

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**Aufgabe 1:** Ein Gebläsebrenner, der in Hamburg bei 30 m über NN bei einem atmosphärischen Druck von 101000 Pa für die Verbrennung mit einer Luftzahl von  $\lambda = 1,15$  eingestellt ist, wird nach Freudenstadt, 630 m über NN, transportiert, und wird dort ohne neue Einstellung (!) weiterbetrieben. (So etwas darf natürlich nicht vorkommen!) Der atmosphärische Druck nimmt je 8 Meter Höhenzunahme um 1 hPa ab. Wie hoch wird am neuen Ort die Luftzahl sein, wenn *alle anderen Bedingungen gleich geblieben sind*?

**Lösung:** Der Höhenunterschied beträgt 600 m, (630 – 30);  
 die Abnahme des Luftdrucks beträgt 75 hPa (600 / 8);  
 Luftdruck in Hamburg ist 101000 Pa  
 Luftdruck in Freudenstadt ist 93500 Pa (101000 – 7500)  
*Alle anderen Bedingungen gleich*  $\Rightarrow$  Brennerleistung (Brennstoffmassenstrom) gleich, Lüfterradleistung (Luftvolumenstrom) gleich!

**Lösung nach der Theorie idealer Gase:**

bzw.  $p \cdot V / T = n \cdot R_m = m \cdot R_i$

bzw.

$$n = p \cdot V / R_m \cdot T$$

$$p_1 \cdot V_1 / T_1 = p_2 \cdot V_2 / T$$

<b>p</b>	absoluter Druck	[Pa] = [N/m <sup>2</sup> ]	
<b>V</b>	Volumen	[m <sup>3</sup> ]	
<b>n</b>	Stoffmenge	[mol]	$n = m / M$
<b>R<sub>i</sub></b>	individuelle Gaskonstante	[J/(kg·K)]	
<b>R<sub>m</sub></b>	universelle Gaskonstante	[J/(mol·K)]	
<b>T</b>	die absolute Temperatur	[K]	
<b>M</b>	Molmasse	[g/mol]	
<b>m</b>	Masse	[kg]	
<b>R<sub>m</sub></b>	$= R_i \cdot m$	$= 8,3144$ [J/(mol·K)] = 8314,4 [J/kmol]	

Die Stoffmenge **n** beträgt für die Verbrennungsluft in Hamburg den Wert:

$$n_{\text{Hamburg}} = p_{\text{Hamburg}} \cdot V / R_m \cdot T = 101000 \cdot V / R_m \cdot T,$$

mit V als der Volumenstrom, den das Lüfterrad fördert. Da außer dem Luftdruck alle Bedingungen gleich bleiben, nimmt der Ausdruck  $V / R_m \cdot T$  in beiden Fällen den gleichen Wert an. Die Stoffmenge für die Verbrennungsluft **n** in Freudenstadt ist wiederum:

$$n_{\text{Freudenstadt}} = p_{\text{Freudenstadt}} \cdot V / R_m \cdot T = 93500 \cdot V / R_m \cdot T.$$

Der geförderte Luftmassenstrom ändert sich wie das Verhältnis der Stoffmenge, also

$$n_{\text{Freudenstadt}} / n_{\text{Hamburg}} = (93500 \cdot V / R_m \cdot T) / (101000 \cdot V / R_m \cdot T) = 0,9257$$

Die Luftzahl der Verbrennung in Freudenstadt beträgt also  $\lambda = 1,15 \cdot 0,9257 = 1,0646$

**Lösung nach dem Boyle-Mariotte-Gesetz :**  $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \text{Konstante} = m \cdot R_i \cdot T$

$$p_{\text{Hamburg}} \cdot V_{\text{Hamburg}} = p_{\text{Freudenstadt}} \cdot V_{\text{Freudenstadt}} \quad \text{und somit}$$

$$V_{\text{Freudenstadt}} = (p_{\text{Hamburg}} \cdot V_{\text{Hamburg}}) / p_{\text{Freudenstadt}}$$

$$= (101000 \cdot V_{\text{Hamburg}}) / 93500 = 1,0802 \cdot V_{\text{Hamburg}}$$

Demnach müsste in Freudenstadt nach dem Boyle-Mariotte-Gesetz ein um den Faktor 1,0802 höherer Volumenstrom gefördert werden, um den Brenner mit der gleichen Luftzahl zu betreiben wie in Hamburg. Da aber das Lüfterrad den gleichen Volumenstrom fördert, ist der Luftmassenstrom in Freudenstadt bei sonst gleichen Bedingungen um den Faktor  $1 / 1,0802$  niedriger als in Hamburg.

Die Luftzahl der Verbrennung in Freudenstadt beträgt also  $\lambda = 1,15 / 1,0802 = 1,0646$

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**Aufgabe 2:** Bei einer Außentemperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  beträgt die Luftzahl  $\lambda = 1,1$ . Wie hoch wird die Luftzahl sein, wenn alle Bedingungen gleich bleiben, lediglich die Außentemperatur den Wert von  $+20^{\circ}\text{C}$  annimmt?

**Lösung nach Gay-Lussac:**  $V_1/T_1 = V_2/T_2$  mit  $T_1 = 253,15\text{ K}$  und  $T_2 = 293,15\text{ K}$ . Demnach ist  $V_2 = V_1 \cdot (T_2 / T_1) = 1,158 \cdot V_1$ . Der benötigte Luftvolumenstrom bei  $+20^{\circ}\text{C}$  wäre also um den Faktor 1,158 höher, um den Brenner mit Luft für eine Verbrennung mit  $\lambda = 1,1$  zu versorgen. Das Lüfterrad fördert aber nach wie vor den gleichen Volumenstrom von  $V_1$  wie bei der Verbrennung bei  $-20^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur. Also wird die Luftzahl bei  $+20^{\circ}\text{C}$  den Wert von  $\lambda = 1,1/1,158 = 0,95$  annehmen: **Der Brenner läuft mit 5 % Luftmangel!!!!**

**Lösung nach der Theorie idealer Gase :**

$$n_{-20^{\circ}\text{C}} = p \cdot V / (R_m \cdot 253,15),$$

$$n_{+20^{\circ}\text{C}} = p \cdot V / (R_m \cdot 293,15),$$

$$\begin{aligned} n_{-20^{\circ}\text{C}} / n_{+20^{\circ}\text{C}} &= p \cdot V / (R_m \cdot 253,15) / p \cdot V / (R_m \cdot 293,15) \\ &= (1/253,15) / (1/293,15) \\ &= 293,15 / 253,15 \\ &= 1,158 \end{aligned}$$

$$\lambda_{+20^{\circ}\text{C}} = \lambda_{-20^{\circ}\text{C}} / 1,158 = 0,95 \quad \text{Der Brenner läuft mit 5 % Luftmangel!!!!}$$

**Aufgabe 3:** Unter welchen Bedingungen ist die Aufgabe 2 wirklichkeitsfremd, und wann ist sie nicht wirklichkeitsfremd?

**Antwort:** Bei einer Außentemperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  herrscht im Kesselraum keinesfalls  $-20^{\circ}\text{C}$ . Bei einer realistischen Aufgabestellung sollte der Temperaturunterschied im Aufstellungsraum des Kessels (Brenners) für die zwei Zeitpunkte berücksichtigt werden, die Temperatur im Kesselraum sinkt nie auf  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Eine Ausnahme stellt die winterliche Inbetriebnahme einer Heizungsanlage dar (Siehe Aufgabe 13 im Manuskript „Brennstoffverbrennung“!) Wurde die „Voreinstellung“ des Brenners im Sommer vorgenommen, kann bei der winterlichen Inbetriebnahme ein um 20 % höherer Luftüberschuss vorliegen, was u. U. Zündungsprobleme mit sich bringt.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**Aufgabe 4:** Die Luftzahl der Verbrennung mit einem Gebläsebrenner beträgt bei einem Luftdruck von 1010 mbar und Temperatur von 10 °C den Wert von  $\lambda = 1,2$ . Wie wird die Luftzahl sein, wenn der Luftdruck auf 975 mbar sinkt und die Temperatur auf 22 °C ansteigt?

**Antwort:**  $p \cdot V / T = n \cdot R_m$

Da der vom Lüfterrad geförderte Volumenstrom  $V$  in beiden Fällen gleich ist, sind die Werte  $V$  und  $R_m$  konstant.

$$\begin{aligned} n_{1,\text{Luft}} &= 1010 \cdot V / (R_m \cdot 283,15) & \Rightarrow & V = (R_m \cdot 283,15) \cdot n_{1,\text{Luft}} / 1010 \quad \text{und} \\ n_{2,\text{Luft}} &= 975 \cdot V / (R_m \cdot 295,15) & \Rightarrow & V = (R_m \cdot 295,15) \cdot n_{2,\text{Luft}} / 975. \end{aligned}$$

$$(R_m \cdot 283,15) \cdot n_{1,\text{Luft}} / 1010 = (R_m \cdot 295,15) \cdot n_{2,\text{Luft}} / 975 \quad \text{und}$$

$$n_{2,\text{Luft}} = n_{1,\text{Luft}} \cdot (283,15/295,15) \cdot (975 / 1010)$$

Zum Zeitpunkt 1 ist die Luftzahl  $\lambda_1 = 1,2$ . Damit ist die Stoffmenge  $n$  für den Brennstoff

$$n_{1,\text{Brennstoff}} = n_{1,\text{Luft}} / \lambda_1 = n_{1,\text{Luft}} / 1,2 .$$

Da sich die Brennstoffmenge nicht ändert, gilt  $n_{1,\text{Brennstoff}} = n_{2,\text{Brennstoff}}$

Die Luftzahl  $\lambda$ , definiert als Luft-Brennstoff-Verhältnis, ist

$$\lambda_2 = n_{2,\text{Luft}} / n_{2,\text{Brennstoff}} = (n_{1,\text{Luft}} \cdot (283,13/295,15) \cdot (975 / 1010)) / (n_{1,\text{Luft}} / 1,2) = \mathbf{1,11}.$$

**Aufgabe 5:** Sie führen die Wartung eines Brenners bei extrem schwülem Wetter durch. Sie wollen bei der Einstellung der Luftzahl für die Verbrennung die Wetterlage berücksichtigen. Müssen Sie dabei die Luftzahl eher etwas höher oder eher etwas niedriger stellen als bei einer normalen Wetterlage?

**Lösung:** Bei feuchtwarmem Wetter enthält die Luft, bezogen auf das Luftvolumen, wenig Sauerstoff. Erstens, weil die Luft sich ausdehnt bei Wärme (die Luft wird „dünner“); zweitens, weil bei hoher Luftfeuchtigkeit der Sauerstoffanteil reduziert wird. Wenn Sie eine relativ niedrige Luftzahl einstellen (den Brenner „scharf“ stellen), wird bei Normalisierung der Wetterlage die Luftzahl automatisch etwas steigen, denn das gleiche Luftvolumen wird mehr Sauerstoff enthalten. Also dürfen Sie bei schwülem Wetter den Brenner ruhig etwas scharf einstellen.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

**Aufgabe 6:** Berechnen Sie die Mittelwert-Tropfengrößen für einen Spray mit folgender Zusammensetzung

Tropfenklasse	Anzahl der Tropfen in der Tropfenklasse	Größe der Tropfenklasse μm
1	500	10
2	200	20
3	80	30
4	40	40
5	5	50

nach der in untenstehender Tabelle definierten Formeln.

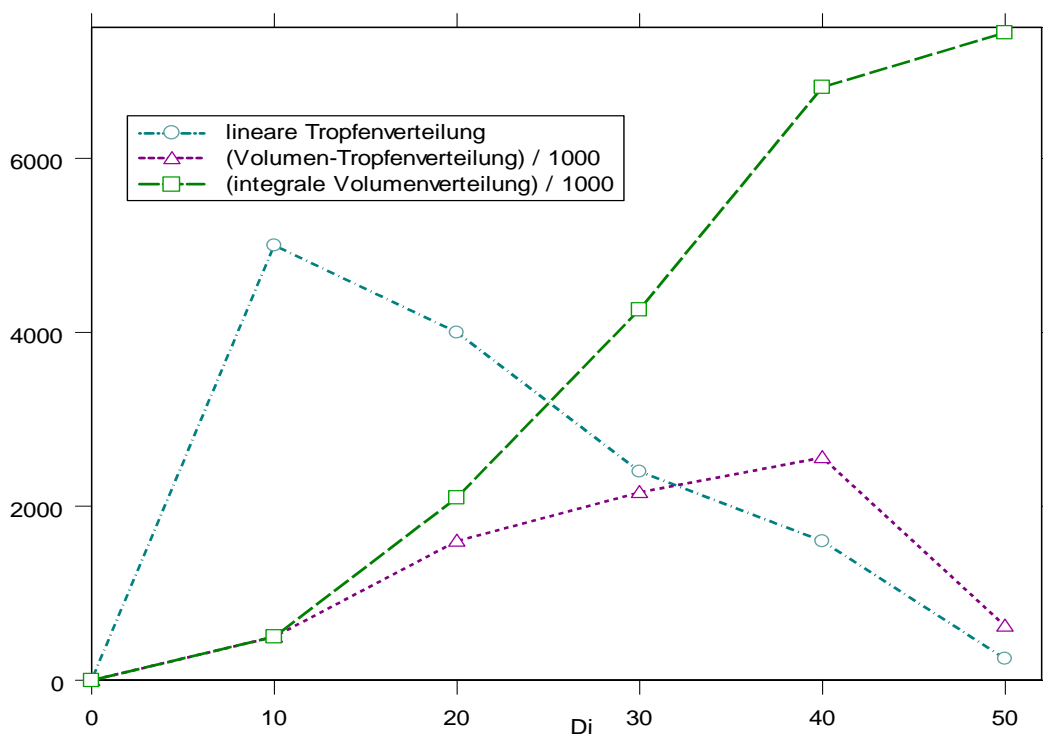
$D_{10}$	Arithmetisch gemittelt	$\frac{\sum n_i \cdot D_i}{\sum n_i}$
$D_{20}$	Flächenmittlung	$(\frac{\sum n_i \cdot D_i^2}{\sum n_i})^{1/2}$
$D_{30}$	Volumenmittlung	$(\frac{\sum n_i \cdot D_i^3}{\sum n_i})^{1/3}$
$D_{32}$ <b>SMD</b>	Sauter Durchmesser	$\frac{\sum n_i \cdot D_i^3}{\sum n_i \cdot D_i^2}$
$D_{0,1}$	10 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,1}$	
$D_{0,5}$ <b>MMD</b>	50 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,5}$	
$D_{0,9}$	90 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,9}$	
$D_{0,99}$	99 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,99}$	
$D_{0,999}$ <b>Dmax</b>	99,9 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,999}$	

Klasse	Anzahl der Tropfen	Größe				
<i>i</i>	$n_i$	$D_i$	$n_i \cdot D_i$	$\frac{\sum n_i \cdot D_i}{\sum n_i}$	$n_i \cdot D_i^2$	$(\frac{\sum n_i \cdot D_i^2}{\sum n_i})^{1/2}$
1	500	10	<b>5000</b>		50000	
2	200	20	4000		<b>80000</b>	
3	80	30	2400		72000	
4	40	40	1600		64000	
5	5	50	250		12500	
$\Sigma$	825		13250	16,1	278500	18,4

<i>i</i>	$n_i D_i^3$	$\sum_i n_i D_i^3$	$(\frac{\sum n_i \cdot D_i^3}{\sum n_i})^{1/3}$	<b>SMD</b> ( $D_{32}$ )		*	*	Lineare Interpolation
1	500000	500000			10% vol =	744500	10 < $D_{0,1}$ < 20	≈ 11,5
2	1600000	2100000			50% vol =	3722500	20 < $D_{0,5}$ < 30	≈ 27,5
3	2160000	4260000			90% vol =	6700500	30 < $D_{0,9}$ < 40	≈ 39,5
4	<b>2560000</b>	6820000			99% vol =	7370550	40 < $D_{0,99}$ < 50	≈ 48,7
5	625000	7445000			99,9% v. =	7437555	40 < $D_{0,999}$ < 50	≈ 48,9
$\Sigma$	<b>7445000</b>	= 100 %	20,8	27,7				

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

Di	Ni	Ni*Di Lineare Verteilung	Ni*Di <sup>3</sup> /1000 Kubische Verteilung	Σ Ni*Di <sup>3</sup> /1000 Integral
0	0	0	0	0
10	500	5000	500	500
20	200	4000	1600	2100
30	80	2400	2160	4260
40	40	1600	2560	6820
50	5	250	625	7445



Hilfstabelle für die lineare Interpolation

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
	<b>500000</b>	<b>2 100 000</b>	<b>4 260 000</b>	<b>6 820 000</b>	<b>7 445 000</b>
i 1	<b>660000</b>	2316000	4516000	6882500	
i 2	<b>820000</b>	2532000	4772000	6945000	
i 3	980000	2748000	5028000	7007500	
i 4	1140000	2964000	5284000	7070000	
i 5	1300000	3180000	5540000	7132500	
i 6	1460000	3396000	5796000	7195000	
i 7	1620000	<b>3612000</b>	6052000	7257500	
i 8	1780000	<b>3828000</b>	6308000	<b>7320000</b>	
i 9	1940000	4044000	<b>6564000</b>	<b>7382500</b>	
	<b>2 100 000</b>	<b>4 260 000</b>	<b>6 820 000</b>	<b>7 445 000</b>	

D10 = 16,1µm  
 D0,1 ~11,5µm  
 D0,999 ~48,9µm

D20 = 18,4µm  
 D0,5 ~27,5µm

D30 = 20,8µm  
 D0,9 ~39,5µm

D32 = 27,7µm  
 D0,99 ~48,7µm

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**Aufgabe 7:** Ein Heizölspray weist folgende gemittelte Tropfengrößenverteilung auf:

$$D_{0,1} = 10 \mu\text{m}, \quad D_{0,5} = 20 \mu\text{m}, \quad D_{0,9} = 40 \mu\text{m}, \quad D_{0,99} = 80 \mu\text{m},$$

$D_{0,999} = 100 \mu\text{m}$ . Die Verdampfungskonstante im Flammrohr eines Blaubrenners beträgt

$$K = 1,3 \text{ s/mm}^2.$$

**a)** Wie hoch ist die Verdampfungszeit der angegebenen Tropfengrößen in dem Heizölbrenner? **b)** Wie groß sind die Tropfen nach 5 ms Verweilzeit?

**c)** Wie hoch ist die CO-Konzentration im Abgas, wenn die Tropfen der Tropfenklasse  $D_{0,999}$  die Flammenzone nach 5 ms Verweilzeit verlassen und unter ungünstigen Bedingungen lediglich zur CO oxidiert werden? Die Luftzahl der Verbrennung ist  $\lambda = 1,1$  und der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas beträgt 15 %

**d)** Wie hoch ist die CO-Konzentration, wenn alle Tropfen, die größer sind als  $D_{0,99}$  die Tropfengröße von  $D_{0,999}$  aufweisen?

**7a** Die Verdampfungszeit der Mittelwertgrößen  $D_{0,1}$  bis  $D_{0,999}$  beträgt nach Gl(7):

$$d^2 = D^2 - K \cdot t \quad \text{mit } d = 0, \quad \rightarrow \quad 0 = D^2 - K \cdot t \quad \rightarrow \quad t = D^2 / K$$

	D [mm]	D <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	t = D <sup>2</sup> /1,3 [s]	t [ms]
D <sub>0,1</sub>	0,01	0,0001	7,69231E-05	0,08
D <sub>0,5</sub>	0,02	0,0004	0,000307692	0,31
D <sub>0,9</sub>	0,04	0,0016	0,001230769	1,23
D <sub>0,99</sub>	0,08	0,0064	0,004923077	4,92
D <sub>0,999</sub>	0,1	0,01	0,007692308	7,69

Nach 0,08 ms sind 10 %,

nach 0,31 ms sind 50 %,

nach 1,23 ms sind 90 %,

nach 4,92 ms sind 99 % des Heizöls verdampft.

**7b** Der Durchmesser der  $D_{0,999}$ -Tropfenklasse beträgt nach 5 ms:

$$d^2 = D^2 - K \cdot t = 0,1^2 - 1,3 \cdot 0,005$$

$$d = \sqrt{0,1^2 - 1,3 \cdot 0,005} = 0,05916 \text{ mm} = 59,16 \mu\text{m} \quad \sim 60 \mu\text{m}.$$

**7c** Nach 5 ms beträgt der augenblickliche Durchmesser der  $D_{0,999}$ -Tropfenklasse 60 % des Anfangswertes, die Oberfläche dieser Tropfenklasse weist  $0,6^2 \sim 36$  % des Anfangswertes auf, und das nicht verdampfte Tropfenvolumen beträgt  $0,6^3 \sim 22$  % des Anfangswertes.

D.h. definitiv nicht verdampft ist:  $0,22 \cdot 0,1\% \rightarrow 0,00022$ .

Bei  $\lambda = 1,1$  ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas 15 %

$$100 \% = 1\,000\,000 \text{ ppm}$$

$$15 \% = 150\,000 \text{ ppm}$$

$$0,00022 \cdot 150000 \text{ ppm} = 33 \text{ ppm CO}$$

**7d**

$$0,0022 \cdot 150000 \text{ ppm} = 330 \text{ ppm CO im Abgas.}$$

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**Aufgabe 8:** Warum sind die Mittelwert-Tropfengrößen  $D_{0,1}$  für die Zündstabilität,  $D_{0,99}$  für das Flammenvolumen und  $D_{0,999}$  für die schadstoffarme Verbrennung ausschlaggebend?

Nach dem D<sup>2</sup>-Gesetz verdampfen die kleinen Tropfen extrem schnell und verbessern die Zündstabilität. Der Tropfendurchmesser  $D_{0,1}$  beschreibt diesen Sprayanteil.

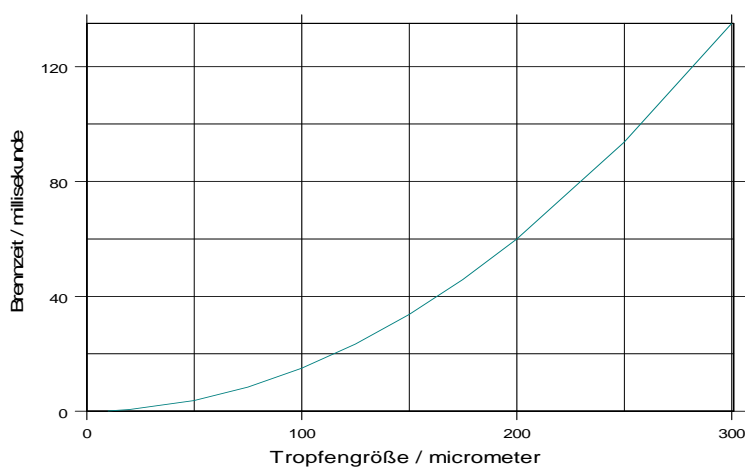
Wenn 99 % der Tropfen verbrannt sind, ist die Verbrennung weitgehend abgeschlossen. Dieser Sprayanteil,  $D_{0,99}$ , bestimmt das Flammenvolumen.

Wenn die Tropfen  $D_{0,999}$  so groß sind, dass sie nicht mehr vollständig verbrennen können, verbrennt 0,1% des Brennstoffes unvollständig. Wenn 0,1% des Kohlendioxids im Abgas nur zu Kohlenmonoxid verbrennen, ist die CO-Konzentration im Abgas einer Heizölfeuerung mit 14 % CO<sub>2</sub>-Gehalt:

1% von 14% CO<sub>2</sub> = 0,14 CO<sub>2</sub> entspricht 0,14 % CO.

Da 100 % = 10<sup>6</sup> ppm, 1 % = 10<sup>4</sup> ppm, sind 0,14 % = 1400 ppm. Diese CO-Konzentration ist 100fach größer als die für Kleinfeuerungen tolerablen Werte.

**Aufgabe 9:** Der Feuerraum eines Niedertemperaturkessels mit kaltem Feuerraum für 44 kW Brennerleistung weist eine Länge von 500 mm auf. Die Geschwindigkeit der Ölspray-Luft-Mischung beträgt 25 m/s. Welche Hohlkegel-Brennerdüsen bei welchem Förderdruck sind für den Heizölbrenner geeignet? (siehe Tabelle 5 und Abbildung 22)



Tropfengröße – Brennzeit – Diagramm in einem Niedertemperaturkessel

Düse GPH	Förderdruck 7 bar Untere Grenze nach Empfehlung von Düsenherstellern			Förderdruck 10 bar Untere Grenze nach Empfehlung von Brennerherstellern			Förderdruck 15 bar Optimaler Druck für gute Zerstäubung bei Kleinbrennern		
	Massenstrom kg/h	Brennerleistung kW	Dmax Mm	Massenstrom Kg/h	Leistung KW	Dmax Mm	Massenstrom Kg/h	Leistung KW	Dmax Mm
0,4	1,25	14,8	0,09	1,46	17,3	0,085	1,79	21,2	0,082
0,5	1,6	19	0,10	1,87	22,2	0,95	2,29	27,1	0,09
0,6	2	23,7	0,11	2,37	28,1	0,10	2,90	34,4	0,95
0,75	2,5	29,6	0,12	2,94	34,8	0,11	3,60	42,7	0,105
0,85	2,8	33,2	0,13	3,31	39,2	0,12	4,05	48,0	0,115
1	3,2	37,9	0,14	3,72	44,1	0,13	4,56	54,0	0,125
1,25	4	47,4	0,16	4,71	55,8	0,15	5,77	68,4	0,14
1,5	5	59,3	0,17	5,84	69,2	0,16	7,15	84,7	0,155
1,75	5,6	66,4	0,19	6,55	77,6	0,18	8,02	95,0	0,17

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

Bei Geschwindigkeit von 25 m/s und Feuerraumlänge von 500 mm beträgt die höchstmögliche Tropfen-Verweilzeit

$$t = L / u = 0,5 \text{ (m)} / 25 \text{ (m/s)} = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms.}$$

Nach obigem Diagramm ist einer Brennzeit von 20 ms in einem kalten Brennraum die maximale Tropfengröße von 120  $\mu\text{m}$  zugeordnet.

Nach obiger Tabelle sind für eine Brennerleistung  $\geq 44 \text{ kW}$  die Düsen

1,25 GPH bei 7 bar (47,4 kW) mit  $D_{\text{max}} = 160 \mu\text{m}$ , oder  
1 GPH bei 10 bar (44,1 kW) mit  $D_{\text{max}} = 140 \mu\text{m}$ , oder  
0,85 GPH bei 15 bar (48 kW) mit  $D_{\text{max}} = 120 \mu\text{m}$  geeignet.

Nur die letztere dieser drei Düsen erfüllt das Kriterium mit  $D_{\text{max}} = 120 \mu\text{m}$

Es wird also die Düse 0,85 GPH bei 15 bar Förderdrucks benötigt.

**Aufgabe 10a:** Welche Düsen nach Tabelle 5 sind geeignet für eine Brennerleistung von 24 kW bei einem maximalen Tropfendurchmesser mit 90  $\mu\text{m}$ , wenn der Förderdruck im Bereich  $10 < p < 20 \text{ bar}$  variiert wird. (Gln (4) und (6)).

**10 b:** Was ist wirklichkeitsfremd in der Aufgabe 10a?

**10 c:** Welche Düse würden Sie nehmen, wenn ein neuer 24 kW-Ölbrenner bei einer Heizungssanierung an einen alten 35-kW-Kessel angebaut wird, und warum gerade diese Düse?

**10 d:** Welche Düse würden Sie nehmen, wenn der 24-kW-Brenner an einen neuen 23-kW-Kessel angebaut wird, und warum gerade diese Düse?

**10a :** Ausgehend von der Tabelle zur vorigen Aufgabe, 0,4 GPH, 15 bar, 21,2 kW, 82 $\mu\text{m}$

$$24 = 21,2 \cdot (p_2 / 15)^{0,5} \quad (\text{Gl. (6)})$$

$$24^2 = 21,2^2 \cdot (p_2 / 15)$$

$$p_2 = 15 \cdot 24^2 / 21,2^2 = \underline{19,2 \text{ bar}} \text{ für } 24 \text{ kW}$$

$$D_{\text{max}} = 82 \cdot (15 / 19,2)^{0,15} = \underline{79 \mu\text{m}} \quad (\text{Gl. (4)})$$

Ausgehend von der Tabelle zur vorigen Aufgabe, 0,5 GPH, 10 bar, 22,2 kW, 95 $\mu\text{m}$

$$24 = 22,2 \cdot (p_2 / 10)^{0,5}$$

$$24^2 = 22,2^2 \cdot (p_2 / 10)$$

$$p_2 = 10 \cdot 24^2 / 22,2^2 = \underline{11,7 \text{ bar}} \text{ für } 24 \text{ kW}$$

$$D_{\text{max}} = 95 \cdot (10 / 11,7)^{0,15} = \underline{92,8 \mu\text{m}}$$

**10b:** Die maximale Tropfengröße kann man bei der Einstellung eines Brenners nicht messen, da hierzu keine Feldmessgeräte existieren. Man kann allerdings kontrollieren, ob die größten Tropfen gut verbrennen oder nicht: Papiertest!! (Eine große Papierseite schnell durch die Flamme ziehen. Große unverbrannte Öltropfen hinterlassen einen Ölfleck. Papiertest beim Brennerschluss zeigt an, ob die Düse nach Brennerschluss in den Feuerraum „pinkelt“.)

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**10c:** Ein alter 35-kW-Kessel hat einen deutlich größeren Feuerraum als das Flammenvolumen eines neuen 24-kW-Brenners ist. Die Anforderung an den Brenner ist daher nicht besonders groß. Nach der Tabelle kommen folgende Düsen in Frage:

- |    |         |               |                           |
|----|---------|---------------|---------------------------|
| 1) | 0,6 GPH | ca. 7,1 bar,  | Dmax: 109,8 $\mu\text{m}$ |
| 2) | 0,5 GPH | ca. 11,7 bar, | Dmax: 92,8 $\mu\text{m}$  |
| 3) | 0,4 GPH | ca. 19,2 bar, | Dmax: 79 $\mu\text{m}$    |

Bei der 0,6 GPH-Düse ist der Förderdruck ca. 7,1 bar, dies ist die untere Grenze der Düsenhersteller-Empfehlung. Eher nicht!

Die 0,4 GPH-Düse hat zu kleine Kanal- und Bohrungsabmessungen und ist daher verstopfungsgefährdet. Nach Tabelle 1 würde es gerade zum Gelbbrenner reichen. Eher nicht!

Von den obigen drei Düsen ist die 0,5 GPH-Düse für einen Gelbbrenner zu bevorzugen.

Zum Blaubrenner kann eine 0,45 GPH-Düse in Erwägung gezogen werden.

**10d:** Ein neuer 23-kW-Kessel hat meist einen sehr kleinen Feuerraum (insbesondere Gusskessel) und meist auch einen hohen Abgaswiderstand (auch hier sind Gusskessel eher problematisch). Die Anforderungen an den Brenner und an die Düse sind sehr hoch.

Keinesfalls die 0,6 GPH-Düse!

Die 0,5 GPH-Düse kann eventuell schlechte Abgaswerte (hoher CO-Gehalt) aufweisen. Beim Kaltstart kann es zum Pulsieren kommen. Wenn beide Probleme nicht vorkommen, ist die 0,5 GPH-Düse eine gute Wahl.

Die 0,4 GPH-Düse ergibt mit Sicherheit bessere Abgaswerte und verringert möglicherweise die Kaltstartprobleme. Demgegenüber stehen ein höherer Stromverbrauch und eine erhöhte Verstopfungsgefahr, d.h. ein höherer Wartungsaufwand. Nur dann die 0,4 GPH-Düse ausprobieren, wenn die Abgaswerte bei der 0,5 GPH-Düse schlecht sind.

Eine 0,45 GPH-Düse kann ebenfalls in Erwägung gezogen werden.

**Aufgabe 11:** Warum altert das Heizöl im Zweistrangsystem schneller als im Einstrangsystem, und wie kann man dem Altern entgegenwirken?

Das Öl erwärmt sich in der Ölpumpe. Der hohe Rücklaufmassenstrom in der Rücklaufleitung wirbelt den ganzen Tankinhalt um. Das Erwärmen und das Umwirbeln des Heizöls bewirkt das schnelle Altern. Eine gute Gegenmaßnahme ist, erst dann zu tanken, wenn das Heizöl weitestgehend verbraucht ist: Dann steht nur wenig altes Heizöl zur Verfügung, das den neuen Tankinhalt altert. Die beste Gegenmaßnahme ist: Umstellung auf das Einstrangsystem.

**Aufgabe 12:** Warum sinkt die Brennerleistung bei langen Brennerlaufzeiten im Einstrangsystem, und wie kann man diesem Effekt entgegenwirken?

Die in der Ölpumpe erzeugte Wärme bleibt im Einstrangfilter, wodurch sich das Öl im Filter erwärmt. Die Öltemperatur kann einen höheren Wert erreichen als die Solltemperatur des Ölvorwärmers. Je länger die Brennerlaufzeit ist, umso höher steigt die Öltemperatur. Dies ist verbunden mit einer Senkung der Viskosität (Abbildung 33) und des Durchflussbeiwerts der Düse (Abbildung 12 und 32). Dies verursacht den Leistungsabfall. Gegenmaßnahme ist, einen Ölvorwärmer zu betreiben, der sich bei einer Erhöhung der Öltemperatur abschaltet.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**Aufgabe 13:** Der Heizölverbrauch für drei Einfamilienhäuser beträgt 1900 Liter pro Jahr und Haus. Die Öltankkapazität beträgt jeweils 6000 Liter. Alle drei Anlagen gehen im Jahr 2000 in Betrieb, indem zuerst die Öltanks mit Heizöl gefüllt werden. Im Haus 1 wird der Öltank einmal jährlich nachgefüllt. Im Haus 2 wird alle zwei Jahre voll getankt. Beim Haus 3 wird der Tank alle drei Jahre einmal nachgefüllt. Wie alt ist das Öl in den drei Anlagen im Jahre 2012 vor und nach dem Vulltanken? Für das Alter bei Ölmischungen kann ein linearer Ansatz angenommen werden: Z.B. 750 Liter 2 Jahre altes Öl gemischt mit 250 Liter Öl-Neulieferung (0 Jahre alt) ergibt 1000 Liter 1,5 Jahre altes Öl:  $(750 \cdot 2 + 250 \cdot 0) / 1000 = 1,5$

Jahr	Haus1 vor dem Tanken		Haus2 vor dem Tanken		Haus3 vor dem Tanken	
	vor	nach	vor	nach	vor	nach
0		0,0000		0,0000		0,0000
1	1,0000	0,6833				
2	1,6833	1,1503	2	0,733		
3	2,1503	1,4694			3	0,15
4	2,4694	1,6874	2,733	1,002		
5	2,6874	1,8364				
6	2,8364	1,9382	3,002	1,101	3,15	0,1575
7	2,9382	2,0078				
8	3,0078	2,0553	3,137	1,15		
9	3,0553	2,0878			3,1575	0,1578
10	3,0878	2,1100	3,150	1,155		
11	3,1100	2,1252				
12	3,1252	2,1355	3,155	1,157	3,1578	0,1579

**Aufgabe 14:** Was sind die häufigsten Fehler bei der Einstellung der Zündelektrode bei Ölbrennern?

Zu geringer oder zu hoher Zündelektrodenabstand und schlechte Positionierung.

Die Herstellerangaben sind nur ein Hinweis, sie sind keine Garantie für optimale Einstellung! Bei zu geringem Abstand ist der Zündfunke zu klein. Bei zu hohem Zündelektrodenabstand kann der Zündfunke auf den Düsenkörper überspringen: Ein Effekt, den man bei oberflächlicher Kontrolle gar nicht merkt. (Man sieht nur, dass der Zündfunken vorhanden ist, aber nicht, dass er sich an falscher Stelle befindet.)

Beim Düsenwechseln ist oft ein Nachstellen der Zündelektrode notwendig.

Die Zündelektrode darf nicht so nah an der Düse sein, dass an der Stelle des Zündfunkens die Zerstäubung nicht abgeschlossen ist: Bei niedrigem Öldruck muss der Zündfunken von der Düse weiter entfernt sein. Die Zündelektrode darf nicht in den Spray hineinragen, sondern muss gerade am Sprayrand liegen.

**Aufgabe 15:** Warum muss beim Austauschen einer Brennerkomponente meist auch das Steuergerät ausgetauscht werden?

Der Feuerungsautomat (Steuergerät) macht einige brennerkomponentenabhängige Abfragen (z.B. Öltemperatur erreicht?, Zündung an?, etc.). Wenn das Steuergerät das Antwortsignal einer Brennerkomponente „nicht versteht“, geht der Brenner auf Störung. Gelegentlich brennt auch das Steuergerät (und die Sicherung) durch. Beim Austausch eines kaputten Düsenstockvorwärmers muss man gelegentlich die Marke des Vorwärmers wechseln, da der alte Typ nicht mehr vertrieben wird: Dies kann mit sich bringen, dass auch das Steuergerät ausgetauscht werden muss.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[www.farago.info](http://www.farago.info)

**Aufgabe 16:** Warum verbessert sich die Zerstäubungsqualität und warum reduzieren sich die viskositätsbedingten Durchsatzschwankungen durch die Ölvorwärmung?

**Lösung:** Nach Abbildungen 12 und 32 nimmt der Durchflussbeiwert mit einer Abnahme der Viskosität (d.h. mit der Erhöhung der Öltemperatur) ab, dies führt zu einer Verbesserung der Zerstäubung. Oberhalb einer Reynoldszahl (bzw. unterhalb einer Viskosität) wird der Durchflussbeiwert annähernd reynoldszahlunabhängig. In diesem Bereich zeigt die Düse keine viskositätsabhängigen Durchsatzschwankungen.

**Aufgabe 17:** Warum kann man die Brennerstart-Schadstoffbildung durch das Austauschen eines alten Ölvorwärmers durch ein neues Modell reduzieren?

**Lösung:** Alte Ölvorwärmer weisen ein relativ großes Ölvolume auf. Dies bringt zwei Nachteile mit sich: 1) Nach dem Brennerschluss erhöht sich vorübergehend die Düsenstocktemperatur, dies führt durch die Wärmeausdehnung des eingeschlossenen Heizöls zum Nachtropfen. Das herausgelaufene Öl macht sich beim nächsten Brennerstart als Start-Schadstoffemission bemerkbar. 2) In einem großvolumigen Ölvorwärmer kann sich eine große Luftblase bilden. Dies führt nach Brennerschluss zu einer Verlängerung des Zeitbereiches der ungünstigen Zerstäubung nach Abbildungen 13 bis 15. Die in dieser Zeit ausfließende Ölmenge macht sich ebenfalls als Startemission bemerkbar.

**Aufgabe 18:** Warum ist beim Brennerstart einer Ölheizung die Schadstoffbelastung besonders hoch?

Jedem Brennerstart geht ein Brennerschluss voran. Beim Brennerschluss entsteht kurzzeitig eine äußerst schlechte Zerstäubung (Abbildungen 13 - 15). In dieser Zeit gelangen unverbrannte Öltropfen in das Flammrohr und in den Feuerraum. Beim nächsten Brennerstart verdampft und verbrennt diese Ölmenge mit einer schlechten Verbrennungsqualität, denn die Verbrennung findet in kalten Flammenbereichen statt. Die unerwünschten Effekte beim Brennerschluss machen sich beim nächsten Brennerstart als Startemission bemerkbar.

**Aufgabe 19:** Warum kann sich die Lambda-Sonde für kleinere Öl- und Gasfeuerungen nicht durchsetzen?

Wenn die Sauerstoffkonzentration an der Innen- und Außenseite einen Unterschied aufweist, zeigt die Lambdasonde eine Spannung auf, die vom Konzentrationsunterschied und der Temperatur beeinflusst wird. Kleinere Öl- und gasbeheizte Kessel (unter 100 kW) schalten am Tag 100 bis 200 Mal ein und aus: Ehe die Lambdasonde ihr thermisches Gleichgewicht erreichen könnte, schaltet die Heizungsanlage bereits aus. Für den Taktbetrieb der Kleinfeuerungen ist die Lambdasonde noch nicht ausgereift.

**Aufgabe 20:** Warum eignet sich besser ein Abbrandkessel zur Leistungsregelung als die Durchbrandfeuerung?

Bei der Durchbrandfeuerung erhöht sich die Verbrennungsleistung durch zwei Maßnahmen: 1) beim Nachfüllen vom Brennstoff und 2) durch Vergrößern der Primärluftzufuhr. Bei dem Abbrandkessel ist die Wärmefreisetzung unabhängig von dem Füllzustand des Brennstoff-Vorratsraums und wird lediglich durch die Primärluftzufuhr beeinflusst. Dies ermöglicht eine einfache Leistungsregelung. Durch die Primärluftregelung wird die Leistung und durch die Sekundärluftregelung die Luftzahl (d.h. die Verbrennungsqualität) eingestellt.