



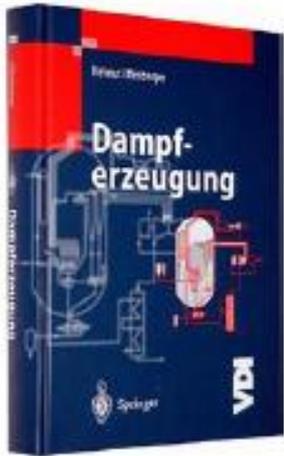
**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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

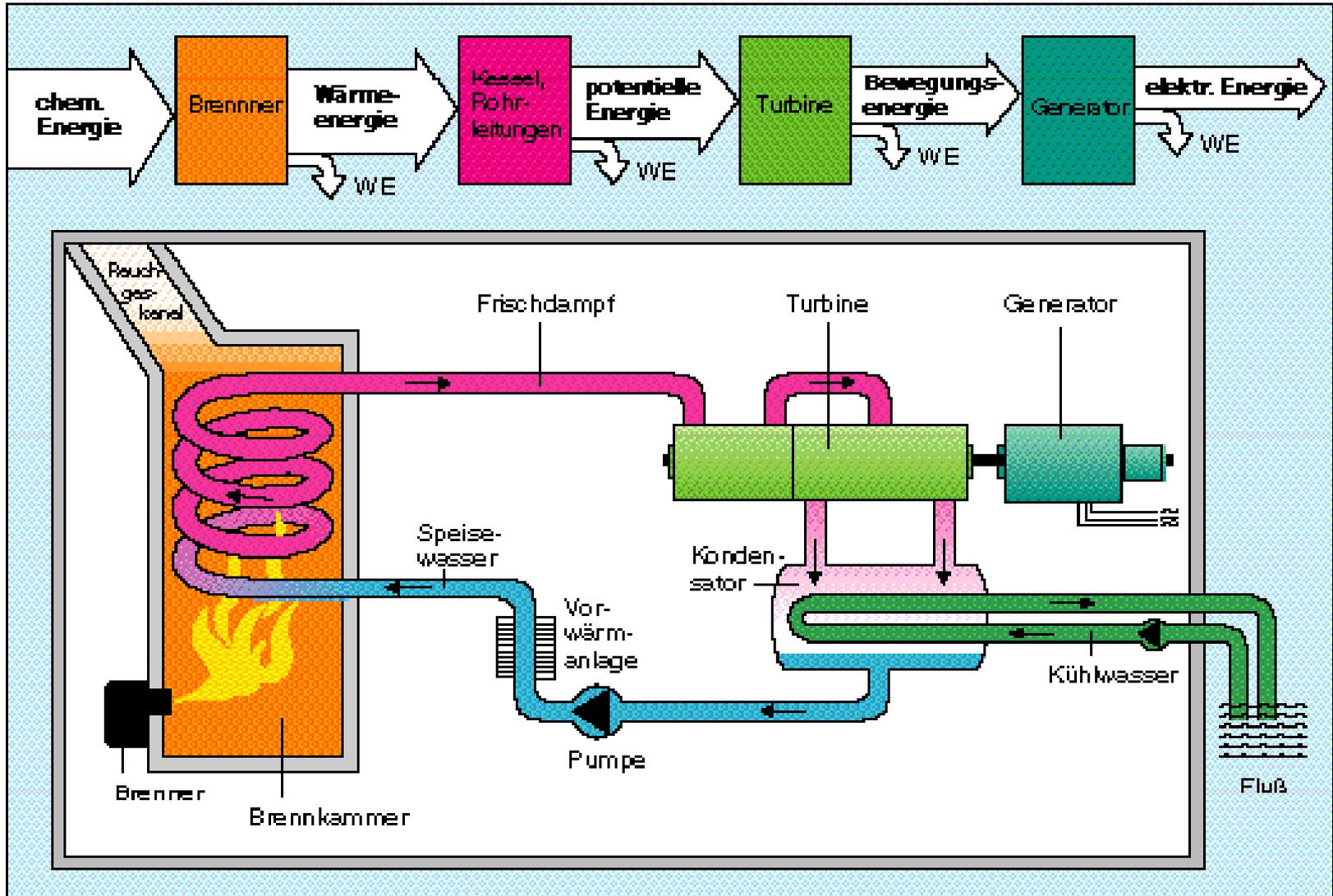
Handbuch der Kesselbetriebstechnik

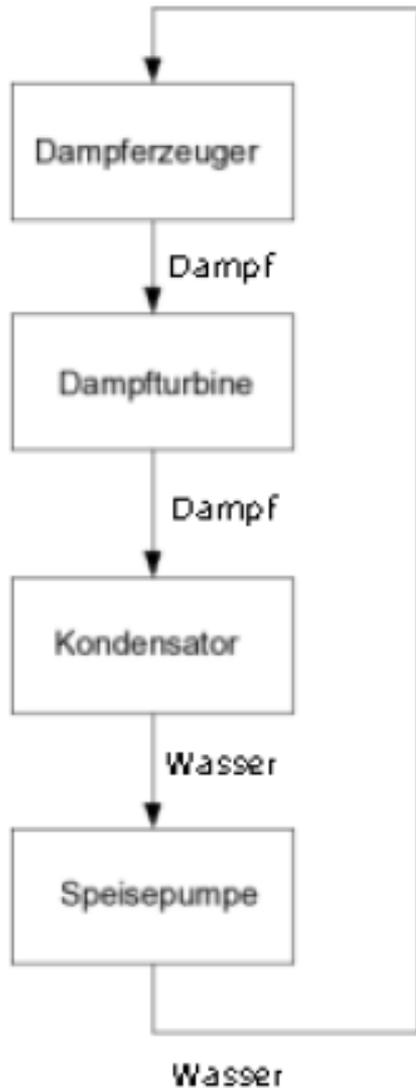
Kraft- und Wärmeerzeugung in Praxis und Theorie,
10. Auflage 2003 842 Seiten, 451 Abb., 104 Taf.

EUR 96.00



Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

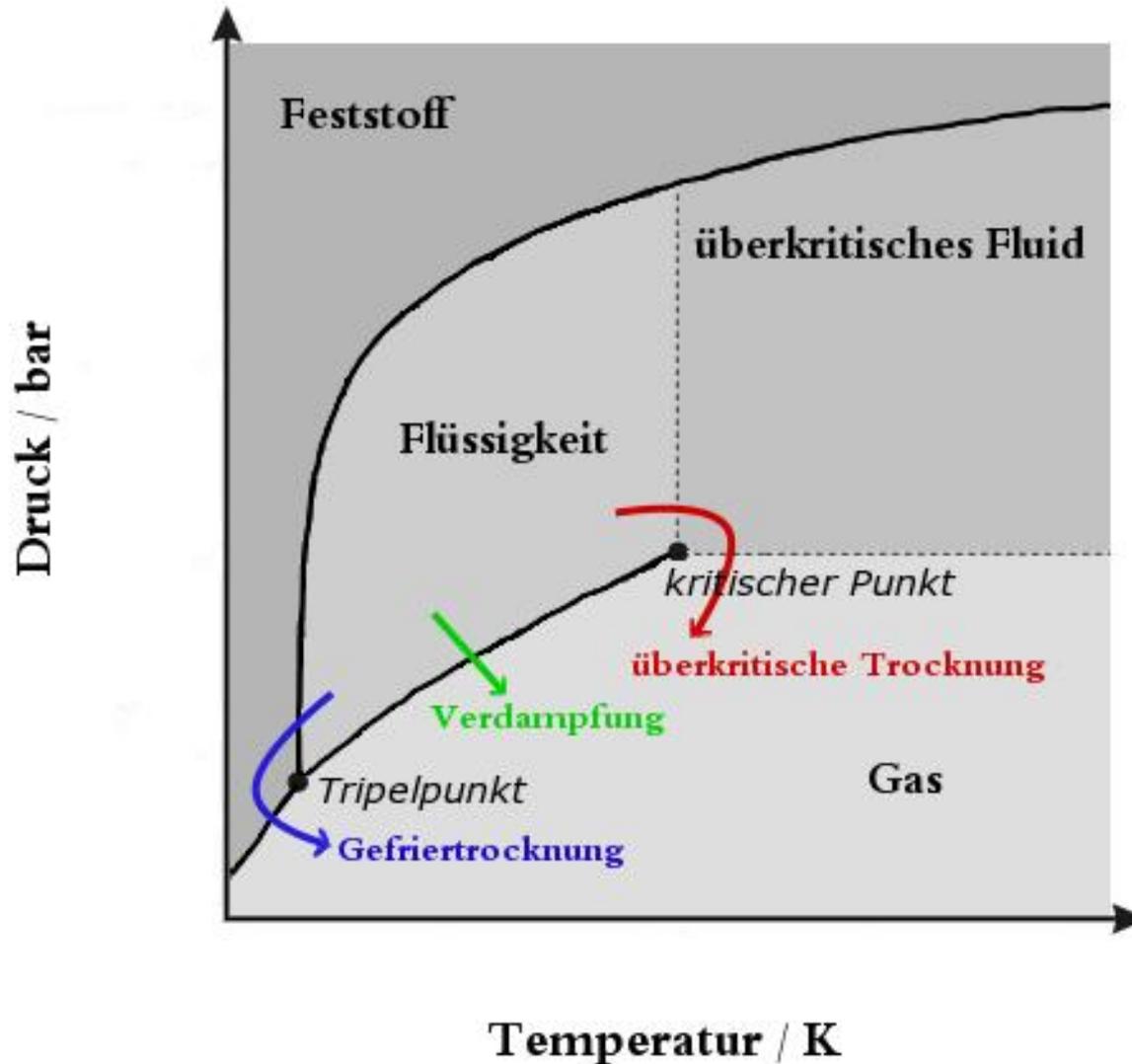




Grundfließbild eines Wasser-Dampf-Kreislaufes in einem Dampfkraftwerk

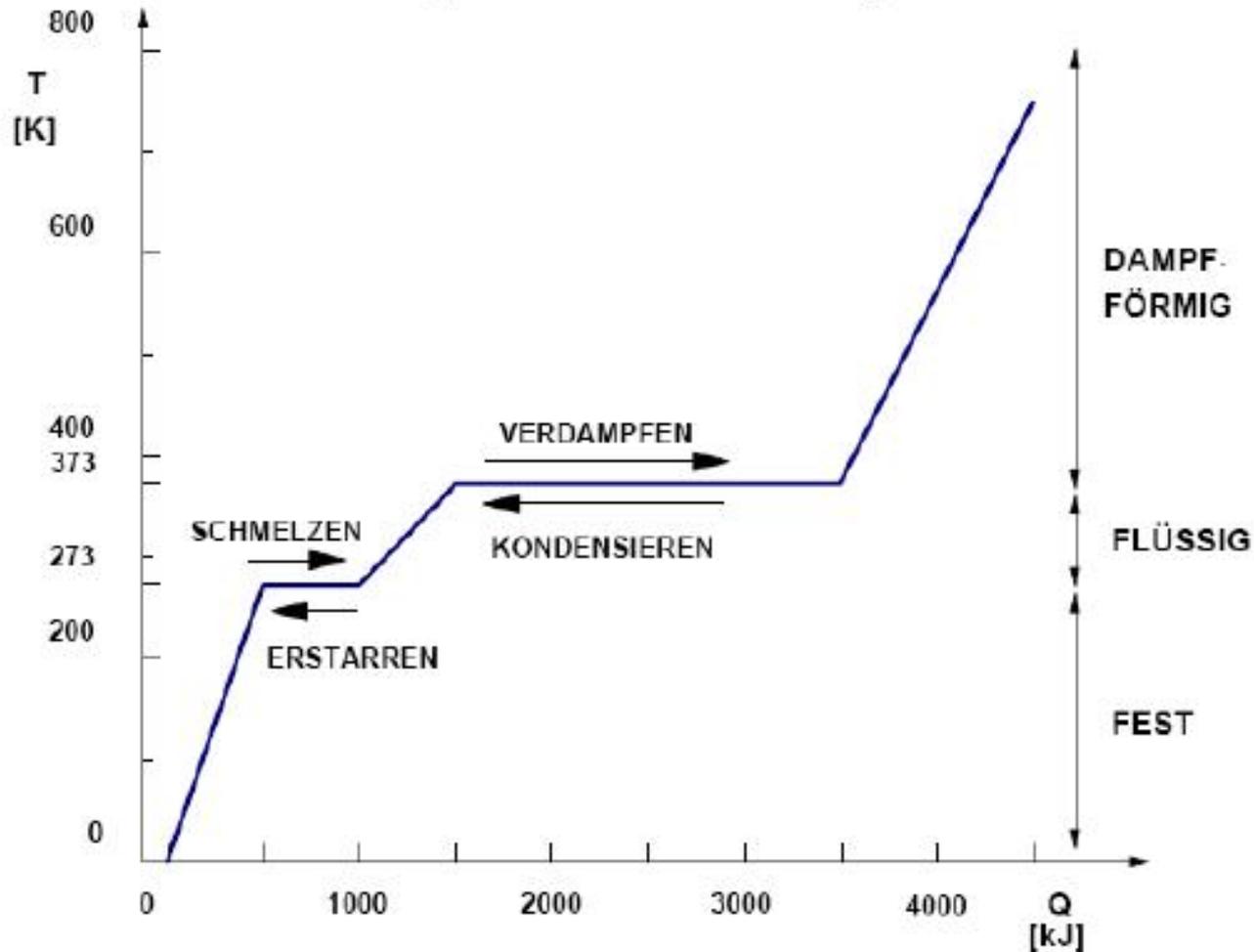
Die derzeit größten Kraftwerk-Dampferzeuger haben eine Leistung von bis zu 3600 Tonnen Dampf pro Stunde. Derartige Mengen werden beispielsweise mit einem Wasserrohrkessel bereit gestellt.

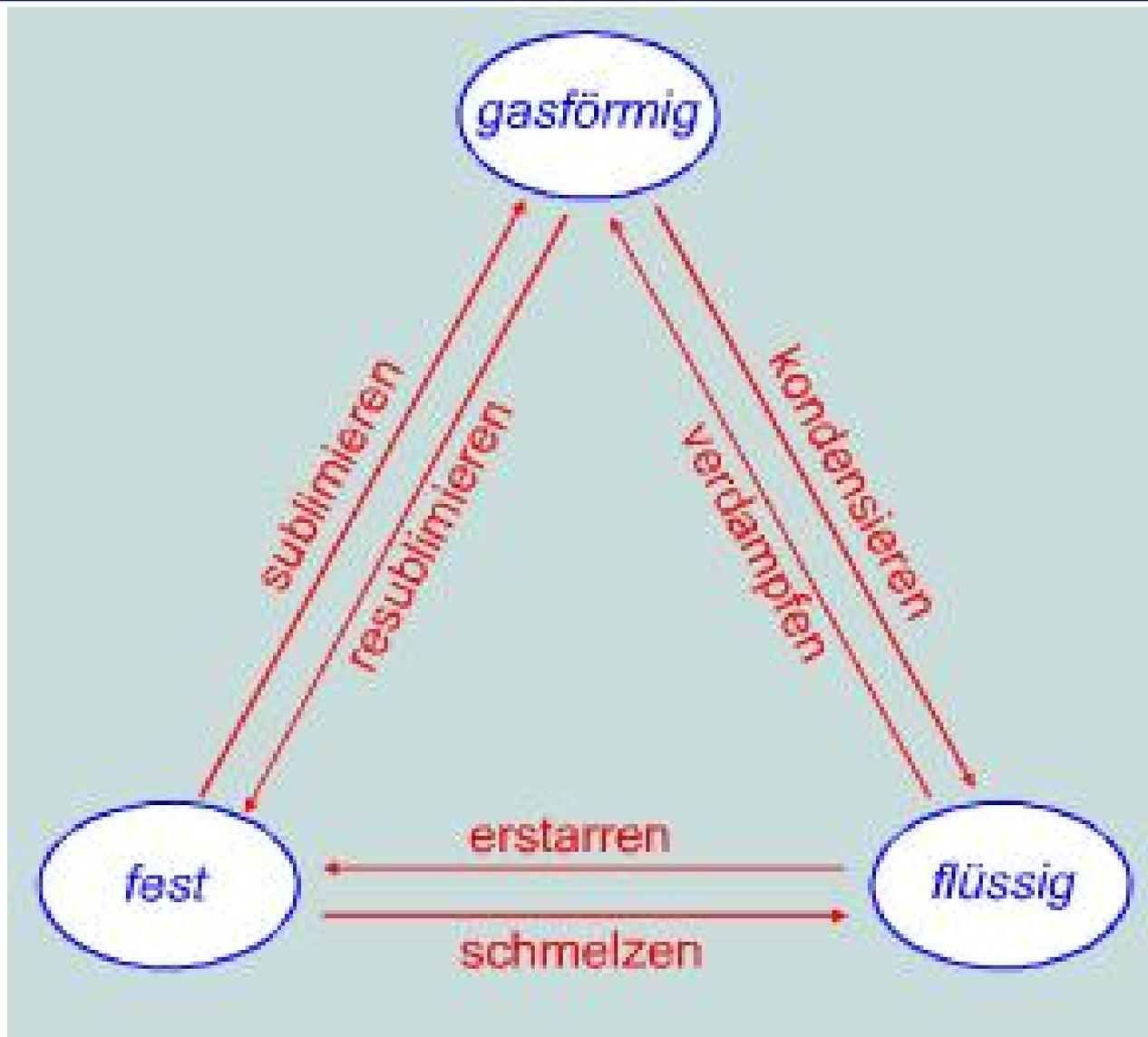
- Wasser als Arbeitsmedium -

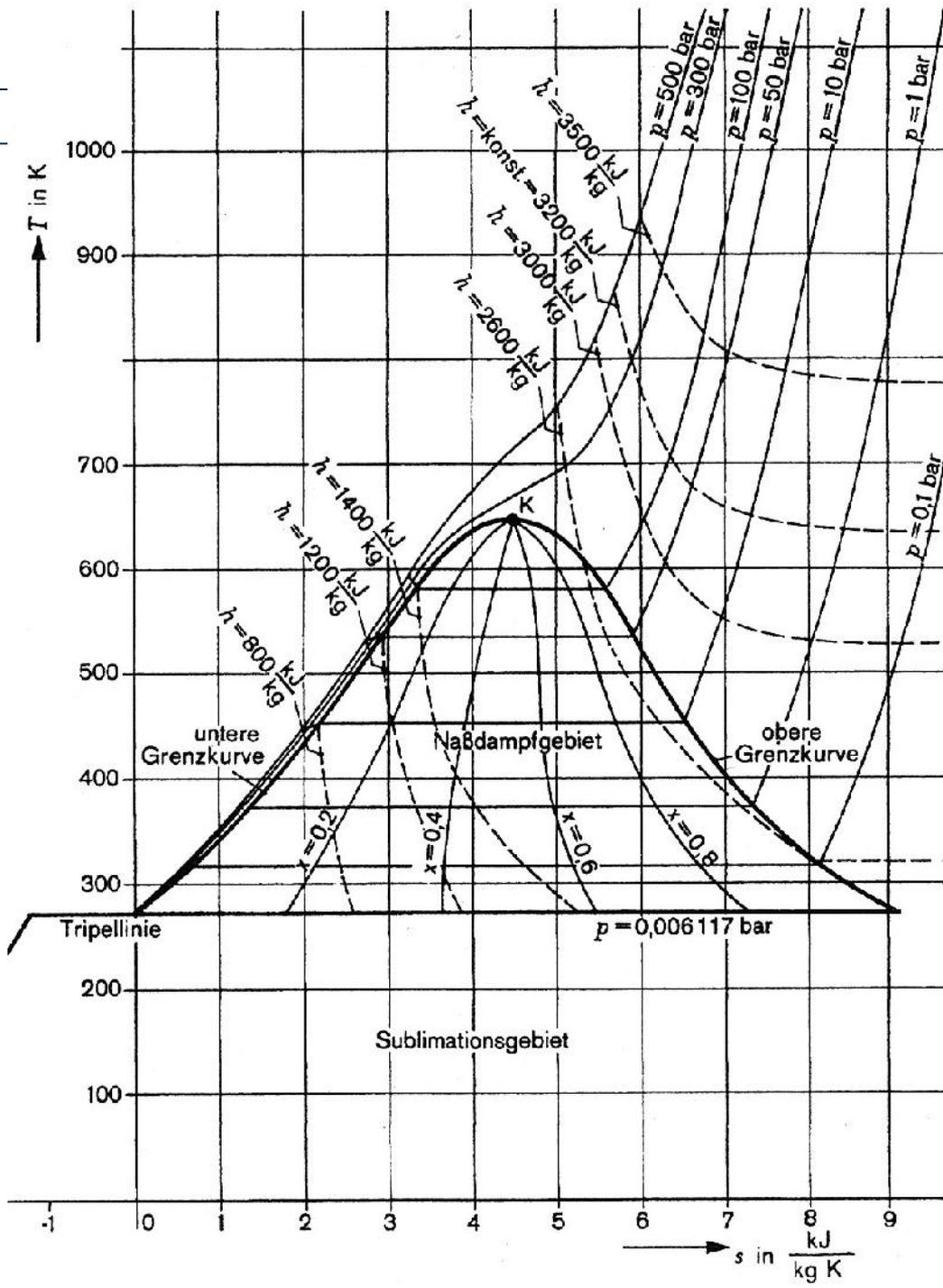


[www.wikipedia.de]

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

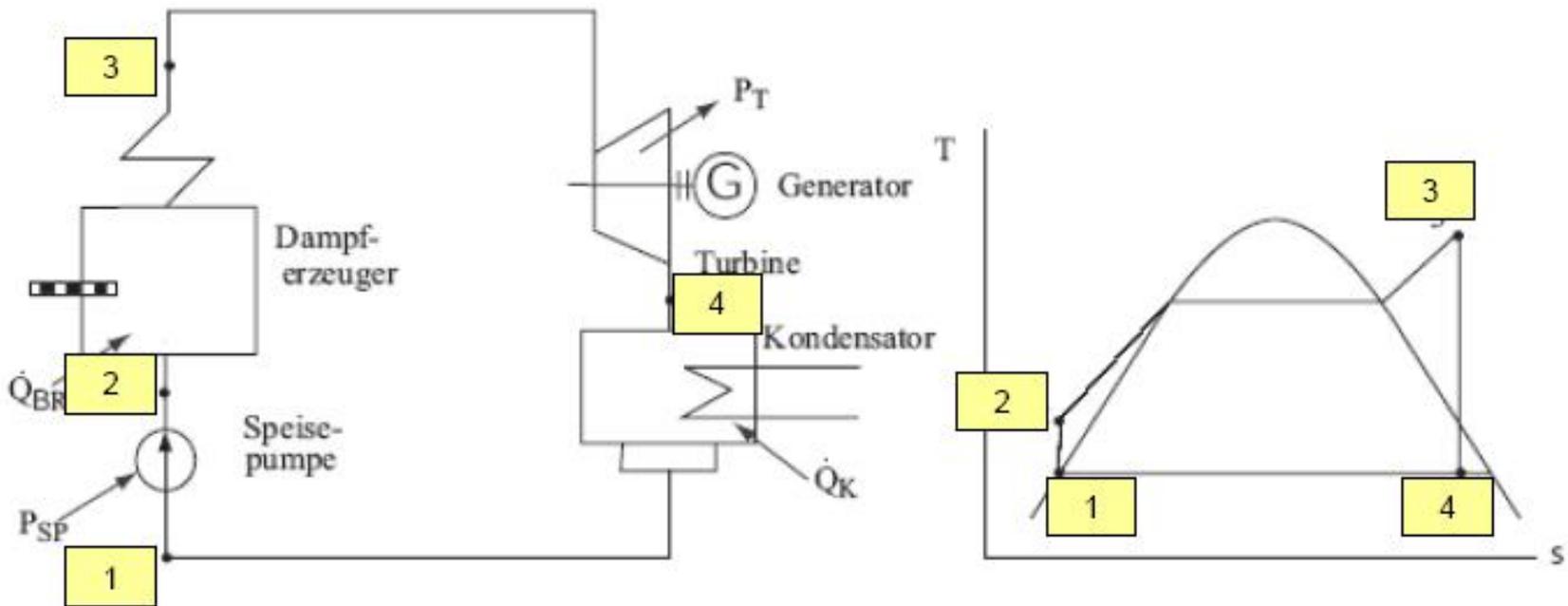






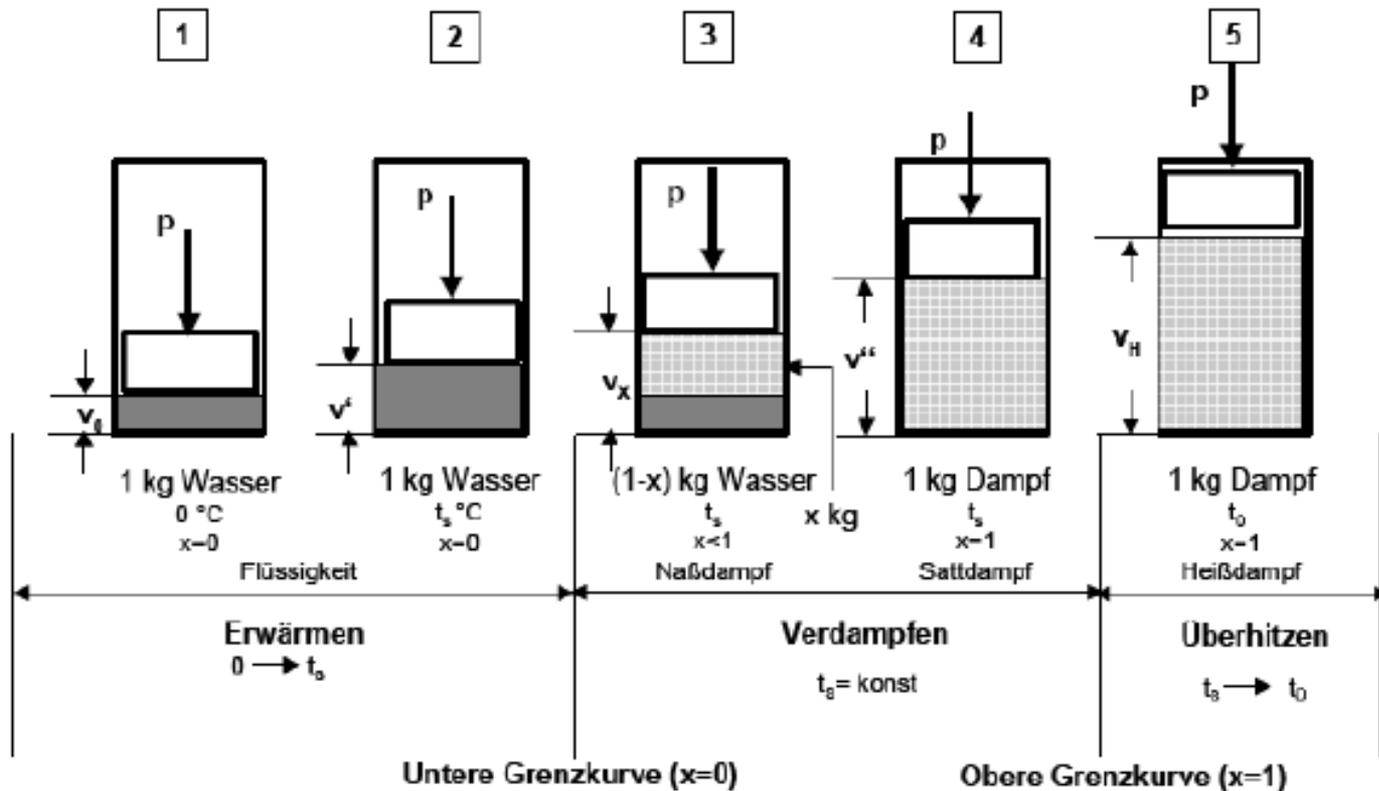
Zustandsänderungen für Wasser / Dampf

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



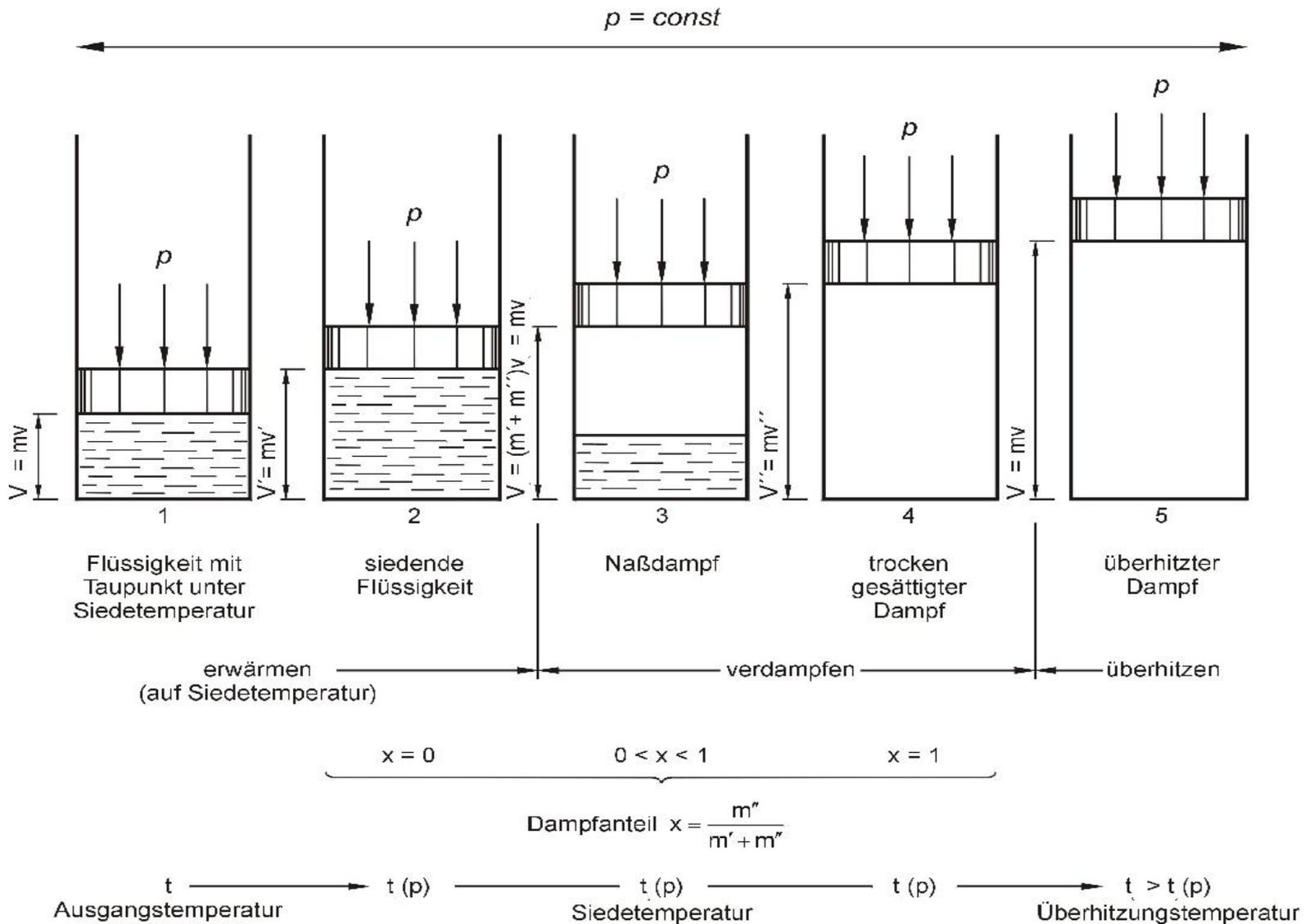
Verdampfung bei konstantem Druck

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

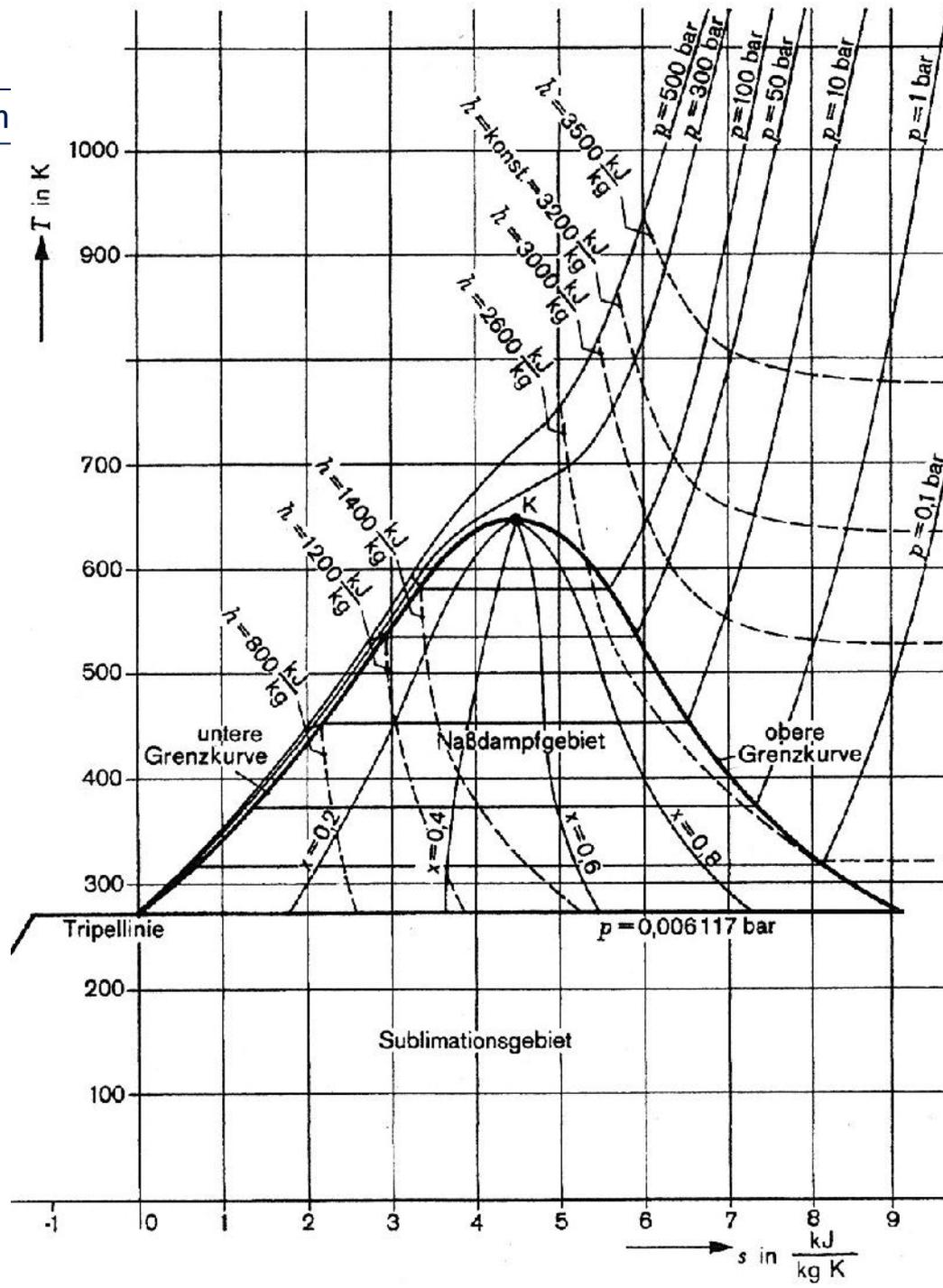
entsteht aus Sattdampf, der bei konstantem Druck weiter erhitzt wird. Überhitzter Dampf ist nicht mehr gesättigt.

Der kritische Punkt

Druckabhängigkeit der Dichte von Wasser und Dampf

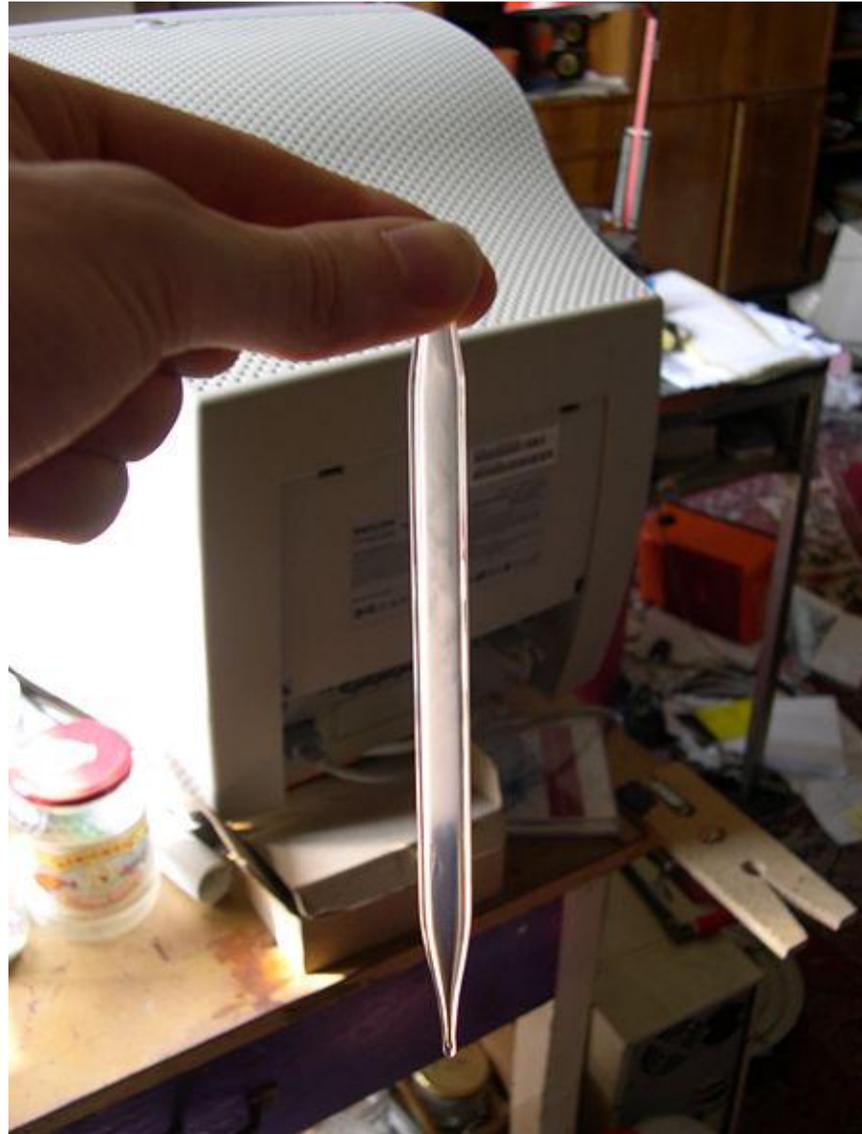
Kesseldruck bar	Sättigungstemperatur °C	Dichte kg/m ³		Dichteverhältnis
		Wasser	Sattdampf	
65	280	751	33	22,7 : 1
130	329	640	88,5	7,3 : 1
200	364	502	162	3,1 : 1
225	374	315	315	1,0 : 1





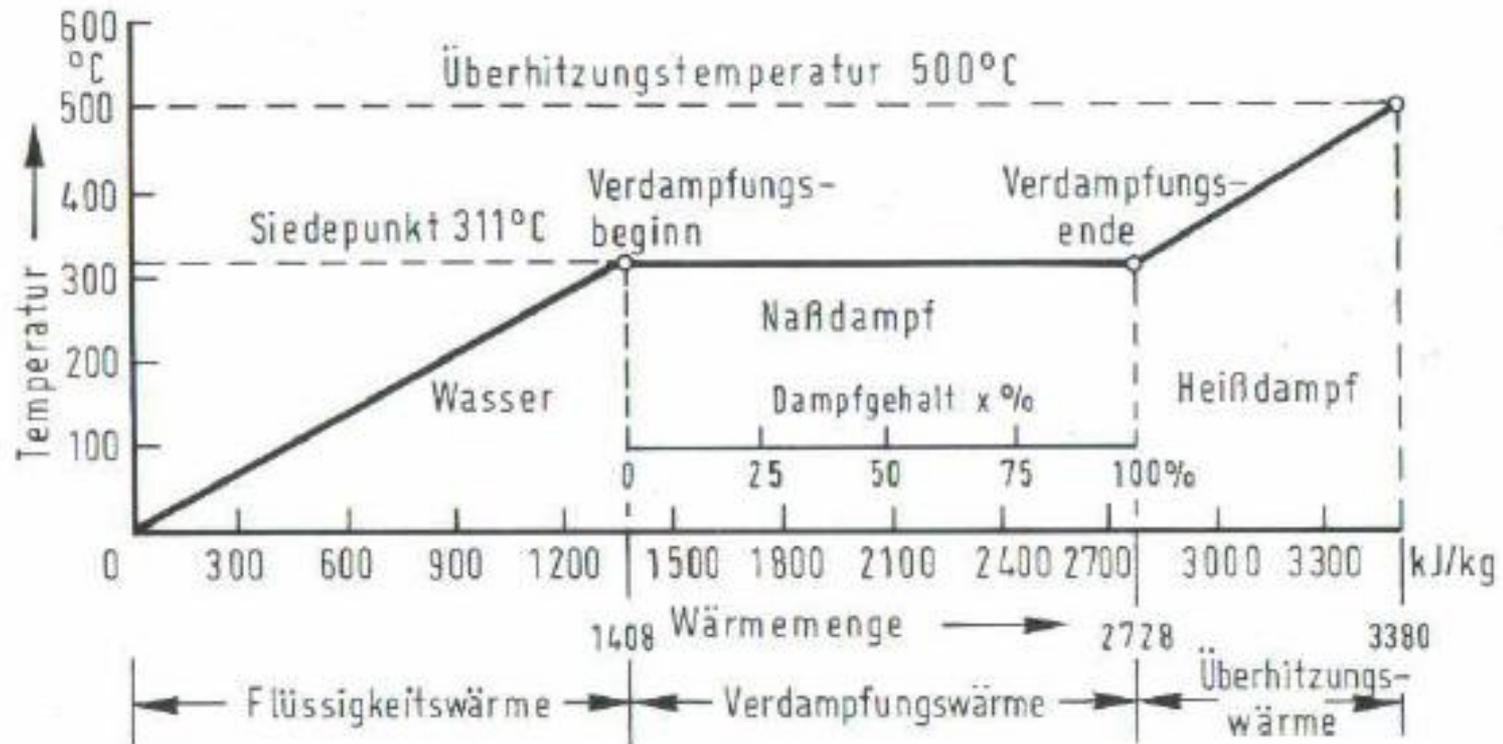
Der Übergang in einen überkritischen Zustand lässt sich an CO₂ beobachten, das in einem dickwandigen Rohr aus Quarzglas unter Druck eingeschlossen ist. Die kritische Temperatur von CO₂ beträgt 31,0 °C, der kritische Druck 73,8 bar.

Bei einer Temperatur unter 31 °C ist das Rohr zum Teil mit flüssigem CO₂, zum anderen Teil mit gasförmigem CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂. Beim Abkühlen tritt wieder kurzzeitig Nebel auf, bevor sich das CO₂ in eine flüssige und eine gasförmige Phase teilt.



[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

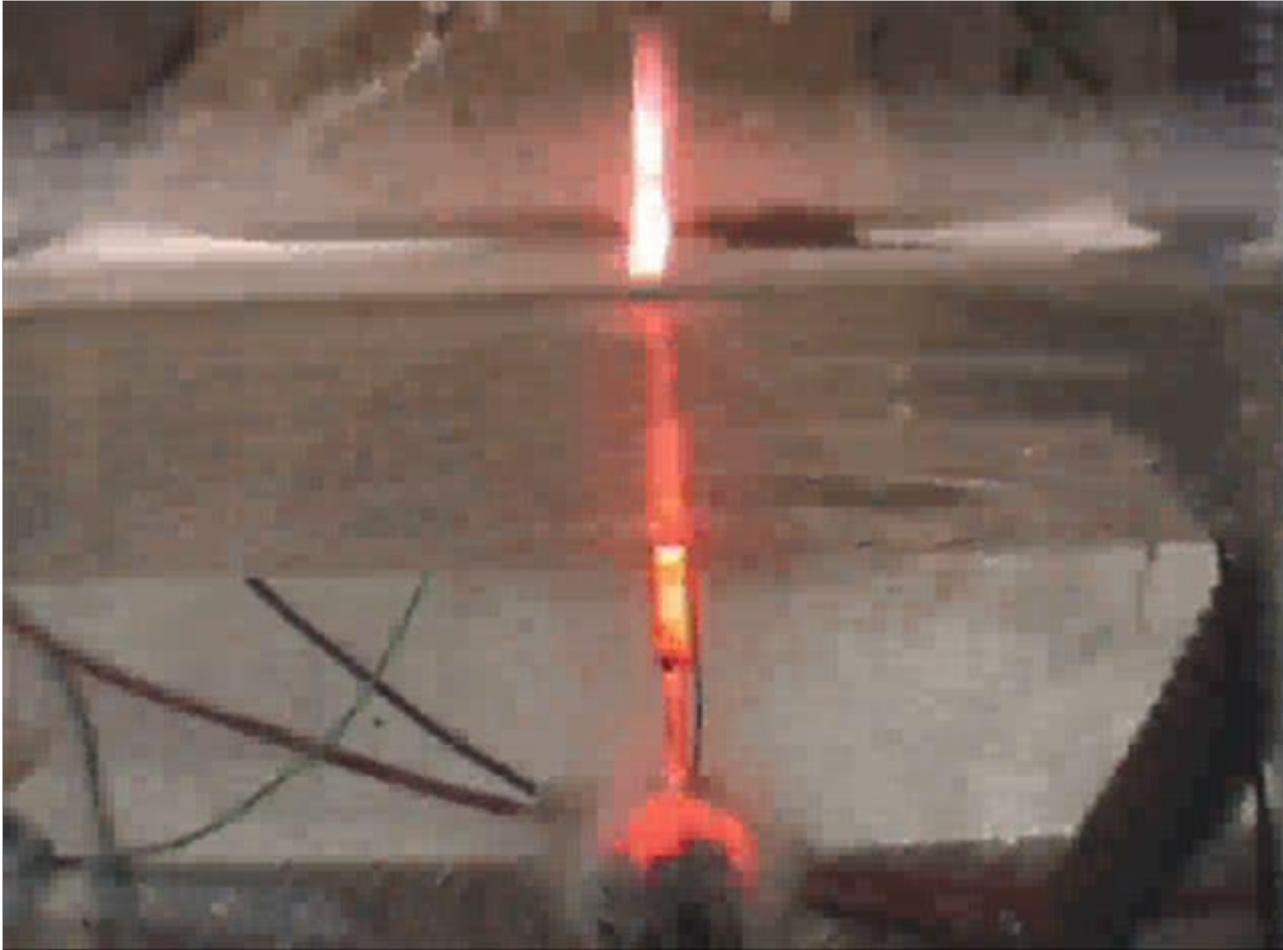
Es bilden sich Blasen an Siedekeimen, die Wand wird ausreichend benetzt, die Fluide vermischen sich gut damit ist der Wärmeübergang sehr gut.

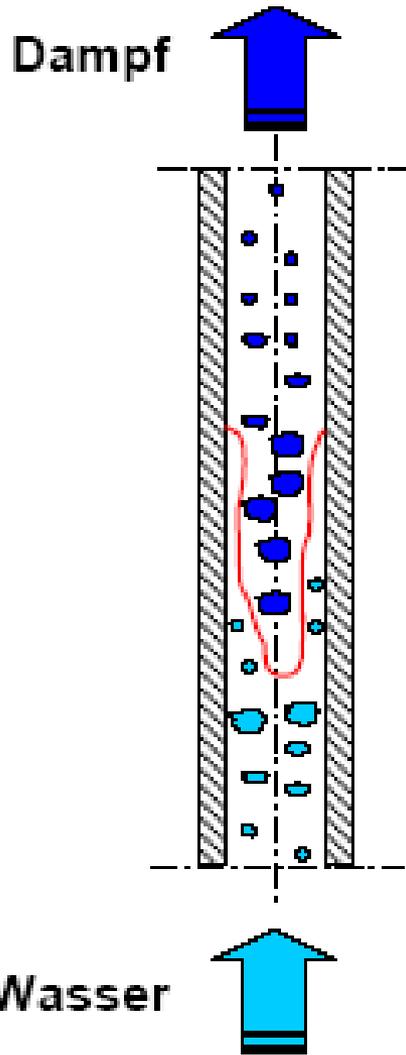
Filmsieden: Form der Verdampfung bei sehr hohen Wärmestromdichten.

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.**

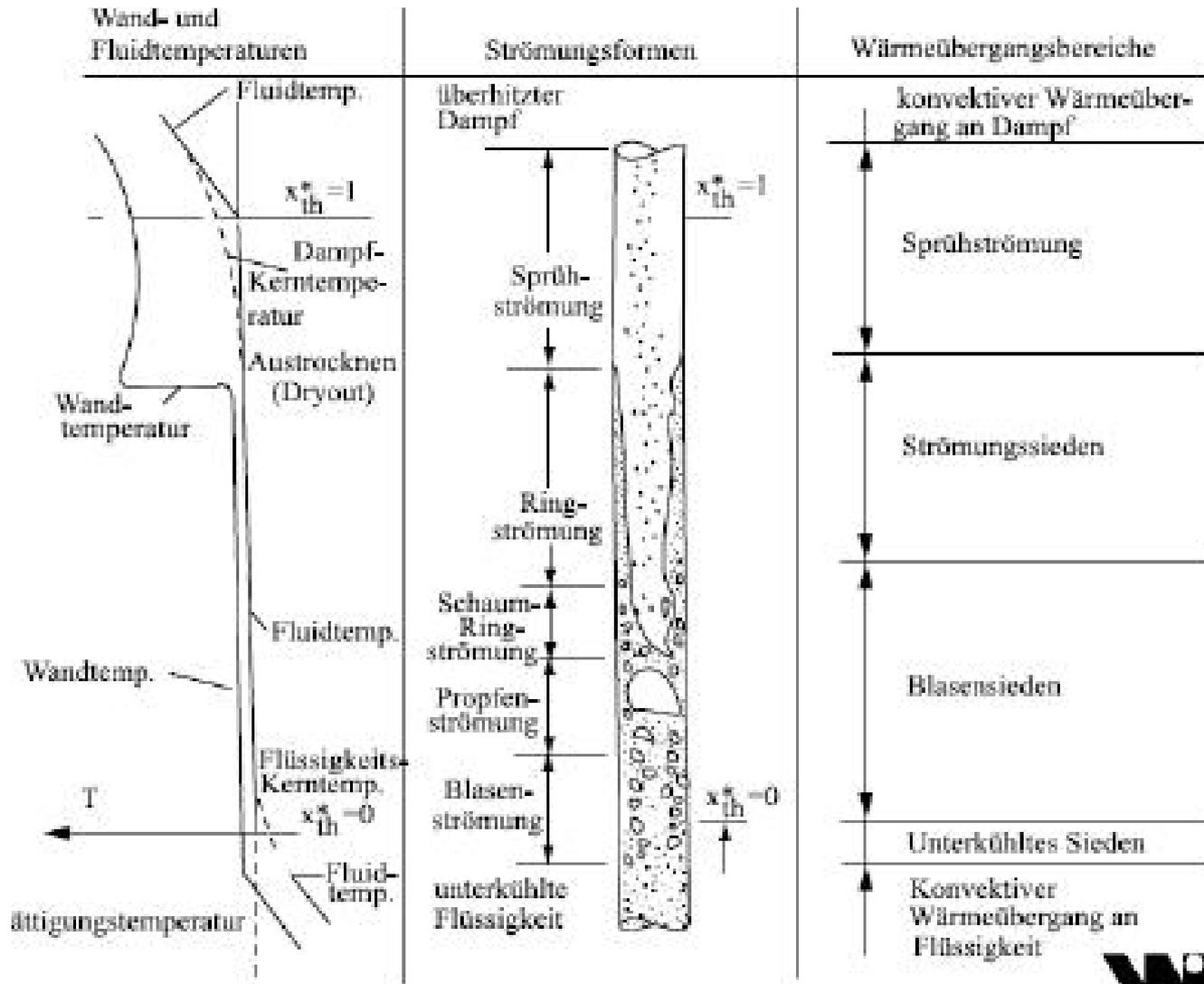
In technischen Anwendungen muss daher darauf geachtet werden, dass die Wärmestromdichten deutlich unter dem Umschlagpunkt vom Blasen- und Filmsieden liegen. Für das Medium Wasser liegt die kritische Wärmestromdichte bei etwa 1000 kW/m^2 . **Dampfkessel werden daher so ausgelegt, dass eine Wärmestromdichte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



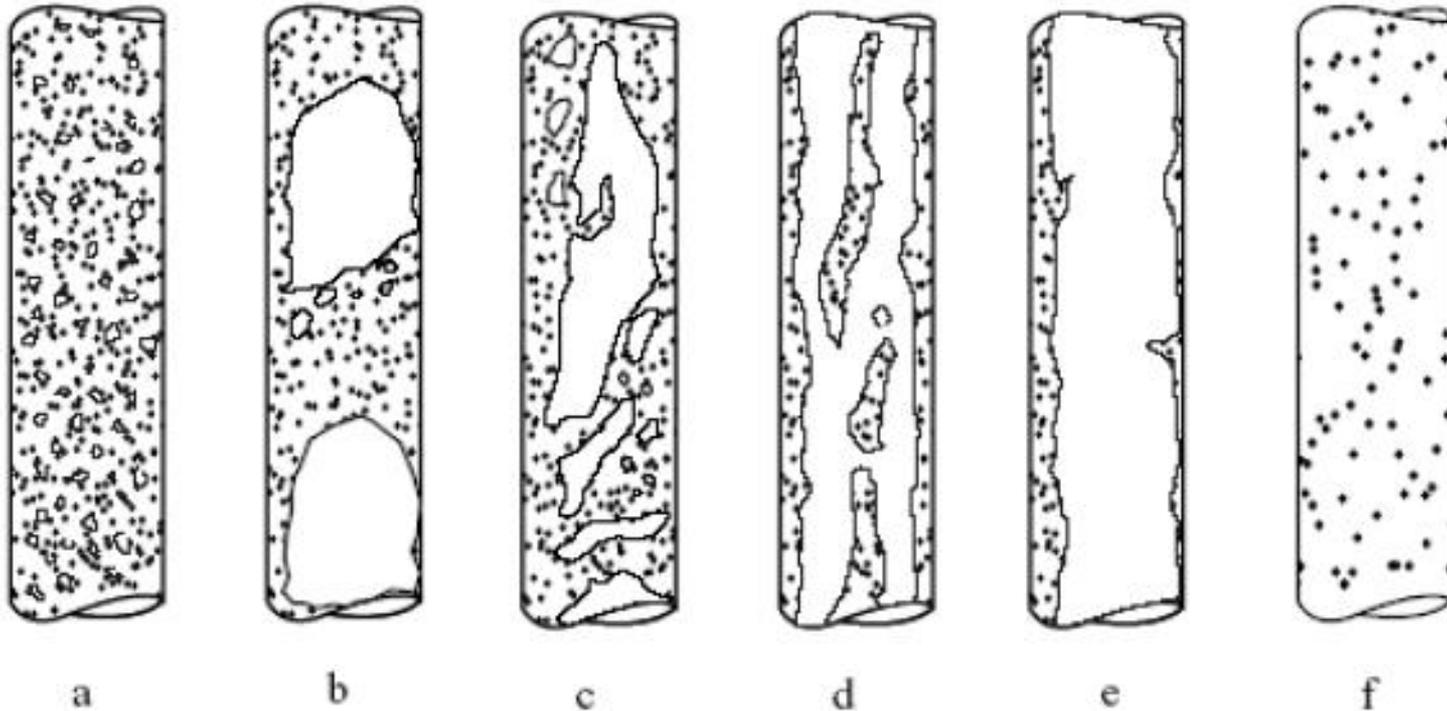


Strömungsform	Wärmeübertragungsbereich
Einphasige Dampfströmung	Konvektiver Wärmeübergang zum Dampf
Tropfenströmung	Post-Dryout-Bereich
Ringströmung mit Wassermitriß	Konvektiver Wärmeübergang durch den Wasserfilm
Ringströmung	Konvektiver Wärmeübergang durch den Wasserfilm
Kolbenblasenströmung	Sieden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

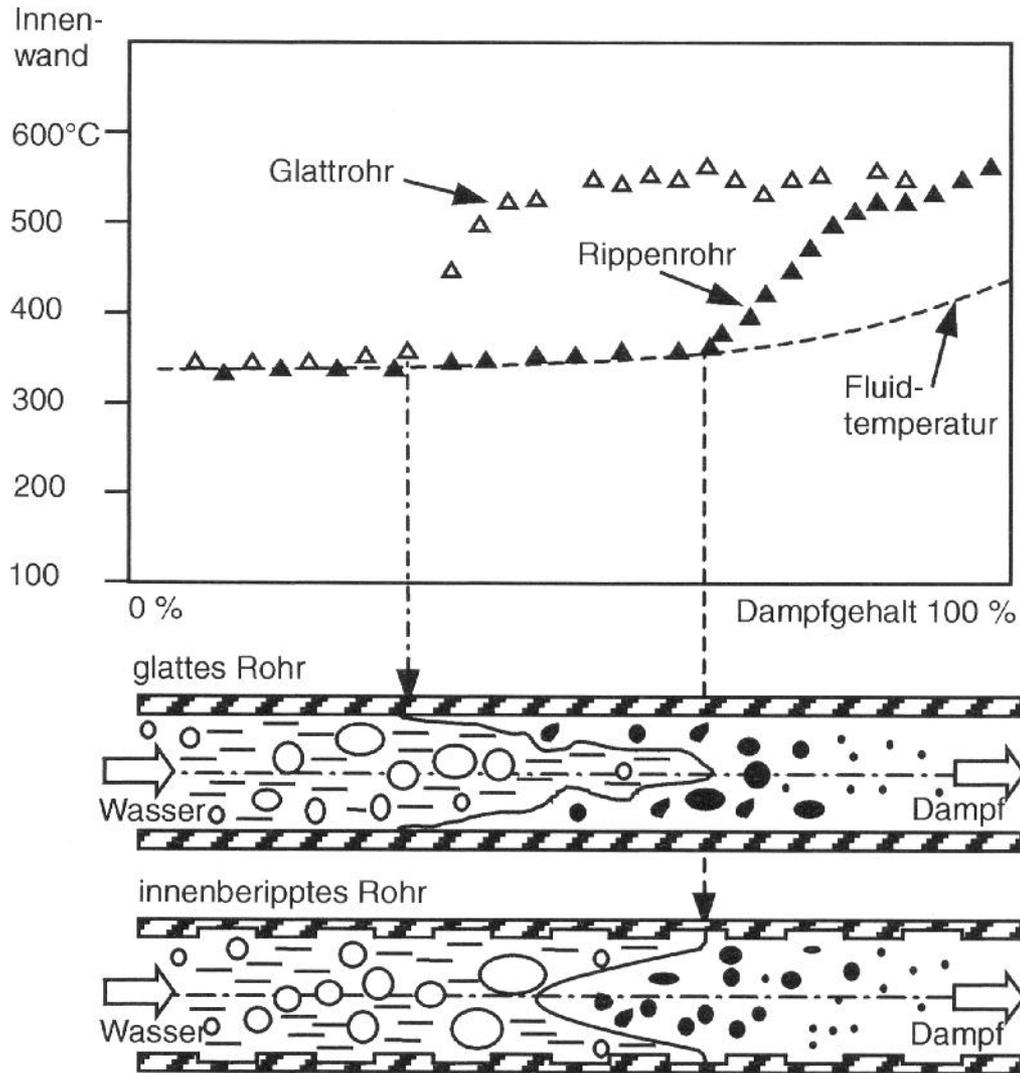
Siedekrise

- **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

