



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

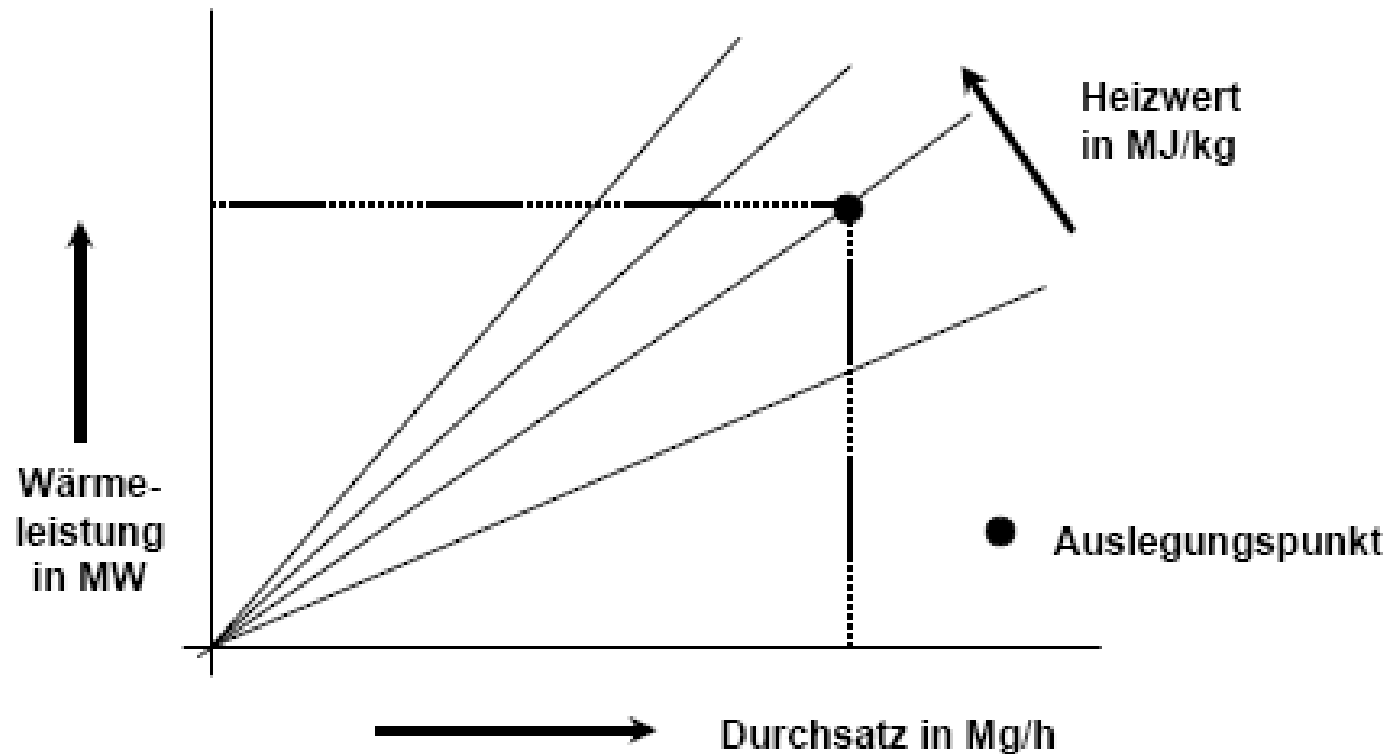
**Institut für Energietechnik, Professur Kraftwerkstechnik**

# **Verbrennung und Dampferzeugung**

**- universitäres Fernstudium -**

**Feuerungssysteme und  
Feuerraumdimensionierung**

# Feuerungsleistungsdiagramm



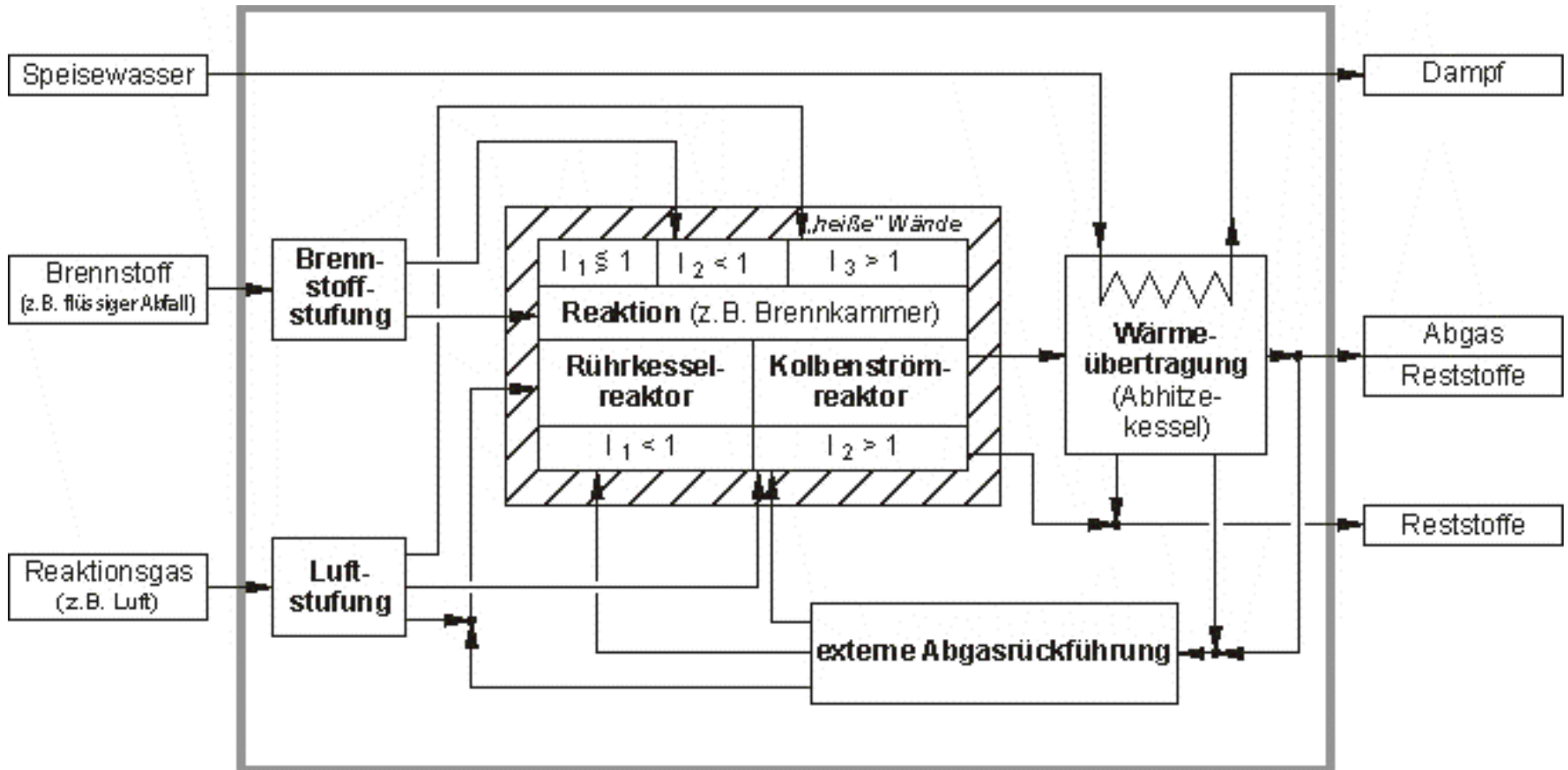
# Haupteinflussgrößen bei thermischen Umwandlungsprozessen

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

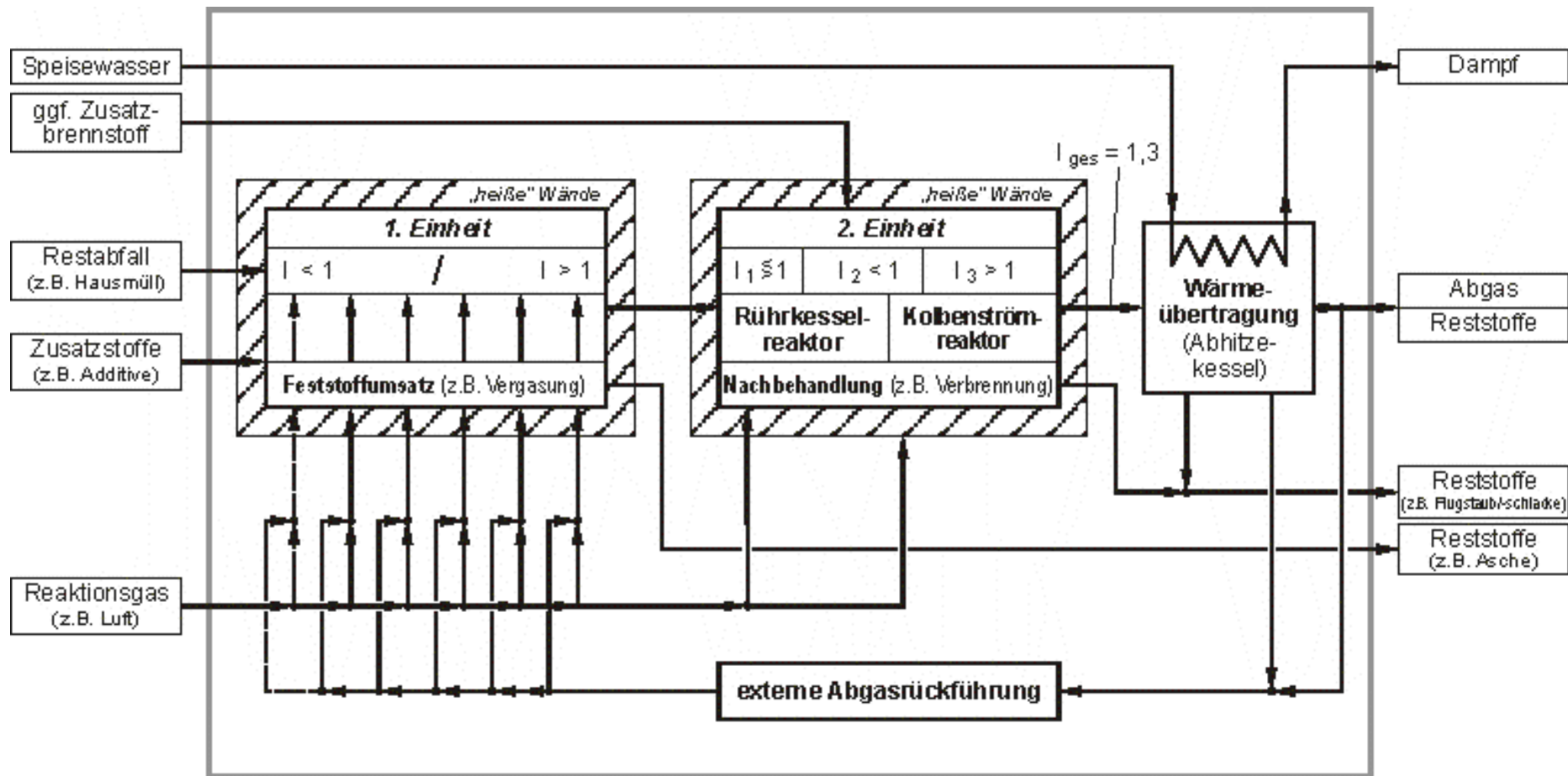
<b>Einsatzstoffe</b>	<b>physikalische Eigenschaften</b>	gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig)		
	<b>chemische Eigenschaften</b>	Zusammensetzung (Problemstoffe)		
<b>Sauerstoffangebot</b>	<b>Thermolyse</b> $\lambda = 0$	<b>Vergasung</b> $\lambda < 1$	<b>Verbrennung</b> $\lambda \geq 1$	
<b>Reaktionsgase</b>	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff), Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.			
<b>Temperatur</b>	<b>Niedertemperatur</b> $\vartheta = 600 \text{ °C}$	<b>bis</b>	<b>Hochtemperatur</b> $\vartheta > 1000 \text{ °C}$ ggf. bis 2000 °C und höher	} Trocknen, Entgasen, Schmelzen, Verdampfen, Sublimieren
<b>Druck</b>	<b>Niederdruck</b> $p \ll 0,1 \text{ MPa}$	<b>Umgebungsdruck</b> $p \approx 0,1 \text{ MPa}$	<b>Hochdruck</b> $p \gg 0,1 \text{ MPa}$	
<b>Reaktorverhalten</b>	<b>Rührkessel</b> $Bo \rightarrow \infty$	<b>Realer Reaktor</b> $0 < Bo < \infty$	<b>Rohrreaktor</b> $Bo = 0$	
<b>Art der Stoffzufuhr</b>	<b>Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, Fluidisation usw.</b> für z.B. Einsatzstoffe, Reaktionsgas, Zusatzstoffe			
<b>Verweilzeit</b>	<b>kurz</b> Sekunden	<b>lang</b> Minuten bis Stunden	<b>sehr lang</b> Stunden bis Tage	
<b>Zusatzstoffe</b>	<b>Additiv</b> (z.B. zur Schadstoffeinbindung, Beeinflussung des Schmelzverhaltens) <b>Zusatzbrennstoff</b> <b>Bett</b> (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung)			

- **Steuerung der Haupteinflussgrößen (Niveau, entlang des Reaktionsweges)**
- **Maßnahmen zur Steuerung der HEG**
  - **Luftstufung**
  - **Brennstoffstufung**
  - **Trennung von Prozessteilschritten zur unabhängigen Optimierung**
  - **Trennung von Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung Feststoff und Nachverbrennung**
  - **Trennung von Verbrennung und Wärmeübertragung**
  - **Wassereindüsung**
  - **Zusatzbrennstoff**
  - **Additive**

## Schematische Prozessführung für gasförmige, flüssige und staubförmige feste Brennstoffe



# Schematische Prozessführung für feste stückige und pastöse Brennstoffe



## Apparate:

- Brennkammer (Staubfeuerung, Feuerung für Flüssigbrennstoffe, Gasfeuerung)
- Drehrohr
- Rost
- Wirbelschicht
- Schacht

# Feuerungssystem für feste Brennstoffe

Festbettfeuerung

Schüttung liegt auf dem Rost

Wirbelschichtfeuerung

stationär

atmosphärisch

Gas- und Feststoffsuspension

zirkulierend

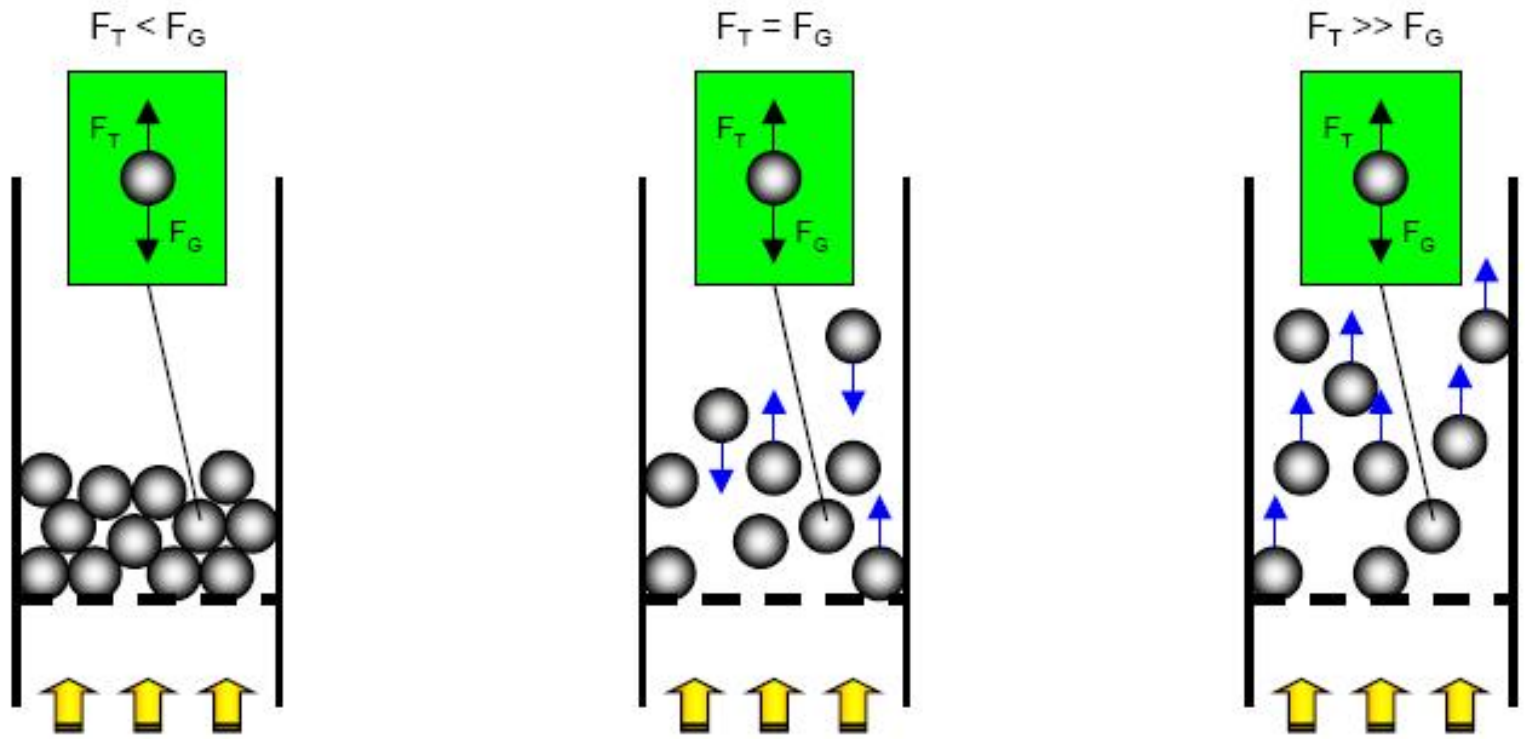
aufgeladen

Staubfeuerung

Stofftransport



# Kraftwirkung am Feststoffpartikel



**Festbettfeuerung**  
(Schüttung ruht auf dem Rost)

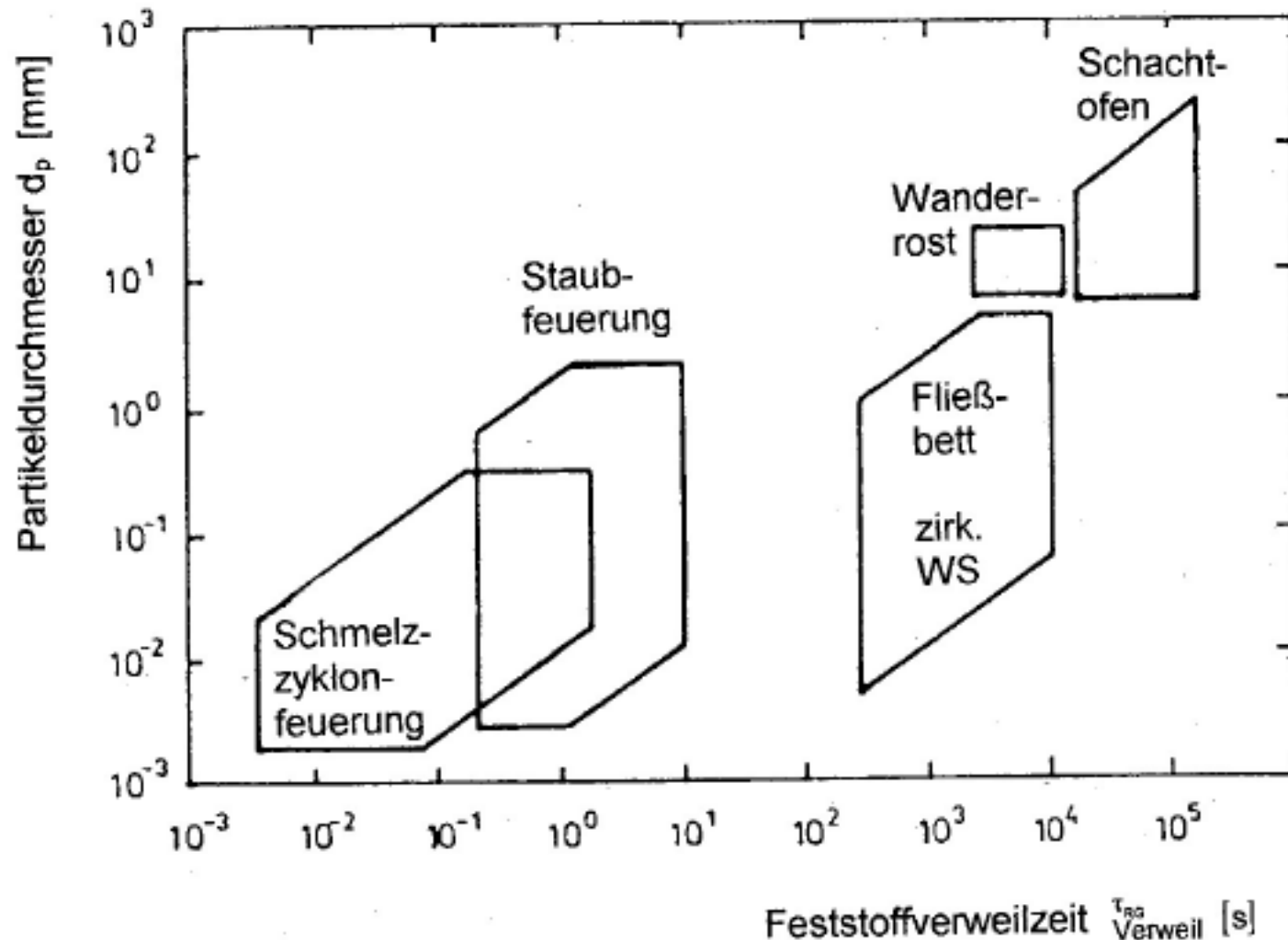
**Wirbelschichtfeuerung**  
(Gas-/ Feststoffsuspension)

**Staubfeuerung**  
(Stofftransport)

↑ = Bewegungsrichtung  
 $F_T = F_A + F_W = \text{Transportkraft}$

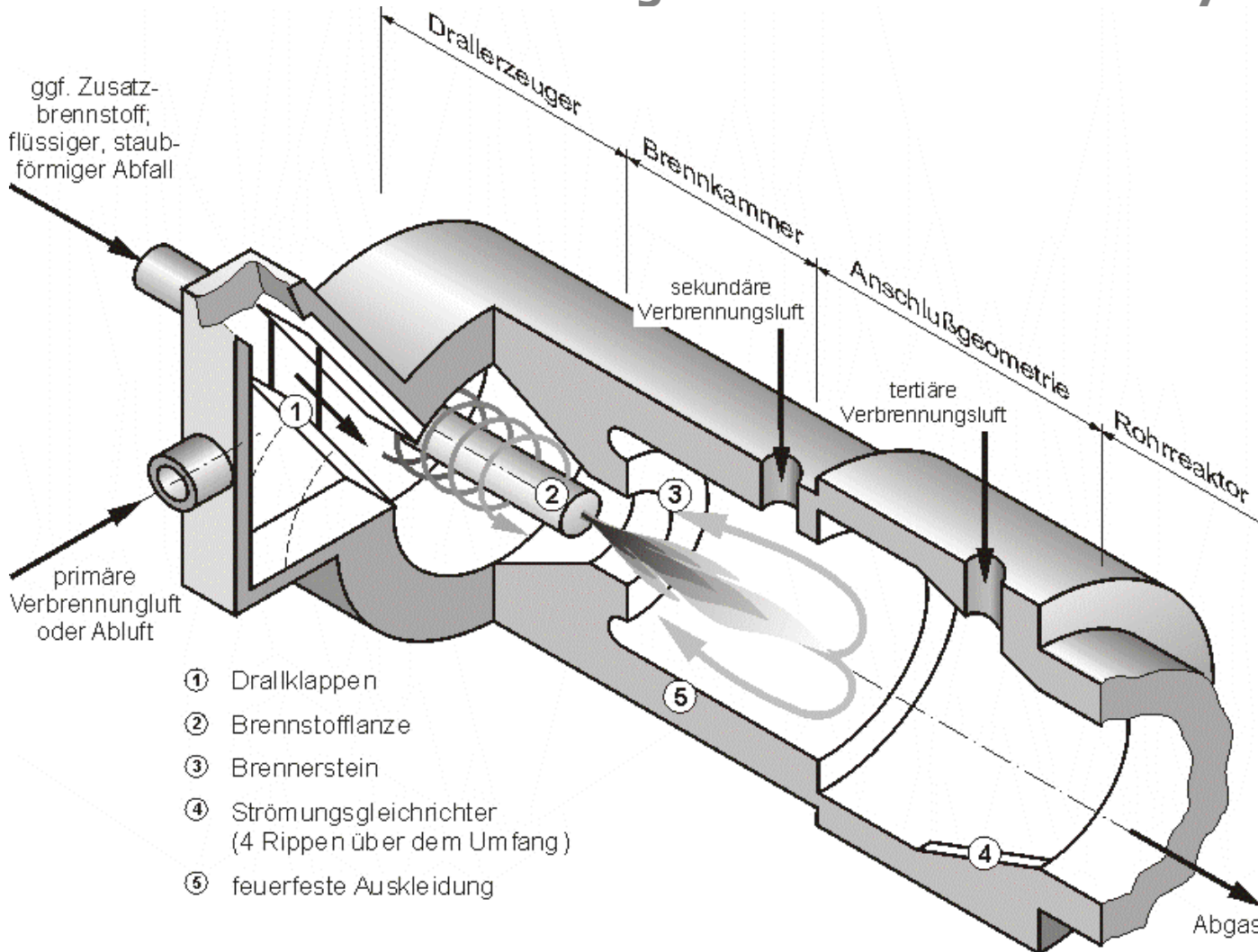
$F_A$  = Auftriebskraft     $F_W$  = Widerstandskraft     $F_G$  = Schwerkraft

# Feuerungssysteme – typische Arbeitsbereiche

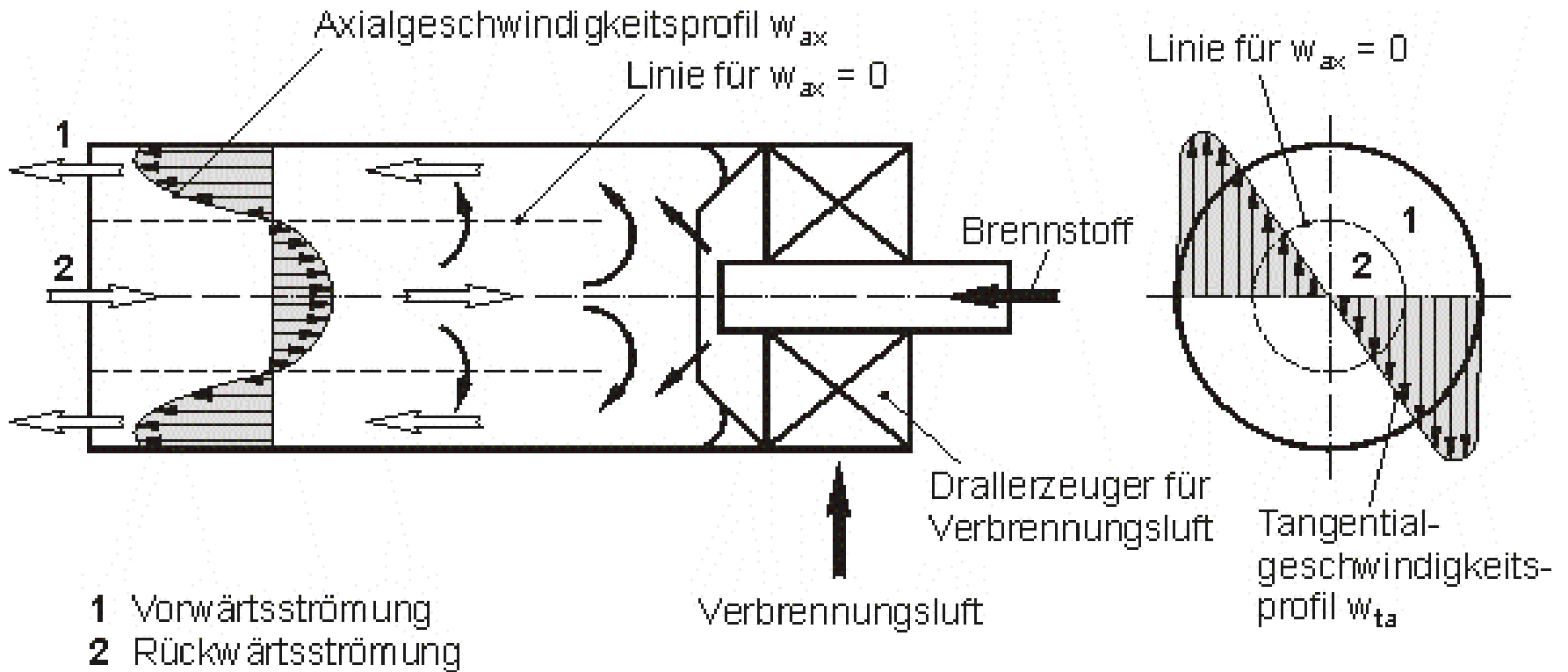


# - Brennkammer / Staubfeuerung -

## Schematische Darstellung eines Brennkammersystems



**Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung einer überkritischen Drallströmung in einer zylindrischen Brennkammer.**

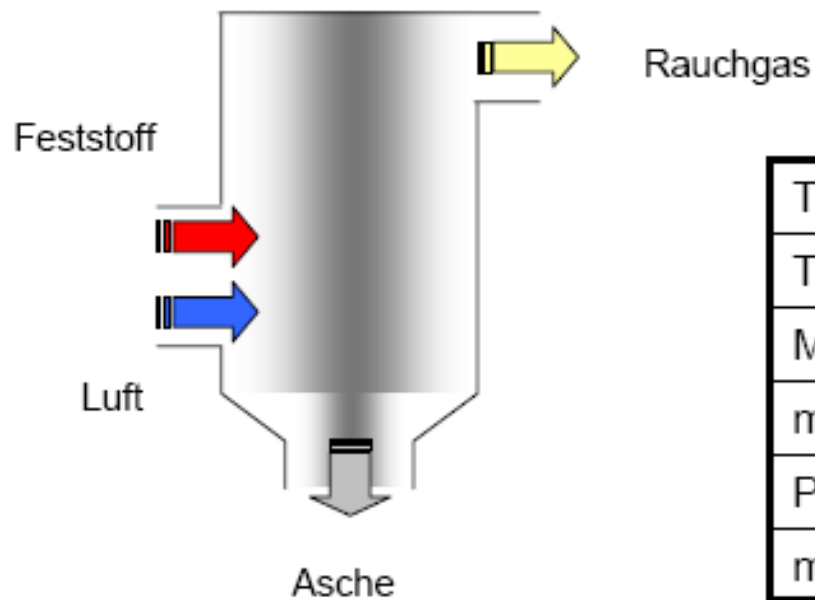


# Charakterisierung von Brennkammersystemen

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Haupteinflußgrößen		Bemerkungen
Einsatzstoffe		gasförmig, flüssig, staubförmig
Sauerstoffangebot	Niveau	unter- bis überstöchiometrisch; in weiten Bereichen variabel; falls am Reaktoraustritt Überstöchiometrie: Bezeichnung „Brennkammer“; falls am Ende Unterstöchiometrie: Bezeichnung „Vergasungsreaktor“
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff längs des Verbrennungsweges sehr gut möglich (einbringen über Rührkessellemente)
Temperatur	Niveau	Verbrennungstemperaturen im Bereich von 1000°C bis 2000°C ggf. auch höher; Bereich sehr variabel
	Steuerung längs des Reaktionsweges	neben der Stufung von Oxidationsmittel und Brennstoff über dem Reaktionsweg, insbesondere Eingriffe durch Abgasrückführung, Wassereindüsung usw. möglich; indirekte Wärmein- bzw. -auskopplung durch entsprechende Heiz- bzw. Kühlsysteme
Druck		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck; Hochdruckvergasung und Hochdruckverbrennung seltener
Reaktorverhalten	Staub/Gas	strömungstechnische können sowohl RK- als auch KS-Charakteristiken für Staub und Gas angenähert werden
Verweilzeit (Gas)	Niveau	im Bereich von Sekunden (bei höherem Druck entsprechend länger); durch Lastzustand einstellbar und bei Projektierung durch geometrische Abmessungen beeinflussbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	nur schwer möglich; Verweilzeitverteilung über Reaktorverhalten steuerbar
Zusatzstoffe		Additive insbesondere über Rührkessellemente einbringen, sowohl zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeldioxid, Stickstoffoxide) als auch zur Beeinflussung der Schlackeeigenschaften und Schmelztemperaturen der Stäube (falls flüssiger Abzug gewünscht)

## Staubfeuerung

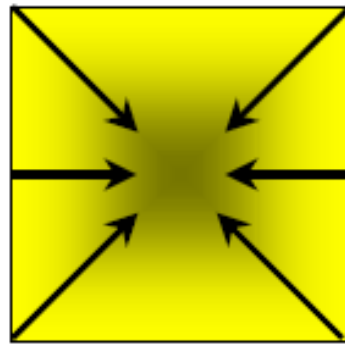


Typische Geschwindigkeiten in m/s	> 8
Typische Feststoffverweilzeiten in s	0,01 ... 1
Mindestluftbedarf $\lambda$	1,05 ... 1,15
maximale Feuerungstemperatur in °C	1.100 ... 1.500
Partikelgrößen in mm	0,01 ... 0,8
mittlere Partikelgröße in mm	0,1

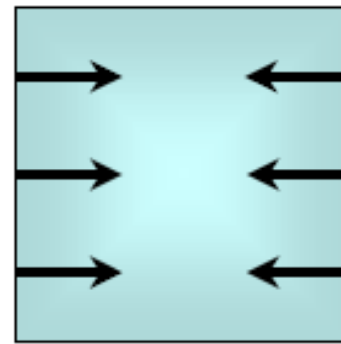
## Anordnung von Kohlenstaubbrennern



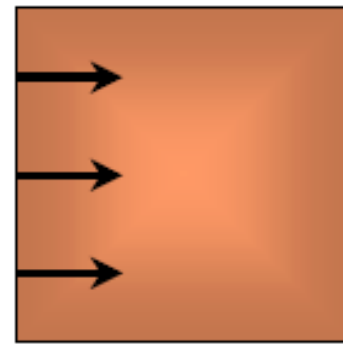
Tangential-  
feuerung



Zweipunkt-  
feuerung



Boxer-  
feuerung



Front-  
feuerung



## Charakteristische Größen für Staubfeuerungen (Braunkohle) im Kraftwerksbereich

Verbrennungstemperatur	$^{\circ}\text{C}$	1.100 – 1.300
Feuerraumendtemperatur	$^{\circ}\text{C}$	950 – 1.150
Gasgeschwindigkeit im Feuerraum	m/s	4 - 8
Verweilzeit der Gase im Feuerraum	s	1 - 3
Luftzahl	-	1,2 – 1,5
Verweilzeit des Brennstoffs im Feuerraum	s	1 - 3
Thermische Volumenbelastung	MW/m <sup>3</sup>	0,06 – 0,15
Thermische Querschnittsbelastung	MW/m <sup>2</sup>	2,5 - 5
Thermische Oberflächenbelastung	MW/m <sup>2</sup>	0,25 – 0,4
Thermische Gürtelflächenbelastung	MW/m <sup>2</sup>	0,4 - 1
Feuerungswirkungsgrad	-	0,96 – 0,99

## Schmelzfeuerung



Die S. ist eine Feuerungstechnik, die in Steinkohlekraftwerken zur Verbrennung von Kohle mit hohem Aschegehalt benutzt wird.

Bei Temperaturen von 1.500-1.600 °C schmilzt die Asche, kann flüssig abgezogen und granuliert werden. Entstehende Flugasche wird aus dem Abgas gefiltert und wieder dem Brennraum zugeführt. Vorteile der S. sind: gute Brennstoffausnutzung, einfache Lagerung des Aschegranulats.

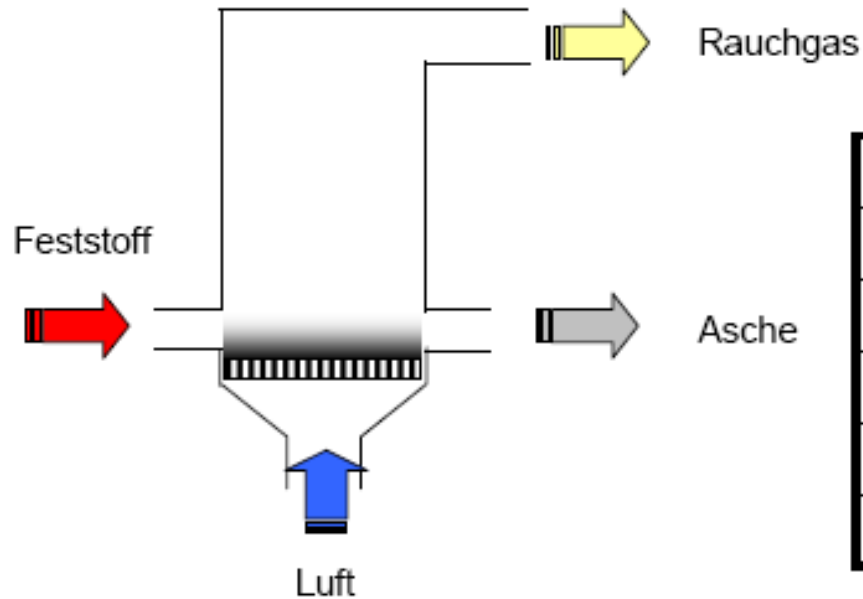
Hauptnachteil der S. sind die hohen Stickoxidemissionen.

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

	Trockenfeuerung	Alle Brennstoffe
	Schmelzfeuerung	Niederflüchtige, Asche
	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung	Steinkohle, Braunkohle, Minderwertige Kohle, Holz, Klärschlamm
	Rostfeuerung	Kohle, Torf, Klärschlamm, Müll

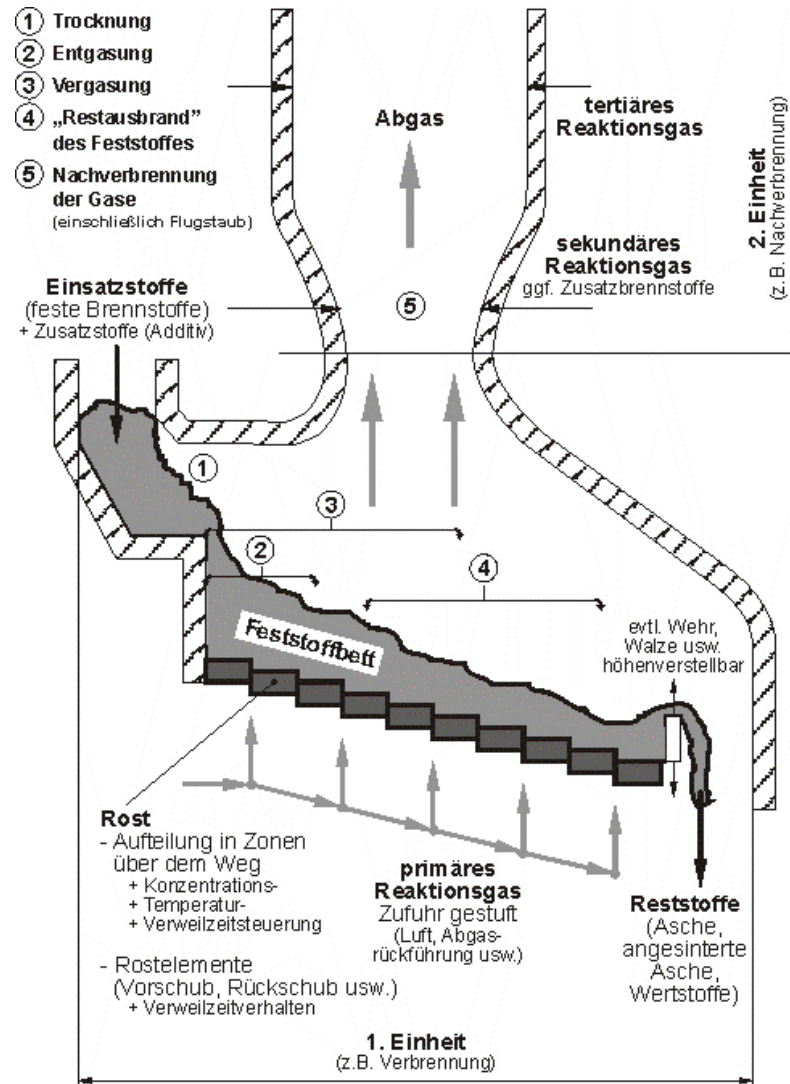
# - Festbettfeuerung -

# Festbettfeuerung



Typische Geschwindigkeiten in m/s	0,3 ... 8
Typische Feststoffverweilzeiten in h	1,5
Mindestluftbedarf $\lambda$	1,3 ... 1,6
maximale Feuerungstemperatur in °C	bis 1.200
Partikelgrößen in mm	0,5 ... 400
mittlere Partikelgröße in mm	50

## Feststoffumsatz auf einem Rost







## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Haupteinflußgrößen		Bemerkungen
<b>Einsatzstoffe</b>		stückig, in Verbindung mit einem Feststoffbett auch pastös
<b>Sauerstoffangebot</b>	Niveau	überstöchiometrisch (Verbrennung) üblich; unterstöchiometrisch (Vergasung) möglich; Sauerstoffabschluß (Thermolyse) nicht üblich jedoch auch möglich
	Steuerung längs des Reaktionsweges	getrennt in einzelnen Zonen sehr gut einstellbar (z.B. Luft-/Sauerstoffstufung, Abgasrückführung, usw.); in Verbindung mit Temperatursteuerung sind die Teilschritte Trocknen, Entgasen, Vergasen, Restausbrand des Feststoffes beeinflussbar
<b>Temperatur</b>	Niveau	Bettoberflächentemperatur bis ca. 1000°C; mittlere Betttemperaturen niedriger
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch Einteilung in mehrere Zonen ebenfalls sehr gut möglich, wie bei der Steuerung der Sauerstoffkonzentration (Luftvorwärmung, Abgasrückführung, Wasser-/Dampfkühlung)
<b>Druck</b>		bei Umgebungsdruck, in der Regel aus anlagentechnischen Gründen wenige Pa Unterdruck
<b>Reaktorverhalten</b>	Staub/Gas	je nach Bewegung der Rostelemente können die einzelnen Zonen einer RK-Charakteristik (z.B. Rückschubrost) oder eine KS-Charakteristik (z.B. Walzenrost) angenähert werden; über der gesamten Reaktorlänge ergibt sich angenähert eine KS-Charakteristik
	Gas	a) Oxidationsmittel usw. strömt zwangsweise durch das Bett und wird gleichmäßig über dem Rost verteilt; damit sehr guter Kontakt zwischen Gas und Feststoff b) Strömungsführung über dem Bett im Gegen- und Gleichstrom möglich, Nachverbrennung erforderlich
<b>Verweilzeit (Feststoff)</b>	Niveau	im Bereich von Minuten bis Stunden; durch Rostelementgeschwindigkeit und Massenstrom einstellbar; bei Projektierung durch Gesamtlänge und -breite beeinflussbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	durch getrennte Geschwindigkeitseinstellungen der Rostelemente in den einzelnen Zonen sehr gute Anpassung möglich; falls erforderlich für zusätzliche Verbesserung des Ausbrandes am Rostende Steuerung durch Austragswalze
<b>Zusatzstoffe</b>		Additive z.B. zur Schadstoffeinbindung in den Feststoff und Beeinflussung der Eigenschaften der verbleibenden Reststoffe (Asche, angeschmolzene Asche, Schlacke); Inertbett z.B. Trägermatrix für eventuell leicht schmelzende Stoffe (z.B. Kunststoff)



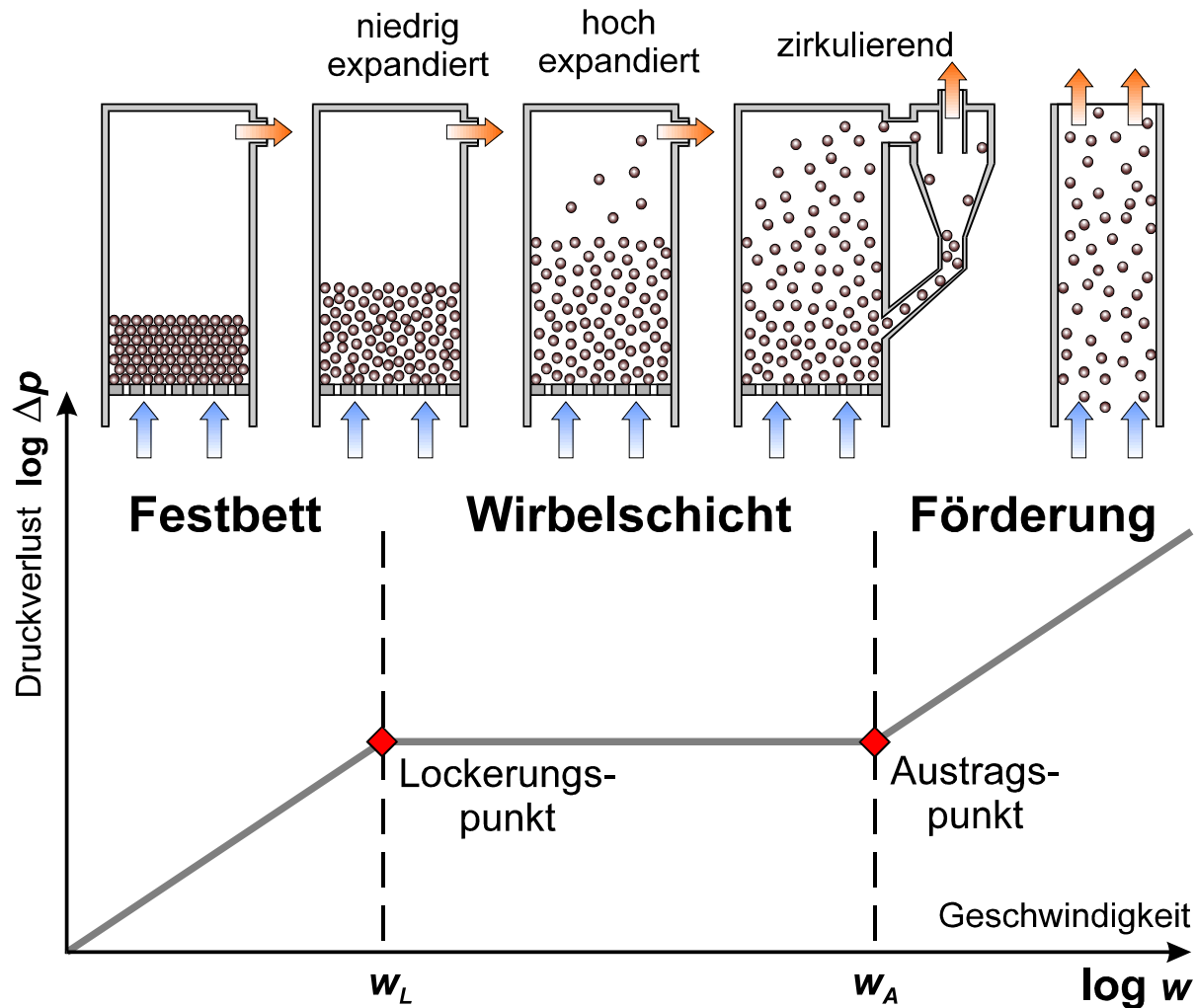
# - Wirbelschichtfeuerung -

## Wirbelschichtfeuerung

Die Wirbelschichtfeuerung hat durch die hohe Luftgeschwindigkeit ein aufgewirbeltes schwebendes Brennstoffbett.

Ihr verfahrenstechnisches Prinzip beruht darauf, dass eine Schüttung aus körnigen, inerten (*träge, wenig reaktionsfreudig*) Feststoffen (Quarzsand, Kalkstein, Asche u.a.) im Brennraum über einem Düsenboden von unten durch Luft angeströmt wird, so dass die Feststoffe in einem aufgewirbelten Schwebезustand versetzt werden.

### Prinzipieller Druckverlustverlauf beim Übergang zwischen Festbett, Wirbelschicht und pneumatischer Förderung:



Kräftegleichgewicht:

$$F_{Sk,P} = F_{Wk,P} + F_{Ak,P}$$

mit

Gewichtskraft:

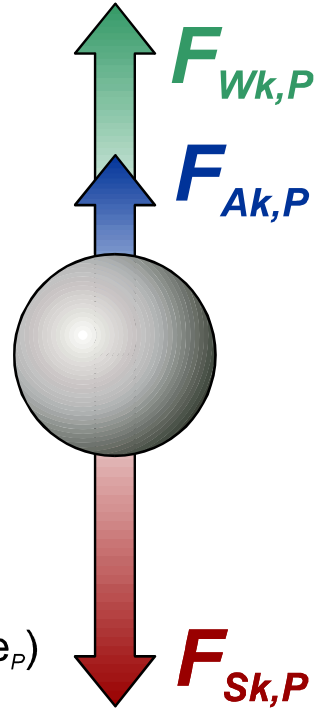
$$F_{Sk,P} = V_P \cdot \rho_P \cdot g = \pi/6 \cdot d_P^3 \cdot \rho_P \cdot g$$

Auftriebskraft:

$$F_{Ak,P} = V_P \cdot \rho_F \cdot g = \pi/6 \cdot d_P^3 \cdot \rho_F \cdot g$$

Widerstandskraft:

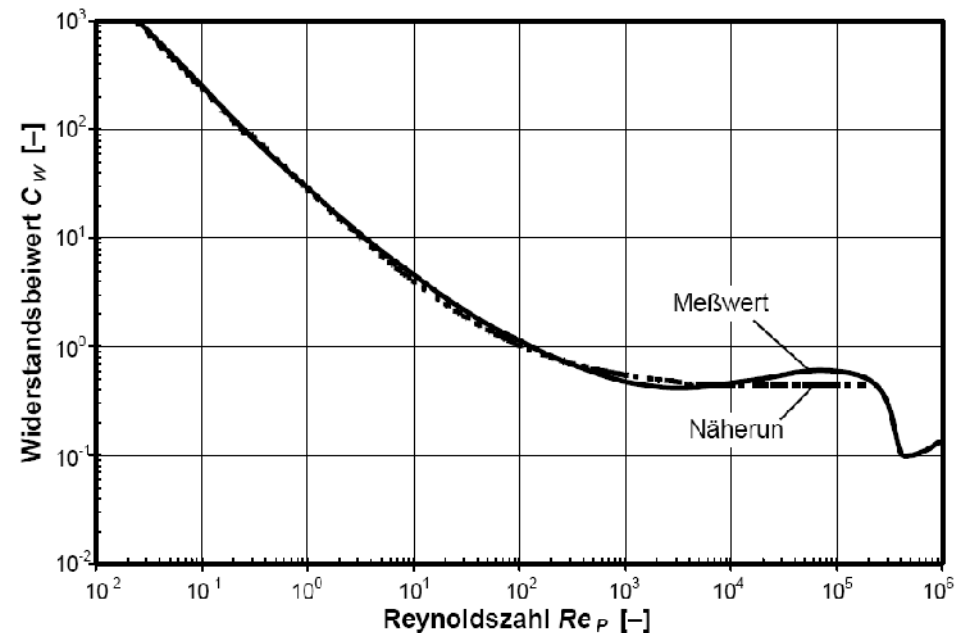
$$F_{Wk,P} = \frac{\rho_F}{2} \cdot A_{Q,P} \cdot (w_F - w_P)^2 \cdot c_W(Re_P)$$



$$(\rho_P - \rho_F) \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_P^3 \cdot g = \frac{\rho_F}{2} \cdot w_{F,Sg}^2 \cdot d_P^2 \cdot C_{Wk}(Re_{P,Sg})$$

$$\Rightarrow w_{F,Sg}^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_P - \rho_F}{\rho_F} \cdot \frac{g \cdot d_P}{C_{Wk}(Re_{P,Sg})}$$

(Fluidgeschwindigkeit an absinkenden Partikeln)



Kennzeichnet die Expansion der Wirbelschicht  
**(andere Bezeichnungen: Zwischenraumvolumen,  
 Porosität)**

**Verhältnis des Zwischenraumvolumens zu dem  
 Gesamtvolumen des Wirbelschichtbettes**

$$\varepsilon = \frac{V_{Ges} - V_P}{V_{Ges}} = 1 - \frac{V_P}{V_{Ges}}$$

**Festbett:**

$$n < 1$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{Sch}$$

Die Differenz aus Gewichtskraft und Auftriebskraft des Einzelteilchens ist größer, als die auf das Teilchen wirkende Strömungskraft. Die Schüttung ruht. Es besteht ein konstantes Zwischenraumvolumen.

**Wirbelschicht:**

$$n = 1$$

$$0,4 < \varepsilon < 1$$

Die Differenz aus Gewichtskraft und Auftriebskraft des Teilchens entspricht der auf das Einzelteilchen wirkende Strömungskraft. Bei konstantem Druckverlust variiert die Expansion der Wirbelschicht im Bereich von  $\varepsilon = 0,4$  bis 1.

**Pneumatische Förderung:**

$$n > 1$$

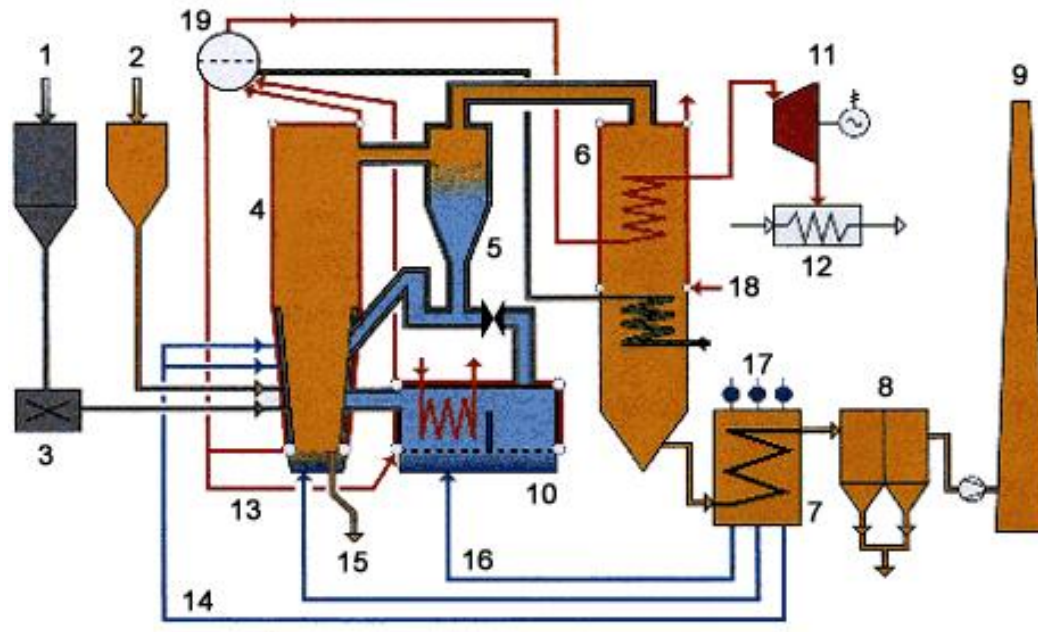
$$\varepsilon \rightarrow 1$$

Die Strömungskraft, die auf das Einzelteilchen wirkt, ist größer als die Differenz aus Gewichtskraft und Auftriebskraft. Ein Partikelaustrag aus der Schicht ist die Folge.

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

### ➔ Ziel: intensiver Kontakt zwischen Gasphase und Partikeln

- Trocknungsprozesse
- Chemische Reaktoren
- Verbrennung / Vergasung

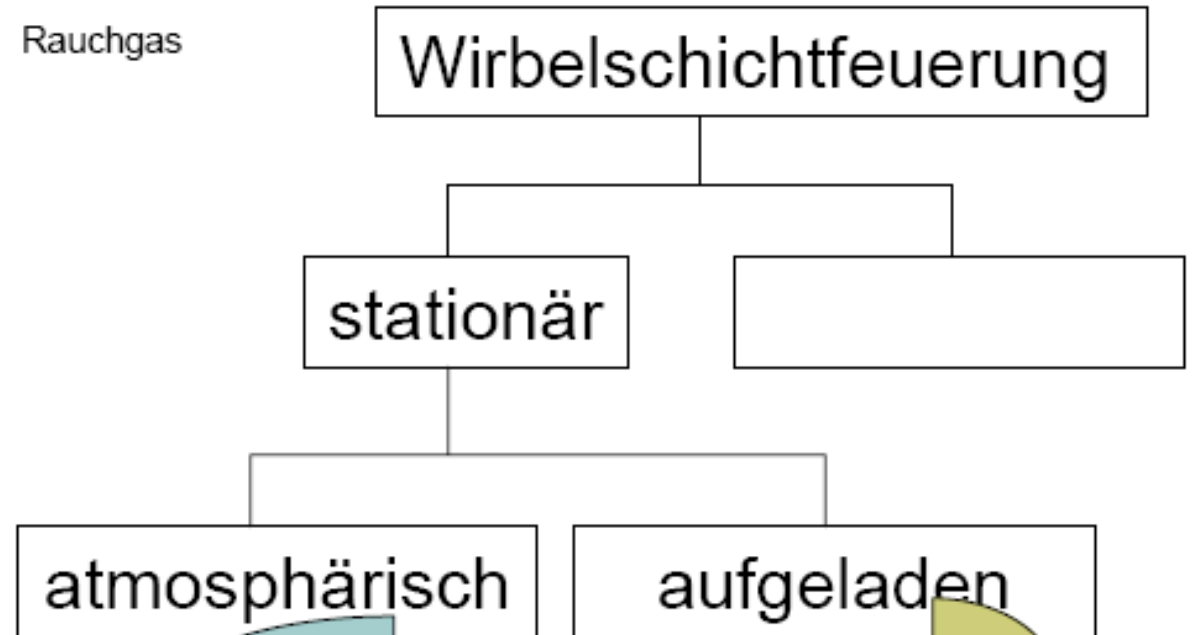
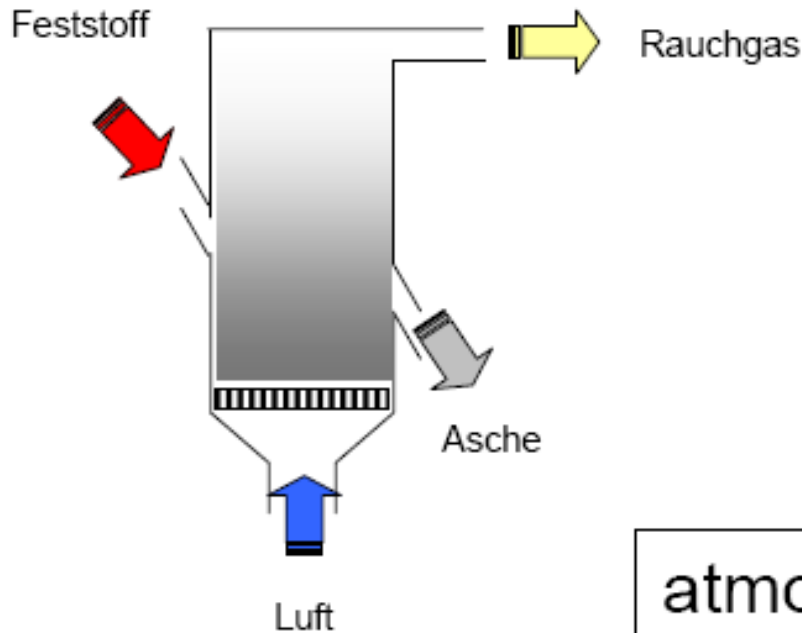


- 1 Kohlebunker
- 2 Kalksteinbunker
- 3 Brecher
- 4 Brennkammer
- 5 Zyklon
- 6 Konvektionszug
- 7 Luftvorwärmer
- 8 Filter
- 9 Kamin
- 10 FBK

- 11 Generator mit Turbine
- 12 Fernwärme
- 13 Primär - Luft
- 14 Sekundär - Luft
- 15 Grobasche
- 16 FBK - Luft
- 17 Ventilatoren
- 18 Kesselspeisewasser
- 19 Dampftrommel

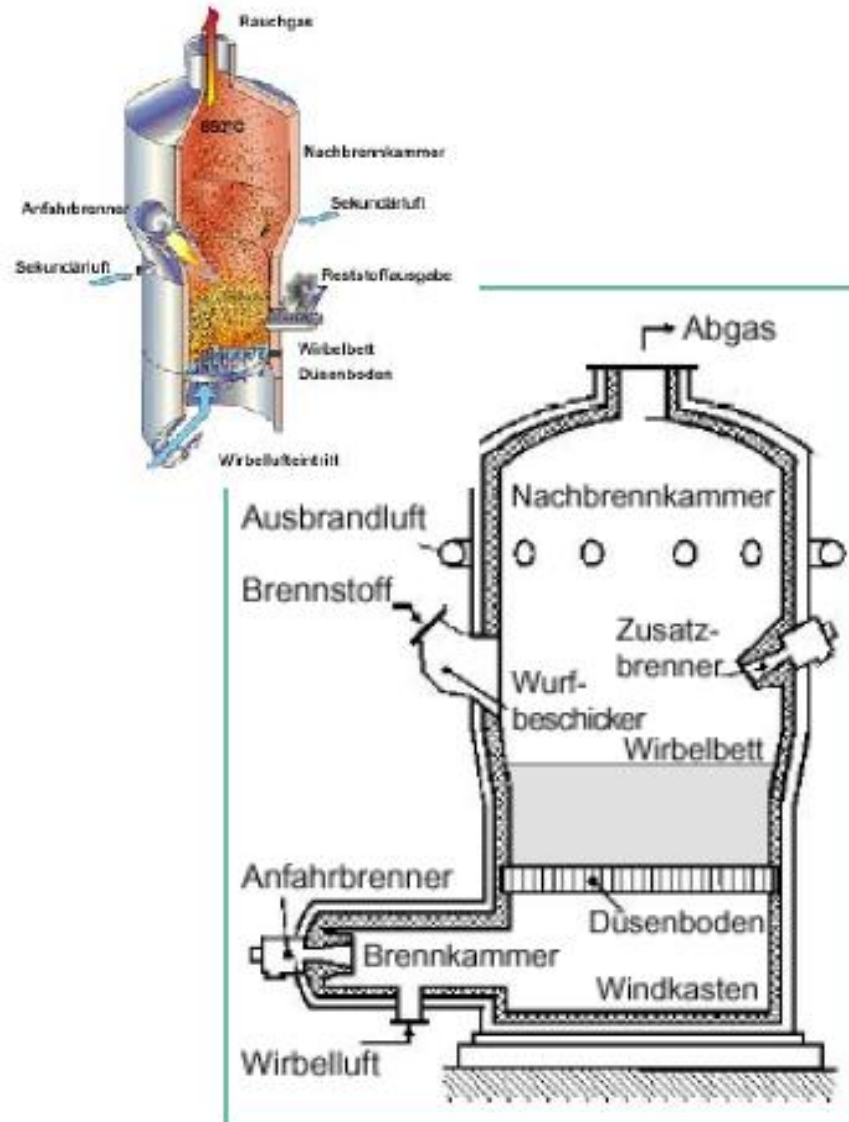
Dampferzeuger mit zirkulierender Wirbelschichtfeuerung

Quelle: AE&E Lentjes

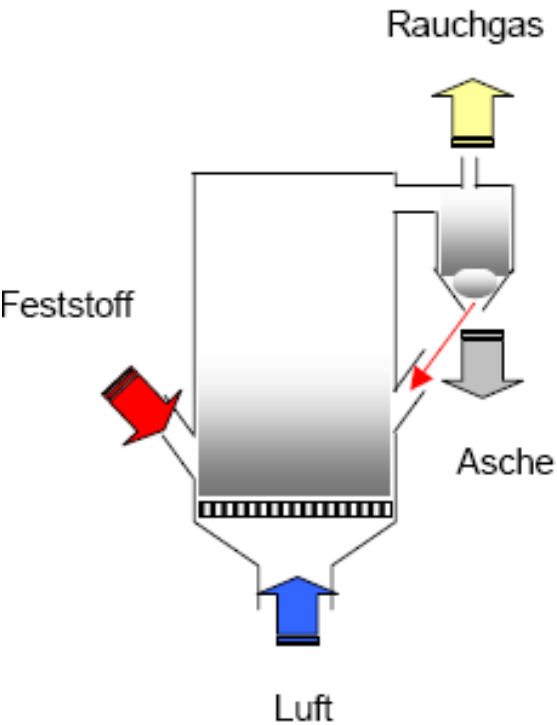


Typische Geschwindigkeiten in m/s	0,1 ... 2,5	0,5 ... 3
Typische Feststoffverweilzeiten in h	0,2 ... 1	--
Mindestluftbedarf $\lambda$	1,1 ... 1,5	1,2 ... 1,5
maximale Feuerungstemperatur in °C	bis 1.000	750 ... 900
Partikelgrößen in mm	1 ... 20	1 ... 20
mittlere Partikelgröße in mm	2	2

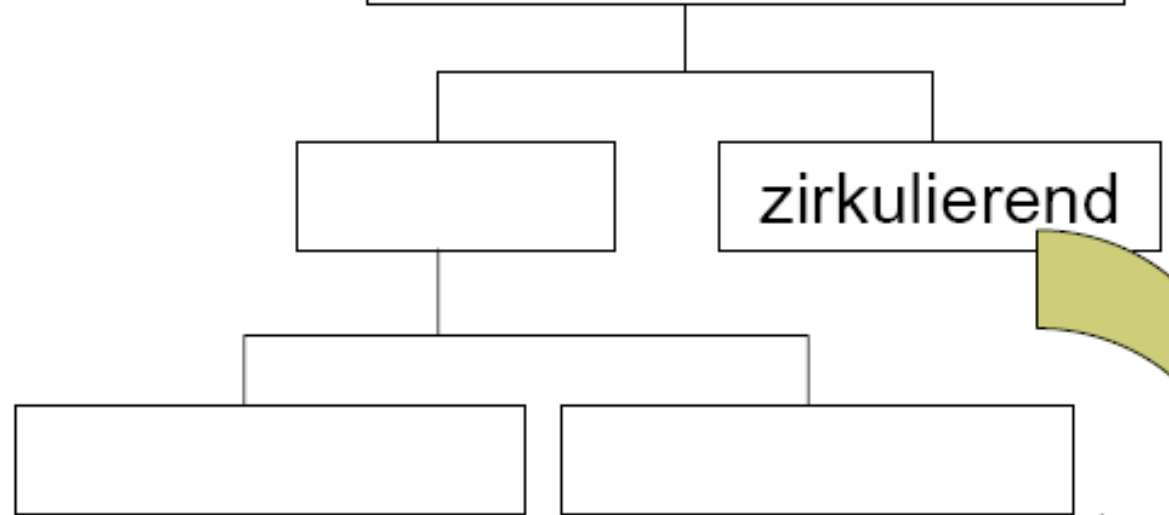
# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)







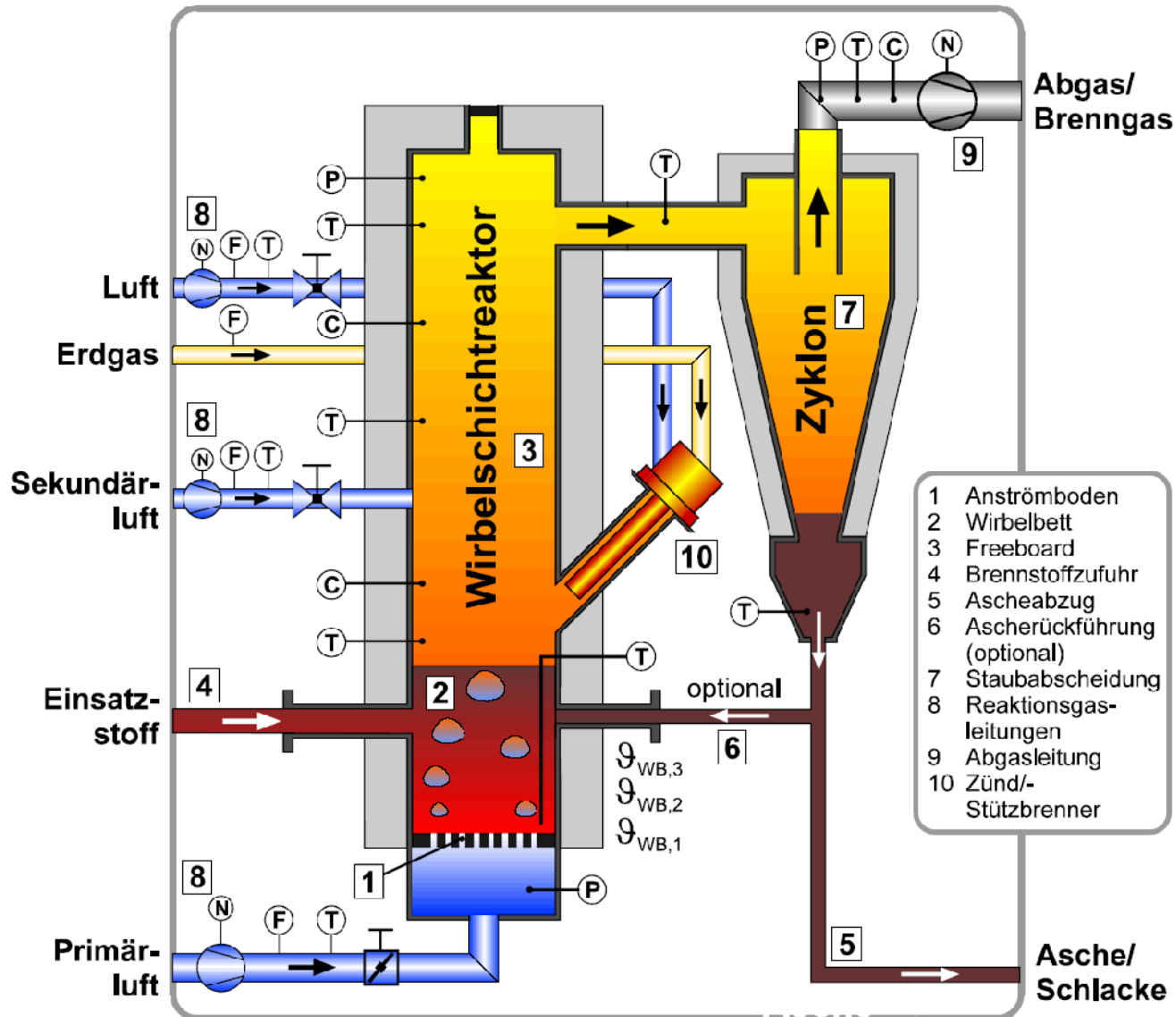
# Wirbelschichtfeuerung



Typische Geschwindigkeiten in m/s	8 ... 10
Typische Feststoffverweilzeiten in h	0,05 ... 0,2
Mindestluftbedarf $\lambda$	1,1 ... 1,3
maximale Feuerungstemperatur in °C	bis 1.000
Partikelgrößen in mm	0,15 ... 20
mittlere Partikelgröße in mm	0,25

# Wirbelschichtverbrennungsanlage (allg.)

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



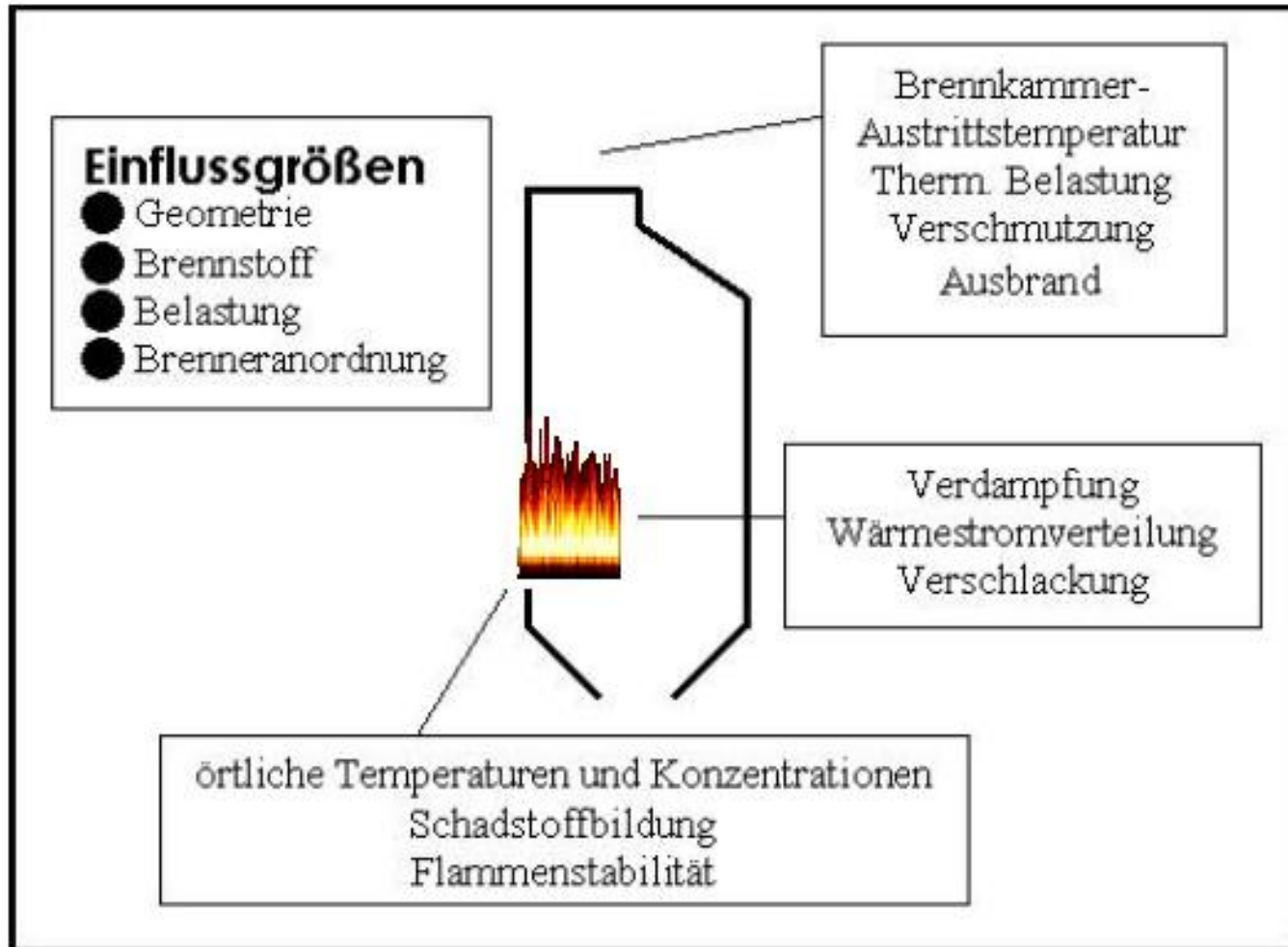
# Charakterisierung von Wirbelschichtsystemen

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Haupteinflußgrößen		Bemerkungen
Einsatzstoffe		staubförmig bis stückig mit enger Korngrößenverteilung, pastös, flüssig
Sauerstoffangebot	Niveau	unterstöchiometrisch (Vergasung) oder überstöchiometrisch (Verbrennung); Sauerstoffabschluß (Thermolyse) nicht üblich
	Steuerung längs des Reaktionsweges	bedingt möglich, durch Zuführung über die Reaktorhöhe; besser möglich bei mehreren übereinander angeordneten Wirbelschichten
Temperatur	Niveau	bis ca. 850°C und höher
	Steuerung längs des Reaktionsweges	nur bedingt möglich durch über die Reaktorhöhe angeordnete Zuführungen von Gas und/oder Feststoff (z.B. Luftstufung, Abgasrückführung, Wasser- oder Dampfzugabe)
Druck		zwischen Umgebungsdruck bis Hochdruck bei ca. 2 MPa
Reaktorverhalten	Feststoff / Gas	die Verwirbelung von Gas und Feststoff im „Wirbelbett“ realisiert eine RK-Charakteristik; hohe Strömungs- und Relativgeschwindigkeiten bedingen sehr guten Kontakt zwischen Feststoff (Rückstand) und Gas
Verweilzeit (Feststoff)	Niveau	im Minutenbereich; falls erforderlich durch Feststoffrückführung (Zirkulation) höher; durch Gas- und Feststoffmassenstrom steuerbar
	Steuerung längs des Reaktionsweges	nicht möglich
Zusatzstoffe		Additive z.B. zur Schadstoffeinbindung (z.B. Schwefeldioxideinbindung); Bett z.B. zur Optimierung der fluiddynamischen Eigenschaften

# - Brennkammerdimensionierung -

# Problemstellung bei der Brennkammerauslegung

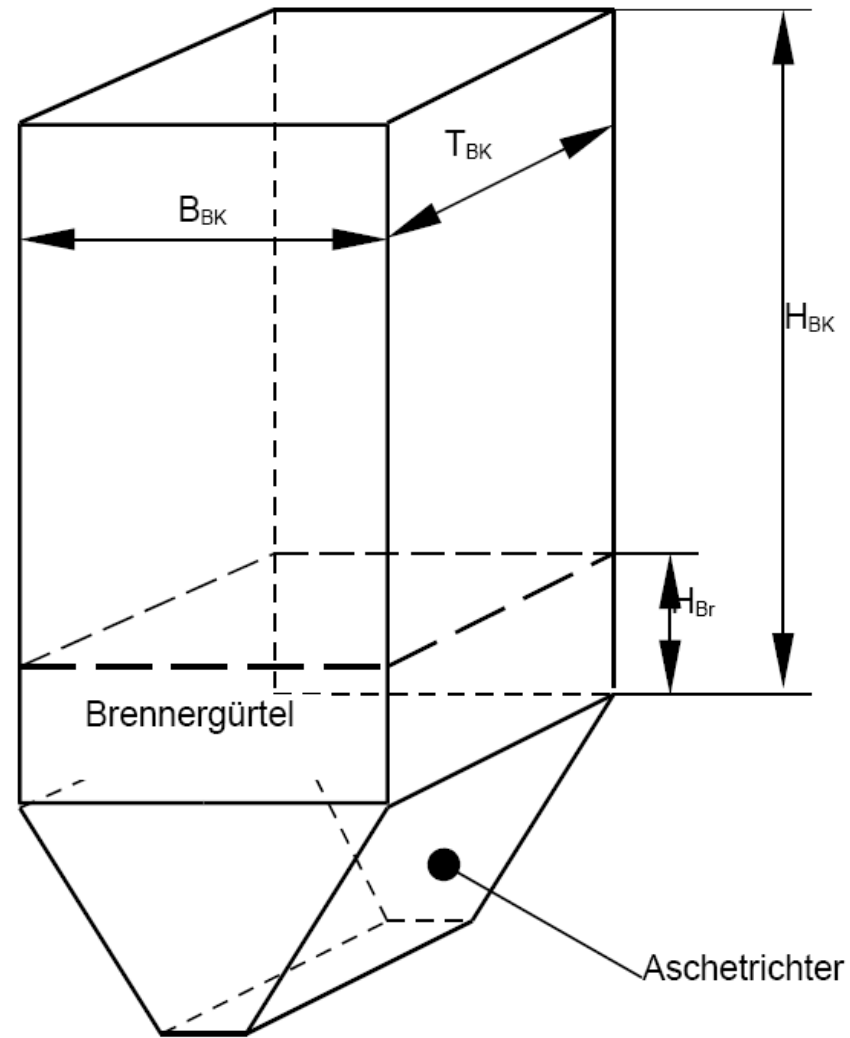


## Auslegungskriterien

Um sowohl den Feuerraumquerschnitt als auch die Brenneranordnung und Feuerraumhöhe in erster Näherung festzulegen, werden in der Praxis spezifische Kennzahlen verwendet.

Sie wurden durch systematisches Untersuchen und Auswerten ausgeführter Anlagen empirische ermittelt.

Diese Kennzahlen erlauben eine Beurteilung nur, wenn sie gesamtheitlich betrachtet werden.



## Volumenbelastung (Ausbrand / Verschlackung):

$$q_V = \frac{\dot{Q}_{zu}}{V_{BK}} \quad \text{in} \quad \frac{MW}{m^3}$$

$\dot{Q}_{zu}$  – der Brennkammer zugeführter Wärmestrom in MW

$V_{BK}$  – Brennkammervolumen



## Querschnittsbelastung (Zündstabilität / Strömung):

$$q_A = \frac{\dot{Q}_{zu}}{A_{BK}} \quad \text{in } \frac{MW}{m^2}$$

$A_{BK}$  – Brennkammerquerschnitt

Höhe der Brennkammer:  $H_{BK} = \frac{V_{BK}}{A_{BK}} \quad \text{in m}$

Bei quadr. Querschnitt:  $B_{BK} = T_{BK} = \sqrt{A_{BK}} \quad \text{in m}$

## Gürtelbelastung (thermische Wandbelastung des Brennergürtels):

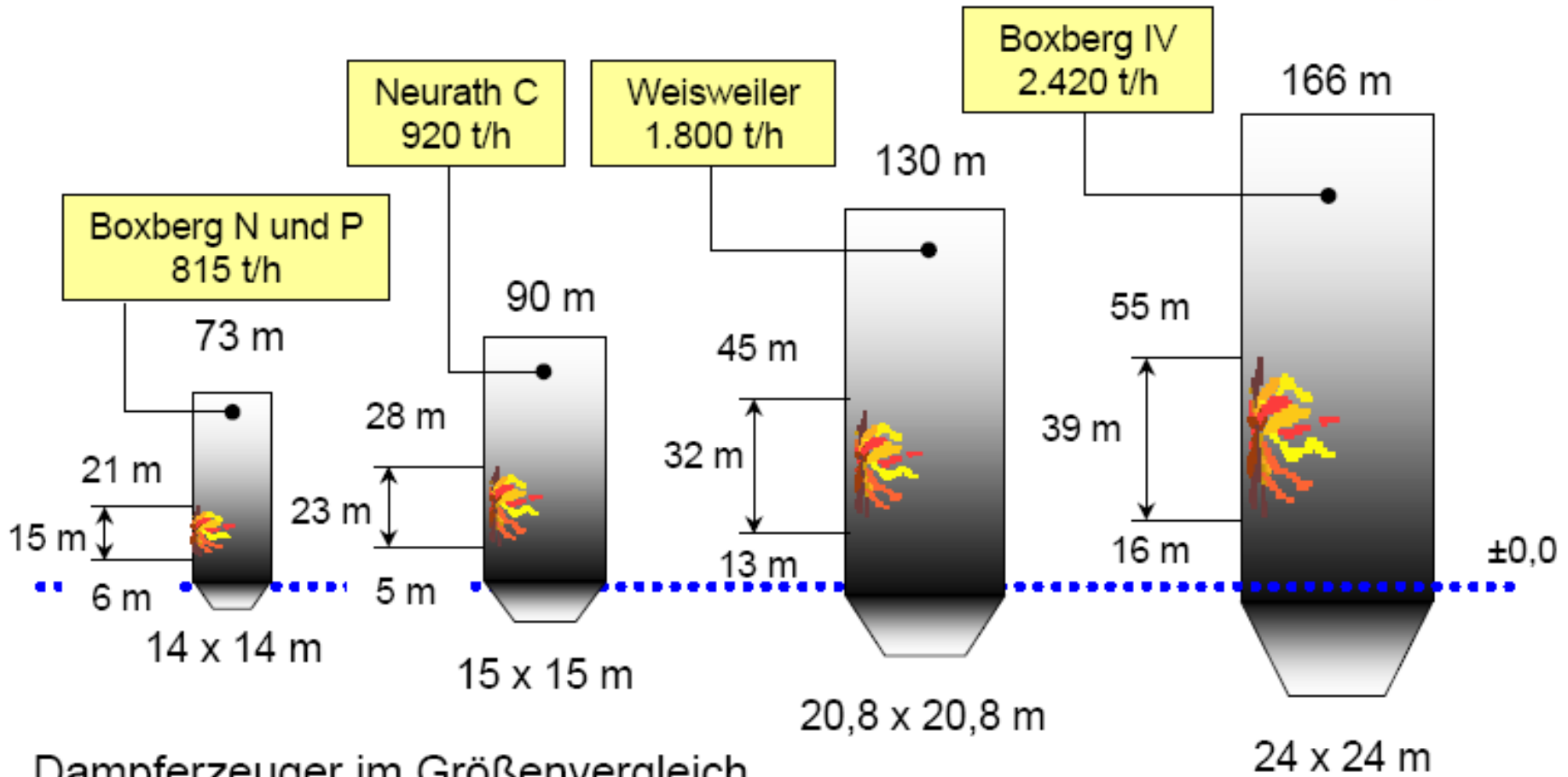
$$q_H = \frac{\dot{Q}_{zu}}{A_H} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{2 * H_{BG} * (T_{BK} + B_{BK})} \quad \text{in} \quad \frac{MW}{m^2}$$

$A_H$  – Brennkammergürtelquerschnitt

## Brennkammer-Wärmebelastung für verschiedene Brennstoffe

Brennstoff	Brennkammerbelastung			
	Volumen MW/m <sup>3</sup>		Querschnitt MW/m <sup>2</sup>	Gürtel MW/m <sup>2</sup>
	Rost	Staub		
Kohle	0,2 ... 0,3	0,1 ... 0,2	2,5 ... 5,0	1,0 ... 1,2
Öl, Gas	0,23 ... 0,3		4,0 ... 7,0	nicht festgelegt

Quelle: Effenberger



Dampferzeuger im Größenvergleich