



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

**Institut für Energietechnik, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung**

# **Verbrennung und Dampferzeugung**

**- universitäres Fernstudium -  
Verdampfung / 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

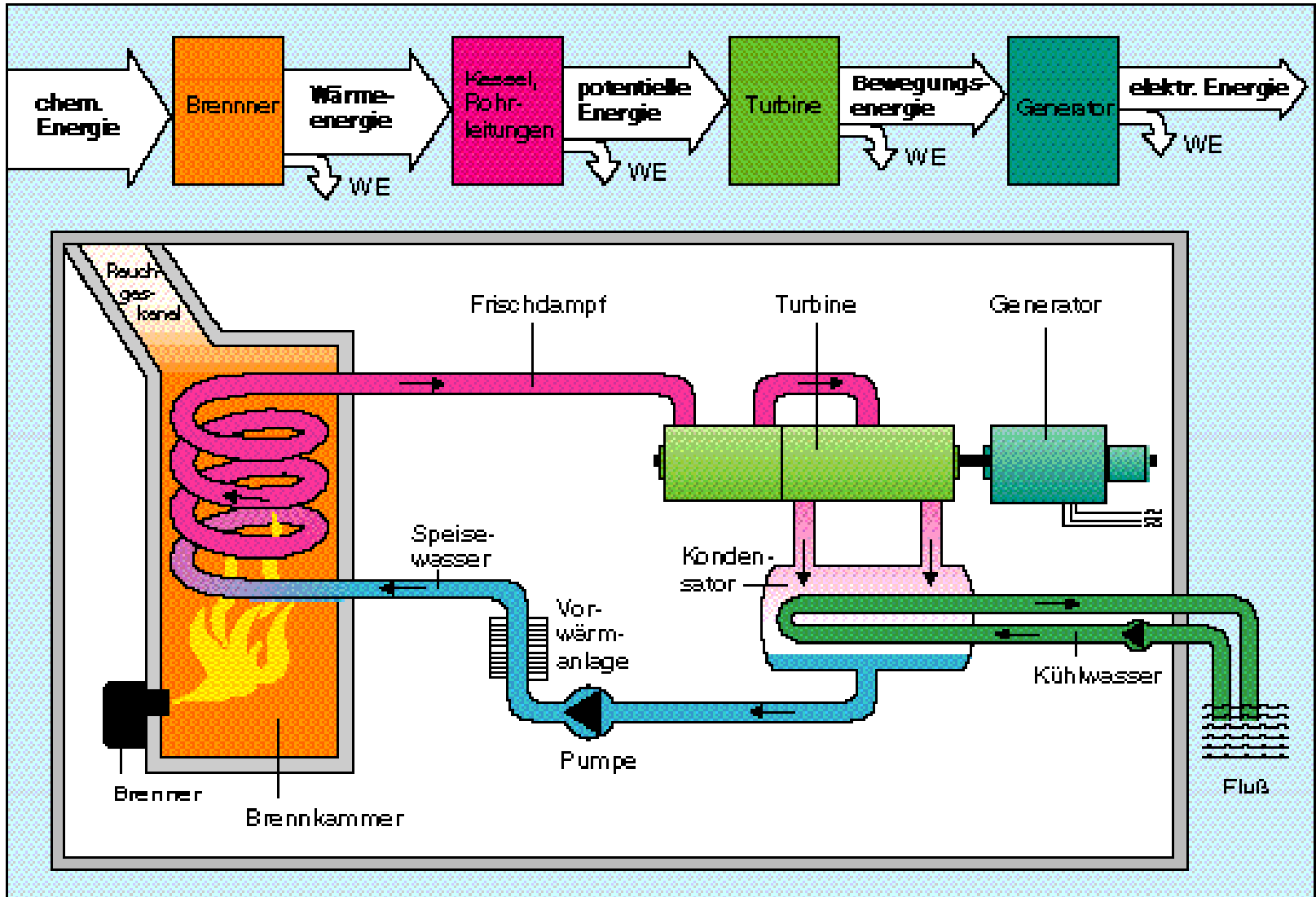
**Handbuch der Kesselbetriebstechnik**

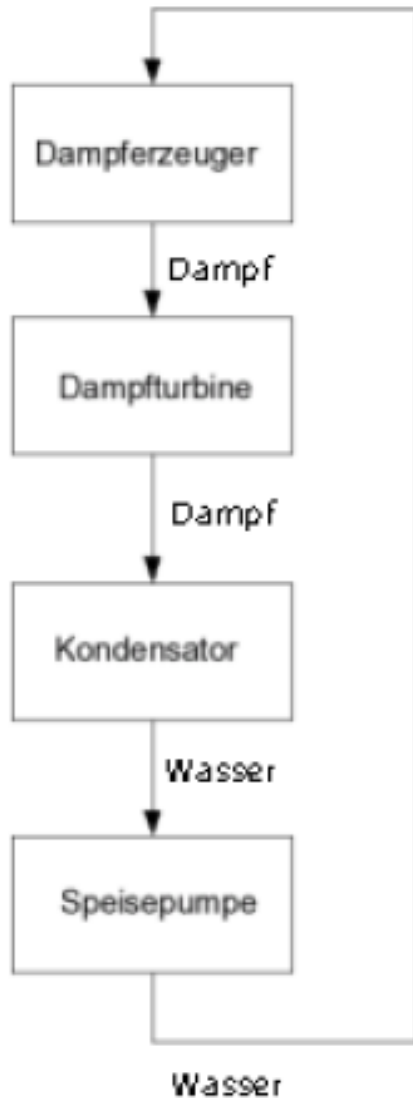
Kraft- und Wärmeerzeugung in Praxis und Theorie,  
10. Auflage 2003 842 Seiten, 451 Abb., 104 Taf.

EUR 96.00



# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

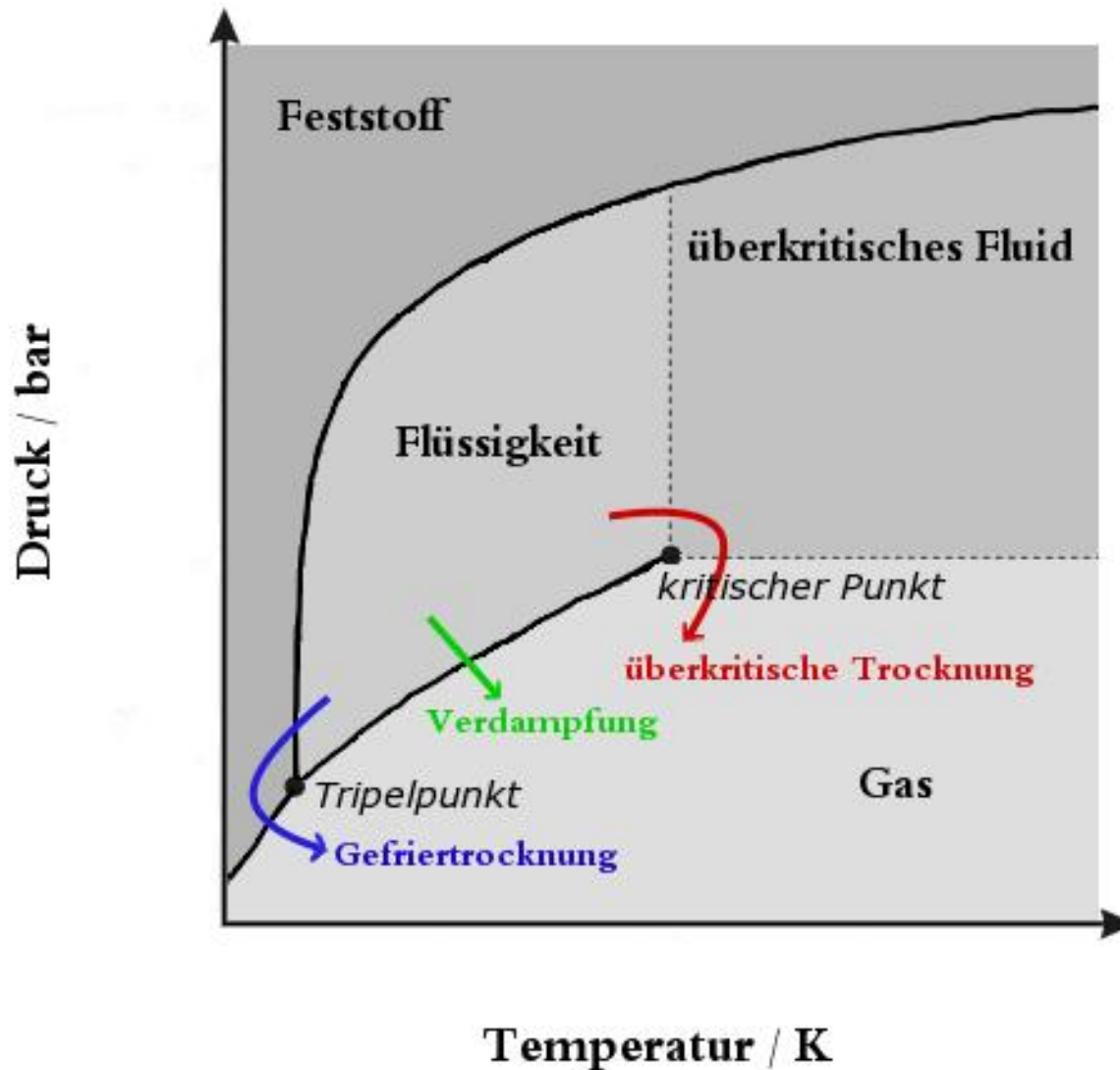




## Grundfließbild eines Wasser-Dampf-Kreislaufes in einem Dampfkraftwerk

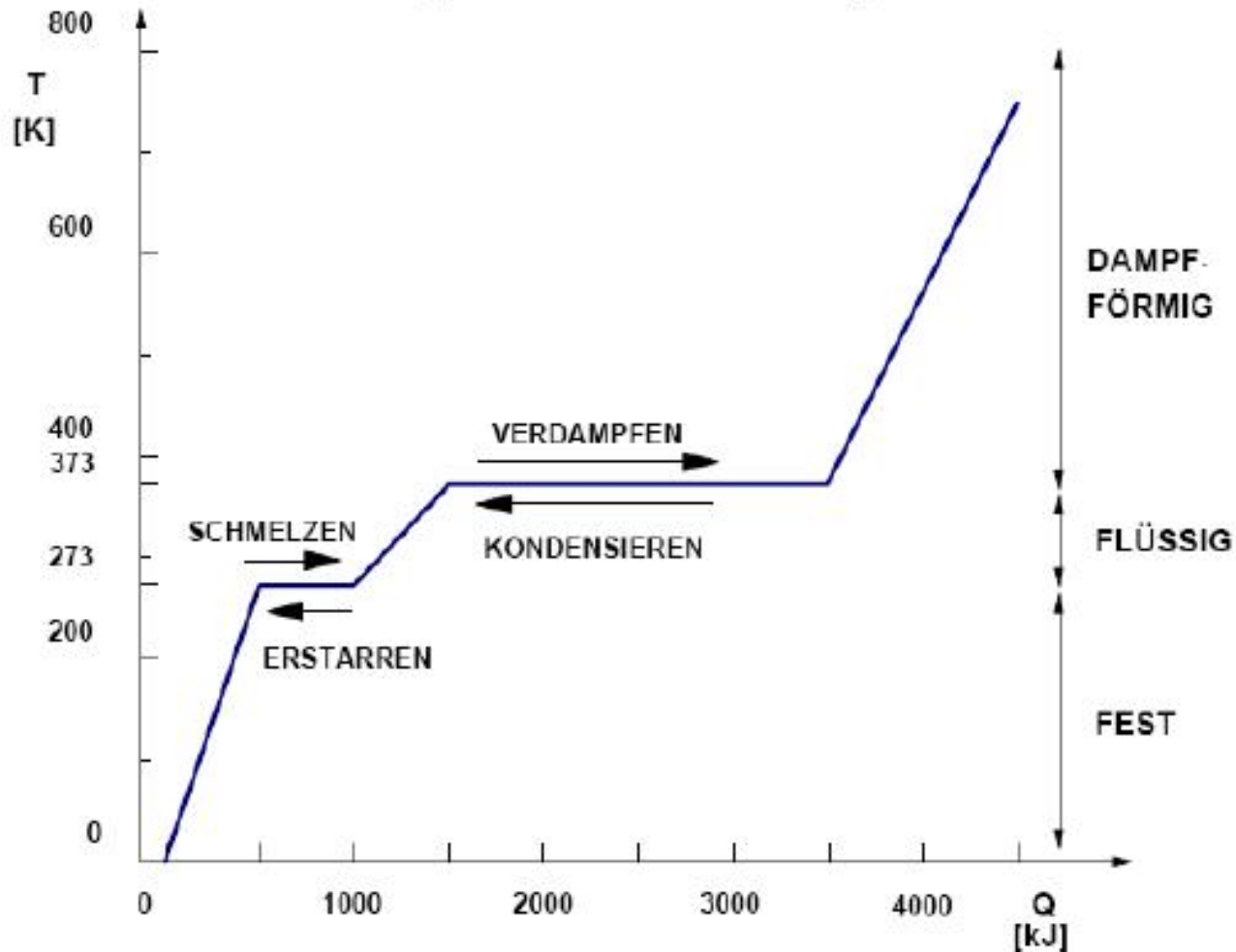
Die derzeit größten Kraftwerk-Dampferzeuger haben eine Leistung von bis zu 3600 Tonnen Dampf pro Stunde. Derartige Mengen werden beispielsweise mit einem Wasserrohrkessel bereit gestellt.

# - Wasser als Arbeitsmedium -

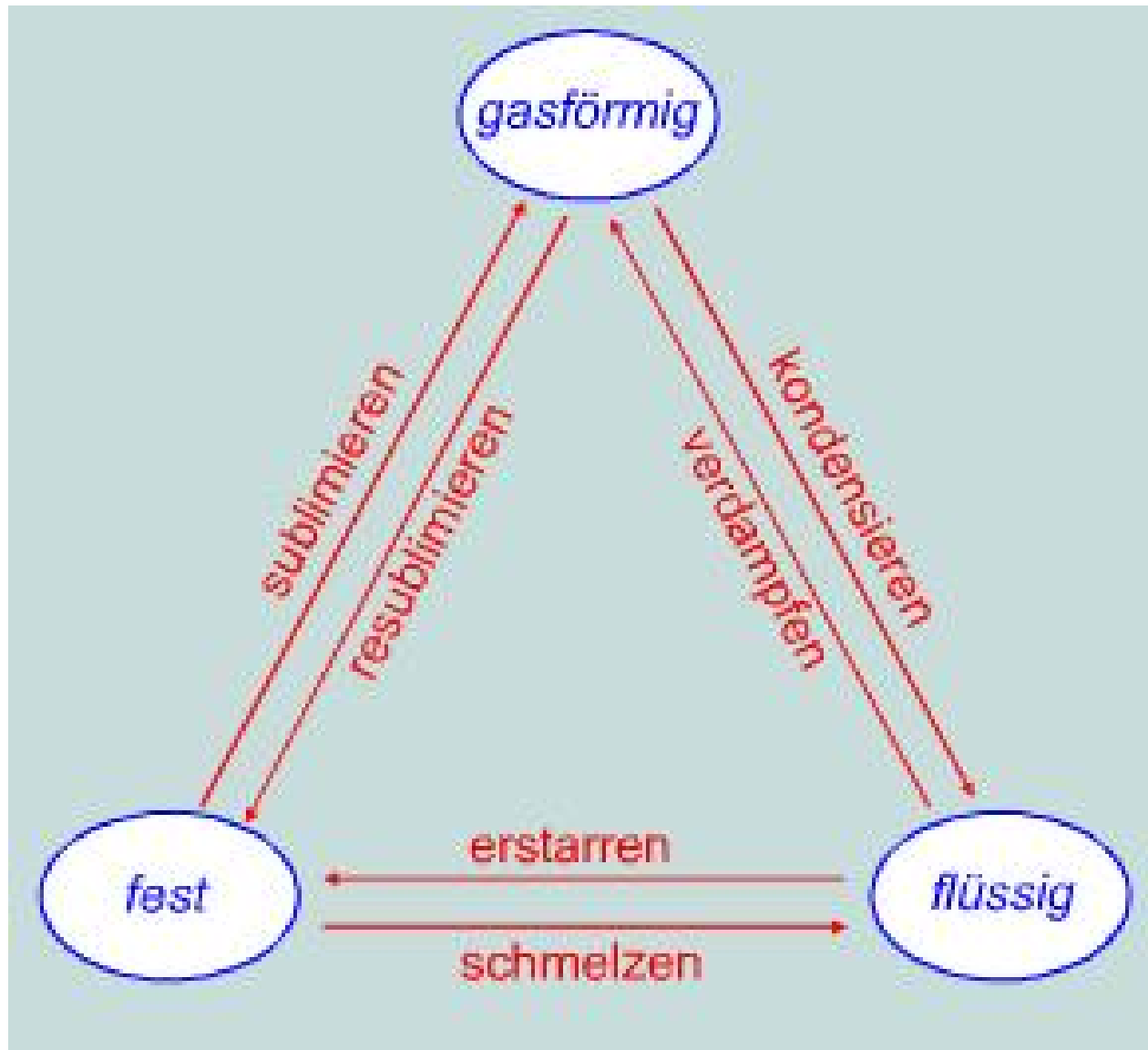


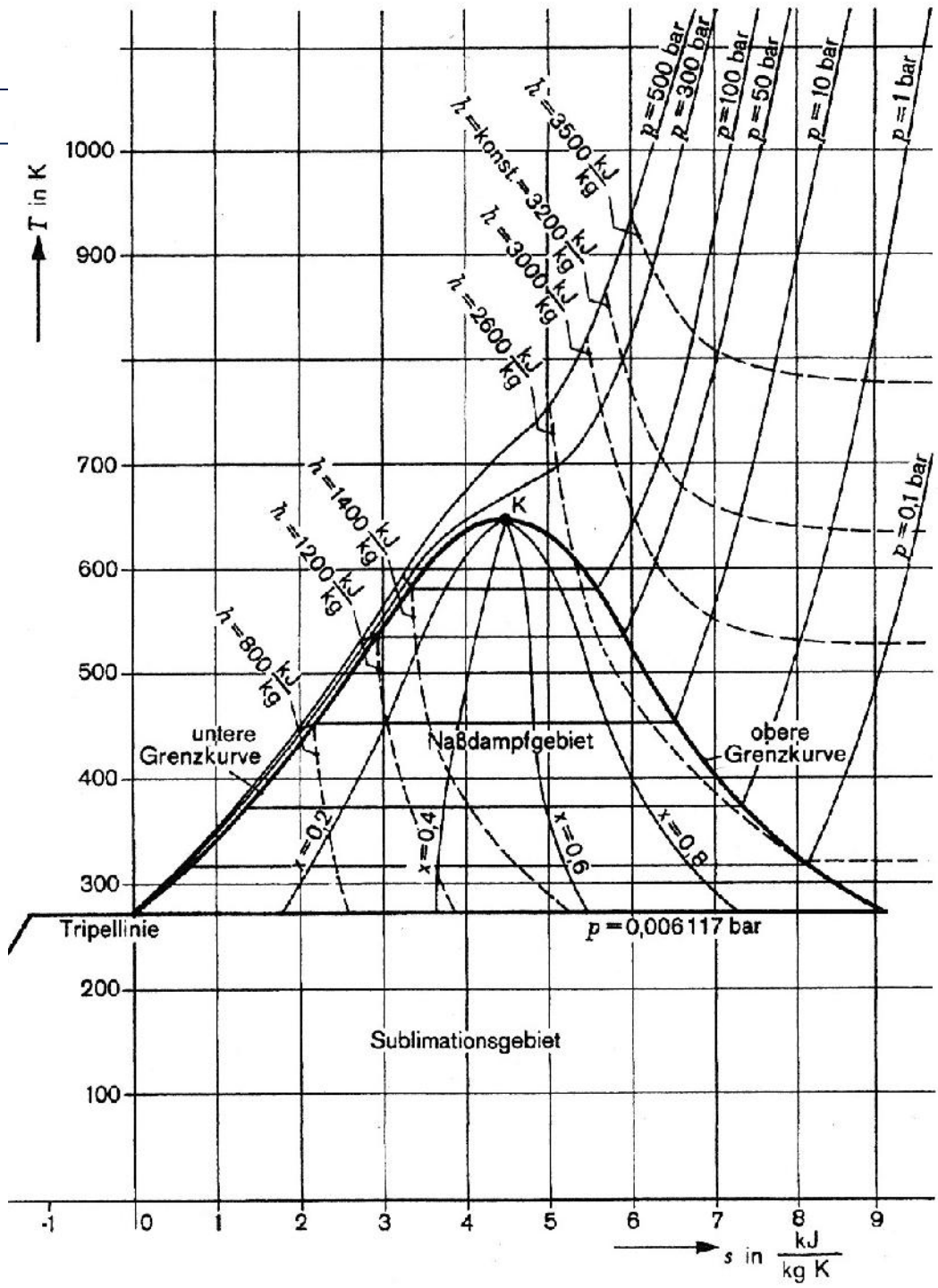
[www.wikipedia.de]

# Zustandsverlauf von Wasser im T-Q-Diagramm für 1 kg Wasser bei $p = 1 \text{ bar}$



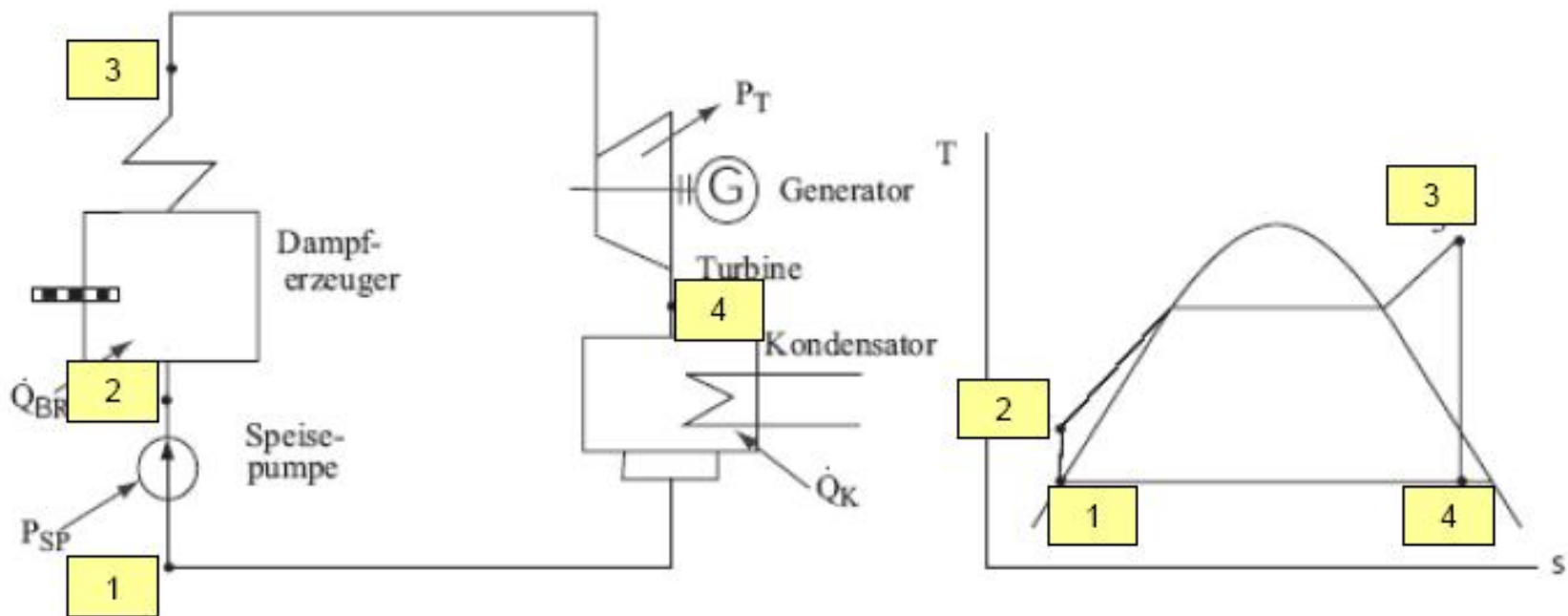






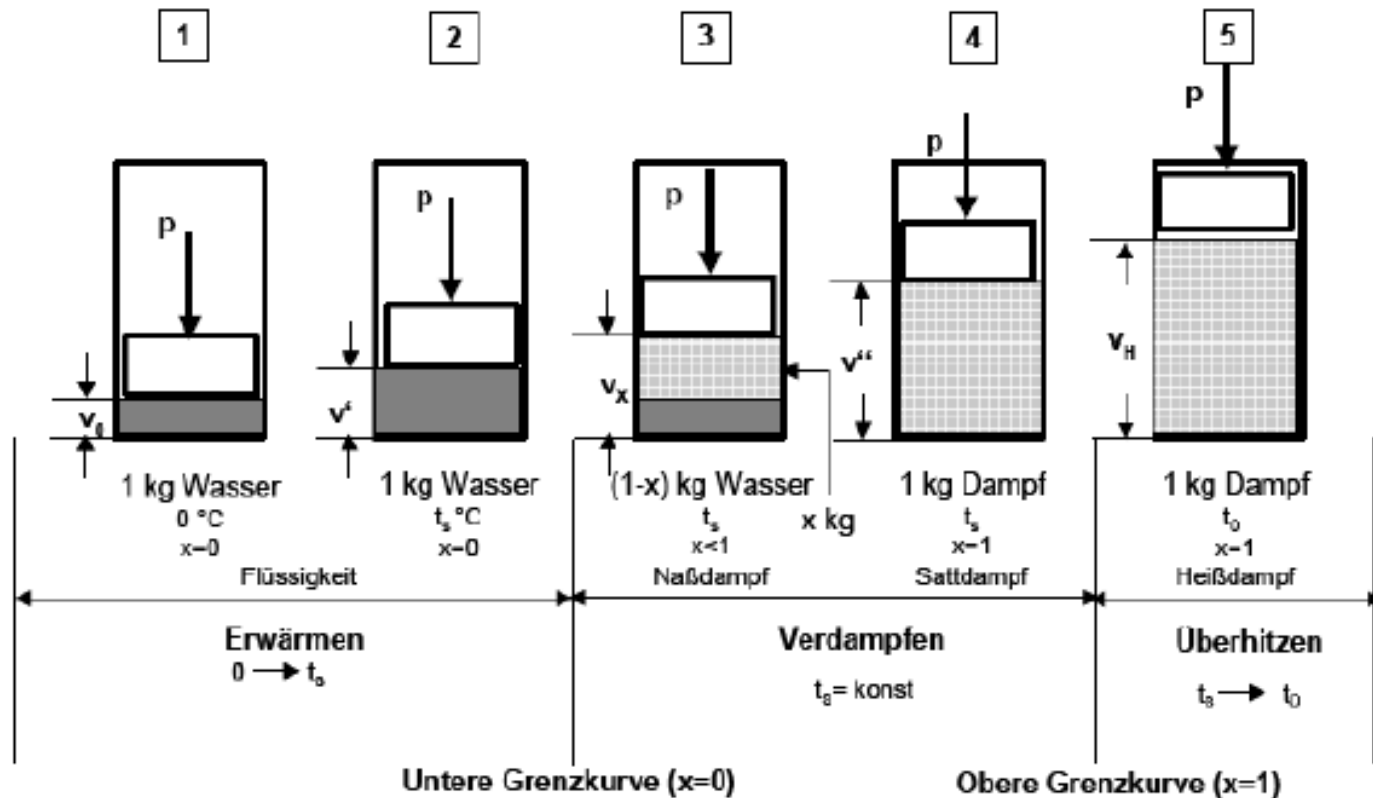
## Zustandsänderungen für Wasser / Dampf

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



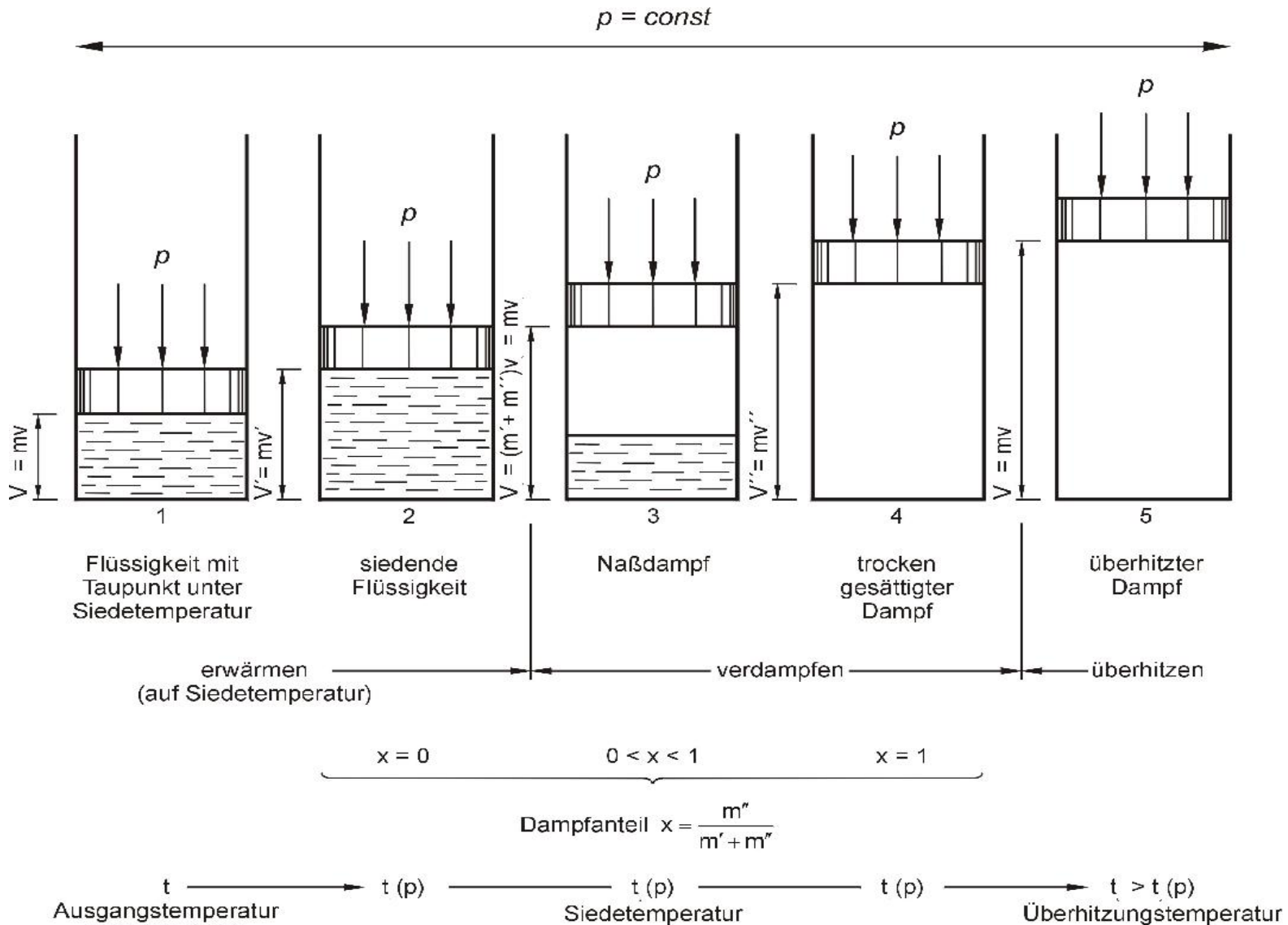
# Verdampfung bei konstantem Druck

Die Dampferzeugung lässt sich in 3 Phasen unterteilen



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

# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



Quelle: Elsner, Technische Thermodynamik

Dampfanteil  $x = \frac{m''}{m' + m''} \left[ \frac{kg D_{tr, gesättigt}}{kg_{gesamt}} \right]$

siedende Flüssigkeit  $x = 0$  ( $m'' = 0$ )

trocken gesättigter Dampf  $x = 1$  ( $m' = 0$ )

Nassdampf  $0 < x < 1$

$$(m' + m'') \cdot v_x = m' v' + m'' v''$$

$$v_x = v' + x(v'' - v')$$

jedem Druck ist eine bestimmte Siedetemperatur zugeordnet (Sättigungsdruck, Sättigungstemperatur)

Dampfdruckkurve  $p = p(T)$

„Dampfarten“

```
graph TD; A[„Dampfarten“] --- B[Nassdampf]; A --- C[Sattdampf]; A --- D[überhitzter Dampf];
```

Nassdampf

Gemisch aus Flüssigkeit (z.B. Wassertröpfchen) und Dampf, bei dem beide Teile Sättigungstemperatur haben

Sattdampf

ist gesättigter Dampf, d. h. Dampf, der keine weitere Flüssigkeit mehr aufnehmen kann. Dieser Dampf ist mit Wasser noch in direkter Berührung.

überhitzter Dampf

entsteht aus Sattdampf, der bei konstantem Druck weiter erhitzt wird. Überhitzter Dampf ist nicht mehr gesättigt.

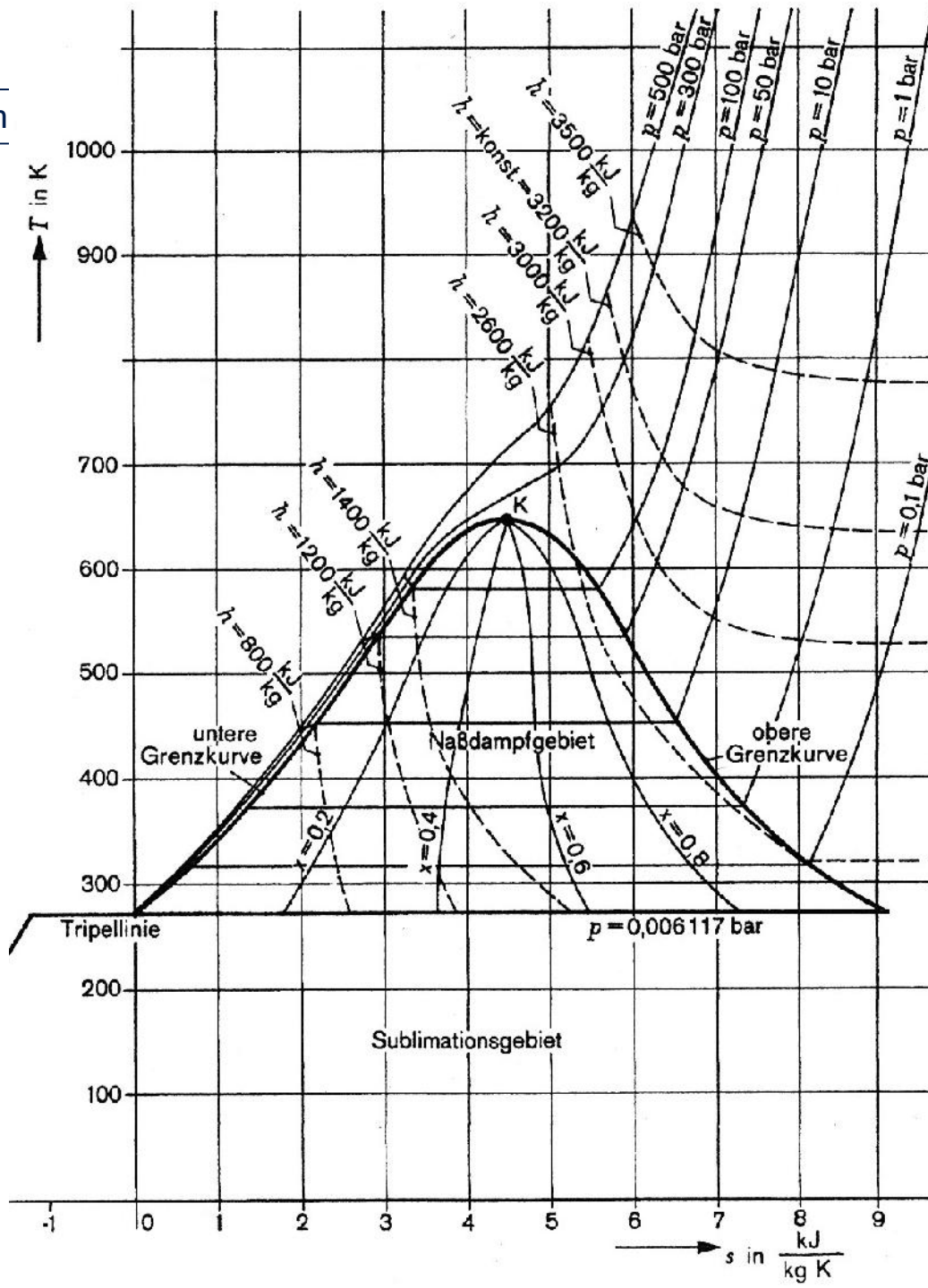
# Der kritische Punkt

## 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
225	374	315	315	1,0 : 1

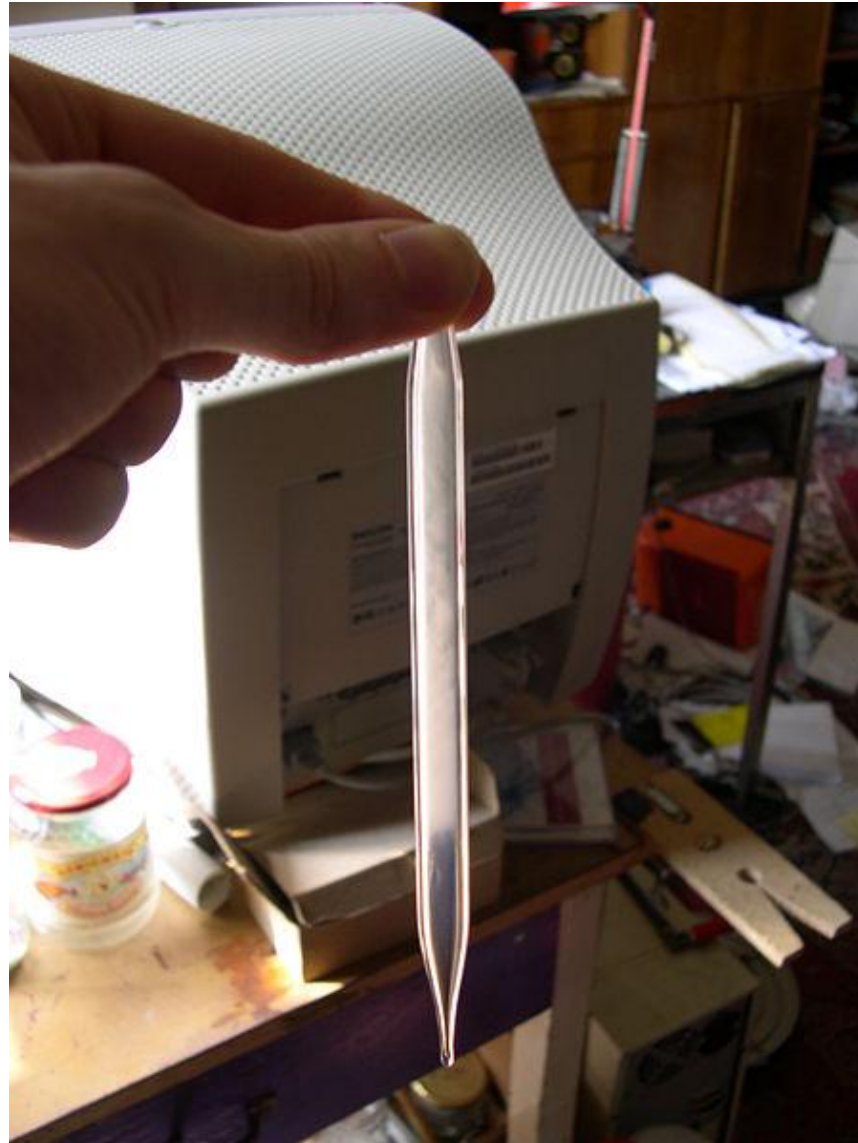






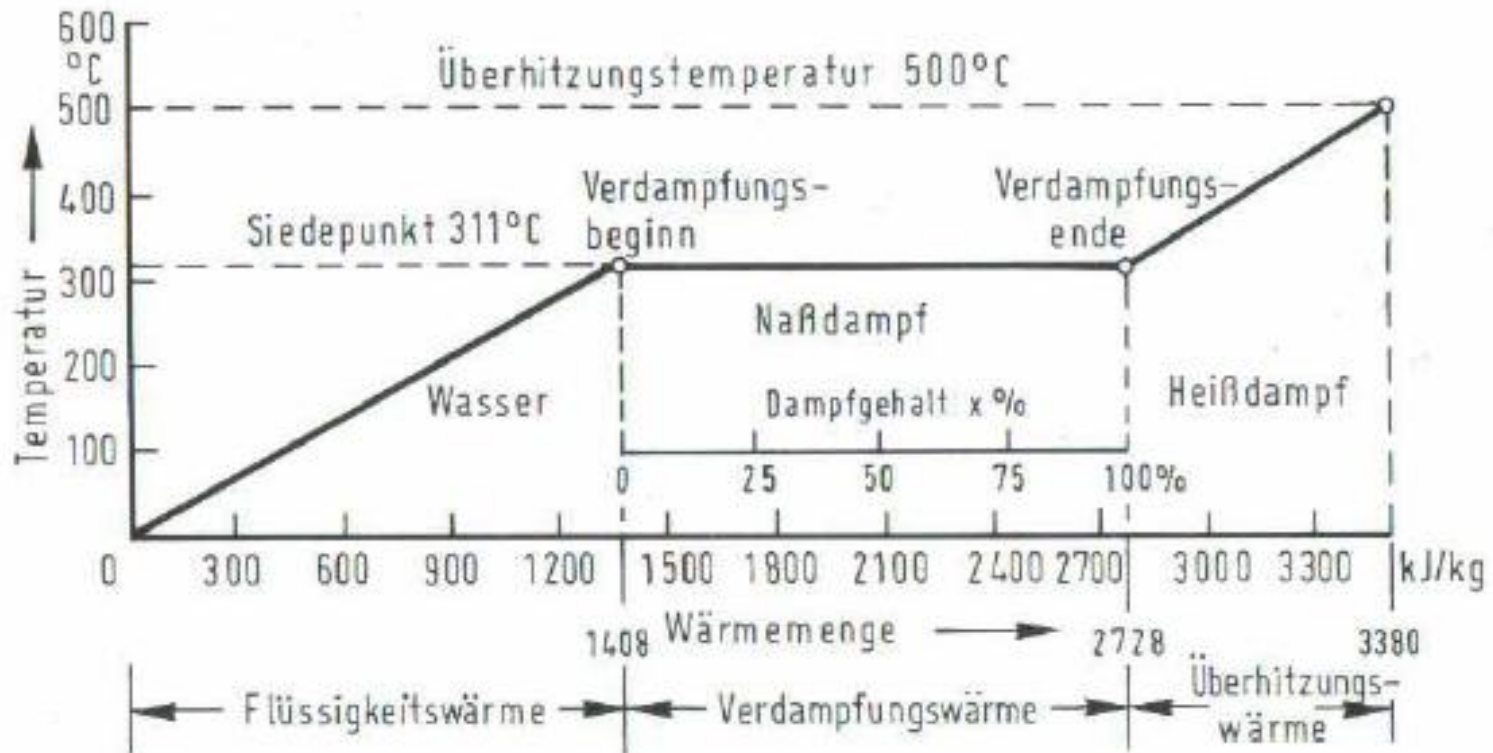
Der Übergang in einen überkritischen Zustand lässt sich an CO<sub>2</sub> beobachten, das in einem dickwandigen Rohr aus Quarzglas unter Druck eingeschlossen ist. Die kritische Temperatur von CO<sub>2</sub> beträgt 31,0 °C, der kritische Druck 73,8 bar.

Bei einer Temperatur unter 31 °C ist das Rohr zum Teil mit flüssigem CO<sub>2</sub>, zum anderen Teil mit gasförmigem CO<sub>2</sub> gefüllt. Beide Phasen sind farblos, klar durchsichtig und durch die deutlich sichtbare Flüssigkeitsoberfläche (Phasengrenzfläche) getrennt. Wird das Rohr in ein Wasserbad von etwa 35 °C getaucht, so lässt sich beim Erwärmen zunächst eine Volumenzunahme der Flüssigkeit durch thermische Ausdehnung beobachten, während das Volumen des Dampfes infolge Kompression abnimmt. Hat das CO<sub>2</sub> die kritische Temperatur von 31 °C erreicht, so bildet sich kurzzeitig ein dichter Nebel (kritische Opaleszenz), der sich nach wenigen Sekunden weiterer Erwärmung wieder auflöst. Das Rohr ist danach mit einer einzigen homogenen, klar durchsichtigen Phase gefüllt: überkritisches CO<sub>2</sub>. Beim Abkühlen tritt wieder kurzzeitig Nebel auf, bevor sich das CO<sub>2</sub> in eine flüssige und eine gasförmige Phase teilt.



[[www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)]

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



# - Der Verdampfungsvorgang -

## **Blasensieden: Form der Verdampfung bei geringen Wärmestromdichten**

Es bilden sich Blasen an Siedekeimen, die Wand wird ausreichend benetzt, die Fluide vermischen sich gut damit ist der Wärmeübergang sehr gut.

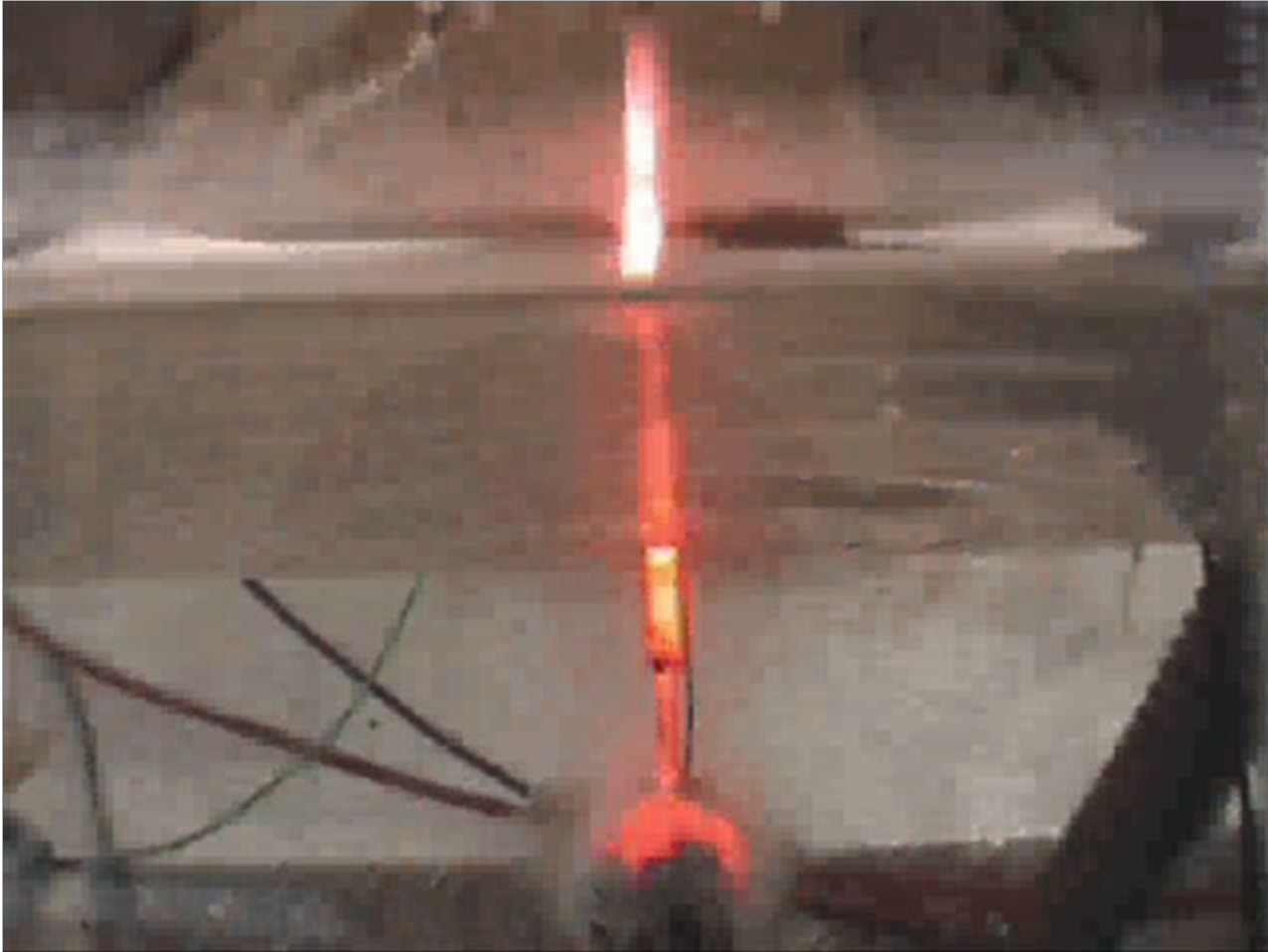
## **Filmsieden: Form der Verdampfung bei sehr hohen Wärmestromdichten.**

Es bildet sich auf der Wärmeübergangsfläche ein durchgehender Dampffilm, der im Gegensatz zur gut durchmischten Flüssigkeit beim Blasensieden eine hohe wärmeisolierende Wirkung hat.

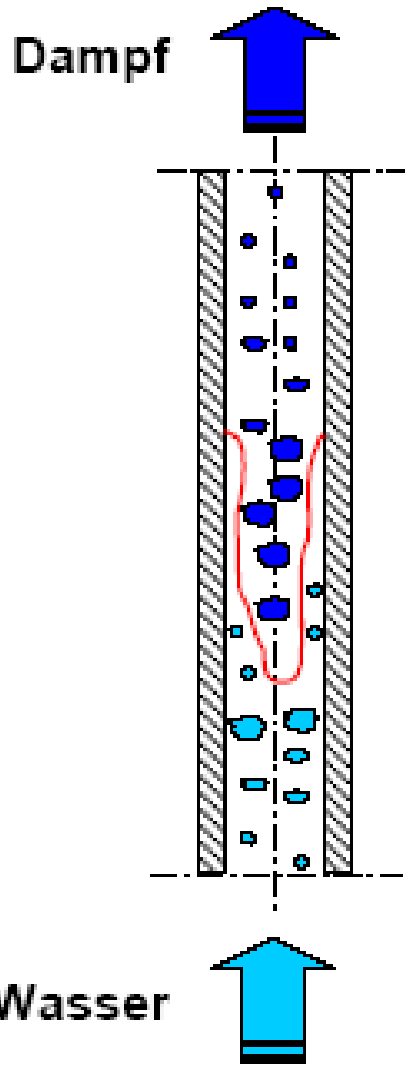
**Der Wärmeübergangskoeffizient liegt beim **Filmsieden** um Zehnerpotenzen niedriger als beim Blasensieden, und das bei hohen Wärmestromdichten. Dies hat zur Folge, dass die Wandtemperatur ansteigt, was eine **Gefährdung der Heizflächen** darstellt.**

**In technischen Anwendungen muss daher darauf geachtet werden, dass die Wärmestromdichten deutlich unter dem Umschlagpunkt vom Blasen- und Filmsieden liegen. Für das Medium Wasser liegt die kritische Wärmestromdichte bei etwa  $1000 \text{ kW/m}^2$ . **Dampfkessel werden daher so ausgelegt, dass eine Wärmestromdichte von  $300 \text{ kW/m}^2$  nicht überschritten wird.****



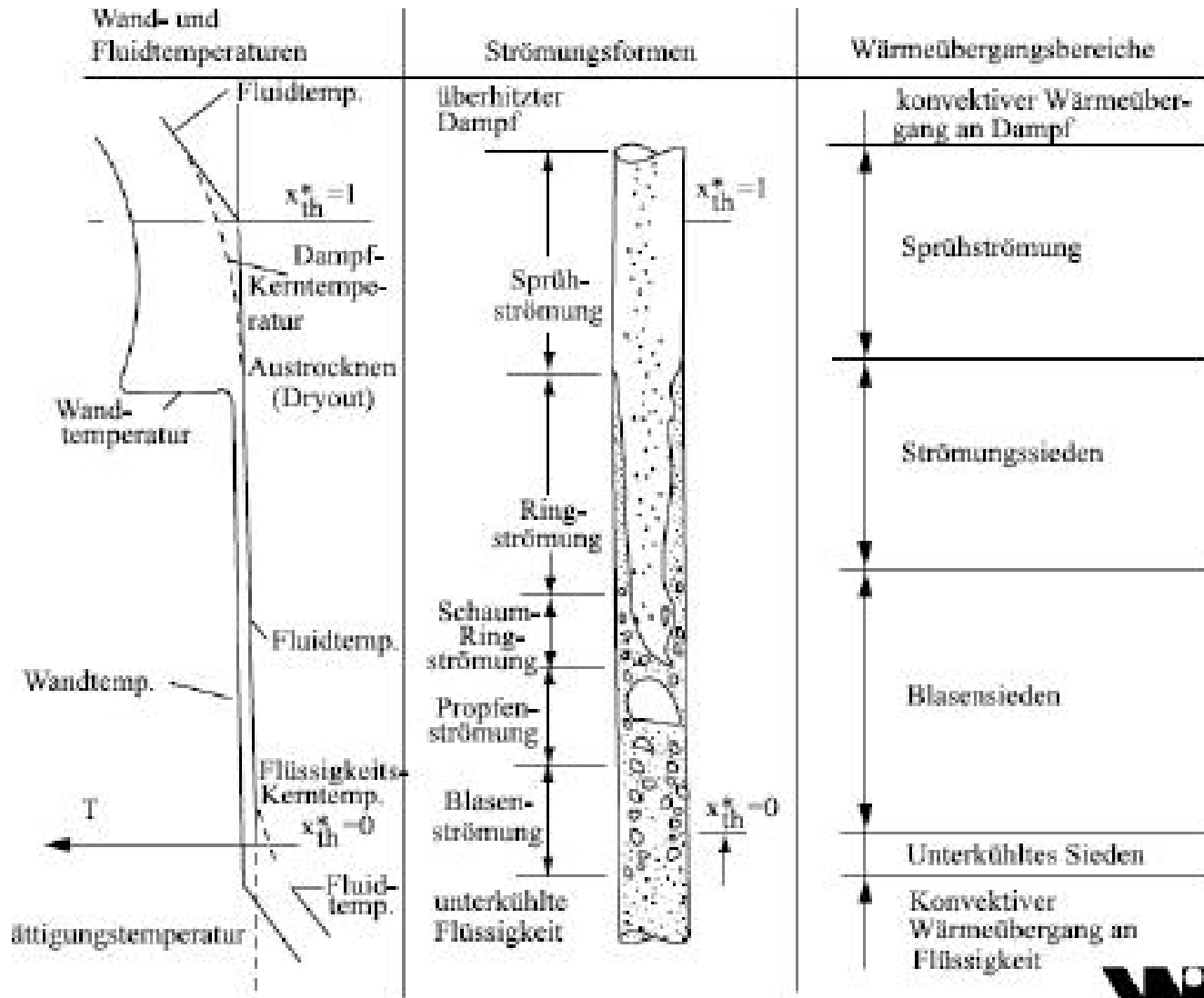




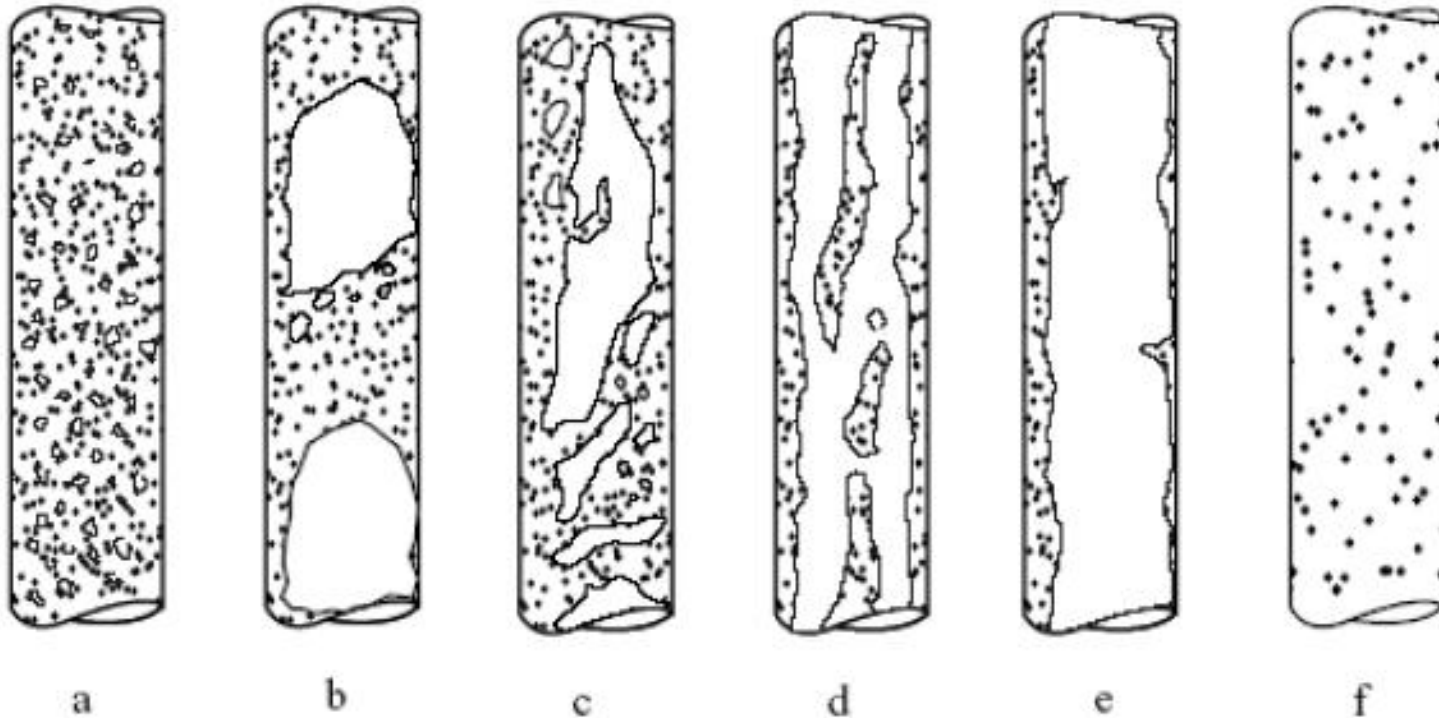


Strömungsform	Wärmeübertragungsbereich
Einphasige Dampfströmung	Konvektiver Wärmeübergang zum Dampf
Tropfenströmung	Post-Dryout-Bereich
Ringströmung mit Wassermitriß	Konvektiver Wärmeübergang durch den Wasserfilm
Ringströmung	Sieden
Kolbenblasenströmung	Unterkühltes Sieden
Blasenströmung	Unterkühltes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

# Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



# Strömungsformen im senkrechten unbeheizten Rohr bei Aufwärtsströmung



a-Blasenströmung; b-Propfenströmung; c-Schaumströmung  
d-Strähnen-Ring-Strömung; e-Ringströmung; f-Sprühströmung

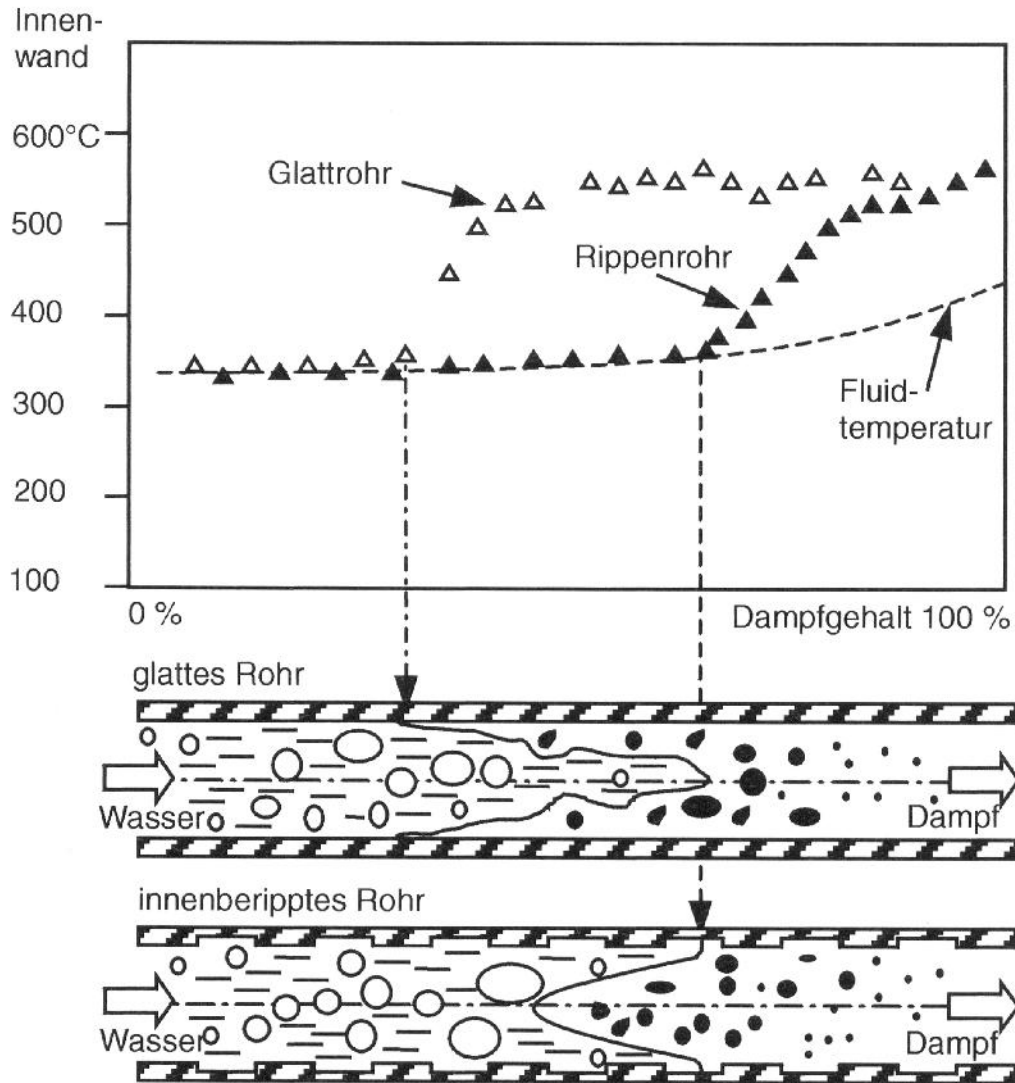
# Siedekrise

- **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

