	0,002	SO ₂
N	0,005	0	0,004	N ₂
L _{min.}		11,1	11,1*0,79	N ₂
V _{min, feucht}			11,8	
V _{min, trocken}			10,4	
CO _{2, max, trocken}			15,5	
V _{λ, feucht} λ = 1,05; 1,1; 1,2; 1,4	12,4	12,9	14	16,2

3 – Brennstoffverbrennung

H ₂ O % λ = 1,05; 1,1; 1,2; 1,4	11,6%	11,2%	10,3%	8,89%
Taupunkt λ = 1,05; 1,1; 1,2; 1,4	48,6°C	47,8°C	46°C	43°C

Heizöl-Taupunkt, lineare Interpolation

Taupunkt	50 °C	40 °C	48,57	47,76	45,92	43,04	
Sättigung	12,3%	7,4 %	11,6	11,2	10,3	8,89	
ΔSättigung	12,3 – 7,4 =	4,9 %	11,6-7,4=	4,2	3,8	2,9	1,49
ΔTaupunkt	50 – 40 =	10 °C	4,2*10/4,9=	8,57	7,76	5,92	3,04



Stöchiometrische Methan- und Ethanverbrennung															
1	CH ₄	+	2 O ₂	+	7,59 N ₂		⇒	CO ₂	+	2 H ₂ O	+	7,59 N ₂			
2	C ₂ H ₆	+	3,5 O ₂	+	13,2 N ₂		⇒	2CO ₂	+	3 H ₂ O	+	13,2 N ₂			
Stöchiometrische Erdgasverbrennung															
3	0,82·CH ₄ 0,03 C ₂ H ₆	+	0,82·2 0,03·3,5 =1,75 O ₂	+	0,82·7,59 0,03·13,2 = 6,62 N ₂	+	0,14 N ₂	⇒	0,82 0,03·2 = 0,88 CO ₂	+	0,82·2 0,03·3 = 1,73 H ₂ O	+	6,62 N ₂	+	0,14 N ₂
4	1 m ³ Erdgas	+	8,37 m ³ Luft				⇒	9,37 m ³ Abgas (mit 0,88 m ³ CO ₂ und 1,73 m ³ H ₂ O) H ₂ O = 18,5 %							
5 % Luftüberschuss															
5	1 m ³ Erdgas	+	8,79 m ³ Luft				⇒	9,79 m ³ Abgas (mit 0,88 m ³ CO ₂ und 1,73 m ³ H ₂ O) H ₂ O = 17,7 %							
10 % Luftüberschuss															
6	1 m ³ Erdgas	+	9,21 m ³ Luft				⇒	10,2 m ³ Abgas (mit 0,88 m ³ CO ₂ und 1,73 m ³ H ₂ O) H ₂ O = 17 %							
20 % Luftüberschuss															
6	1 m ³ Erdgas	+	10 m ³ Luft				⇒	11 m ³ Abgas (mit 0,88 m ³ CO ₂ und 1,73 m ³ H ₂ O) H ₂ O = 15,7 %							
40 % Luftüberschuss															
6	1 m ³ Erdgas	+	11,7 m ³ Luft				⇒	12,7 m ³ Abgas (mit 0,88 m ³ CO ₂ und 1,73 m ³ H ₂ O) H ₂ O = 13,6 %							

Erdgas L -Taupunkt, lineare Interpolation

Taupunkt	50 °C	60 °C	51,88	54,93	56,81	57,83
Sättigung	12,3%	19,1 %	13,6	15,7	17	17,7
ΔSättigung	6,9 %		1,3	3,4	4,7	5,4
ΔTaupunkt	10 °C		1,88	4,93	6,81	7,83

3 – Brennstoffverbrennung

Aufgabe 5: Wie hoch ist die Luftzahl bei der Verbrennung, dargestellt in Abbildung 3?

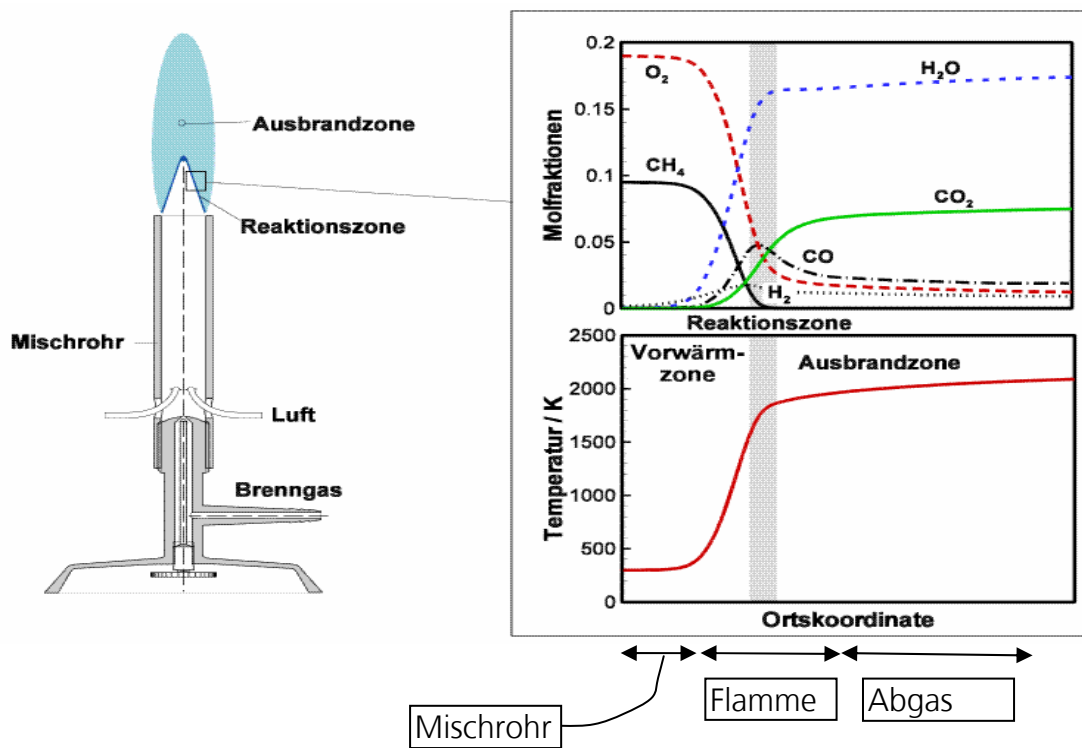
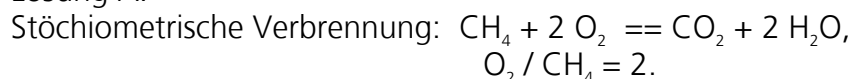


Abbildung 3: Methanverbrennung mit einem Bunsenbrenner

Lösung A:



Molfraktion in Abb. 3: CH_4 : ca. 0,095, O_2 : ca. 0,19, d.h. $O_2 / CH_4 = 2$.

Also zeigt Abb. 3 die stöchiometrische Verbrennung mit $\lambda = 1$.

Lösung B

Molfraktionen: $CH_4 = 0,095$, $O_2 = 0,19$, $N_2 = 1 - 0,19 - 0,095 = 0,715$
 in der Luft: $N_2 = 0,79$ $O_2 / 0,21$.

$CH_4 + 2O_2 + (79/21) N_2 = 0,095 + 0,19 + 0,715 = 1,0$ ist die stöchiometrische Methan-Luft-Mischung.

Aufgabe 6: Bei einer Verbrennung befindet sich die Flamme im Dissoziationsgleichgewicht. Die Zusammensetzung des Abgases ist:

$\lambda = 1,02$ $CO_2 = 13\%$ $O_2 = 0,44\%$ $CO = 40$ ppm

$\lambda = 1,2$ $CO_2 = 11,1\%$ $O_2 = 3,72\%$ $CO = ?$

Wie hoch ist die CO-Konzentration in der Flamme bei 20 % Luftüberschuss, wenn alle anderen Bedingungen gleich sind?

3 – Brennstoffverbrennung

Lösung

$$K = \frac{p_{CO_2}^2}{p_{CO}^2 \cdot p_{O_2}} = \frac{(0,13)^2}{(4 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 0,0044} = \frac{(0,111)^2}{X^2 \cdot 0,0372}$$

$$X = \sqrt{\frac{(4 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (0,111)^2 \cdot 0,0044}{(0,13)^2 \cdot 0,0372}} = 1,17 \cdot 10^{-5} = 11,7 \text{ ppm}$$

Aufgabe 7: Welcher Anteil des Brennstoffschwefels ist als Schwefeldioxid und als Schwefeltrioxid bei der Verbrennung mit 2 % und mit 20 % Luftüberschuss vorhanden, wenn sich die Schwefeloxide im Dissoziationsgleichgewicht befinden?

$$\lambda = 1,02 \quad O_2 = 0,44\% \quad SO_2 = 25 \text{ ppm}$$

$$\lambda = 1,2 \quad O_2 = 3,72\% \quad SO_2 = 5,4 \text{ ppm}$$

$$K_{1000^\circ C} = SO_3^2 / (SO_2^2 \cdot O_2) = 0,0277$$

$$\lambda = 1,02$$

$$K = \frac{p_{SO_3}^2}{p_{SO_2}^2 \cdot p_{O_2}} = \frac{SO_3^2}{(25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,0044} = 0,0277$$

$$SO_3 = \sqrt{0,0277 \cdot (25 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,0044} = 5,52 \cdot 10^{-5} = 55,2 \text{ ppm}$$

$$SO_x = SO_2 + SO_3$$

$$SO_2 = 25 \text{ ppm}, \quad SO_3 = 55,2 \text{ ppm}, \quad SO_x = SO_2 + SO_3 = 80,2 \text{ ppm}$$

$$SO_2 = 25/80,2 = 31,2 \%$$

$$\lambda = 1,2$$

$$K = \frac{p_{SO_3}^2}{p_{SO_2}^2 \cdot p_{O_2}} = \frac{SO_3^2}{(5,4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,0374} = 0,0277$$

$$SO_3 = \sqrt{0,0277 \cdot (5,4 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,0372} = 7,46 \cdot 10^{-5} = 74,6 \text{ ppm}$$

$$SO_x = SO_2 + SO_3$$

$$SO_2 = 5,4 \text{ ppm}, \quad SO_3 = 74,6 \text{ ppm}, \quad SO_x = SO_2 + SO_3 = 80,0 \text{ ppm}$$

$$SO_2 = 5,4/80,0 = 6,75 \%$$

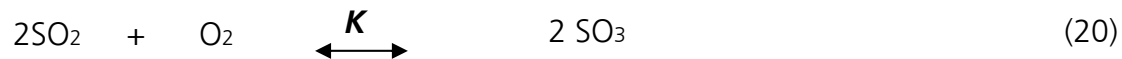
Aufgabe 8: Warum steigt die NO-Bildung, und warum sinkt die CO₂-, SO₃- und H₂O-Bildung mit zunehmender Verbrennungstemperatur?

Antwort: Die NO-Bildung ist endotherm, die CO₂-, SO₃- und H₂O-Bildungsreaktionen sind exotherm. Die Regel nach **le Chatelier** besagt, dass die Reaktionsrichtung immer diejenige ist, welche die Extremwerte mindert. Ist die Flammentemperatur zu hoch, so werden die Reaktionsrichtungen gefördert, die einen weiteren Anstieg der Flammentemperatur verhindern.

3 – Brennstoffverbrennung

Aufgabe 9: In welche Richtung verschiebt sich die Dissoziationslinie der Schwefelverbrennung bzw. Schwefeloxiddissoziation bei einer starken Zunahme des Feuerraumdruckes?

Antwort: . Die Regel nach **le Chatelier** besagt, dass die Reaktionsrichtung immer diejenige ist, welche die Extremwerte mindert. Die Globalreaktion der Schwefelverbrennung bzw. Schwefeloxiddissoziation lautet:



Bei der Verbrennung entstehen aus 3 Molekülen (2 SO₂ und 1 O₂) 2 Moleküle (2 SO₃). Die Reaktion führt also bei konstantem Feuerraumdruck zu einer Druckminderung. Einer Erhöhung des Feuerraumdruckes wirkt die Druckminderung entgegen: Also wird die Reaktion der SO₃-Bildung begünstigt; Die Reaktionsrichtung verschiebt sich rechts in Gleichung (20), die Dissoziationslinie verschiebt sich rechts in Abbildung (5).

Aufgabe 10: Interpretation der Tabellen 5a, 5b und 5c.

- Wie hoch ist die CO-Konzentration bei 10 % Luftüberschuss bei homogener Brennstoff-Luft-Mischung im Abgas eines Heizkessels mit einer Feuerraum-Endtemperatur von 1500 K?
- Wie hoch ist die CO-Konzentration bei 10 % Luftüberschuss bei homogener Brennstoff-Luft-Mischung im Abgas eines Heizkessels mit einer Feuerraum-Endtemperatur von 1700 K?
- Wie hoch ist die CO-Konzentration bei 20 % Luftüberschuss bei inhomogener Brennstoff-Luft-Mischung im Abgas eines Heizkessels mit einer Feuerraum-Endtemperatur von 1700 K, wenn in der einen Feuerraumhälfte 10% Luftmangel und in der anderen Feuerraumhälfte 50% Luftüberschuss herrschen?

a)	Tabelle 5a,	$\lambda=1,1$	1500 K	CO = 5 ppm
b)	Tabelle 5a,	$\lambda=1,1$	1700 K	CO = 60 ppm
c)	Tabelle 5c,	$\lambda=0,9$	1700 K	31840 ppm
	Tabelle 5c,	$\lambda=1,5$	1700 K	20 ppm
	$(31840 + 20) / 2 = 15920 \text{ ppm}$			

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

3 – Brennstoffverbrennung

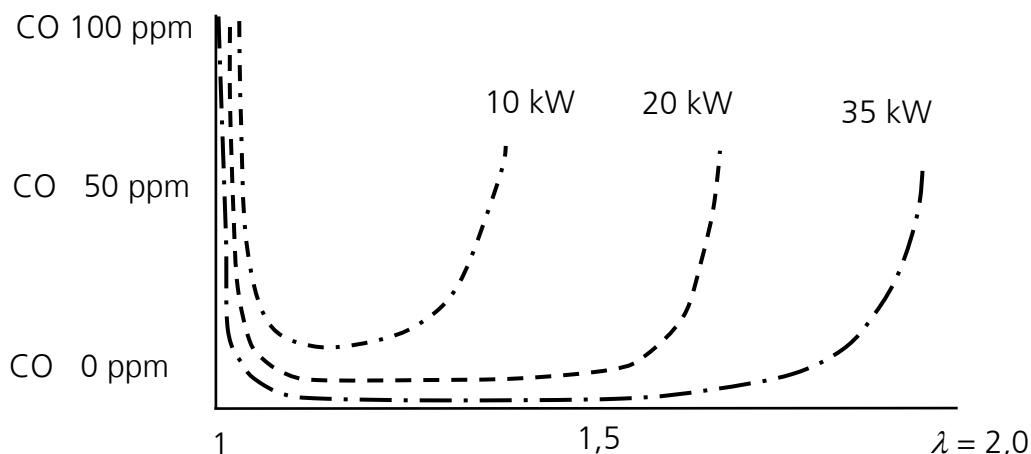
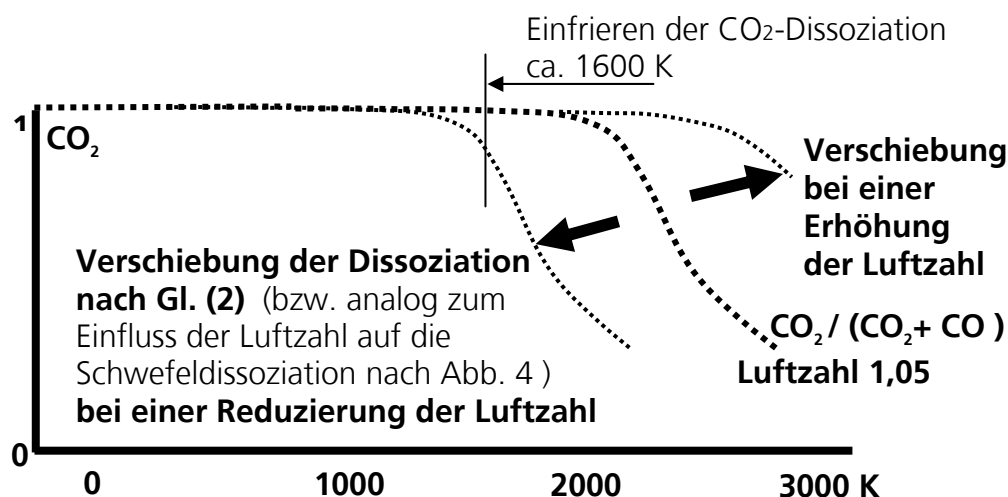


Abbildung 7: Einfluss der Luftzahl auf die Kohlenmonoxid-Konzentration im Abgas bei der Verbrennung von Heizöl EL für verschiedene Brennerleistungen

Lösung:



Einfluss der Änderung der Luftzahl auf die Dissoziation von CO_2 in Analogie zu Abbildung 4

Bei einer Reduzierung der Luftzahl erhöht sich die CO-Konzentration nach den Dissoziationsgleichungen (12) und (13). Die Erhöhung der CO-Konzentration ist unabhängig von der Brennerleistung. Die Luftzahl, bei der die CO-Konzentration ca. 40 ppm überschreitet, ist im Diagramm der Aufgabenstellung bei allen drei Brennerleistungen ca. 1, 05.

zu wenig Luft \Rightarrow unvollständige Verbrennung \Rightarrow viel CO

Bei einer Erhöhung der Luftzahl sinkt die Verbrennungstemperatur. Insbesondere bei kleinen Brennerleistungen wird der Luftzahlbereich immer kleiner, in dem die Verbrennungstemperatur ca. 1600 K übersteigt. Dies ist die Temperatur, bei der die CO_2 -Dissoziation einfriert, und zugleich die Mindesttemperatur für eine vollständige CO-Verbrennung bei Hausheizungen.

3 – Brennstoffverbrennung

Die Luftzahl, bei der 1600 K Verbrennungstemperatur unterschritten wird, beträgt in Abbildung 4 ca. 1,3, 1,6 und 1,8 für die Brennerleistungen 10, 20 und 35 kW. Die Luftzahl, bei der die CO-Konzentration ca. 40 ppm überschreitet, beträgt nach Abbildung 6 bei den drei Brennerleistungen ebenfalls ca. 1,3, 1,6 und 1,8.

zu viel Luft \Rightarrow **zu niedrige Verbrennungstemperatur** \Rightarrow **unvollständige Verbrennung** \Rightarrow **viel CO, insbesondere bei kleiner Brennerleistung**

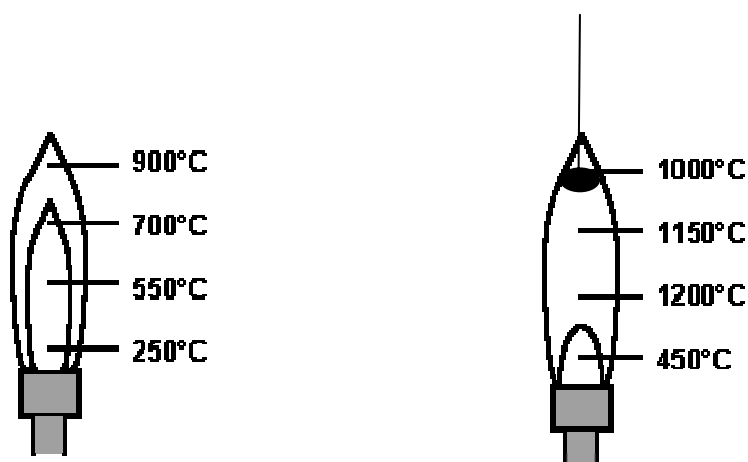
Aufgabe 12: Warum ist das Starten eines Verbrennungsmotors schwieriger im Winter als im Sommer?

Im Winter ist der ausgekühlte Motor kälter als im Sommer. Dadurch ist der Löschabstand größer. Dies erschwert den Start des Motors.

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

Bei der Inbetriebnahme sind die Temperaturen der Feuerraumwand und der Brennerbauteile kälter als im ausgestalteten Zustand beim Taktbetrieb. Dies führt zu einer Verminderung der Flammentemperatur und zu einer Vergrößerung des Löschabstandes. Mit einer Verminderung der Luftzahl kann man den Kaltstart verbessern. Gegebenfalls muss zum Kaltstart die Luftzahl so weit reduziert werden, dass die Verbrennung im Luftmangel stattfindet. Daher muss nach dem Kaltstart die Luftzahl ermittelt und, wenn nötig, neu eingestellt werden.

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



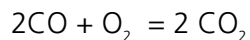
leuchtende Flamme

nicht leuchtende Flamme

Auf einen dünnen Draht eine Metallkugel (Kupfer, Stahl, etc.) hängen. Die erhitzte Kugel ins Wasserbad tauchen. Die Temperaturerhöhung des Wassers messen, und aus Temperaturanstieg, Masse und Wärmekapazität der Kugel und des Wassers auf die Flammentemperatur schließen.

3 – Brennstoffverbrennung

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



$$21O_2 + 1H_2O + 78N_2 + 42CO = 142 \text{ Vol.-Einheit Brennstoff-Luft-Mischung} = 100\%$$

$$14,8\% + 0,7\% + 14,9\% + 29,6\% = 100\%$$

Die CO-Konzentration der stöchiometrischen Mischung beträgt 29,6 %.

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

Der Choke verhindert bei Kaltstart einen zu hohen Luftüberschuss und verbessert damit die Starteigenschaft des kalten Motors. Es gibt auch am **Diesel** Thermofühler für die Kaltstartbeschleunigung.

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 %

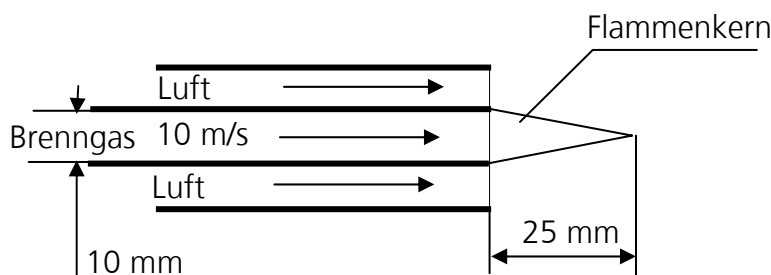
Untere Zündgrenze nach Le Chatelier:

$$(50+38+12) / ((50/4) + (38/12,5)) = 6,44\%$$

obere Zündgrenze nach Le Chatelier:

$$(50+38) / ((50/74) + (38/77)) = 75,27\%$$

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?



$$\arctg \alpha = (10/2) / 25; \quad \alpha = 11,3; \quad \sin \alpha = 0,196$$

$$U_{\text{Flamme}} = \sin \alpha \cdot U_{\text{Strömung}} = 0,196 \cdot 10 \text{ m/s} = \underline{1,96 \text{ m/s}}$$

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 und Abbildung 14!

Lösung:

Die laminare Flammengeschwindigkeit in der Aufgabe 17 beträgt 1,96 m/s.

Abbildung 14 zeigt nur ein Brenngas, das eine so hohe laminare Flammengeschwindigkeit aufweist, nämlich Wasserstoff. Die Luftzahl der Verbrennung ist entweder $\lambda = 1,0$, oder $\lambda = 0,5$