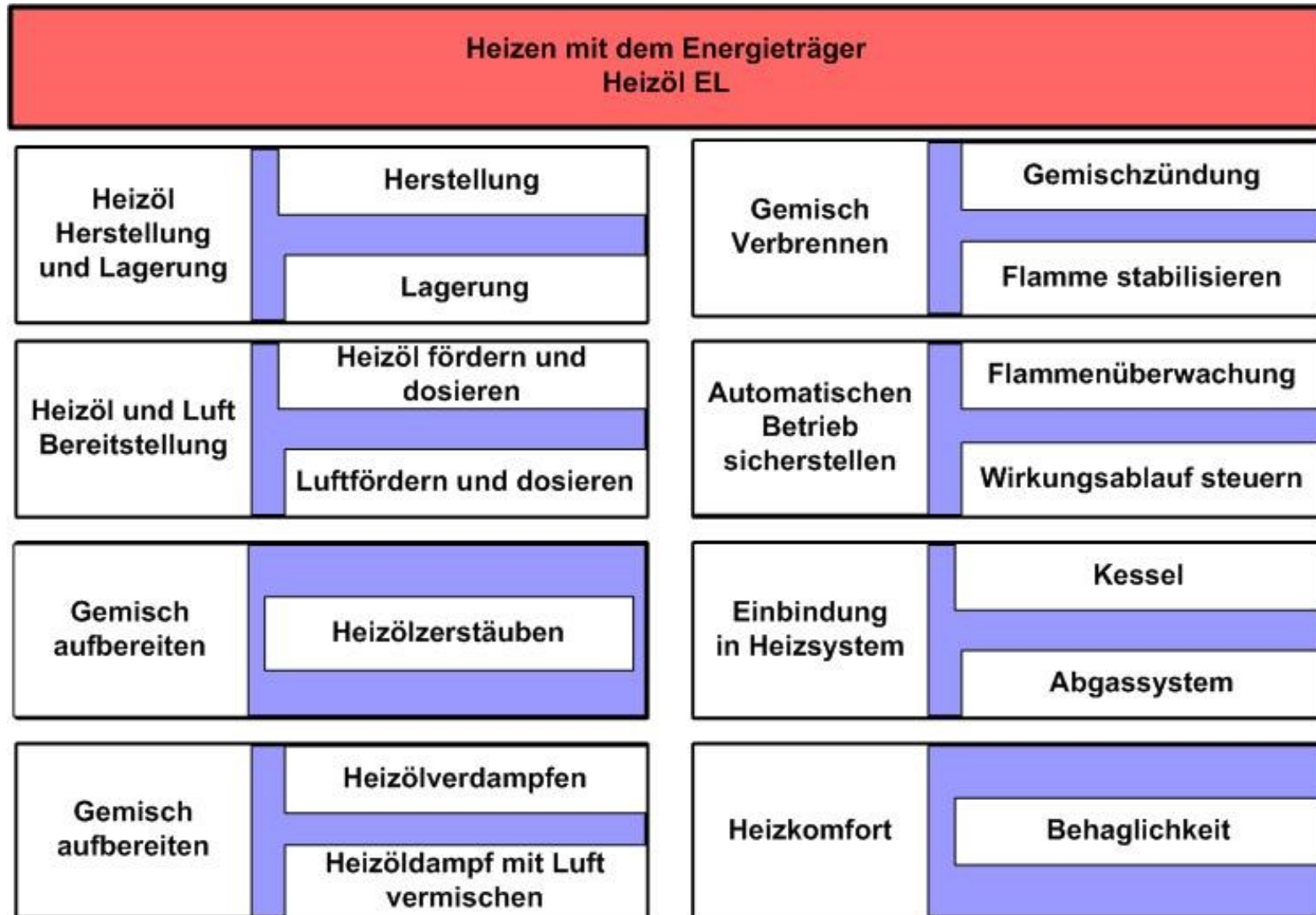


Angewandte Thermofluiddynamik

Dr.-Ing. F. v. Issendorff

Inhalte der Vorlesungen



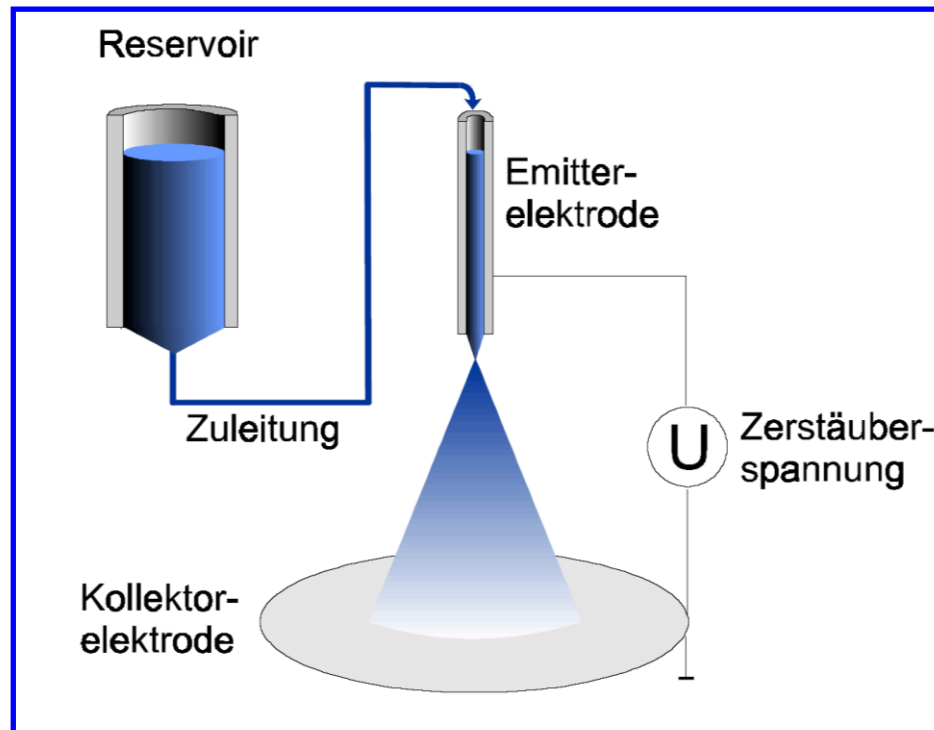
Zusammenfassung der gebräuchlichen Zerstäubungsmethoden

Typ	Zerstäuberprinzip	Anwendung
Einstoffdüsen	Hydraulische Zerstäubung (mit voll-, hohl-, flach- oder kegelförmigem Strahl)	Einspritzdüsen für Verbrennungsvorgänge, Lösch- und Kühldüsen, Sprühtrocknung, Spraydosen, Lackierung, Gaswäscher, Luftbefeuchtung, Schädlingsbekämpfung
Zweistoffdüsen	Pneumatische Zerstäubung (mit interner oder externer Mischung)	Einspritzdüsen für Verbrennungsvorgänge, Lösch- und Kühldüsen, Sprühtrocknung, Lackierung, Gaswäscher, Elektrofilter, Luftbefeuchtung
Rotation	Rotierende Scheiben, Glocken etc.	Sprühtrocknung, Landwirtschaft, Medizin, Lackierung
Ultraschall	Ultraschall-Gas-Zerstäubung, Ultraschall-Schwingungs-Zerstäubung	Verbrennung, Luftbefeuchtung, Sprühtrocknung, Medizin
Elektrostatik	Elektrostatische Zerstäubung	Tintenstrahldrucker, Landwirtschaft, Lackierung

Behandelt

Nicht behandelt

Die **elektrostatische Zerstäubung** beruht auf einem Effekt, der erstmals im Jahre 1600 beobachtet wurde. Der englische Naturforscher Gilbert entdeckte, dass sich ein Wassertropfen auf einer trockenen Oberfläche in der Nähe eines statisch aufgeladenen Bernsteins kegelartig verformte.

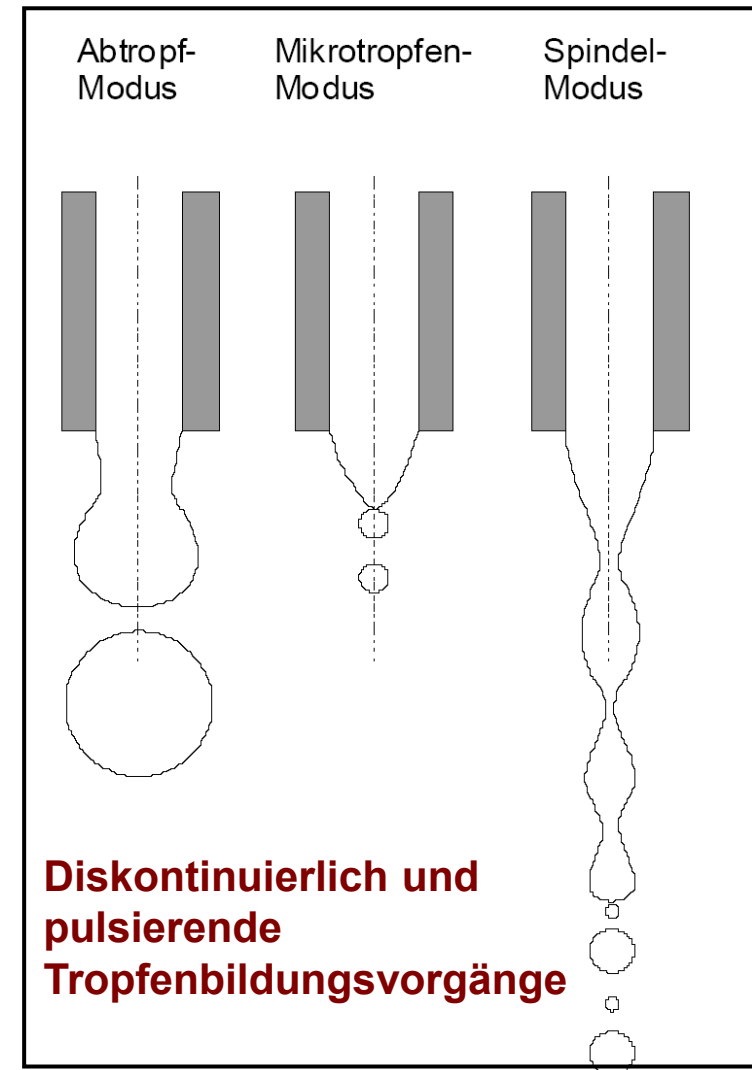


In der Regel wird hierbei eine Kapillare als Emittierelektrode verwendet, die senkrecht zu einer ebenen Kollektorelektrode angeordnet ist und über ein Reservoir mit Flüssigkeit versorgt wird.

Der **Abtropf-Modus** (dripping-mode) stellt sich bei sehr geringen Spannungen ein. Der Tropfendurchmesser ist deutlich größer als der Kapillardurchmesser.

Die Abtropffrequenz kann hier bis 500 Hz betragen. Wird die Spannung weiter erhöht, so nimmt die Abtropffrequenz bis zu 10 kHz zu und der Tropfendurchmesser bis zu einigen Mikrometern im **Mikrotropfen-Modus** ab.

Im **Spindel-Modus** (spindle mode) wird ein Flüssigkeitsfaden emittiert, der unter Bildung zweierlei Tropfengrößen zerfällt. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch, wobei die Frequenz stark von der Viskosität der Flüssigkeit abhängt.



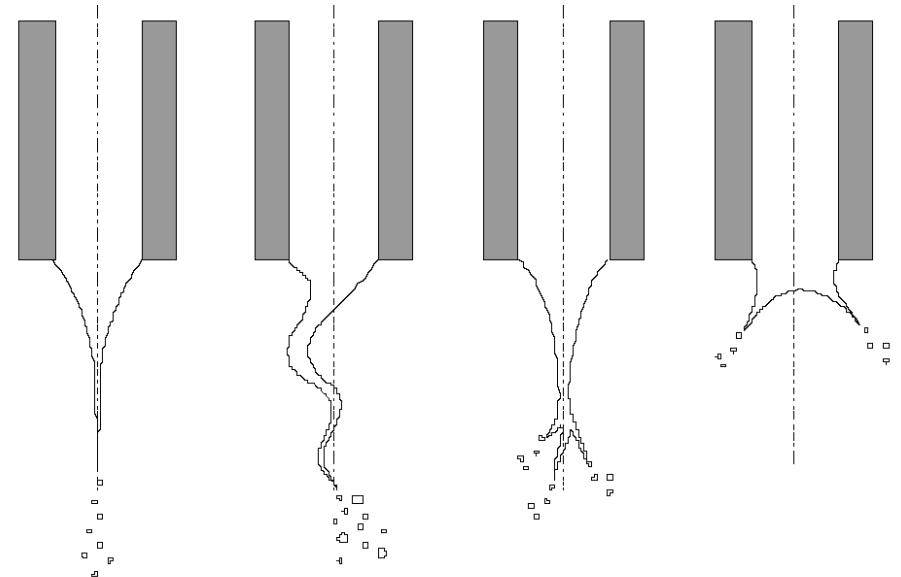
Wird eine **kritische Spannung** überschritten, so treten die kontinuierlichen Zerstäubungsmodi unter Bildung eines permanenten Flüssigkeitsfadens in Erscheinung, die auch als **Kegel-Faden-Modi** (bezeichnet werden und in zahlreiche Unterformen eingeteilt werden.

Der wohl wichtigste Modus für die technische Sprayerzeugung ist der **Taylor-Kegel-Modus**.

Der **chaotische Kegel-Faden-Modus** wird durch den unkontrollierten Zerfall des Fadens in laterale Schwingungen versetzt, bei dem die resultierende Tropfengröße nicht mehr eindeutig bestimmbar wird.

Der chaotische Kegel-Faden-Modus **kann bei Erhöhung der Flussrate** in den **Multi-Faden-Modus**, wobei sich der Faden eines Kegels verzweigt, oder in den **Multi-Kegel-Faden-Modus** übergehen.

Taylor-Kegel-Modus Chaotischer Kegel-Faden-Modus Multi-Faden-Modus Multi-Kegel-Faden-Modus



Kontinuierliche Zerstäubungsvorgänge

Tropfenbildung beim primären Strahlzerfall

Durch Störungen hervorgerufene, mit der Zeit anwachsende Schwingungen, wird der Strahl in eine Tropfenkette überführt.

Zertropfen

Rayleigh
Zerfall



Zerwellen

1. Windinduzierter
Zerfall

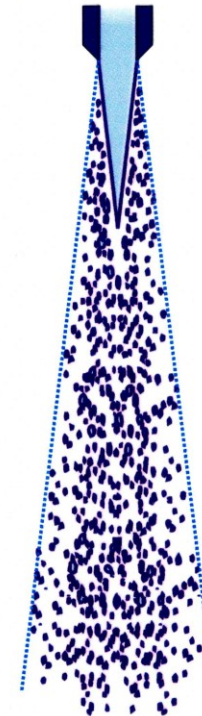


Zerwellen

2. Windinduzierter
Zerfall



Atomisieren
(Zerstäuben)

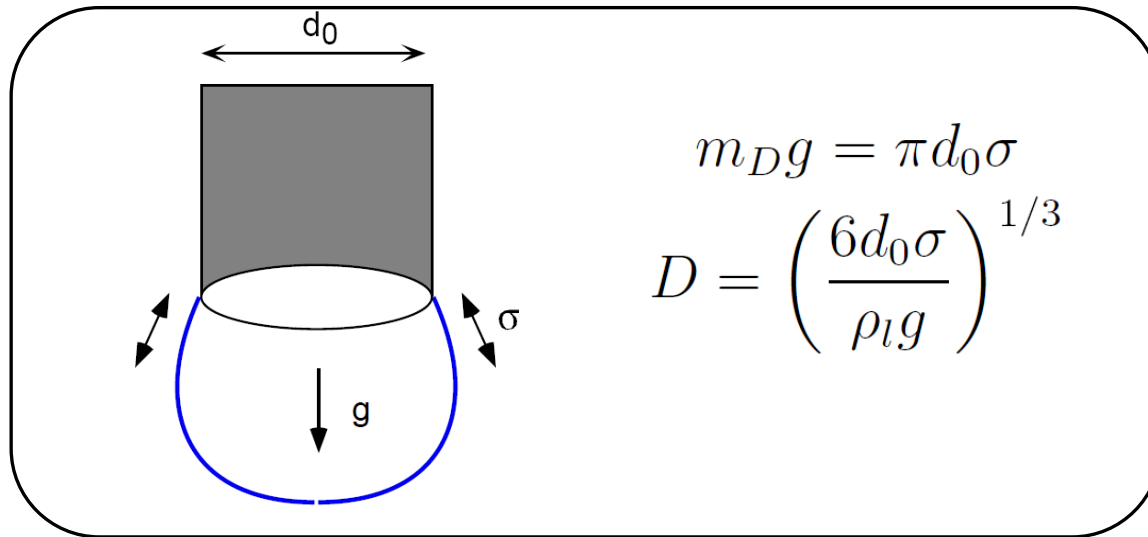


modelle (nach Rayleigh 1878)

Primärer Strahlzerfall

Abtropfen

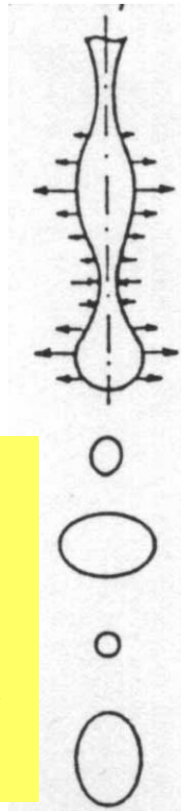
Die Gravitation stellt die maßgebliche treibende Kraft dar



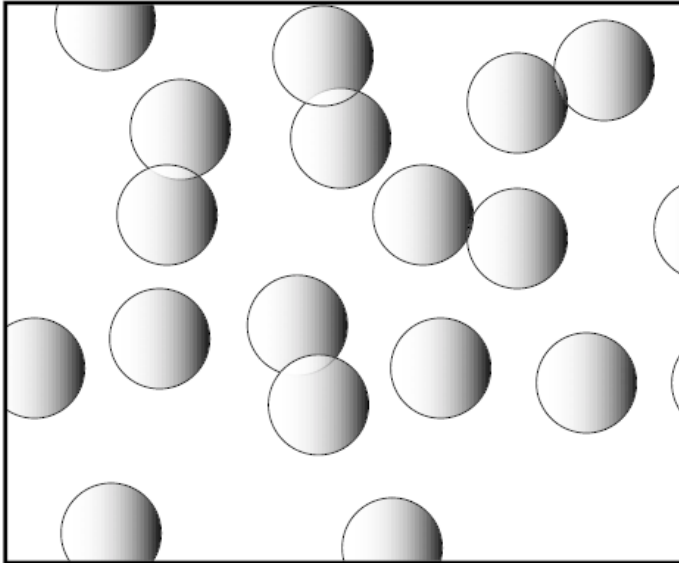
Zertropfen

Zertropfen

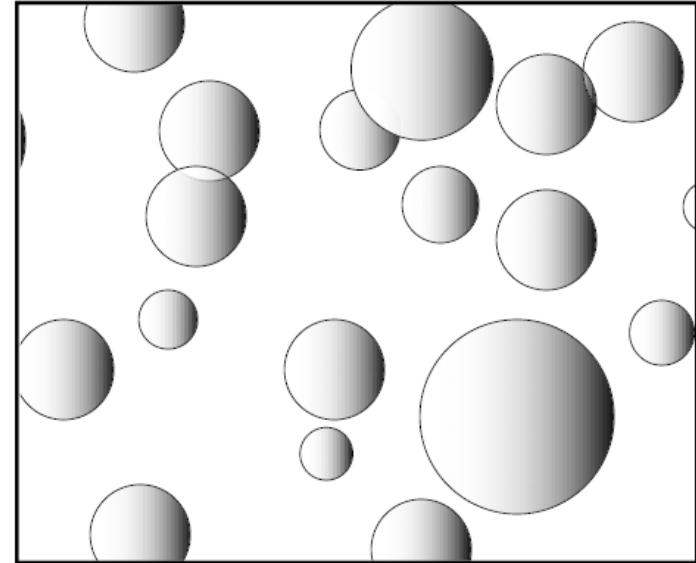
Bei vernachlässigbaren Relativgeschwindigkeiten tritt ein Flüssigkeitsstrahl aus der Düse aus. Es bilden sich aufgrund der **Oberflächenspannung** achsensymmetrische Oszillationen an der Strahloberfläche aus. Einzelne Bereiche zwischen den Einschnürungen trennen sich ab und bilden polydisperse Tropfen, deren Durchmesser größer als der des Strahls ist.



Monodisperse



Polydisperse



Sind alle Tröpfchen von derselben Größe, spricht man von einem *monodispersen* Tröpfchen. → polydisperse Tropfen

Zerwellen (erster windinduzierter Strahlzerfall)

Strahlzerlegung unter Verlust der Achsensymmetrie und unter Entwicklung von transversaler wellenförmiger Schwingungen im Strahl.

Es entstehen Flüssigkeitsfäden, die durch Oberflächenspannungen abgeschnürt werden und anschließend zu Tropfen zerfallen.

Die Tropfendurchmesser sind im Bereich des Strahldurchmessers

Zerwellen (zweiter windinduzierter Strahlzerfall)

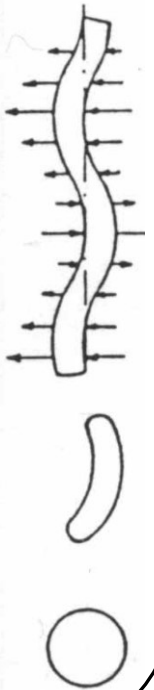
Bei einer weiteren Erhöhung des Düsenvordrucks steigt die Turbulenz in der Flüssigkeit an, so dass sich ohne ausgeprägte periodisch aufklingende Bewegung Tropfen vom Strahlkern ablösen. Die Tropfengröße nimmt deutlich ab und der Ort des Strahlzerfalls bewegt sich stromauf zum Düsenloch hin. Der Zerfall wird der eigentlichen Strahlzerstäubung immer ähnlicher. Dieser Bereich wird als zweiter windinduzierter Strahlzerfall bezeichnet.

Die Tropfendurchmesser sind kleiner als der Strahldurchmesser

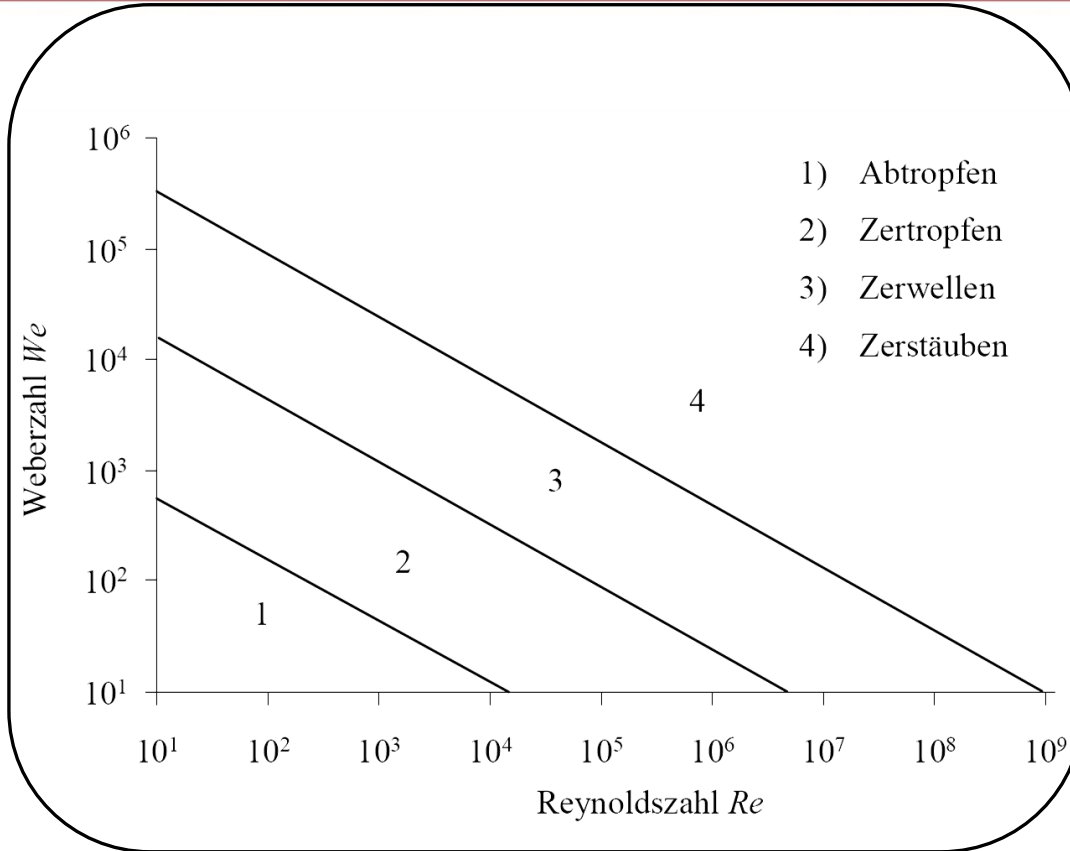
Zerstäuben

(hohe Relativgeschwindigkeit): Der Strahl reißt unmittelbar am Düsenaustritt auf. Der Zerfallsprozess ist bereits in Düsennähe abgeschlossen.

Die resultierenden Tropfen sind erheblich kleiner als der Strahl.



Primärer Strahlzerfall



- 1) Abtropfen
- 2) Zertropfen
- 3) Zerwellen
- 4) Zerstäuben

Darstellung der Übergänge zwischen:

- Abtropfen (1)
- Zertropfen (2)
- Zerwellen (3)
- Zerstäuben (4) in Abhängigkeit von Re und We

Für eine genauere Vorhersage des vorliegenden Zerfallbereiches werden die Einflussgrößen des Fluids wie:

Die Dichte ρ

Die Austrittsgeschwindigkeit u ,

Die Viskosität η

Die Oberflächenspannung σ

zu den dimensionslosen Kennzahlen:

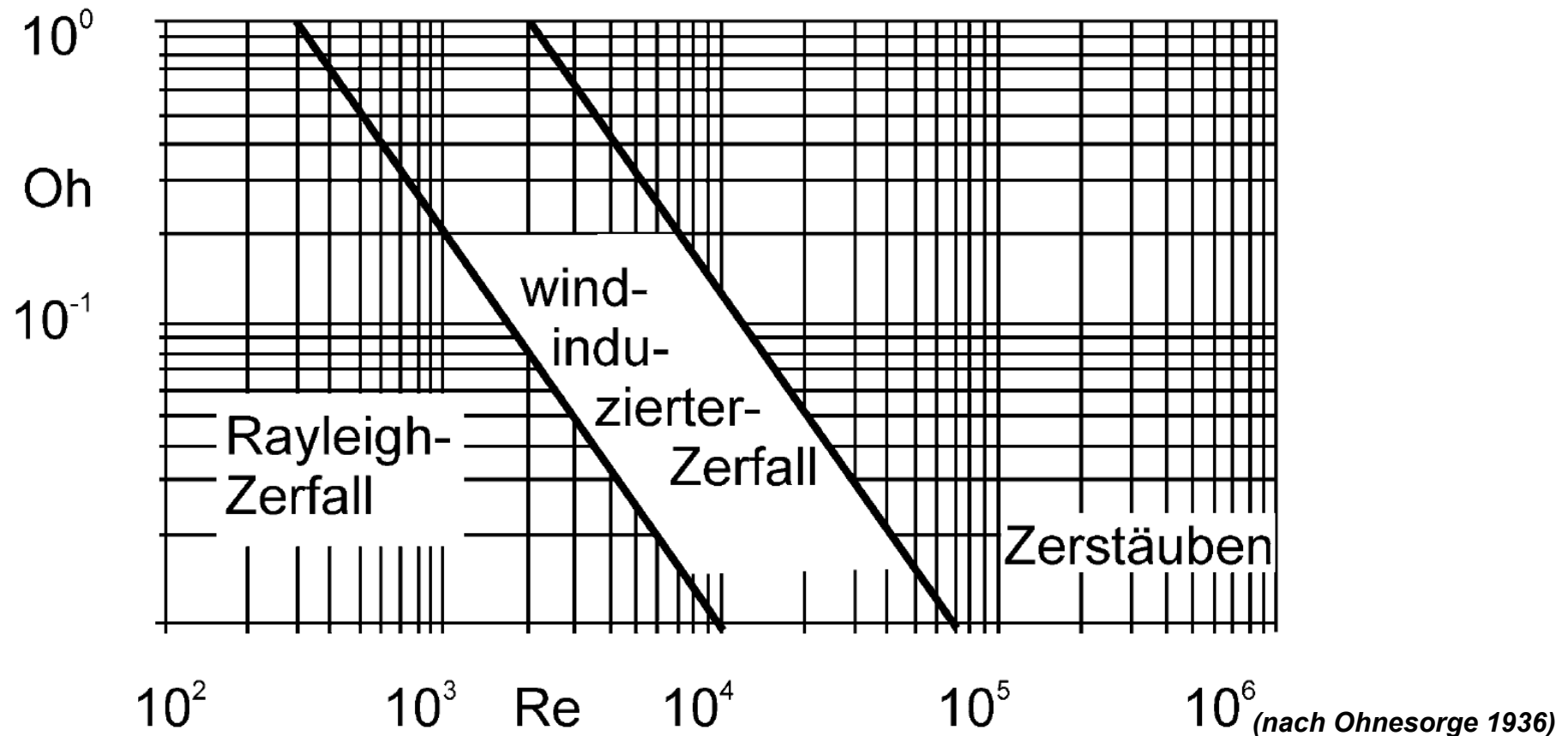
Reynoldszahl Re

Weberzahl We

Ohnesorgezahl Oh

Primärzerfallsbereiche einer Lochdüse

Ohnesorge untersuchte den Einfluss der **Viskosität**, der **Fluiddichte**, der **Oberflächenspannung** und des **Düsendurchmessers** auf den Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. **Abgrenzung der verschiedenen Zerfallsformen durch Geraden konstanter Weberzahl.**



Reynolds-Zahl:
$$Re = \frac{\rho_l \cdot u_{aus} \cdot d}{\eta_l}$$

Weber-Zahl:
$$We = \frac{\rho_l \cdot u_{rel}^2 \cdot d}{\sigma_l}$$

Ohnesorge-Zahl:
$$Oh = \frac{\eta_l}{\sqrt{\sigma_l \cdot \rho_l \cdot d}}$$

ρ_l Dichte des Fluids

u_{aus} Austrittsgeschwindigkeit

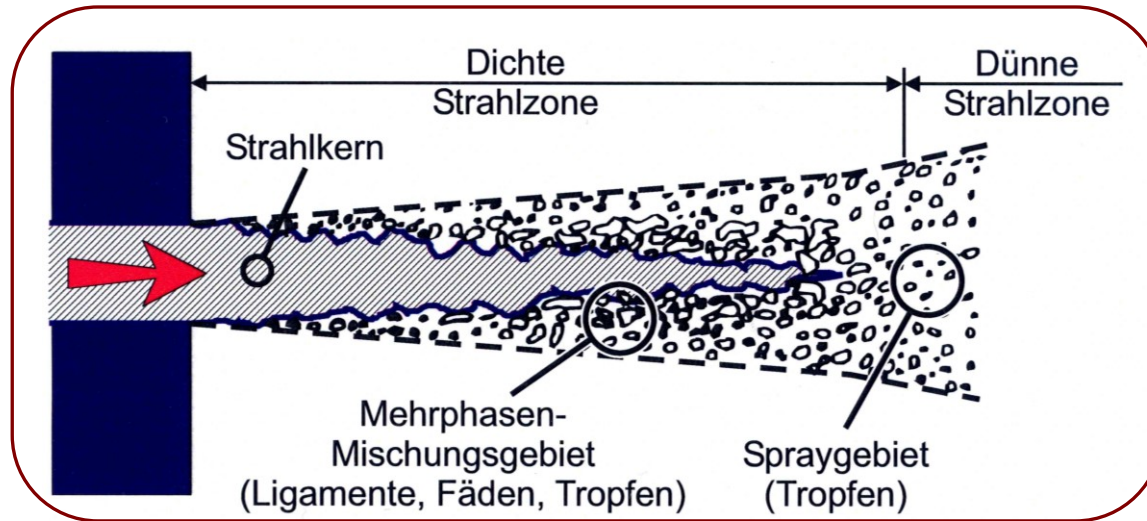
η_l Viskosität des Fluids

σ_l Oberflächenspannung des Fluids

Sekundärer Tropfenzerfall

Unterteilung der Strahlbereiche in Kernstrahl, Dichte und Dünne Strahlzone.

Im **Strahlkern** kommt es zu häufigen Wechselwirkungen zwischen den Tropfen (Kollisionen, Zersplitterungen)

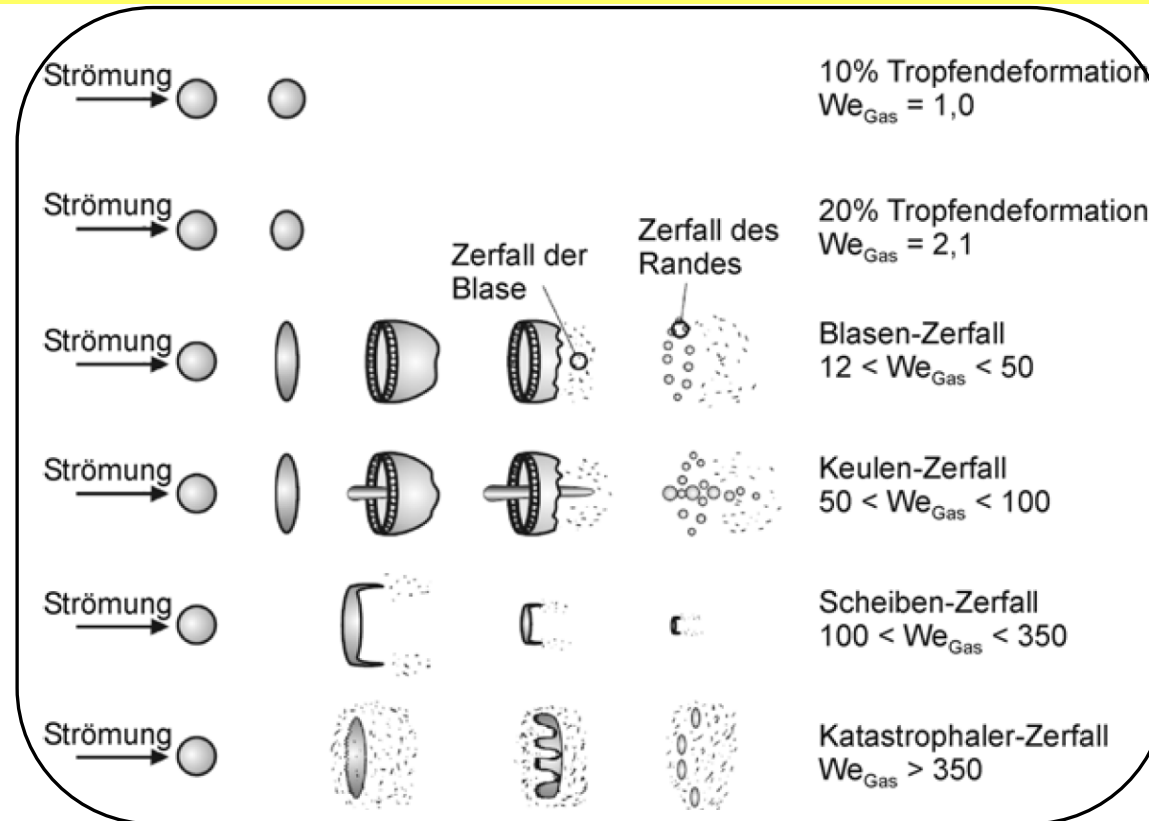


In der **dichten Zone** kommt es seltener zu einer direkten Interaktion der Tropfen. Bei hoher Relativgeschwindigkeit zwischen den verschiedenen Phasen tritt verstärkt ein Zerfall der instabilen Tröpfchen auf.

In der **dünnen Strahlzone** findet keine Interaktion zwischen den Tropfen mehr statt. Die Tropfengeschwindigkeit nähert sich der Geschwindigkeit des umgebenden Fluid an, so dass die aerodynamischen Kräfte keinen Einfluss mehr auf den Zerfall haben

Sekundärer Tropfenzerfall

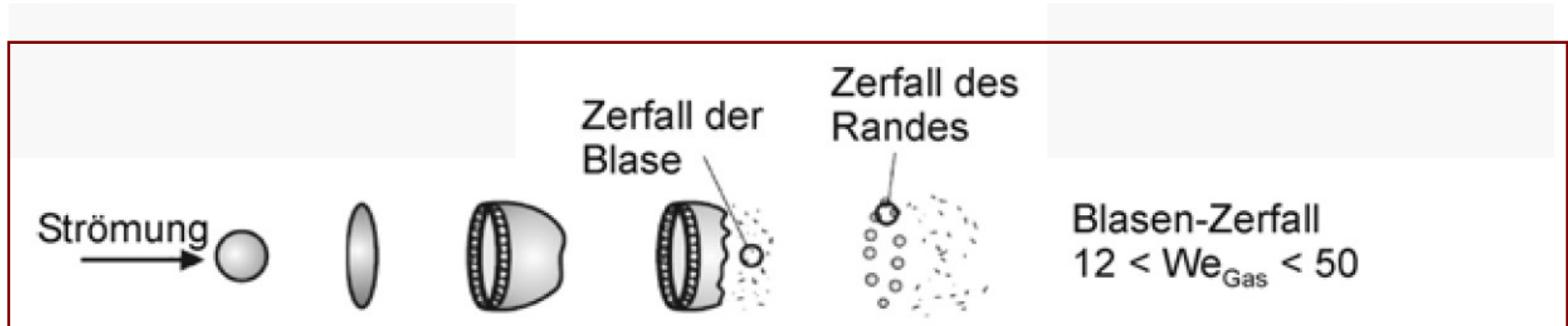
Für den **Sekundärzerfall** sind in der Regel aerodynamische Ursachen sowie starke Wechselwirkung der Flüssigkeitsligamente untereinander verantwortlich. Die primären Tropfen zerfallen solange weiter, bis eine stabile Kleinsttropfengröße erreicht ist.



Sekundärzerfallmechanismen
(nach Pilch u. Erdmann 1987)

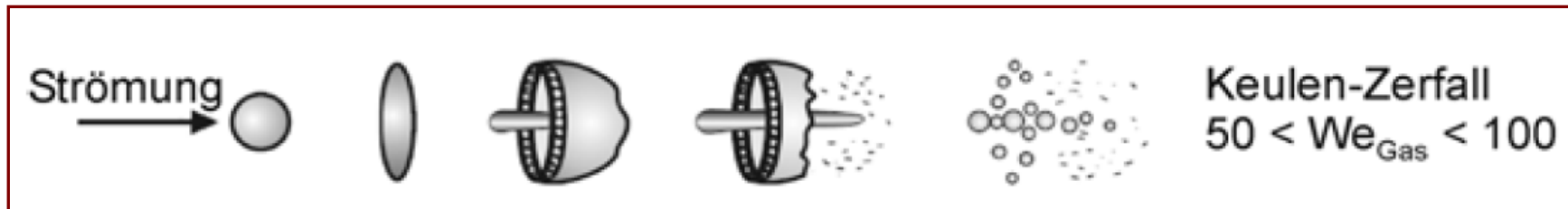
Beim Sekundärzerfall kommt es in Abhängigkeit von der **Weber-Zahl** zu unterschiedlichsten *Erscheinungsformen*.

Blasenzerfall



Übersteigt die Weberzahl leicht den kritischen Wert **We > 12**, so setzt der **Blasenzerfall** ein. Der Blasenzerfall wird durch die Verformung des Tropfens in eine Scheibe eingeleitet, die dann, ähnlich wie beim Erzeugen einer Seifenblase, zu einem dünnen hohlen Beutel aufgeblasen wird. Der Rand des Beutels besteht aus einem massiven wulstartigen Ring. Der Zerfallsprozess beginnt mit dem Zerplatzen der Membran und schließt mit dem Zerfall des Beutelringes ab. Es entstehen viele unterschiedlich große Tropfen

Keulen-Zerfall



Der Keulenzерfall ist dem Blasenzerfall sehr ähnlich. Zusätzlich zu der Membran tritt hier entlang der Tropfenachse, parallel zur Anströmung, eine Flüssigkeitssäule auf. Auch diese zerfällt in zahllose Tropfen, ähnlich denen beim Aufbruch des Beutelrings

Scheiben-Zerfall



Bei weiterer Steigerung der Weberzahl verändern sich die Zerfallsmechanismen grundlegend.

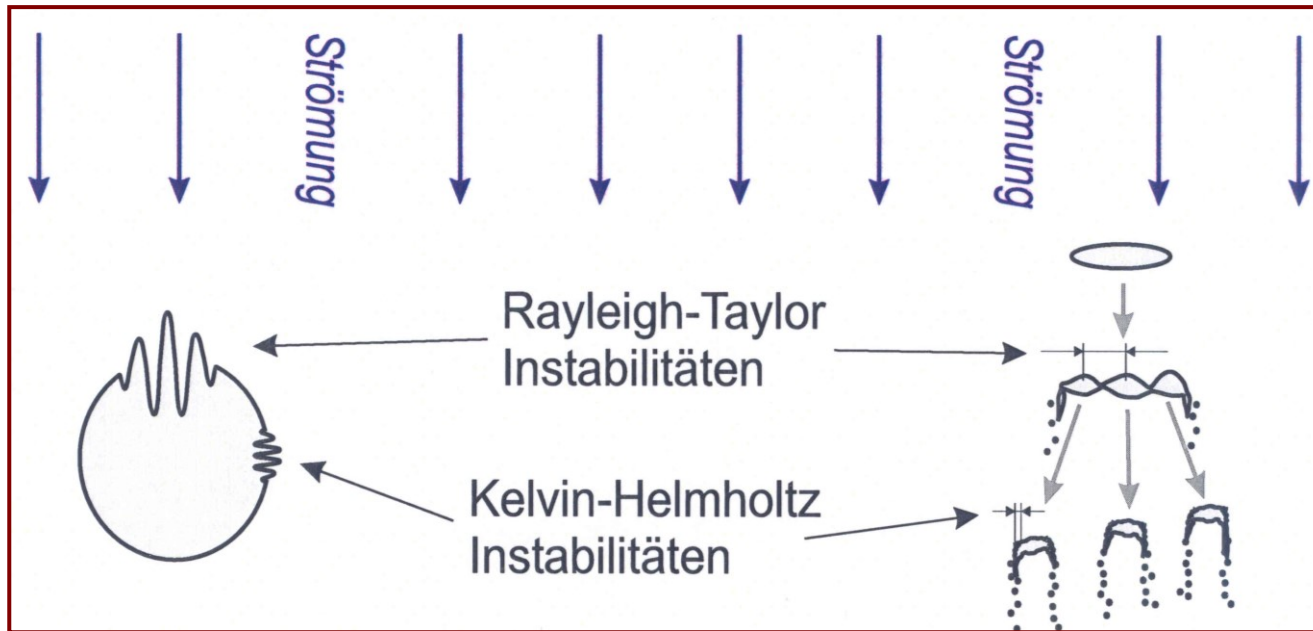
Beim Scheiben-Zerfall bildet sich am Rand des abgeflachten Tropfens ein Flüssigkeitsstreifen aus, von dem aus feine Tropfen abgeschert werden. Dabei werden auf der Tropfenoberfläche durch aerodynamische Anregung kurzweilige Störungen induziert, die kontinuierlich bei Erreichen einer kritischen Amplitude kleinste Tropfen aus der Flüssigkeitsoberfläche herauslösen.

Katastrophaler-Zerfall



Bei noch **größeren Weberzahlen ($We > 350$)** führen die kurzweiligen Störungen zum sogenannten **katastrophalen Zerfall**. Hierbei zerfällt der Tropfen kaskadenartig in immer kleinere Elemente, bis schließlich alle Fragmente Weberzahlen unter dem kritischen Wert aufweisen

Tropfeninstabilitäten beim Katastrophalen-Zerfall



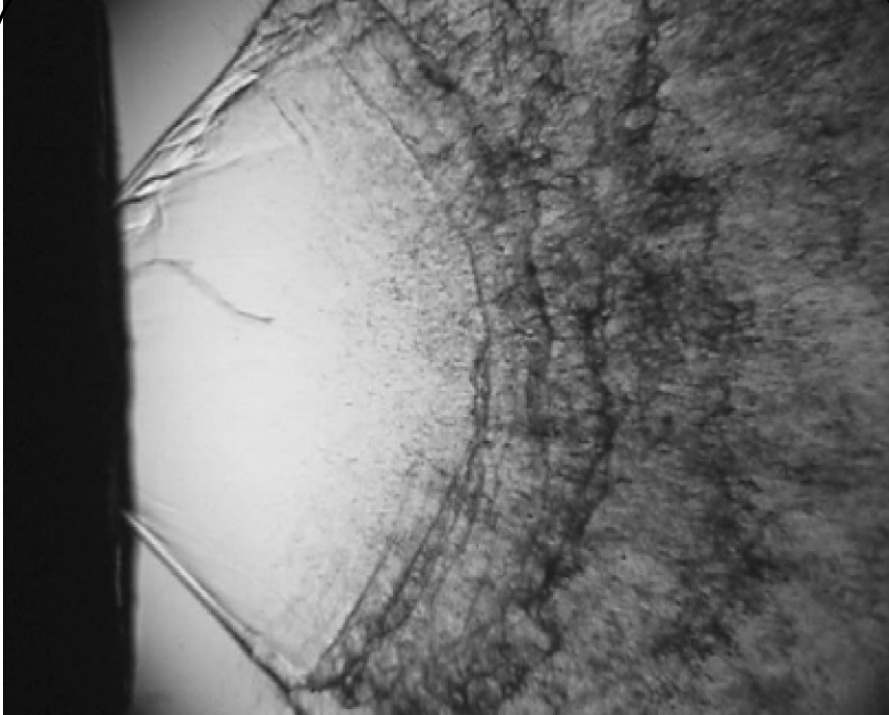
Rayleigh-Taylor-Instabilität:

tritt auf, wenn zwei unterschiedlich dichte Fluide gegeneinander beschleunigt werden.

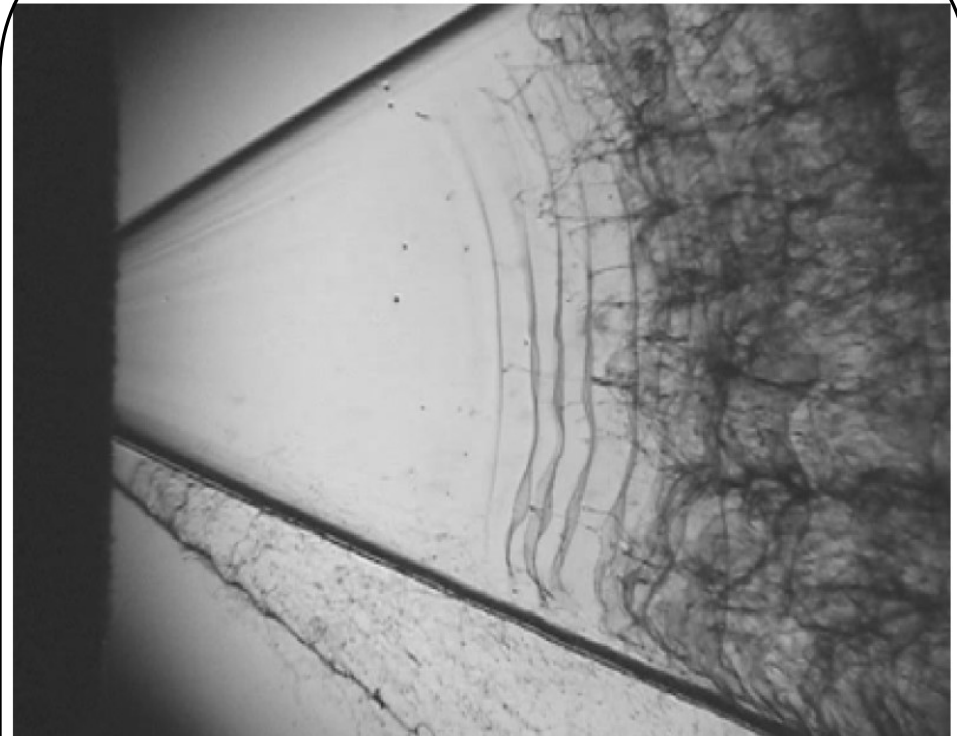
Kelvin-Helmholtz-Instabilität:

entsteht an der Grenzschicht zweier paralleler Fluidströmungen. Voraussetzung für das Auftreten dieser Instabilität sind verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten und oder verschiedene Strömungsrichtungen der beiden Fluidschichten, so dass Scherung in der Grenzschicht entsteht.

Lamellenzerfall

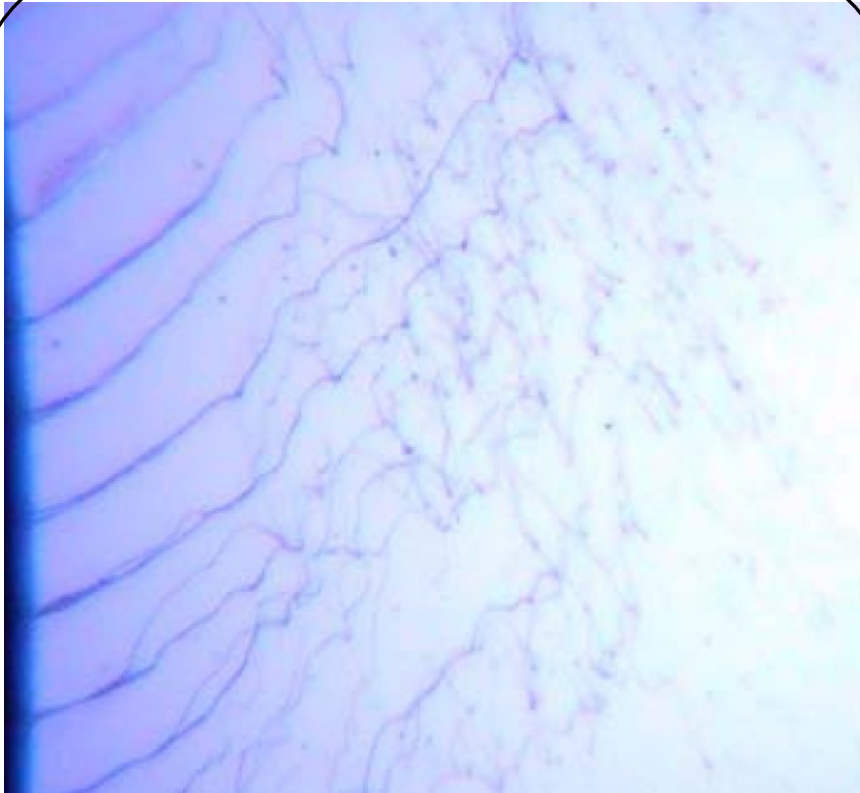


**Hydraulische Zerstäubung
(Alkydal F251 X/Xylol)
Druck =200 bar
 $\eta = 104 \text{ mPa}\cdot\text{s}$**

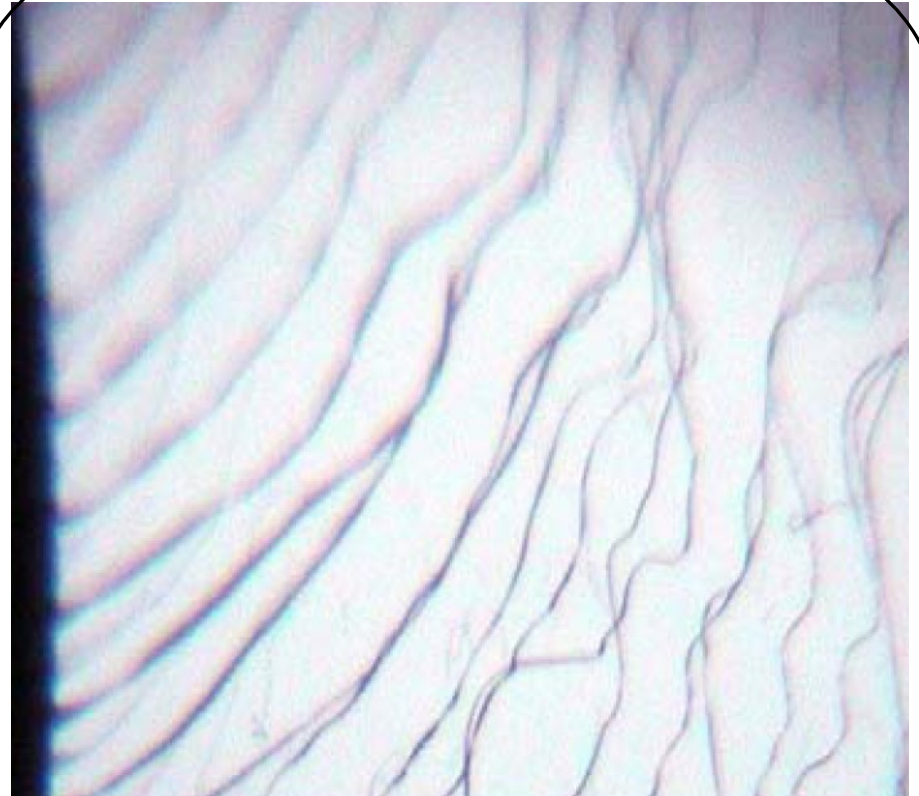


**Hydraulische Zerstäubung
(Alkydal F251 X/Xylol)
 $p = 200 \text{ bar}$
 $\eta = 999 \text{ mPa}\cdot\text{s}$**

Fadenzerfall (Rotationszerstäubung)



**Hochrotationszerstäubung
Alkydal F251 X/Xylol
Drehzahl von 50.000 min⁻¹
 $\eta = 104 \text{ mPa}\cdot\text{s}$**



**Hochrotationszerstäubung
Alkydal F251 X/Xylol
Drehzahl von 50.000 min⁻¹
 $\eta = 999 \text{ mPa}\cdot\text{s}$**

Tropfenverdampfung, D²-Gesetz

Es geht von der Annahme aus, dass der Tropfen zunächst auf die Siedetemperatur aufgeheizt wird. In dieser Aufheizphase findet nur geringer Stoffaustausch mit der Umgebung statt. Im Anschluss daran wird alle weitere zugeführte Energie in latente Verdampfungswärme umgesetzt. In dieser stationären Phase der Tropfenverdampfung kann über die Verdampfungskonstante λ der momentane Durchmesser eines verdampfenden Tropfens mit seinem ursprünglichen verknüpft werden [Lefebvre 1989]:

$$D_0^2 - D^2 = \lambda_{st} \cdot t$$

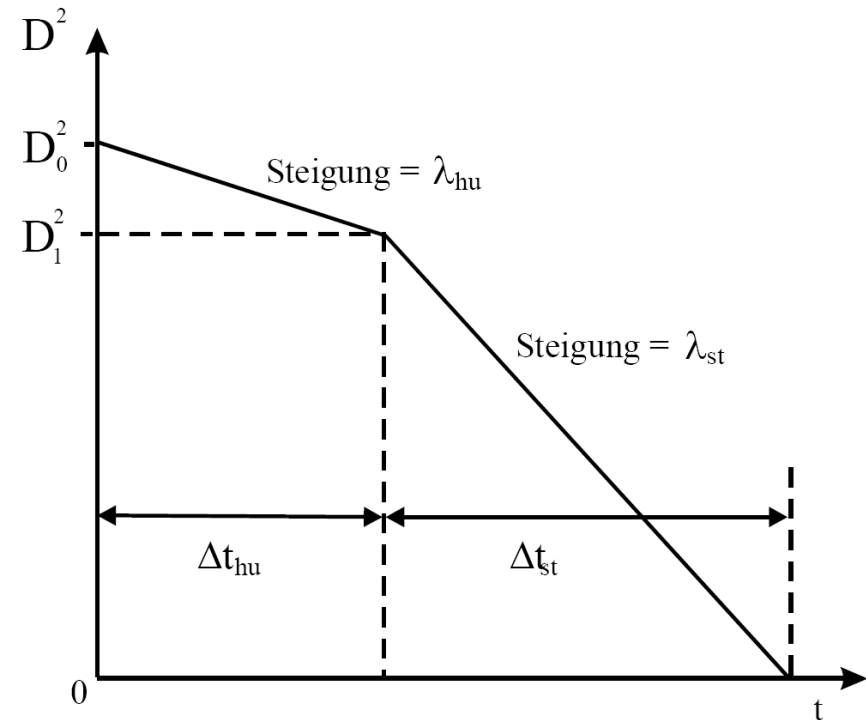
$$t = \frac{D_0^2}{\lambda_{st}}$$

D_0 Der Durchmesser zum Zeitpunkt 0

t Die Verdampfungszeit

λ_{st} Die Verdampfungskonstante

Die Verdampfungskonstante λ ist die Zeit, in der die bzw. Durchmesserquadrat, d^2 des verdampfenden Tropfens 1 mm² abnimmt.

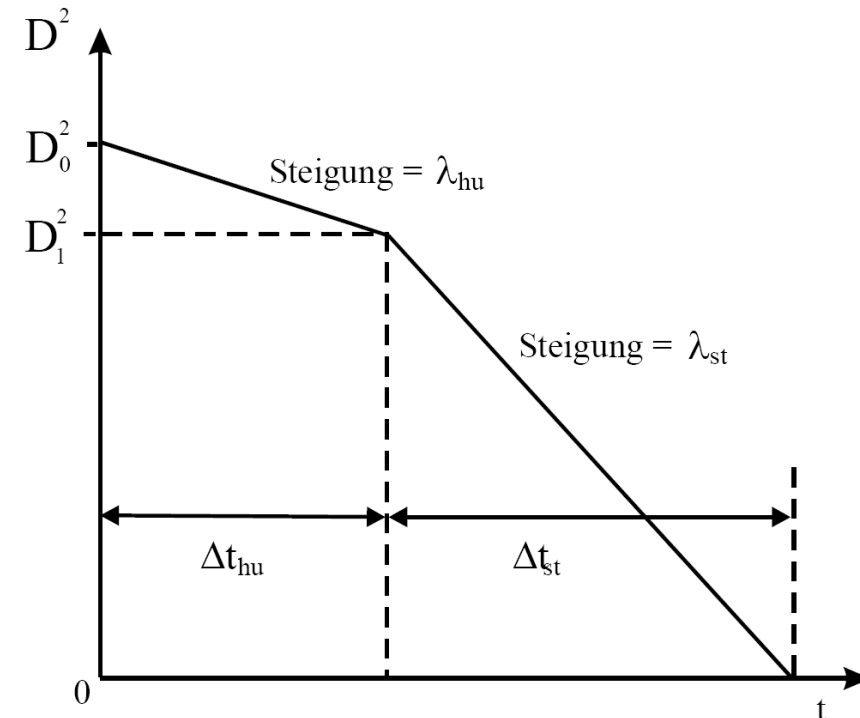


Tropfenverdampfung, D²-Gesetz

Berücksichtigt man die Aufheizperiode, so setzt sich die Lebensdauer aus der Aufheizzeit und der Verdampfungszeit zusammen.

$$t = \frac{D_0^2 - D_1^2}{\lambda_{hu}} + \frac{D_1^2}{\lambda_{st}}$$

- t Verdampfungszeit
- D₀ Anfangdurchmesser
- D₁ Durchmesser am Ende des Aufheizens
- λ_{hu} Verdampfungskonstante während des Aufheizens
- λ_{st} Verdampfungskonstante



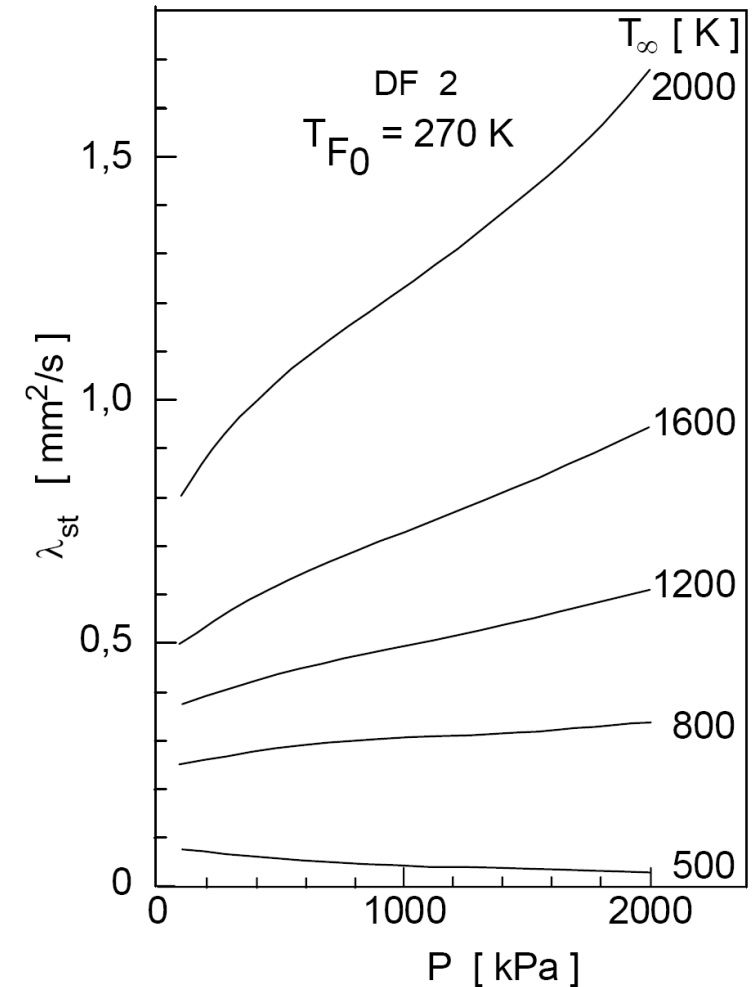
Einfluss von Temperatur und Umgebungsdruck auf die Verdampfungskonstante

Der λ -Wert steigt mit steigendem Umgebungsdruck, sofern die Umgebungstemperatur hoch genug ist (>800 K).

Bei Temperaturen unterhalb 600 K sinkt die Verdampfungsrate mit steigendem Druck, da hier die vergrößerte Teilchendichte der Gasphase den Austritt weiterer Moleküle aus der Flüssigphase verhindert.

Zwischen 600 K und 800 K ist λ nahezu druckunabhängig.

Die Verdampfungsrate wird umso geringer, je höher der Siedepunkt einer Flüssigkeit liegt.



Einfluss von Temperatur und Umgebungsdruck auf die Verdampfungskonstante (Gleichgewichtsphase). Diesel-Kraftstoff, 270 K bei Einspritzbeginn [Lefebvre 1989].

Tropfenverdampfung, D²-Gesetz

Ein Heizölspray weist folgende gemittelte Tropfengrößenverteilung auf:

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

$$D_{0,99} = 80 \mu\text{m} \quad D_{0,999} = 100 \mu\text{m}.$$

Die Verdampfungskonstante im Flammrohr eines Blaubrenners beträgt $\lambda = 1,3 \text{ s/mm}^2$.

a) Wie hoch ist die Verdampfungszeit der angegebenen Tropfengrößen?

b) Wie groß sind die Tropfen nach 5 ms Verweilzeit?

$$D_0^2 - D^2 = \lambda_{st} \cdot t$$

$$D = 0$$

$$t = \frac{D_0^2}{\lambda_{st}}$$

D_0 Der Durchmesser zum Zeitpunkt 0

t Die Verdampfungszeit

λ_{st} Die Verdampfungskonstante

	D_0 [mm]	D_0^2 [mm ²]	$t = D_0^2/1,3$ [s]	t [ms]
D 0,1	0,01	0,0001	7,69231E-05	0,08
D 0,5	0,02	0,0004	0,000307692	0,31
D 0,9	0,04	0,0016	0,001230769	1,23
D 0,99	0,08	0,0064	0,004923077	4,92
D 0,999	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.**

Wie groß sind die Tropfen D 0,999-Tropfenklasse nach 5 ms Verweilzeit?

$$D_0^2 - D^2 = \lambda_{st} \cdot t$$

$$D = \sqrt{D_0^2 - \lambda_{st} \cdot t}$$

$$D = \sqrt{(0,1 \text{ mm})^2 - 1,3 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot 0,005 \text{ s}} = 0,0591 \text{ mm} \approx 60 \mu\text{m}$$

Nach 5 ms beträgt der augenblickliche Durchmesser der D 0,999-Tropfenklasse 60 % des Anfangswertes.

Das nicht verdampfte Tropfenvolumen beträgt $(0,6)^3 \sim 21,6$ % des Anfangswertes.

D.h. definitiv nicht verdampft ist: $(21,6 \% \cdot 0,1\%) = 0,022\%$

Tropfenverdampfung, D²-Gesetz

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 D²-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 % CO₂-Gehalt:

1% von 14% CO₂ = 0,14 CO₂ entspricht 0,14 % CO.

Da 100 % = 10⁶ ppm, 1 % = 10⁴ ppm, sind 0,14 % = 1400 ppm.

Tropfenparameter

Ein Spray besteht gewöhnlich aus Tropfen vieler verschiedener Größen

Symbol	Messgröße	Formel	Physikalische Bedeutung
D_{20}	Oberfläche	$\left(\frac{\sum_i N_i d_i^2}{\sum N_i} \right)^{1/2}$	durchschnittliche Oberfläche
D_{30}	Volumen	$\left(\frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum N_i} \right)^{1/3}$	durchschnittliches Volumen
D_{32}	Oberflächenvolumen (SMD)	$\frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum N_i d_i^2}$	Oberflächenvolumen

Sauter-Durchmesser D_{32} ist eine typische Größe, die die Verteilung der Tropfengröße im Einspritzstrahl beschreibt. Er ist definiert als das Verhältnis von Gesamtvolumen der eingespritzten Kraftstoffmenge zur Gesamtoberfläche aller Tröpfchen.

Tropfenparameter

Berechnung der 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

D_{10}	Arithmetisch gemittelt $\Sigma n_i \cdot D_i / \Sigma n_i$
D_{20}	Flächenmittelung $(\Sigma n_i \cdot D_i^2 / \Sigma n_i)^{1/2}$
D_{30}	Volumenmittelung $(\Sigma n_i \cdot D_i^3 / \Sigma n_i)^{1/3}$
D_{32} SMD	Sauter Durchmesser $\Sigma n_i \cdot D_i^3 / \Sigma n_i \cdot D_i^2$
$D_{0,1}$	10 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,1}$
$D_{0,5}$ MMD	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}	99,9 % des Tropfenvolumens besteht aus Tropfen kleiner oder gleich $D_{0,999}$

Tropfenparameter

Berechnung der Mittelwert-Tropfengrößen für einen Spray mit folgender Zusammensetzung

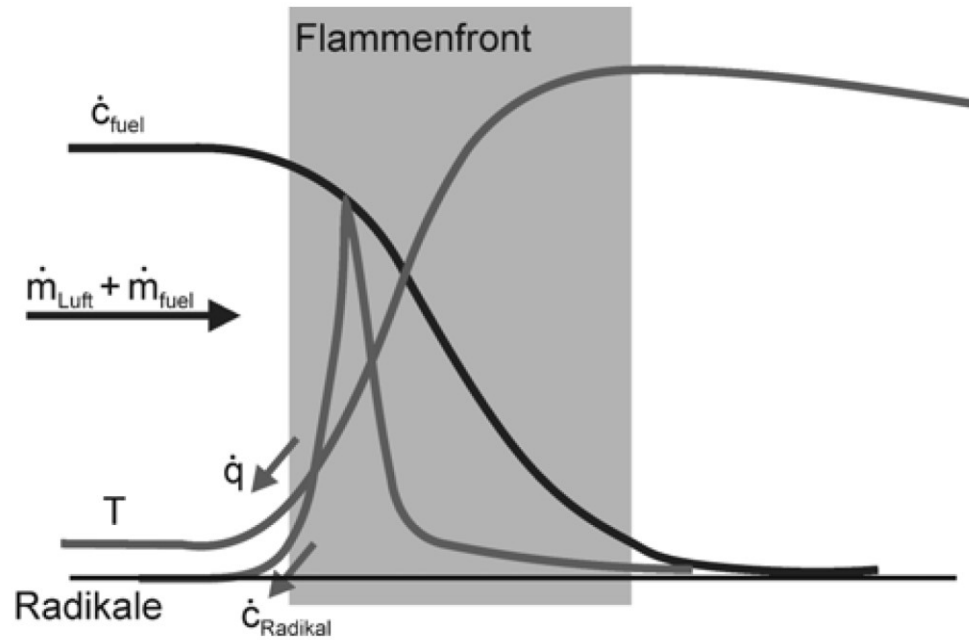
Klasse	Anzahl der Tropfen	Größe				
<i>l</i>	n_i	D_i	$n_i \cdot D_i$	$\Sigma n_i \cdot D_i / \Sigma n_i$	$n_i \cdot D_i^2$	$(\Sigma n_i \cdot D_i^2 / \Sigma n_i)^{1/2}$
1	500	10	5000		50000	
2	200	20	4000		80000	
3	80	30	2400		72000	
4	40	40	1600		64000	
5	5	50	250		12500	
Σ	825		13250	16,1	278500	18,4

<i>i</i>	$n_i D_i^3$	$\Sigma_i n_i D_i^3$	$(\Sigma n_i \cdot D_i^3 / \Sigma n_i)^{1/3}$	SMD (D_{32})
1	500000	500000		
2	1600000	2100000		
3	2160000	4260000		
4	2560000	6820000		
5	625000	7445000		
Σ	7445000	= 100 %	20,8	27,7

Flammenstabilisierung

Eine Flamme ist eine kontinuierlich reagierende oder sich entzündende chemische Reaktionszone. Um die chemische Reaktion aufrecht zu erhalten, bedarf es der Zufuhr von Wärme und Radikalen in das Frischgas.

Die Flammenstabilisierung beruht auf dem Aufrechterhalten der Reaktion, d.h. auf dem kontinuierlichen Zünden des Frischgases aufgrund zweier physikalischer Mechanismen:



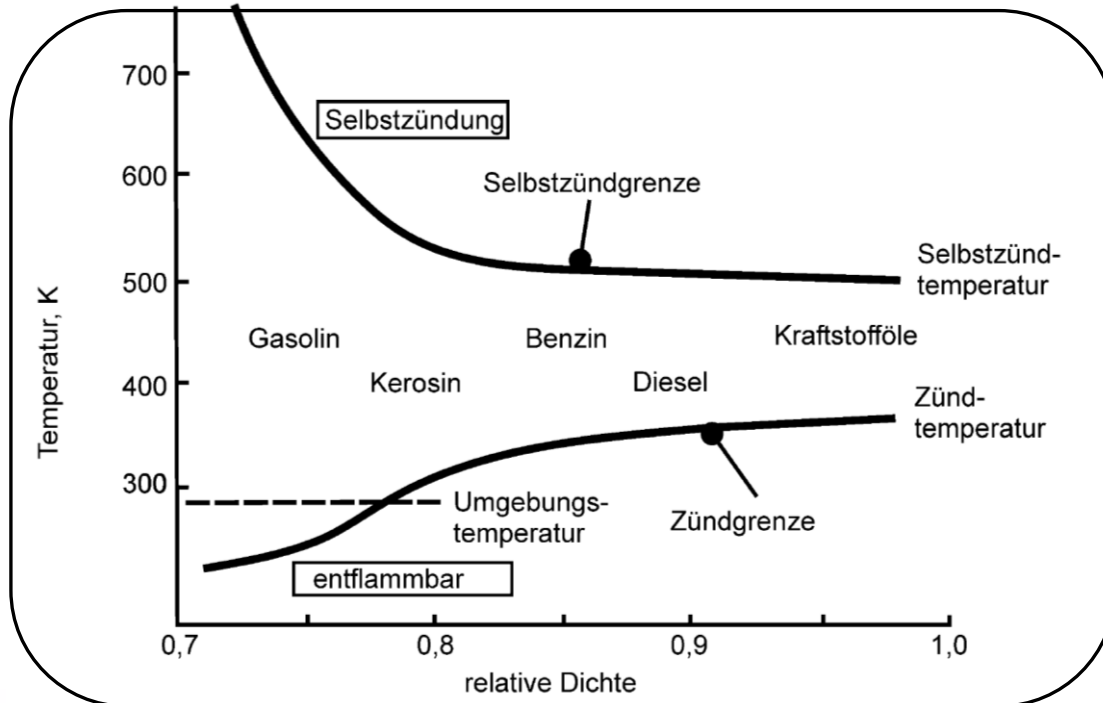
Temperatur- und Radikalenprofil durch eine laminare Flammenfront

Zündgrenzen

Brennstoff-Luftgemische sind nur zündfähig, wenn ihre Zusammensetzung zwischen zwei Grenzwerten, den „Zündgrenzen“ liegt.

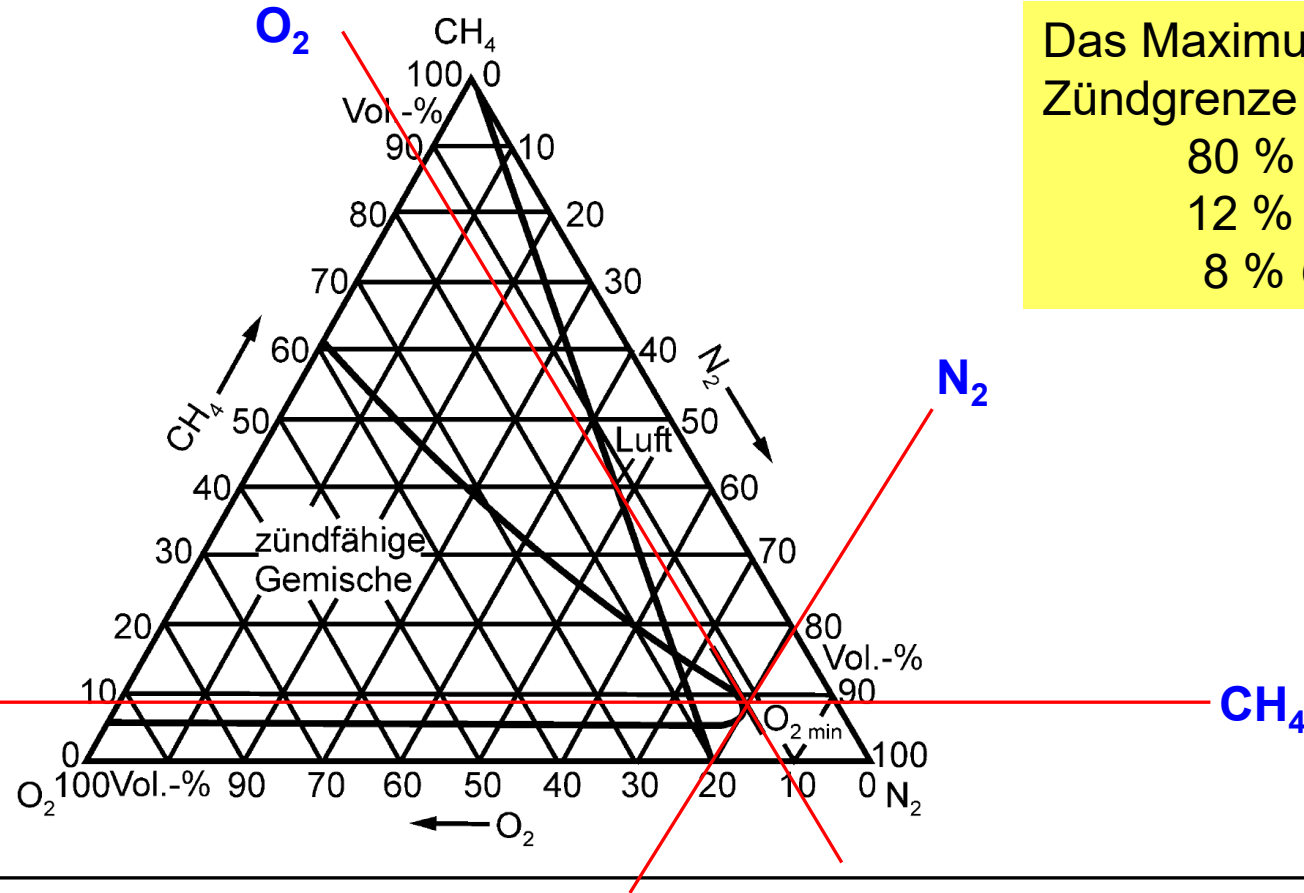
Zündgrenzen sind Grenzen des Mischungsverhältnisses, d.h. der Konzentration von Brennstoff im Gemisch mit Luft.

Man unterscheidet eine „untere“ Zündgrenze im luftreichen (*magere Zündgrenze*) und eine „obere“ Zündgrenze im brennstoffreichen Mischungsgebiet (*fette Zündgrenze*).



Zündgrenzen hängt von:
 Art des Brennstoffs
 Art des Oxidationsmittels
 Druck und Temperatur ab,

Zündgrenzen



Das Maximum der Zündgrenze liegt bei
 80 % N_2
 12 % O_2
 8 % CH_4

Gasart	Untere Zündgrenze		Obere Zündgrenze	
	Vol. Gas	% Gas / mg Gas / l _n Luft	Vol. Gas	% Gas / mg Gas / l _n Luft
CH_4	5,0	38	15,0	126

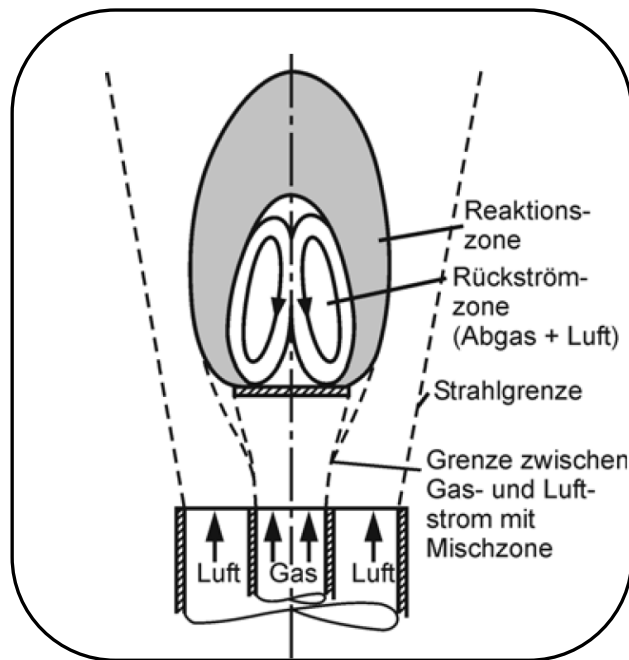
Zum Ablesen eines Punktes aus diesem Diagramm wird der Schnittpunkt aller Achsparallelen mit dem jeweiligen Wert gesucht.

Flammenstabilisierung

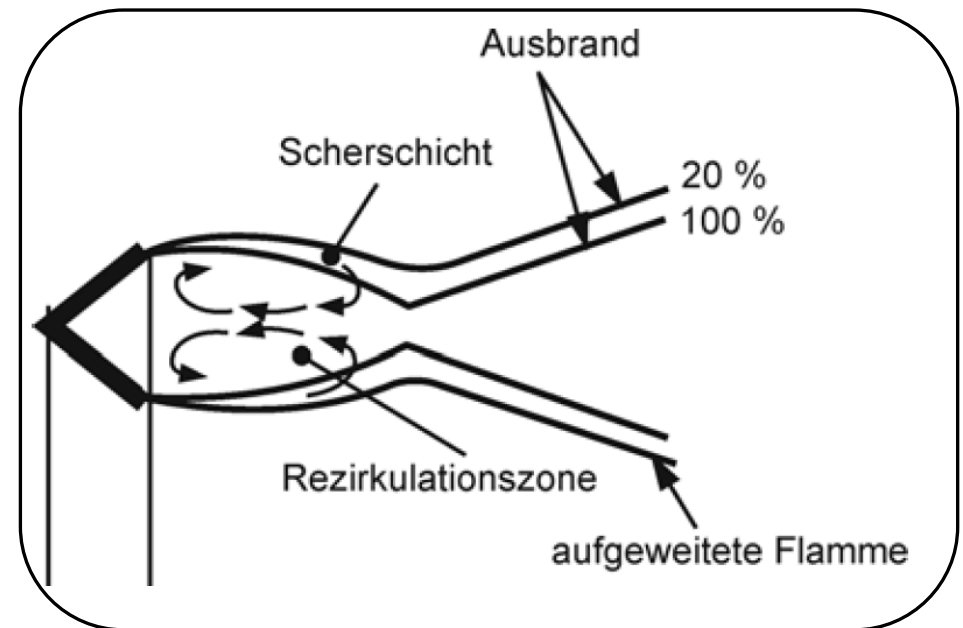
Die einfachste Möglichkeit Flammen zu stabilisieren besteht darin, einen Rückfluss an Wärme und Radikale durch Abgase ins Frische Gemisch zu initiieren.

z.B. im Nachlauf von **Staukörpern oder Querschnittsprüngen, sogenannten Flammhaltern, Rezirkulationsströmungen.**

Derartige Flammhalter kommen heute vorwiegend in Haushaltsbrennern aber auch in Nachbrennern von Flugtriebwerken zum Einsatz

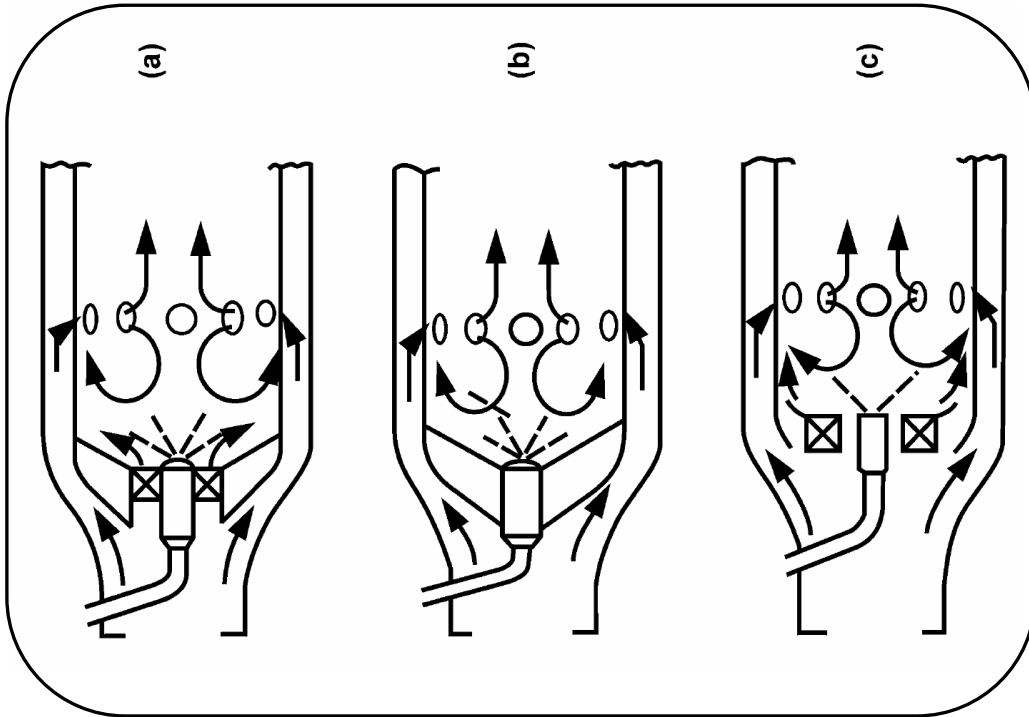


Flammenstabilisierung durch ein Rückströmgebiet hinter einer Stauscheibe



Ringförmiger Flammhalter (V-Gutter) eines Nachbrenners eines Flugtriebwerkes

Flammenstabilisierung



Rezirkulationserzeugung in der primären Verbrennungszone von Flugtriebwerksbrennkammern durch eingeblasene Luftstrahlen teilweise unterstützt durch Drallbrenner (a, c) (Lefebvre 1983)

Rezirkulationszonen ohne Bauteile in der heißen Flammenzone können durch aerodynamische Strömungsführungen hervorgerufen werden.

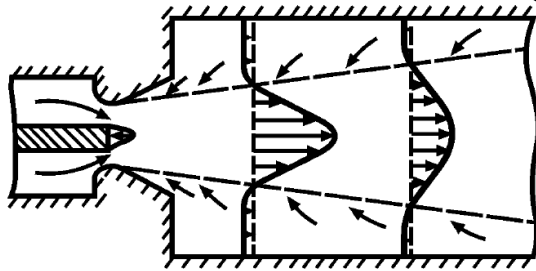
Beispiele:

Konventionelle Flugtriebwerksbrennkammern stabilisieren die primäre Verbrennungszone durch eingeblasene Luftstrahlen teilweise unterstützt durch Dralleinrichtungen, die eine Rezirkulation bewirken

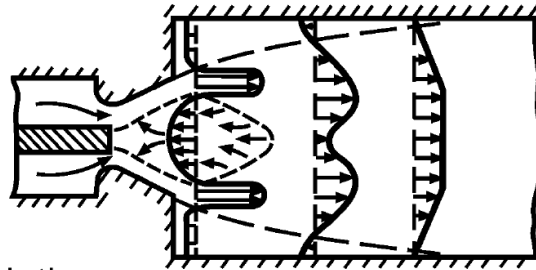
Auch im Brennraum von Ottomotoren werden zur Stabilisierung der Verbrennung gezielt Rezirkulationsgebiete erzeugt, indem die Gemischzuteilung in Verbindung mit den Ventileinlässen entsprechend gestaltet wird.

Flammenstabilisierung

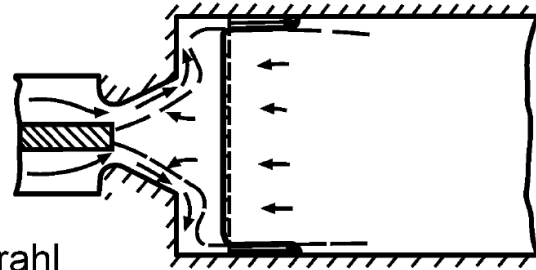
schwacher Drall
 $S_N < 0,6$



starker Drall
 $S_N > 0,6$
 zentrale Rezirkulationszone



starker Drall
 $S_N > 0,6$
 radialer Wandstrahl

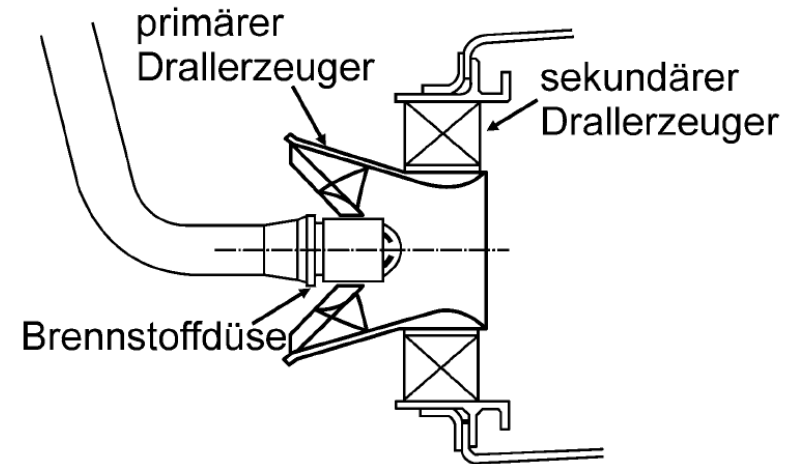
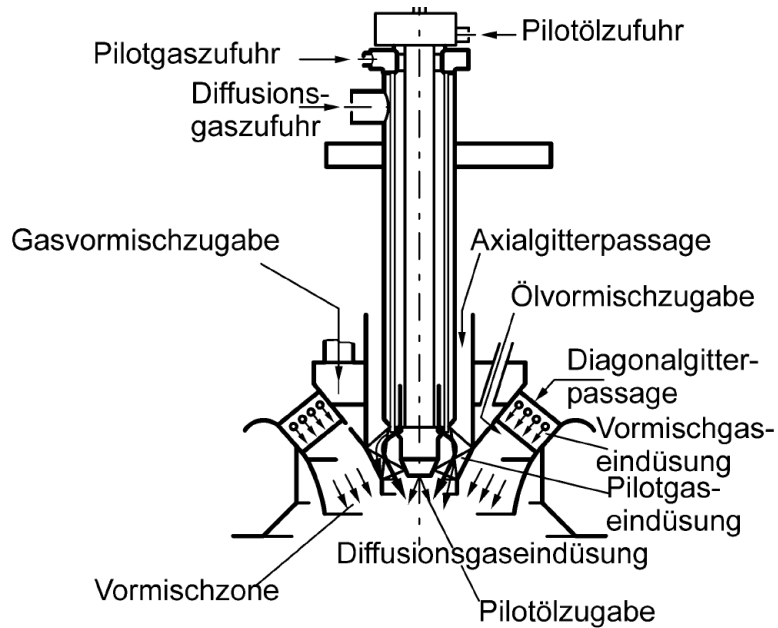


Drallinduzierte Strömungsfelder bei verschiedenen Drallstärken (Beer u. Chigier 1972)

Die Stabilisierung durch starke Wirbel stellt eine Möglichkeit dar, eine stabile Flammenfront zu erzielen ohne Bauteile in der heißen Zone platzieren zu müssen.
 Je nach Drallstärke, quantifiziert durch den sogenannten Drallparameter (Swirlnumber S_N), der sich aus dem Verhältnis des Umfangsimpulses zum axialen Impuls definiert

Flammenstabilisierung

Drallbrenner von Gasturbinenbrennkammern



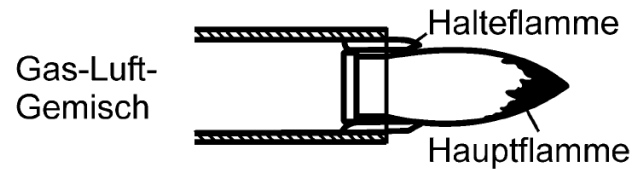
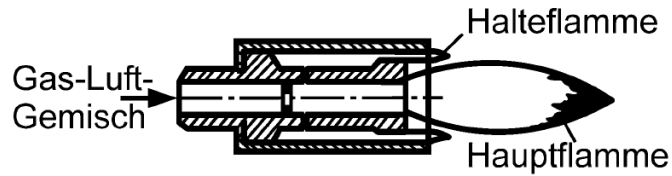
Stationäre Gasturbine; Gas- und Ölbrenner

Gas: Diffusions und Vormischbetrieb

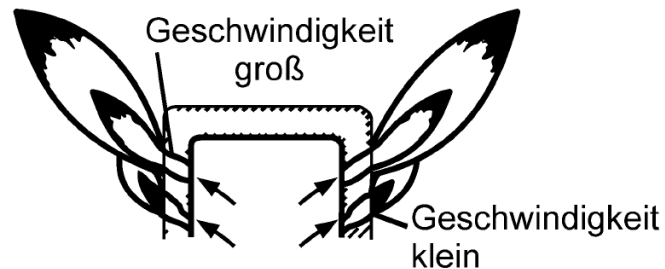
Öl: Diffusionsbetrieb ([Siemens-KWU: Hybridbrenner](#))

Fluggasturbine, Öldiffusionsbrenner

Flammenstabilisierung



a)



b)

Eine zusätzliche Möglichkeit der Flammenstabilisierung stellt die Bereitstellung von Wärme über sogenannte Halteflammen oder heiße Wände dar, die die eigentliche Hauptflamme umgeben

Stabilisierung von Gasflammen durch Halteflammen;

a) Industriebrenner;

b) Brennerdeckel des Haushaltskochbrenners (Cerbe 1992)