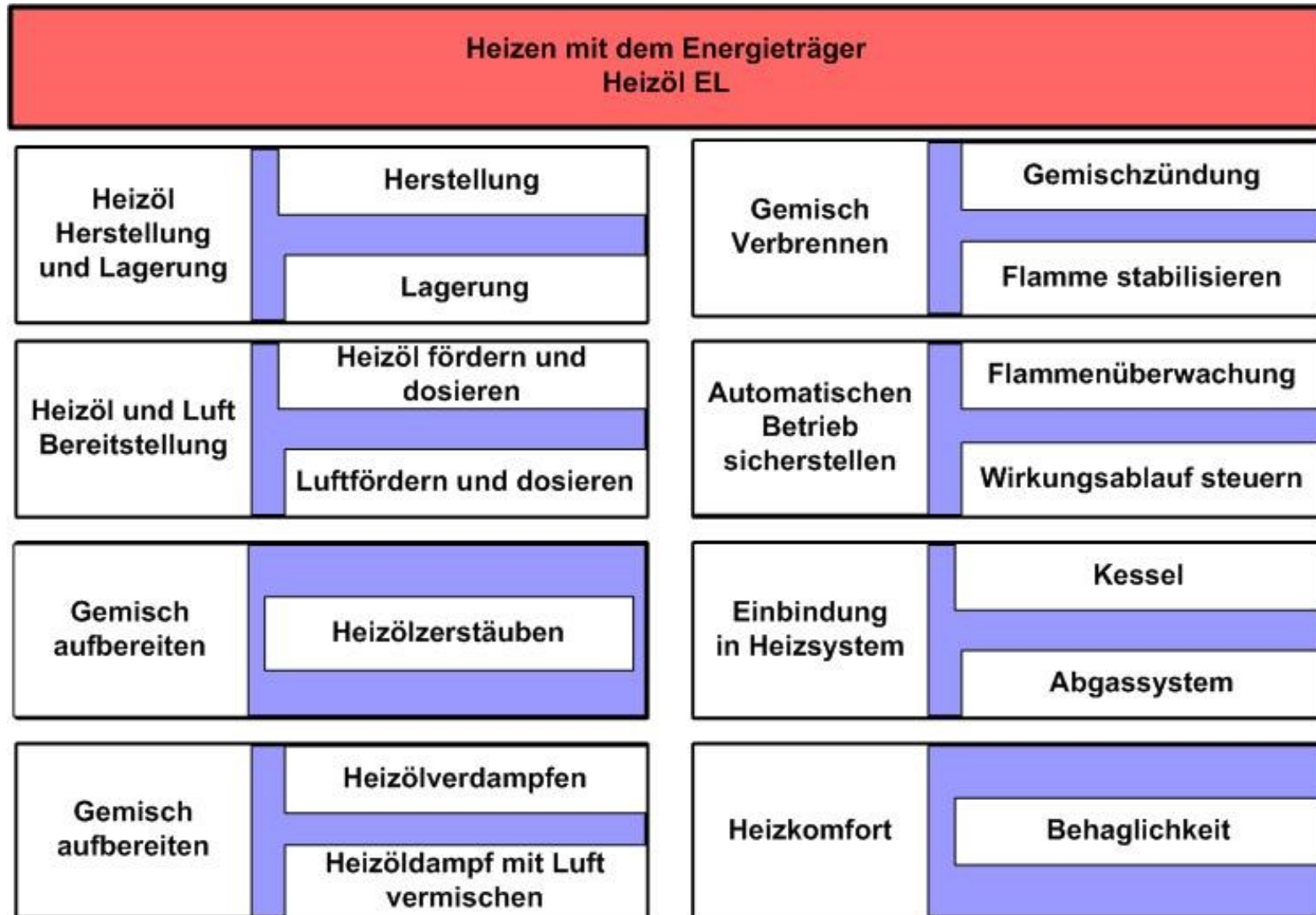
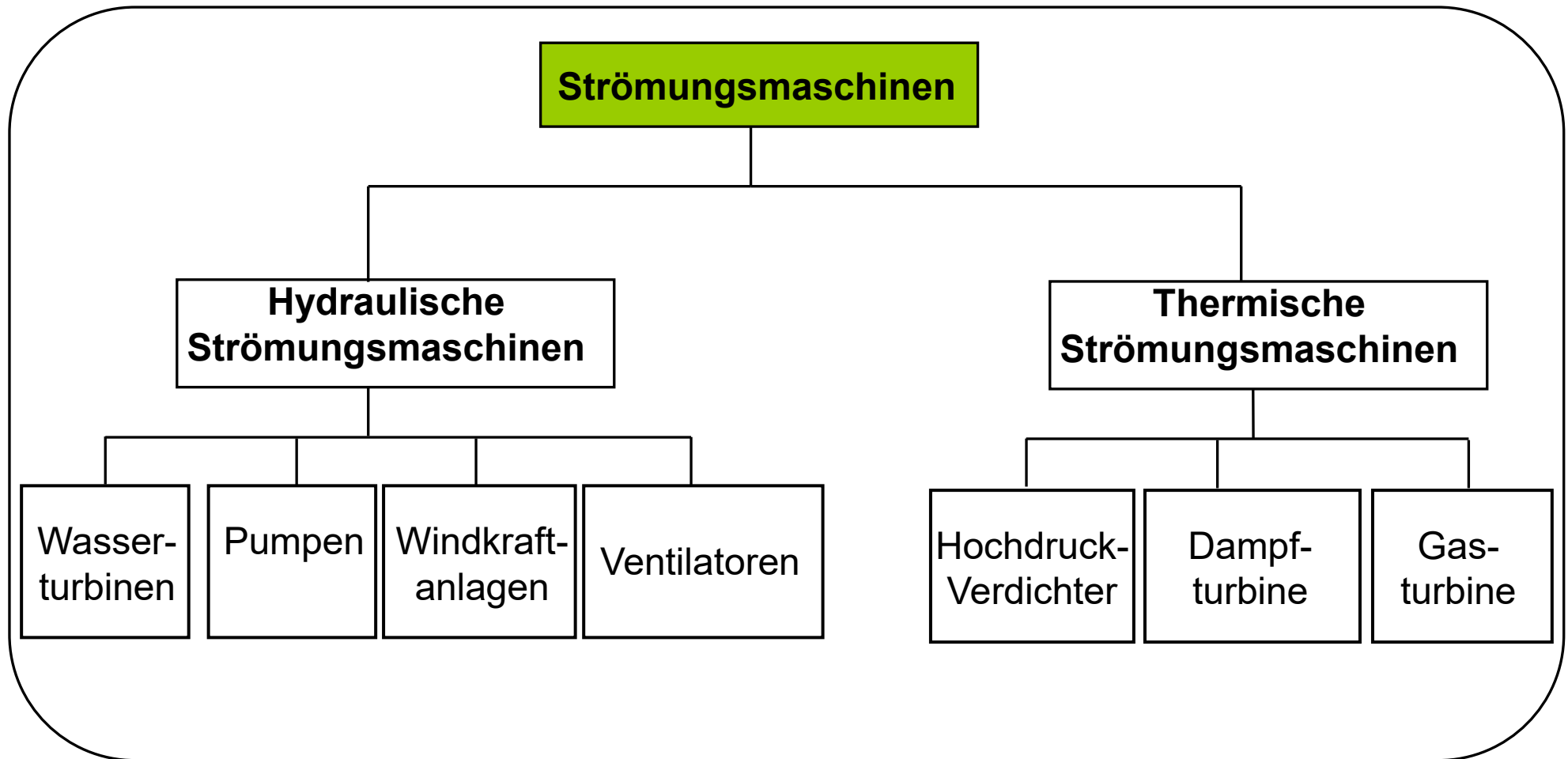


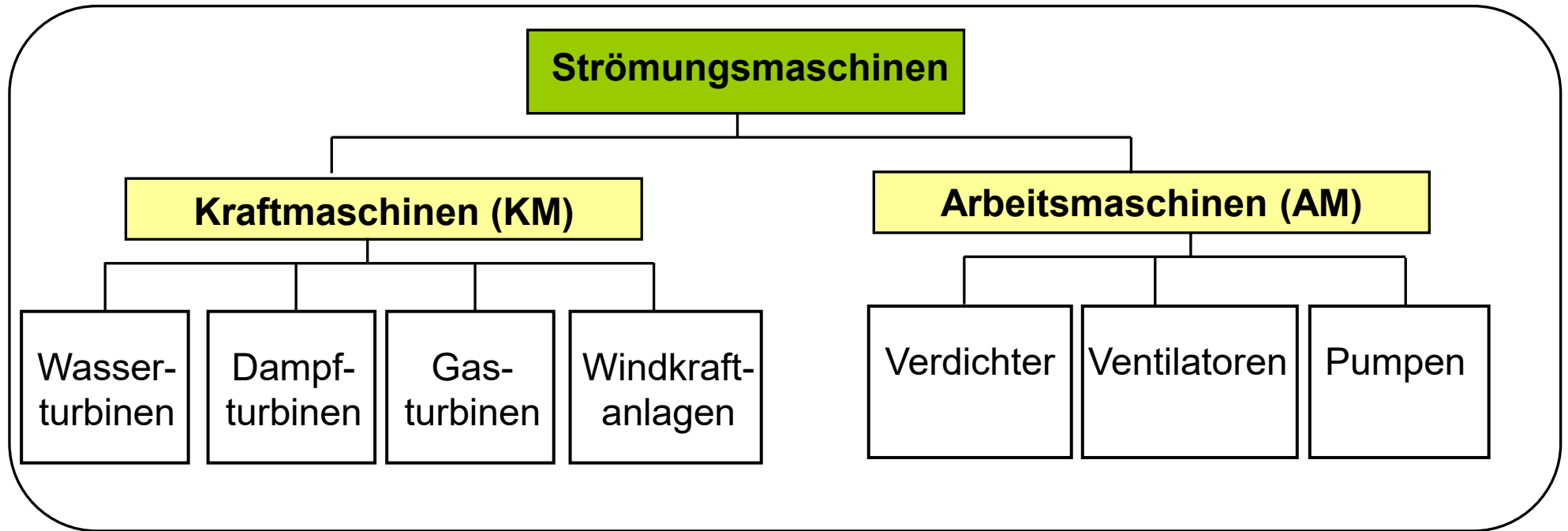
# Angewandte Thermofluiddynamik

Dr.-Ing. F. v. Issendorff

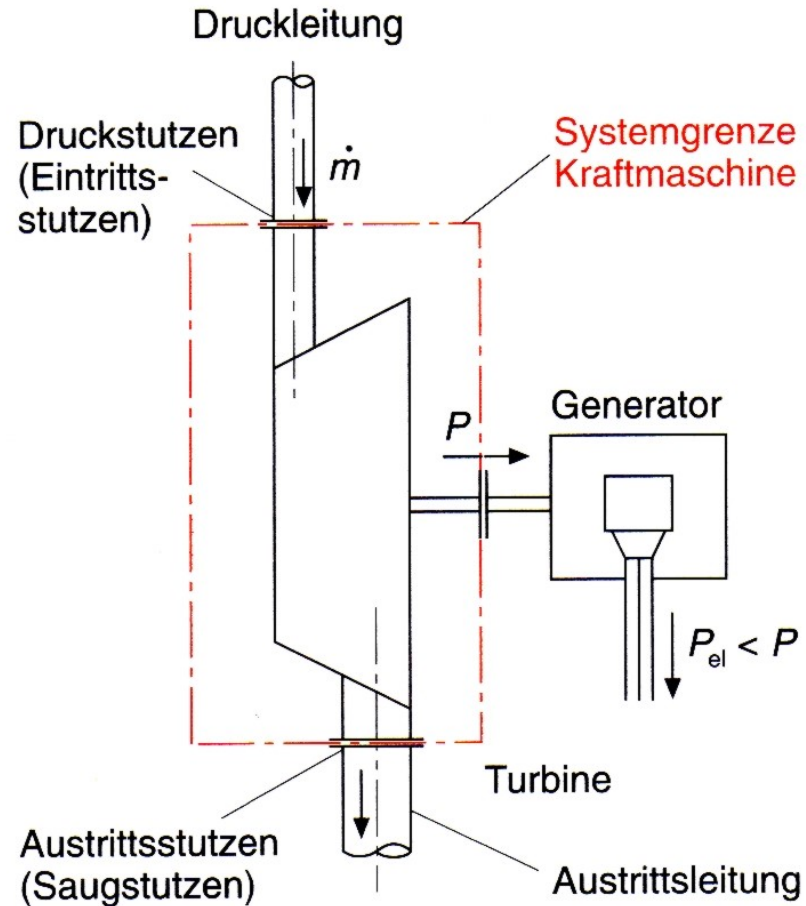
# Inhalte der Vorlesungen



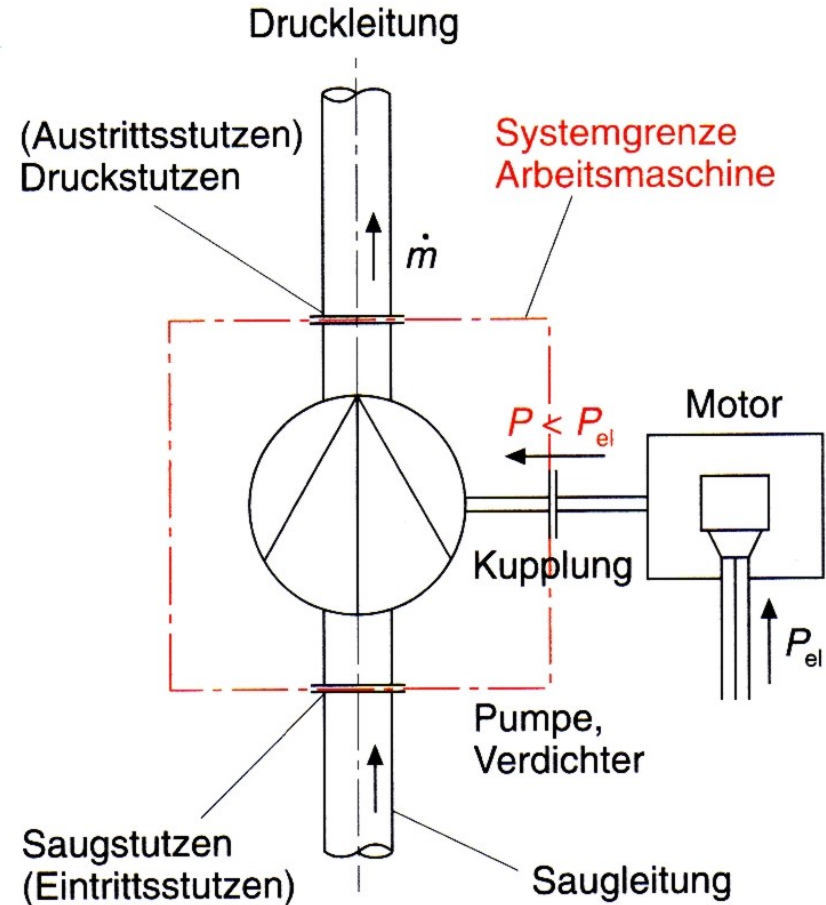




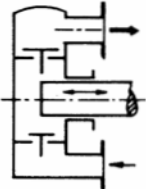

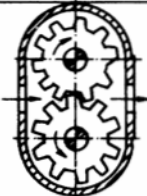
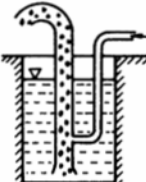
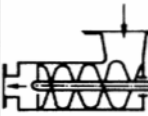

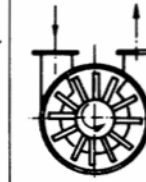

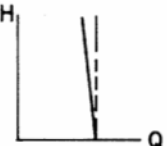
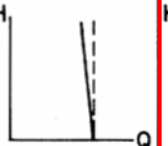
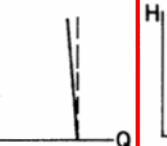
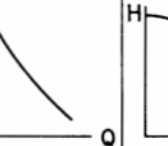
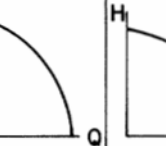
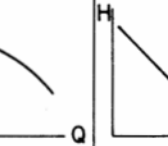
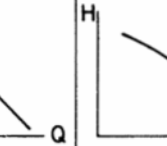
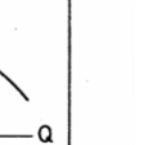
## Prinzip Kraftmaschine (KM)



## Arbeitsmaschine (AM) /1/



# Pumpen

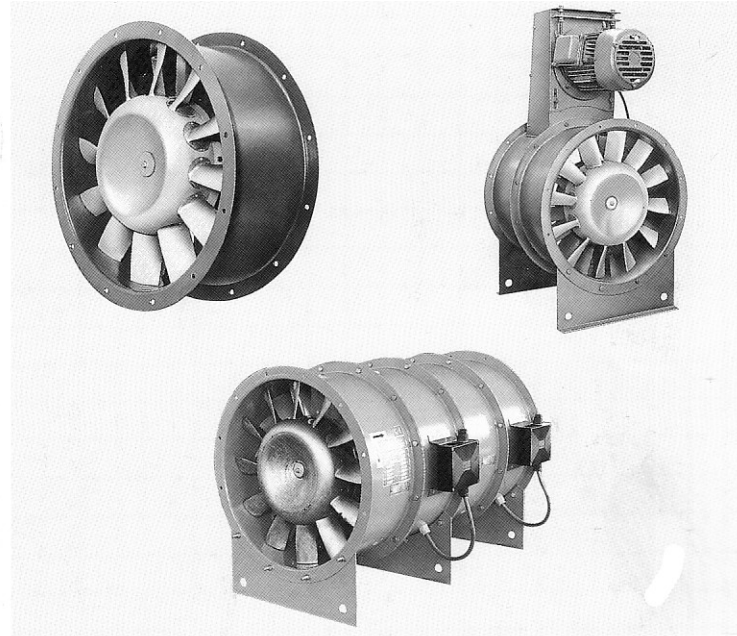
Arbeitsprinzip	Verdrängerprinzip			Auftriebsprinzip	Reibungsprinzip	Strömungsprinzip		Strahlprinzip
Beispiele	Kolbenpumpe	Kreiskolbenpumpe	Zahnradpumpe	Mammutpumpe	Schneckenpumpe	Kreiselpumpe	Seitenkanalpumpe	Strahlpumpe
Prinzipbild								
Förderung	pulsierend	pulsierend	schwach pulsier.	gleichförmig	nahezu gleichförm.	gleichförmig	gleichförmig	gleichförmig
Grundsätzliches Betriebsverhalten	Förderstrom praktisch unabhängig von der Förderhöhe				Förderstrom von Förderhöhe abhängig			
Q-H-Kennlinie								
maximal erreichbare Wirkungsgrade	≈ 95%	≈ 92%	≈ 92%	≈ 46%	≈ 70%	≈ 92%	≈ 50%	≈ 30%
Einsatz	bis zu sehr hohen Drücken, kleine bis mittlere Förderströme, eignet sich als Dosierpumpe			Da Pumpe keine beweglichen Teile hat, Eignung für besonders schonende Förderung	Förderung zäher, verschmutzter, pasteuser Medien, schonende Förderung	Universalpumpe für dünnflüssige Medien, Großer Einsatzbereich für Förderstrom und Förderhöhe	Selbstansaugende Pumpe für kleinere Förderströme und große Förderhöhe	Zum Absaugen, Heben und Mischen von Flüssigkeiten verwendbar.

Schematische Darstellung verschiedener Pumpen aus Bohl (1979)

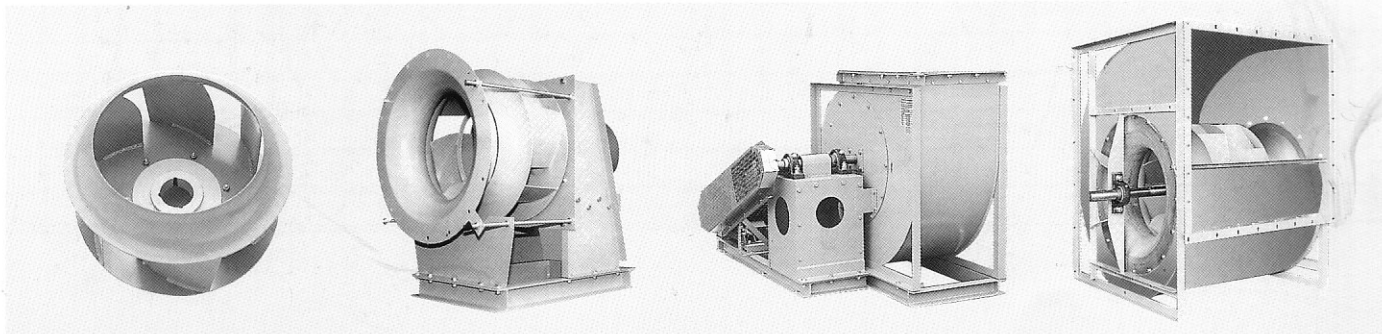
# Radial- und Axialventilatoren



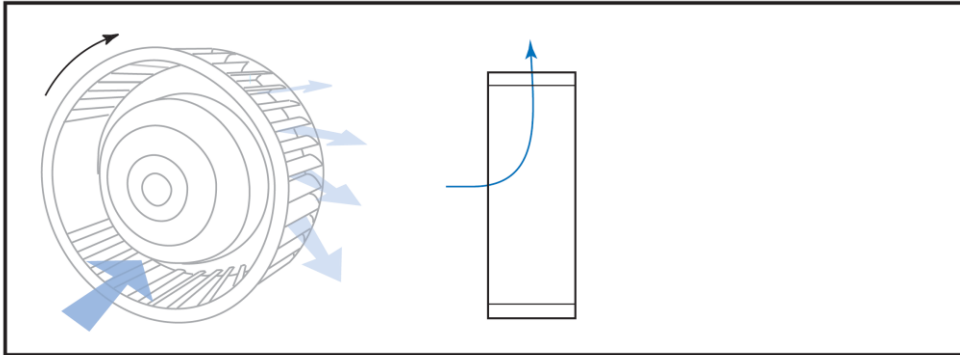
Brandgasventilatoren als Dach-, Wand- oder Zentralventilatoren



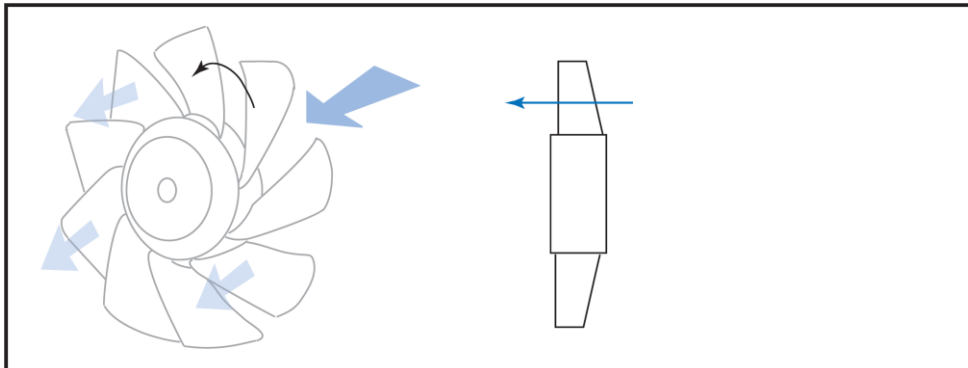
Axialventilatoren mit direktem Antrieb oder Antrieb über Keilriemen



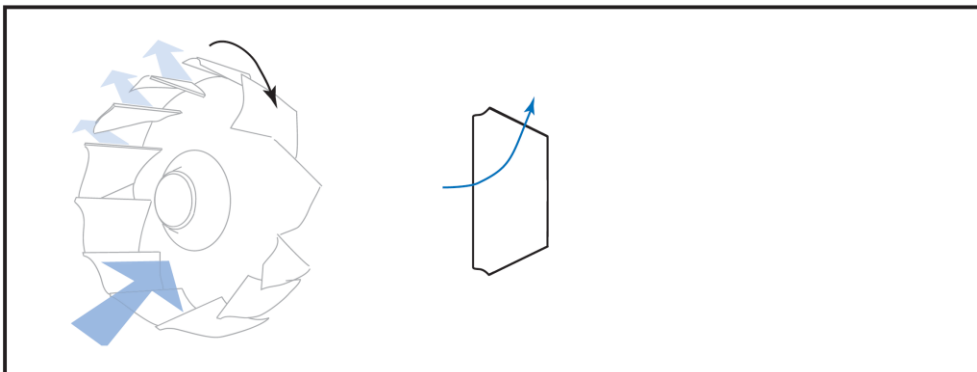
Freilaufende Energiespar-Räder, freilaufende Radialventilatoren, ein- und zweiseitig saugende Lüftungs-Radialventilatoren



**Radialventilator**  
Kleine Förderströme  
Große Förderhöhe

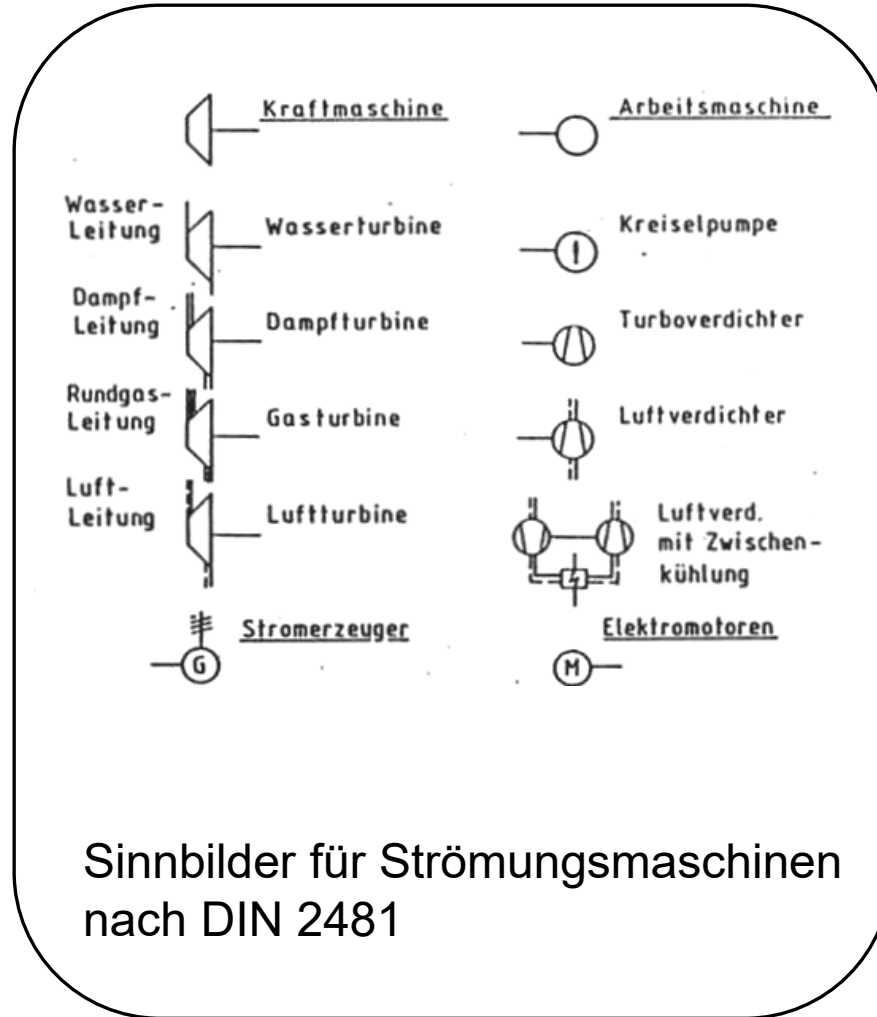


**Axialventilator**  
Große Förderströme  
Kleine Förderhöhe



**Diagonallaufventilator**

*Der Diagonallaufventilator ist eine Mischung zwischen Radial- und Axialventilator. Die Luft wird in axialer Richtung gefördert, wird aber dann um 45° im Laufrad umgeleitet.*



Sinnbilder für Strömungsmaschinen  
nach DIN 2481

## Hydraulische Strömungsmaschinen

Volumenstrom: 
$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{m} \cdot v = \text{konst.}$$

mit 
$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

$V$	Volumenstrom $\text{m}^3$	$v$	spez. Volumen $\text{m}^3/\text{kg}$
$t$	Zeit $\text{s}$	$p$	Absolutdruck $\text{N}/\text{m}^2$
$\dot{m}$	Massenstrom $\text{kg}/\text{s}$	$R$	spez. Gaskonstante $\text{Nm}/\text{kgK}$
$\rho$	Dichte $\text{kg}/\text{m}^3$	$T$	absolute Temperatur $\text{K}$

## Thermische Strömungsmaschinen

Massenstrom:  $\dot{m} = \frac{m}{t}$   $m$  Masse in kg

örtlicher Volumenstrom an der Stelle i:

$$\dot{V}_i = \frac{\dot{m}}{\rho_i} = \dot{m} \cdot v_i$$

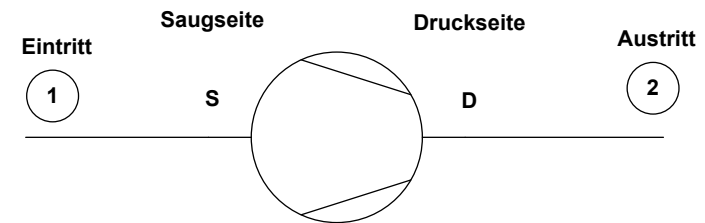
$\rho_i$  : örtliche Dichte =  $f(p_i, T_i, x)$   
 $v_i$  örtl. spez. Volumen =  $f(p_i, T_i, x)$   
 $p_i$  örtl. Absolutdruck bei i  
 $T_i$  örtl. absolute Temperatur bei i  
 $x$  Dampfnässe, abs. Feuchte

*Abhängig von Druck und Temperatur bestimmt man die Dichte und das spez. Volumen für das Fluid mit Tabellen, Diagrammen oder EDV-Programmen (VDI-Wasserdampf-tafeln, Mollier-(h-s-)Diagramme).*

## Spezifische Stutzenarbeit der Pumpe:

Aus den Meßwerten  $p_S$  und  $p_D$  an Saug- und Druckstutzen der Pumpe ist unter Berücksichtigung der Strömungsgeschwindigkeiten  $c_S$  und  $c_D$  die spezifische Stutzenarbeit  $Y$  der Pumpe zu bestimmen. Dafür ist die Bernoulli-Gleichung zwischen den Querschnitten A und E ohne Berücksichtigung von Verlusten anzusetzen :

$$Y = \frac{p_D - p_S}{\rho} + \frac{c_D^2 - c_S^2}{2} + g \cdot (Z_D - Z_S) \quad [m^2 / s^2]$$



## spez. Energiegefälle bei

Kraftmaschinen: zwischen Ein – und Austrittsstutzen

Arbeitsmaschinen: zwischen Aus – und Eintrittsstutzen

Andere Bezeichnungen anstelle von  $Y$ :

- |                   |                    |                            |
|-------------------|--------------------|----------------------------|
| ➤ Wasserturbinen: | Fallhöhe           | $H = Y/g \text{ m}$        |
| ➤ Kreiselpumpen:  | Förderhöhe         | $H = Y/g \text{ m}$        |
| ➤ Ventilatoren:   | spez. Förderarbeit | $Y \text{ m}^2/\text{s}^2$ |

## Volumenstrom:

Die Bestimmung des Fördervolumenstromes erfolgt mit Hilfe einer Ringkammer-Messblende nach DIN EN ISO 5167-1 für inkompressible Medien Die Druckdifferenz an der Blende wird mit einer Differenzdruckmessdose ermittelt. Es ist darauf zu achten, dass das System der Messleitungen sorgfältig entlüftet ist.

## Förderhöhe H

Üblich ist im Pumpenbau statt der Angabe der spezifischen Stutzenarbeit die Angabe einer Förderhöhe H

$$H = \frac{Y}{g} \quad [m]$$

## Totaldruckerhöhung der Pumpe

$$\Delta p_t = \rho \cdot g \cdot H \quad [Pa]$$

$$\Delta p_t = \rho \cdot Y \quad [Pa]$$

$$\Delta p_t = \frac{P}{\dot{V}} \quad [Pa]$$

Die Druckerhöhung  $\Delta p$  einer Pumpe hängt von folgenden Parametern ab

- Volumenstrom
- Durchmesser D des Laufrades
- Dichte  $\rho$  des Fördermediums
- Zähigkeit des Fördermediums
- Drehzahl n der Maschine

## Nutzleistung P

Mit Hilfe des Massenstroms läßt sich die Nutzleistung bestimmen :

$$P = Y \cdot \dot{m} \quad [W]$$

## Mechanische Leistung und Wirkungsgrad der Pumpe

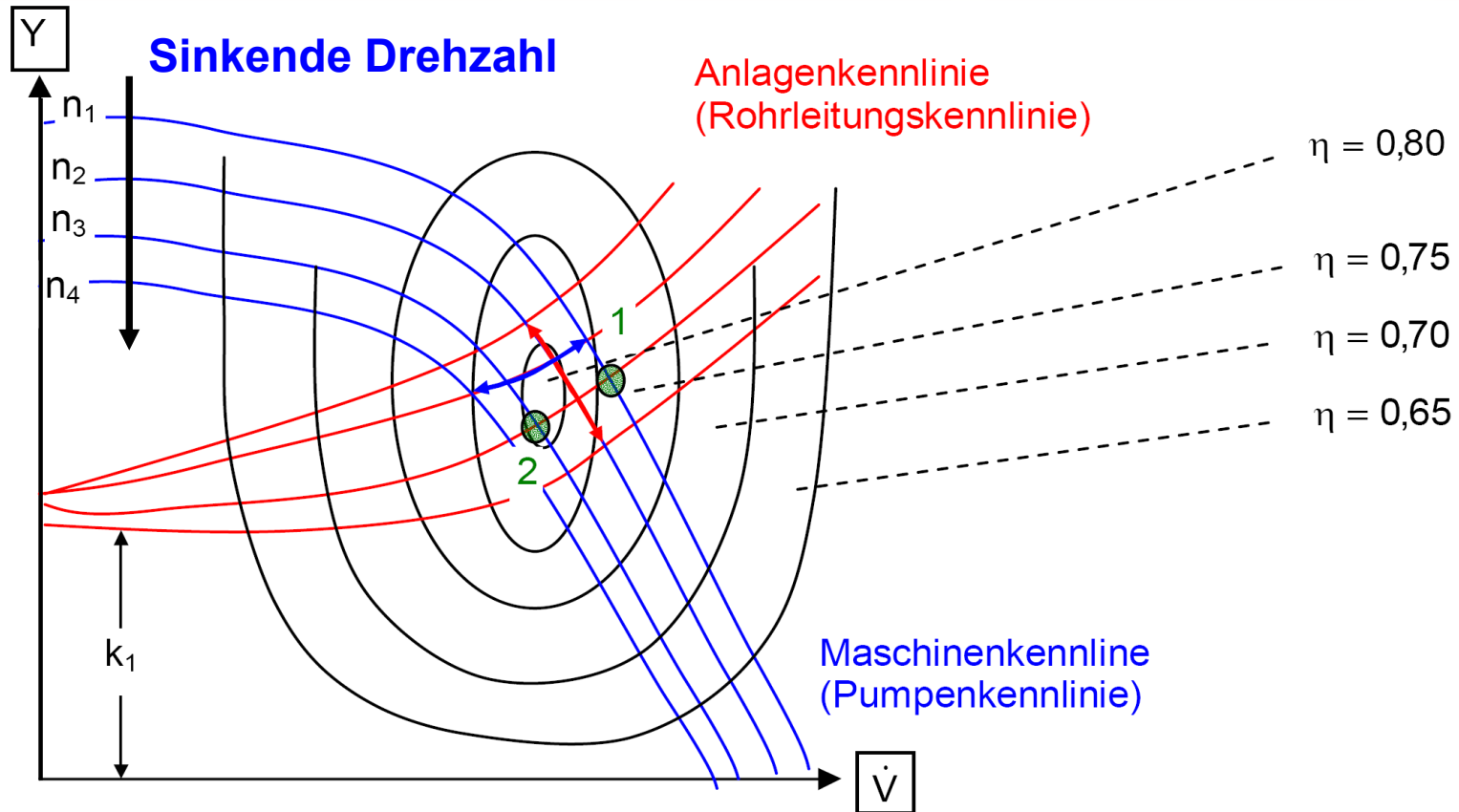
Gemessen wird das Antriebsdrehmoment der Pumpe mit Hilfe einer zwischen Motor- und Pumpenwelle befindlichen Drehmomentmesswelle. Die mechanische Wellenleistung ist

$$P_{mech} = M_d \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad [Nm / s = W]$$

## Hydraulischer Wirkungsgrad

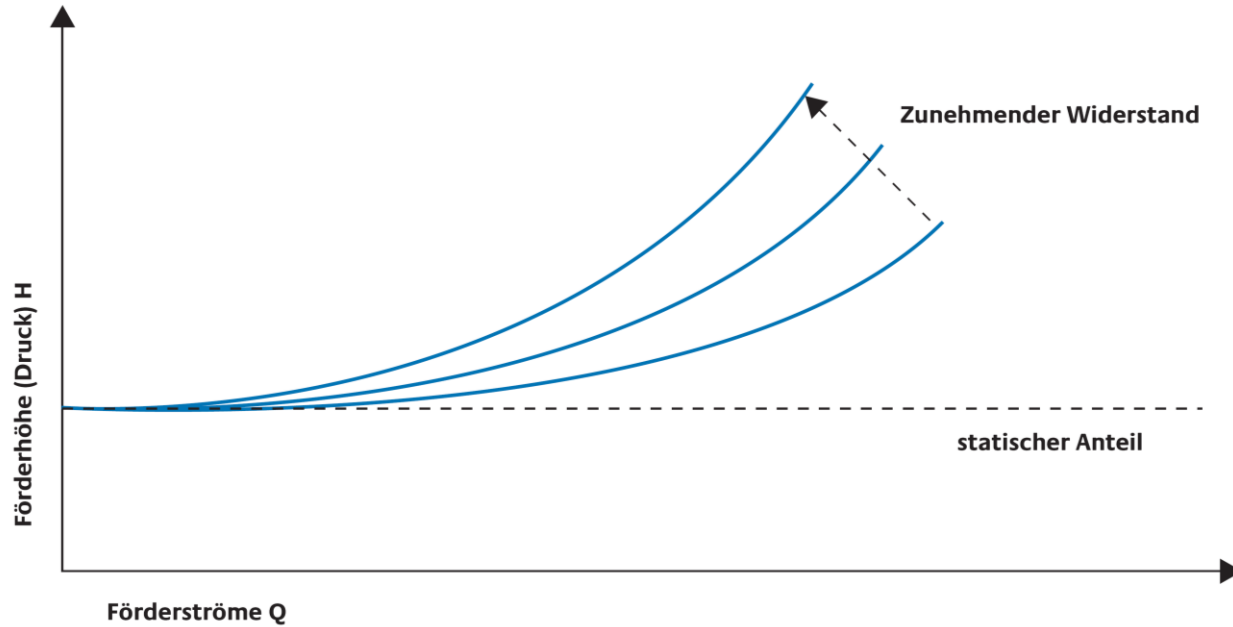
Der hydraulische Wirkungsgrad der Pumpe berechnet sich aus dem Verhältnis der Nutzleistung der Pumpe und der mechanischen Leistung an der Welle

$$\eta = \frac{P}{P_{mech}}$$



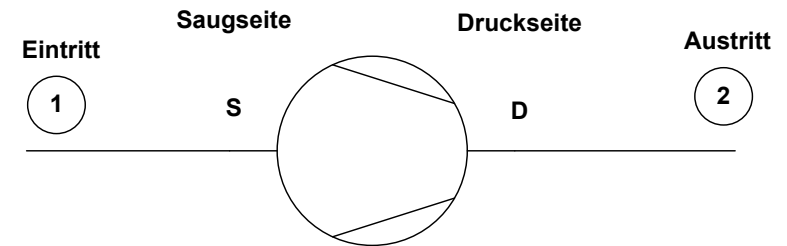
Anlagenkennlinie durch Widerstände beeinflussbar  
Maschinenkennlinie durch Drehzahl bzw. Laufradform beeinflussbar

# Anlagenkennlinie



$$Y_A = \underbrace{\frac{p_2 - p_1}{\rho} + g \cdot (Z_2 - Z_1)}_{\text{statischer Anteil}} + \underbrace{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{\Delta p_v}{\rho}}_{\text{dynamischer Anteil}} \quad [m^2 / s^2]$$

$$\frac{\Delta p_v}{\rho} = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \left( \sum \xi + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right) \quad ; \quad c = \frac{\dot{V}}{A}$$



## Literatur:

/1/ Bohl, W., Elmendorf, W.: Strömungsmaschinen 1. Würzburg: Vogel Buchverlag, 9. Auflage, 2004.

/2/ KSB-Kreiselpumpenlexikon. Frankenthal, 3. Auflage, 1989.

## Weitere verwendete Literatur:

Bommes, L....(Hrsg.). Ventilatoren. Essen: Vulkan-Verlag, 2. Auflage, 2003.

Reinartz, D.: Abnahme – und Leistungsmessungen, Essen: HdT-Seminar, April 2006.

Reinartz, D.: Ventilatoren. Düsseldorf: VDI-Wissensforum, Lüftungs- und Klimatechnik, Nov. 2003.

DIN 24163, Teil 1, Ausgabe: 1985-01

Ventilatoren – Leistungsmessung – Normkennlinien (Nationale Norm).

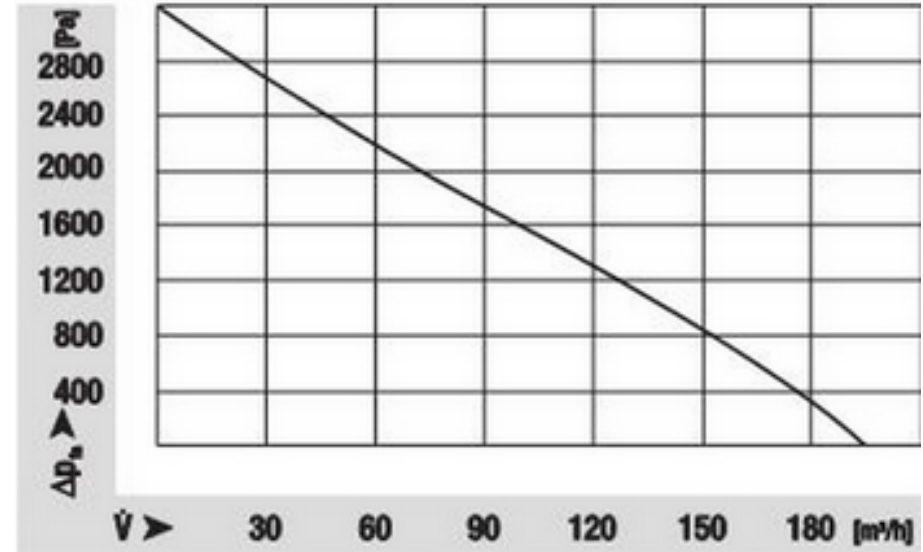
ISO 5801, Ausgabe: 1997-06

Industrieventilatoren – Leistungsmessung auf genormten Prüfständen (Internationale Norm), Internationale „Übereinstimmung“ mit DIN 24163.

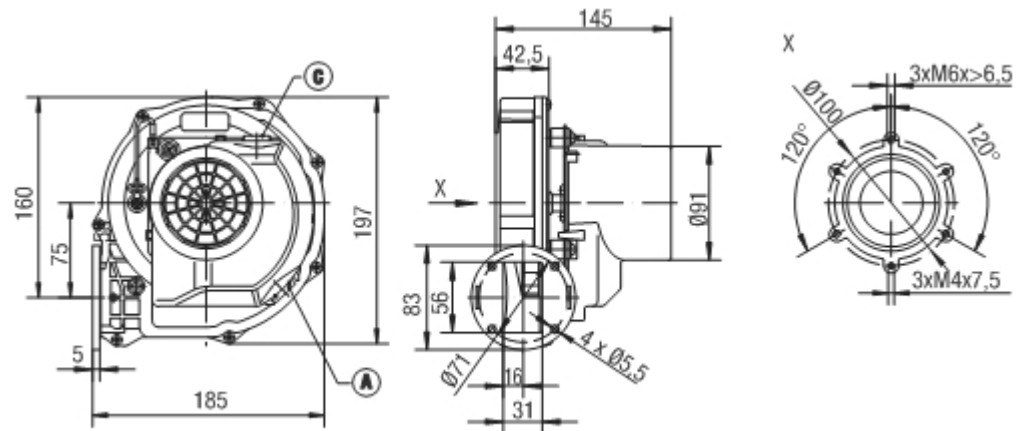
VDI 2044, Ausgabe: 2002-11

Abnahme- und Leistungsversuche an Ventilatoren (VDI-Ventilatorregeln).

## RG 148

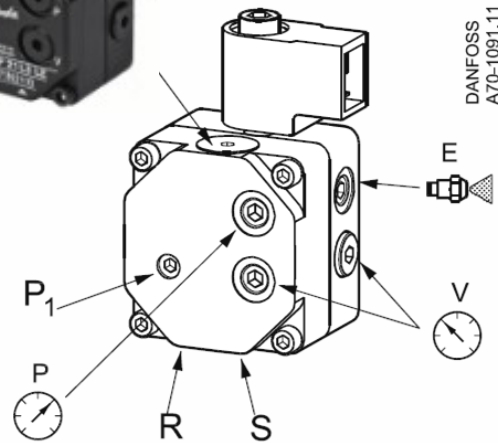


Technische Daten		
Spannung	230	VAC
Frequenz	50	Hz
Volumenstrom	190	m³/h
Drehzahl	8500	1/min
Leistungsaufnahme	135	W
Masse	1,9	kg



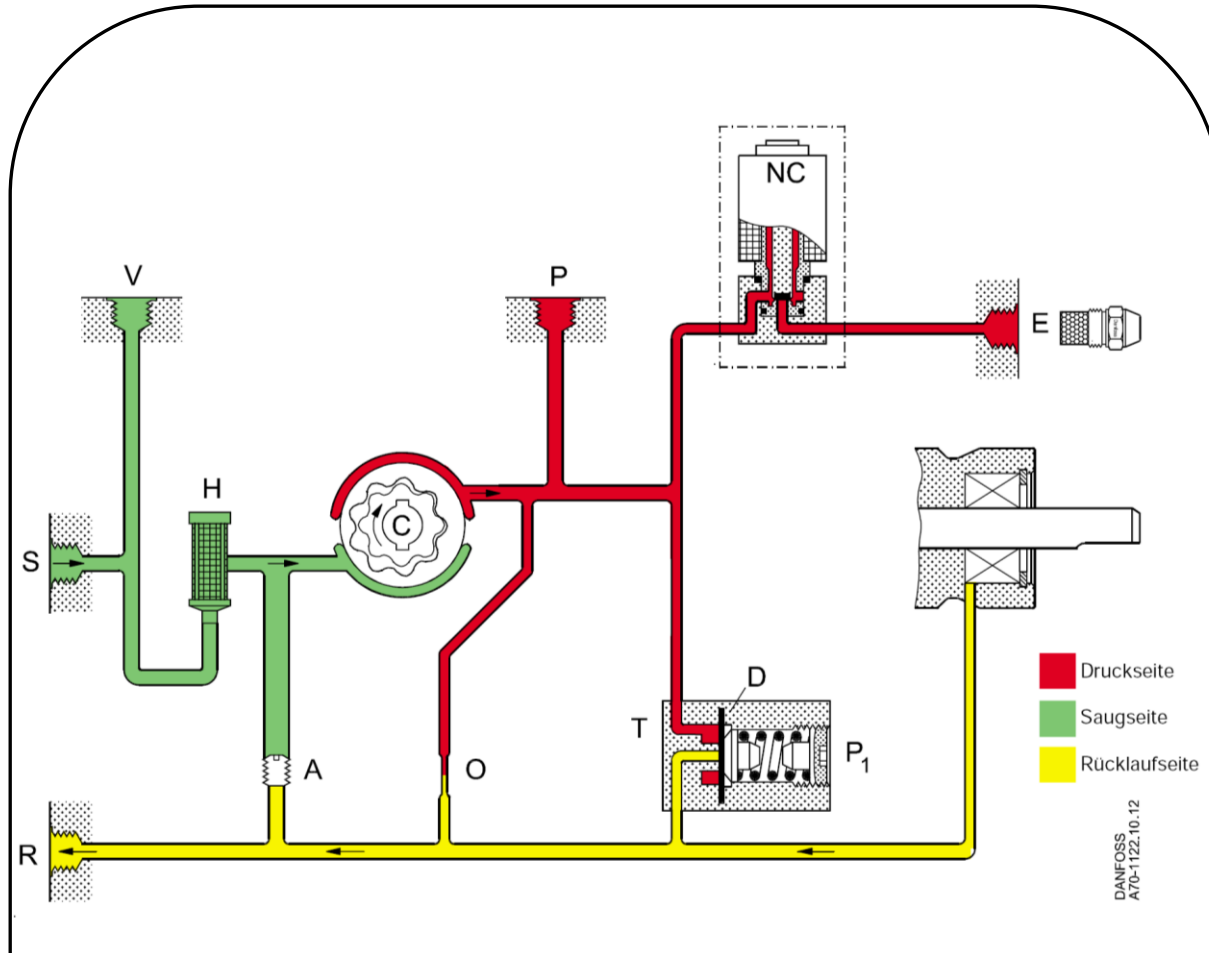
Quelle: ebm-papst

# Ölpumpe (Danfoss)



DANFOSS  
A70-1091.11

- P<sub>1</sub> Druckeinstellung
- S Sauganschluss
- R Rücklaufanschluss
- E Düsenanschluss G 1/8
- P Druckmessstutzen G 1/8
- V Vakuummessstutzen G 1/8
- H Filter



DANFOSS  
A70-1122.10.12

**Für 1-stufige Brenner**

Quelle: Danfoss

Über den **Sauganschluss (S)** wird das Öl über das **Filter (H)** in den Zahnradsatz gesaugt, wo der Druck erhöht wird. Wenn Spannung an das NC-Ventil (normally closed) gelegt wird, öffnet es und gibt das Öl zur Düse frei.

Durch die **Membran (D)** im **Druckregler (T)** wird der an der **Druckregelschraube (P1)** eingestellte Druck konstant gehalten.

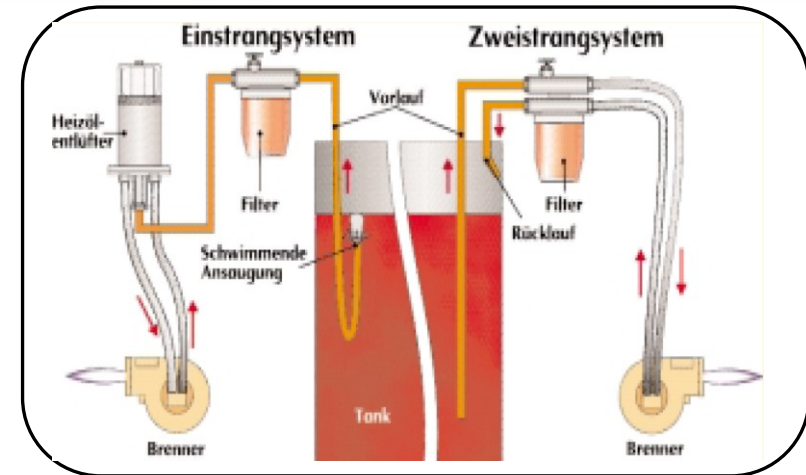
In 2-Strang Systemen wird das überschüssige Öl zum **Rücklaufstutzen (R)** geleitet und dann zum Tank.

In 1-Strang Systemen mit verschlossenem Rücklaufstutzen (R) und der entfernten Schraube (A) wird das Öl intern zum Zahnradsatz zurück geführt (siehe auch Funktionsschema).

Mit dem Abschalten des Brenners wird die Spannung zum NC-Ventil unterbrochen und der Ölstrom zur Düse wird unmittelbar gestoppt.

# Einstrang- Zweistrangsystem

Die Ölpumpe des Brenners ist so ausgelegt, dass mehr Heizöl angesaugt als tatsächlich verbrannt wird (bei kleinen Anlagen beträgt das Verhältnis ca. 20 : 1).



Beim Zweistrangsystem fließt durch die Rücklaufleitung das nicht benötigte Heizöl wieder in den Tank zurück. Der Rücklauf sollte so in den Tank einmünden, dass eine Verwirbelung des Heizöls im Tank und damit ein intensiver Kontakt mit Luftsauerstoff vermieden wird, um die Alterung des Heizöls nicht zu beschleunigen.

Bei einem Einstrangsystem wird nur so viel Heizöl durch die Saugleitung gefördert, wie auch tatsächlich verbrannt wird.

Dies wirkt sich u. a. positiv auf die Lagerungsstabilität des Heizöls im Tank und auf die Standzeit des Filters aus.

Das Einstrangsystem mit stetigem Gefälle zum Tank ist „eigensicher“, d. h., bei einer Undichtigkeit in der Leitung saugt die Pumpe Luft an und der Brenner geht auf Störung. Dadurch wird die Ursache relativ zeitnah erkannt.

Bei der **Zerstäubung** einer Flüssigkeit erfolgt eine Vergrößerung der Oberfläche des Flüssigkeitsvolumens. Die erforderliche Energie zur Oberflächenvergrößerung wird durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und die Oberflächenvergrößerung bestimmt.

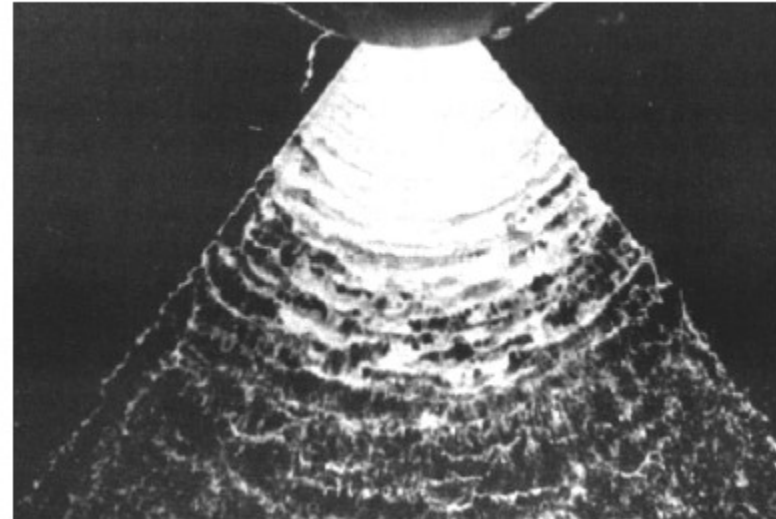
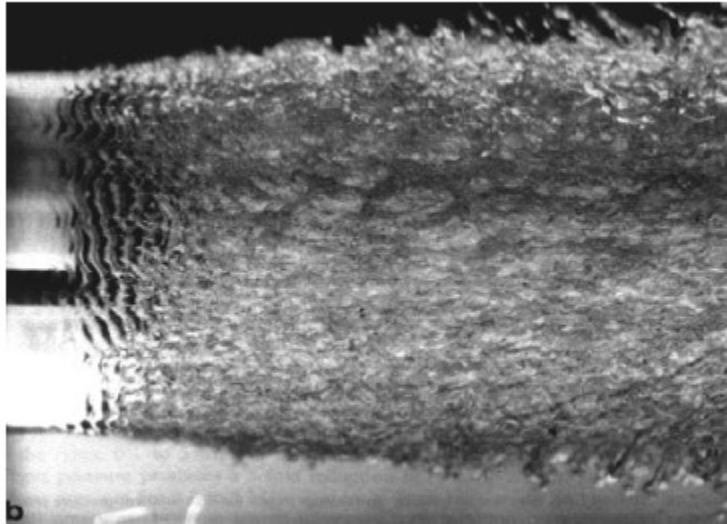
## Ziel der Zerstäubung:

Die Aufbereitung des Öls zur Verbesserung der Feuerungsqualität

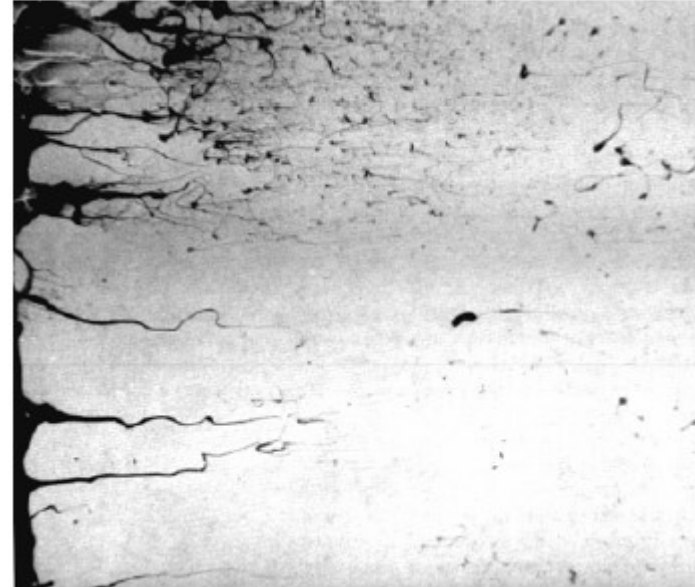
Unzerstäubter Brennstoff verbrennt im Feuerraum unter **starker Rauchentwicklung**. Daher ist es notwendig, das Öl in eine Vielzahl von Tröpfchen zu zerlegen. Dadurch wird die Oberfläche des Heizöls derart vergrößert, dass genügend Sauerstoff für eine gute Verbrennung zugeführt werden kann.



Unabhängig von der Art der Energiezufuhr erfolgt die Zerstäubung durch die Ausbildung von dünnen Flüssigkeitsschichten (Lamellen, Filme, Fäden). Instabile Schwingungen durch die Wechselwirkungen der Gas-Flüssigkeits-Grenzflächen mit wachsender Amplitude in diesen Objekten führen zum Zerfall in Tropfen. Die Zerstäubung von Flüssigkeiten ist ein sehr komplexer Prozess.

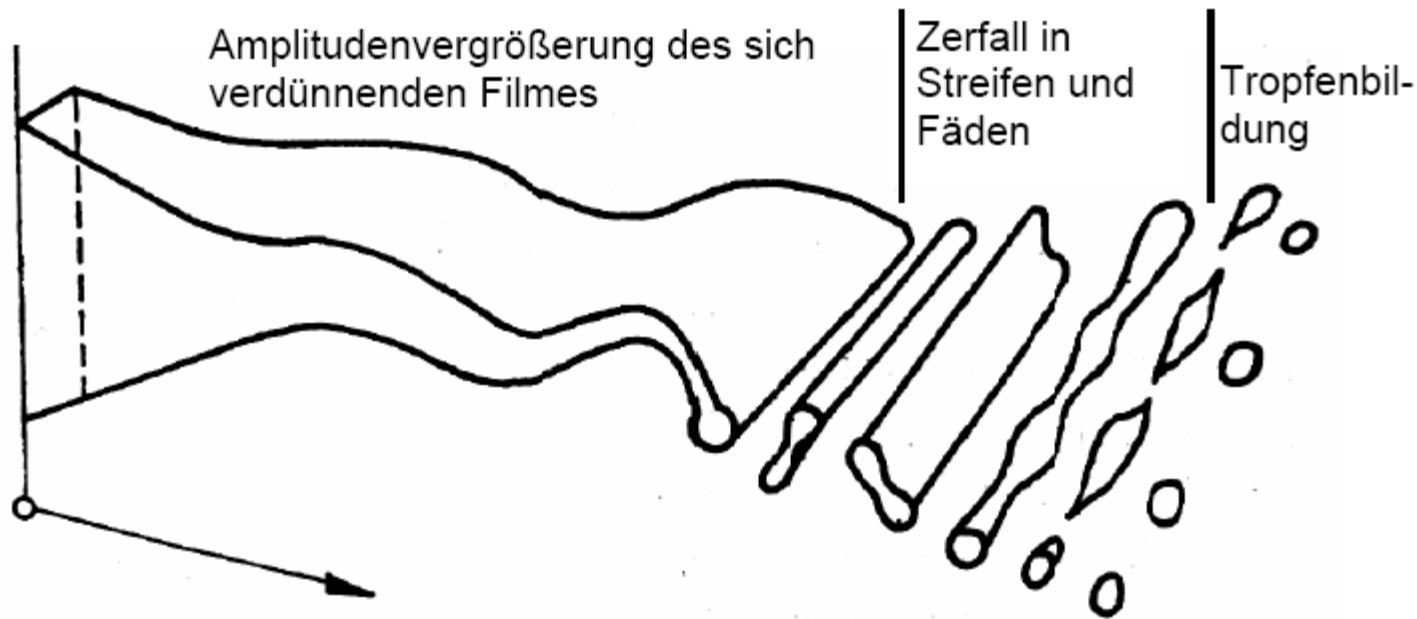


Zerfall eines kompakten Strahles (links) und eines Flüssigkeitsfilmes (rechts)



Zerfall des Filmes einer niederviskosen (links) und einer hochviskosen Flüssigkeit (rechts)

# Zerfall eines Flüssigkeitsfilmes



Die Ursachen für die Tropfenbildung sind Instabilitäten und Druckschwingungen in der Flüssigkeit infolge der Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Gas. Zur Charakterisierung von Versprühprozessen sind experimentelle Untersuchungen unerlässlich.

# Zerstäubungsarten

Zerstäuberbrenner können in drei Gruppen unterteilt werden:  
Druckzerstäuber, Injektionszerstäuber, Drehzerstäuber

Für viele technische Anwendungen werden Druckzerstäuberdüsen als Dralldüsen ausgeführt.

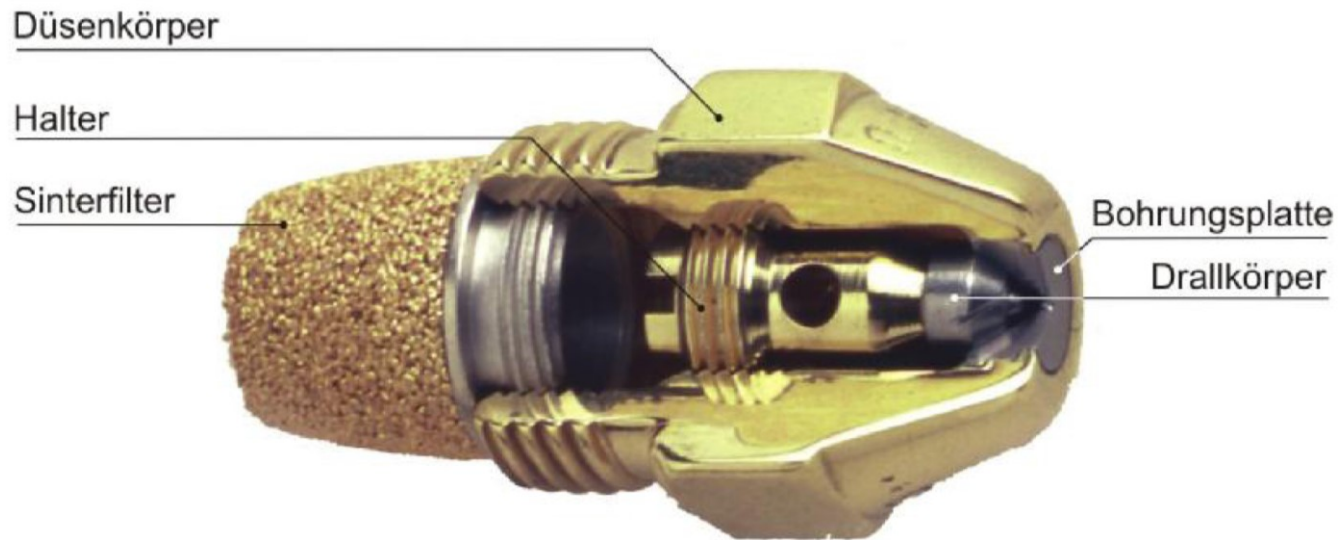
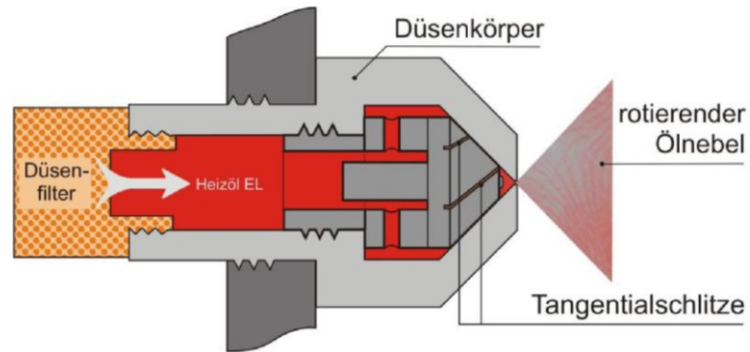
Das Medium wird tangential in die Drallkammer der Düse eingeleitet. Eine Rotationsströmung bildet sich in der Drallkammer aus.

Aufgrund der Erhaltung des Drehimpulses steigt die Umfangsgeschwindigkeit in Richtung der Düsenbohrung an. Dabei nimmt der statische Druck in der Düse soweit ab, dass der Umgebungsdruck unterschritten wird und ein Luftkern in der Düse ausgebildet wird. In der Düsenbohrung bildet sich ein Flüssigkeitsfilm aus, der an der Düsenmündung mit der Umgebungsluft in Wechselwirkung tritt und in Tropfen zerfällt.



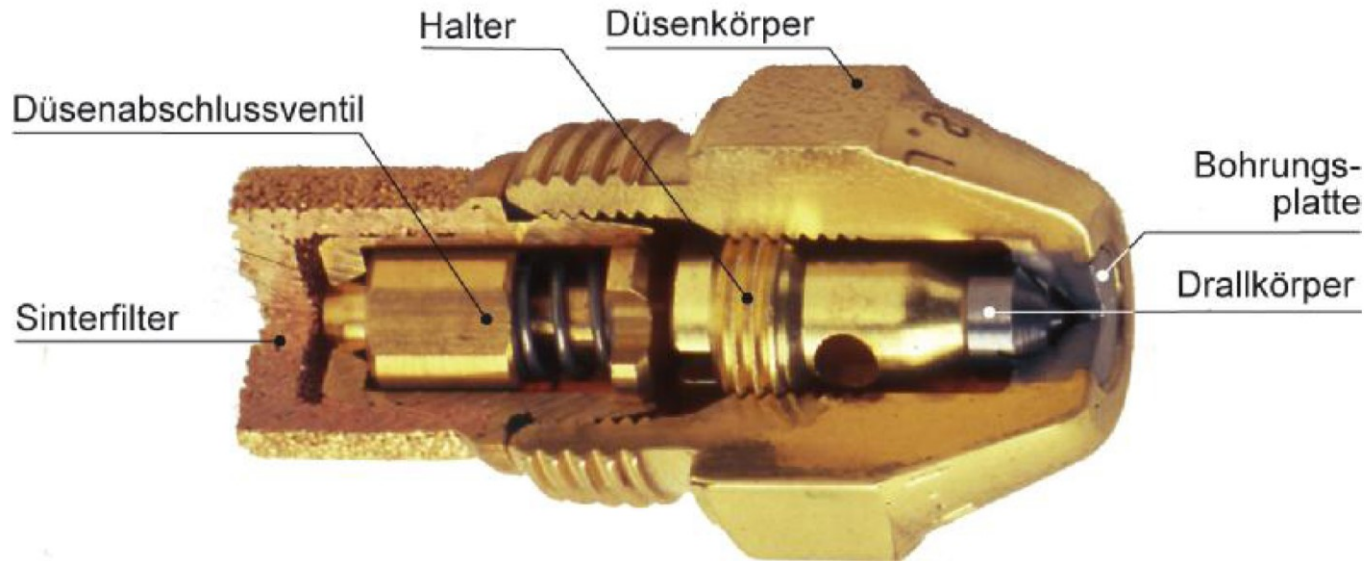
**DELAVAN Öldüse**

# Druckzerstäuber (Simplexdüse)





# Simplexdüse mit Düsenabschlussventil



Ölbrennerdüsen mit einem **eingebauten Abschlussventil** verhindern den Ölaustritt aus der Düse während der Aufheizphase des Ölvorwärmers und bei Wärmerückstrahlung nach der Abschaltung des Brenners.

# Rücklaufdüse

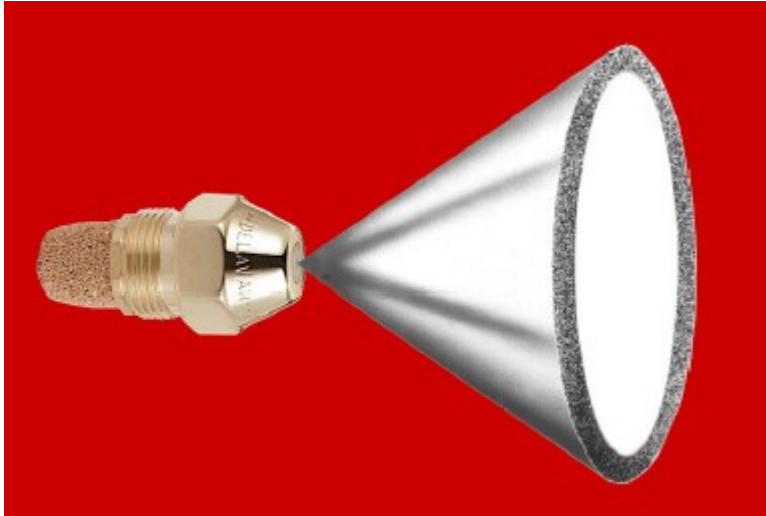
Ähnlich wie bei Simplexdüse gelangt der Brennstoff durch einen tangential angeordneten Kanal in die Drallkammer. Die stark rotierende Flüssigkeit bildet hinter der Düsenöffnung einen Filmkegel, der in einem bestimmten Abstand zur Düse in Tropfen zerfällt.

Bei Rücklaufdralldüsen wird ein Teil der rotierenden Flüssigkeit aus der Drallkammer durch eine Rücklaufbohrung in den Brennstoffbehälter zurückgeführt.

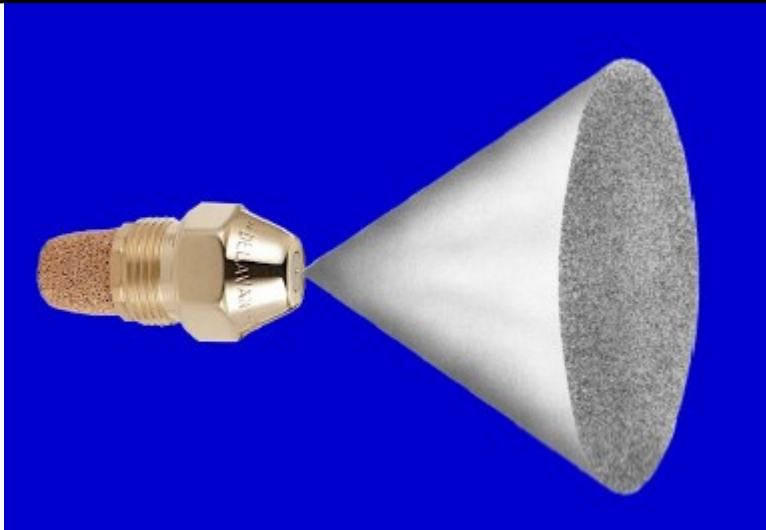


**Fluidics Rücklaufdüse**

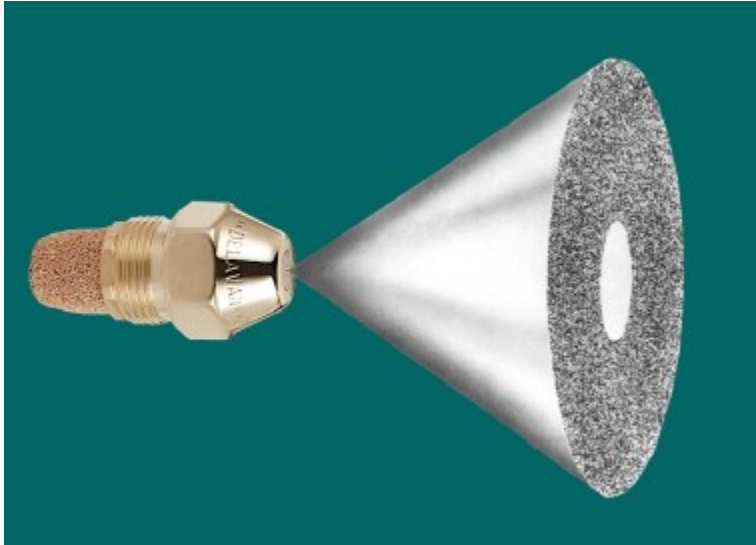
# Ölbrennerdüsen



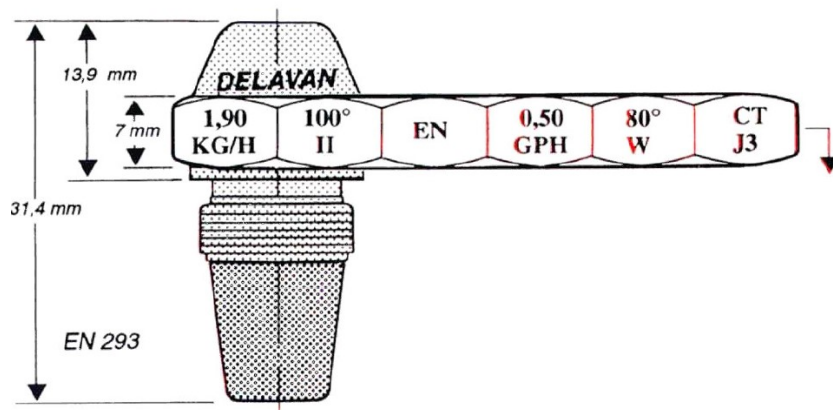
**Hohlkegel-Düsen** werden vorwiegend bei Durchsätzen bis zu 2.00 GPH eingesetzt. Die Tröpfchen-Verteilung konzentriert sich überwiegend im Randbereich des Zerstäubungskegels. Dies trägt meistens zum niedrigen Flammen-Geräuschpegel bei.



**Vollkegel-Düse** : Die Tröpfchen-Verteilung ist ziemlich gleichmäßig innerhalb des Sprühkegels. Das Sprühbild wird mit steigendem Durchsatz etwas hohler, dies wird aber erst ab 8.00 GPH merkbar. Dieser Düsen-Typ begünstigt einen weichen Start besonders bei größeren Durchsätzen.



**Allzweck-Düse** : Diese Düse wird meistens dort eingesetzt, wo weder eine typische Hohlkegel noch eine Vollkegel-Düse zu einer optimalen Verbrennung führen. Die Tröpfchenverteilung innerhalb des Zerstäubungskegels tendiert bei kleinerem Durchsatz zur Hohlkegel-Form.



EN : CE Kennzeichnung

1,90 kg/h : Düsendurchsatz in kg/h unter 10 bar

0.50 GPH : Düsendurchsatz unter 7 bar (100PSI)

80° W : Sprühwinkel und Düsentyp

100° II : Sprühwinkel und S nach EN

CT j3 : Herstellungs-Code

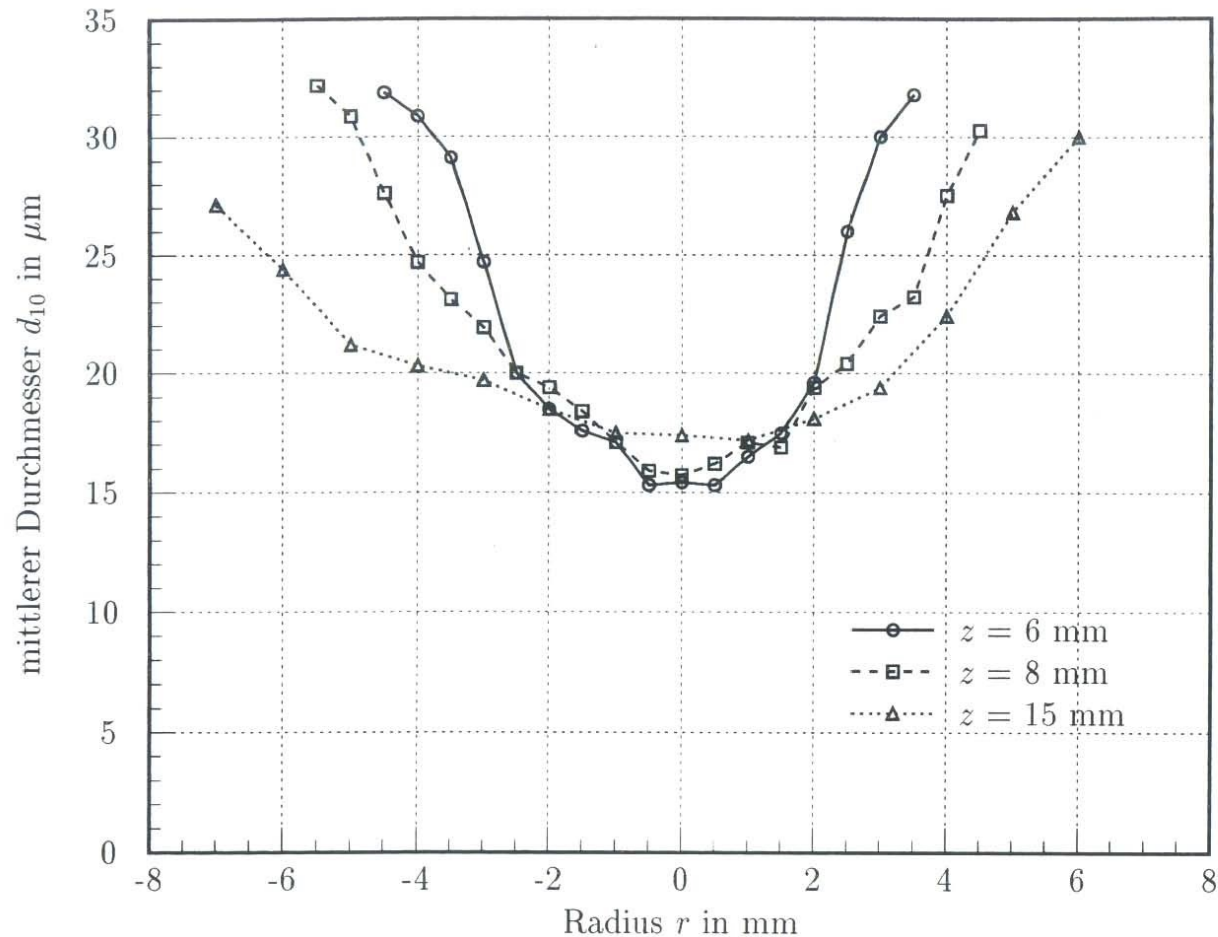
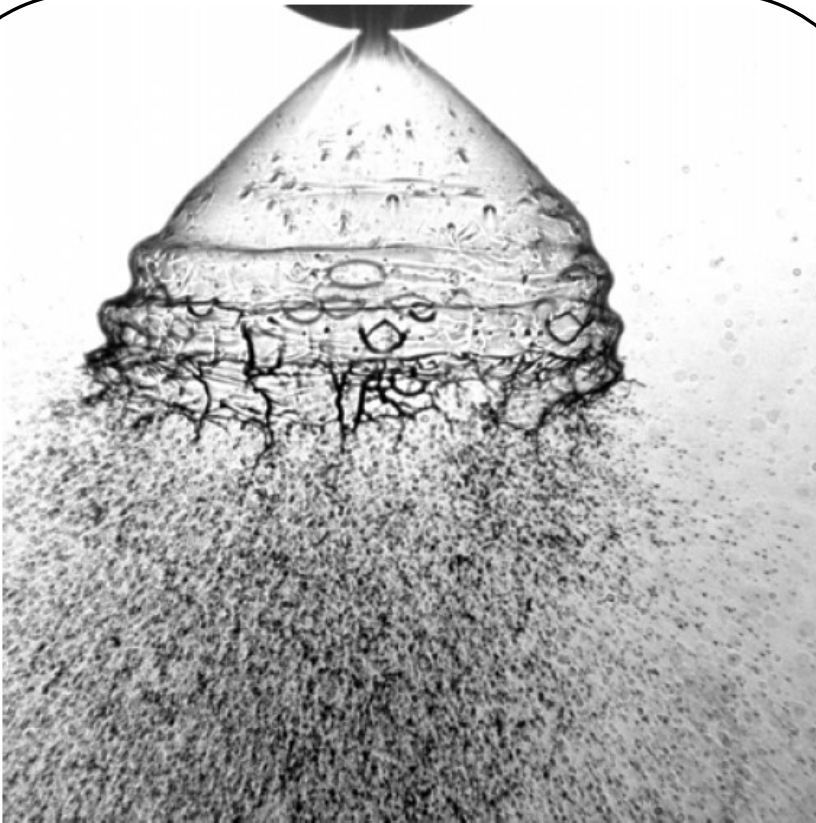
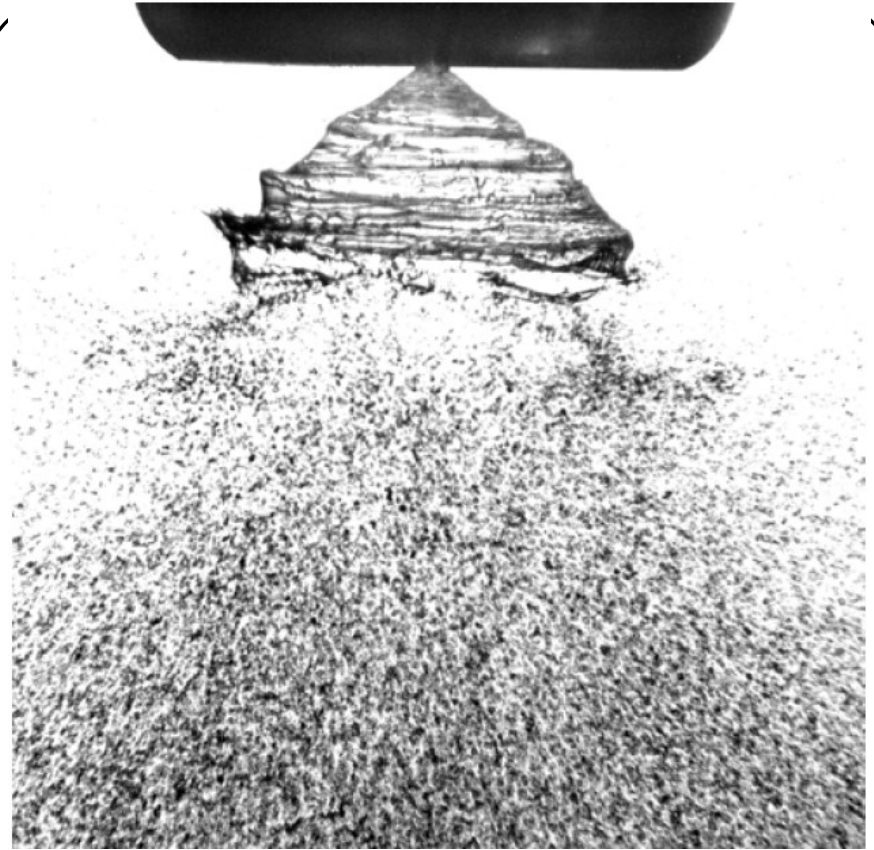


Abbildung 2.5: Mittlere Tropfendurchmesser  $d_{10}$  eines Sprays einer Simplex-Düse ( $60^\circ\text{H}/1,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ) in Abhängigkeit des radialen Abstands  $r$  von der Strahlachse für verschiedene Abstände  $z$  von der Düse ( $\Delta p = 10$  bar,  $\vartheta_{\text{Ö1}} = 50$  °C) [21]



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



Sprühbild einer 0,3 – 0,5 GPH-Simplexdüse  
bei einem Förderdruck  
von ca. 10 – 15 bar.



Sprühbild eines  
Öls hoher Viskosität

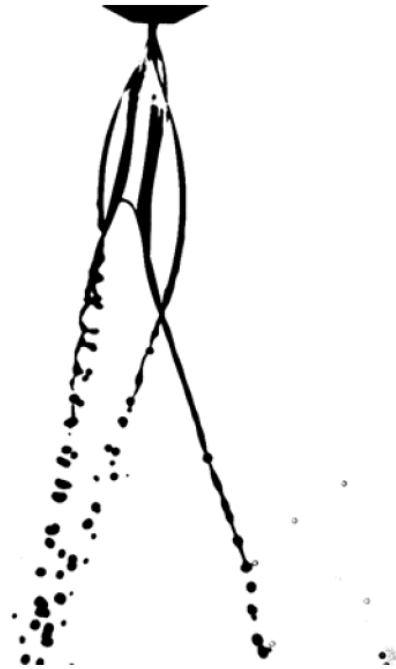


Sprühbild eines  
Öls geringer Viskosität

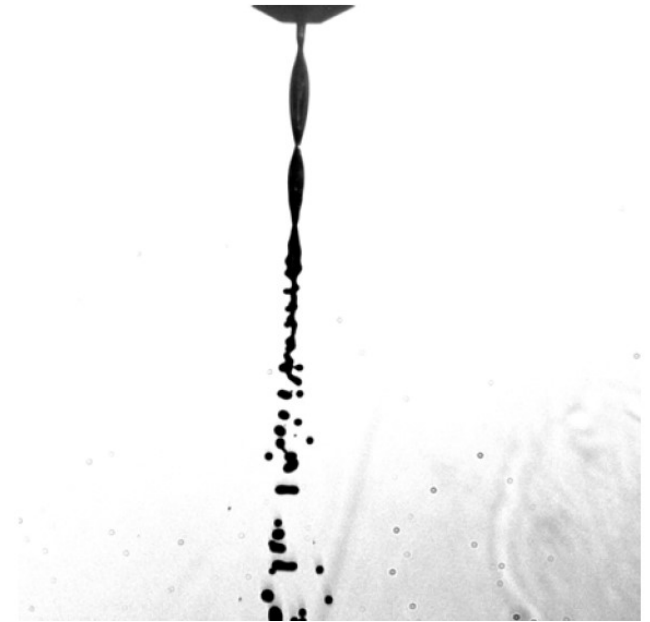
# Zerstäubung



Sprühbild einer Simplexdüse  
ca. 1–2 ms nach Brennerschluss



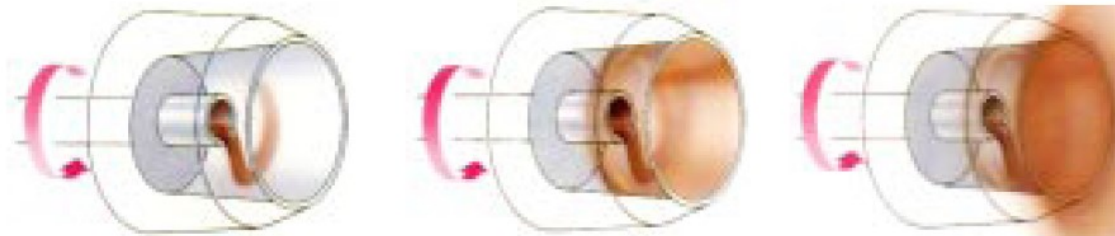
Sprühbild einer Simplexdüse  
ca. 3–4 ms nach Brennerschluss



Sprühbild einer Simplexdüse  
ca. 5–10 ms nach Brennerschluss

# Rotationszerstäuber

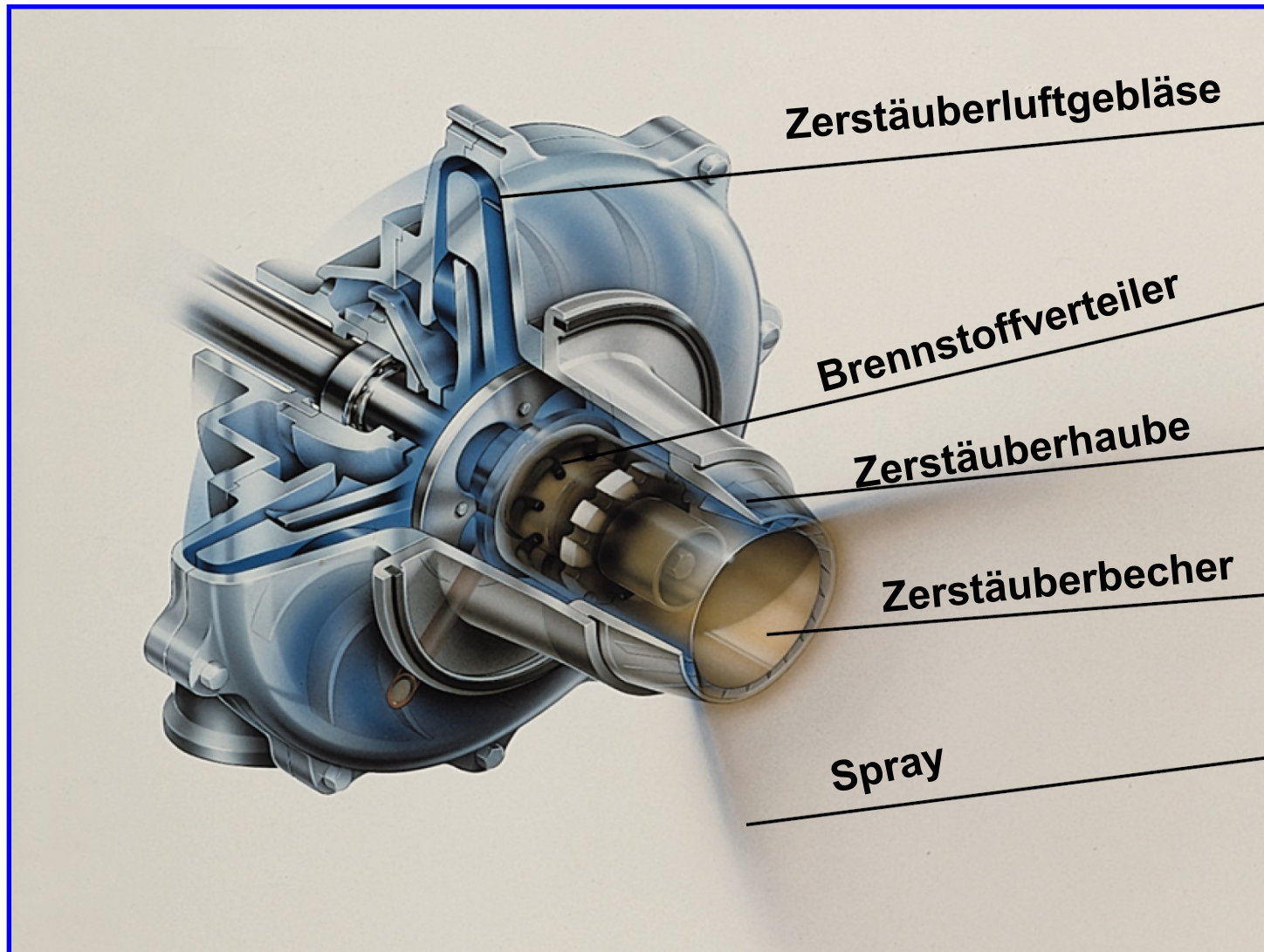
Bei einem Rotations-/Drehzerstäuber wird der flüssige Brennstoff bei geringem Druck über einen Verteiler in einen schnell rotierenden Becher geleitet. Der Becher wird von einem Antriebsmotor angetrieben. Der Becher weitet sich zum Feuerungsraum. Dadurch wird der Brennstoff nach vorne geleitet und angetrieben von der Zentrifugalkraft wird er fein verteilt mit einem Drall in den Feuerungsraum geleitet. Eine geringe Menge Zerstäuberluft wird direkt in den Becher geblasen, unterstützt die Verwirbelung und bildet die primäre Verbrennungsluft.



Vorteile eines Drehzerstäubers:

- geringer Öldruck – etwa 1 bis 3 bar – erforderlich → damit geringere Pumpenleistung
- unempfindlich gegen Viskositätsschwankungen
- großer Regelbereich des Brenners möglich

# SAACKE Rotationszerstäuber

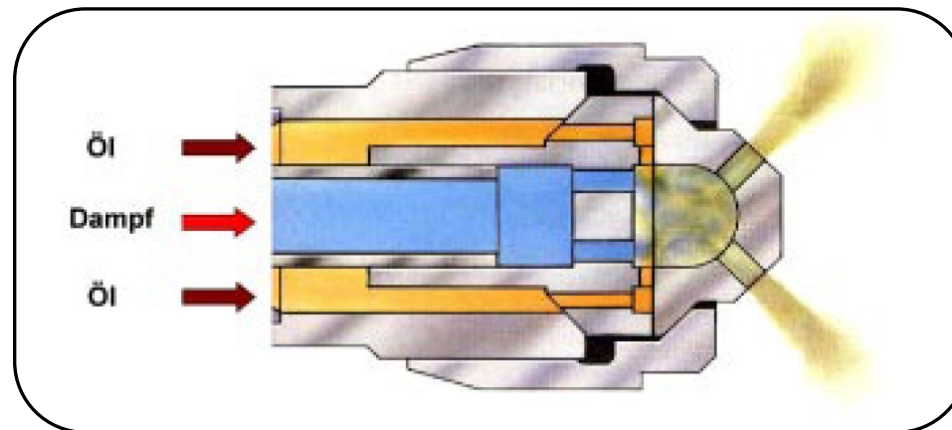


# Injektionszerstäuber

Der Brennstoff wird mit relativ hohem Druck – zwischen etwa 5 und 15 bar – einer Düse zugeführt. Zur Zerstäubung des Brennstoffs wird hier ein Hilfsmedium benötigt: Zerstäuberluft (oder -dampf).

Dieses Medium wird kurz vor dem Austritt des Öls so beigemischt, dass über den ganzen Lastbereich eine gute Zerstäubung gewährleistet ist.

Der Nachteil solcher Zerstäuber, dass bei der Zerstäubung von Suspensionen die Düsen stark verschleifen können, bei der Zerstäubung klebriger Flüssigkeiten die Düsen verstopfen können und der Regelbereich der Zerstäuber eingeschränkt ist.



Prinzip einer Dampfdruckzerstäuberdüse

# Ultraschall-Zerstäuber

Ein piezokeramisches Element wandelt elektrische Wellen in mechanische Schwingungen um. Die drucklos auf den Schwingkörper aufgebrachte Flüssigkeit bildet Kapillarwellen, aus denen feinste Tropfen abgenebelt werden.

## Die Vorteile von Ultraschall-Zerstäubern:

- sehr geringer Energieaufwand durch drucklose Zuführung der Flüssigkeit
- geringer elektrischer Leistungsbedarf
- Gleichmäßige Zerstäubung veränderlicher Volumenströme
- Nahezu konstantes Tropfenspektrum über den gesamten Volumenstrombereich
- Hohe Betriebssicherheit, da praktisch verstopfungsfrei

## Einsatzmöglichkeit:

Luftbefeuchtung  
Warenbefeuchtung  
Aufgabe von Trennmitteln  
Flüssigkeitszugabe bei Rühr- und  
Medizintechnik



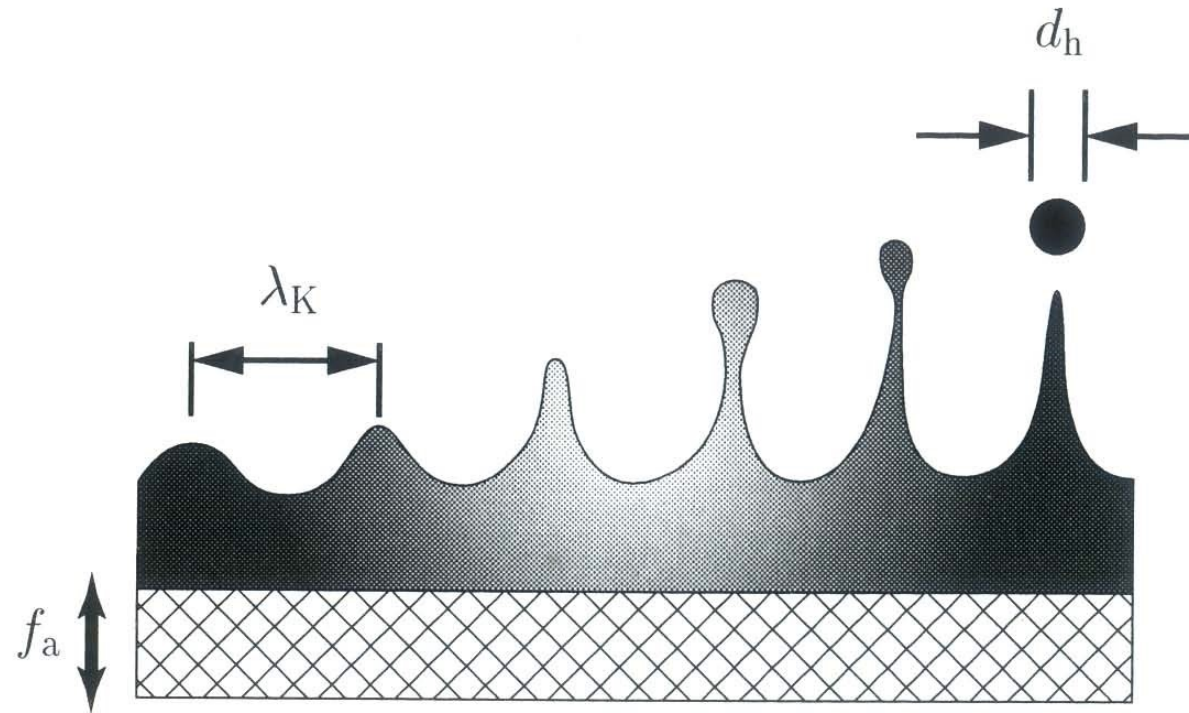
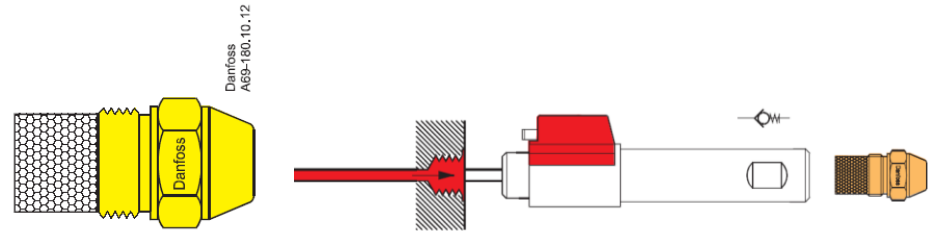
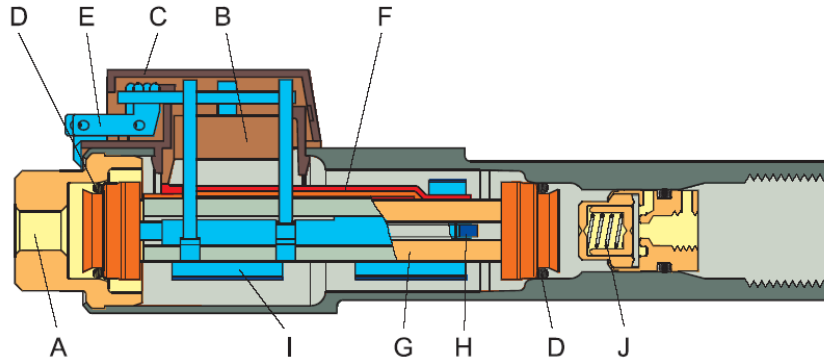


Abbildung 2.7: Kapillarwellenbildung und Tropfenablösung einer mit Ultraschallwellen angeregten Flüssigkeitsoberfläche [33]

# Danfoss Ölvorwärmer



**A** Ölanschlussstutzen

**D** O-Ring

**G** Wärmeaustauscher

**J** LE – Ventil

**B** Thermostat

**E** Elektrischer Anschluss

**H** PTC Element

**K** Feder

**C** Deckel

**F** Wärmeleiter

**I** Federklemme

**L** Membran

**M** O-Ring

Vor dem Start des Ölbrenners wird das Heizöl im Ölvorwärmer vorgewärmt, und durch diese Erwärmung findet eine Ausdehnung des Heizöls statt. Das Sicherheitsabsperrentventil im Ölvorwärmer verhindert, dass das sich ausdehnende Heizöl aus der Düse tropft, da das Rückschlagventil im Magnetventil sich öffnet und damit eine Verbindung zur Saugseite oder zur Rücklaufseite der Ölpumpe herstellt. Das LE Ventil im Ivorwärmer öffnet bei einem Druck von  $\geq 6$  bar.