



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Institut für Energietechnik, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

# Verbrennung und Dampferzeugung

- universitäres Fernstudium -

Dampferzeuger / Dampferzeugung

## Literatur (Empfehlung):



Effenberger, Helmut  
**Dampferzeugung.**

854 Seiten, 516 Abb., Tab.  
Springer-Verlag GmbH  
EUR 269.00



Brandt, Fritz  
**Dampferzeuger.**  
Kesselsysteme,  
Energiebilanz,  
Strömungstechnik,  
2. Auflage 1999  
283 Seiten  
Vulkan Verlag

EUR 69.00



Brandt, Fritz  
**Brennstoffe und  
Verbrennungsrechnung.**

3. Auflage 1999 281 Seiten  
Vulkan Verlag  
EUR 65.00

RICHARD DOLEZAL:  
**DAMPFERZEUGUNG. VERBRENNUNG, FEUERUNG, DAMPFERZEUGUNG**  
Springer-Verlag, Berlin 1990, Broschiert, ISBN3540137718

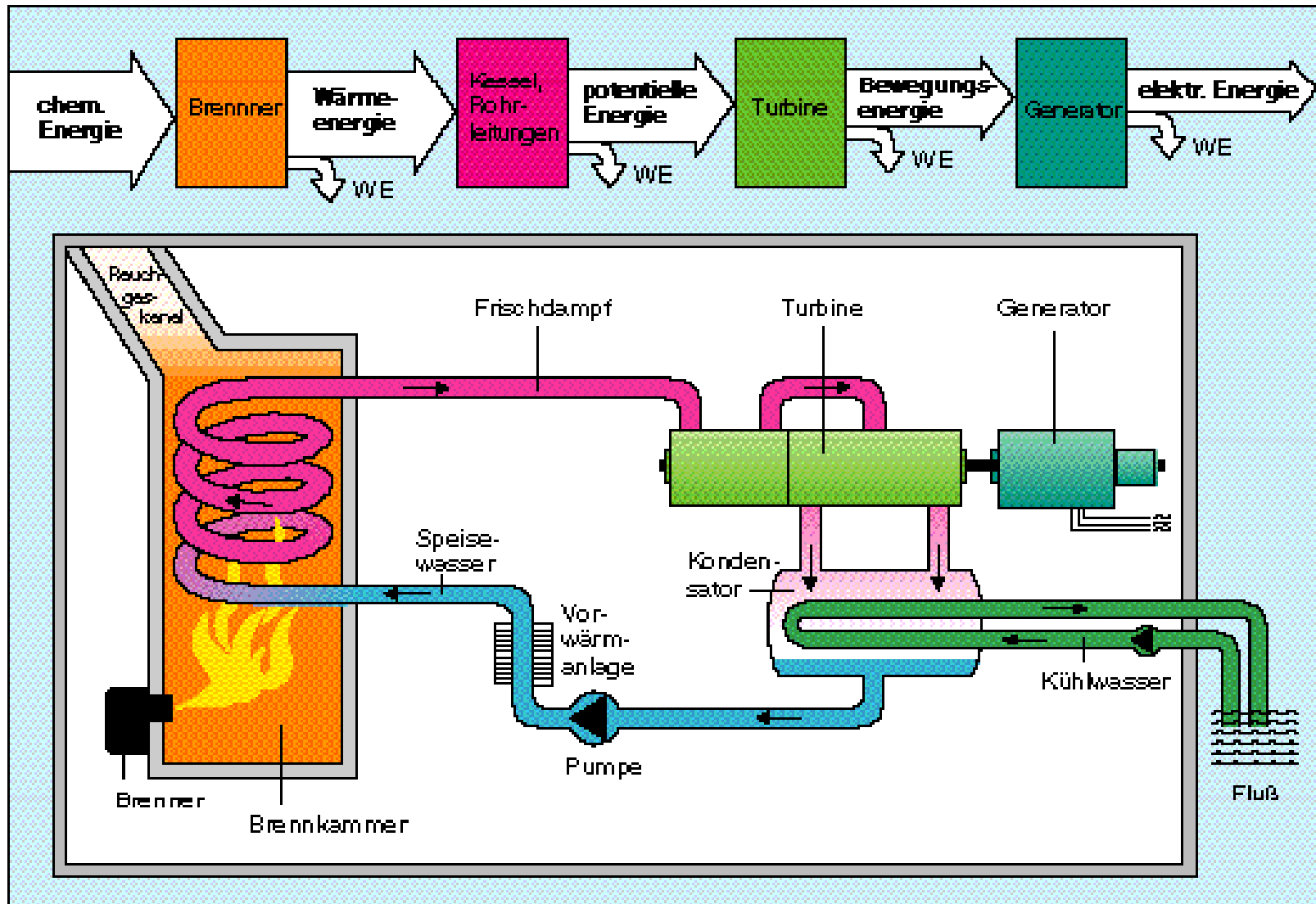


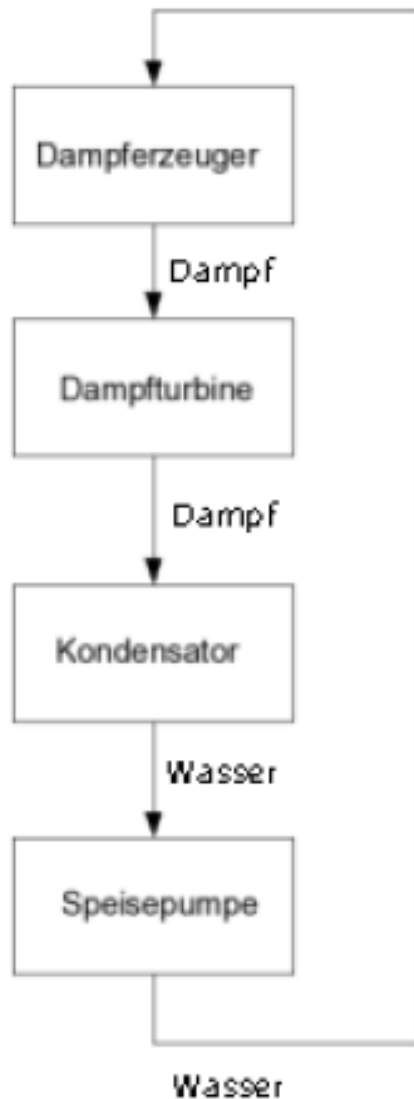
Karl Strauß:  
**Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, regenerativer und nuklearer Energiequellen**  
SPRINGER-Verlag BERLIN 1998, 494 Seiten, ISBN: 3-540-64750-3

Fritz Mayr  
**Handbuch der Kesselbetriebstechnik**  
Kraft- und Wärmeerzeugung in Praxis und Theorie,  
10. Auflage 2003 842 Seiten, 451 Abb., 104 Taf.  
EUR 96.00



# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



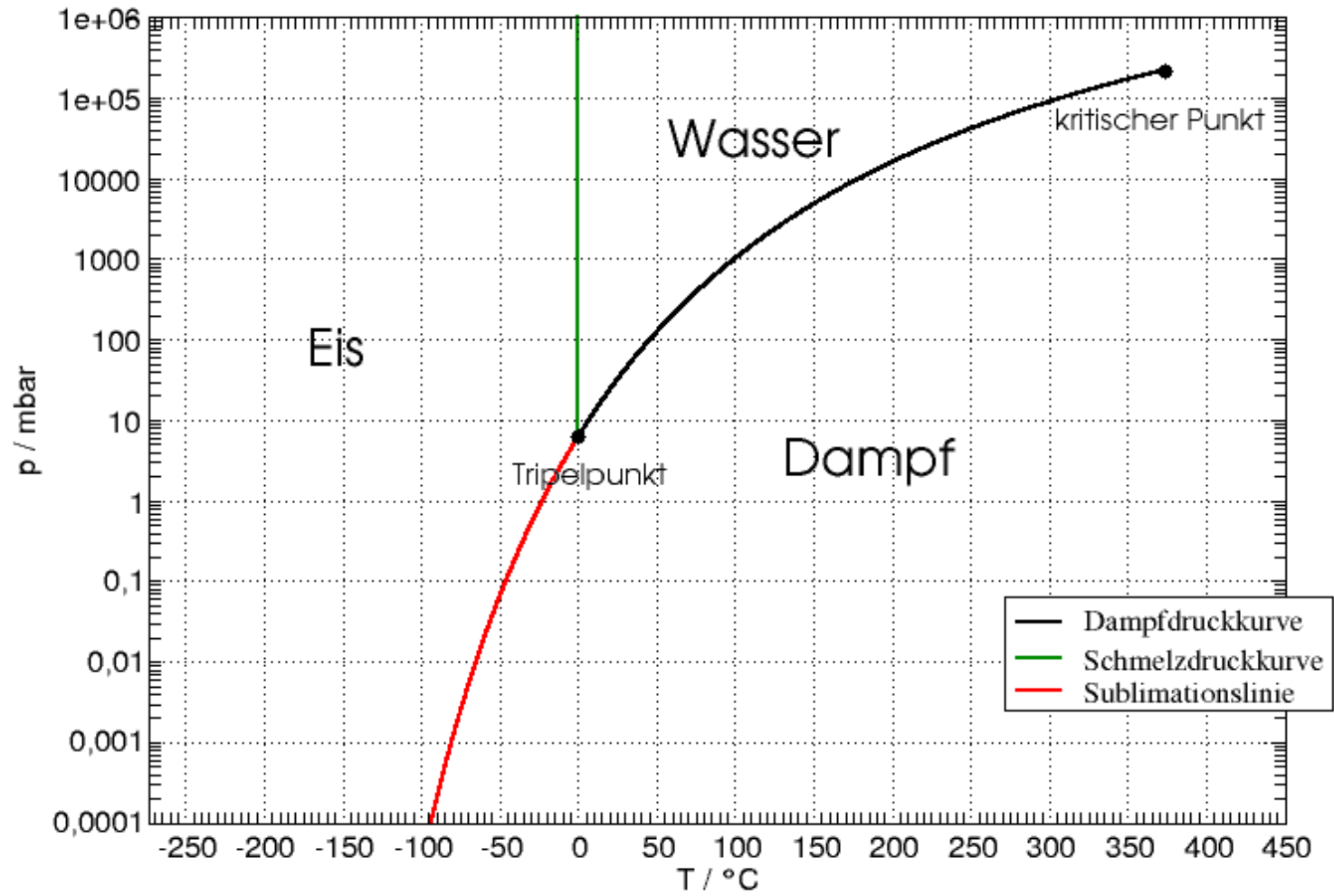


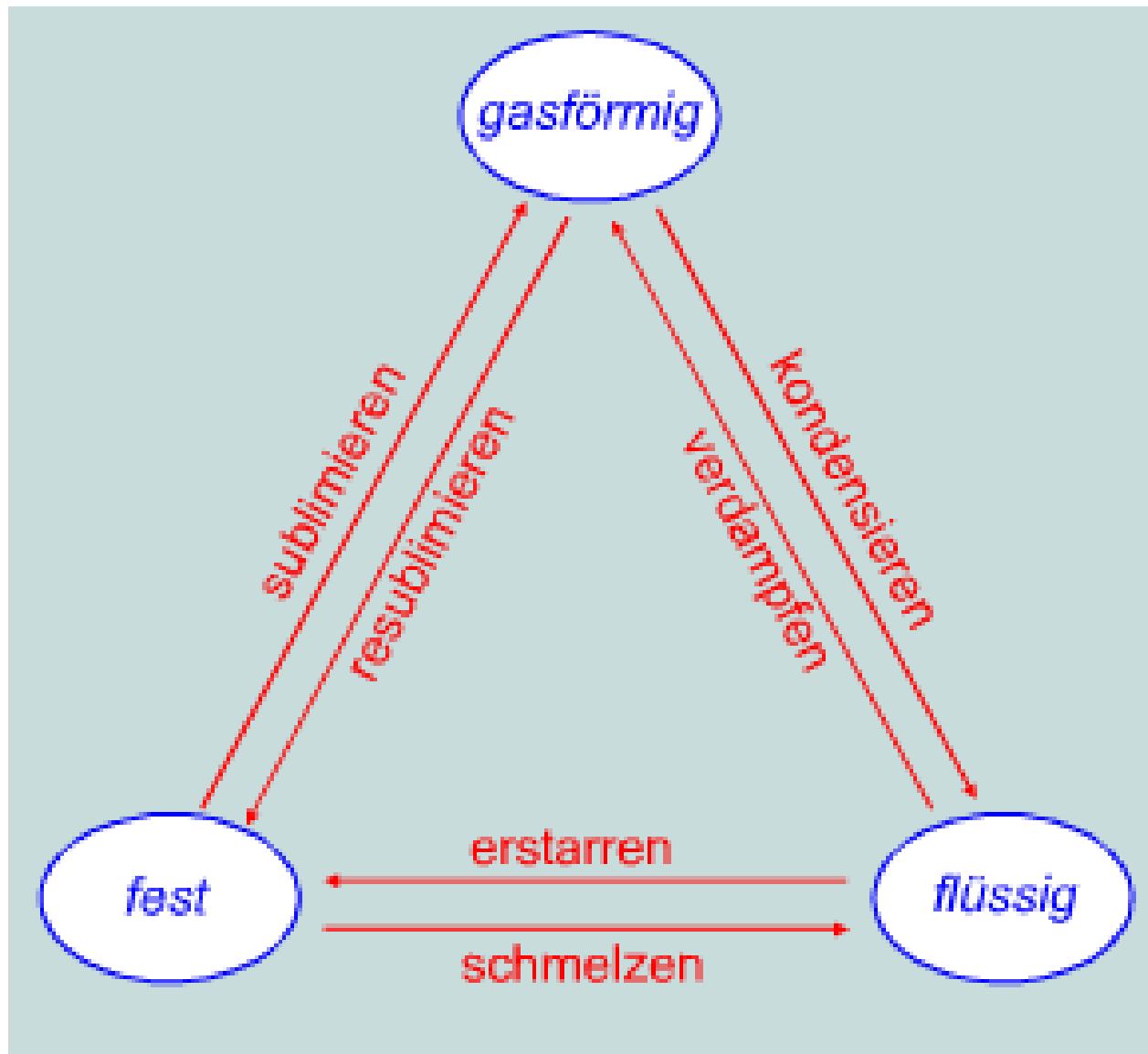
## Grundfließbild eines Wasser-Dampf-Kreislaufes in einem Dampfkraftwerk

Die derzeit größten Kraftwerk-Dampferzeuger haben eine Leistung von bis zu 3600 Tonnen Dampf pro Stunde. Derartige Mengen werden beispielsweise mit einem Wasserrohrkessel bereit gestellt.

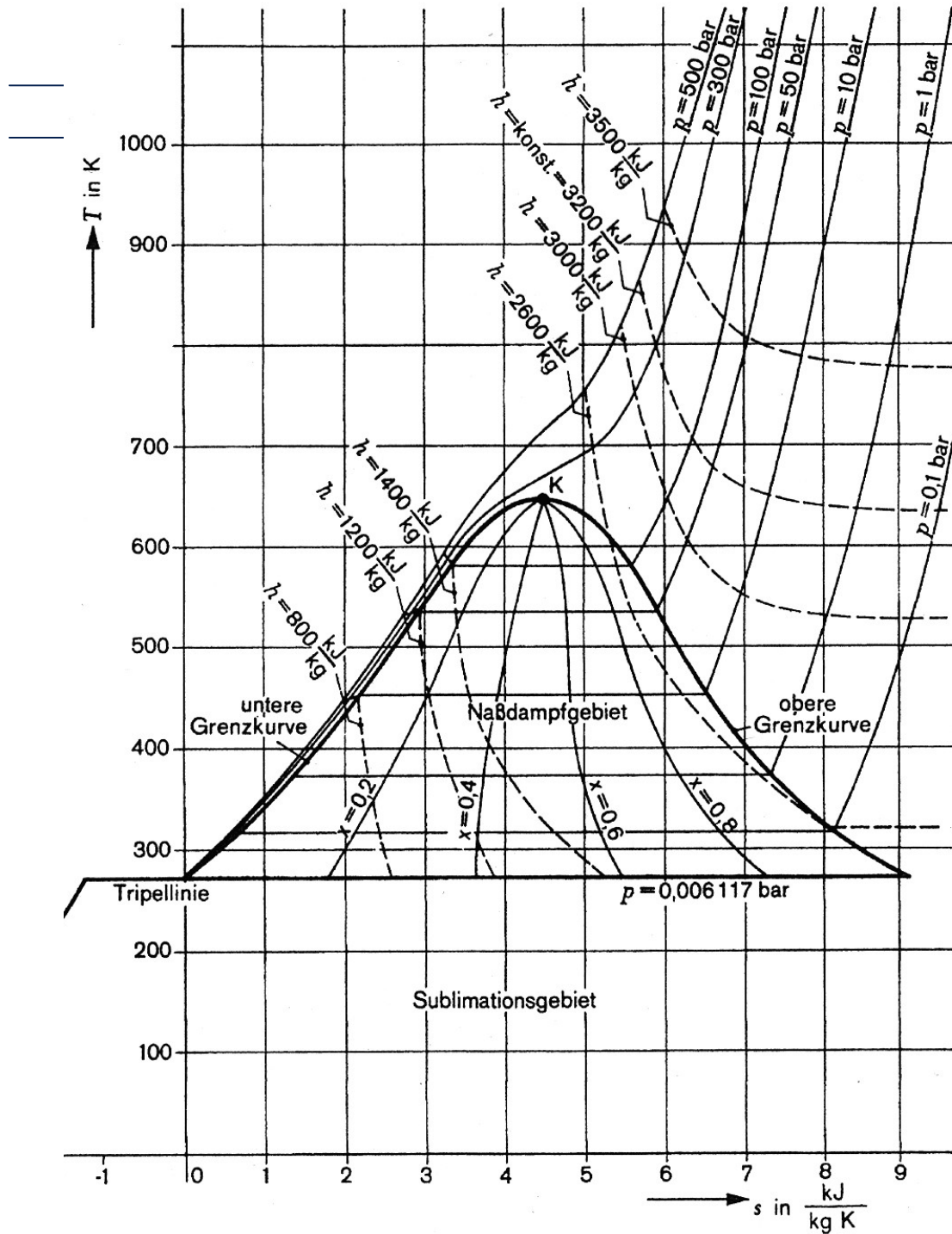
# - Wasser als Arbeitsmedium -

### Zustandsdiagramm des Wassers





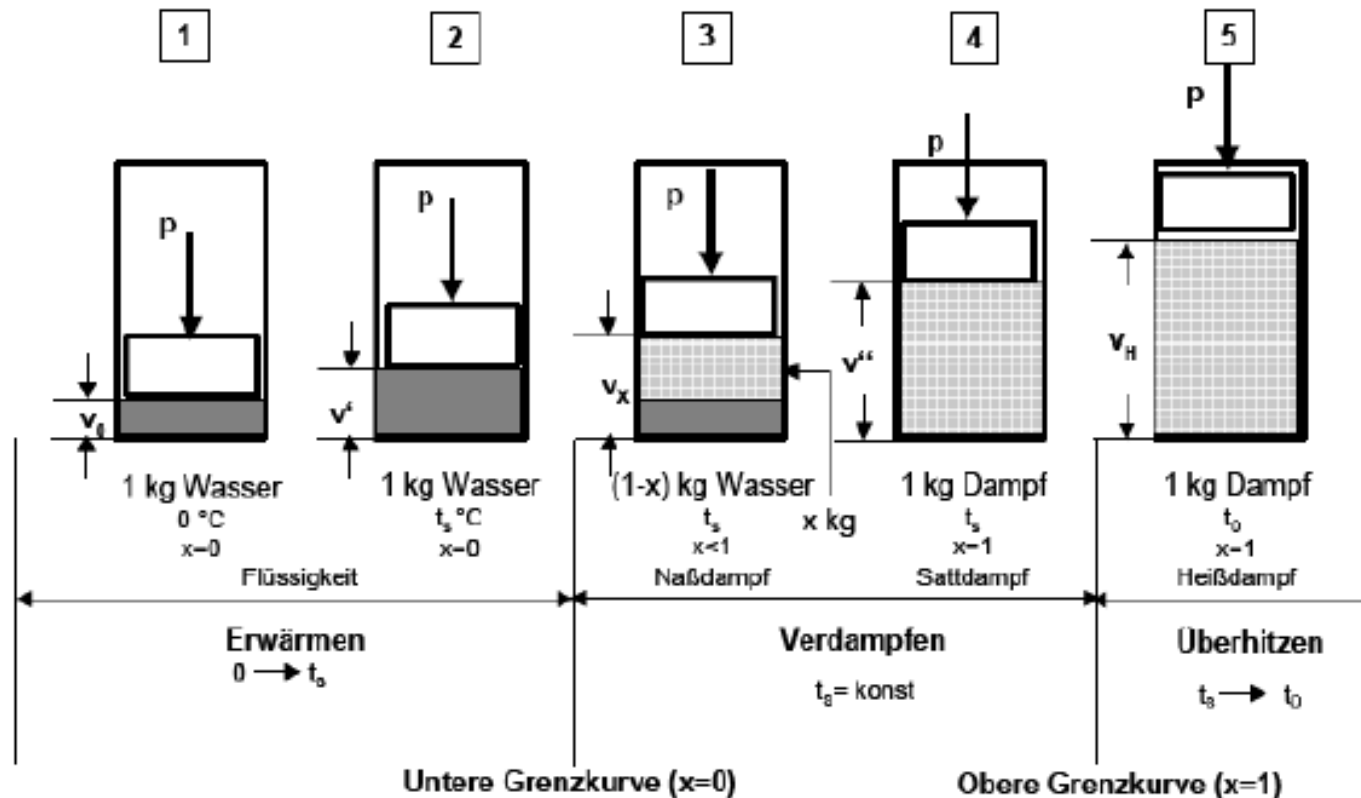




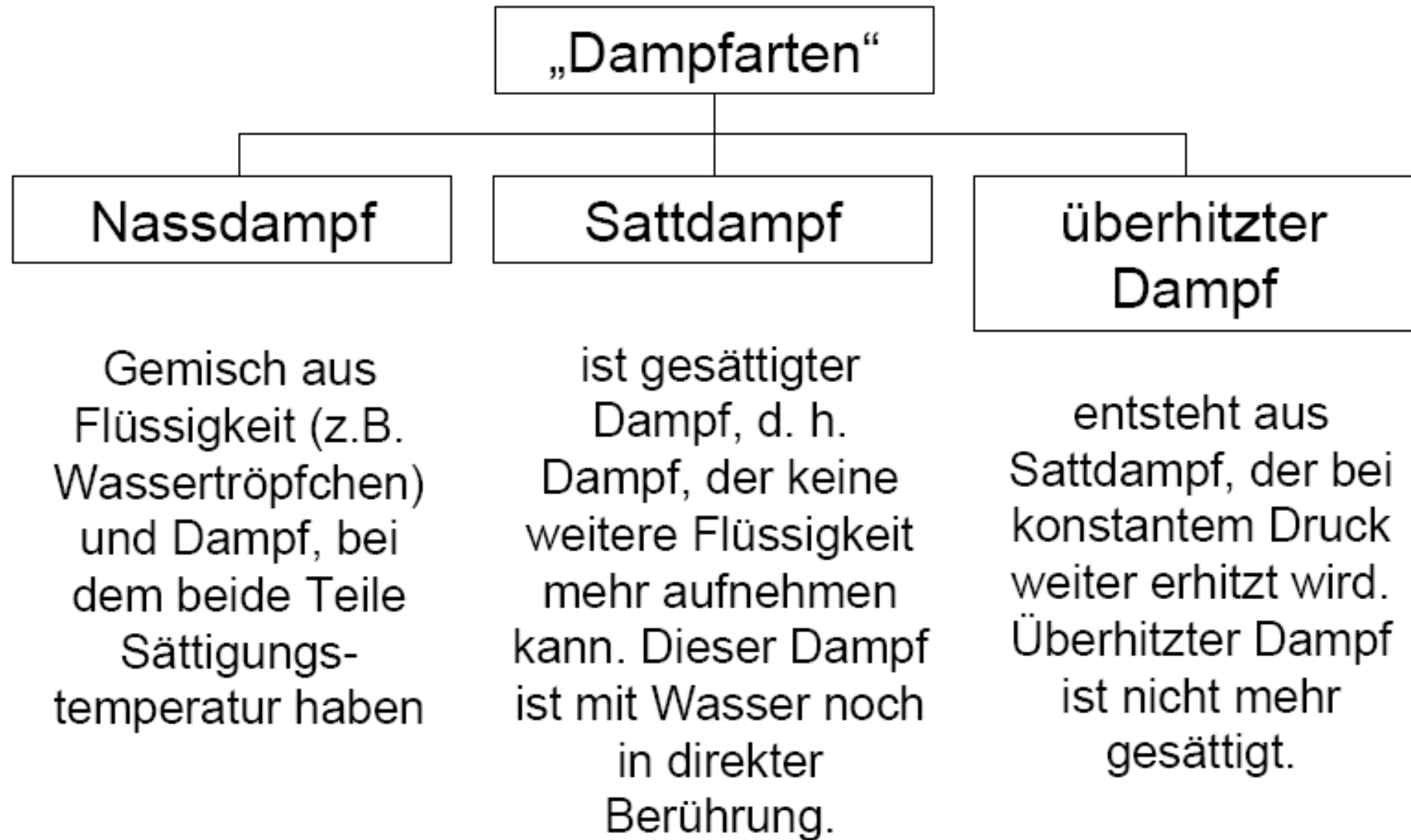
## Zustandsänderungen für Wasser / Dampf

# Verdampfung bei konstantem Druck

Die Dampferzeugung lässt sich in 3 Phasen unterteilen



$t_s$  – Siedetemperatur;  $t_0$  – Temperatur der überhitzten Heißdampfes

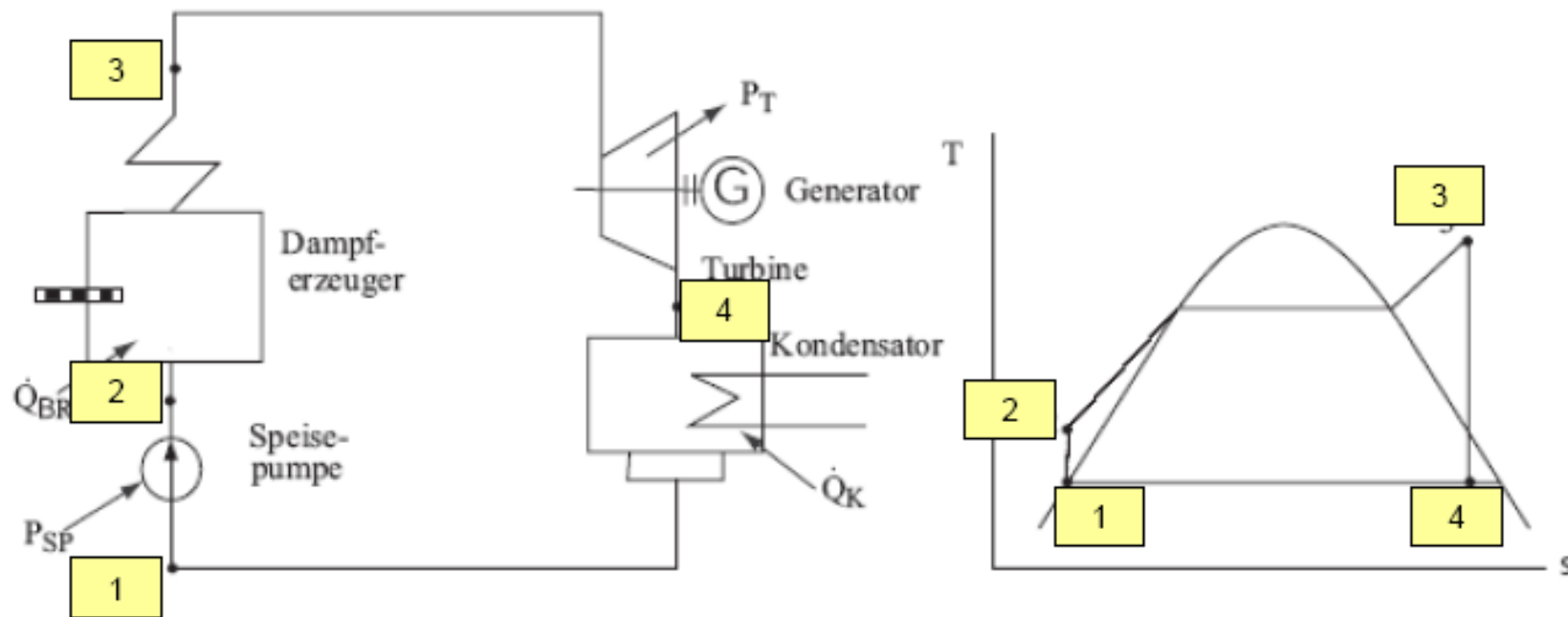


## Druckabhängigkeit der Dichte von Wasser und Dampf

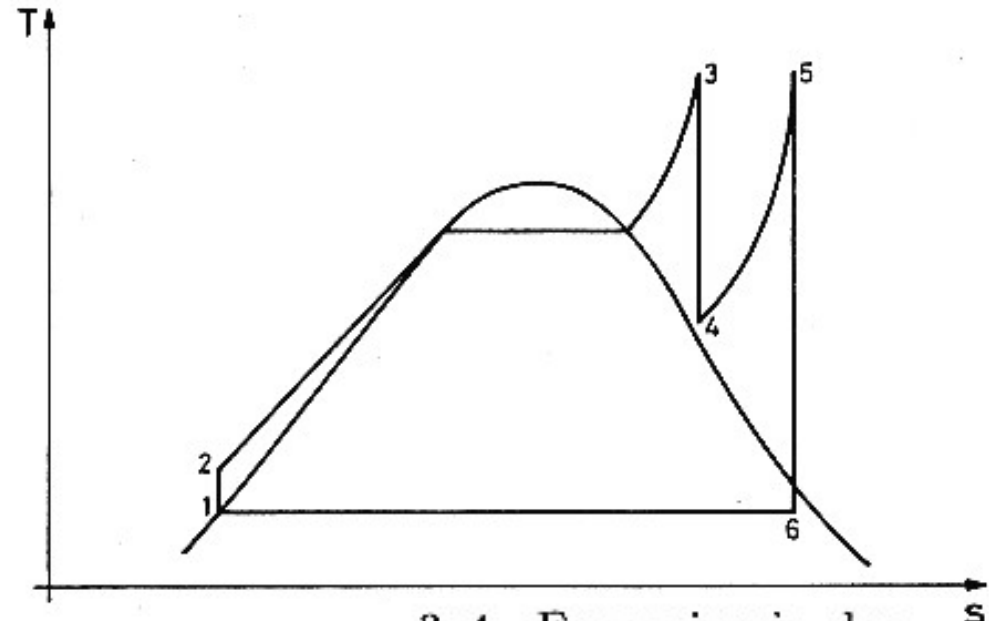
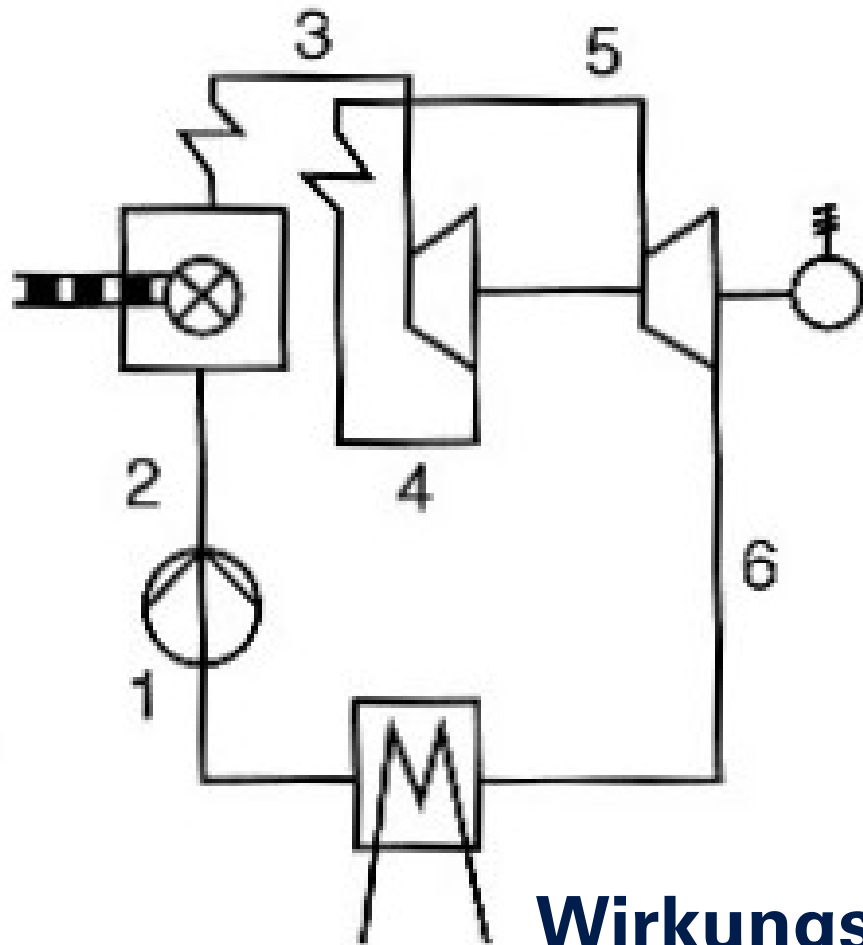
Kesseldruck bar	Sättigungstemperatur °C	Dichte kg/m <sup>3</sup>		Dichteverhältnis
		Wasser	Sattdampf	
65	280	751	33	22,7 : 1
130	329	640	88,5	7,3 : 1
200	364	502	162	3,1 : 1



# Schaltschema eines einfachen Dampfkraftprozesses und Darstellung im T,s-Diagramm



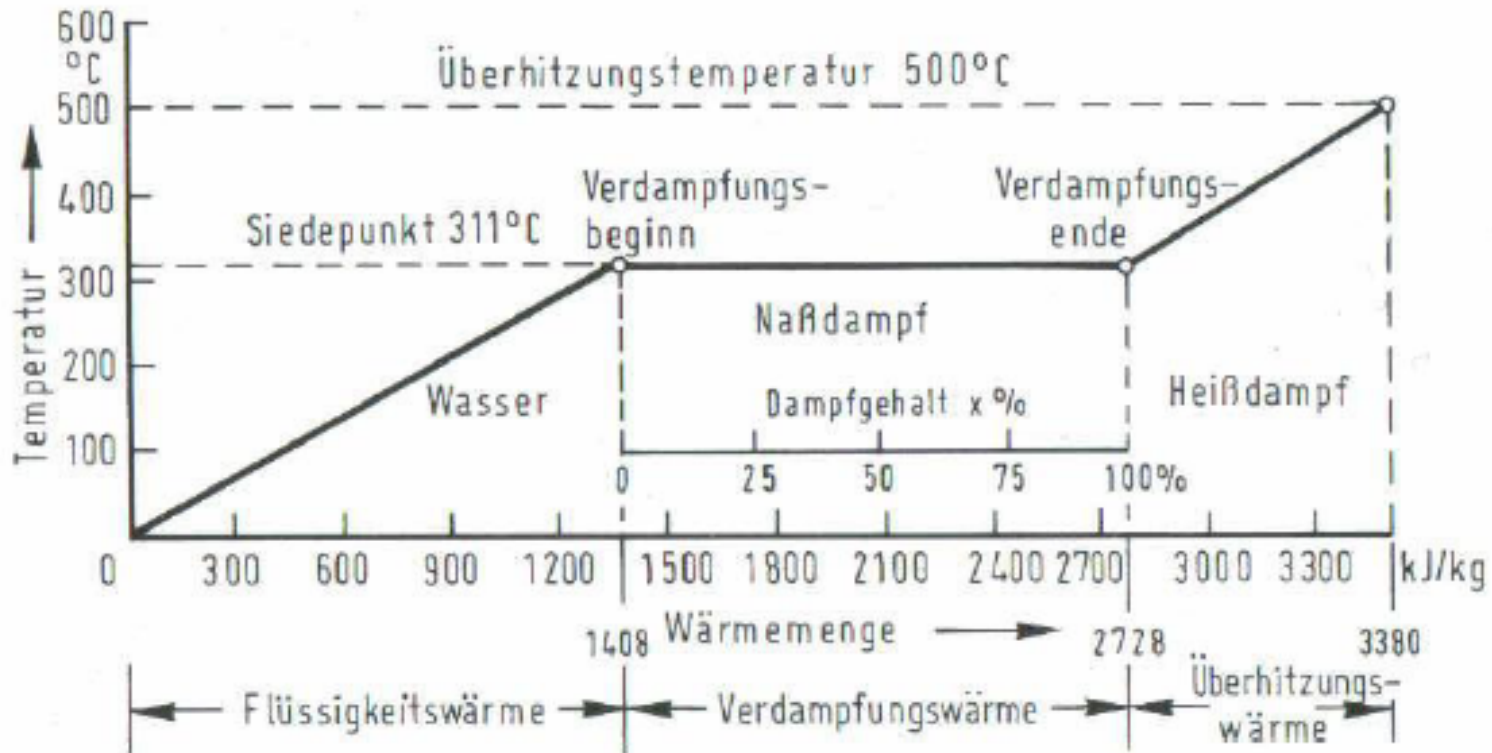
# Dampfkraftprozess mit einfacher Zwischenüberhitzung



- 3-4: Expansion in der Hochdruckturbine
- 4-5: Zwischenüberhitzung
- 5-6: Expansion in der Mittel- und Niederdruckturbine

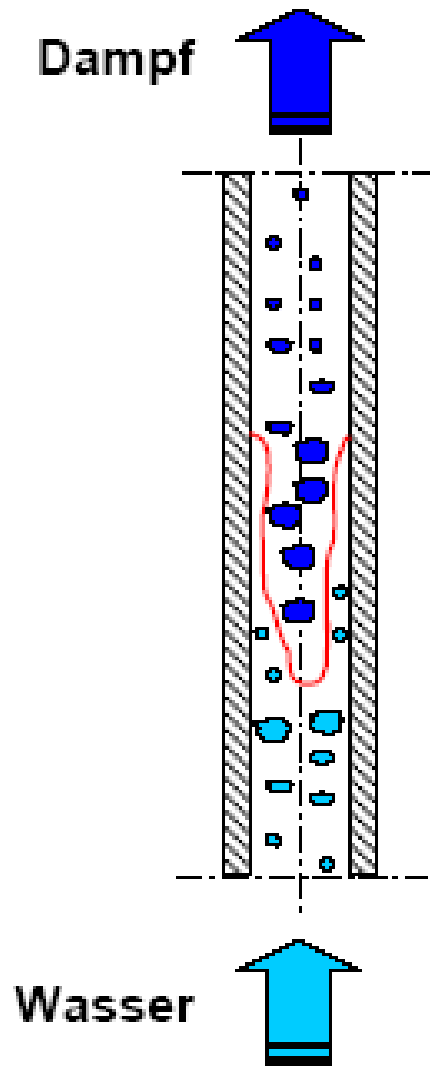
**Wirkungsgrad steigt!**

# Verdampfungs- und Überhitzungsvorgang von Wasser bei 100 bar bis zur Überhitzungstemperatur von 500 °C

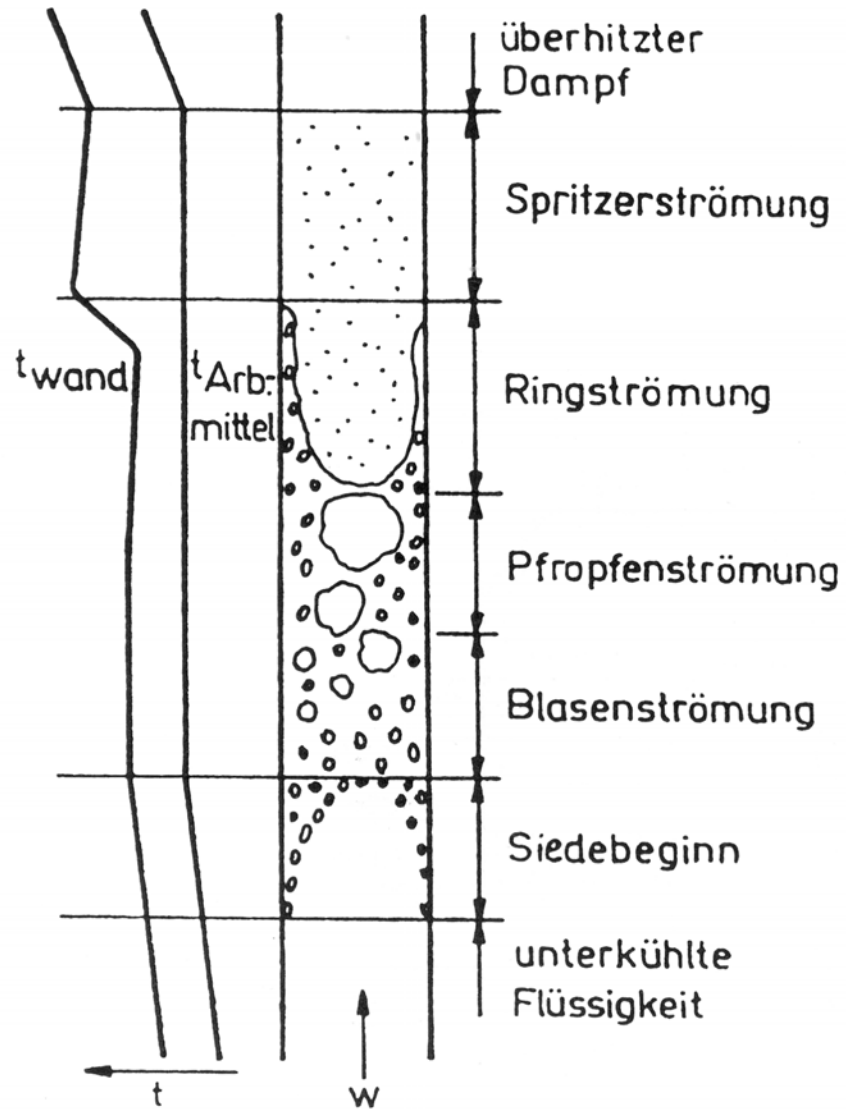


# - Der Verdampfungsvorgang -





Strömungsform	Wärmeübertragungsbereich
Einphasige Dampfströmung	Konvektiver Wärmeübergang zum Dampf
Tropfenströmung	Post-Dryout-Bereich
Ringströmung mit Wassermitriß	Konvektiver Wärmeübergang durch den Wasserfilm
Ringströmung	Konvektiver Wärmeübergang durch den Wasserfilm
Kolbenblasenströmung	Sieden
Blasenströmung	Unterkühltes Sieden
Einphasige Wasserströmung	Konvektiver Wärmeübergang zum Wasser



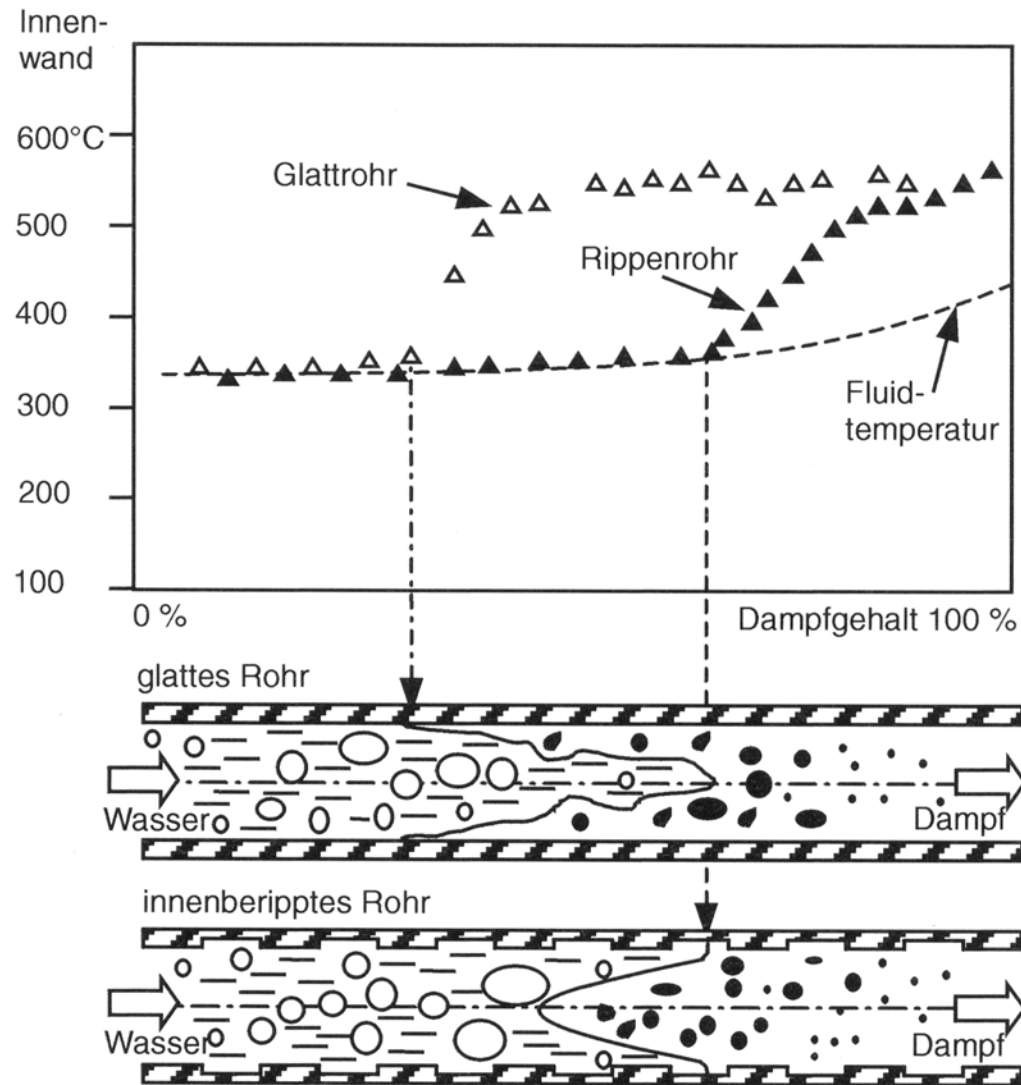
# Siedekrise

- **Plötzliche Verschlechterung des Wärmeübergangs am Ende des Siedevorgangs**
  - **Bei hoher Wärmestromdichte gefährlicher Wandtemperaturanstieg**
1. **Siedekrise 1. Art: wandnahe Verdampfung durch hohe Wärmestromdichte verdrängt Flüssigkeit in Rohrmitte Dampfschicht wirkt wärmeisolierend und führt zu drastischer Temperaturerhöhung**

**2. Siedekrise 2. Art: tritt beim Übergang der Ringströmung in die Pfropfenströmung auf (Komplettverlust des Wasserfilms an der Wandung) bei hohen Dampfgehalten, insbesondere im Teillast von Zwangsdurchlaufkesseln**

**3. Burnout: Austrocknen von Wassertropfen in Wandnähe**

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



Zustand:

Druck: 150 bar

Massenstromdichte:  $500 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

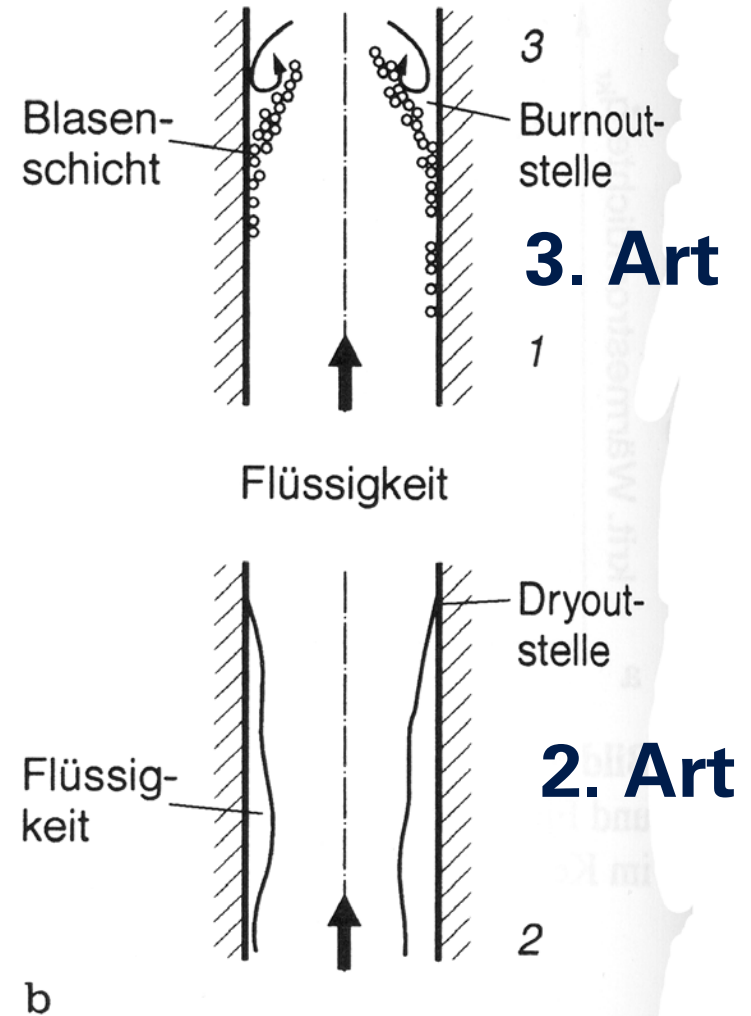
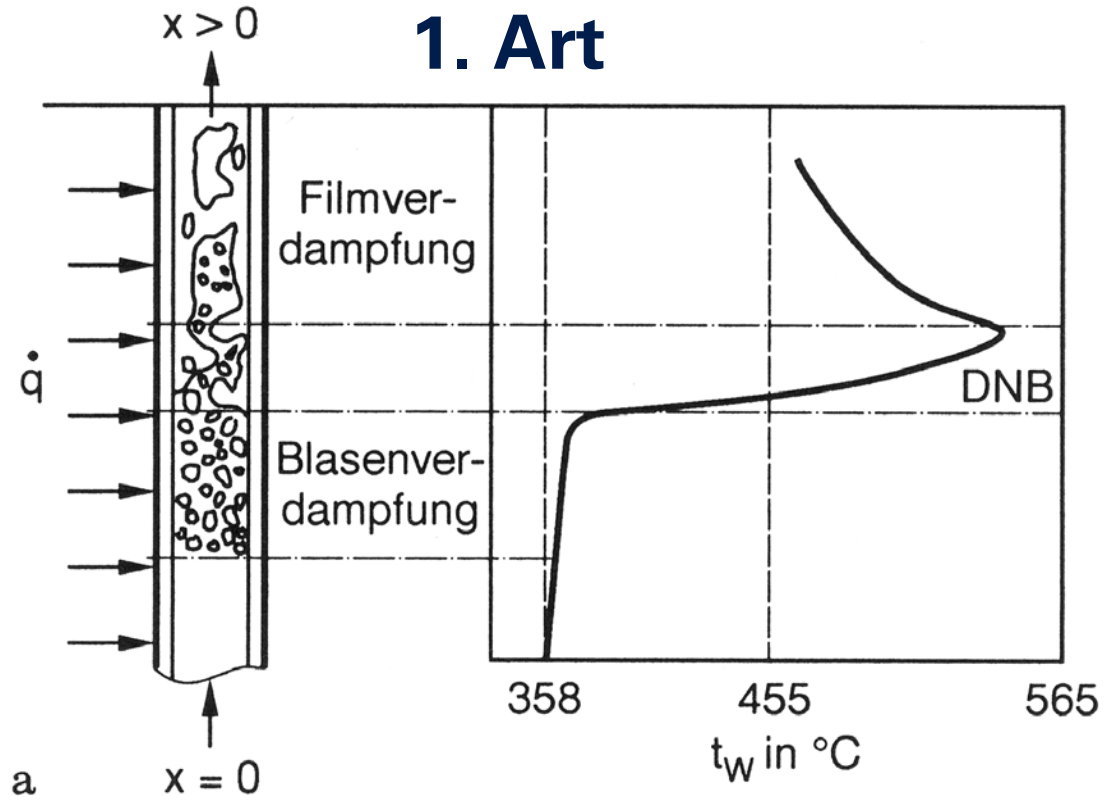
Wärmestromdichte:  $300 \text{ kW}/\text{m}^2$

— Wasser

○ Dampfblasen

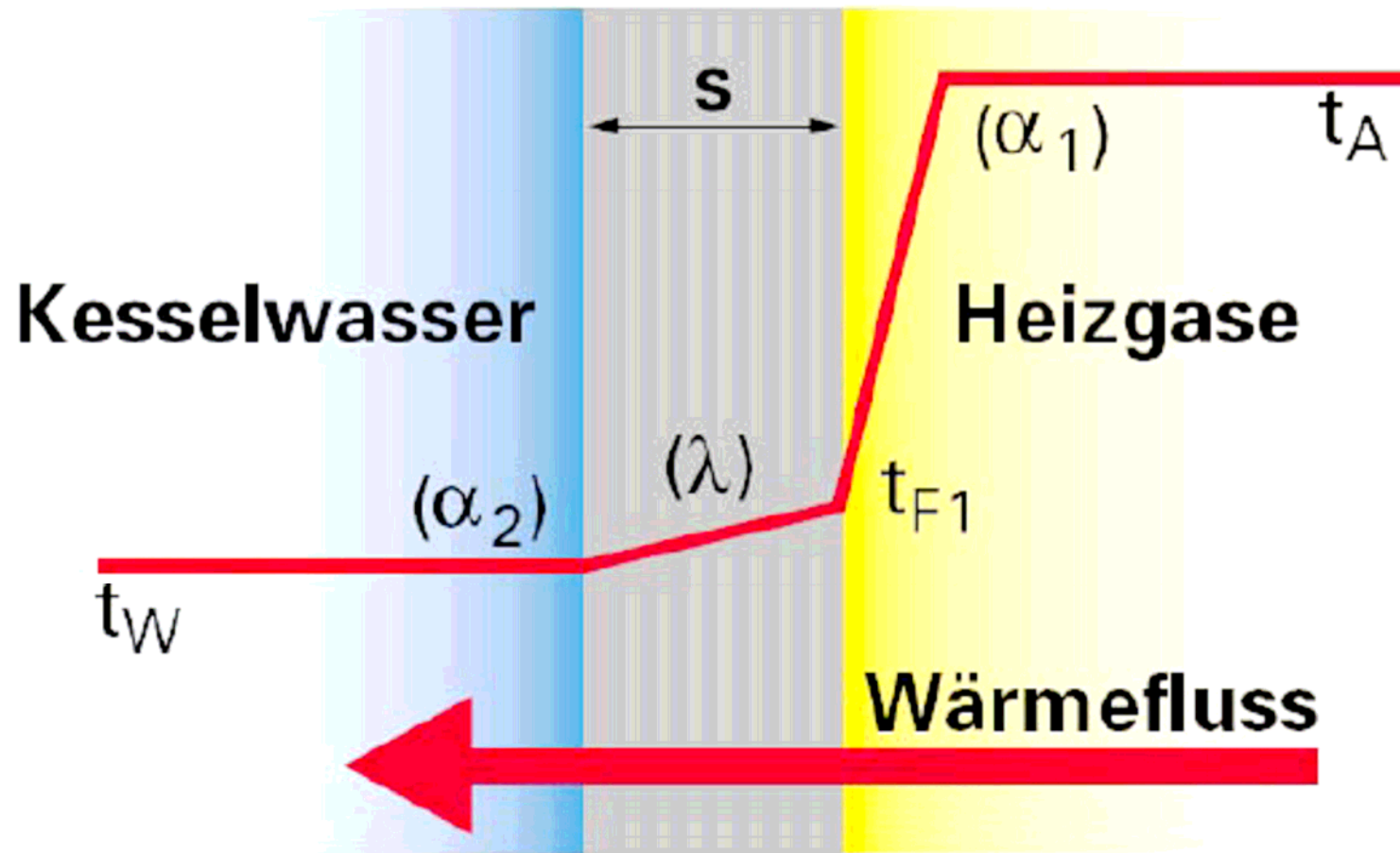
● Tropfen

# 1. Art

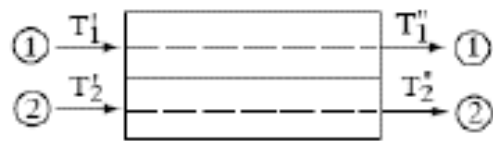


# - Wärmübertragung im Dampferzeuger -

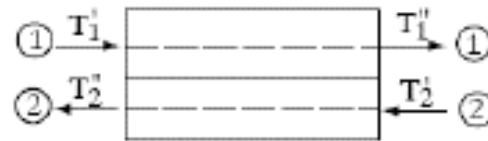
## Wärmefluss durch eine Kesselwand



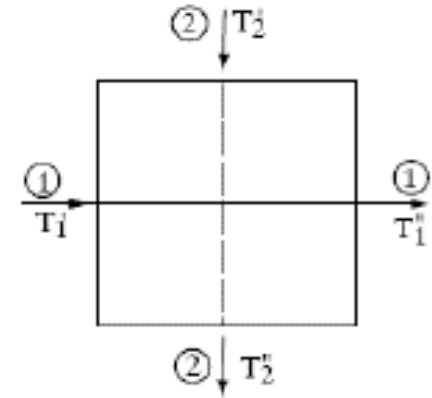




Gleichstrom

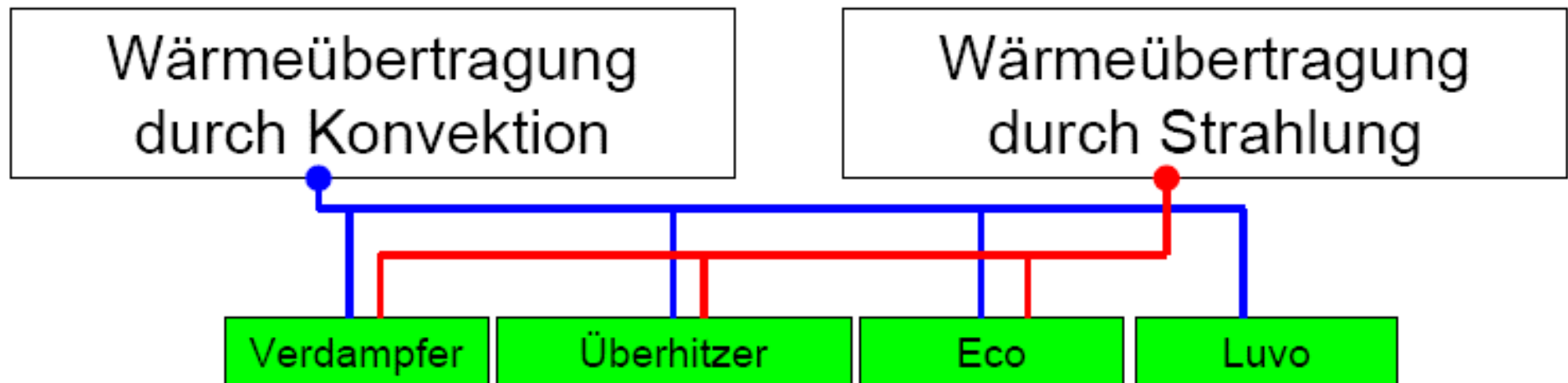


Gegenstrom

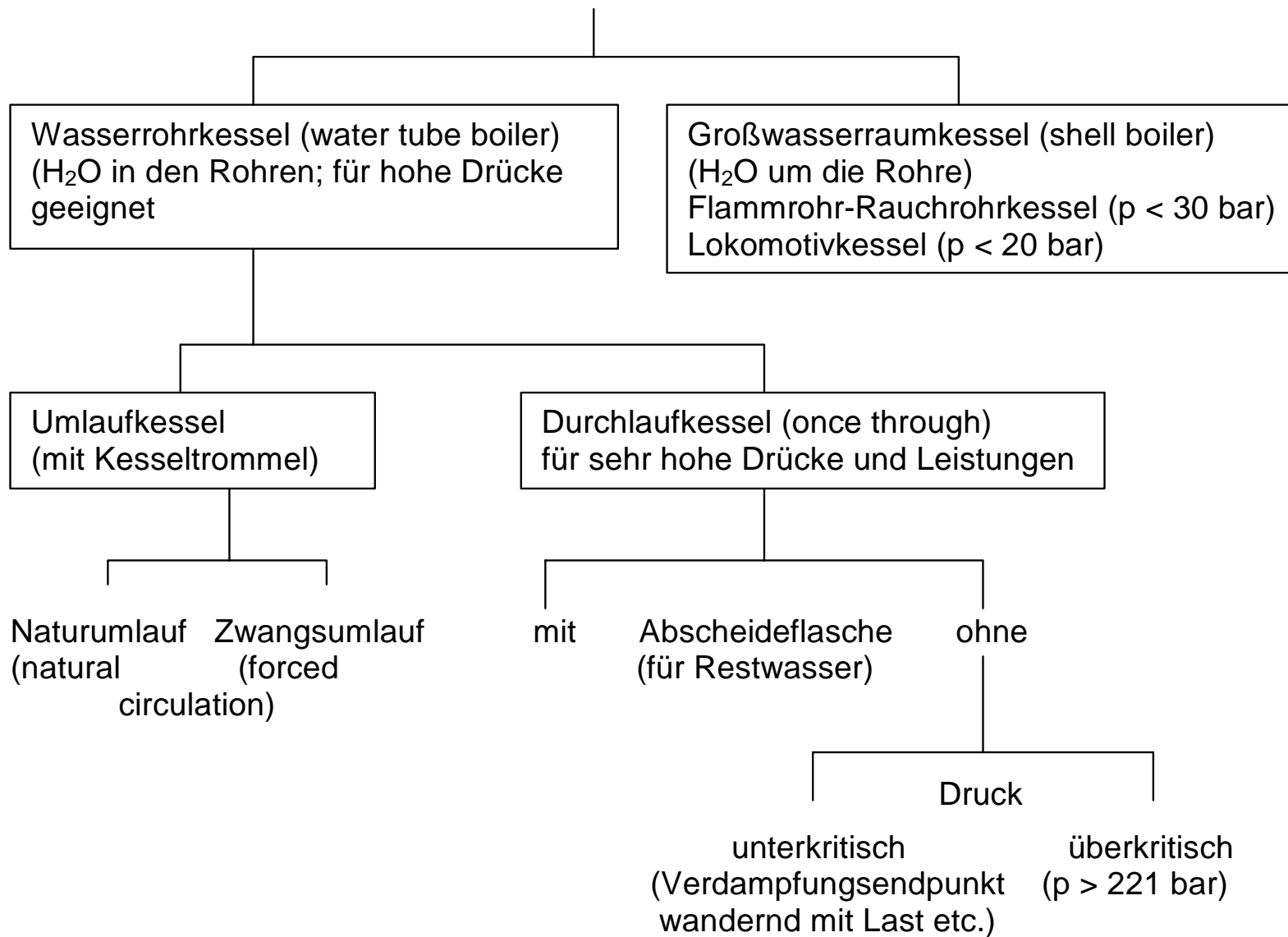


Kreuzstrom

Wärmeübertragung	Beschreibung	Bezeichnung	Symbol	Einheit	Formel
Wärmeleitung	in Körpern	Wärmeleitkoeffizient	$\lambda$	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} A \cdot \Delta T$
Konvektion	innerhalb von Flächen und Gasen oder von diesen an eine feste Wand	Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$
Strahlung	Strahlungsenergie in Form elektromagnetischer Wellen (wird absorbiert, reflektiert oder durchgelassen)	Emissionskoeffizient	$\varepsilon$	dimensionslos	$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$
Wärmedurchgang	aus den Teilvorgängen Leitung, Konvektion und Strahlung	Wärmedurchgangskoeffizient	$k$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T$



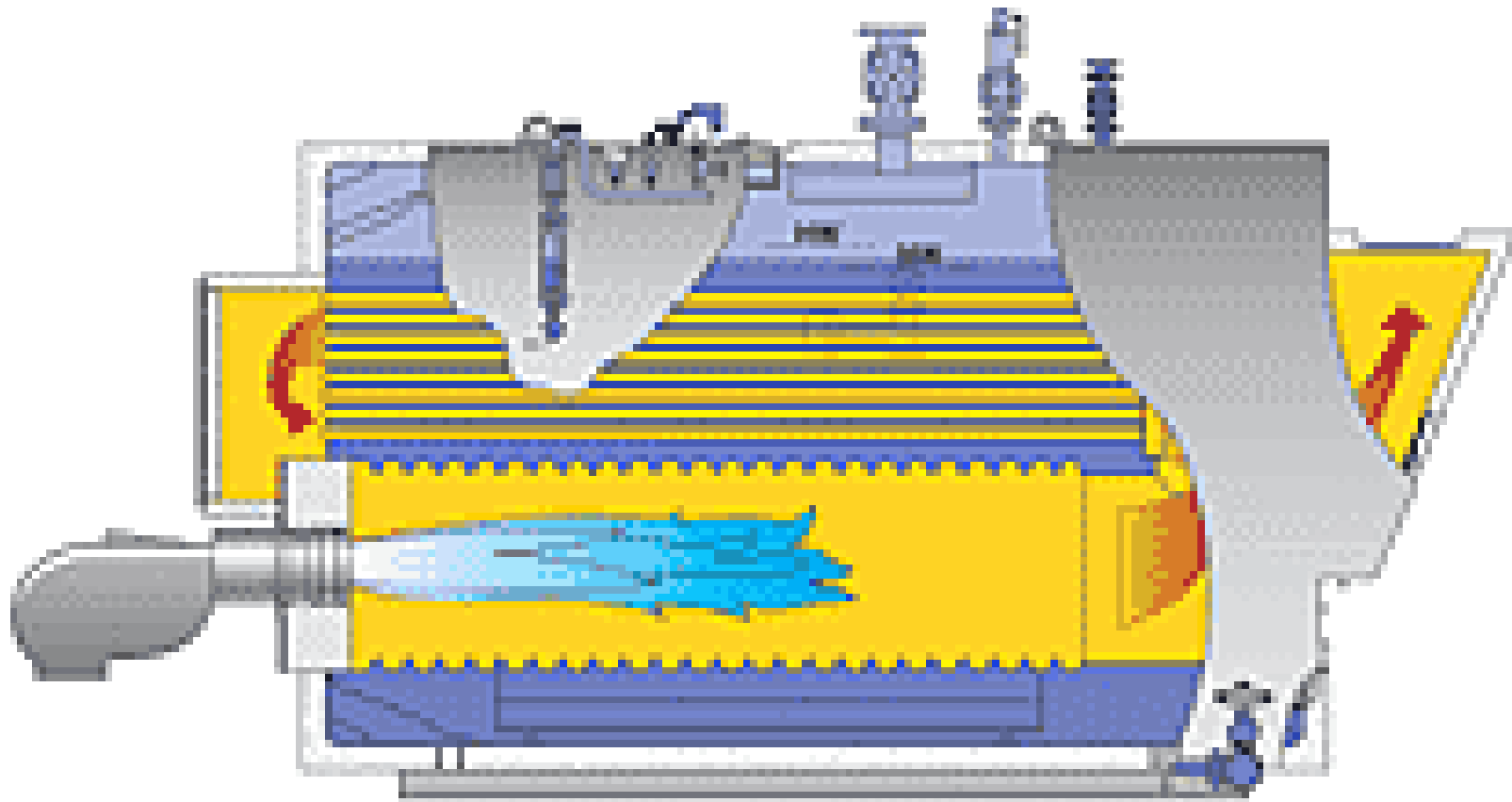
# - Dampferzeugerbauarten -



# Großwasserraumkessel

**Dampfdrücke: bis 32 bar, Leistung bis ca. 20 MW**

**Dampfleistung: bis 28 t/h (ein Flammrohr), 55 t/h (zwei)**

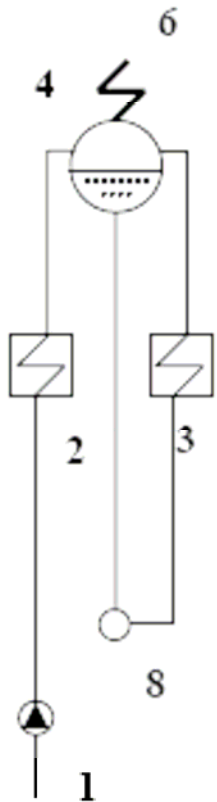


# - Wasserrohrkessel -

# Dampferzeuger-Systeme

## Naturumlauf

Strömung wird durch Verdampfung selbst eingeleitet und aufrecht erhalten. Es ist ein geschlossenes System.



1 Speisepumpe

2 Speisewasservorwärmer

3 Verdampfer

4 Kesseltrommel

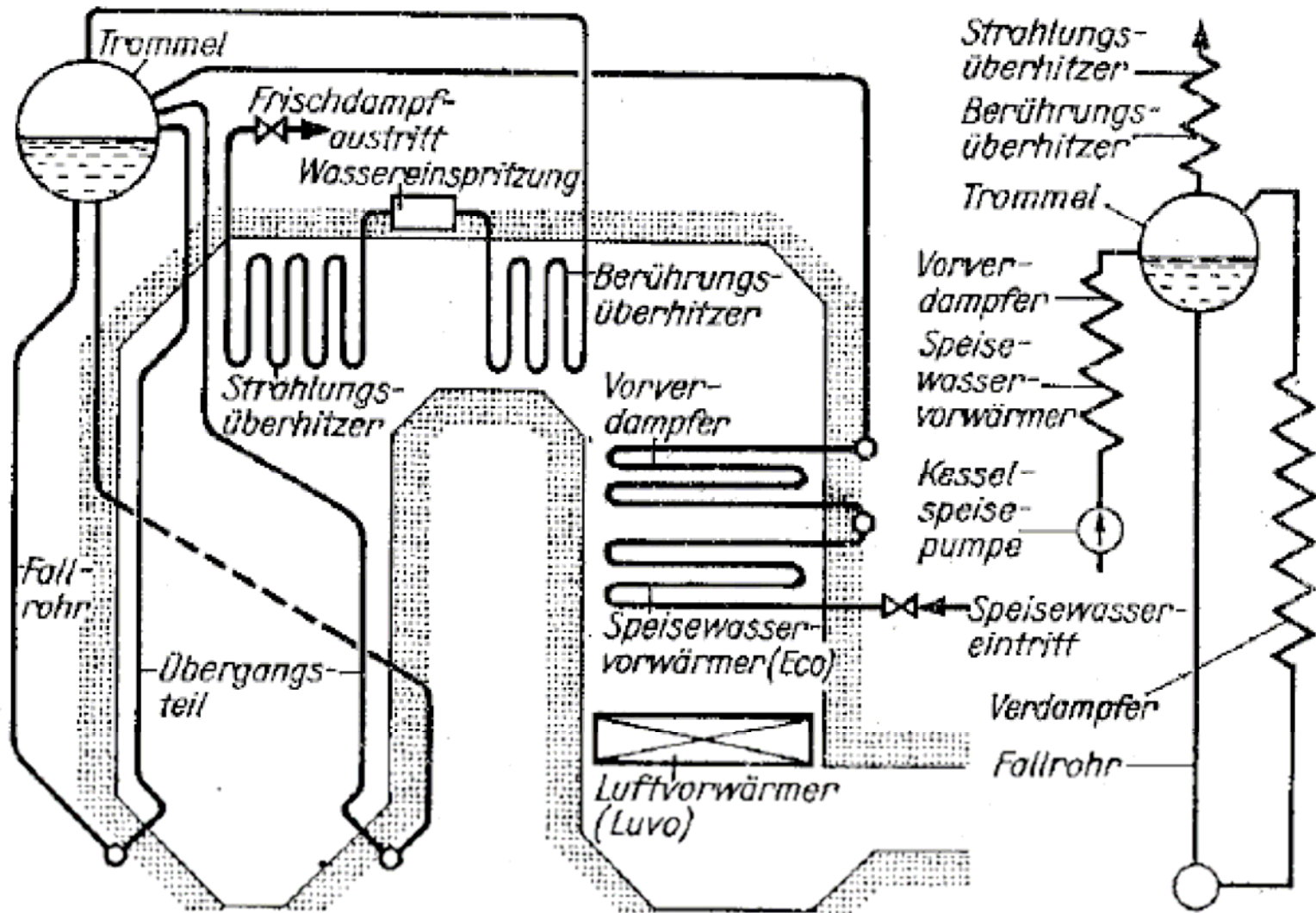
5 Trenngefäß

6 Überhitzer

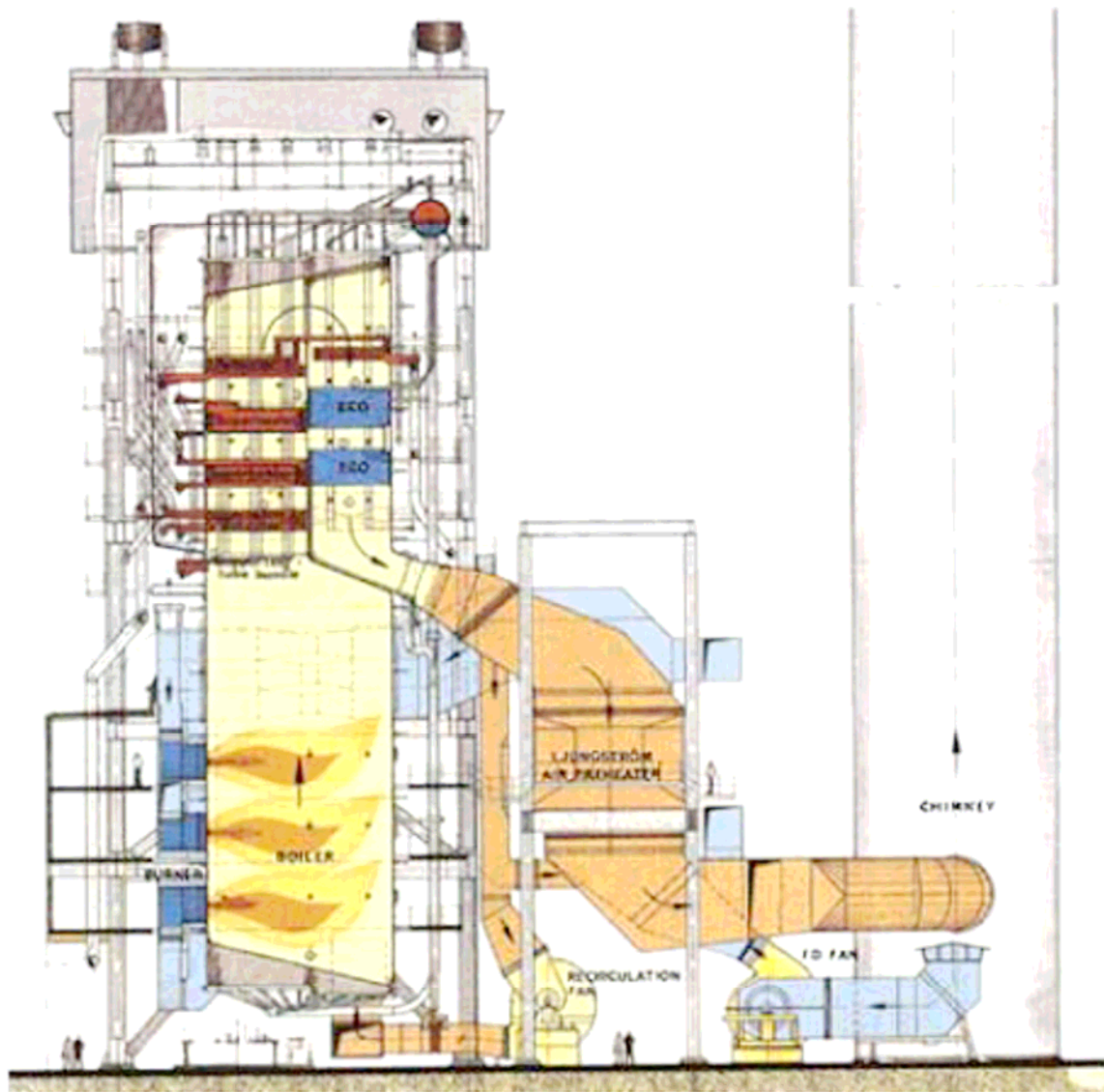
7 Umwälzpumpe

8 Sammler/Mischpunkt





## Naturumlauf



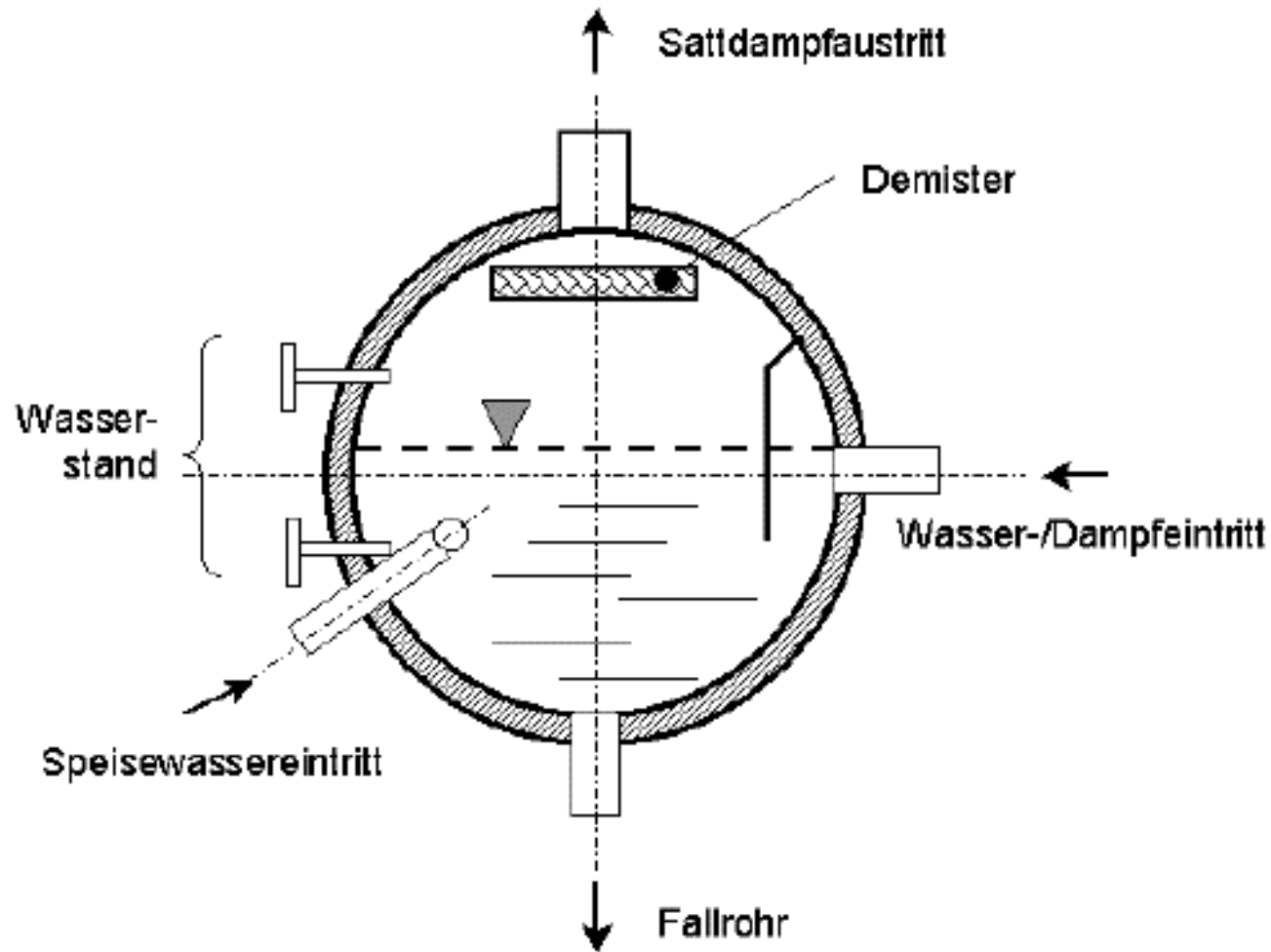
## Naturumlaufkessel

Brennstoffe:  
Stein- und Braunkohle,  
Öl; Gas

Leistungsbereich:  
ca. 250 - 700 t/h



# Kesseltrommel (schematisch)



Zu den Aufgaben der Kesseltrommel bei Umlaufsystemen zählen:

- ☑ Trennung des umlaufenden Wassers und des Dampfes
- ☑ Ausbildung des Wasserspiegels; Halten des zulässigen Betriebsdruckes und des Wasserstandes als Regelgrößen
- ☑ Erwärmung des vom Speisewasservorwärmer kommenden Wassers auf Siedetemperatur und Vermischung mit den umlaufenden Wasser
- ☑ Zurückhaltung der eingebrachten Salze und Abführung über das Entsalzungsventil
- ☑ Verteilung des Trommelwassers auf die Fallrohre

# **Vor- und Nachteile von Naturumlaufkesseln**

## **Vorteile:**

- **selbsttätiges weitgehend selbstregelndes System**
- **eigensicher, d. h. keine Noteinrichtungen erforderlich**
- **keine Umlaufpumpe**
- **einfacher Aufbau**
- **einfache Bedienung**
- **geringe Anforderungen an die Speisewasserqualität**
- **Verschmutzungen sammeln sich in der Trommel und können abgeschlämmt werden**
- **weiter Regelbereich**
- **einfaches Anfahrregime, keine Zusatzeinrichtungen**

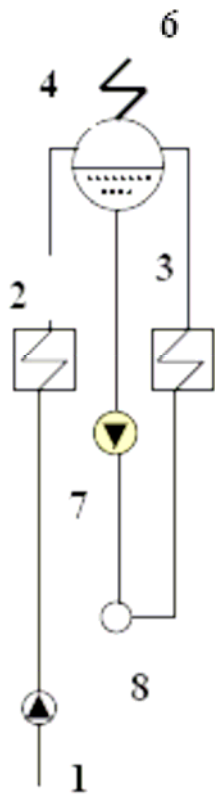
## **Nachteile:**

- **begrenzt durch Wegfall des Dichteunterschiedes zwischen Wasser und Dampf**
- **Trommel als großes dickwandiges Bauteil nicht für >200 bar baubar**
- **Betriebsdruck bis 190 bar**
- **keine überkritischen Dampfparameter**
- **größere Rohrdimensionen**
- **Verdampfungsanteil pro Umlauf < 30%**
- **konstruktive Einschränkungen (prinzipbedingte Lage der Rohre)**
- **hydraulischer Ausgleich erforderlich (Drosseln)**

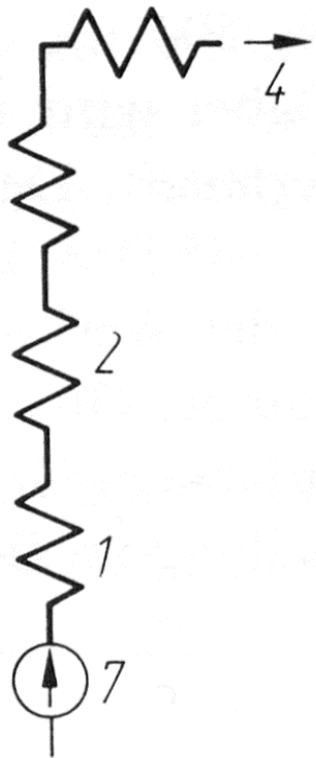
# Dampferzeuger-Systeme

## Zwangumlauf

Wasserkreislauf wird durch eine Umwälzpumpe aufrecht erhalten.



- |                         |                 |                      |
|-------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 Speisepumpe           | 4 Kesseltrommel | 7 Umwälzpumpe        |
| 2 Speisewasservorwärmer | 5 Trenngefäß    | 8 Sammler/Mischpunkt |
| 3 Verdampfer            | 6 Überhitzer    |                      |

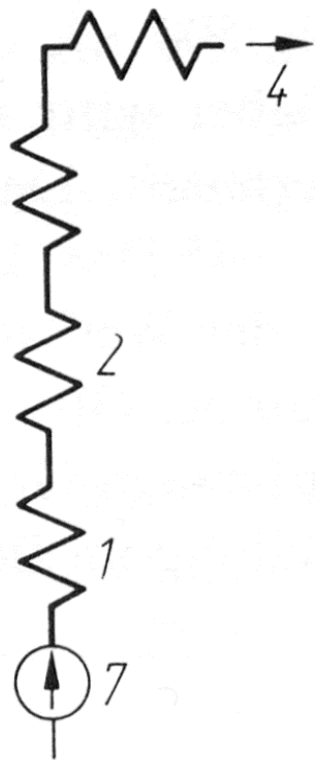


## Dampferzeuger-Systeme

### Zwangdurchlauf

Arbeitsmittel wird in einem einmaligen Durchgang durch das Rohrsystem vorgewärmt, verdampft und überhitzt. Besitzt keine Trommel und kann mit beliebigem Druck betrieben werden. Speisepumpe bewirkt den Durchlauf.





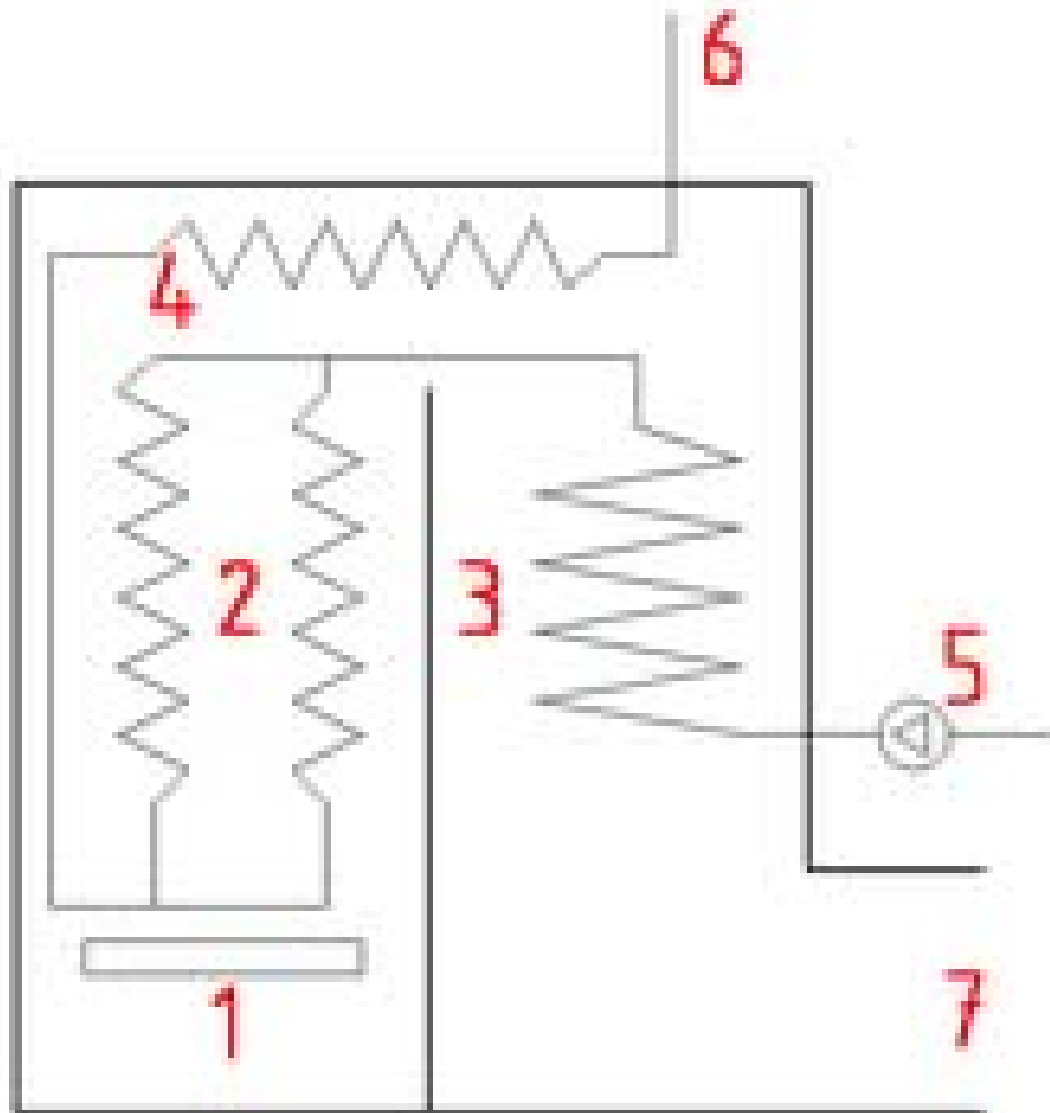
## Dampferzeuger-Systeme

### Zwangdurchlauf

mit variablen Verdampfungspunkt

Leistung und Wassermenge werden so aufeinander abgestimmt, dass die Dampftemperatur über einen großen Lastbereich konstant gehalten werden kann. **Gleitender Übergang zwischen Verdampfer und Überhitzer**

1 Speisewasservorwärmer, 2 Verdampfer, 3 Entspanner, 4 Überhitzer, 5 Fallrohr, 6 Steigrohr, 7 Speisewasserpumpe



## Bensonkessel

1-Feuerung

2-Verdampferrohre

3-Vorwärmer

4-Überhitzer

5-Speisepumpe

6-Dampfaustritt

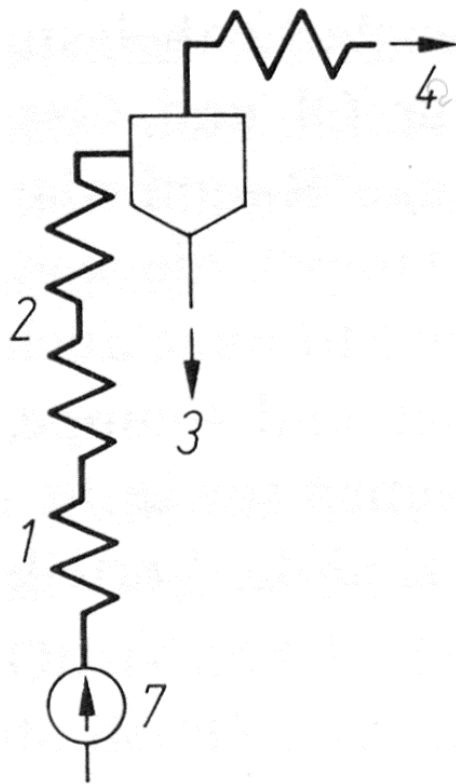
7-Abgas

## Dampferzeuger-Systeme

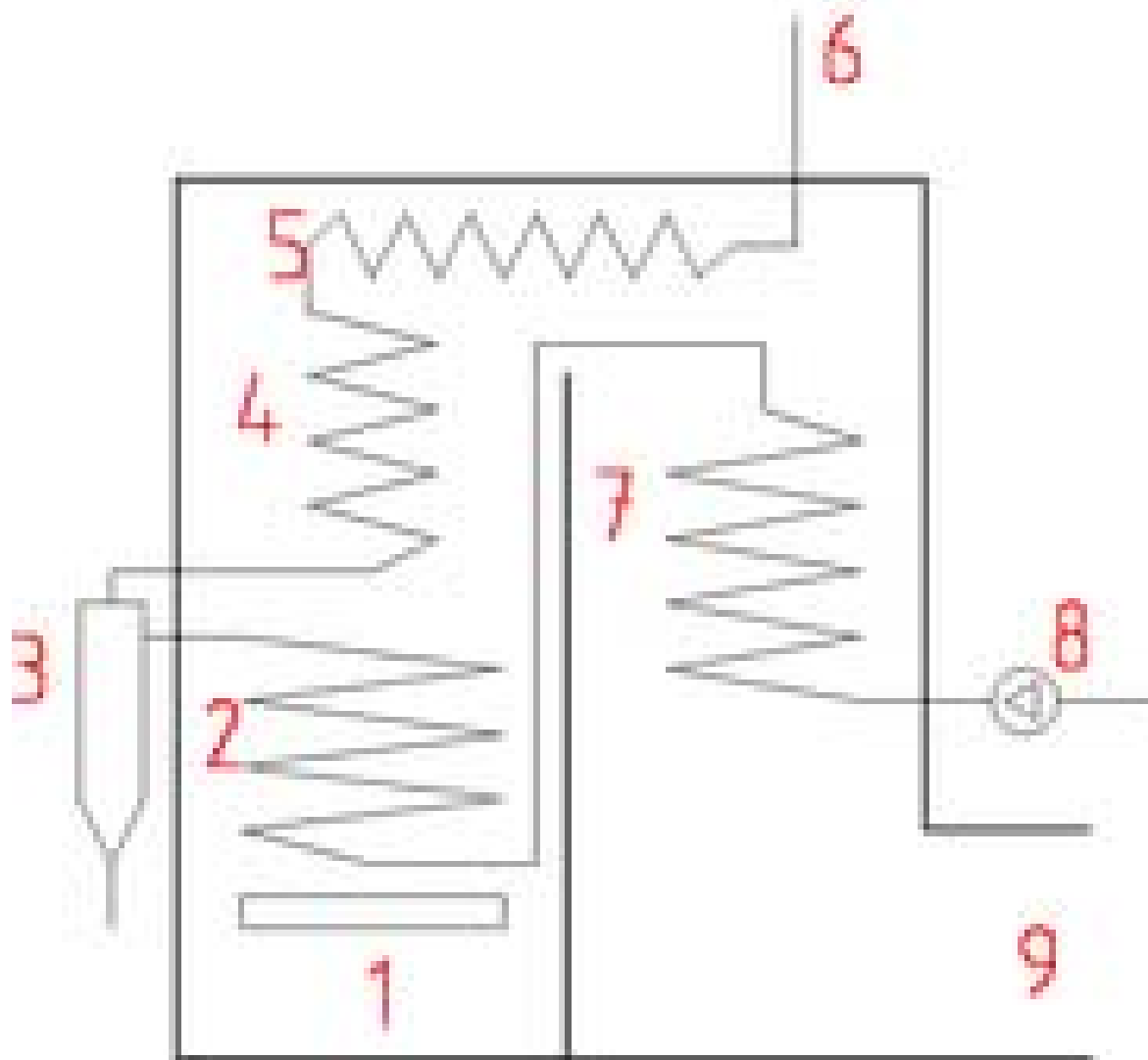
### Zwangsdurchlauf

mit festem Verdampfungspunkt

Wasserstand wird in einem Trenngefäß geregelt und örtlich fixiert.



1 Speisewasservorwärmer, 2 Verdampfer, 3 Entspanner, 4 Überhitzer, 5 Fallrohr, 6 Steigrohr, 7 Speisewasserpumpe



## Sulzerkessel

1-Feuerung

2-Verdampferrohre

3-Wasserabscheider

4-Nachverdampfer

5-Überhitzer

6-Dampfaustritt

7-Vorwärmung

8-Speisepumpe

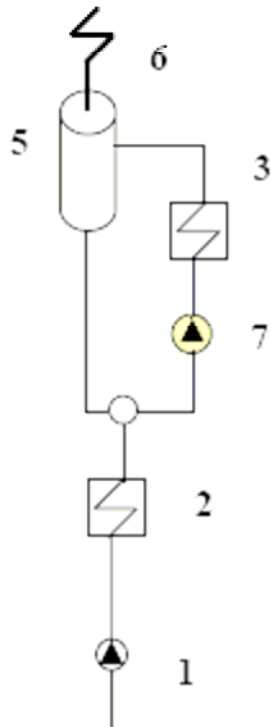
9-Abgas

## Dampferzeuger-Systeme

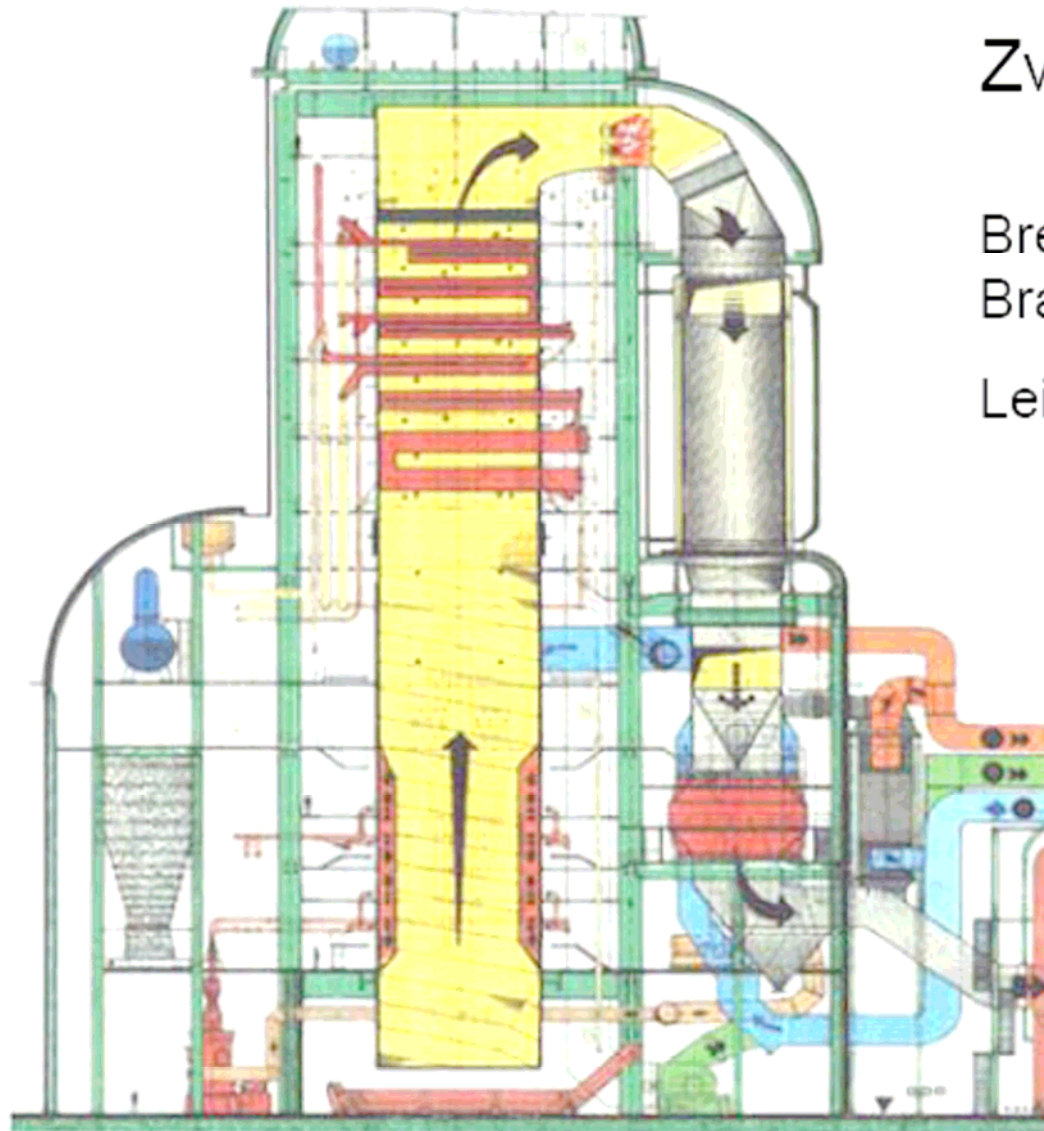
### Zwangsdurchlauf

mit überlagertem Umlauf

Hauptmerkmal ist die Umwälzpumpe, die das Wasser aus dem Trenngefäß absaugt und gemeinsam mit dem vorgewärmten Speisewasser durch den Verdampfer drückt.



- |                         |                 |                      |
|-------------------------|-----------------|----------------------|
| 1 Speisepumpe           | 4 Kesseltrommel | 7 Umwälzpumpe        |
| 2 Speisewasservorwärmer | 5 Trenngefäß    | 8 Sammler/Mischpunkt |
| 3 Verdampfer            | 6 Überhitzer    |                      |



## Zwangsdurchlaufkessel

Brennstoffe: Stein- und Braunkohle, Öl, Gas

Leistungsbereich: 400 - 1500 t/h



AUSTRIAN ENERGY  
& ENVIRONMENT

## **Vor- und Nachteile der Zwangsdurchlaufkessel**

### **Vorteile:**

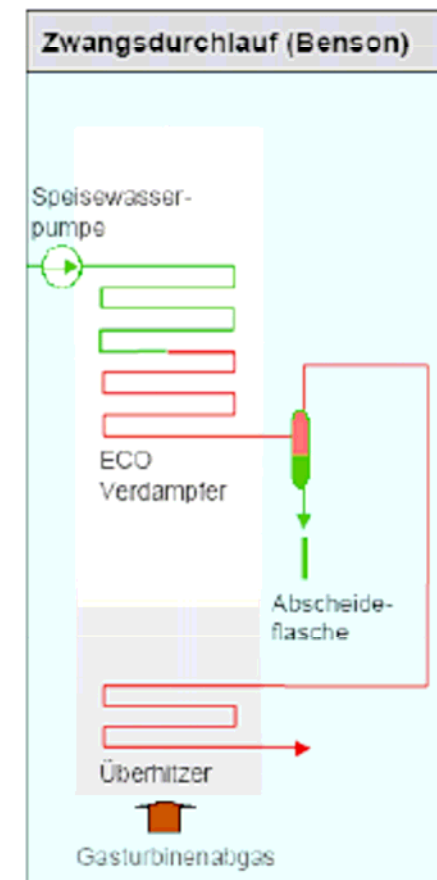
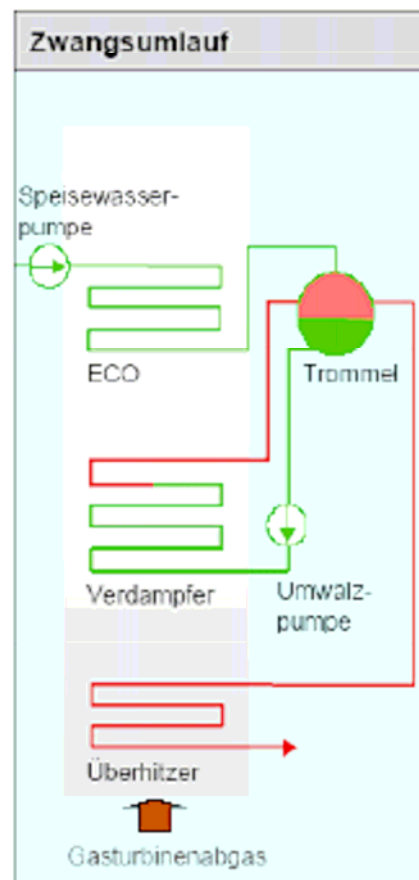
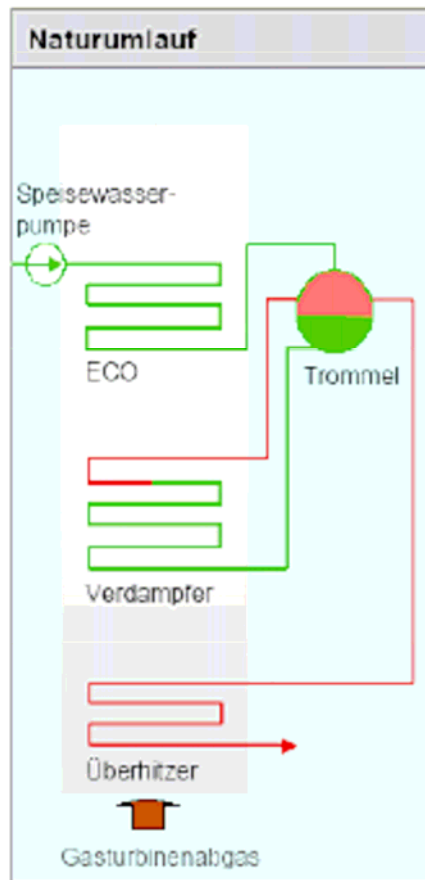
- hohe Dampfparameter**
- überkritischer Betrieb möglich**
- kleine Rohrdurchmesser**
- freizügige Rohrverlegung**
- keine Trommel und keine Fallrohre**
- Verdampfungsanteil bis 100 %**

## **Nachteile:**

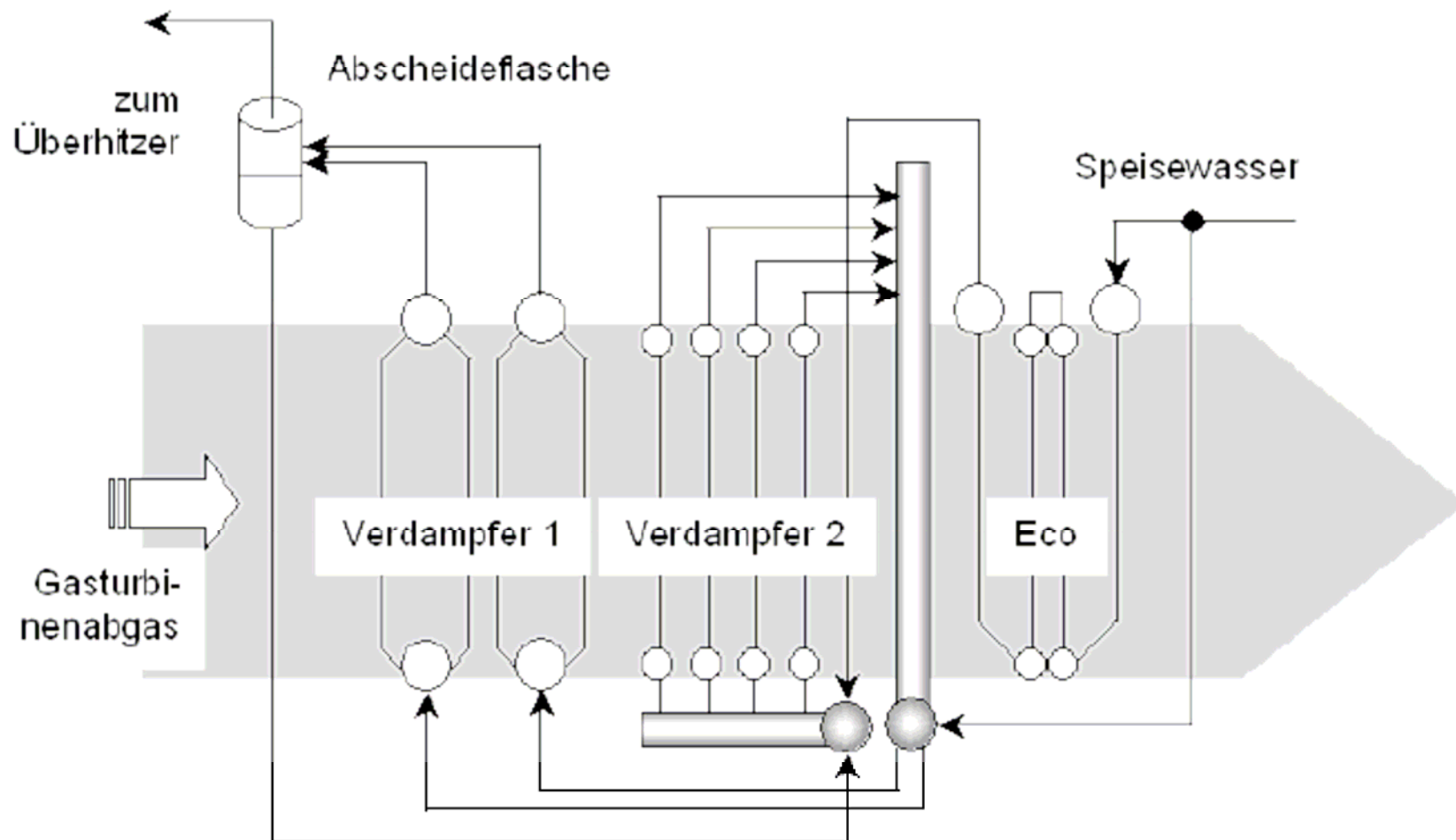
- **kein selbsttätiges System**
- **nur für sehr hochwertiges Speisewasser**
- **große Speisewasserpumpe erforderlich**
- **eingeschränkt in Teillastfähigkeit**
- **spezielle Einrichtung für das Anfahren erforderlich**
- **komplex in Aufbau und Bedienung**
- **nicht eigensicher (spezielle Notfalleinrichtung erforderlich)**



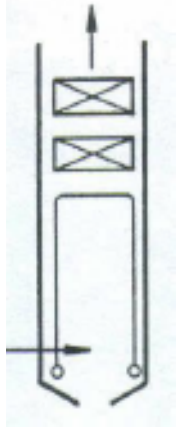
# Unterschiedliche Verdampferschaltungen bei einem Abhitze-Kessel



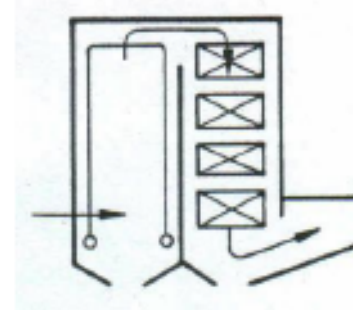
# Prinzip eines liegenden Abhitzekessels (Zwangsdurchlauf)



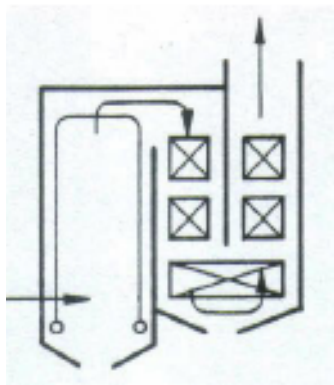
## Anordnung der Kesselzüge und Heizflächen



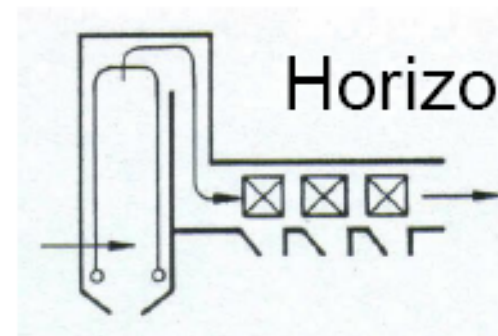
**Einzug-Kessel**  
(Turmkessel)



**Zweizug-Kessel**



**Dreizug-Kessel**



**Horizontalzug-Kessel**



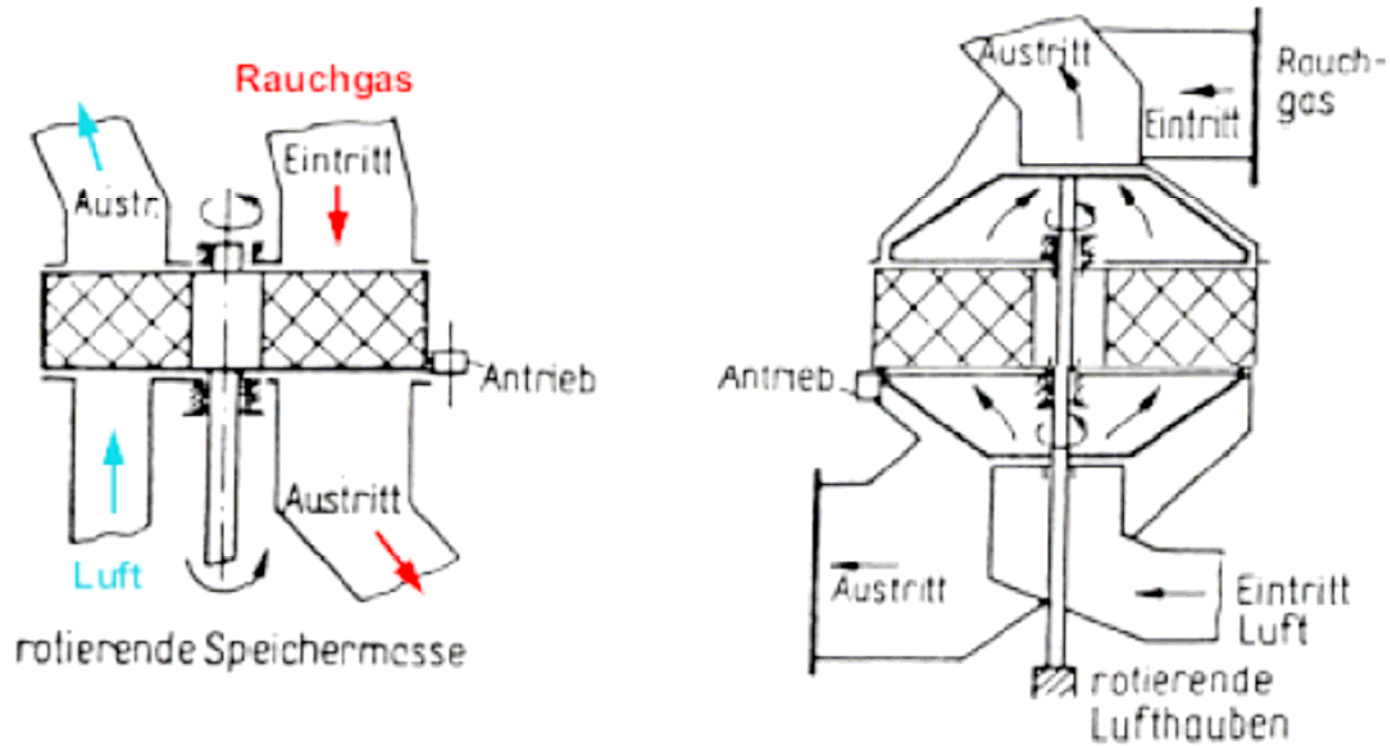
**Strahlungsheizfläche**



**Berührungsheizfläche**

# - Dampferzeuger Bauteile-

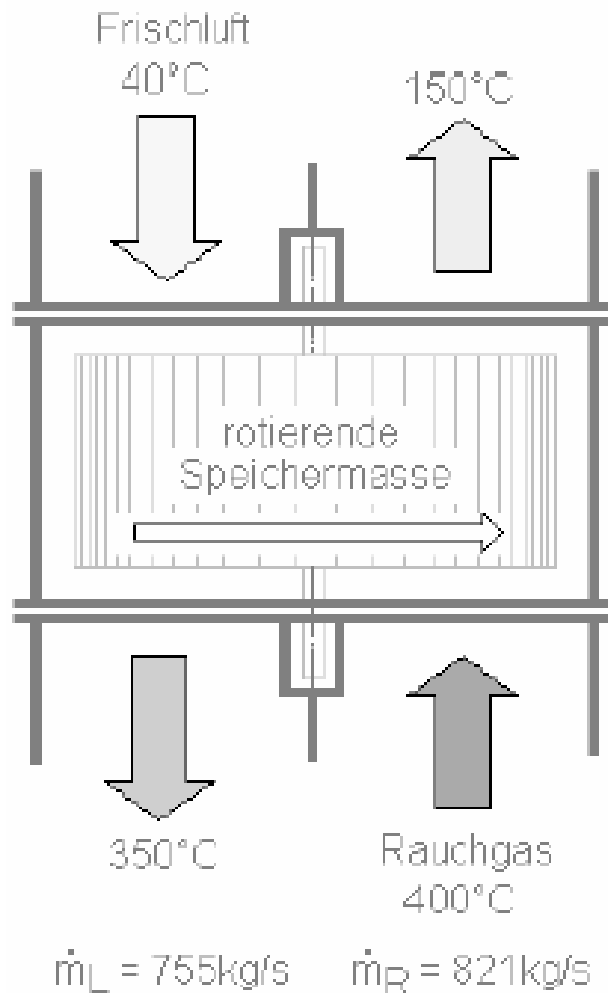
## Regenerativ- Luftvorwärmer



Rotierender  
Heizflächenträger

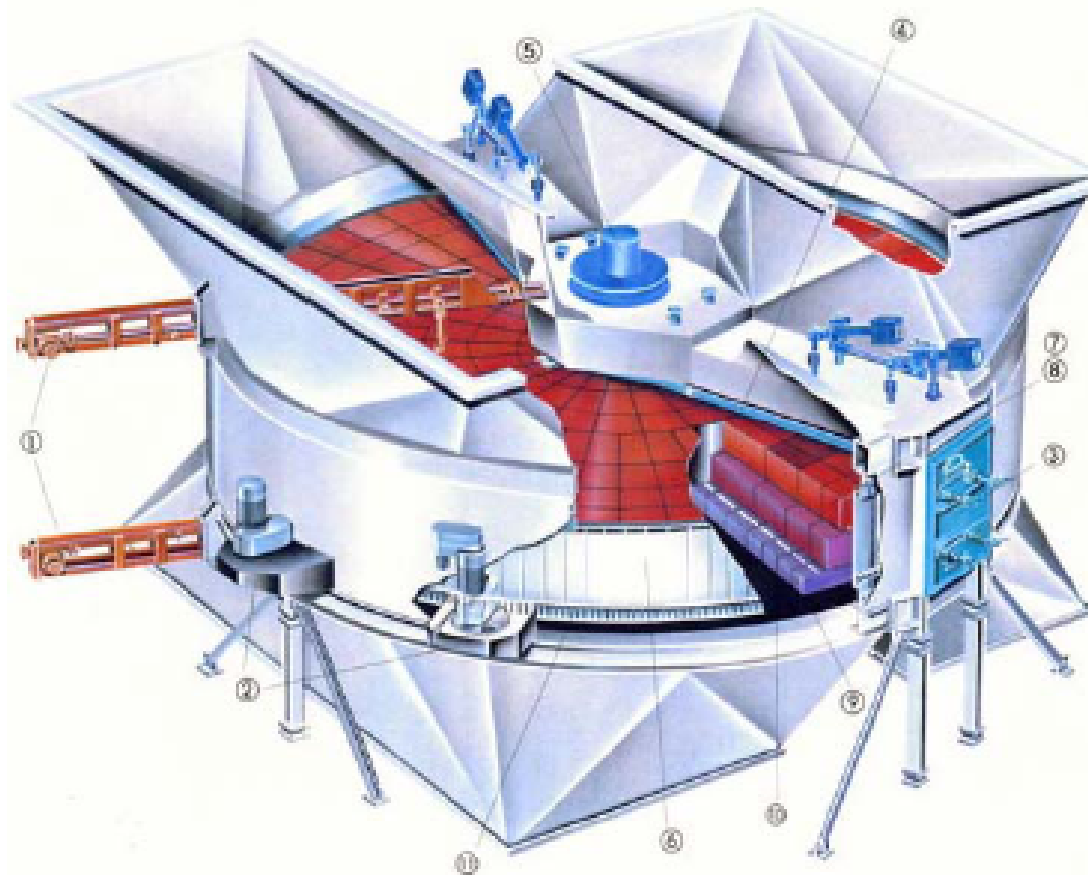
Feststehender  
Heizflächenträger

Ljungström-Regenerator



Der Luftvorwärmer (LUVO) ist im Gasfluss dem Kessel nachgeschaltet, wird somit vom Rauchgas beaufschlagt und dient der Vorwärmung der Verbrennungsluft. Der LUVO ist meist die letzte Heizfläche im Rauchgasstrom vor dem Rauchgasabzug bzw. Schornstein.

*Ljungström*<sup>®</sup>



- ① Reinigungseinrichtung zum Blasen mit Dampf oder Druckluft und Spülen mit Wasser
- ② Rotorantriebe
- ③ Mantelabdichtung
- ④ Radialabdichtung
- ⑤ Führungslager
- ⑥ Rotor
- ⑦ Heizelemente verpackt in Behältern
- ⑧ Heiße Lage: Stahl
- ⑨ Kalte Lage: „Corten“ oder emaillierte Bleche
- ⑩ Mittlere Lage (Material: Stahl)
- ⑪ Bolzenkranz

Rauchgas- temperaturen:	Braunkohle	160 ... 500 °C
	Steinkohle	120 ... 500 °C
Lufttemperatur am Austritt:	Kohlenstaubfeuerung	200 ... 400 °C (bei Zyklon- feuerung höher)
	Rostfeuerungen	
	- Steinkohle	100 ... 150 °C
	- Braunkohle	150 ... 200 °C
	- Braunkohlenbriketts	120 ... 150 °C



## **Speisewasservorwärmung**

Physikalisch bedingt liegen die Abgastemperaturen nach Verdampferheizflächen deutlich über der jeweiligen Sattedampftemperatur. Um dadurch bedingte Wärmeverluste zu verringern, werden Speisewasservorwärmer (Economiser) als Nachschaltheizflächen zur Speisewasservorwärmung für Dampferzeuger eingesetzt.

# Speisewasservorwärmer (Economiser)



## Überhitzer

Der Überhitzer ist ein mit Rauchgas beheiztes Rohrsystem. In den dampfseitig parallel geschalteten Rohren wird der im Verdampfer erzeugte Sattedampf auf die gewünschte Dampftemperatur gebracht.

# Überhitzer

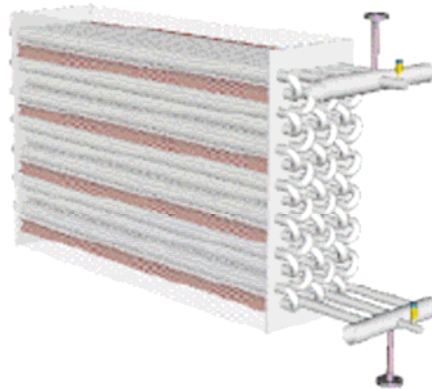
Die Überhitzer-Heizflächen werden nach der Art der Wärmeübertragung eingeteilt

Strahlungsüberhitzer

Berührungsüberhitzer

Schottenüberhitzer

Rohrwände, die schottenartig in Abständen von 800 bis 1.500 mm am Ende der Brennkammer hängen. Die Wärmeübertragung erfolgt sowohl durch Strahlung als auch Berührung.



## Überhitzer (Anhaltswerte)

Dampfgeschwindigkeit	12 ... 22 m/s
Druckverlust im Überhitzer	maximal 8 % des Genehmigungs-Druckes
Rauchgastemperatur	600 ... 1000 °C
Rauchgasgeschwindigkeit	6 ... 10 m/s
Zugverlust	5 ... 15 mm WS
Wärmeübergangszahl, rauchgasseitig	40 ... 60 kcal/m <sup>2</sup> h K
Wärmeübergangszahl, dampfseitig	800 ... 1000 kcal/m <sup>2</sup> h K

Wärmedurchgangszahl	40 ... 60 kcal/m <sup>2</sup> h K
Rohraußendurchmesser	32 ... 38 mm
Rohrteilung beim Berührungs-Überhitzer	70 ... 200 mm
Anzahl der Schlangen hintereinander	maximal 10
Größte senkrechte Länge der Schlange	7500 mm
Abstand der Schotten beim Schotten -Überhitzer	700 ... 1400 mm

## Vorschau: Übung Naturumlaufkessel

### Wasserumlaufberechnung

Um einen zuverlässigen Wasserumlauf sichern und beurteilen zu können, ist die Berechnung der Umlaufgeschwindigkeit, des Auftriebes, des Druckverlustes und anderer Eigenschaften des umlaufenden Arbeitsmittels notwendig.

Die Wasserumlaufberechnung hat durch die Entwicklung einer speziellen Software ein hohes Niveau erreicht und erlaubt eine effiziente Auslegung des Systems.

## Wasserumlaufberechnung

### Mittlere Umlaufzahl für Naturumlauf-Dampferzeuger

Druck in MPa	Dampfmassestrom in t/h	Umlaufzahl
14 ... 18,8	200 ... 650	8 ... 5
8 ... 14	80 ... 250	14 ... 6

Quelle: EFFENBERGER: Dampferzeuger

$$\text{Umlaufzahl} = \frac{\text{Gesamtmassestrom}}{\text{Dampfmassestrom}}$$

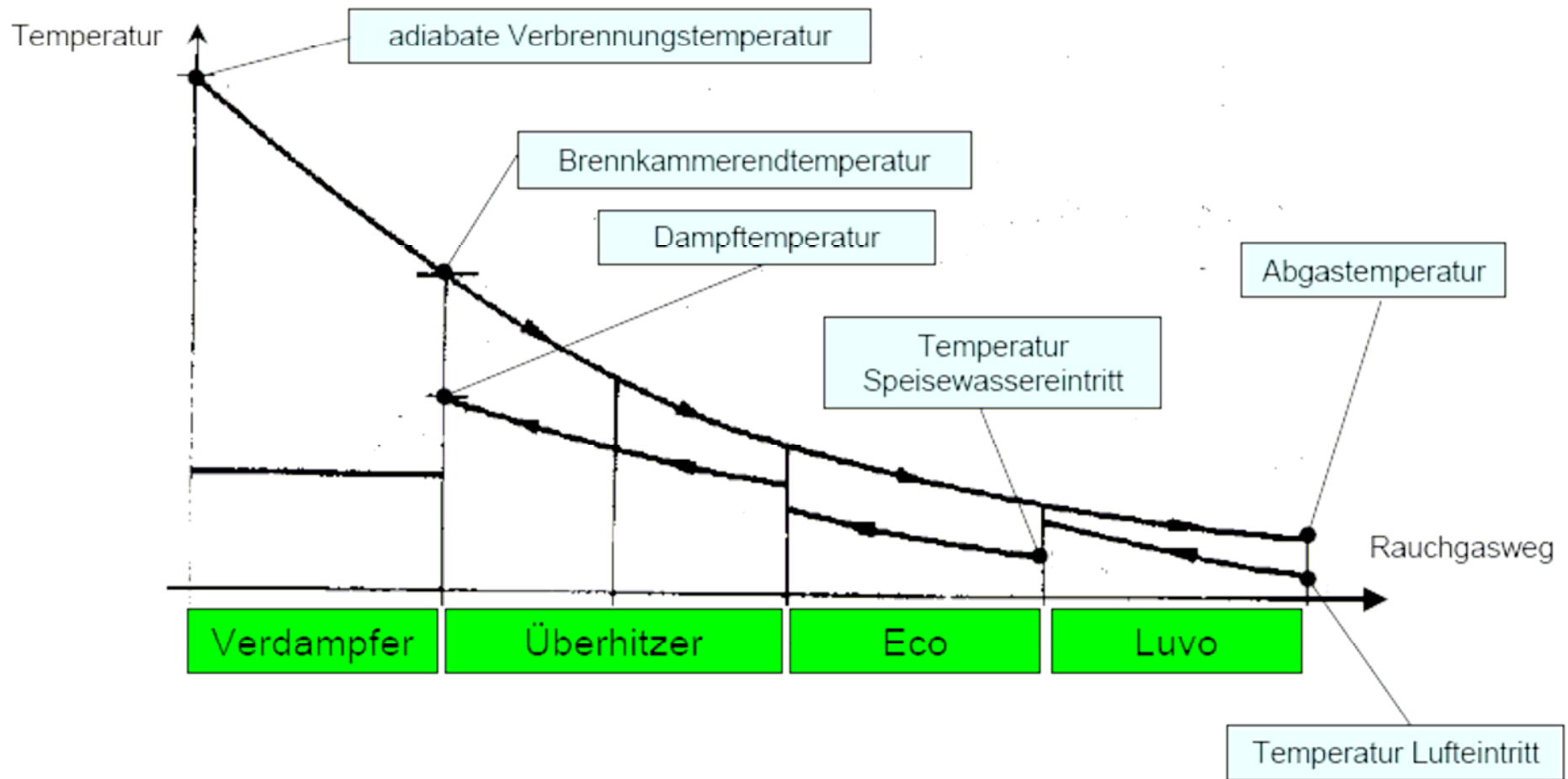
## Wasserumlaufberechnung

Anhaltswerte für Umlaufgeschwindigkeiten ( $w$ ) in m/s

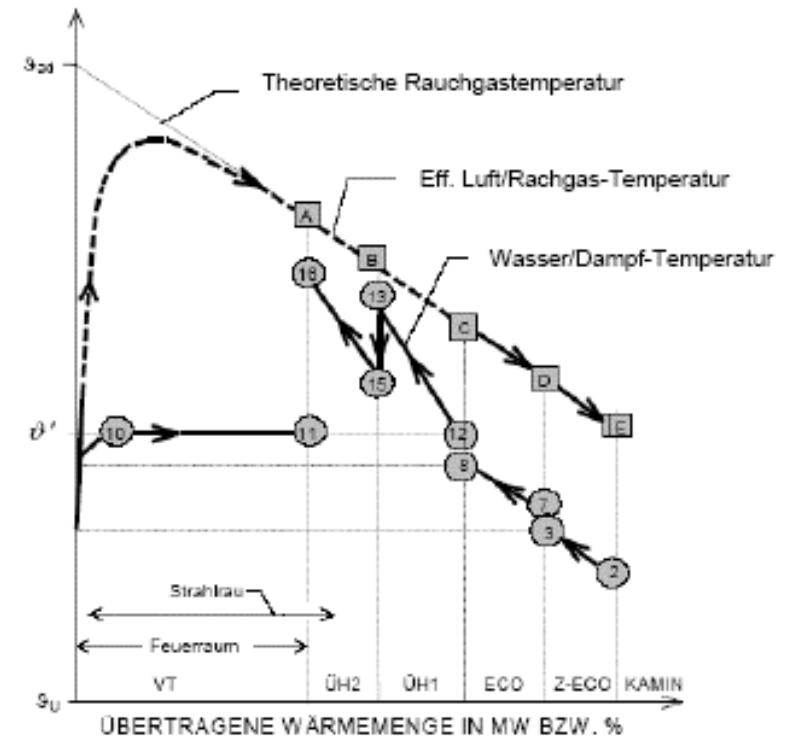
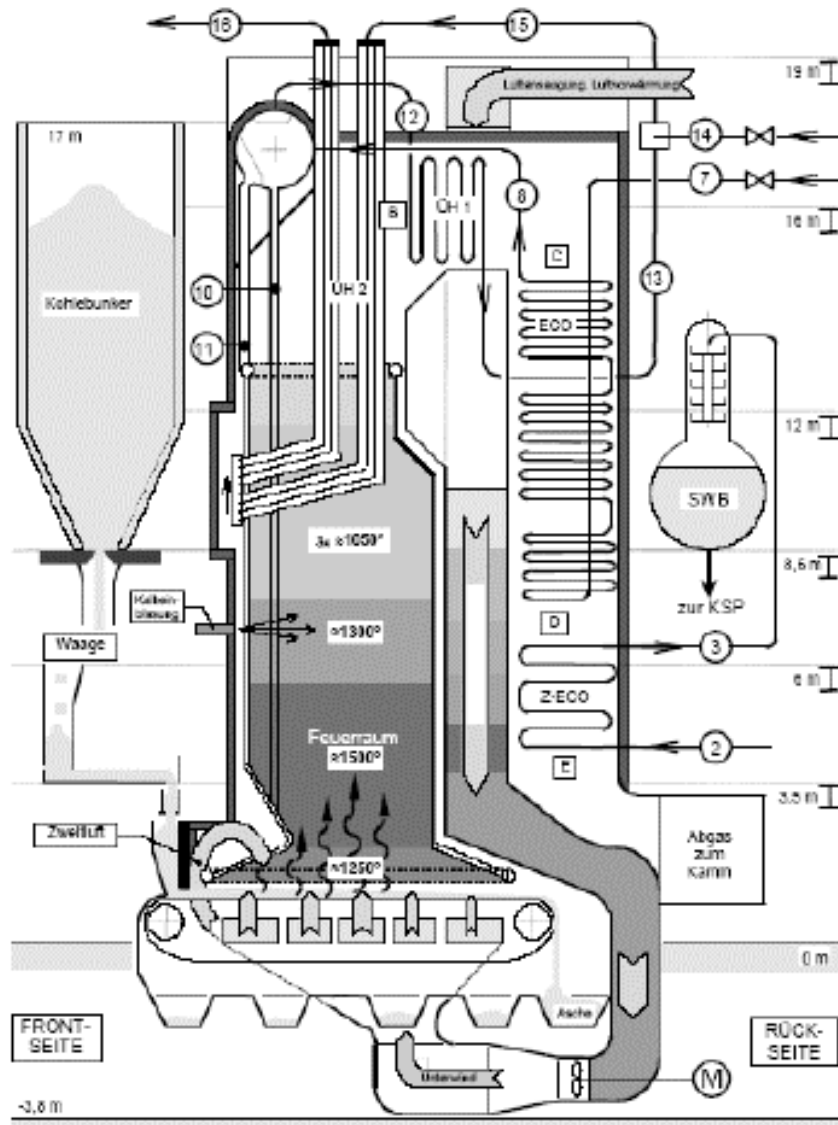
Verdampferelement	$w$
Kühlwandschirm, direkt mit der Trommel verbunden	0,5 ... 1,5
Kühlwandschirm mit oberem Sammler	0,2 ... 1,0
Schottheizflächen	0,5 ... 2,0



# Temperaturverlauf längs des Rauchgasweges



# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



T(δ)-Q-Diagramm

Schema Kesselaufbau