



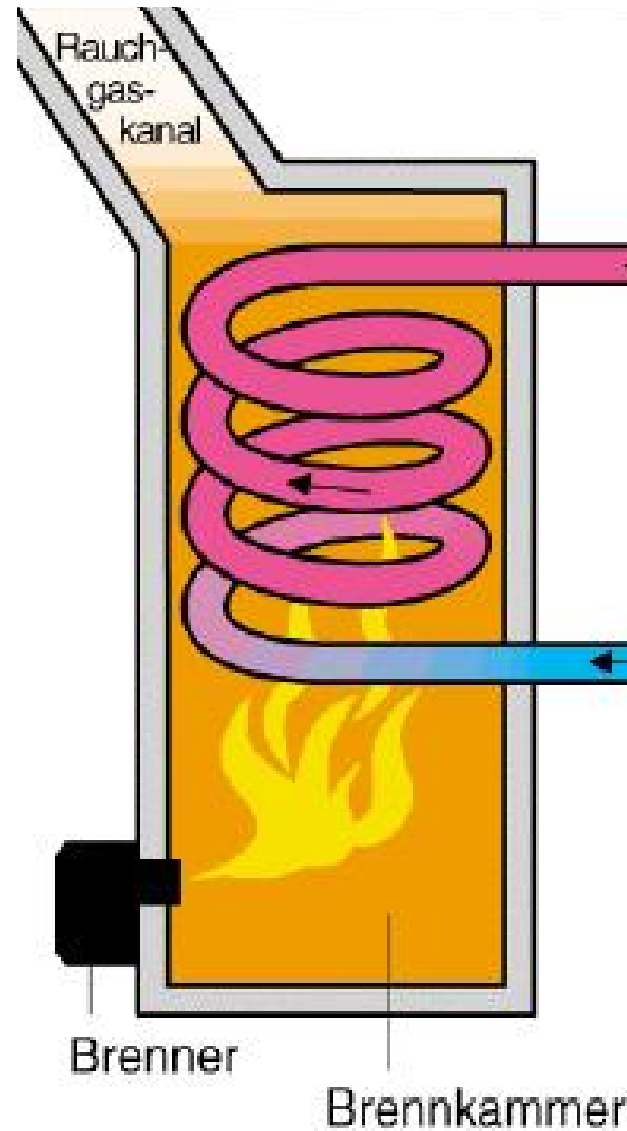
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

Institut für Energietechnik, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

# Verbrennung und Dampferzeugung

- universitäres Fernstudium -

Dampferzeuger



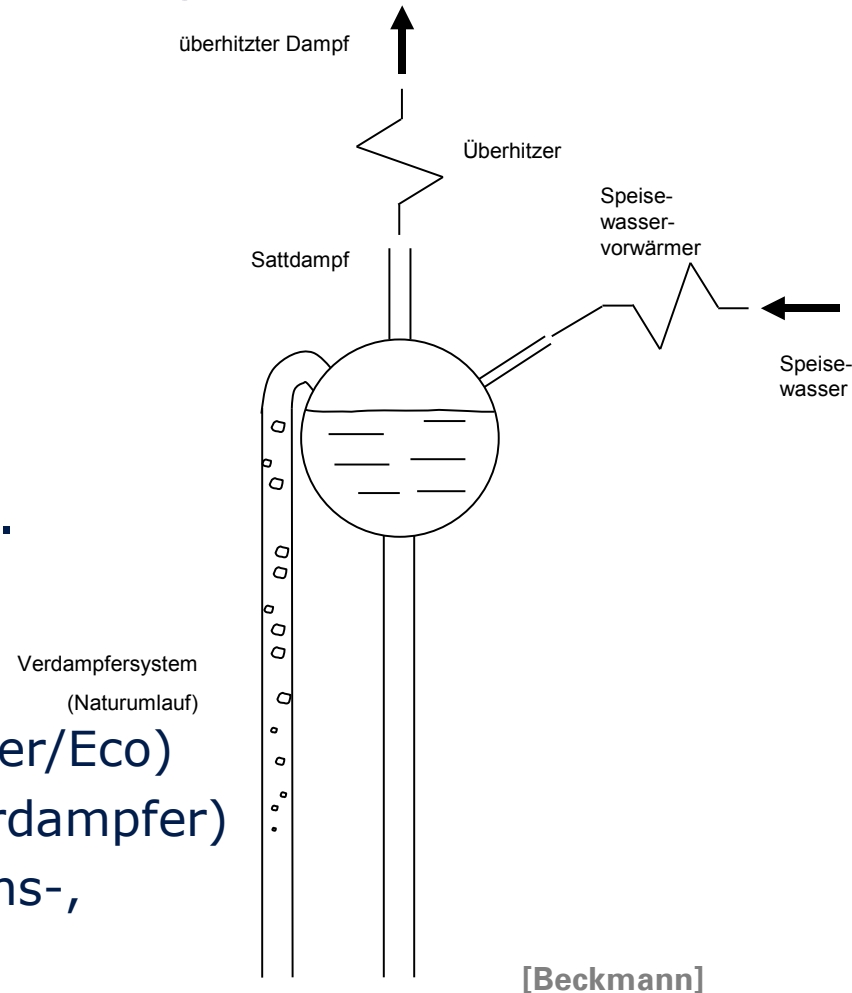
### 3 wesentliche Verfahrensschritte:

1. Speisewasservorwärmung
2. Verdampfung
3. Überhitzung (meist mehrstufig)

Wärmeübertragung vom Rauchgas an Wasser/Dampf in den Heizflächen durch Strahlung und/oder Konvektion.

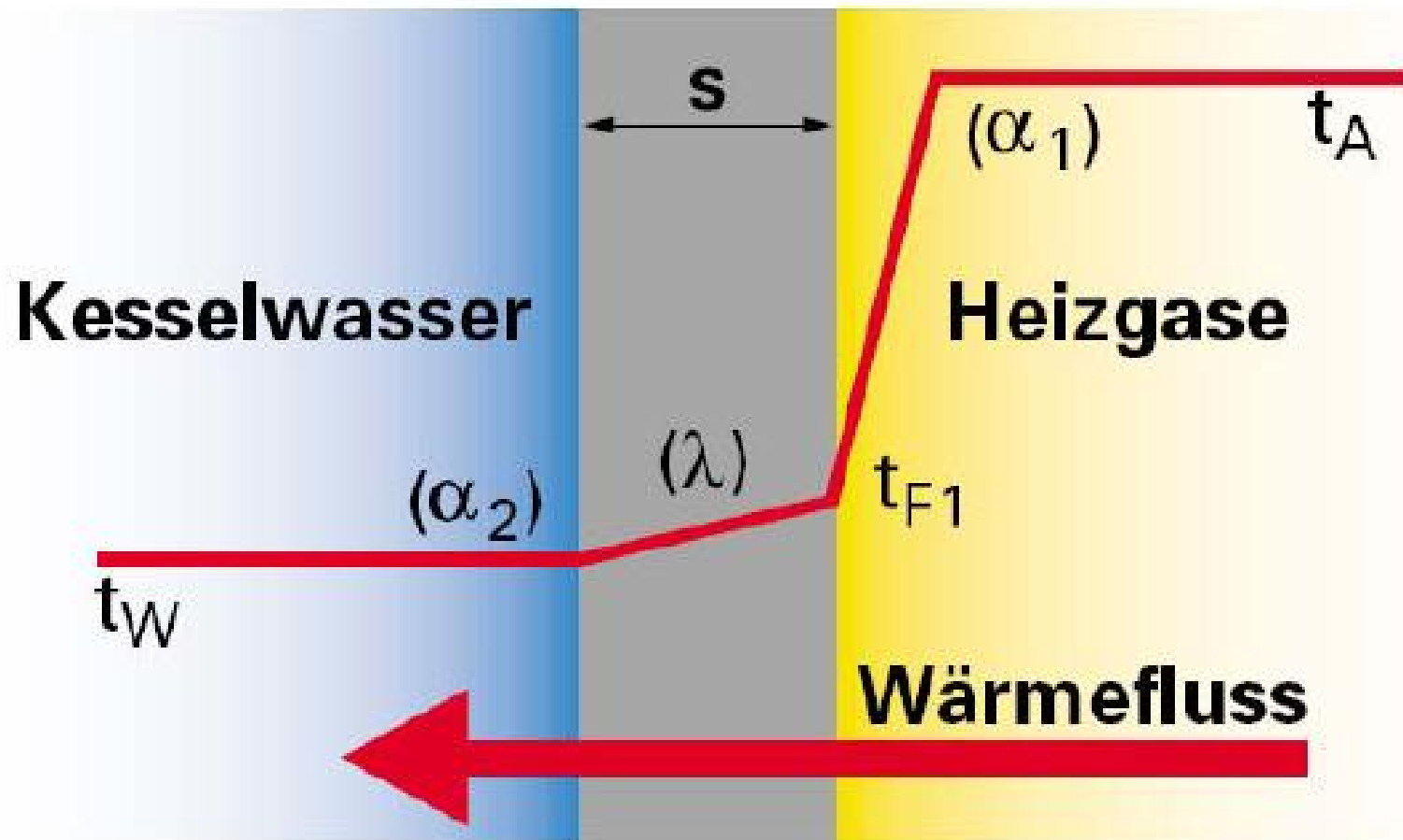
### Heizflächenarten:

1. Speisewasservorwärmer (Economiser/Eco)
2. Verdampfer (Wand- oder Bündelverdampfer)
3. Überhitzer (Strahlungs-, Konvektions-, Schottüberhitzer)



# - Wärmübertragung im Dampferzeuger -

# Wärmefluss durch eine Kesselwand

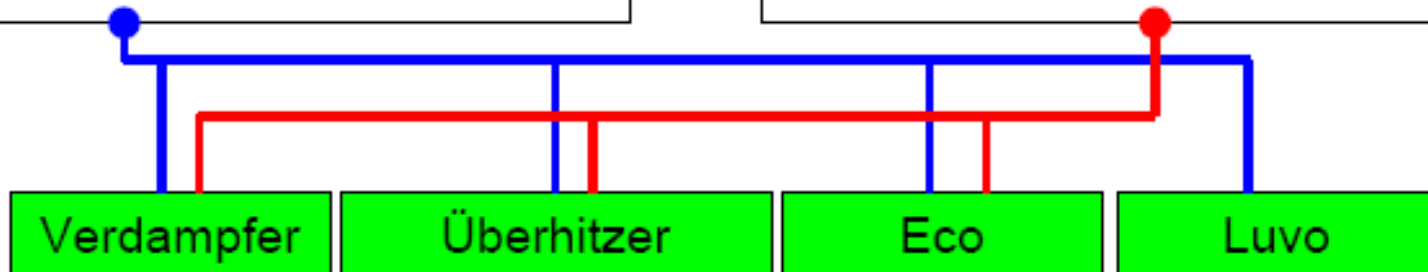


## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

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

Wärmeübertragung  
durch Konvektion

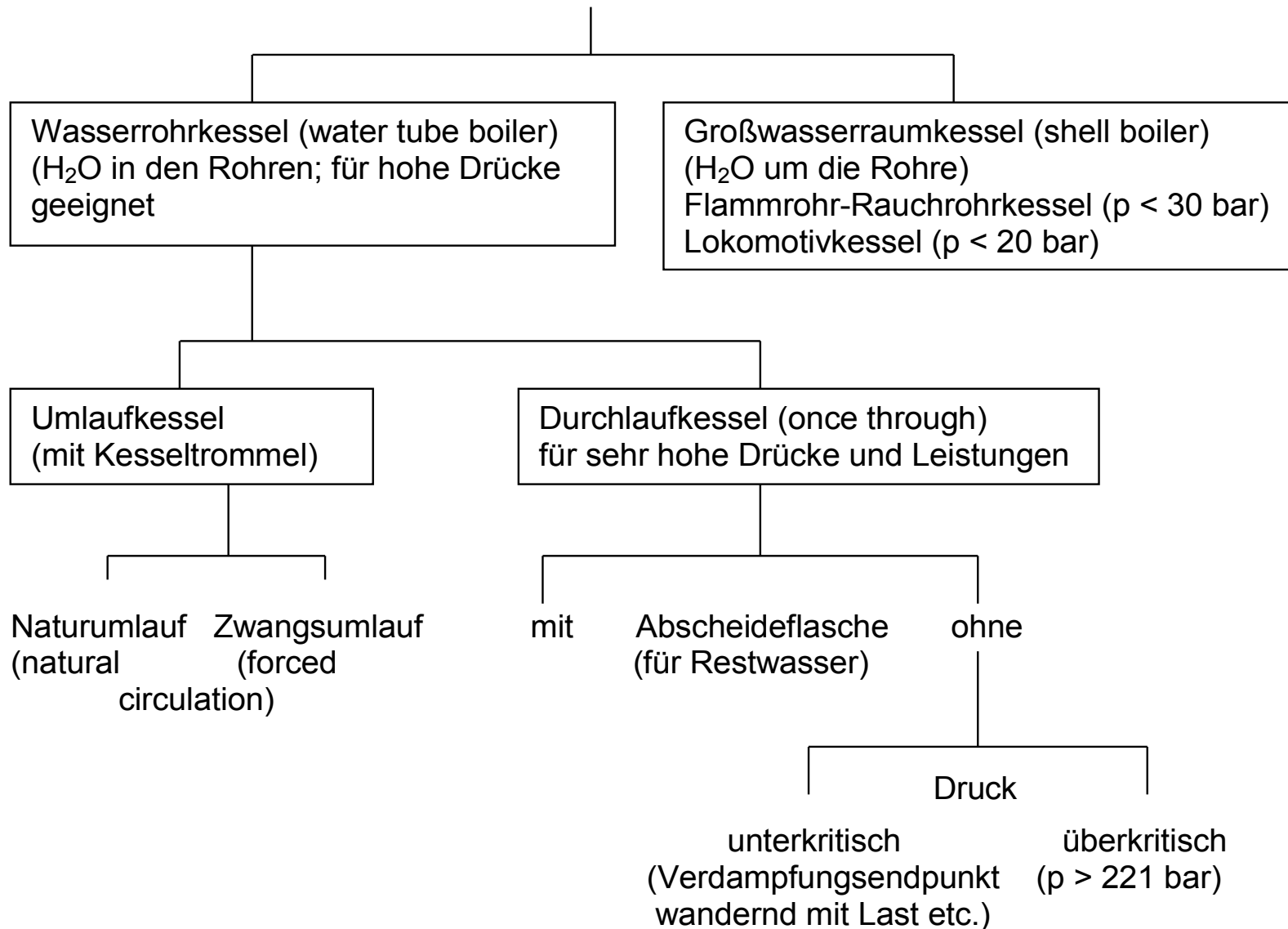
Wärmeübertragung  
durch Strahlung



# - Dampferzeugerbauarten -



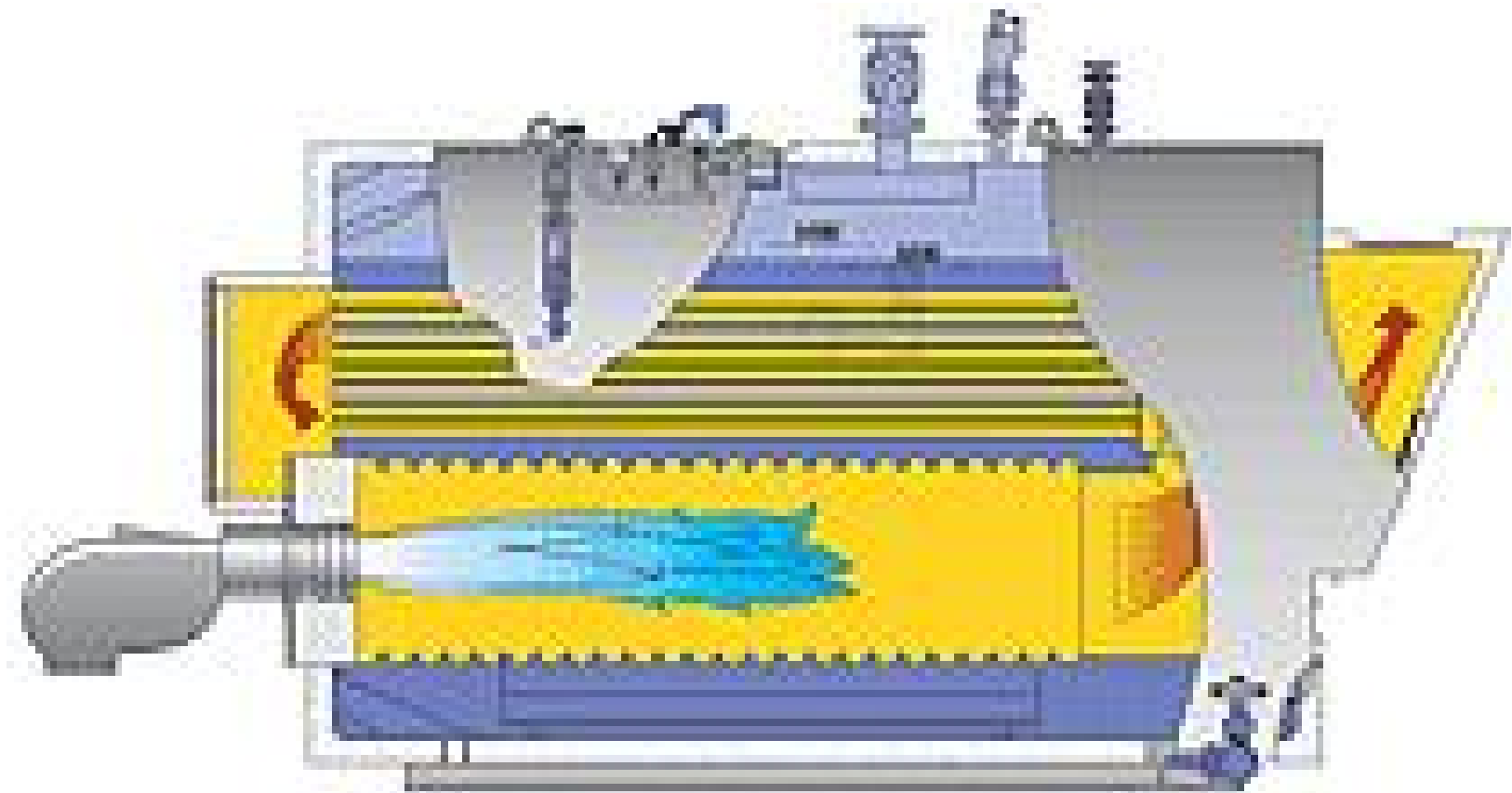
# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



# Großwasserraumkessel

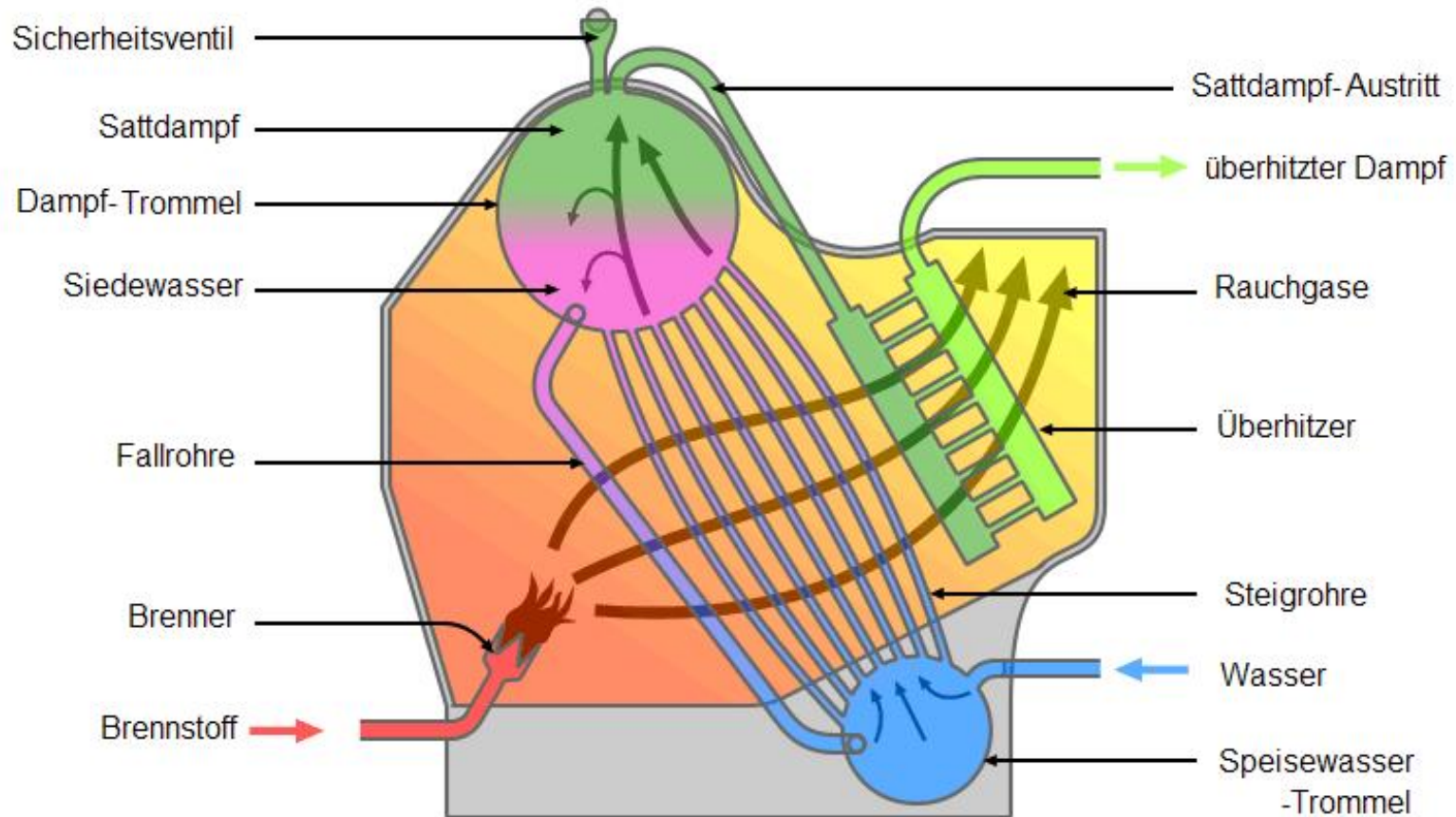
**Dampfdrücke: bis 32 bar, Leistung bis ca. 20 MW**

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



# - Wasserrohrkessel -

# Prinzip

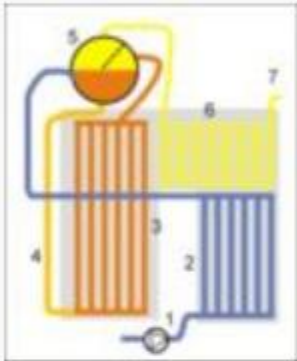


[www.wikipedia.de]

Kriterium	Großwasserraumkessel	Wasserrohrkessel
Wasserqualität	geringere Anforderungen, salzhaltige Fahrweise möglich	hohe Anforderungen, salzfreie Fahrweise für die meisten Bauformen erforderlich
Wartung	einfache Reinigung	aufwendiger
wiederkehrende Prüfungen	einfach, Besichtigung nach hoher Wasserdruckprobe  weitergehende, zerstörungsfreie Prüfungen wie zum Beispiel Ultraschall selten und in geringem Umfang	zusätzlich zur Wasserdruckprobe Ultraschall oder ähnliches  unvermeidbar; entsprechend hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand
Kosten bei vergleichbarem Niveau der Herstellkosten und Qualität	niedriger	höher

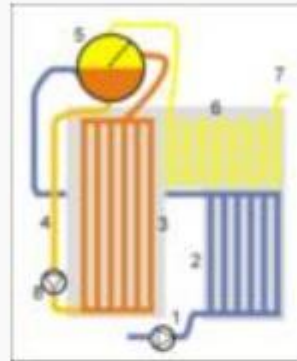
Kriterium	Großwasserraumkessel	Wasserrohrkessel
Teillastverhalten	Regelbereich der Feuerung kann ausgenutzt werden bei Unterschreitung Mindestlast Brenner problemlos abschaltbar	Teillast muss bei gewissen Bauformen begrenzt werden, Brenner kann nicht ohne weiteres abgeschaltet werden
Wasserinhalt	prinzipbedingt höher	niedriger
Speichervermögen	aufgrund des hohen Wasservolumens robust gegen Druck- und Lastschwankungen	empfindlich gegen prozessseitige Last- und Druckschwankungen
Lieferzeit	kürzer	länger
Platzbedarf	niedrig	hoch
Zeit für Aufstellung, Erstinbetriebnahme	kurz	länger

# Bauformen



**Naturumlaufkessel**

- 1 SPW-Pumpe
- 2 SPW-Vorwärmer
- 3 Verdampfer
- 4 Fallrohre
- 5 Trommel
- 6 Überhitzer
- 7 zur Turbine



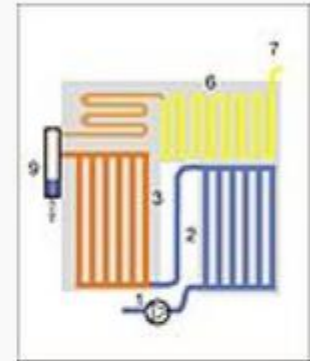
**Zwangumlaufkessel**

- 1 SPW-Pumpe
- 2 SPW-Vorwärmer
- 3 Verdampfer
- 4 Fallrohre
- 5 Trommel
- 6 Überhitzer
- 7 zur Turbine
- 8 Umwälzpumpe



**Zwangdurchlaufkessel**

- Bauart: Bensonkessel**
- 1 SPW-Pumpe
  - 2 SPW-Vorwärmer
  - 3 Verdampfer
  - 6 Überhitzer
  - 7 zur Turbine



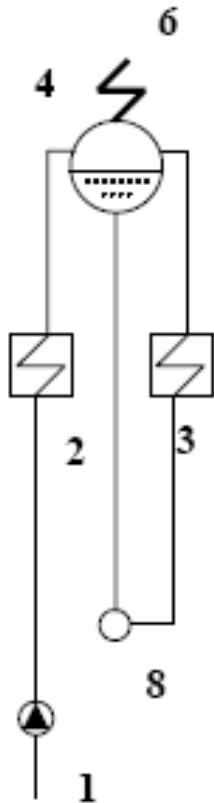
**Zwangdurchlaufkessel**

- Bauart: Sulzerkessel**
- 1 SPW-Pumpe
  - 2 SPW-Vorwärmer
  - 3 Verdampfer
  - 6 Überhitzer
  - 7 zur Turbine
  - 9 Wasser-Abscheider

# Dampferzeuger-Systeme

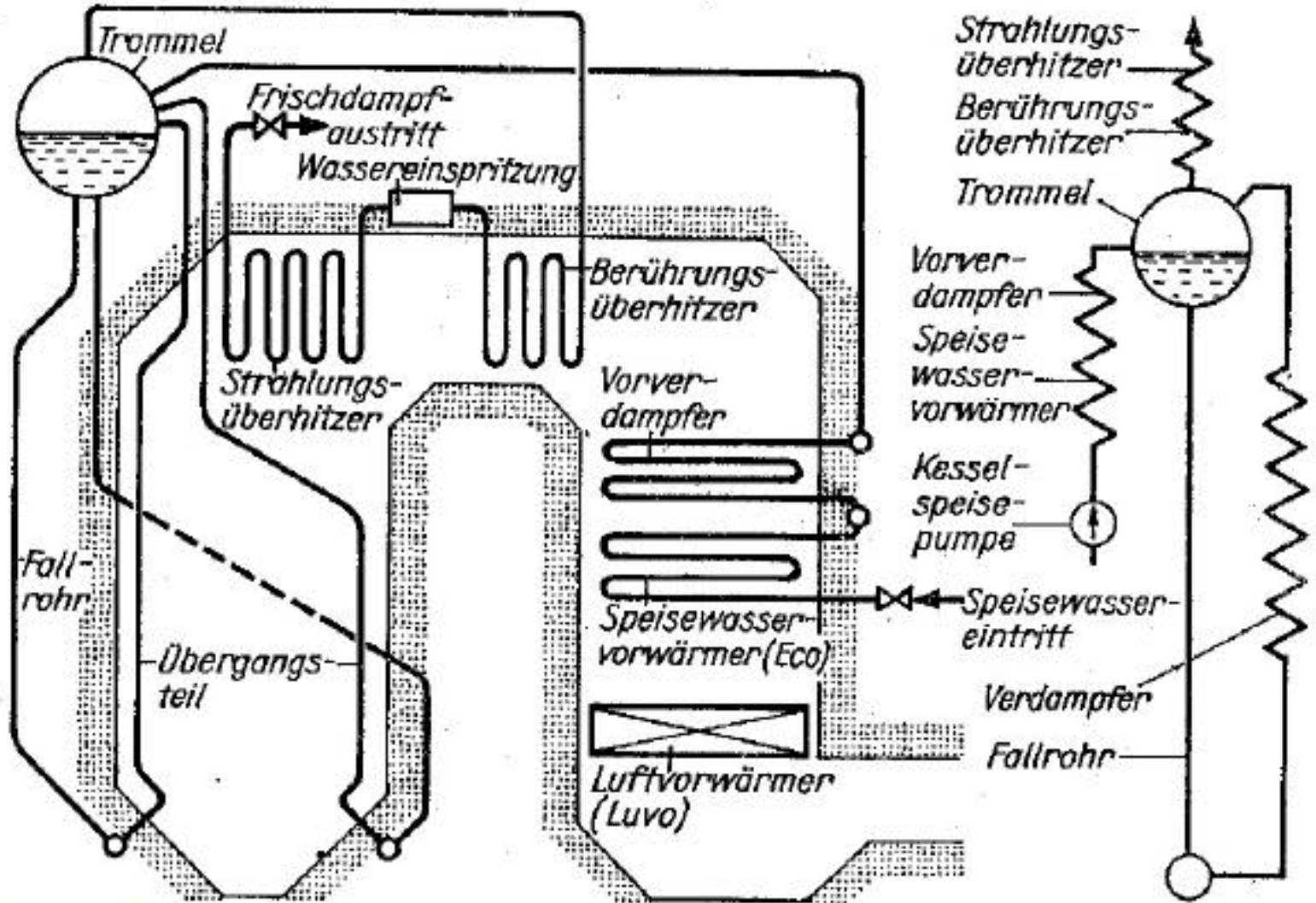
## Naturumlauf

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



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



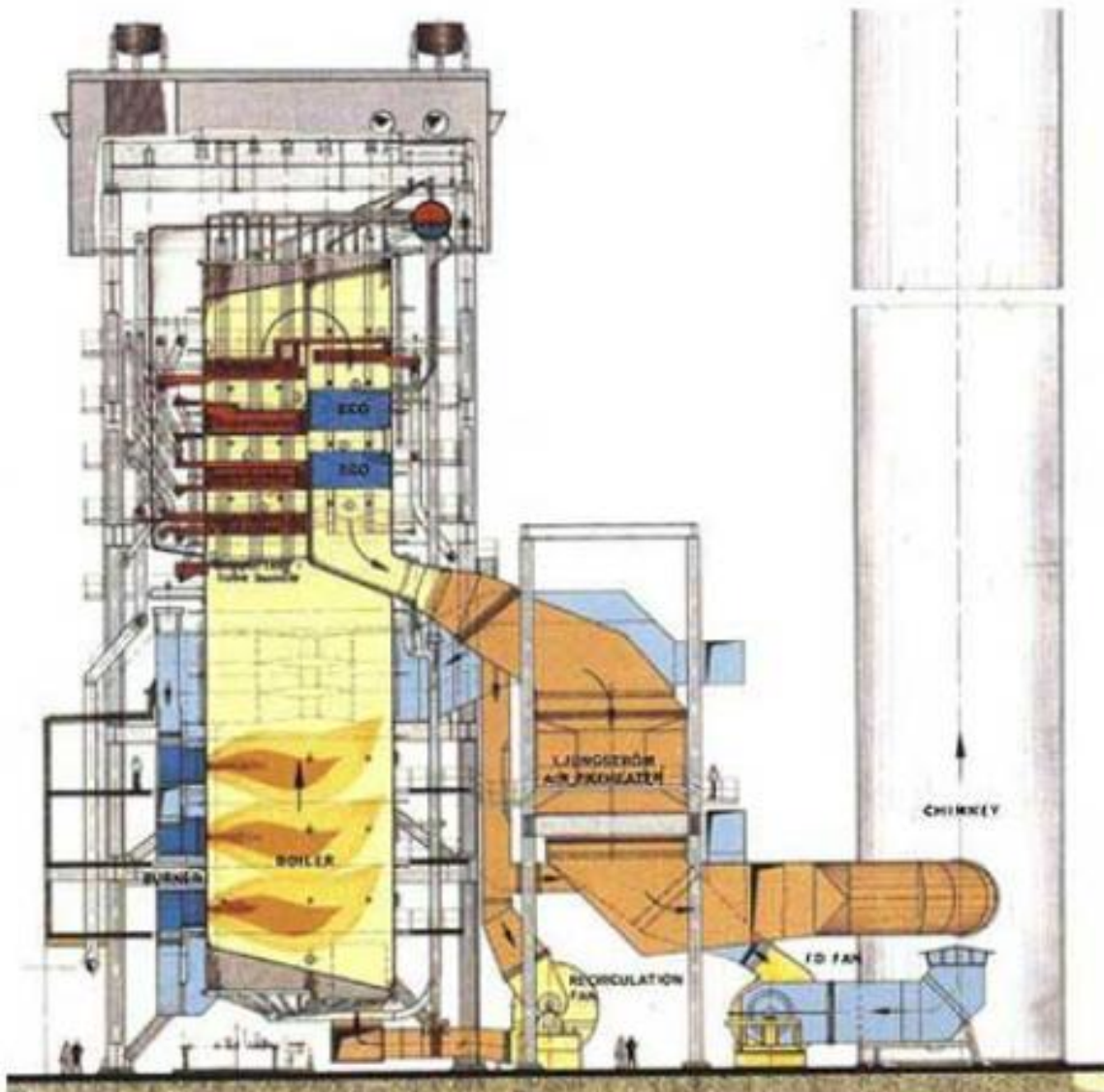


# Naturumlauf

## Naturumlaufkessel

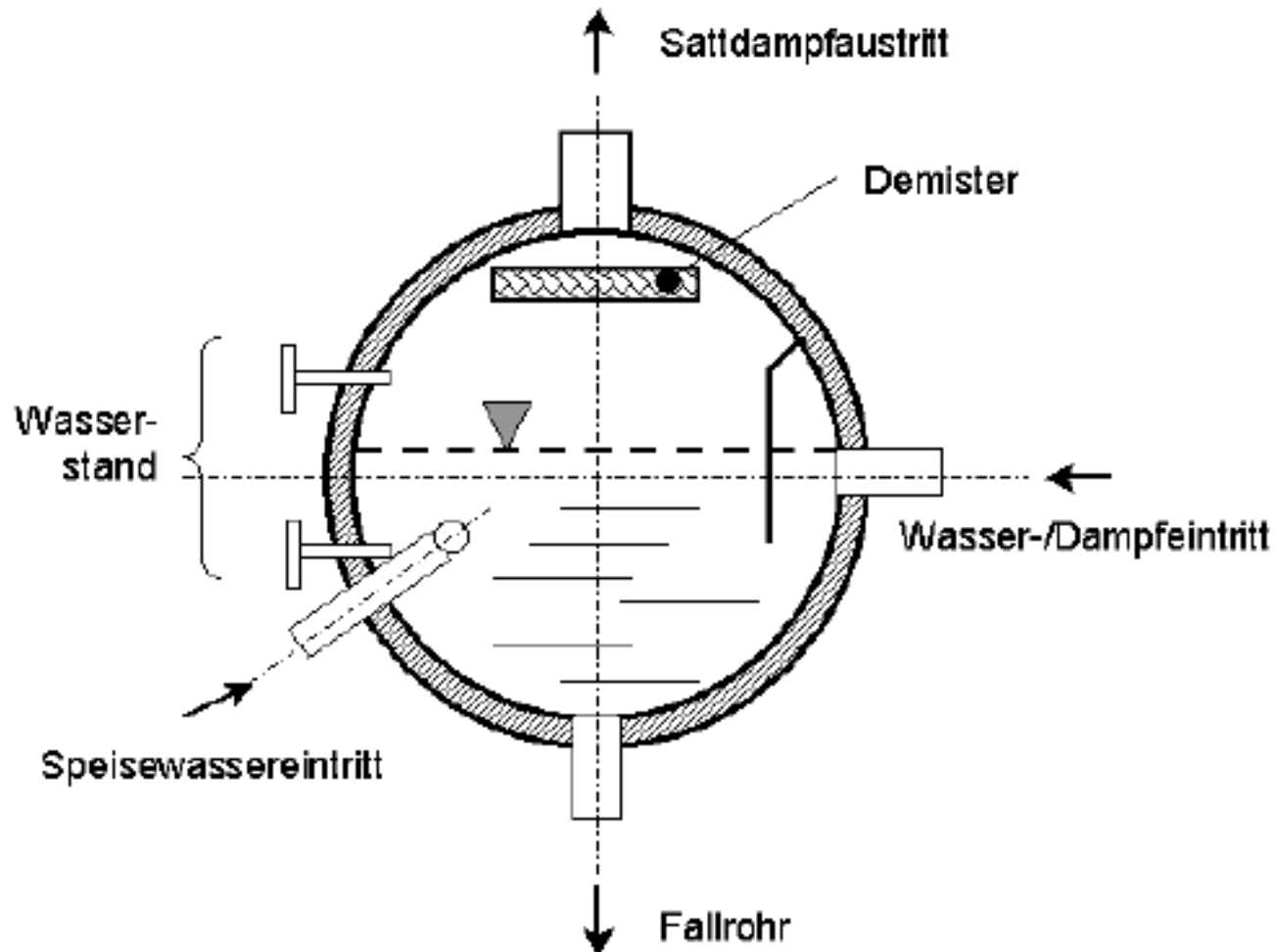
Brennstoffe:  
Stein- und Braunkohle,  
Öl; Gas

Leistungsbereich:  
ca. 250 - 700 t/h



AUSTRIAN ENERGY  
& ENVIRONMENT

# 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**

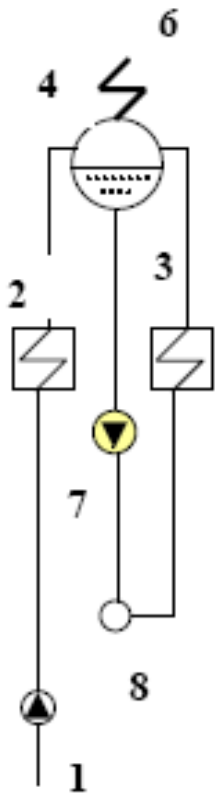
## **Nachteile:**

- **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

2 Speisewasservorwärmer

3 Verdampfer

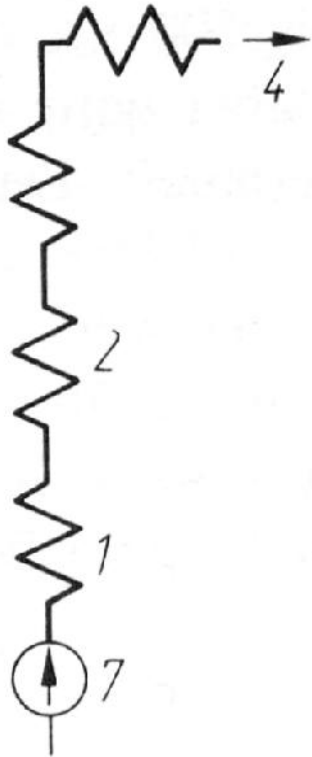
4 Kesseltrommel

5 Trenngefäß

6 Überhitzer

7 Umwälzpumpe

8 Sammler/Mischpunkt

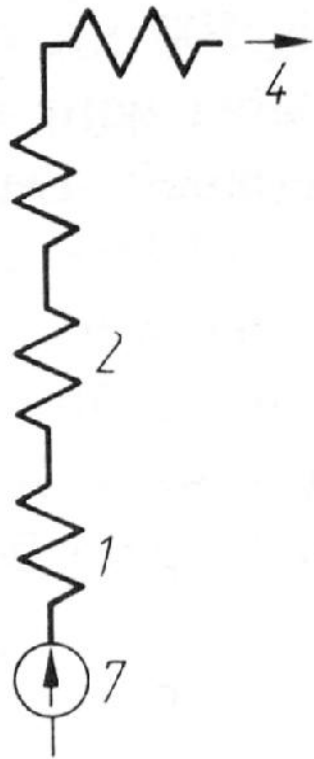


## Dampferzeuger-Systeme

### 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.





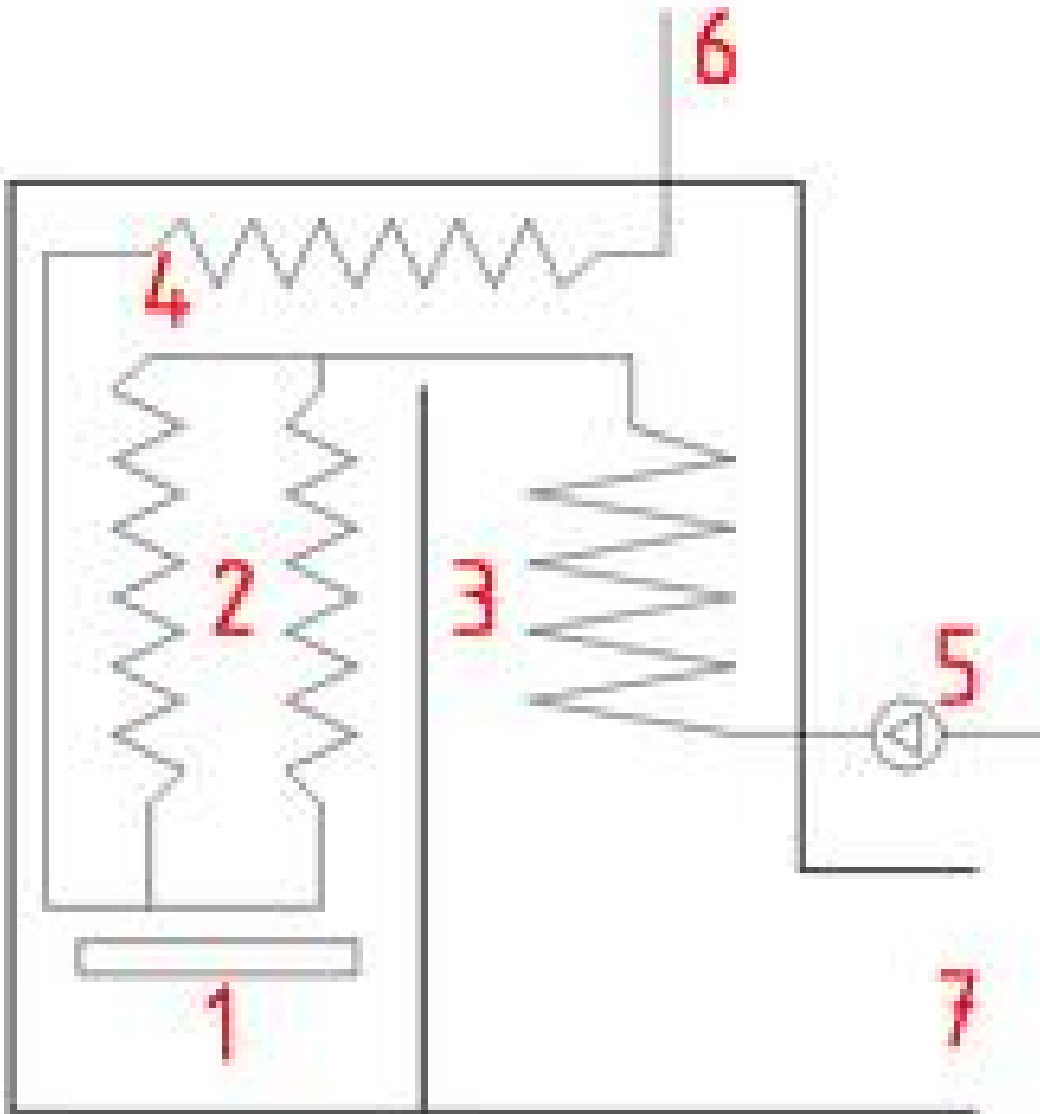
## Dampferzeuger-Systeme

### 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



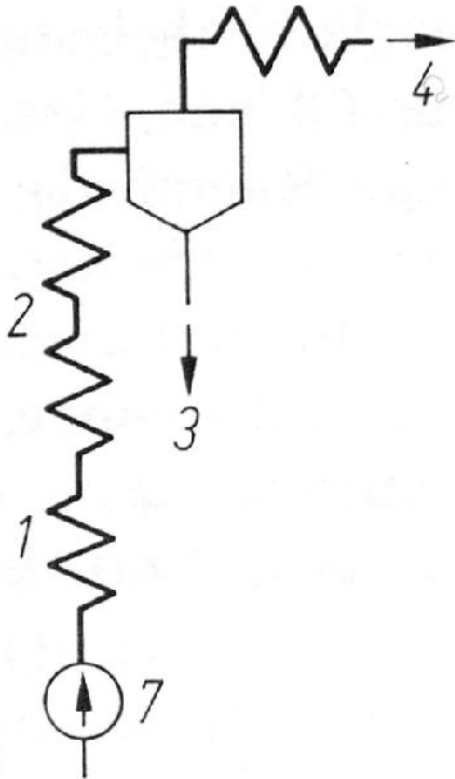
- ## Bensonkessel
- 1-Feuerung
  - 2-Verdampferrohre
  - 3-Vorwärmer
  - 4-Überhitzer
  - 5-Speisepumpe
  - 6-Dampfaustritt
  - 7-Abgas

# Dampferzeuger-Systeme

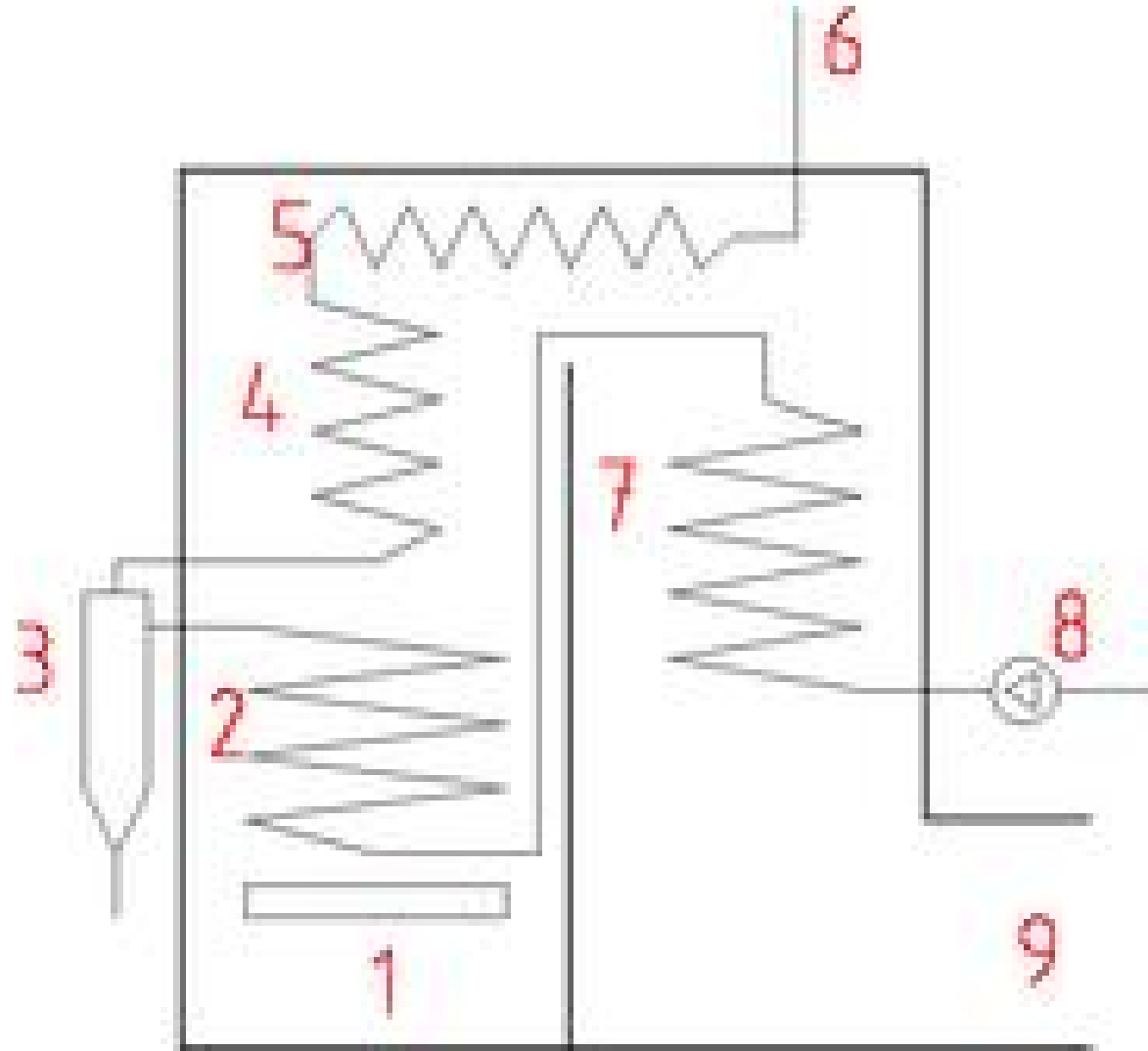
## Zwangsdurchlauf

mit festem Verdampfungspunkt

Wasserstand wird in einem Trenngefäß  
geregelt und örtlich fixiert.



1 Speisewasservorwärmer, 2 Verdampfer, 3 Entspanner, 4 Überhit-  
zer, 5 Fallrohr, 6 Steigrohr, 7 Speisewasserpumpe



## Sulzerkessel

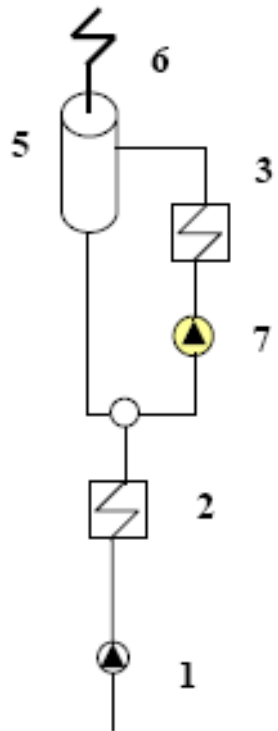
- 1-Feuerung
- 2-Verdampferrohre
- 3-Wasserabscheider
- 4-Nachverdampfer
- 5-Überhitzer
- 6-Dampfaustritt
- 7-Vorwärmung
- 8-Speisepumpe
- 9-Abgas

# Dampferzeuger-Systeme

## Zwangdurchlauf

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

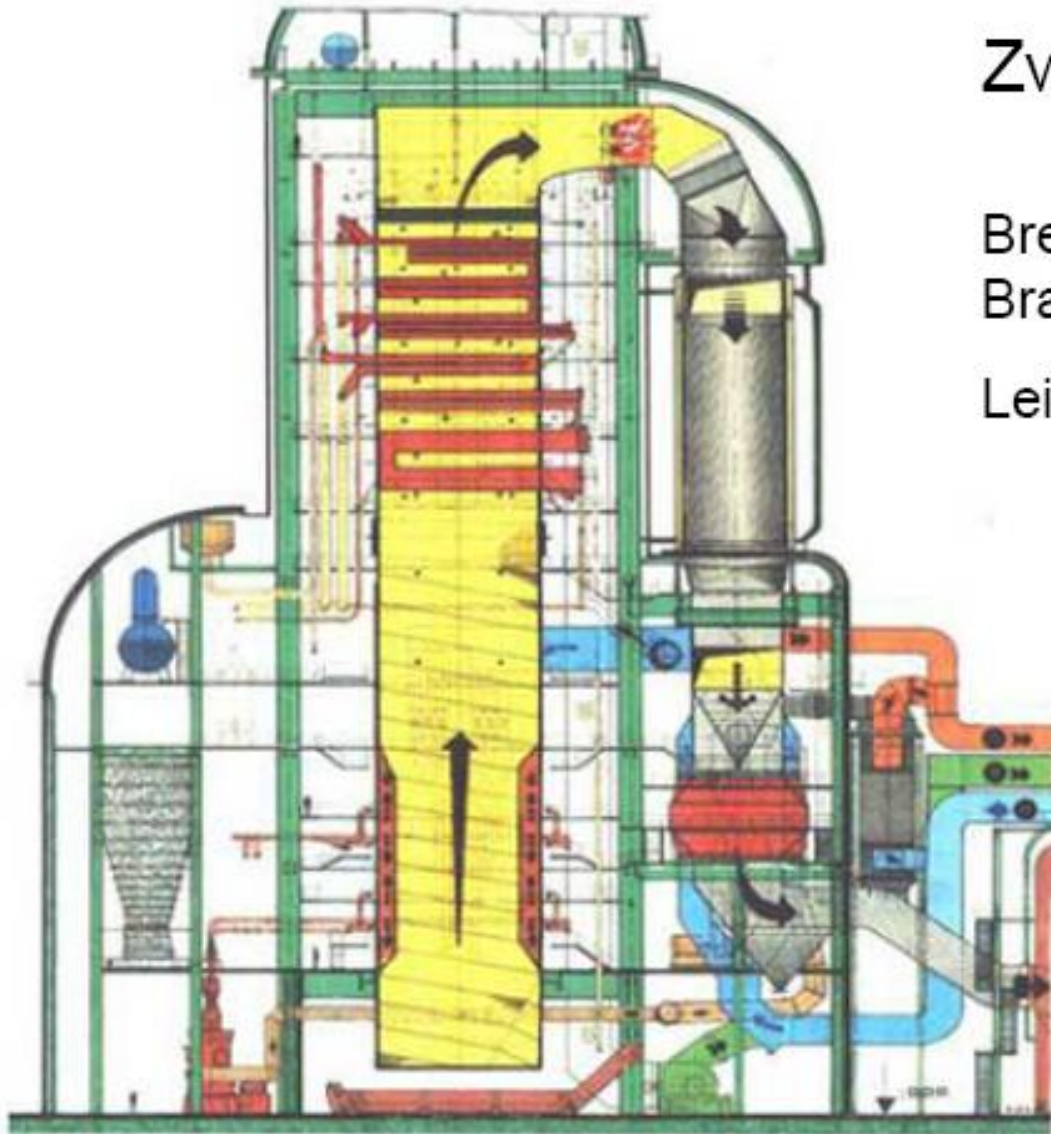
2 Speisewasservorwärmer

5 Trenngefäß

8 Sammler/Mischpunkt

3 Verdampfer

6 Überhitzer



## Zwangsdurchlaufkessel

Brennstoffe: Stein- und Braunkohle, Öl, Gas

Leistungsbereich: 400 - 1500 t/h



# **Vor- und Nachteile der Zwangsdurchlaufkessel**

## **Vorteile:**

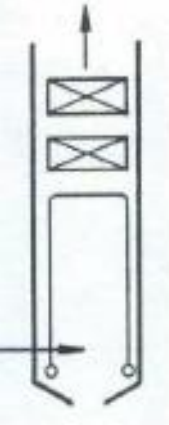
- hohe Dampfparameter**
- überkritischer Betrieb möglich**
- kleine Rohrdurchmesser**
- freizügige Rohrverlegung**
- keine Trommel und keine Fallrohre**
- Verdampfungsanteil bis 100 %**

## **Nachteile:**

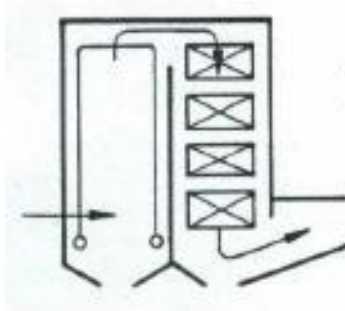
- **kein selbsttätiges System**
- **nur für sehr hochwertiges Speisewasser**
- **große Speisewasserpumpe erforderlich**
- **eingeschränkt in Teillastfähigkeit**
- **spezielle Einrichtung für das Anfahren erforderlich**
- **komplex in Aufbau und Bedienung**
- **nicht eigensicher (spezielle Notfalleinrichtung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



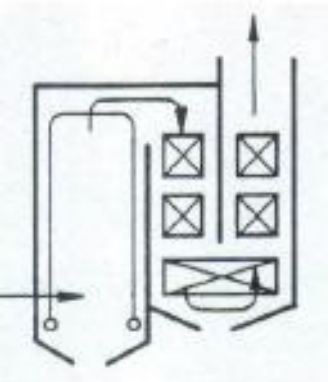
# Anordnung der Kesselzüge und Heizflächen



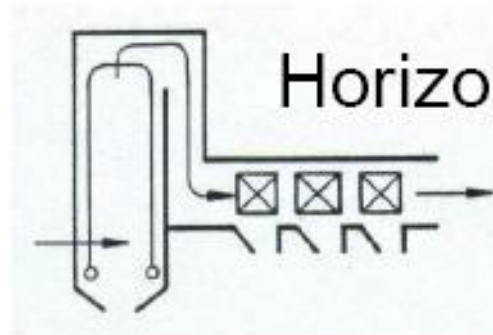
**Einzug-Kessel  
(Turmkessel)**



**Zweizug-Kessel**



**Dreizug-Kessel**



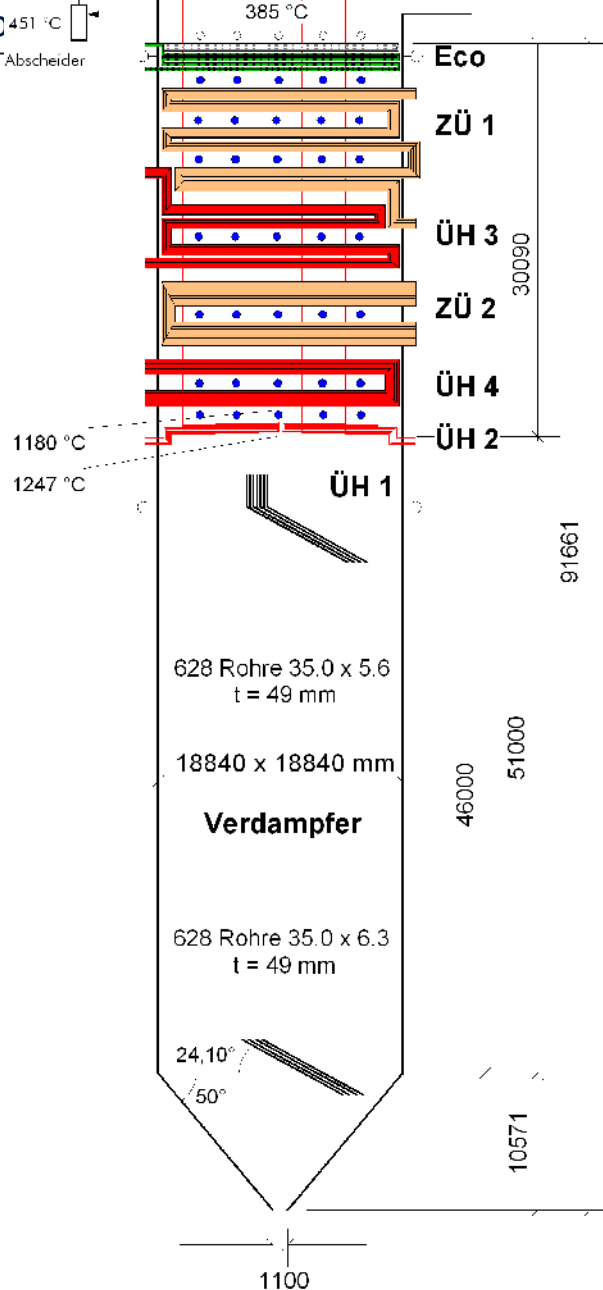
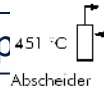
**Horizontalzug-Kessel**



**Strahlungsheizfläche**



**Berührungsheizfläche**



# Übliche Positionen der Heizflächen

Quelle: EnBW

# Übliche Positionierung der Heizflächen

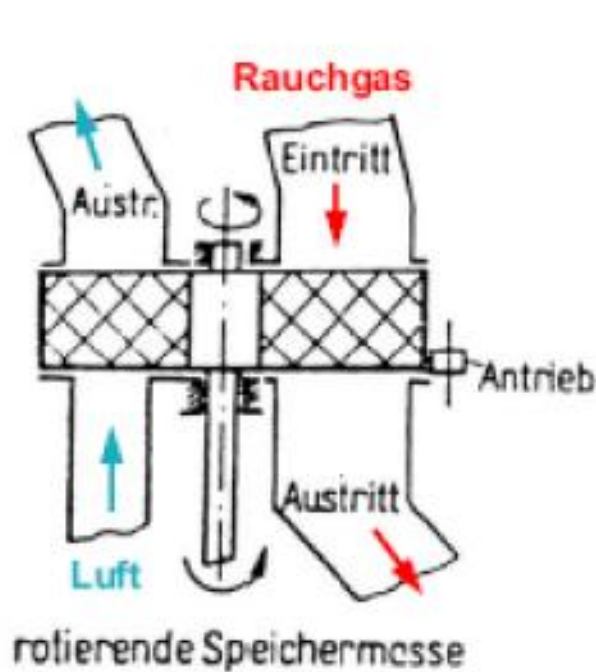
## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Heizfläche	Bemerkungen
Economiser	Letzte und „am kältesten liegende“ Kesselheizfläche, daher Speisewasservorwärmer
Verdampfer	Immer als Brennkammerwand, denn Verdampfungsprozess besitzt höchsten Wärmebedarf und die Brennkammeraustrittstemperatur der Rauchgase soll niedrig liegen
Überhitzer 1	Als Wandheizfläche oberhalb des Verdampfers
Überhitzer 2	Tragrohre für alle anderen Heizflächen, münden später in die Schottheizfläche. Schott: bestgekühlter Überhitzer, daher direkt nach dem Brennkammerende angeordnet.
Überhitzer 3	Vergleichsweise weit hinten im Rauchgasweg angeordnet
Überhitzer 4	Endüberhitzer, durch Schottheizfläche geschützt
Zwischenüberhitzer 1	Anordnung vor Economiser, nur geringe Grädigkeit zum RG
Zwischenüberhitzer 2	Anordnung nach Überhitzer 4, wegen Materialtemperaturen

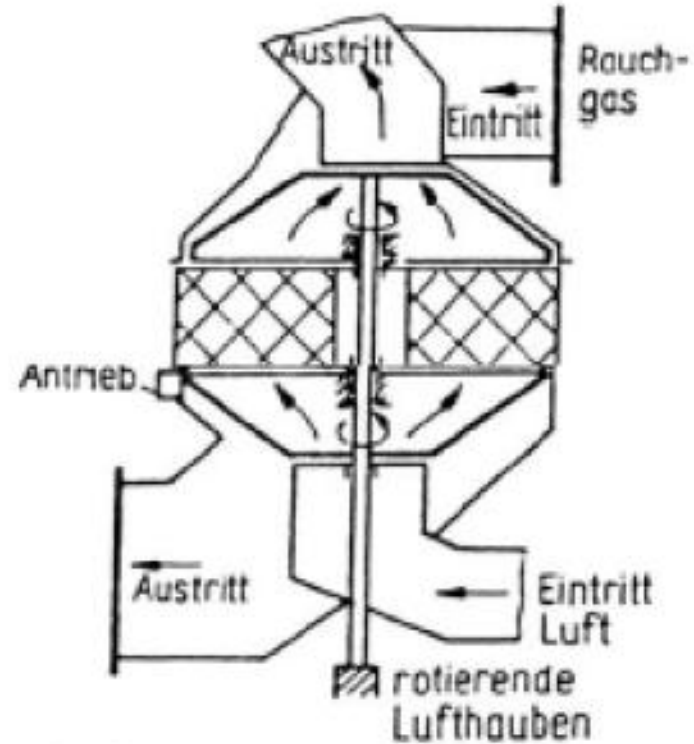
[Beckmann]

# - Dampferzeuger Bauteile-

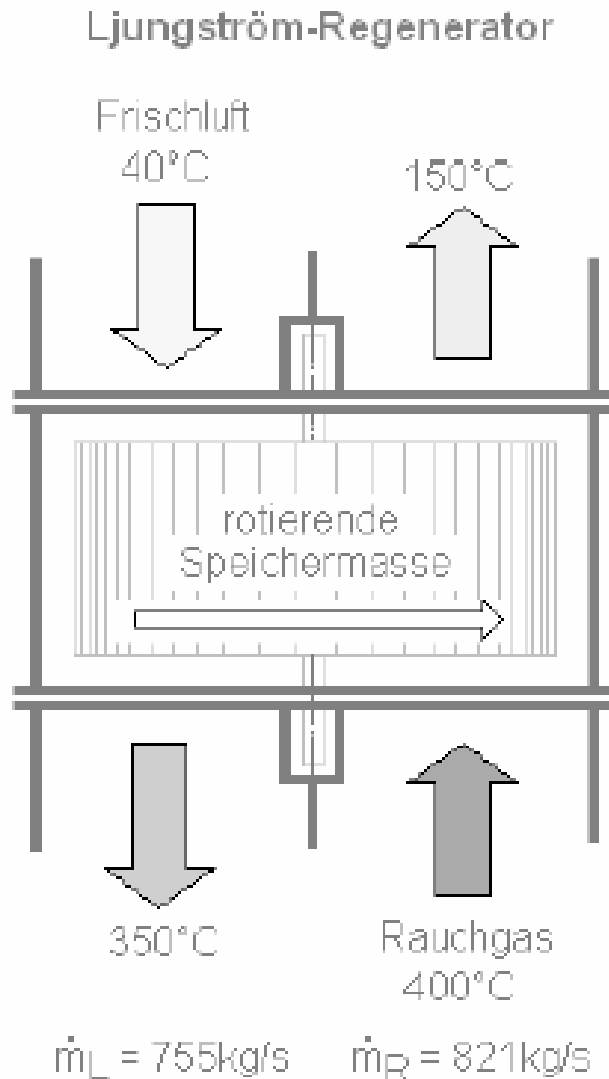
## Regenerativ- Luftvorwärmer



Rotierender  
Heizflächenträger

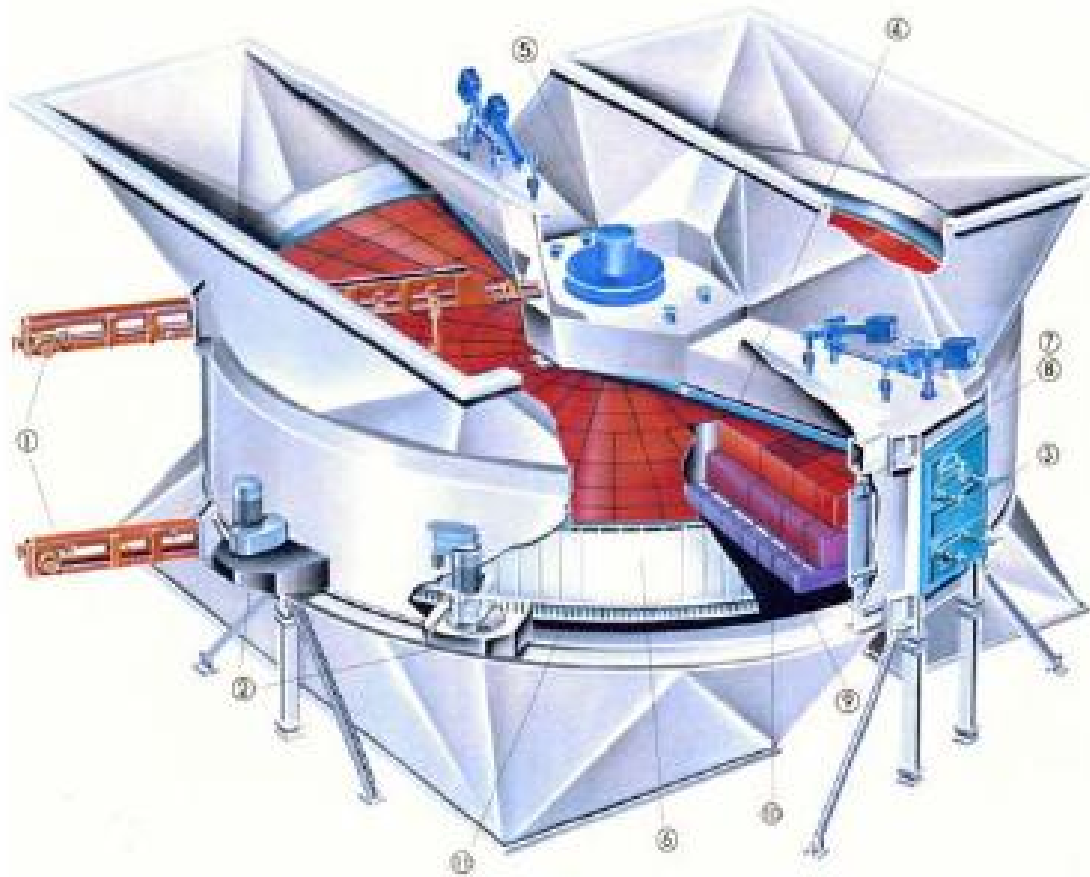


Feststehender  
Heizflächenträger



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



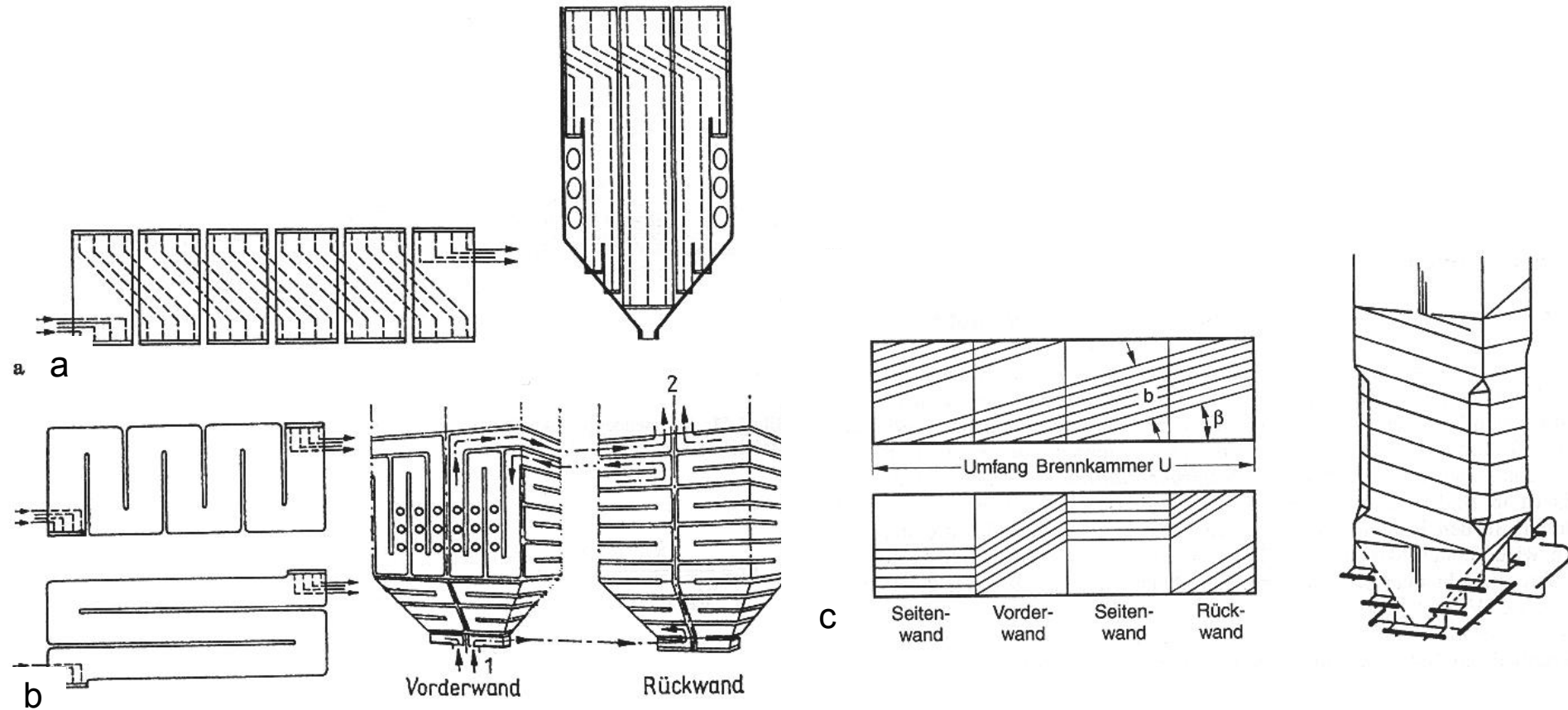
## Speisewasservorwärmung

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)



## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



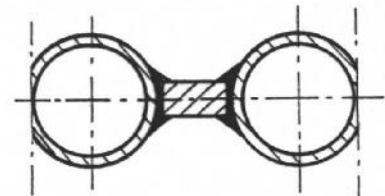
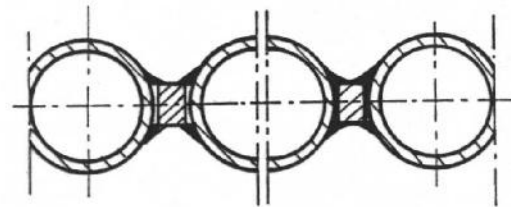
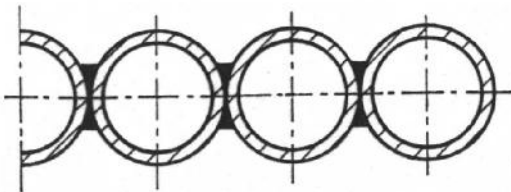
Durchlaufverdampferausführungen:

- a) Steigrohr-Fallrohr-Verdampfer mit Unterteilung der unteren Sammler
- b) Mäanderband-Verdampfer in vertikaler und horizontaler Anordnung
- c) Schraubenband-Verdampfer, durchgehend und gestuft, Ausführung der Umfassungswände

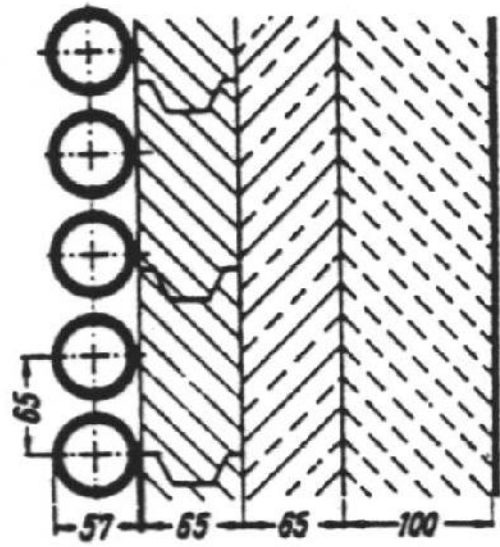
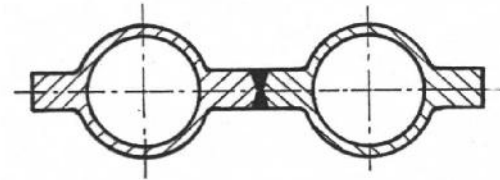
[Beckmann]

# Ausführungsarten der Wandberohrung

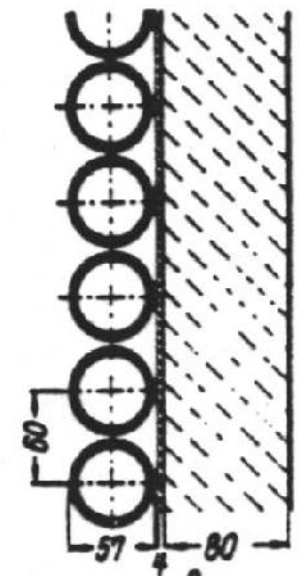
Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



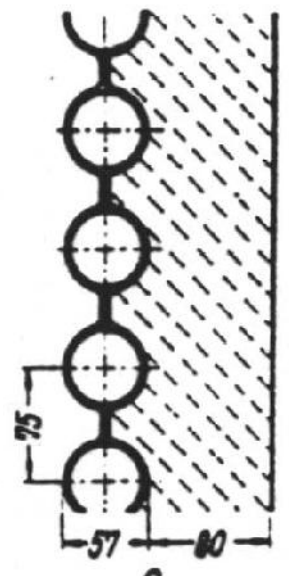
gängigster Fall



Schamottenausmauerung  
Mit Mineralwollesteinen und  
Mineralwolle-Isolierung



Gasdicht verschweißte  
Blechwand mit Mineral-  
Wolle-Isolierung



[Beckmann]

Flossen- oder Membran-  
Wand mit Mineralwolle-  
Isolierung

## 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.

## Unterteilung in:

- **Strahlungsüberhitzer**
- **Konvektionsüberhitzer / Berührungsüberhitzer**

**(Unterscheidung nach dominierender Art der Wärmeübertragung)**

### Strahlungsüberhitzer

- **im Bereich nach der Brennkammer**
- **oft als sgn. Schottheizflächen ausgeführt**  
→ **breite Rauchgasspalten zwischen wandartigen Rohranordnungen**

### Konvektionsüberhitzer

- **Rohrbündelkonstruktionen mit relativ geringen Teilungen je nach RG-Strömungsgeschwindigkeit.**
- **Versetzte oder fluchtende Rohranordnung**

[Beckmann]

# Überhitzer

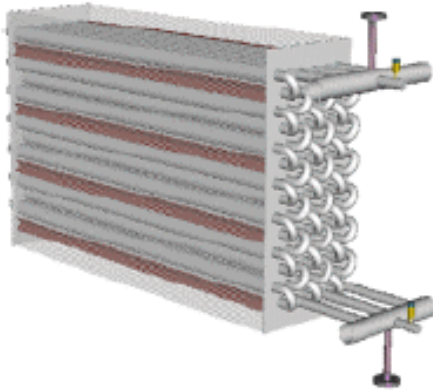
Die Überhitzer-Heizflächen werden nach der Art der Wärmeübertragung eingeteilt

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.



## Berührungs- Überhitzer (Anhaltswahlen)

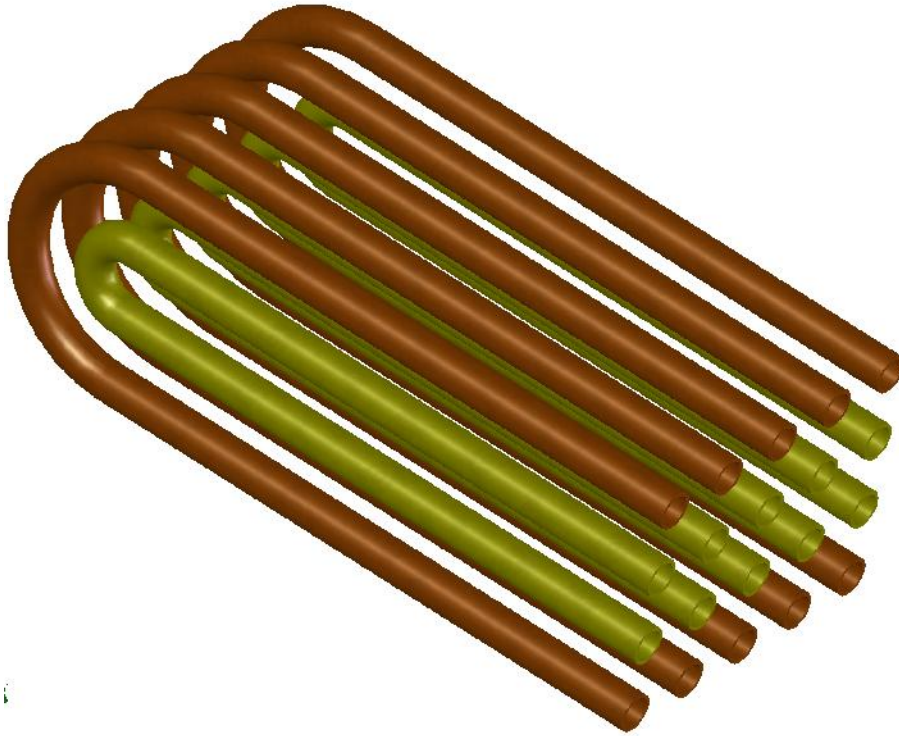
Dampfgeschwindigkeit	12 ... 22 m/s
Druckverlust im Überhitzer	maximal 8 % des Genehmigungs-Druckes
Rauchgastemperatur	600 ... 1000 °C
Rauchgasgeschwindigkeit	6 ... 10 m/s
Zugverlust	5 ... 15 mm WS
Wärmeübergangszahl, rauchgasseitig	40 ... 60 kcal/m <sup>2</sup> h K
Wärmeübergangszahl, dampfseitig	800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



- **Rohrbündelheizfläche mit geringster Querteilung, da im niedrigen RG-Temperaturbereich.**
- **Oftmals mit Rippen zur Verbesserung des Wärmeübergangs**

[Beckmann]



### Erläuterung der Skizze

Rohre nebeneinander:	= 5
Rohre übereinander:	= 4
Anzahl paralleler Rohre:	$2 \times 5 = 10$
Anzahl Rohre im Bündel:	$4 \times 5 = 20$

### Richtwerte

Bündelhöhe	< 2 m
Bündelabstand	1,5 m
RG-Geschwindigkeit (Kohlefeuerung)	< 9 m/s

**Heizflächenbündel sind üblicherweise an senkrecht verlaufenden Tragrohren aufgehangen, welche dampfgekühlt sind und in die Schottheizfläche münden.** [Beckmann]

# Rohrdurchmesser und Durchströmungskennwerte

Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Heizfläche	$d_a$	Durchströmung
Economiser	31,8 mm	1,5 – 2 m/s
Zwischenüberhitzer, kälter liegend	31,8 – 48,3 mm	10 – 12 m/s
Überhitzer, kälter liegend	38,0 – 42,4 mm	8 – 10 m/s
Zwischenüberhitzer, heißer liegend	48,3 – 51,0 mm	20 – 25 m/s
Überhitzer, heißer liegend	38,0 mm	15 – 17 m/s
Tragrohrschott	31,8 – 38,0 mm	12 – 15 m/s
Verdampfer	33,7 – 38,0 mm	2000 – 2400 kg/m <sup>2</sup> s

Übliche Außendurchmesser: 26,9 / 31,8 / 33,7 / 38,0 / 42,4 / 48,3 / 51,0 mm

[Beckmann]

# Übliche Aufwärmspannen in Heizflächen

Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Heizfläche	Richtwerte für Aufwärmspanne
Economiser	10 – 60 K
Zwischenüberhitzer 1. Stufe	120 – 190 K
Vorüberhitzer	35 – 80 K
Zwischenüberhitzer 2. Stufe	80 – 85 K
Endüberhitzer	40 – 50 K
Tragrohrschott	10 – 50 K

[Beckmann]

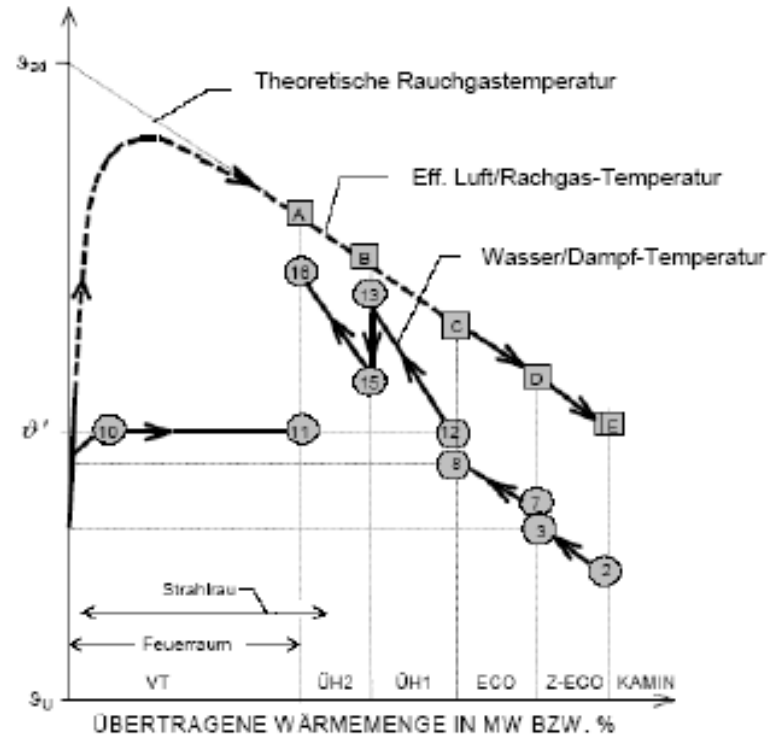
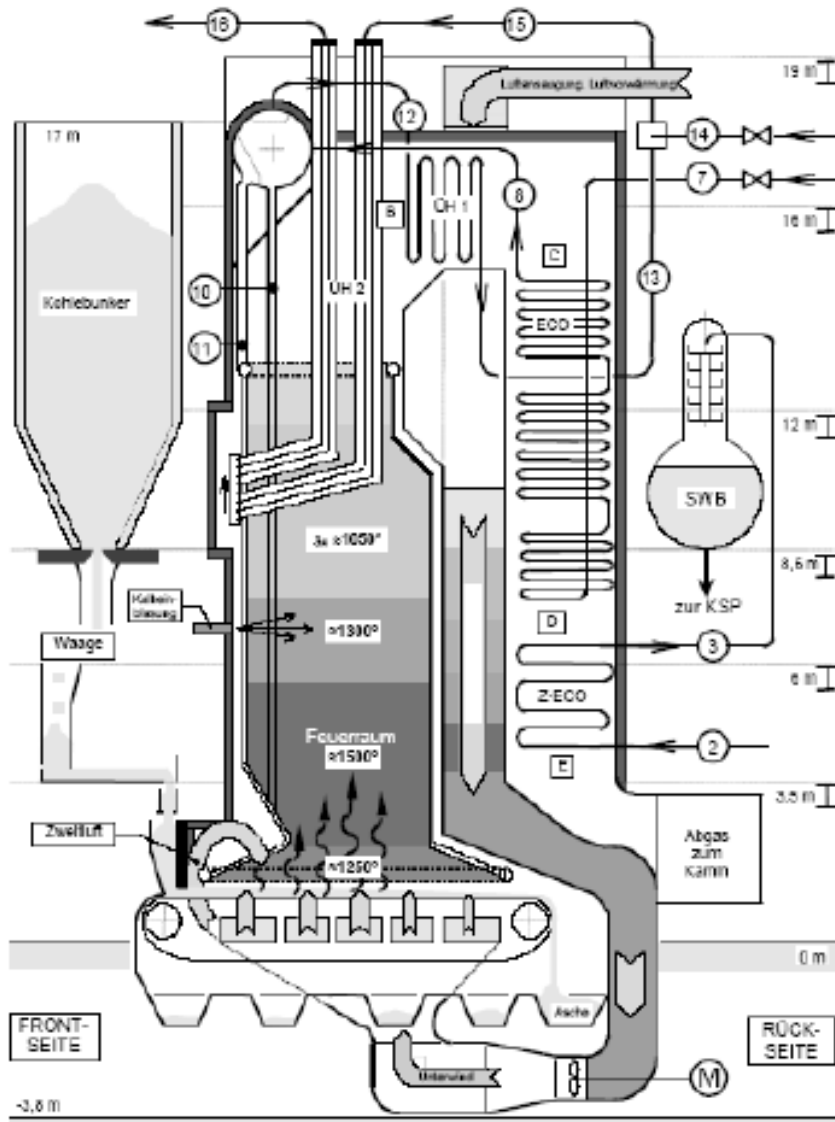
# Abschätzungen für k-Werte und $\Delta t$

Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Heizfläche	k-Wert	Temperaturdifferenz
Economiser	60 – 65 W/m <sup>2</sup> K	75 – 100 K
Zwischenüberhitzer, kälter liegend	60 – 65 W/m <sup>2</sup> K	100 – 130 K
Überhitzer, kälter liegend	65 – 70 W/m <sup>2</sup> K	180 – 200 K
Zwischenüberhitzer, heißer liegend	70 – 90 W/m <sup>2</sup> K	240 – 260 K
Überhitzer, heißer liegend	80 – 95 W/m <sup>2</sup> K	330 – 360 K
Tragrohrschott	90 – 110 W/m <sup>2</sup> K	460 – 500 K

[Beckmann]

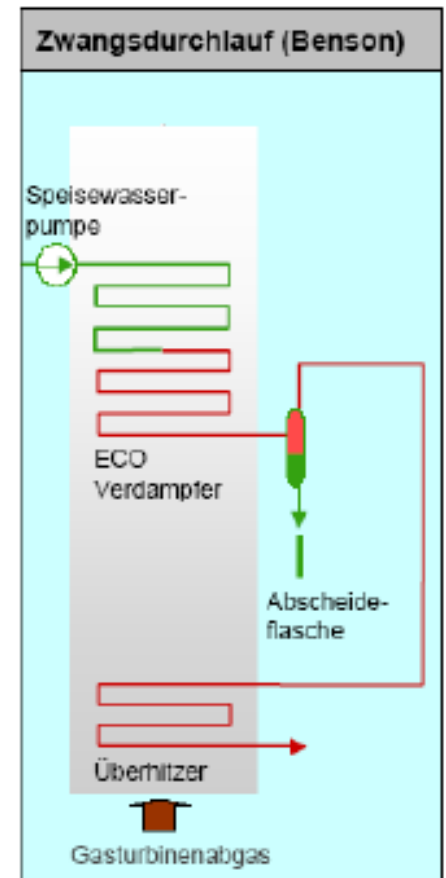
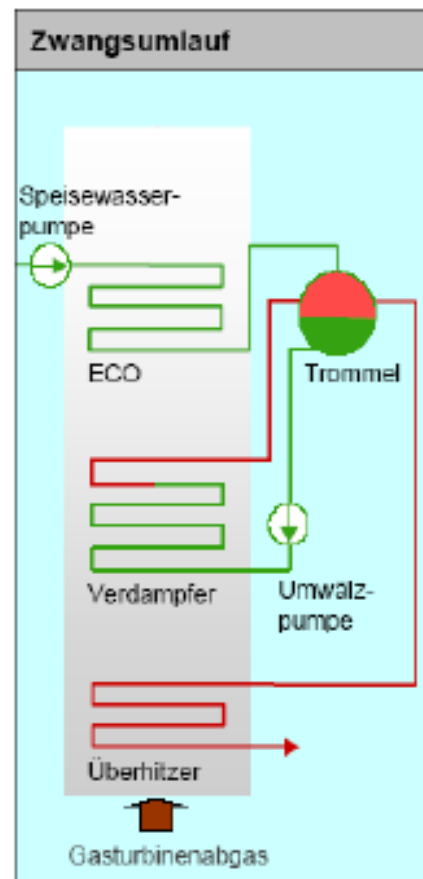
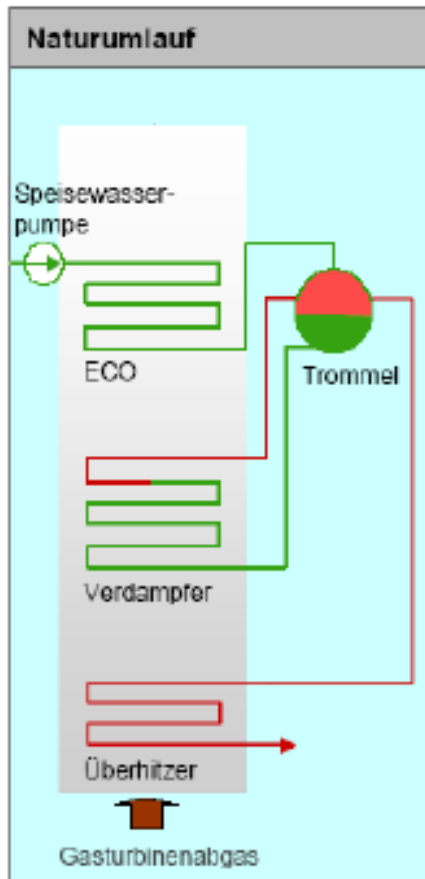
# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



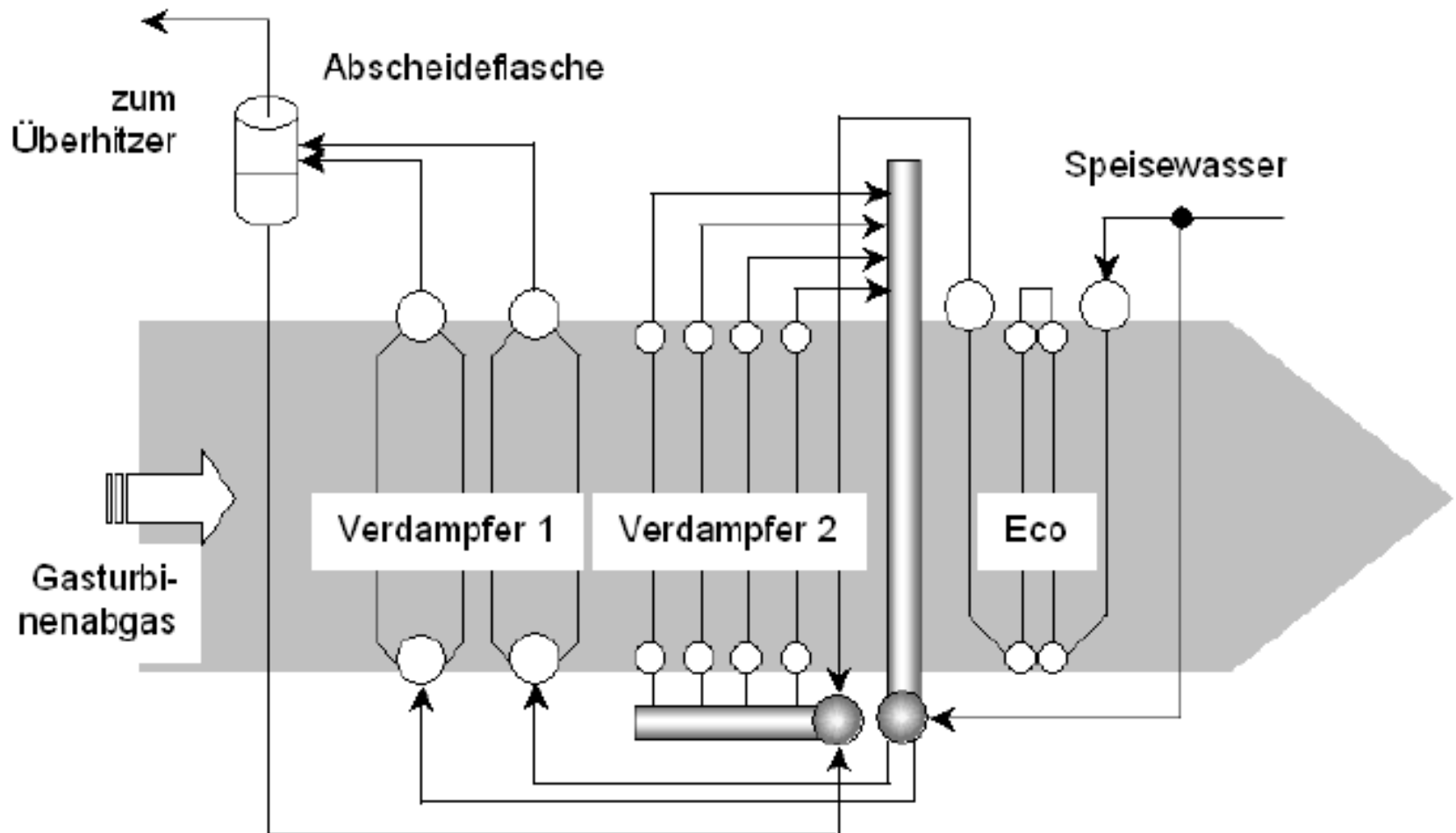
T(δ)-Q-Diagramm

## Schema Kesselaufbau

# Unterschiedliche Verdampferschaltungen bei einem Abhitze-Kessel



# Prinzip eines liegenden Abhitzekeessels (Zwangsdurchlauf)





# 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

