

## Allgemeine Betrachtungen

Homogene und heterogene Verbrennung

Fette und magere Verbrennung

Wie hoch muss mindestens der Luftüberschuss sein?

Brennstoff-Partikelgröße und Verbrennungsqualität

## Heizölfeuerungen

Sprayverbrennung, Gelbbrenner

Heizölverbrennung mit Blaubrenner

Spraycharakterisierung

Brennstoffzerstäubung

Zerstäubung von Heizöl EL mit Druckdralldüse

Tropfenverdampfung,  $D^2$ -Gesetz

Ölbrenner

## Feststofffeuerungen

Brennstoffaufbereitung bei Feststoffverbrennung

Klassifizierung der Feststofffeuerungen

# Allgemeine Betrachtungen

## Homogene und heterogene Verbrennung

Die Verbrennung ist „homogen“ (gleichartig, einheitlich, gleichförmig), wenn Brennstoff und Oxidator (meist Verbrennungsluft) vor der Verbrennung den gleichen, nämlich gasförmigen, Aggregatzustand aufweisen. Die im Manuskript „**Brennstoffverbrennung**“ gezeigten Beispiele präsentieren die homogene Verbrennung. Die Gasverbrennung ist immer homogen.

Die Verbrennung ist „heterogen“ (andersartig, uneinheitlich, ungleichmäßig), wenn ein fester Brennstoff, z.B. Koks, mit (gasförmiger) Luft reagiert: In diesem Fall diffundiert der Sauerstoff in den Feststoff hinein und das gasförmige Verbrennungsprodukt, Kohlendioxid, diffundiert in die entgegengesetzte Richtung, nämlich in die Luft hinein. Während die Gasverbrennung immer homogen ist, ist die Feststoffverbrennung **nicht** immer heterogen. Der Feststoff, z.B. Holz oder Kohle, kann nämlich bei der Verbrennung gänzlich oder teilweise vergast bzw. entgast werden: Der ent- oder vergaste Brennstoff verbrennt dann homogen.

Auch flüssige Brennstoffe verbrennen homogen: Der Flüssigbrennstoff wird zuerst verdampft, der gasförmige Brennstoffdampf verbrennt homogen mit der Verbrennungsluft.

Gemeinsam ist bei der Flüssigbrennstoff- und Festbrennstoffverbrennung, dass der Verbrennung eine Aufbereitungsphase vorgeschaltet wird. Die Aufbereitungsphase ist die Gasifizierung des Brennstoffes, d.h. die Verdampfung, Vergasung oder Entgasung, und die Vermischung des gasifizierten Brennstoffes mit der Verbrennungsluft. Während die Verbrennung ein chemischer Vorgang ist, ist die Brennstoffaufbereitung eine physikalische Angelegenheit.

Dabei ist die zur Aufbereitung benötigte Zeit meist um ein Vielfaches länger als die Verbrennungszeit. Der Verbrennungsvorgang wird demzufolge in erster Linie durch die Aufbereitungszeit beeinflusst. Die Aufbereitungszeit kann durch die Verkleinerung der Brennstoff-Partikelgröße deutlich verkürzt werden.

## Fette und magere Verbrennung

Die Verbrennung im Luftmangelbereich verläuft auf anderen Reaktionswegen als die im Luftüberschuss.

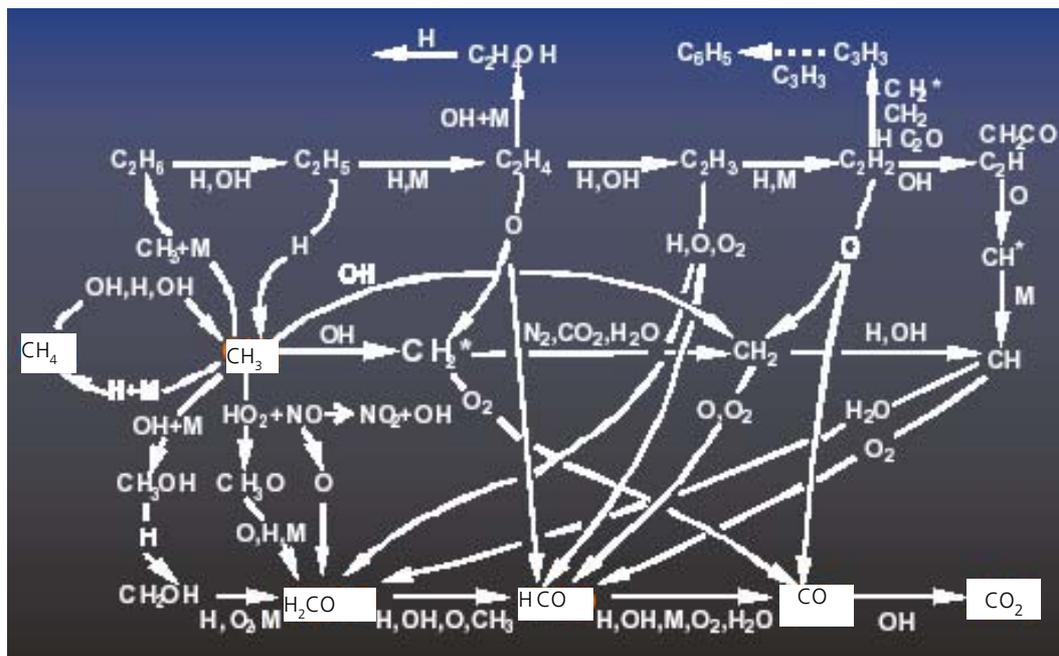
Die Radikale  $\text{CH}_3$  und  $\text{CH}_2$  können in sauerstoffreicher Atmosphäre zu  $\text{H}_2\text{CO}$  (Formaldehyd) oxidiert werden. Durch weite Oxidationsschritte entsteht aus Formaldehyd Kohlenmonoxid und schließlich Kohlendioxid. Aus  $\text{H}_2\text{CO}$  kann kein Ruß entstehen, das Abgas kann aber, wenn die Verweilzeit oder Reaktionstemperatur zu niedrig ist, Formaldehyd als Schadstoff enthalten.

Dieselben Radikale,  $\text{CH}_3$  und  $\text{CH}_2$ , können in sauerstoffarmer Atmosphäre zu  $\text{C}_2\text{H}_2$  (Azetylen) reduziert werden. Aus Azetylen kann wiederum durch Polymerisation Ruß entstehen.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die Vielfalt der möglichen Reaktionspfade der fetten und der mageren Verbrennung.

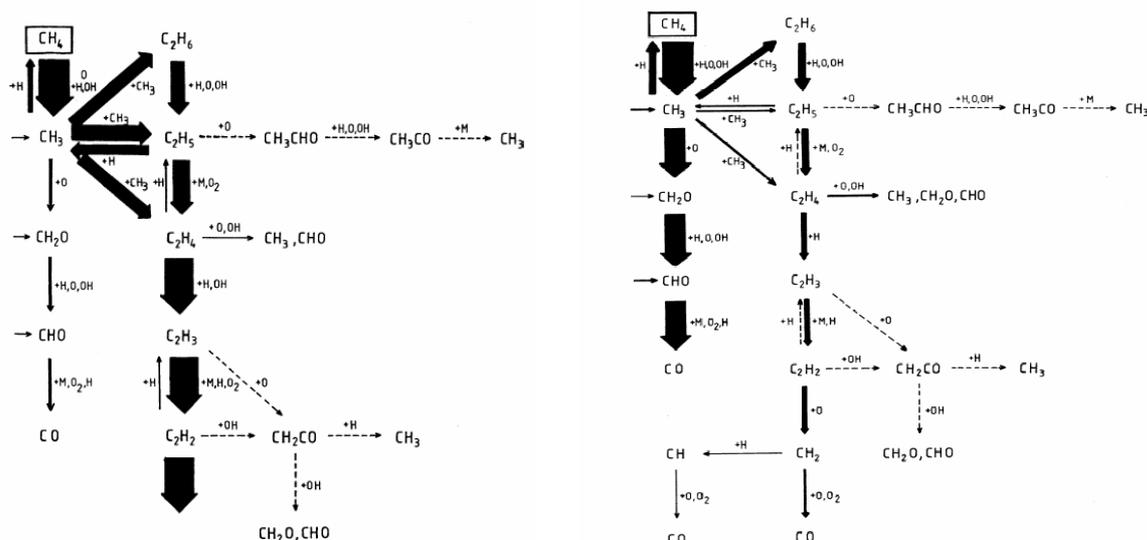
## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)



**Abbildung 1:** Mögliche Reaktionspfaden der Methanverbrennung; *Quelle: J. Warnatz (Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 87, 1008 (1983)).*

Abbildung 1 zeigt die Elementarschritte der Methanverbrennung. Die Reaktionsschritte von links nach rechts sind Oxidationsschritte durch Wasserstoffabgabe, von oben nach unten Oxidationsschritte durch Sauerstoffzunahme und durch Aufspaltung großer Kohlenwasserstoffmoleküle in kleine Bruchstücke. In der fetten Verbrennung verlaufen die Reaktionsschritte nach den oberen Zeilen, im Magerbereich nach den unteren Zeilen. Der zweite Knotenpunkt in der unteren Zeile ist Formaldehyd  $\text{H}_2\text{CO}$ , der vorletzte Knotenpunkt in der oberen Zeile Azetylen  $\text{C}_2\text{H}_2$ .



**Abbildung 2:** Methanverbrennung im fetten (links) und mageren Bereich (rechts). *Quelle: J. Warnatz (Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 87, 1008 (1983)).*

In Abbildung 2 werden die gleichen Reaktionen wie in Abb. 1 gezeigt. Die Dicke der Pfeile zeigt die Reaktionsraten: Dicke Pfeilen deuten die wichtigen Reaktionspfaden an. Im fetten Bereich

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

(linkes Bild) entsteht eine hohe  $C_2H_2$ -Konzentration, was eine erhöhte Neigung zur Russbildung zur Folge hat. Im mageren Bereich zeigt das rechte Bild, dass die  $H_2CO$ -Konzentration ansteigt, was die Neigung zur Russbildung zwar erheblich reduziert, aber die Neigung zur Aldehydbildung begünstigt.

### Wie hoch muss mindestens der Luftüberschuss sein?

- a) Der Luftüberschuss muss die Inhomogenität der Mischungsbildung kompensieren. Je besser Brennstoffaufbereitung und Mischungsbildung sind, umso niedriger liegt der Luftbedarf, diese Schwankungen zu kompensieren  
 Notwendige Luftüberschüsse zur Kompensierung der Inhomogenität der Mischungsbildung:  
 guter Blaubrenner 5 %  
 guter Gelbbrenner 10 %  
 weniger guter Brenner 15 %
- b) Der Luftüberschuss muss die atmosphärischen Luftdruckschwankungen überkompensieren:  
 $100 (\rho_{\text{barometrischer Hochdruck}} - \rho_{\text{barometrischer Niederdruck}}) / \rho_{\text{barometrischer Hochdruck}} > 6 \%$
- c) Der Luftüberschuss muss die Schwankungen der Luftfeuchtigkeit überkompensieren. Die Feuchtigkeit extrem trockener Verbrennungsluft beträgt ca. 0,1 % Wasserdampfkonzentration, während extrem feuchte Verbrennungsluft ca. 3,5 % Wasserdampf enthält.
- d) Der Luftüberschuss muss die Schwankungen der Brennstoffzufuhr überkompensieren:  
 Bei Ölbrennerdüsen bei häufiger Wartung (mindestens 1x im Jahr) 5 %  
 Bei Ölbrennerdüsen bei weniger häufiger Wartung 10 %  
 Bei Gasgebläsebrennern wegen Schwankungen im Versorgungsdruck 10%  
 Bei atmosphärischen Gasbrennern wegen der Auswirkung der Schwankungen im Versorgungsdruck auf die Luftansaugung weitere 5 - 10%
- e) Wenn der Wind große Wirkung auf den Schornsteinzug ausübt:  
 Bei atmosphärischen Gasbrennern (ev. Deflektor einbauen) 20 %  
 Bei Gebläsebrennern (ev. Zugbegrenzer einbauen) 5 %

#### $\Sigma$ a bis e

Bei Großanlagen, bei häufig gewarteten Anlagen, bei Neuanlagen weniger Luftüberschuss. Bei sehr guten Blaubrennern gelten 15 %, bei sehr guten Gelbbrennern 20 % als Minimum für den Haushaltsbereich. Im Megawatt – Bereich können bei gut gewarteten Anlagen diese Werte unterschritten werden.

Durchschnittlicher Luftüberschuss von Hausheizungen und Industriefeuerungen im Allgemeinen ist:

Gasgebläsebrenner (Haushalt)	$\lambda = 1,15$	-	1,25,
Heizöl EL Blaubrenner (Haushalt)	$\lambda = 1,15$	-	1,3,
Heizöl EL Gelbbrenner (Haushalt)	$\lambda = 1,2$	-	1,5 ,
Atmosphärische Gasbrenner (Haushalt)	$\lambda = 1,25$	-	1,5,
Feststofffeuerungen (Haushalt)	$\lambda = 1,5$	-	2,
Industriefeuerungen:			
Gas:	$\lambda = 1,05$	-	1,15,
Öl:	$\lambda = 1,1$	-	1,2,
Kohle:	$\lambda = 1,2$	-	1,3.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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*?

**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?

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

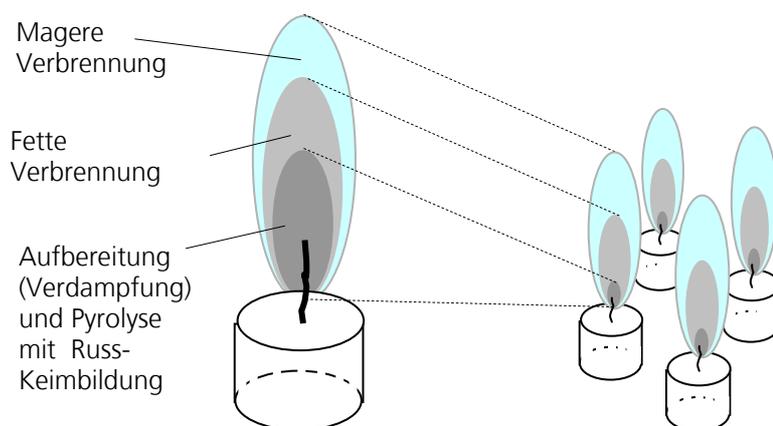
**Aufgabe 4:** Die Luftzahl der Verbrennung mit einem Gebläsebrenner beträgt bei einem Luftdruck von 1010 mbar und Temperatur von  $10^{\circ}\text{C}$  den Wert von  $\lambda = 1,2$ . Wie wird die Luftzahl sein, wenn der Luftdruck auf 975 mbar sinkt und die Temperatur auf  $22^{\circ}\text{C}$  ansteigt?

**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?

## Brennstoff-Partikelgröße und Verbrennungsqualität

Brennstoff	Partikelgröße	Typischer Luftzahlbereich
<b>Kohle</b>	Stückkohle (über 80 mm),	$\lambda > 1,6$
	Nusskohle (10 – 100 mm),	$\lambda > 1,5$
	Grießkohle (1 – 3 mm)	$\lambda > 1,4$
	Staubkohle (< 1 mm)	$\lambda > 1,2$
<b>Holz</b>	Schnittholz (Länge bis 45 cm)	$\lambda > 1,5$
	Hackschnitzel (Länge bis 35cm)	$\lambda > 1,5$
	Scheitholz (Länge bis 25 cm)	$\lambda > 1,4$
	Holzpellet (Länge bis 5 cm)	$\lambda > 1,3$
<b>Heizöl EL ~25 kW</b>	0,5 $\mu\text{m}$ bis ~140 $\mu\text{m}$	$\lambda > 1,4$
	0,5 $\mu\text{m}$ bis ~120 $\mu\text{m}$	$\lambda > 1,25$
	0,5 $\mu\text{m}$ bis ~90 $\mu\text{m}$ <b>Blaubrenner</b>	$\lambda > 1,10$
<b>Heizöl EL ~100 kW</b>	0,5 $\mu\text{m}$ bis ~180 $\mu\text{m}$	$\lambda > 1,35$
	0,5 $\mu\text{m}$ bis ~150 $\mu\text{m}$	$\lambda > 1,20$
	0,5 $\mu\text{m}$ bis ~120 $\mu\text{m}$ <b>Blaubrenner</b>	$\lambda > 1,05$

**Tabelle 1:** Brennstoff-Partikelgröße und benötigte Luftzahl der Verbrennung.



**Abbildung 3:** Einfluss der Brennstoff-Partikelgröße auf das Verhältnis der verschiedenen Bereiche der Verbrennung: Kleine Brennstoffpartikel verkürzen die Aufbereitungszeit und verbessern die Verbrennungsqualität.

In Abbildung 3 weisen die vier kleinen Kerzen die gleiche Brennstoffmasse auf als die eine große Kerze, und die vier kleinen Flammen die gleiche Verbrennungsleistung als die eine große Flamme. Die Verbrennungsgeschwindigkeit wird durch die Luft-Diffusionsgeschwindigkeit bestimmt, welche bei den kleinen wie bei der großen Flamme annähernd gleich groß ist. Demgegenüber sind bei den kleinen Kerzen die Brennstoffaufbereitungszone und Brennstoffaufbereitungszeit deutlich verkleinert bzw. verkürzt. Damit wird die Russkeimbildung in der Aufbereitungszone ebenfalls verringert. Die vier kleinen Kerzenflammen bilden trotz gleicher Verbrennungsleistung weniger Russ als die eine große Flamme.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

	Große Flamme	Kleine Flammen
Brennstoffaufbereitung (Verdampfung und Pyrolyse der Kerzenwachses)	50 %	20%
Fette Verbrennung	25%	40%
Magerverbrennung	25%	40%

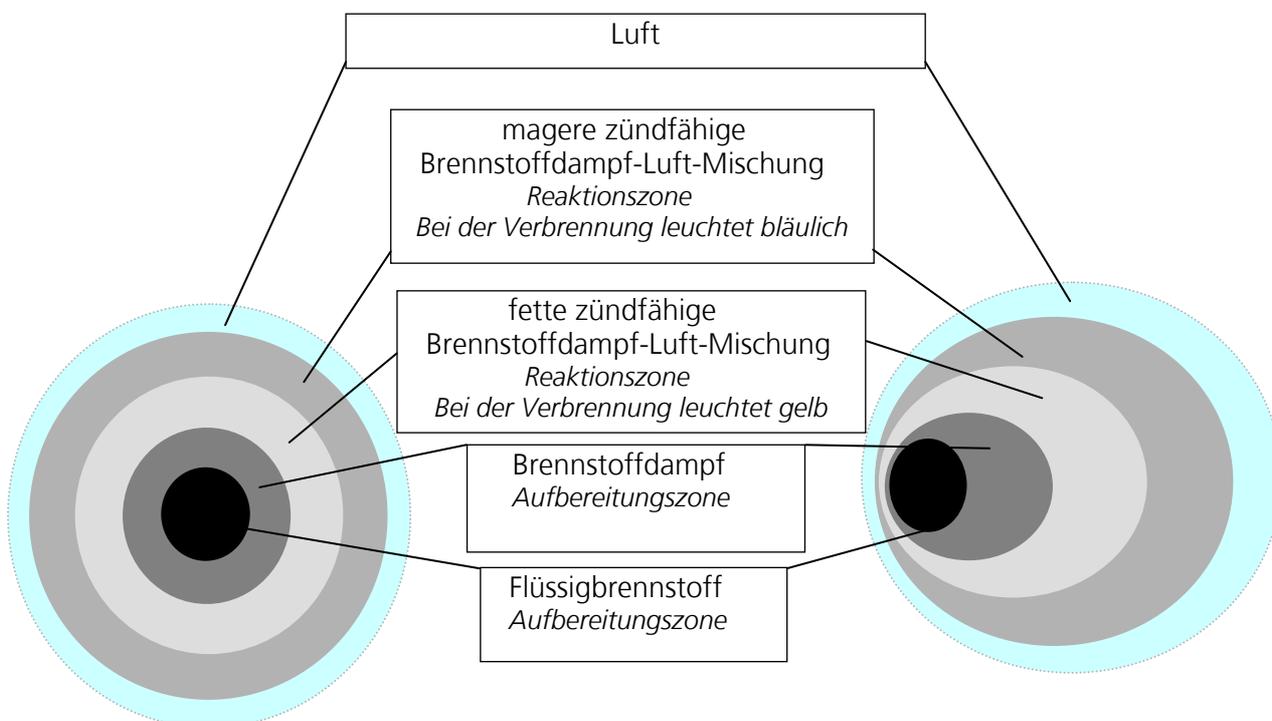
**Tabelle 2:** Das Verhältnis der verschiedenen Flammenbereiche zueinander in Abbildung 3.

Die Verkleinerung der Partikelgröße bei der Feststofffeuerung bzw. der Tropfengröße bei der Ölverbrennung ist die wichtigste Maßnahme zur Verbesserung der Verbrennungsqualität. Sie verkürzt die Verbrennungszeit und reduziert somit sowohl die Neigung zur Russbildung als auch die zur Bildung von Verbrennungsstickoxiden. Gleichzeitig ermöglicht die Verkleinerung der Brennstoff-Partikelgröße eine niedrigere Luftzahl der Verbrennung und somit einen höheren Wirkungsgrad der Feuerungsanlage.

Der Unterschied zwischen großer und kleiner Partikelgröße bei der Flüssig- und Feststoffverbrennung spielt eine ähnliche Rolle bei der Verbesserung der Verbrennungsqualität wie der Unterschied zwischen Diffusions- und Vormischflamme bei der Gasverbrennung.

## Heizölfeuerungen

### Sprayverbrennung, Gelbbrenner



**Abbildung 4:** Verschiedene Flammenbereiche bei der Sprayverbrennung

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Die Verbrennung flüssiger Brennstoffe findet immer in der Gasphase statt: Der flüssige Brennstoff wird zuerst zerstäubt, dann verdampft, mit Luft vermischt und schließlich in der Gasphase verbrannt. Daher ist die Sprayverbrennung so etwas wie die Diffusionsflamme bei der Gasverbrennung. Durch eine Trennung der Brennstoffaufbereitungszone von der Verbrennungszone kann man die Sprayverbrennung in eine vorverdampfte und vorgemischte Verbrennung überführen (Blaubrenner, siehe Manuskript **Brennstoffverbrennung** Seiten 40-41).

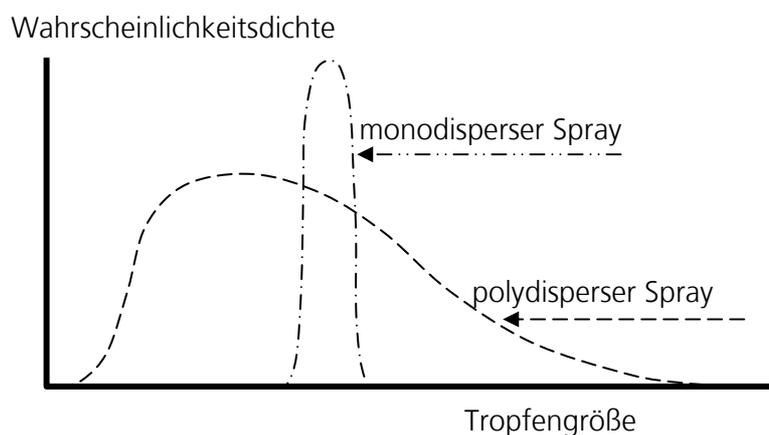
### Heizölverbrennung mit Blaubrenner

Die blaubrennenden Heizölbrenner müssen an dieser Stelle aus thematischen Gründen erwähnt werden, obgleich sie aus technologischen Gründen bereits zusammen mit den Gasbrennern behandelt wurden (siehe Manuskript „Brennstoffverbrennung“; vorverdampfte Heizölverbrennung; Blaubrenner; Abbildung 23 etc.) Der Blaubrenner funktioniert durch die räumliche Trennung der Brennstoffaufbereitung (Verdampfung und Mischung) und der Verbrennung als ein Vormisch-Gasbrenner.

### Spraycharakterisierung

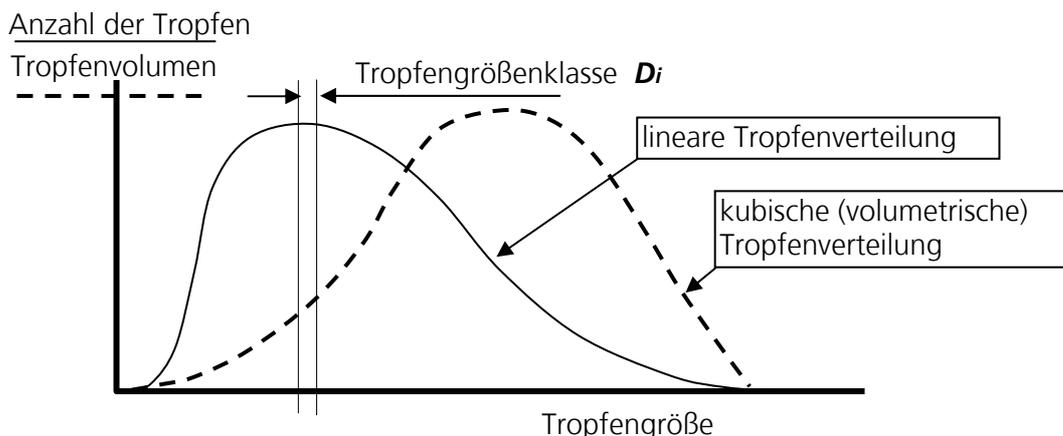
**Monodisperser Spray:** alle Tropfen haben (annähernd) den gleichen Durchmesser (ca. 90 % des Sprayvolumens besitzt einen Durchmesser von  $d \pm 25\%$ ) bzw. ein schmales Tropfengrößenspektrum (siehe Abbildung 5).

**Polydisperser Spray:** Der Spray weist ein breites Tropfengrößenspektrum auf (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Monodisperse und polydisperser Tropfenverteilung

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen



**Abbildung 6:** Lineare und kubische Tropfenverteilung

Für die Beschreibung eines Sprays werden in der Regel 35 bis 100 Tropfengrößenklassen angegeben. Die Anzahl der berücksichtigten Tropfen beträgt in der Regel mehr als 25000, wenn die berücksichtigte untere Tropfengröße  $10 \mu\text{m}$  nicht unterschreitet. Wenn kleinere Tropfen für die Spraybeschreibung berücksichtigt werden, muss die Anzahl der gemessenen Tropfen deutlich erhöht werden.

Die Tropfengröße in einem Spray wird oft mit einem mittleren Durchmesser beschrieben. Die häufigsten Mittelwerte von Tropfengrößen sind in Tabelle 3 zusammengestellt:

$D_{10}$	Arithmetisch gemittelt	$\frac{\sum_i n_i \cdot D_i}{\sum_i n_i}$
$D_{20}$	Flächenmittlung	$\left( \frac{\sum_i n_i \cdot D_i^2}{\sum_i n_i} \right)^{1/2}$
$D_{30}$	Volumenmittlung	$\left( \frac{\sum_i n_i \cdot D_i^3}{\sum_i n_i} \right)^{1/3}$
$D_{32}$ SMD Sauter-Median-Diameter	Sauter Durchmesser	$\frac{\sum_i n_i \cdot D_i^3}{\sum_i n_i \cdot D_i^2}$
$D_{0,1}$	10 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,1}$	
$D_{0,5}$ MMD Mass-Median-Diameter	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 $D_{0,99}$	
$D_{0,999}$ $D_{\max}$ maximale Tropfengröße	99,9 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,999}$	

**Tabelle 3:** Definition der wichtigsten Mittelwert-Tropfengrößen

**Aufgabe 6:** Berechnen Sie alle in der Tabelle 3 definierten Mittelwert-Tropfengrößen für einen Spray mit folgender Zusammensetzung:

Tropfenklasse	Anzahl der Tropfen In der Tropfenklasse	Größe der Tropfenklasse $\mu\text{m}$
1	500	10
2	200	20
3	80	30
4	40	40
5	5	50

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Für die Beschreibung der Verbrennungsqualität ist eine einzige Mittelwert-Tropfengröße nicht ausreichend. Die Mittelwert-Tropfengröße  $D_{0,1}$  ist wichtig für die Zündstabilität,  $D_{0,99}$  für das Flammenvolumen und  $D_{0,999}$  für die schadstoffarme Verbrennung.

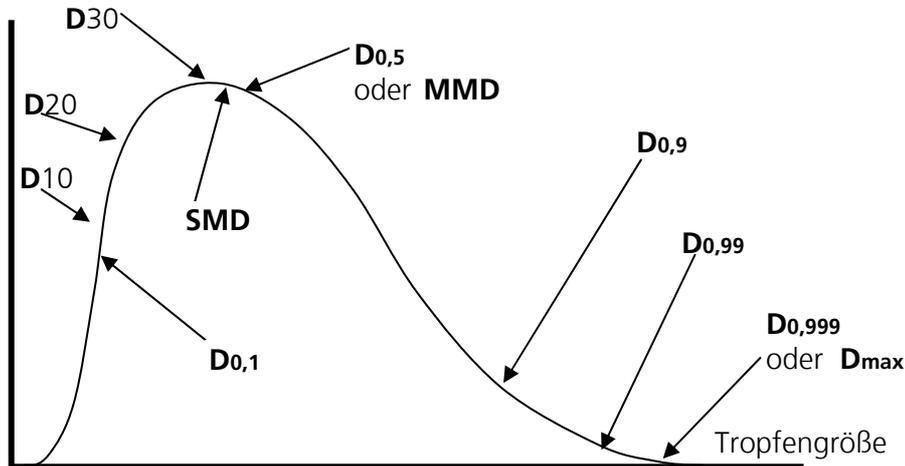


Abbildung 7: Vergleich verschiedener Mittelwert-Tropfengrößen

## Brennstoffzerstäubung

Ziel der Zerstäubung: Flüssigkeit in Tropfen umzuwandeln; die Oberfläche zu erhöhen; die Verdampfung und die Vermischung des Brennstoffdampfes mit Luft zu ermöglichen.

Die große Oberfläche bedeutet eine Instabilität, da in der Natur ein Minimum an Oberfläche angestrebt wird: Entweder verdampft ein Spray, wodurch sich die Oberfläche vermindert, oder durch Tropfenkollision oder andere Phänomene vereinigen sich viele kleine Tropfen zu wenigen großen, wodurch sich die Oberfläche ebenfalls verkleinert.

**Mechanische Zerstäubung:** Die zur Oberflächenzunahme benötigte Energie wird in Form von

- mechanischer Energie der Flüssigkeit (Dralldüse, Einspritzdüse) oder
- mechanischer Energie des Zerstäubersystems (Drehzerstäuber) zugeführt.

Das Spray weist ein schmales Tropfengrößenspektrum auf. Der Energiebedarf der Zerstäubung ist gering.

**Aerodynamische Zerstäubung:** Die zur Oberflächenzunahme benötigte Energie wird in Form von

- kinetischer Energie der Zerstäuberluft (Luft- oder Gaszerstäuber) oder
- kinetischer Energie eines Dampfstrahles (Dampfzerstäuber) zugeführt.

Das Spray weist ein breites Tropfengrößenspektrum auf. Der Energiebedarf der Zerstäubung ist beträchtlich.

Bei aerodynamischer Zerstäubung wird bezüglich Luftdruck und Luftmassenstrom zwischen Hochdruck- und Niederdruckzerstäuber unterschieden. Bei Hochdruckzerstäuber strömt das Zerstäubergas mit Schallgeschwindigkeit aus der Zerstäuberdüse, bei Niederdruckzerstäuber ist die Gasgeschwindigkeit niedriger als die Schallgeschwindigkeit.

Die häufigsten Zerstäuberdüsen für Verbrennungsprozesse sind in Tabelle 4 dargestellt.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Anwendung	Zerstäubungsart	Zerstäuber
Verbrennungsmotoren	mechanisch	Einspritzdüse, Dralldüse
Raketenantriebe	mechanisch, aerodynamisch	Einspritzdüse, Gaszerstäuber, Luftzerstäuber
Schwerölverbrennung	mechanisch, aerodynamisch	Drehzerstäuber, Dampfzerstäuber, Luftzerstäuber
Heizöl EL	mechanisch	Dralldüse
Gasturbinen	aerodynamisch	Luft- oder Gaszerstäuber

**Tabelle 4:** Die häufigsten Zerstäuber für die Brennstoffzerstäubung

### Zerstäubung von Heizöl EL mit Druckdralldüse

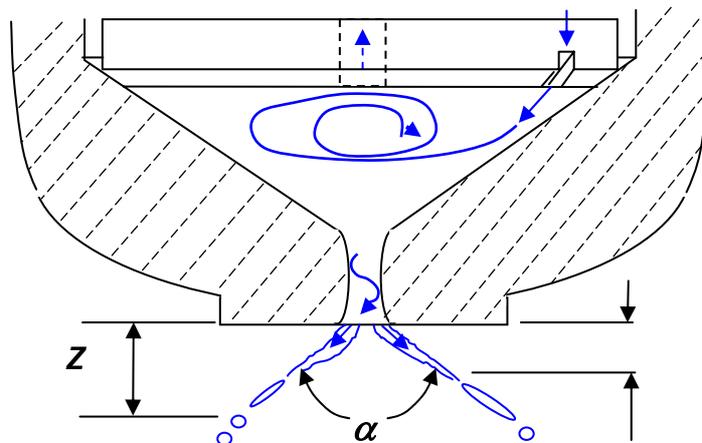


**Abbildung 8:** Druckdralldüsen

Der für die Heizungstechnik wichtigste Zerstäuber ist die **Druckdralldüse**. Bei der **Simplexdüse** gelangt der Brennstoff durch einen tangential angeordneten Kanal (oder durch mehrere Kanäle) in die Drallkammer. Die stark rotierende Flüssigkeit bildet hinter der Düsenöffnung einen Filmkegel, der in einem bestimmten Abstand zur Düse in Tropfen zerfällt. Bei **Rücklaufdralldüsen** wird ein Teil der rotierenden Flüssigkeit aus der Drallkammer durch eine Rücklaufbohrung (gestrichelt dargestellt) in den Brennstoffbehälter zurückgeführt. Bei **Duplexdüsen** ist die Anzahl der in die Drallkammer führenden Drallkanäle variabel.

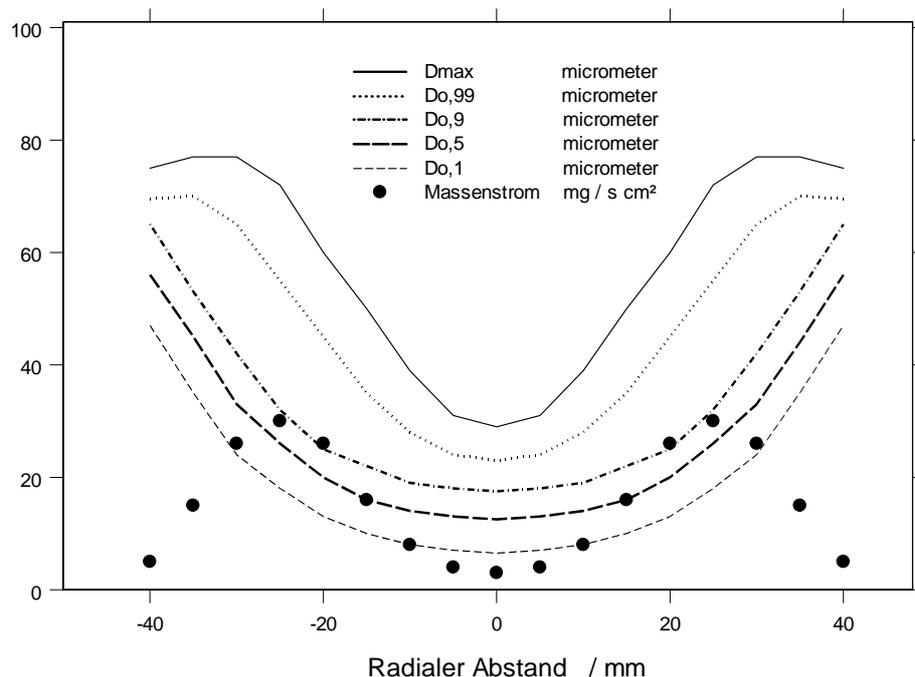
Der Öldurchsatz einer Druckdralldüse unter Nennbedingungen (Förderdruck 7 bar bzw. 100 PSI (Pound pro Square Inch), Ölviskosität 3 cSt (Centistokes) wird in GPH (Gallone pro Stunde, 1 Gallone = 3,785l  $\approx$  3,22kg bei einer relativen Dichte von  $\rho=0,85$ ) angegeben. Der Nenndurchsatz der Düse wird oft als Düsenkapazität oder Düsenleistung bezeichnet.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen



**Abbildung 9:** Prinzip einer Druckdralldüse (siehe auch Abbildung 12)

Für Spraywinkel, Massenstrom und Tropfengröße bei Druckdralldüsen sind die Stoffdaten Dichte, Viskosität, Oberflächenspannung und Förderdruck des Heizöls ausschlaggebend, ferner die Geometriedaten der Drallkammer (Anzahl, Anordnung und Abmessungen der Drallkanäle, Drallkammergröße) und der Düsenbohrung (Durchmesser und Länge).



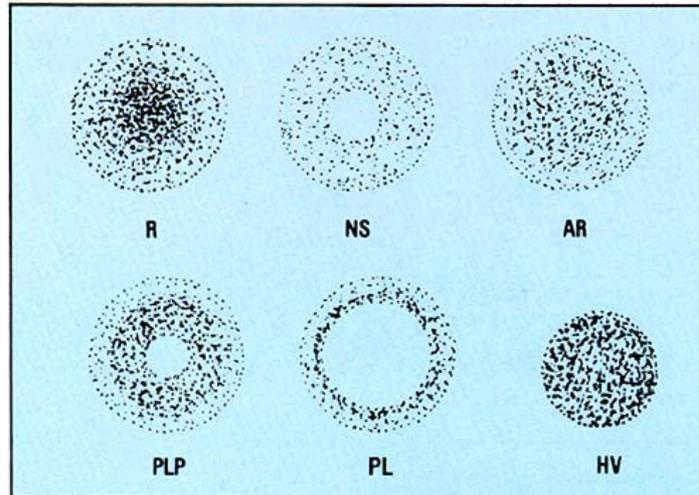
**Abbildung 10:** Spraycharakteristik bei der Zerstäubung von Heizöl EL, Temperatur 60 °C, mit einer 0,4 GPH Hohlkegeldüse bei 15 bar Förderdruck. (Eigene Messung mit PDPA, Phasen-Doppler-Anemometer in 35 mm Abstand von der Düsenkante; D<sub>max</sub> = D<sub>0,999</sub>)

Abbildung 10 zeigt das Ergebnis einer Spraydiagnose mit einer Einzeltropfen-Messung: Tausende Einzeltropfen, die ein Messvolumen von ca. 1 mm<sup>3</sup> passieren, werden dabei ausgewertet. Die Messung kann an vielen Stellen im Spray durchgeführt werden, um die lokale Feinstruktur zu ermitteln.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Für die Beschreibung der Massenstromverteilung benützen die Düsenhersteller **Sprühbildschlüssel**: Ein Beispiel zeigt Abbildung 11.



**Abbildung 11:** Sprühbildschlüssel für die Spraybeschreibung.

Während die Bezeichnungen **Vollkegel-**, **Halbvollkegel-** und **Hohlkegeldüsen** universal benutzt werden, sind die Buchstabenbezeichnungen für den Sprühbildschlüssel in Abbildung 8 nur für die Düsenmarke ‚Monarch‘ gültig, andere Hersteller benützen andere Buchstaben. In obiger Abbildung bedeuten die Sprühbilder PL Hohlkegel-, PLP Halbvollkegel- und R, AR und HV Vollkegeldüsen. Die Bezeichnung NS ist der Grenzfall zwischen Hohlkegel- und Halbvollkegeldüse. Druckdralldüsen verschiedener Fabrikate mit gleichem Sprühbildschlüssel, gleichem Spraywinkel und gleichem Durchsatz sind grundsätzlich austauschbar miteinander. Die häufigste Bezeichnung für Hohlkegeldüse ist H (Danfoss, Steinen, Delevan usw.).

Eine ideale Dralldüse ergibt immer eine Hohlkegelcharakteristik. Bei sonst gleichen Bedingungen sind die Tropfen einer Hohlkegeldüse kleiner als die anderer Dralldüsen. Hohlkegeldüsen werden bei Großanlagen, Blaubrennern und bei vorgewärmtem Schweröl verwendet. Halbvollkegel- und Vollkegeldüsen sind Kompromisse, die bei Gelbbrennern notwendig sind: Bei diesen Düsen wird die räumliche Verteilungscharakteristik des Sprays an die Strömung der Verbrennungsluft im Brenner angepasst. Konstruktiv hochwertige Stauscheiben verteilen die Luftströmung auch bei Gelbbrennern so, dass für die Brennstoffzerstäubung Hohlkegeldüsen verwendet werden können.

Die Herstellerangaben über Ölbrennerdüsen beinhalten den **Öldurchsatz** bei 7 bar Förderdruck für Heizöl mit 3 cSt Viskosität, (Heizöl EL nach DIN 51603, vorgewärmt auf ca. 50 °C), den **Sprühkegelwinkel** und den **Sprühbildschlüssel**. Die Herstellerangaben beinhalten keine Tropfengrößen. Die Angaben des maximalen Tropfendurchmessers **D<sub>max</sub>** in Tabelle 5 sind die Ergebnisse eigener Messungen mit **PDPA** (siehe Abbildung 10) und haben lediglich einen Orientierungscharakter.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

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 Zerstä- ubung bei Kleinbrennern		
	Massenstrom kg/h	Brennerleistung kW	D <sub>max</sub> µm	Massenstrom kg/h	Leistung kW	D <sub>max</sub> µm	Massenstrom kg/h	Leistung kW	D <sub>max</sub> µm
0,4	1,25	14,8	90	1,46	17,3	85	1,79	21,2	82
0,5	1,6	19	100	1,87	22,2	95	2,29	27,1	90
0,6	2	23,7	110	2,37	28,1	100	2,90	34,4	95
0,75	2,5	29,6	120	2,94	34,8	110	3,60	42,7	105
0,85	2,8	33,2	130	3,31	39,2	120	4,05	48,0	115
1	3,2	37,9	140	3,72	44,1	130	4,56	54,0	125
1,25	4	47,4	160	4,71	55,8	150	5,77	68,4	140
1,5	5	59,3	170	5,84	69,2	160	7,15	84,7	155
1,75	5,6	66,4	190	6,55	77,6	180	8,02	95,0	170

**Tagelle 5:** Öldurchsatz, Brennerleistung und Tropfengröße von Hohlkegeldüsen bei vorgewärmtem Heizöl EL (kinematische Viskosität: 3 cSt) für verschiedene Förderdrücke.

Die Umrechnung der Angabe in Tabelle 5 auf andere Düsen bzw. andere Förderdrücke erfolgt bei Vernachlässigung der Viskositätseffekte nach Gleichungen (1) bis (6). Die Bezeichnung **Düse 1** bzw. **Düse 2** in Gln (1) bis (3) bezieht sich auf die nominelle Düsenbezeichnung. Die Größen  $D_{max}$ ,  $\dot{m}$  und  $N$  bezeichnen die maximale Tropfengröße [µm], Düsenmassenstrom [kg/h] und Brennerleistung [kW].

$$D_{max, Düse 2} = D_{max, Düse 1} \cdot \sqrt{Düse 2 / Düse 1} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{Düse 2} = \dot{m}_{Düse 1} \cdot \left( Düse 2 / Düse 1 \right) \quad (2)$$

$$N_{Düse 2} = N_{Düse 1} \cdot \left( Düse 2 / Düse 1 \right) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{p 2} = \dot{m}_{p 1} \cdot \sqrt{p 2 / p 1} \quad (4)$$

$$N_{p 2} = N_{p 1} \cdot \sqrt{p 2 / p 1} \quad (5)$$

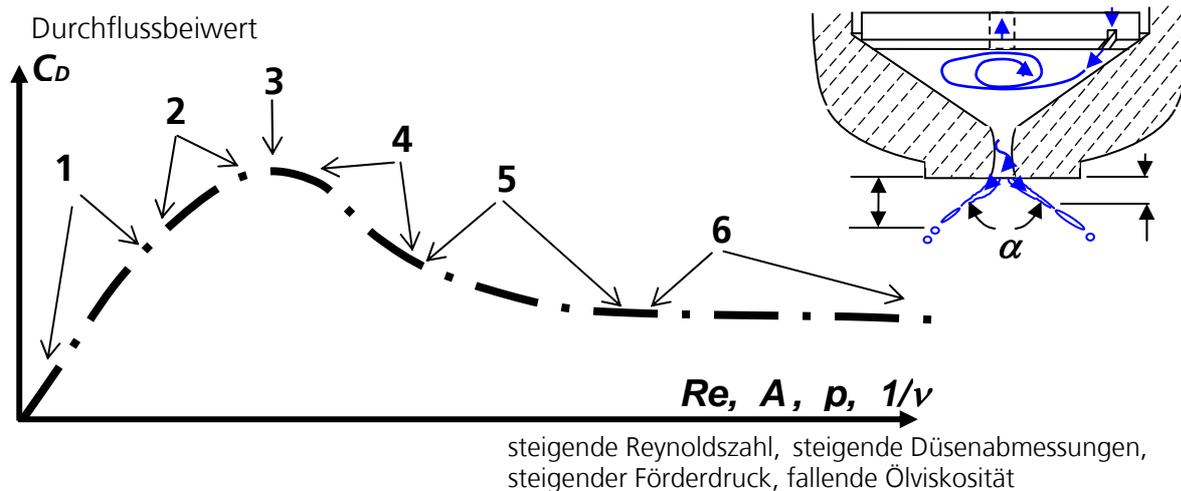
$$D_{max, p 2} = D_{max, p 1} \cdot \left( p 1 / p 2 \right)^{0,15} \quad (6)$$

Eine Kontrolle der Gleichungen (1) bis (6) anhand Tabelle 5 zeigt, dass die Viskositätseffekte auch bei vorgewärmtem Heizöl nicht ganz außer acht gelassen werden können: Der Durchsatz der Düse 1 GPH müsste aus dem Durchsatz der Düse 0,5 GPH bei 10 bar Versorgungsdruck laut Gl. (2):  $2 \cdot 1,87 = 3,74$  kg/h betragen, laut Tabelle 5 beträgt der Durchsatz jedoch 3,72 kg/h. Die Abweichung des tatsächlichen Durchsatzes von dem mit Gl. (2) gerechnetem wird bei einer Erhöhung der Ölviskosität, z.B. durch Verzicht auf die Ölvorwärmung, deutlich größer.

Wird bei einer Düse der Förderdruck erhöht, erhöht sich die Brennerleistung bei einer Verminderung der Tropfengröße! Dies führt zu einer Verbesserung der Verbrennung. Wird die Brennerleistung hingegen dadurch erhöht, dass die Düse durch eine größere ausgetauscht wird, werden die Tropfen größer. Hierdurch verschlechtert sich in der Regel die Verbrennungsqualität.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)



**Abbildung 12:** Durchflusskennlinie von Druckdralldüsen

Der Durchflussbeiwert (Einschnürungsbeiwert) bei einer Querschnittsänderung durchströmter Rohre ist das Verhältnis des durchströmten Querschnitts zum geometrischen Querschnitt. Bei ausgebildeter viskositätsfreier Strömung ist der Durchflussbeiwert unabhängig von der Reynoldszahl. Die Durchflusskennlinie einer Druckdralldüse weist mit steigender Reynoldszahl folgende Bereiche aus.

Bereich 1, Sprühbild nach Abbildung 13, typisch für ca. 5 – 10 ms nach Brennschluss;  
 In diesem Bereich steigt der Durchflussbeiwert linear mit der Reynoldszahl. Keine Zerstäubung!

Bereich 2, Sprühbild nach Abbildung 14, typisch für ca. 3 – 4 ms nach Brennerschluss;  
 Der Anstieg des Durchflussbeiwerts mit steigender Reynoldszahl schwächt sich ab. Strahlenbildung, keine Zerstäubung!

Bereich 3, Sprühbild nach Abbildung 15, typisch für ca. 1 – 2 ms nach Brennerschluss;  
 Maximum des Durchflussbeiwerts. Beginnende, äußerst schlechte Zerstäubung.

Bereich 4, Sprühbild nach Abb. 16, 0,3 – 0,5 GPH-Düse bei  $7 < p < 10$  bar Förderdruck;  
 In dem Engquerschnitt der Düse bildet sich ein Luftkern, der Durchmesser des Luftkerns wächst stark mit steigender Reynoldszahl. Schlechte Zerstäubung.

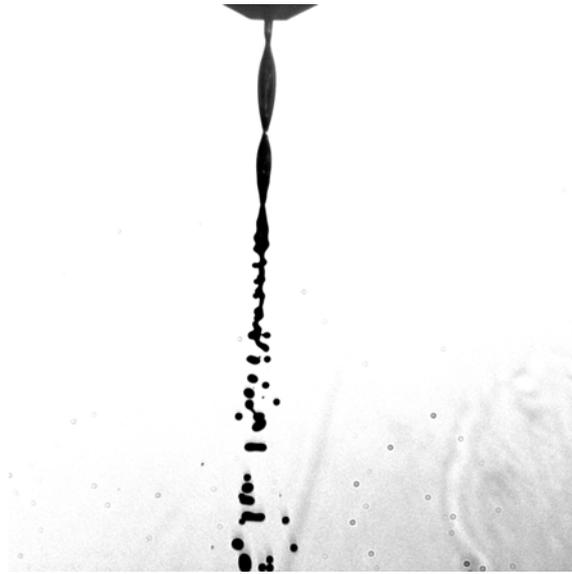
Bereich 5, Sprühbild nach Abb. 17, 0,3 – 0,5 GPH-Düse bei  $10 < p < 15$  bar Förderdruck;  
 Der Luftkern im Engquerschnitt der Düse wird von der Reynoldszahl nur schwach beeinflusst. Gute Zerstäubung.

Bereich 6; Sprühbild nach Abbildung 18; 0,3 – 0,5 GPH-Düse bei  $30 \text{ bar} < p$  Förderdruck,  
 oder 0,5 – 1,0 GPH-Düse bei  $15 < p < 30$  bar Förderdruck,  
 oder Düsen über 1 GPH bei  $10 \text{ bar} < p$  Förderdruck.  
 Ideale Zerstäubung, keine Viskositätsabhängigkeit, Gültigkeitsbereich der Gleichungen (1 – 6).

$$C_D = \frac{U_{\text{Düsenaustritt}}}{U_{\text{theoretisch}}} = \frac{(\text{Durchsatz gemessen})}{((2p/\rho)^{0,5} \rho (A_{\text{Düsenaustritt}}))} \text{ mit}$$

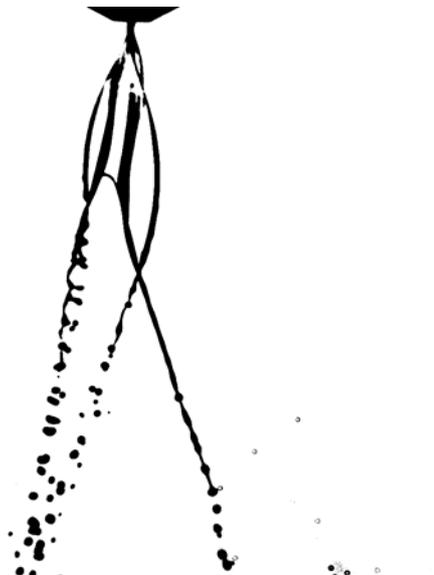
$u$ : Geschwindigkeit,  $p$ : Förderdruck,  $\rho$ : Dichte,  $A$ : Fläche der Düsenaustrittsbohrung und  
 $U_{\text{theoretisch}} : (2p/\rho)^{0,5}$ .

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen



**Abbildung 13:** Sprühbild einer Druckdralldüse ca. 5 – 10 ms nach Brennerschluss.

Falls zwischen Ölpumpe und Dralldüse in der Ölleitung eine Luftblase eingeschlossen ist, dehnt sich diese nach Abschalten des Brenners aus und treibt mehrere hundert Millisekunden lang Heizöl nach obigem Sprühbild in den Feuerraum. Heizöl, das nach dem Brennerschluss in den Feuerraum gelangt, macht sich beim nächsten Einschalten als Brennerstart-Schadstoffemission bemerkbar. Vorkehrung: nach der Montage den Brenner ohne Zündung mehrere mal ein- und ausschalten und das heraustretende Heizöl auffangen; Brenner in Kerzenstellung starten.



**Abbildung 14:** Sprühbild einer Druckdralldüse ca. 3 – 4 ms nach Brennerschluss

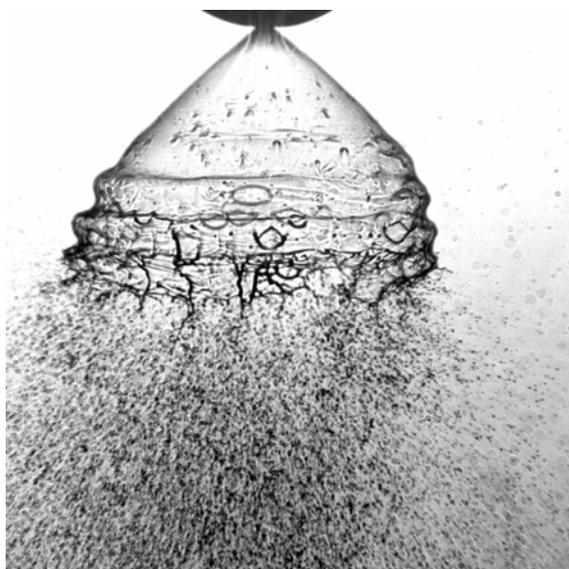
Der rotierende Vollstrahl bildet einen Kegel nach dem Düsenaustritt.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen



**Abbildung 15:** Sprühbild einer Druckdralldüse ca. 1 – 2 ms nach Brennerschluss

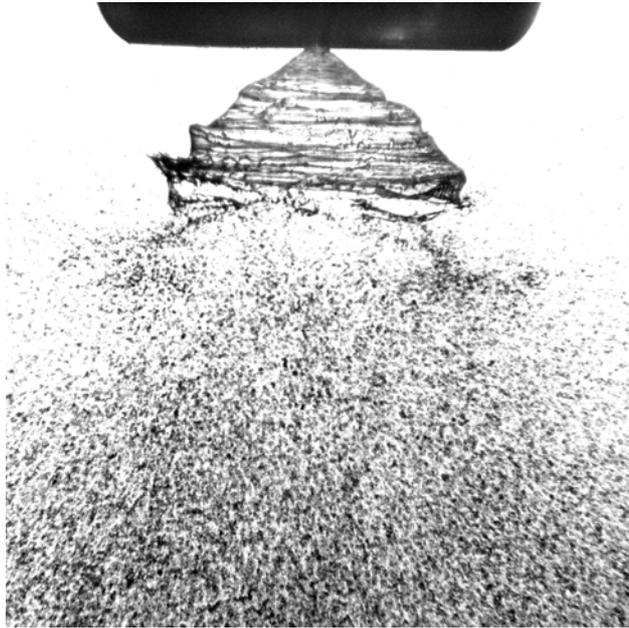
Der in Abbildung 15 dargestellte Ölfilmkegel wird auch als „Zwiebel“ bezeichnet. Ein Luftkern bildet sich im Düsenaustritt, dessen Durchmesser mit zunehmendem Förderdruck größer wird.



**Abbildung 16:** Sprühbild einer 0,3 – 0,5 GPH-Düse bei einem Förderdruck von ca. 7 – 10 bar.

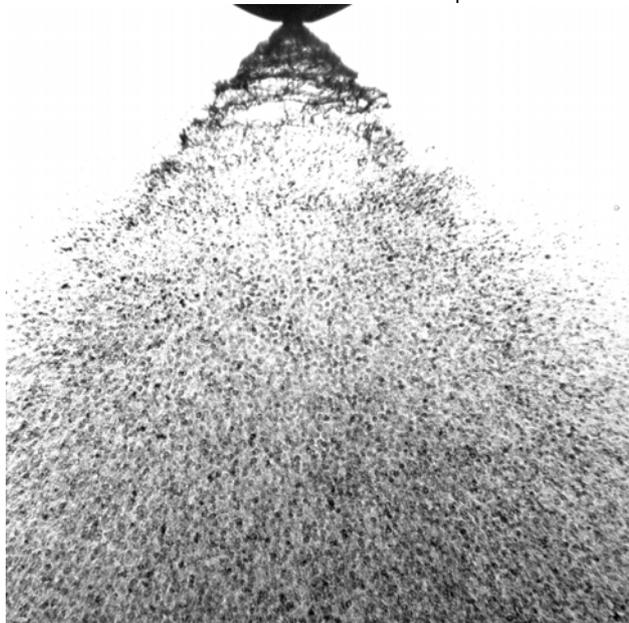
Dieser Filmkegel wird auch als „Tulpe“ bezeichnet. Das in Abbildung 16 gezeigte Sprühbild ist typisch bei der Ölzerstäubung mit Düsen von 0,3 bis 0,5 GPH in Hausheizungen. Der Durchflussbeiwert in Abbildung 9 zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Viskosität. Dementsprechend weist die Brennerleistung kleiner Heizungsanlagen ölqualitäts- und temperaturabhängige Schwankungen auf, die trotz Ölvorwärmung nicht ganz behoben werden können.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen



**Abbildung 17:** Sprühbild einer 0,3 – 0,5 GPH-Düse bei einem Förderdruck von ca. 10 – 15 bar.

Der Durchflussbeiwert in Abbildung 12 zeigt eine schwache Abhängigkeit von der Viskosität. Die Brennerleistung kleiner Anlagen, die mit einem Förderdruck von über 10 bar betrieben werden, sind dementsprechend nicht mehr so stark von der Heizölqualität beeinflusst.

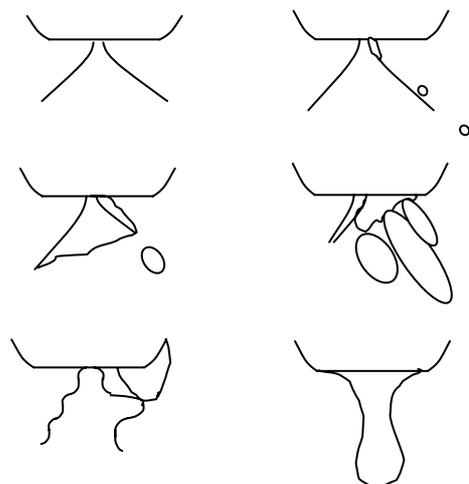


**Abbildung 18:** Sprühbild der Ölzerstäubung mit einer Druckdralldüse im quasiviskositätsfreien Betriebsbereich

Der Durchflussbeiwert in Abbildung 12 zeigt keine Abhängigkeit von der Viskosität, Reynoldszahl oder Förderdruck. Die Umrechnung des Durchsatzes nach Gleichungen (1) bis (6) ergibt exakte Werte, eine Schwankung der Ölviskosität macht sich nicht bemerkbar auf die Brennerleistung oder Zerstäubungsqualität.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

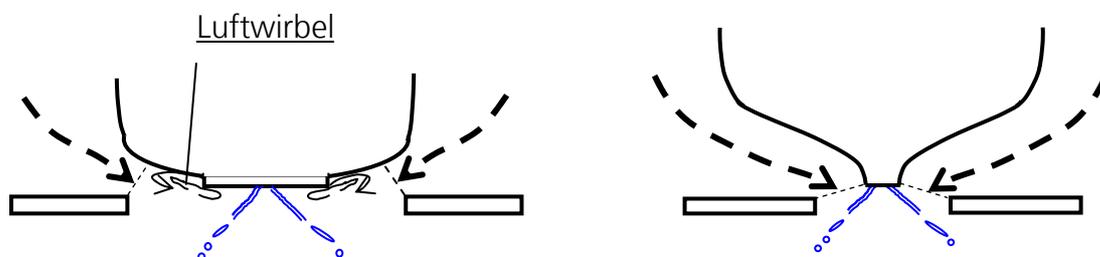
[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)



Die Sprühbilder in den Abbildungen 13 bis 18 zeigen Druckdralldüsen, deren Konturen fehlerfrei und tadellos poliert sind. Wenn die Oberfläche der Düse die geringste Verschmutzung oder Beschädigung aufweist, entstehen bei abnehmendem Öldruck typische Ereignisse, wie dargestellt in Abbildung 19. Das Bild links oben zeigt die normale Zerstäubung. Bei einem Fehler an der Düsenstirnfläche entsteht das Sprühbild wie dargestellt im oberen rechten Bild. Bei Abnahme des Förderdruckes verschlechtert sich die Zerstäubung wie in den mittleren Bildern. Die unteren zwei Bilder zeigen andere typische Fehlermöglichkeiten der Zerstäubung bei zu niedrigem Zerstäuberdruck.

**Abbildung 19:** Typische Fehler der Ölzerstäubung mit Druckdralldüsen bei zu niedrigem Zerstäuberdruck.

Je kleiner die Düsenkapazität, umso größer ist der notwendige Mindestdruck, um die in Abbildung 19 gezeigten Fehlermöglichkeiten zu vermeiden. Bei einer Düse von 0,5 GPH (ca. 1,5 kg/h) können die gezeigten Fehler unterhalb von ca. 3 bar auftreten. Ist die Düsenoberfläche verschmutzt, erhöht sich der erforderliche Mindestdruck. Bei einer 0,3 GPH Düse ist der erforderliche Mindestdruck deutlich höher.



**Abbildung 20** Herkömmliche (linkes Bild) und verbesserte Düsenaustrittskontur (rechtes Bild)

Der Grund für die in Abbildung 19 gezeigten Fehler der Zersprühung ist die aerodynamisch ungünstige Düsenkontur. An der Düsenkante entstehen Luftablösungen, wie gezeigt im linken Bild in Abbildung 20. Die Luftablösung übt eine Saugwirkung auf den Sprühkegel aus und verhindert die rotationsymmetrische Kegelbildung. Wird die Düsenaußenkontur hingegen aerodynamisch optimiert (rechtes Bild), kann ein optimaler Filmkegel auch bei stark reduzierten Öldrücken entstehen. Die Verbrennungsluft unterstützt in diesem Fall die Zerstäubung: Daher lautet die Bezeichnung dieser Zerstäubung „luftunterstützte Druckdralldüse“. Die Luftunterstützung führt zu einer deutlichen Verringerung der erreichbaren Brennerleistungen, ohne die Kanalabmessungen der Düse zu reduzieren, wie gezeigt in Abbildung 21.

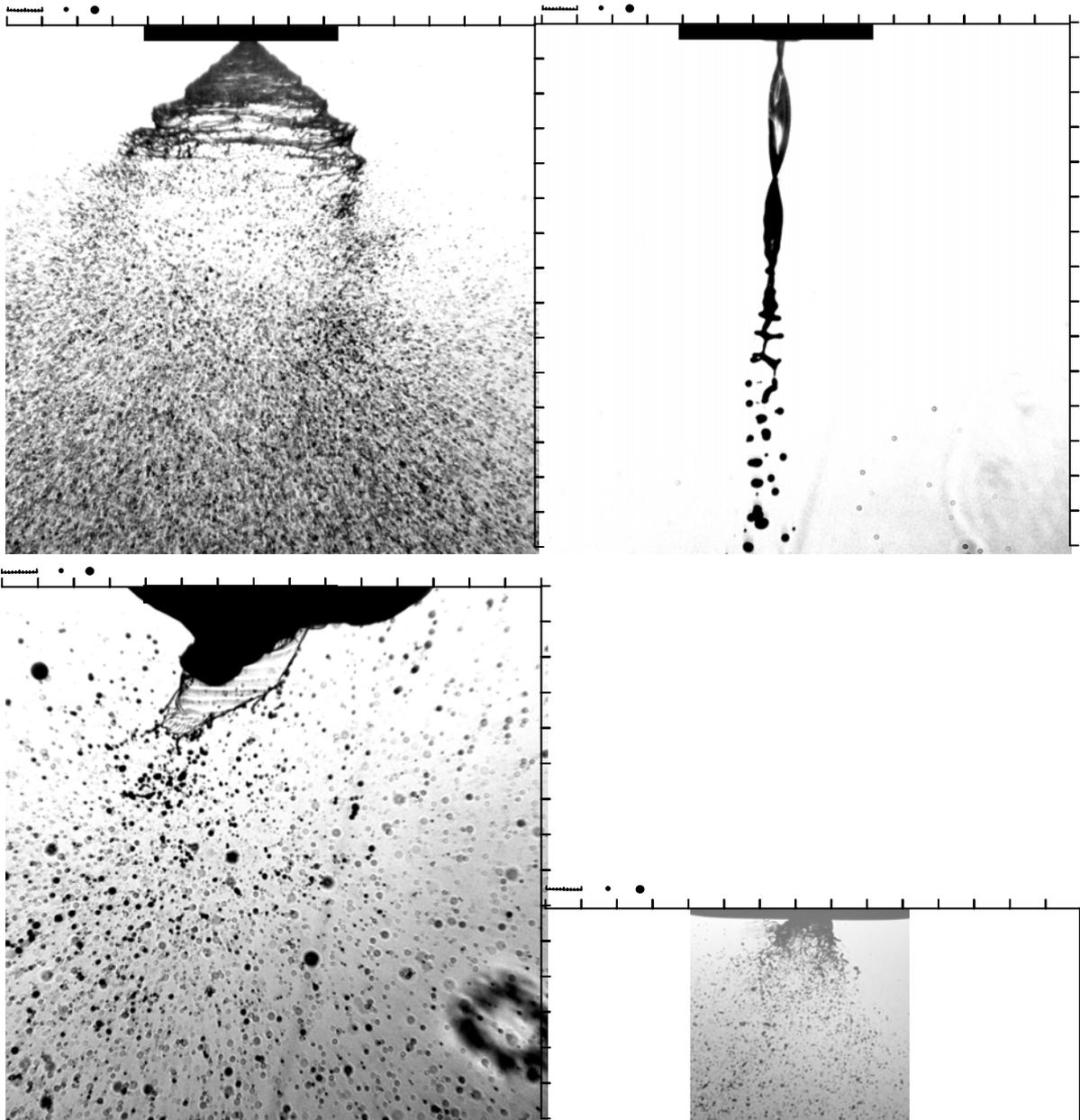
## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

In Abbildung 21 zeigen die Bilder

oben links: Öldruck 7,5 bar, Brennerleistung 17 kW herkömmliche Zerstäubung,  
oben rechts: Öldruck 0,9 bar, Brennerleistung 6 kW herkömmliche Zerstäubung,  
unten links: Öldruck 1,1 bar, Brennerleistung 6,2 kW herkömmliche Zerstäubung,  
unten rechts: Öldruck 0,9 bar, Brennerleistung 5,8 kW **luftunterstützte** Zerstäubung

Luftdruck 23 mbar, Luftstrom 2,4 m<sup>3</sup>/h

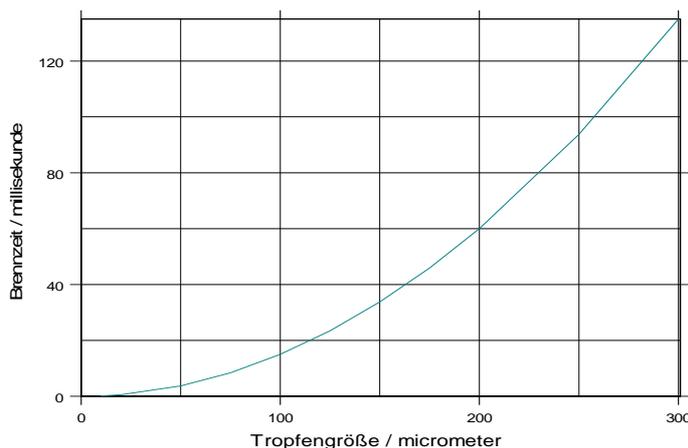


**Abbildung 21:** Vergleich herkömmlicher und luftunterstützter Druckdralldüsen  
Quelle für die Abbildungen 13-21: Faragó, Knapp: *Luftunterstützte Dralldüse*; 3. Aachener Kol-  
loquium: *Heizwärme aus Ölverbrennung*; Schaker Verlag, Aachen, 2000

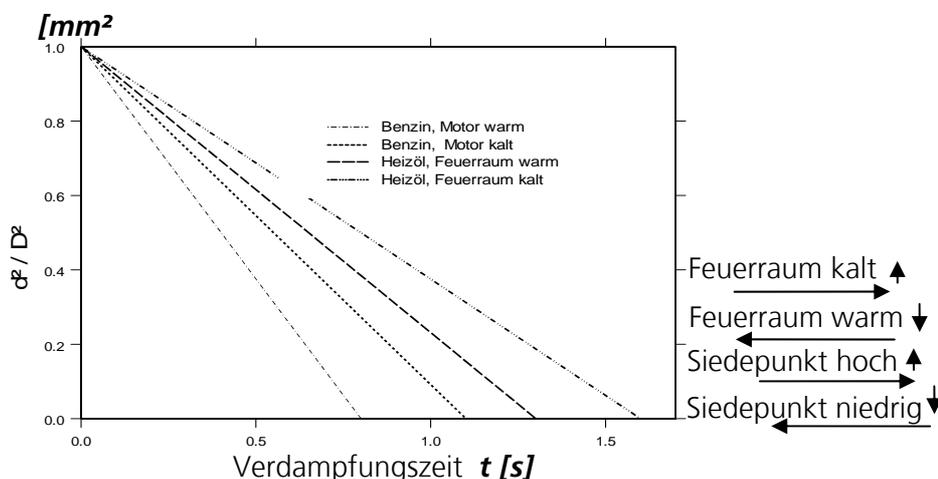
## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen Tropfenverdampfung, D<sup>2</sup>-Gesetz

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Wenn bei der Tropfenverdampfung die Wärmezufuhrate aus der Umgebung in den Tropfen konstant ist, nimmt die Fläche des verdampfenden Tropfens linear ab. Dies ist identisch mit einer linearen Abnahme des Durchmesserquadrats → **D<sup>2</sup>-Gesetz**. Nach diesem Gesetz ist die Verdampfungszeit eines Tropfens quadratisch proportional zu dem anfänglichen Tropfendurchmesser. Die Verdampfung wird von der Wärmedurchgangszahl und der Umgebungstemperatur beeinflusst. Abbildung 22 zeigt die Verdampfungszeit eines Heizöltropfens im Feuerraum eines Niedertemperaturkessels.



**Abbildung 22:** Brennzeit (Verdampfungszeit) eines Heizöltropfens im Feuerraum eines Niedertemperaturkessels



**Abbildung 23:** Einfluss der Betriebstemperatur und der Brennstoffzusammensetzung auf die Verdampfung. D: Anfangs-Tropfengröße = 1 mm;  
 d: abnehmende Tropfengröße während der Verdampfung; t: Verdampfungszeit.

Die Verdampfungskonstante **K** ist die Zeit, in der die Oberfläche (genauer gesagt der Durchmesserquadrat, **d<sup>2</sup>**) des verdampfenden Tropfens 1 mm<sup>2</sup> abnimmt. Das augenblickliche Tropfendurchmesserquadrat beträgt

$$d^2 = D^2 - K \cdot t \quad \text{oder} \quad d^2 / D^2 = 1 - (K / D^2) \cdot t \quad (7)$$

mit D als der Durchmesser zum Zeitpunkt 0 und t als die Verdampfungszeit (Abbildung 23).

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

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

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

$D_{0,999} = 100 \mu\text{m}$ . 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?

**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?

**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)

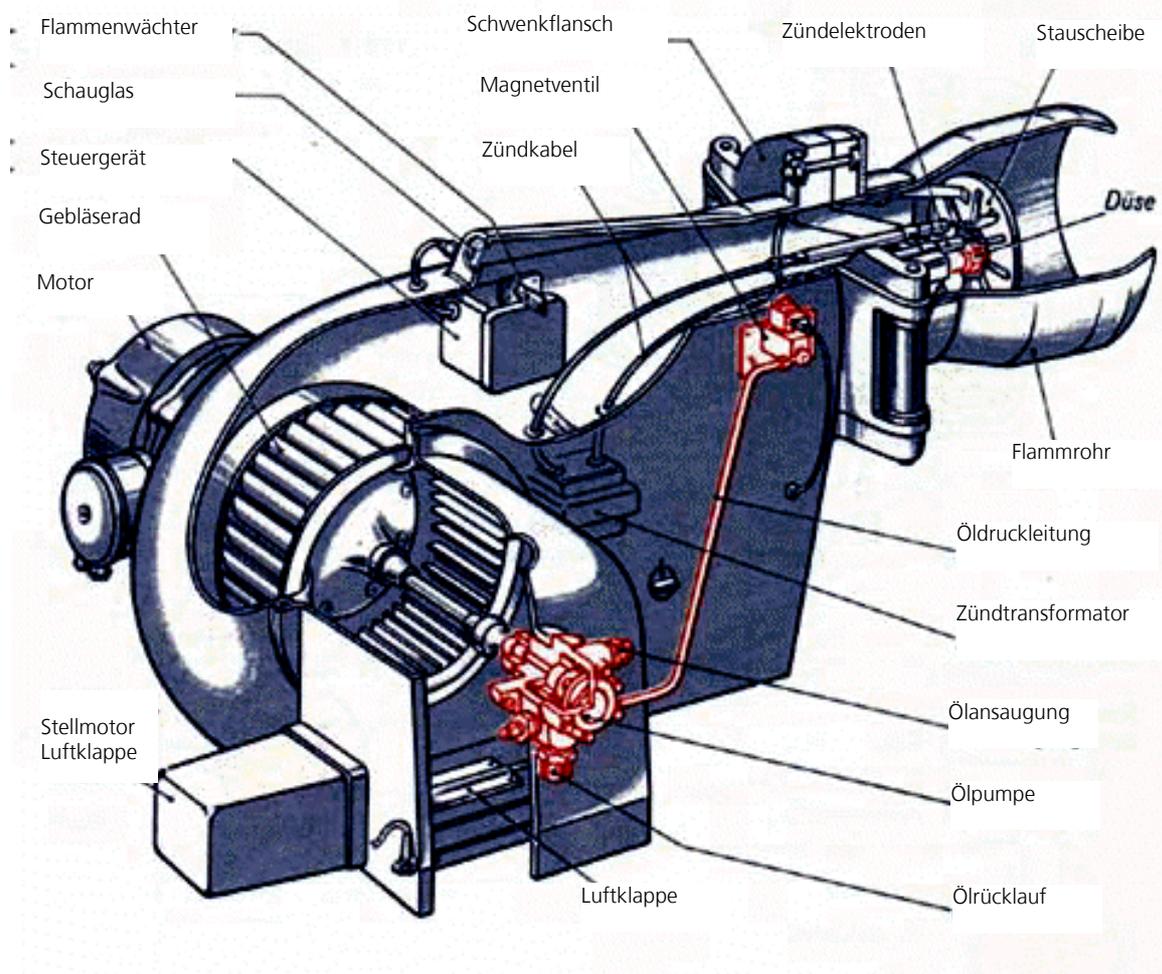
**Aufgabe 10a:** Welche Düsen nach Tabelle 5 sind geeignet für eine Brennerleistung von 24 kW bei einem maximalen Tropfendurchmesser mit  $90 \mu\text{m}$ , wenn der Förderdruck im Bereich  $10 < p < 20 \text{ bar}$  variiert wird (Gln (4) und (6)).

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

**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?

### Ölbrenner



**Abbildung 24:** Aufbau eines Öl-Gebläsebrenners – Gelbbrenner

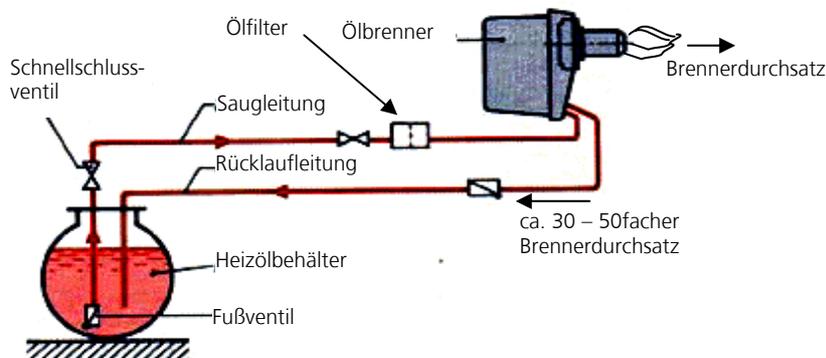
Bei einem Ölzerstäubungsbrenner wird das Heizöl durch eine Ölbrennerdüse zerstäubt und elektrisch gezündet. Ein Gebläse führt die zur Verbrennung notwendige Luft zu. Die Flamme wird durch einen Lichtfühler (Flammenwächter) überwacht. Der Temperaturregler am Heizkessel schaltet den Brenner nach Bedarf ein und aus. Ein Temperaturbegrenzer sichert den Heizkessel gegen zu hohe Temperaturen ab.

Das Heizöl wird durch die Ölpumpe angesaugt. Motor, Gebläse und Ölpumpe sind bei diesen Ölzerstäubungsbrennern immer gleichzeitig in Betrieb. Die Ölpumpen dürfen nie gegen eine Absperrung arbeiten, da der Druck sonst zu hoch wird. Beim unten gezeigten Zweistrangsystem wird deshalb in die Ölrücklaufleitung nur ein Rückschlagventil eingebaut.

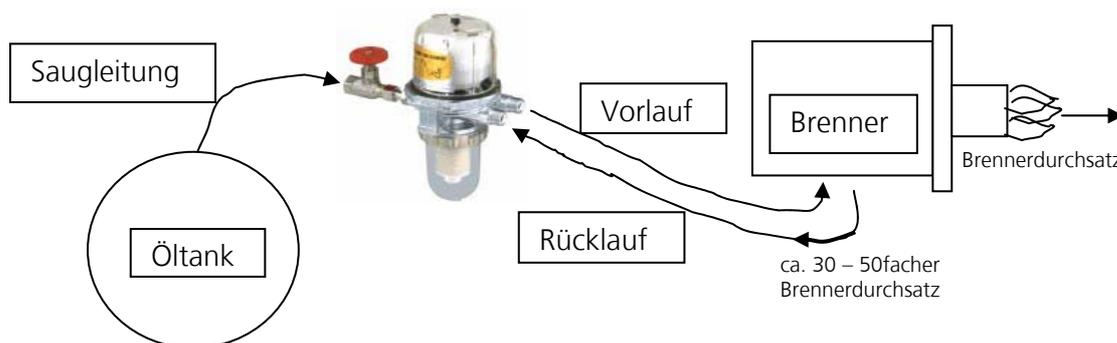
Die Ölpumpe drückt das Heizöl mit einem Druck von 7 bis 25 bar über die Öldruckleitung zur Ölbrennerdüse. Am Austritt der Ölpumpe oder in der Ölleitung ist ein Magnetventil einzubauen, welches das Öl dicht absperrt.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

### Anschluss an die Ölversorgung, Zweistrangsystem, Einstrangsystem



**Abbildung 25:** Anschluss des Brenners an die Ölversorgung, Zweistrangsystem (Altanlagen!)



**Abbildung 26:** Ölfilter, Einstrang-Fördersystem mit Zweistrang-Ölpumpe

Das **Zweistrangsystem** ist das ältere, fast alle Altanlagen sind Zweistrangsysteme.

Ölstrom in der Saugleitung = Rücklaufstrom + Brennerdurchsatz,  
 Rücklaufstrom >> Brennerdurchsatz.

Vorteil: leichte Inbetriebnahme;

Nachteil: Öl im Tank altert schnell; In der Saugleitung kann der Ölstrom abreißen - Fehlzündungen!

Bei Neuanlagen wird ausschließlich **Einstrangsystem** (Einstrang-Fördersystem mit Zweistrang-Ölpumpe) eingebaut.

Vorteil: Öl altert nicht so schnell,  
 die Wärme durch die Ölumlagerung erwärmt das Öl im Filter,  
 Leistungsbedarf der Ölvorwärmung wird minimiert.

Nachteil: Bei der Inbetriebnahme muss das Öl durch eine Handsaugpumpe aus dem Tank in den Filter geführt werden.  
 Die Ölvorwärmung durch die Ölumlagerung ist eine Funktion der Brennerlaufzeit.  
 Entsprechend der fallenden Ölviskosität bei langen Brennerlaufzeiten sinkt die Brennerleistung mit steigender Laufzeit. Dadurch vermindern sich Luftzahl und Kesselwirkungsgrad mit zunehmender Brennerlaufzeit.

Die Kombination Einstrang-Fördersystem mit Einstrang-Ölpumpe ist nicht zu empfehlen!

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

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

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

**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 Volltanken? Für das Alter bei Ölmischungen kann ein linearer Ansatz angenommen werden: Z.B. 750 Liter 2 Jahre altes Öl gemischt mit 250 Liter frisches Öl (0 Jahre alt) ergibt 1000 Liter 1,5 Jahre altes Öl:  $(750 \cdot 2 + 250 \cdot 0) / 1000 = 1,5$

Jahr	Haus1		Haus2		Haus3	
	vor Betankung	nach	vor Betankung	nach	vor Betankung	nach
0		0,0		0,0		0,0
1	1,0					
2			2,0			
3					3,0	
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

### Ölpumpe



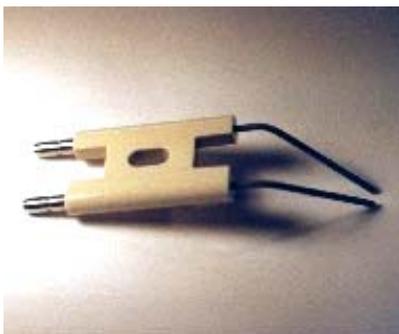
**Abbildung 27** Bei Neuanlagen ist das Magnetventil ein Zubehör der Pumpe. In Abbildung 24 sind Heizölpumpe und Magnetventil voneinander getrennt.

Pumpenanschlüsse sind:

- Saugleitung von Öltank bzw. von Ölfilter (Einstrang)
- Rücklaufleitung zum Öltank bzw. zum Ölfilter
- Leitung zum Ölbrenner (wird mit Magnetventil geöffnet)
- bei Zweistufenbrenner zweite Leitung zum Ölbrenner
- Stutzen zur Öldruckmessung

Der Pumpendurchsatz ist das dreißig- bis fünfzigfache des Brennerdurchsatzes. Bei der Erhöhung des Druckniveaus zur Düse wird der Gesamtdurchsatz gedrosselt  
Die Ölpumpe für Zweistufenbrenner beinhaltet zwei Magnetventile

### Zündelektrode



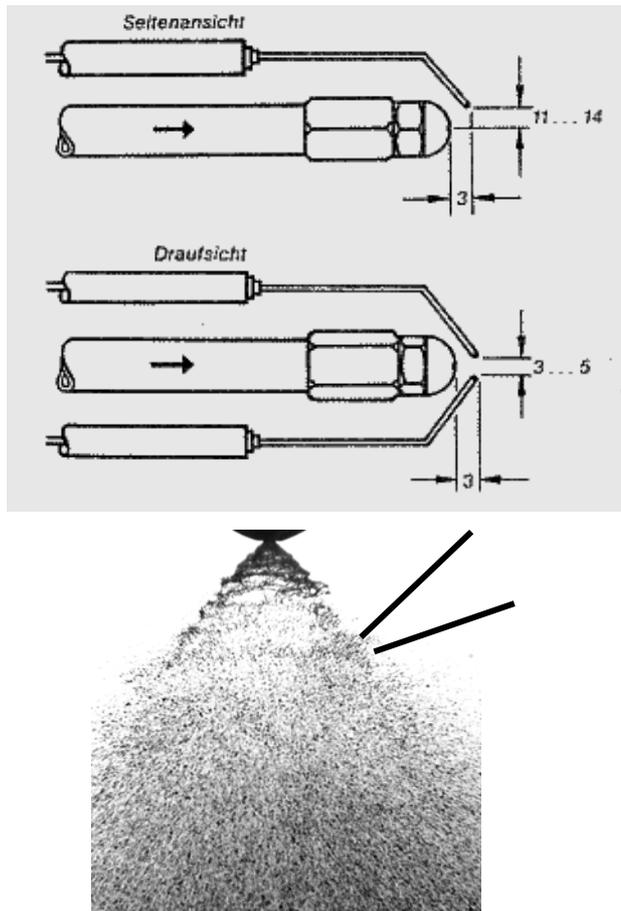
**Abbildung 28:** Zündelektrode **Vorsicht: Spannung über 10 000 Volt**

Wichtig ist die richtige Stellung der Elektroden am Sprühkegel. Hierzu gibt es immer konkrete Herstellerangaben. Der Abstand der beiden Elektroden-Enden voneinander sollte etwa 3 - 5 mm betragen. Bei richtigem Abstand wird der Zündfunke durch den Gebläseluftstrom bogenförmig in den Ölnebel eingeblasen. Man sollte immer darauf achten, dass der Abstand der Elektroden zur Stauscheibe und zum Düsenkopf etwas größer ist als der Abstand der Elektroden-Enden untereinander, da sonst der Zündfunke auf die Düse überspringt. Die Gefahr des Überspringens wächst mit zunehmendem Verschmutzungsgrad des Brenners.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Ein Beispiel, wie Elektroden eingestellt sein sollten, wird in Abbildung 29 gezeigt.



**Abbildung 29:** Einstellung der Zündelektrode:

Am Rand des Ölnebels,

zu weit in den Ölnebel:

zu weit außerhalb des Ölnebels:

Elektroden zu nah zueinander:

Elektroden zu weit voneinander:

Herstellerangaben sind nur Orientierungswerte!

Zündelektrode verkokt

Brenner zündet nicht

schlechte Zündung

Durchschlagen

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

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

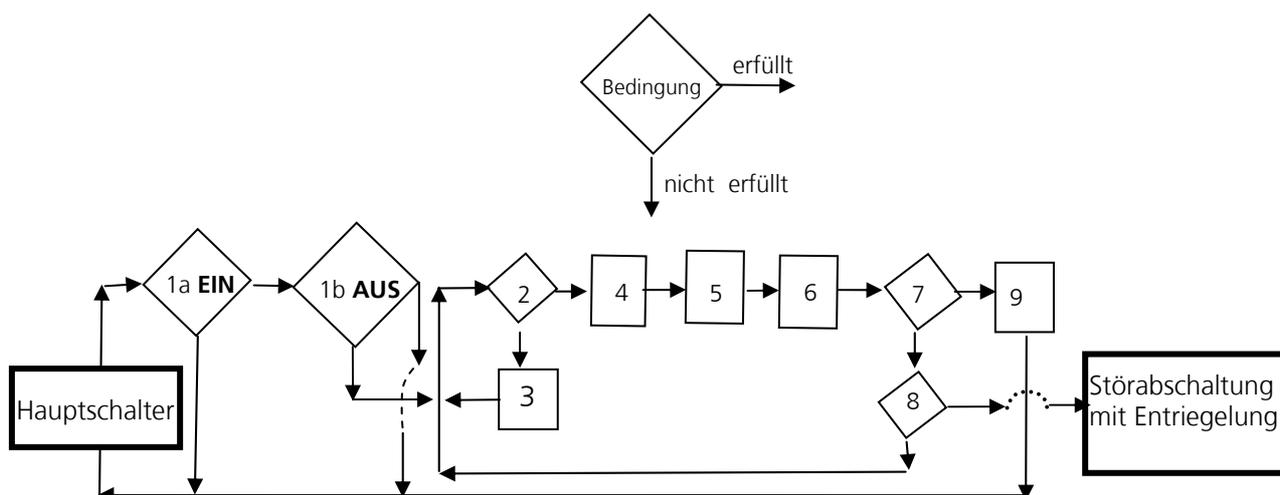
[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

### Feuerungsautomat (Steuergerät)



**Abbildung 30:** Feuerungsautomat

Der Feuerungsautomat (oder Steuergerät) überwacht und kontrolliert die Funktionen Brenner-Motor, Ölvorwärmer, Brennstoffzufuhr, Zündung, Flammenüberwachung etc. nach einem Programmplan. Auf der Rückseite des Steuergerätes ist der elektrische Anschlussplan angezeigt.  
Achtung: Der elektrische Anschlusspan eines Steuergerätes ist nicht genormt! Beim austauschen des Steuergerätes muss der elektrische Anschlussplan der beiden Geräte verglichen werden.



- 1a Kessel-Einschalttemperatur unterschritten: **EIN**
- 1b Kessel-Ausschalttemperatur überschritten: **AUS**
- 2 Brennstofftemperatur- oder Brennstoffdruck-Kontrolle, Vergleich Istwert – Sollwert
- 3 Brennstofftemperatur- oder Brennstoffdruck-Regelung oder Brenner AUS
- 4 Luft / Vorspülung EIN, nach vorgegebener Vorspülzeit weiter
- 5 Zündung **EIN**
- 6 Brennstoff **EIN**
- 7 Flamme vorhanden
- 8 Das erste mal ein neuer Zündversuch, das zweite mal: **Störabschaltung**
- 9 nach vorgegebener Zündzeit: Zündung **AUS**

**Abbildung 31:** Beispiel für einen Steuergerät-Programmplan

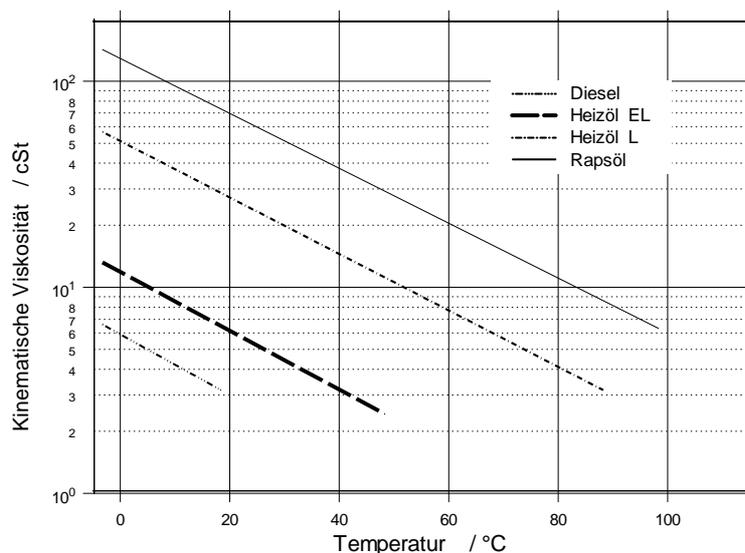
**Aufgabe 15:** Warum muss beim Austauschen einer Brennerkomponente meist auch das Steuergerät ausgetauscht werden?



## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

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



**Abbildung 33:** Kinematische Viskosität verschiedener Brennstoffe

### Rapsölverbrennung

Rapsöl ist ein nachwachsender Brennstoff und damit ein erneuerbarer Energieträger. Bei der Rapsölverbrennung entsteht kein Treibhauseffekt: Die Kohlendioxidmenge, die bei der Rapsölverbrennung freigesetzt wird, wurde beim Wachsen des Rapses aus der Atmosphäre entnommen und im Pflanzenmaterial gebunden. Aus Abbildung 33 ist ersichtlich, dass Rapsöl die ca. zehnfache kinematische Viskosität aufweist als Heizöl EL. Dementsprechend müsste Rapsöl auf ca. 120 °C vorgewärmt werden, um in gleicher Qualität beim gleichen Förderdruck wie Heizöl EL zerstäubt und verbrannt zu werden. Dies könnte zur Verkrackung im Düsenstockvorwärmer führen, Langzeiterfahrung im notwendigen Maß liegt nicht vor. Häufig wird Rapsöl zum Heizöl beigemischt. Gute Erfahrungen liegen bei 85 % Heizöl 15 % Rapsöl Mischungen vor.

Bei der Umstellung eines für die Verbrennung von Heizöl EL ausgelegten Brenners auf die Verbrennung von Rapsöl oder Rapsöl-Heizöl-Mischungen könnten folgende Maßnahmen hilfreich sein:

- 1 Brennstoff stärker vorwärmen (Düsenstockvorwärmer austauschen)
- 2 Förderdruck erhöhen und kleinere Düse nehmen. Bei Kenntnis der Viskosität ist dies kein Problem, ohne Kenntnis: ausprobieren, messen, optimieren!
- 3 Eventuell Düsentyp ändern, und zwar so, dass dabei der neue Düsentyp um eine Stufe mehr die Hohlkegelcharakteristik annimmt (siehe Abbildung 8), d.h. Hohlkegel statt Halbhohlkegel, Halbhohlkegel statt Halbvollkegel etc.
- 4 Eventuell Filmkegelwinkel erhöhen, gegebenenfalls die Stauscheibe der veränderten Zerstäubung anpassen.

Die Umstellung auf Rapsöl oder Rapsölmischung ist eine Herausforderung an den Feuerungs-techniker und ein Dienst an der Umwelt.

## Feststofffeuerung

### Brennstoffaufbereitung bei Feststoffverbrennung

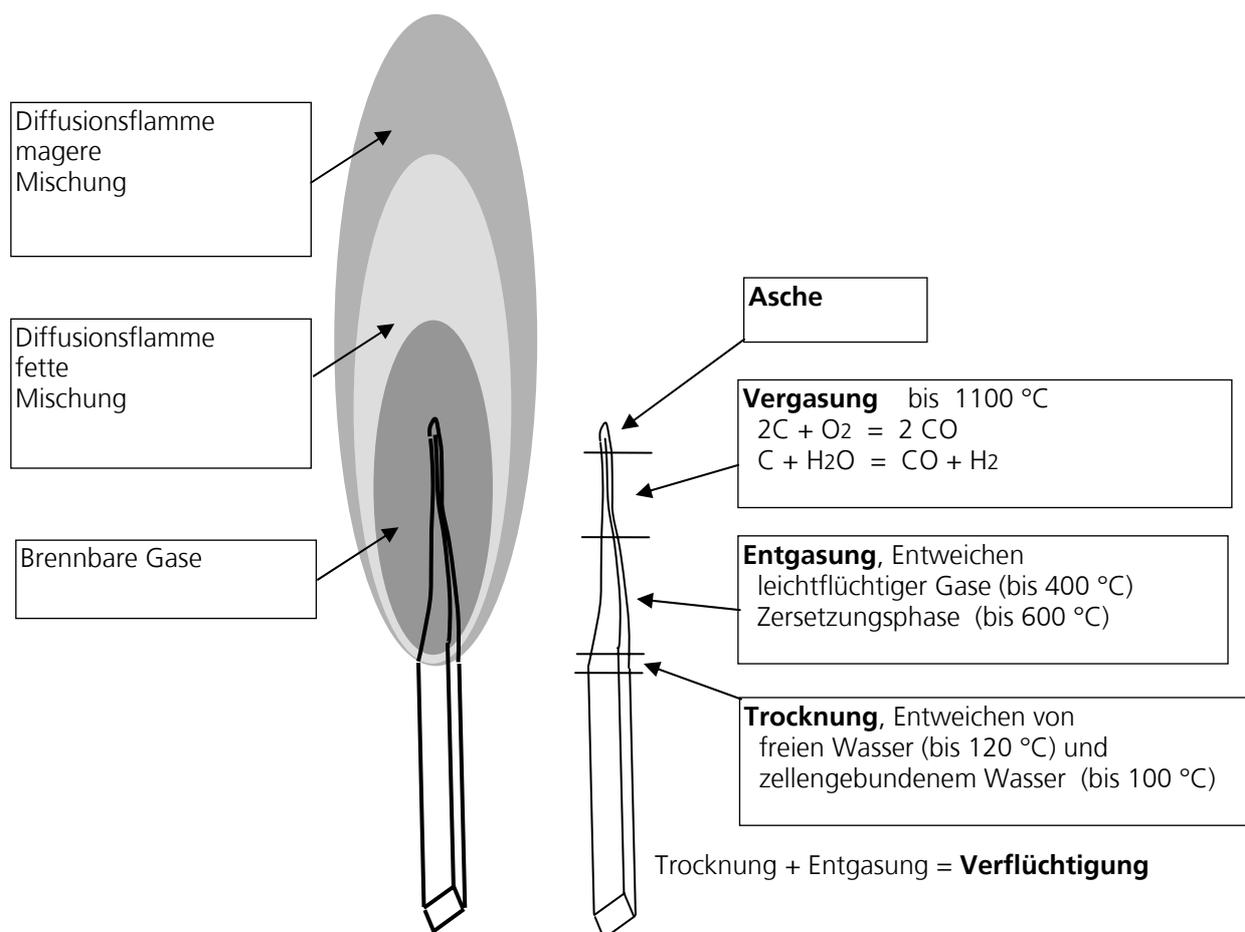


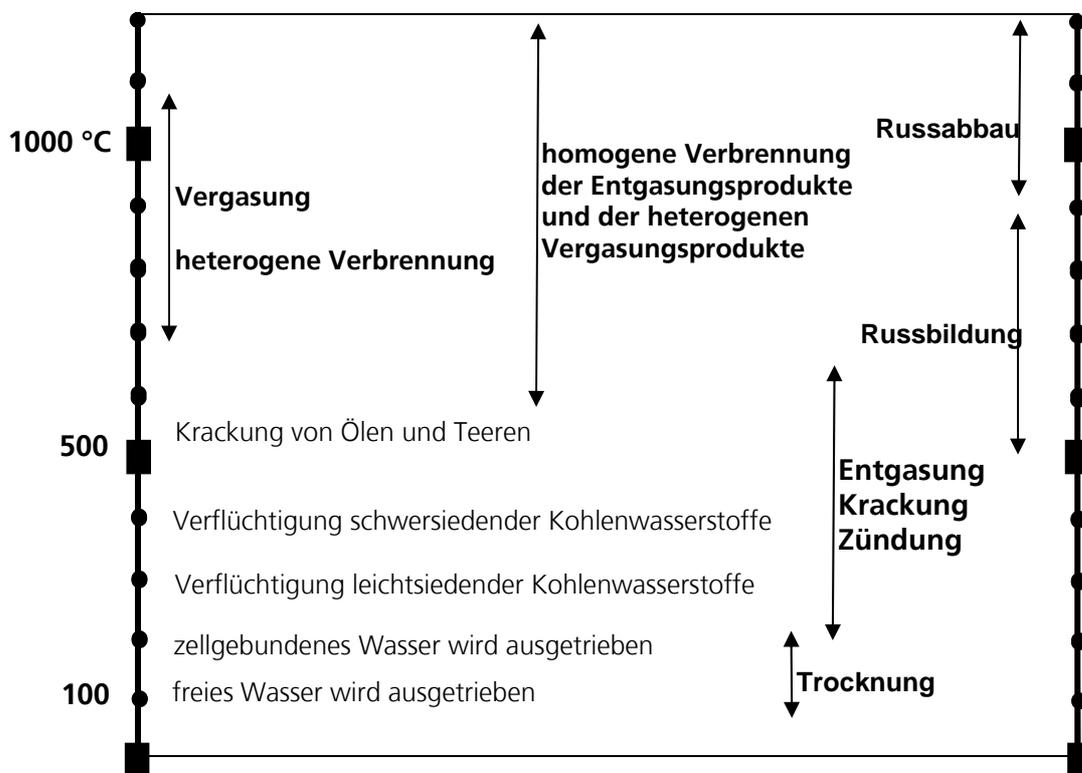
Abbildung 34: Streichholzflamme als laminare Diffusionsflamme

Die Streichholzflamme in Abbildung 34 steht stellvertretend für die Verbrennung von festen fossilen Brennstoffen, wie **Torf, Stroh, Holz**, andere **Biomassen, Kohle, Ölsande, Ölschiefer** etc. Die Mechanismen in der Kerzenflamme, in der Tropfenverbrennung und in der Streichholzflamme weisen viele Parallelen auf. Die Wärmeabgabe der Streichholzflamme lässt Wasser und die flüchtigen brennbaren Bestandteile (Methan, höhere Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde, zyklische Verbindungen und schwerflüchtige Öle bzw. Teer) aus dem Holz verdampfen. *Die flüchtigen Gase zersetzen sich durch thermische Spaltung (Krackung), dabei entsteht eine hohe Konzentration an Methylen und Acetylen.* Diese Gase verbrennen im fetten Bereich der Diffusionsflamme mit starker **Russbildung**.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Der Temperaturverlauf bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe ist in Abbildung 35 dargestellt.



**Abbildung 35:** Physikalische und chemische Vorgänge bei der Feststoffverbrennung

Der größte Anteil der Feststoffverbrennung erfolgt als homogene Gasverbrennung, d.h. eine Verbrennung der **Entgasungsprodukte** in der Gasphase. Der Gewichtsanteil der heterogenen Verbrennung für die Holzverbrennung in der Regel weniger als 10 %. Die dabei entstehende Gase sind die **Vergasungsprodukte**, also teilweise ebenfalls brennbare Gase. Die Gewichts- und Energieanteile der homogenen und der heterogenen Verbrennung einiger fossiler Brennstoffe werden in Tabelle 6 zusammengefasst.

		Kohlenstoff (wasser- u. aschefrei) %	Brennbare Gase %	Heterogener Anteil Gew. %	Energieanteil der Homogenen Gasverbrennung %	Energieanteil der Heterogenen Verbrennung %
Holz		45 – 50	40 – 45	5 – 10	> 95	3 – 5
Braunkohle	Weichkohle	65 – 70	10 – 25	50 – 60	> 70	15 – 30
	Pechkohle	70 – 75	15 – 35	40 – 50	> 75	15 – 25
Steinkohle	Flammkohle	75 – 82	35 – 40	30 – 40	> 80	10 – 20
	Gasflammkohle	82 – 85	30 – 35	40 – 50	> 75	15 – 25
	Gaskohle	85 – 87	25 – 30	50 – 60	> 70	15 – 30
	Fettkohle	87 – 89	17 – 24	60 – 70	> 65	20 – 35
	Esskohle	89 – 90	12 – 15	65 – 75	> 60	25 – 40
	Magerkohle	90 – 91,5	9 – 12	> 75	> 55	25 – 45
	Anthrazit	> 91,5	5 – 9	> 80	> 50	25 – 50

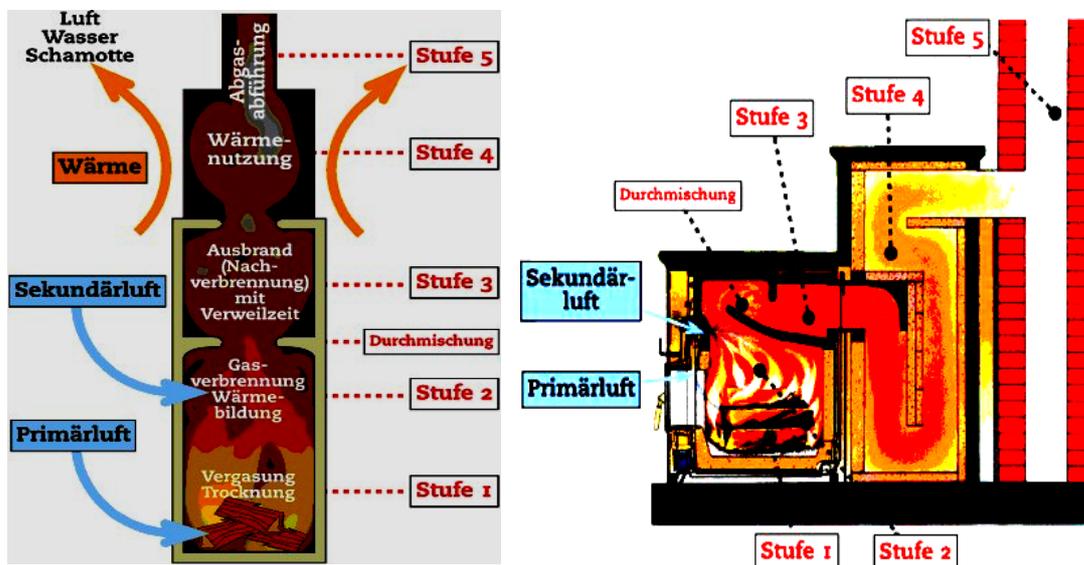
**Tabelle 6:** Gewichts- und Energieanteile der homogenen und der heterogenen Verbrennung einiger fossiler Brennstoffe

Wie paradox es auch klingt: die Feststoffverbrennung ist zum größten Teil eine Gasverbrennung.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

Im Gegensatz zu Öl- und Gaskesseln wird bei den Feststoffkesseln wegen des hohen Raum- und Zeitbedarfs der Entgasung und Vergasung (siehe Abbildungen 34 und 35) ein speziell großer Feuerraum benötigt.



**Abbildung 36:** Prinzip und technische Umsetzung der Holzverbrennung

### Regelung von Feststofffeuerungen im Haushaltsbereich:

Die Regelung erfolgt in den meisten Fällen durch Öffnung oder Drosselung der Luftzufuhr. Bei Pelletfeuerung und bei größeren Wärmeerzeugern (MW-Bereich) kann die Regelung auch über die Brennstoffzufuhr erfolgen. Die Steuergröße ist meist die Kesselsolltemperatur. Unterstützend kann die Abgastemperatur oder die Feuerraumtemperatur eingesetzt werden. Die Regelparameter drosseln durch Öffnen und Schließen von Luftklappen die Primärluftzufuhr. Die Sekundärluft wird durch Lambdasonde geregelt.

**Aufbau und Funktion der Lambda-Sonde:** Eine Lambda-Sonde besteht im Wesentlichen aus einem becherförmigen Körper aus Zirkondioxid- Keramik ( $ZrO_2$ ), der auf der abgasseitigen Oberfläche mit gasdurchlässigem Platin und einer verschleißfesten porösen Keramik beschichtet ist. Die Innenseite hat Verbindung mit der Umgebungsluft. Die Sonde wird nahe beim Abgasstutzen des Kessels angebracht. 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. Der Temperatureinfluss ist so groß, dass die Lambda-Sonde bei Taktbetrieb nicht ohne weiteres einsetzbar ist.



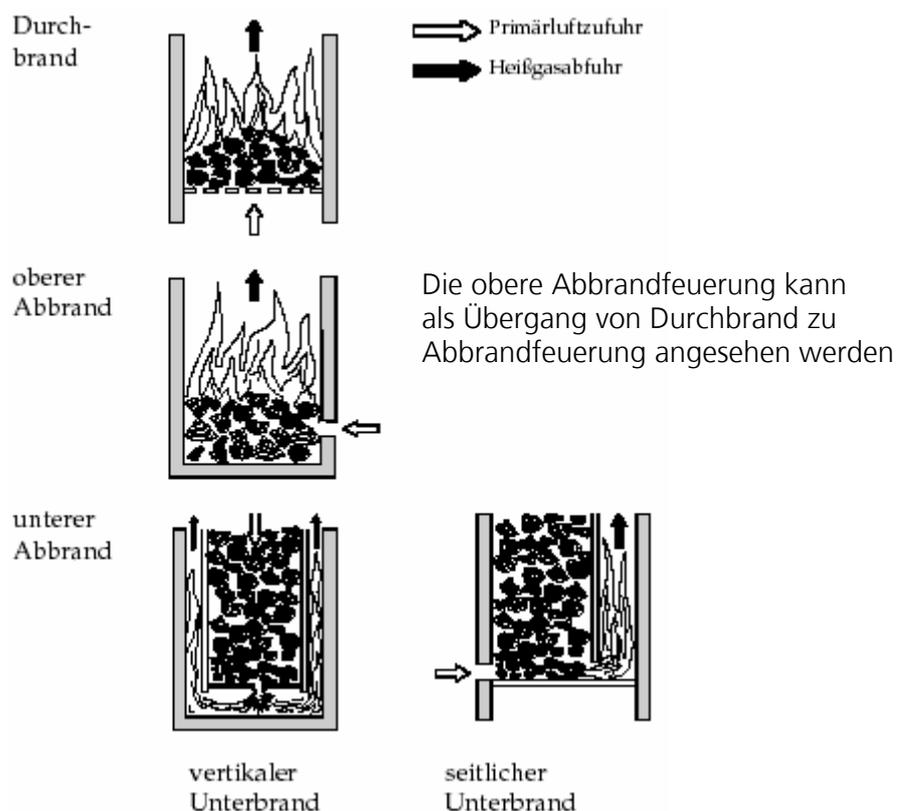
**Abbildung 37:** Lambda-Sonde

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

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

### Klassifizierung der Feststofffeuerungen



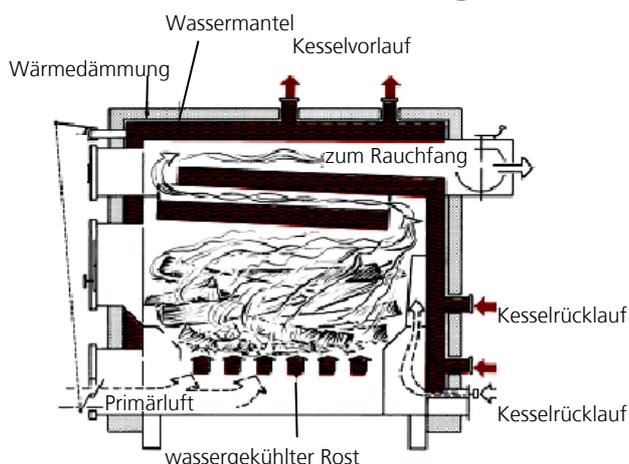
**Abbildung 38:** Einteilung nach Brennstoff- und Luftzufuhr und Abgasabfuhr

**Durchbrandfeuerung** Bei der Durchbrandfeuerung brennt die Flamme durch die gesamte Brennstofffüllung. Beispiele sind: Küchenherd, Kamin, einfacher Kachelofen, einfacher Festbrennstoffofen. Durchbrandkessel benötigen besonders große Feuerräume. Die Verbrennung ist schwer zu kontrollieren. Die Nachlegeintervalle sind sehr kurz. Das Rauchgas enthält einen hohen Anteil an unverbrannten Komponenten. Die Verbrennungsleistung hängt vom Beladungsstatus des Brennraumes ab (viel Brennstoff im Brennraum führt zu hoher Verbrennungsleistung). Aufgrund bestehender Umweltforderungen sind Durchbrandkessel bei Neuanlagen nicht zu anzutreffen.

**Abbrandfeuerung:** Die Verbrennung erfolgt im unteren Teil des Füllraumes. Beispiele sind: moderne Kachelöfen, Festbrennstofföfen und Festbrennstoffkessel. Die Ausbildung des Füllraumes und der Rauchzüge wird auf einen bestimmten Brennstoff (Holz, Kohle, Brikett, Koks) abgestimmt. Die Nachlegeintervalle sind größer und die Verbrennungsqualität ist besser als bei der Durchbrandfeuerung. Die Verbrennungsleistung kann durch die Primärluftdosierung geregelt werden.

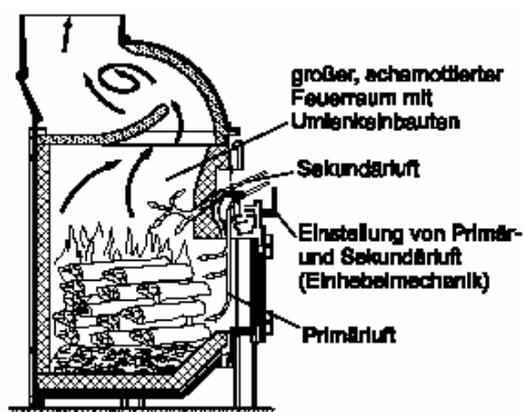
**Aufgabe 20:** Warum eignet sich besser ein Abbrandkessel zur Leistungsregelung als die Durchbrandfeuerung?

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

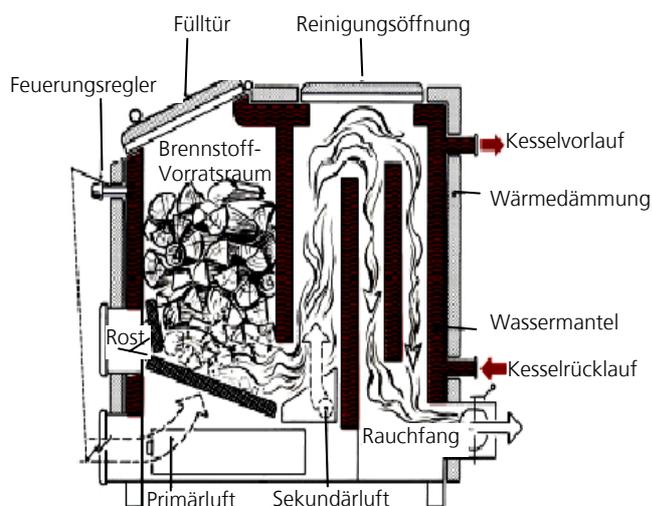


**Abbildung 39:** Heizkessel mit Durchbrandfeuerung

Nach der Brennstofffüllung steigt die Wärmeleistung und somit die Kesseltemperatur. Bei zu hoher Kesseltemperatur wird die Wärmeleistung durch Drosselung der Primärluft reduziert. Die Sekundärluftzufuhr ist nicht regelbar. Daher entsteht bei der Durchbrandfeuerung zu viel Russ.



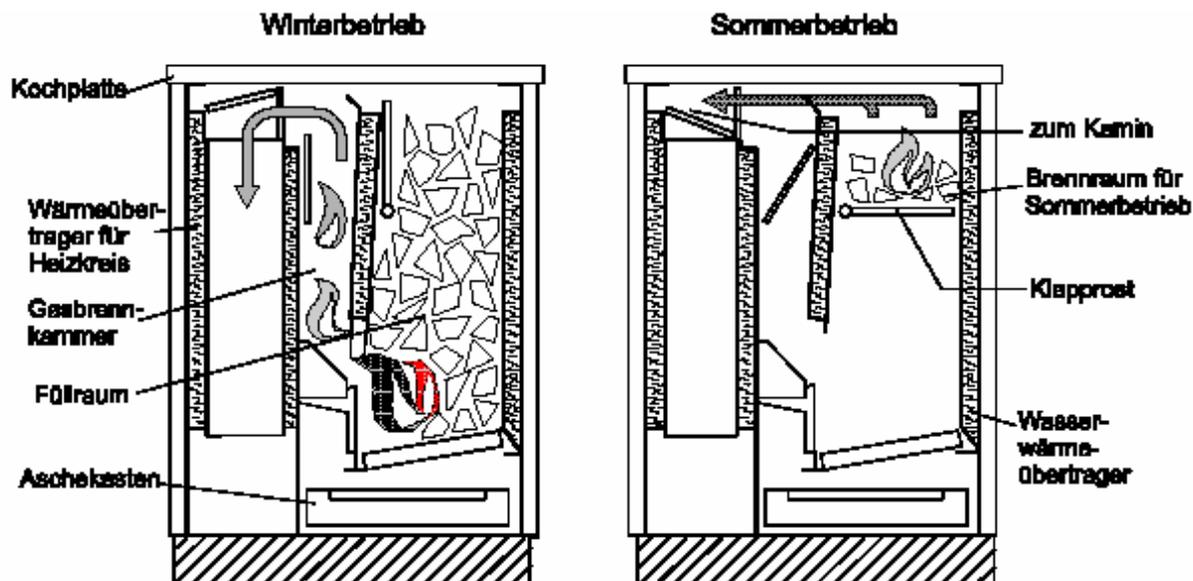
**Abbildung 40:** Obere Abbrandfeuerung



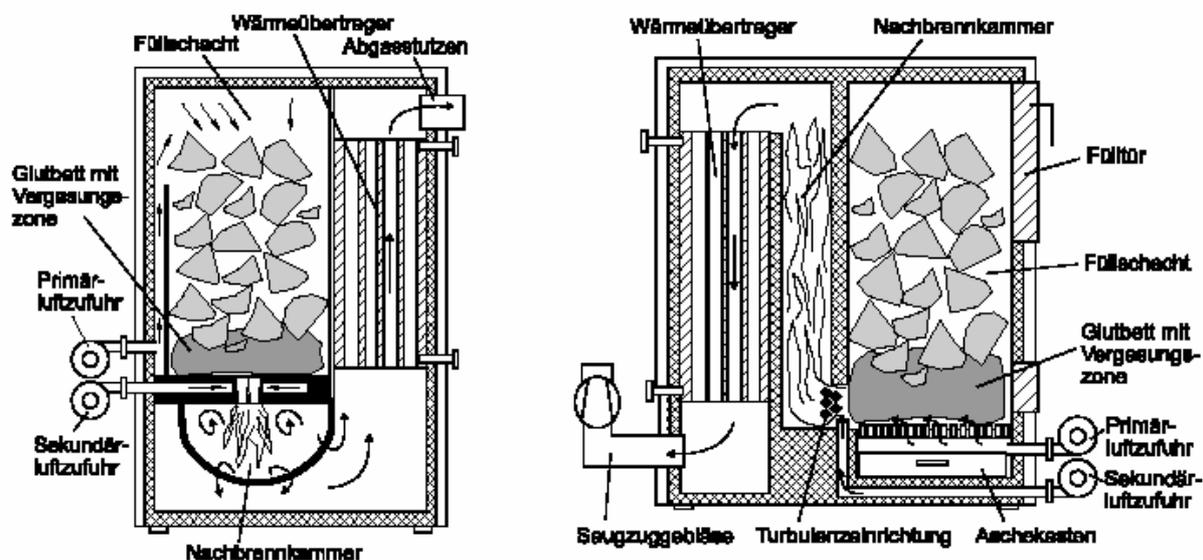
**Abbildung 41:** Heizkessel mit Abbrandfeuerung

Nach der Brennstofffüllung steigt die Wärmefreisetzung weniger an als bei der Durchbrandfeuerung, daher ist diese Feuerung deutlich schadstoffärmer.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen



**Abbildung 42:** Heizkessel mit seitlichem Unterbrand im Winterbetrieb und mit Durchbrand im Sommerbetrieb



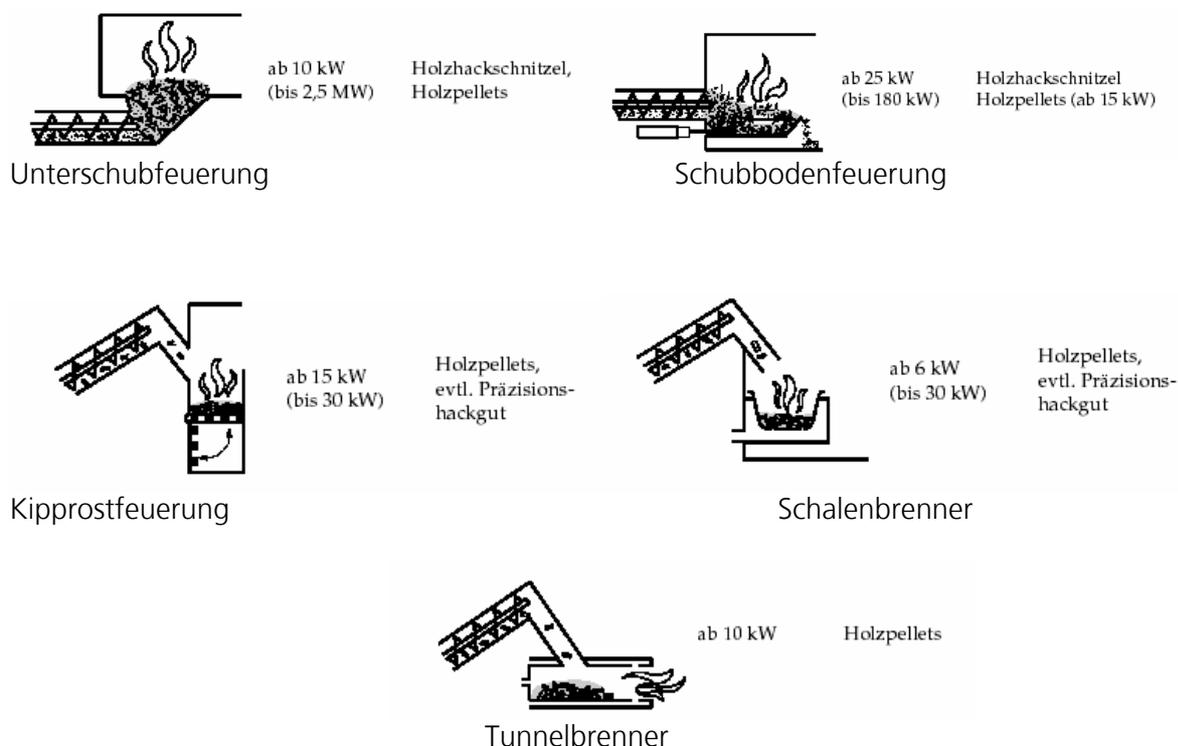
**Abbildung 43:** Sturzbrand und seitlicher Abbrandkessel

Bei größeren Anlagen (Abbildung 43) wird die Verbrennungsluft durch Gebläse der Verbrennung zugeführt. Primär- und Sekundärluft werden unabhängig voneinander geregelt. Durch die Primärluftregelung (Steuerung über Wärmebedarf) wird die Wärmefreisetzung beeinflusst, durch die Sekundärluftregelung (Steuerung über Lambda-Sonde) die Verbrennungsqualität.

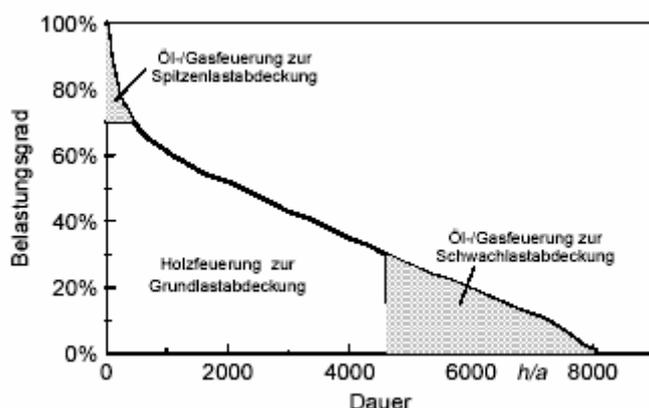
Bei Abbrandkessel nach den Abbildungen 39 – 43 wird der Brennstoff manuell zugeführt. Abbildung 44 zeigt Möglichkeiten der automatischen Brennstoffzufuhr. Die kleinstmögliche Wärmeleistung liegt hierbei für Pärzisionshackgut bei 10 kW, für Holzpelletsfeuerungen bei 6 kW.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)



**Abbildung 44:** Automatisch beschickte Kleinanlagen



**Abbildung 45:** Sinnvolle Kombination von Feststofffeuerungen mit Heizöl oder Gasfeuerung

Quelle zu Abbildungen 38 - 45: Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen

<http://www.fnr-server.de/bioenergie/downloads/BioenergieKleinanlagen/kap6.pdf>

Bei Öl- und Gasfeuerungen wird Wärmefreisetzung dem momentanen Heizwärmebedarf durch Taktbetrieb angeglichen. Da Feststofffeuerungen den Taktbetrieb nicht zulassen, sind sie bei Kleinanlagen für die Heizung in der Übergangszeit wenig geeignet.

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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.

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

$$p_1 \cdot V_1 / T_1 = p_2 \cdot V_2 / T_2$$

<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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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	$\frac{\sum n_i \cdot D_i}{\sum n_i}$
$D_{20}$	Flächenmittelung	$(\frac{\sum n_i \cdot D_i^2}{\sum n_i})^{1/2}$
$D_{30}$	Volumenmittelung	$(\frac{\sum n_i \cdot D_i^3}{\sum n_i})^{1/3}$
$D_{32}$ <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 $D_{0,999}$	

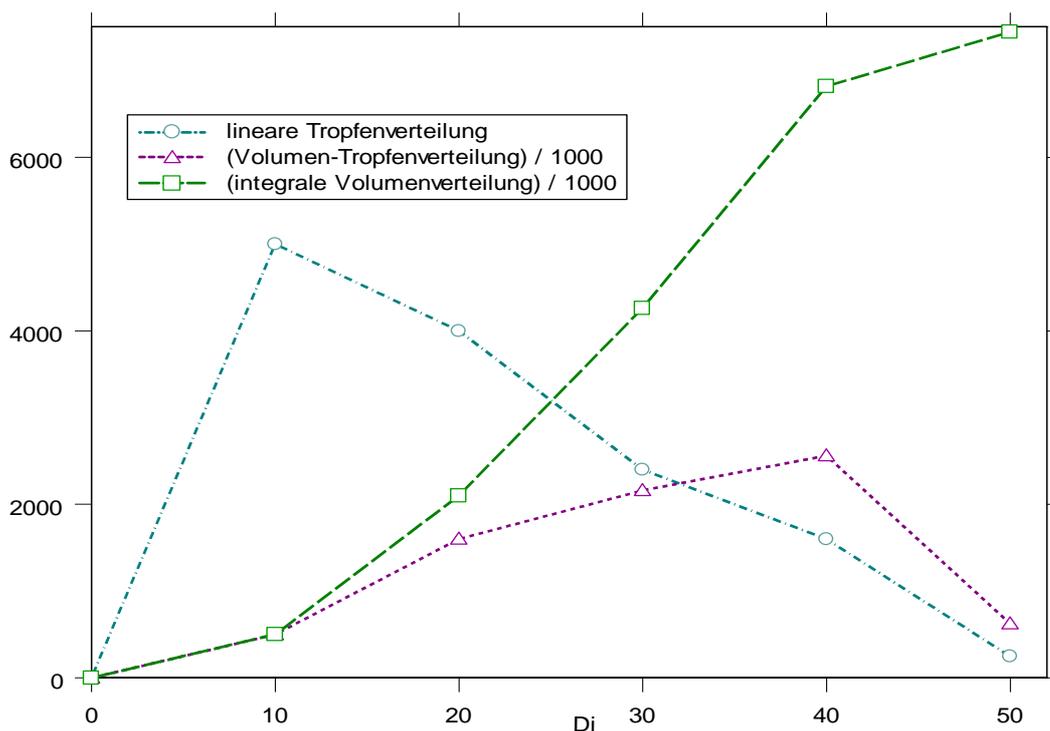
Klasse	Anzahl der Tropfen	Größe				
<i>i</i>	$n_i$	$D_i$	$n_i \cdot D_i$	$\frac{\sum n_i \cdot D_i}{\sum n_i}$	$n_i \cdot D_i^2$	$(\frac{\sum n_i \cdot D_i^2}{\sum n_i})^{1/2}$
1	500	10	<b>5000</b>		50000	
2	200	20	4000		<b>80000</b>	
3	80	30	2400		72000	
4	40	40	1600		64000	
5	5	50	250		12500	
$\Sigma$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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

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>	

$D_{10} = 16,1\mu\text{m}$   
 $D_{0,1} \sim 11,5\mu\text{m}$   
 $D_{0,999} \sim 48,9\mu\text{m}$

$D_{20} = 18,4\mu\text{m}$   
 $D_{0,5} \sim 27,5\mu\text{m}$

$D_{30} = 20,8\mu\text{m}$   
 $D_{0,9} \sim 39,5\mu\text{m}$

$D_{32} = 27,7\mu\text{m}$   
 $D_{0,99} \sim 48,7\mu\text{m}$

## 4 – Heizöl- und Feststofffeuerungen

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

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

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

$D_{0,999} = 100 \mu\text{m}$ . 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 ppm

15 % = 150 000 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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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  $D^2$ -Gesetz verdampfen die kleinen Tropfen extrem schnell und verbessern die Zündstabilität. Der Tropfendurchmesser  $D_{0,1}$  beschreibt diesen Sprayanteil.

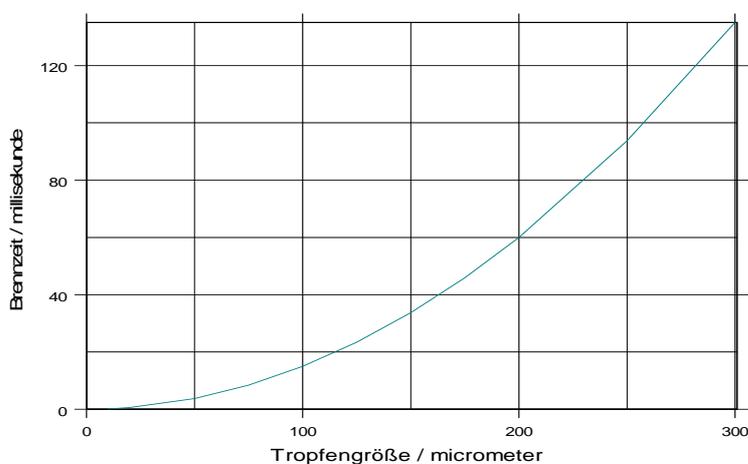
Wenn 99 % der Tropfen verbrannt sind, ist die Verbrennung weitgehend abgeschlossen. Dieser Sprayanteil,  $D_{0,99}$ , bestimmt das Flammenvolumen.

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 %  $CO_2$ -Gehalt:

1% von 14%  $CO_2$  = 0,14  $CO_2$  entspricht 0,14 % CO.

Da 100 % =  $10^6$  ppm, 1 % =  $10^4$  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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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 Volltanken? 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

[zoltan.farago@dlr.de](mailto:zoltan.farago@dlr.de)

**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.