



Deutschland soll bis 2025 klimaneutral werden

<https://unsplash.com/de/fotos/windrader-auf-grunem-raesenfeld-unter-blau-weissem-wolkenhimmel-tagsuber-Z7JWtvFVeEM>

NEW - Thermische Verfahrenstechnik

- 
1. Vorstellung, Organisatorisches
 2. Einführung: TVT im Studiengang NEW
 3. **Grundoperationen (Unit Operations)**
 - 3.1 Verdampfen/Kondensieren (Grundlagen, Apparate, Beispiel)
 - 3.2 Destillation (Grundlagen, Apparate, Beispiel)
 - 3.3 Absorption/Gaswäsche (Grundlagen, Apparate, Beispiel)
 - 3.4 Adsorption (Grundlagen, Apparate, Beispiel)
 4. **Chemische Reaktionstechnik**
 - 4.1 Chemische Thermodynamik
 - 4.2 Kinetik
 - 4.3 Reaktoren

Übungen

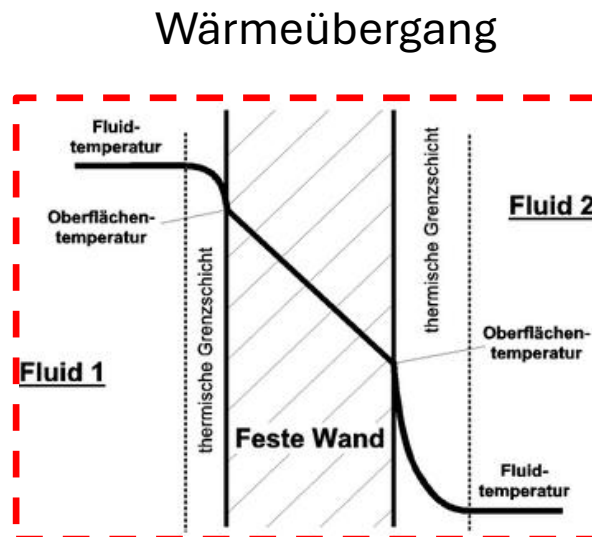
3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

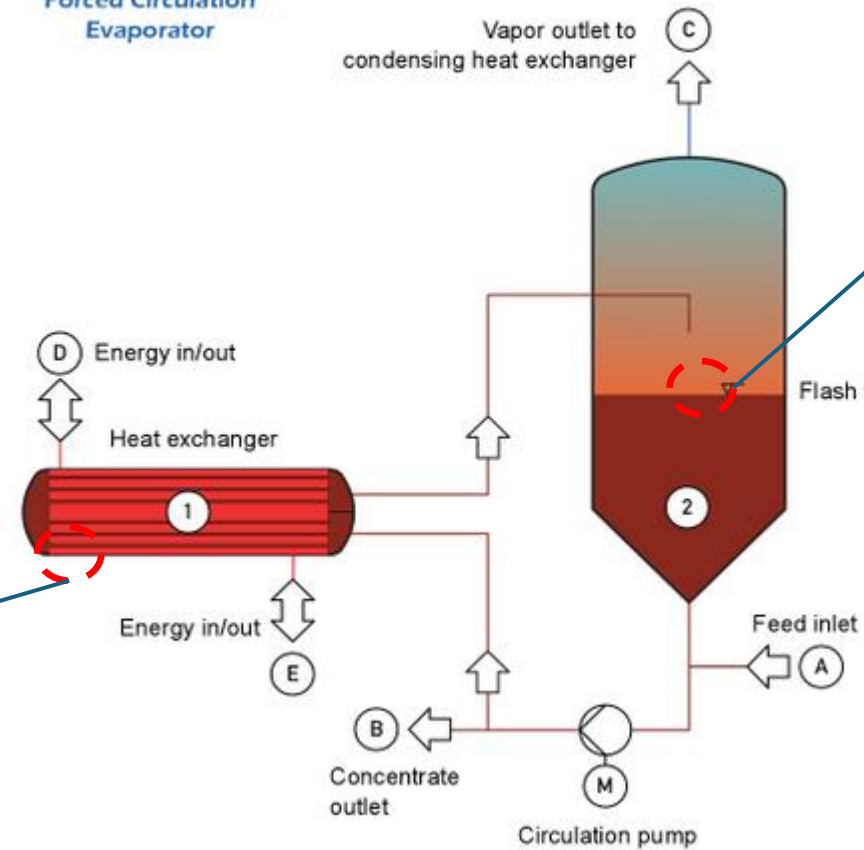
Welche Grundlagen werden benötigt?

→ Was ist das Ziel?

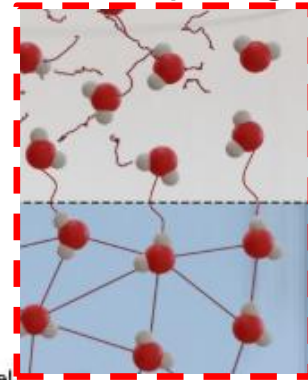
→ Welche Aufgabenstellungen sind zu lösen?



schulz partner
verfahrenstechnik GmbH
**Forced Circulation
Evaporator**



**Dampf/
Verdampfung**



3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

3.1.1 Dampf / Verdampfung

Was versteht man unter Verdampfung?

Physikalischer Prozess bei dem ein oder mehrere Stoffe bei Siedetemperatur von der flüssigen Phase in die Gasphase übergehen.

Abgrenzungen:

- Der Phasenübergang von flüssig nach gasförmig unterhalb der Siedetemperatur nennt man Verdunstung oder Verflüchtigung
- Der Phasenübergang von fest zu gasförmig nennt man Sublimation

Was geschieht bei der Verdampfung?

Moleküle mit ausreichend Energie, um die Kohäsionskräfte und die Oberflächenspannung in der Flüssigkeit zu überwinden, verlassen die Flüssigkeit und gehen in die Gasphase über.

- Die dabei mitgenommene Energie nennt man Verdampfungswärme
- Die Flüssigkeit gibt Moleküle mit hoher Energie an die Gasphase ab, so dass sich die fehlende Energie als Verdunstungskälte bemerkbar macht.
- Der Druck, den die Moleküle in der Gasphase an die Behälterwand übertragen, nennt man Dampfdruck

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

3.1.1 Dampf / Verdampfung

In der Regel finden Verdampfungen bei konstantem Druck und Temperatur statt. Wobei neben der Verdampfungswärme aufgrund der Volumenzunahme auch Volumenänderungsarbeit erforderlich ist.

→ Der Wärme- und Arbeitsbedarf einer solchen Verdampfung wird durch die Verdampfungsenthalpie ΔH_{Verd} beschrieben. (Verdampfungsenthalpie findet man in thermodynamischen Tabellen gelistet)

$$\Delta H_{\text{Verd}} = \Delta U_{\text{Verd}} + p^* \Delta V$$

Molare Verdampfungsenthalpie:

$$\Delta h_{\text{m},i,\text{Verd}} = \frac{\Delta H_{i,\text{Verd}}}{n_i}$$

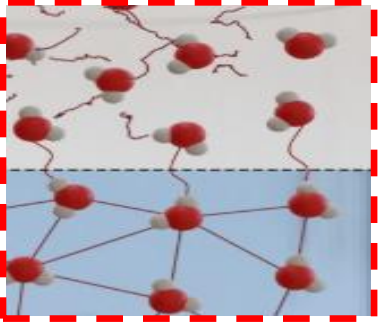
Spezifische Verdampfungsenthalpie

$$\Delta h_{i,\text{Verd}} = \frac{\Delta H_{i,\text{Verd}}}{m_i} = \frac{\Delta h_{\text{m},i,\text{Verd}}}{M_i}$$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

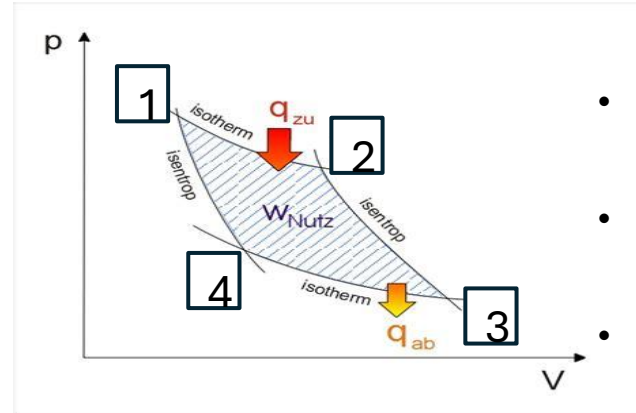
3.1.1 Grundlagen

Verdampfungsprozess

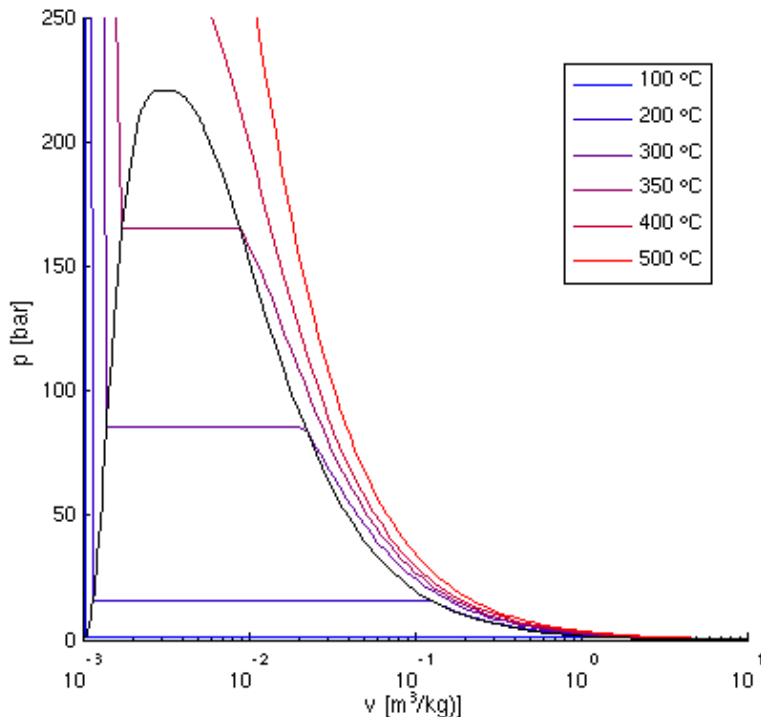


Émile Clapeyron (*1799 bis †1864)

Er formulierte den Carnot-Prozess für einen infinitesimalen kleinen Kreisprozess entlang der Phasengrenze:



- **Isotherme Verdampfung** bei hoher Temperatur $T_1 \rightarrow$ Wärmeaufnahme Q_{zu} , Volumen nimmt stark zu
- **Isentrope Expansion** $\rightarrow$ Temperatur sinkt ohne Wärmeaustausch
- **Isotherme Kondensation** bei niedriger Temperatur $T_2 \rightarrow$ Wärmeabgabe Q_{ab} , Volumen nimmt stark ab
- **Isentrope Kompression** $\rightarrow$ Rückkehr zum Ausgangspunkt



Carnot-Wirkungsgrad (ideale Prozesse) ist definiert:

$$\eta_C = \frac{-w_{Nutz}}{q_{zu}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \Rightarrow \eta_C = \frac{d(-w_{Nutz})}{dq_{zu}} = \frac{dq_{zu} - dq_{ab}}{dq_{zu}} = \frac{dT}{T}$$

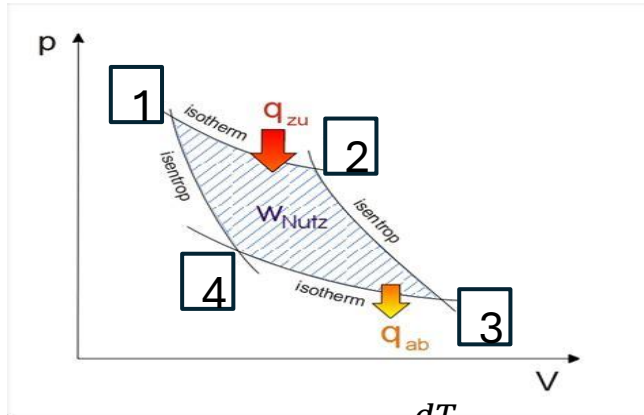
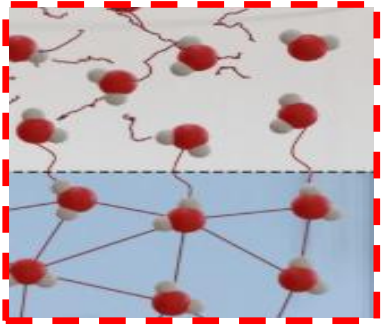
Volumenarbeit: $d(-w_{Nutz}) = (v_g - v_l) dp = \Delta v * dp$

$$d(-w_{Nutz}) = \eta_C * dq_{zu} = \frac{dT}{T} * \Delta h_{m,i,Verd} = \Delta v * dp$$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Verdampfungsprozess (Clausius-Clapeyron Gleichung)



- **Isotherme Verdampfung** bei hoher Temperatur $T_1 \rightarrow$ Wärmeaufnahme Q_{zu} , Volumen nimmt stark zu
- **Isentrope Expansion** $\rightarrow$ Temperatur sinkt ohne Wärmeaustausch
- **Isotherme Kondensation** bei niedriger Temperatur $T_2 \rightarrow$ Wärmeabgabe Q_{ab} , Volumen nimmt stark ab
- **Isentrope Kompression** $\rightarrow$ Rückkehr zum Ausgangspunkt

$$d(-w_{Nutz}) = \eta_C * dq_{zu} = \frac{dT}{T} * \Delta h_{m,i,Verd} = \Delta v * dp$$

Mit $\Delta v \approx v_g = v$ (v_l ist vernachlässigbar) und $v = \frac{R * T}{p}$ (ideales Gas) folgt:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta h_{m,i,Verd}}{T} * \frac{p}{R * T} = \frac{\Delta h_{m,i,Verd} * p}{R * T^2}$$

$$\frac{1}{p} * dp = \frac{\Delta h_{m,i,Verd}}{R} * \frac{1}{T^2} * dT \rightarrow \int \frac{1}{p} * dp = \frac{\Delta h_{m,i,Verd}}{R} * \int \frac{1}{T^2} * dT$$

$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = -\frac{\Delta h_{m,i,Verd}}{R} * \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

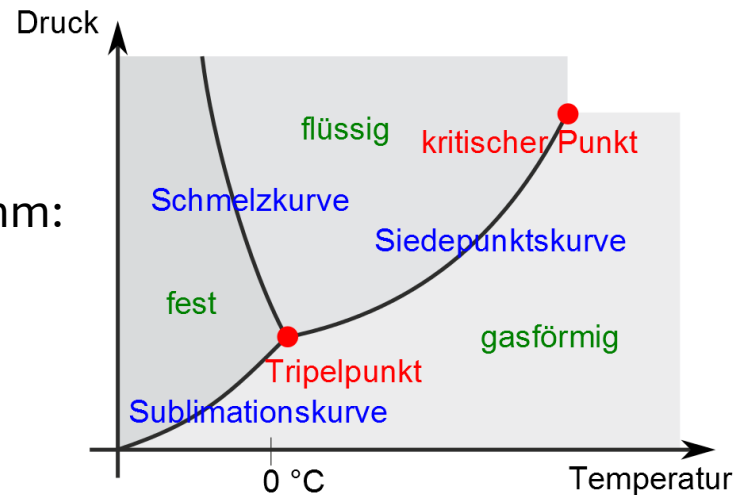
3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Was sollte man verstehen?

Clausius-Clapeyron –Gleichung beschreibt die Steigung der Phasengrenze im pT-Diagramm:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta h_{m,i,Verd}}{T} * \frac{p}{R * T} = \frac{\Delta h_{m,i,Verd} * p}{R * T^2}$$



Wert für Wasser

Schmelzpunkt	101,325 kPa: 0,002519 °C
Siedepunkt	101,325 kPa: 99,974 °C
Tripelpunkt	0,01 °C / 611,655 Pa
kritischer Punkt	373,946 °C / 22,064 MPa / 322 kg/m ³

- Clausius-Clapeyron-Gleichung geht von idealen Stoffen aus
- Berücksichtigt nicht die Temperaturabhängigkeit der Verdampfungswärme
- Gilt prinzipiell auch für Sublimations- und Schmelzkurve
- Je größer der Abstand zum Referenzpunkt ist, desto größer wird der Fehler

Was sind typische Stolpersteine in der Anwendung:

- Temperatur immer in Kelvin einsetzen
- $\Delta h_{m,i,Verd}$ in J/mol und nicht in kJ einsetzen
- Vorzeichenfehler bei $(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})$
- Näherung gilt nicht über große Temperaturbereiche

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Was ist, wenn die Clausius-Clapeyron-Gleichung zu ungenaue Ergebnisse liefert?

Man kann auf die **empirische Antoine-Gleichung** zurückgreifen, die in Tabellenwerken zu finden ist und den Zusammenhang zwischen Dampfdruck und Temperatur beschreibt:

$$\lg p = A - \frac{B}{C + T}$$

p: Dampfdruck (oft in mmHg, bei älteren Tabellen oder bar je nach Definitionen)

T: Temperatur in °C (auch hier sollten die Definitionen beachtet werden)

A,B,C: Konstanten, die stoffspezifisch und temperaturbereichsspezifisch experimentell ermittelt werden

→ Empirische Antoine-Gleichung liefert im zulässigen Anwendungsbereich genauere Dampfdruckwerte als die Clausius-Clapeyron-Gleichung

Warum ist das so?

- Clausius-Clapeyron setzt temperaturunabhängige Verdampfungsenthalpien $\Delta h_{m,i,Verd}$ voraus
- Das Gas wird als ideal angenommen
- Das Flüssigkeitsvolumen wird vernachlässigt

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Beispiel: Wasser

Wie groß ist der Dampfdruck von Wasser bei 120°C?

Antoine-Gleichung

Für den Temperaturbereich von 100 bis 374°C werden folgende Werte in der Literatur gefunden:

$$A = 8,14019; \quad B = 1810,94; \quad C = 244,485$$

$$\lg p = 8,14019 - \frac{1810,94}{244,485 + 120} = 3,1717$$

$$p = 1484,9 \text{ mmHg} = 1,980 \text{ bar}$$

Clausius-Clapeyron liefert

$$\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = - \frac{40,7 \text{ kJ/mol}}{8,314} * \left(\frac{1}{393} - \frac{1}{373} \right)$$
$$= 1,950 \text{ bar}$$

Die **Dampfdrucktabelle** liefert:

$$P (120^\circ\text{C}) = 1,9854 \text{ bar}$$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

1. Aufgabe

Der Dampfdruck von Wasser beträgt bei 100°C $p = 1$ bar. Berechne den Dampfdruck bei 90°C

Gegeben sind: $\Delta h_{m,i,Verd} = 40,7$ kJ/mol; allgemeine Gaskonstante $R = 8,314$ J/(mol*K)

Lösung:
$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = -\frac{407000 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/(mol*K)}} * \left(\frac{1}{363} - \frac{1}{373}\right) = -0,39155$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 0,697 \quad \rightarrow p_2 = 0,697 \text{ bar}$$

2. Aufgabe

Berechne die Verdampfungsenthalpie aus zwei Messpunkten:

Gegeben sind: $T_1 = 320$ K bei $p_1 = 0,50$ bar; $T_2 = 350$ K bei $p_2 = 1,20$ bar

Lösung:
$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = -\frac{\Delta h_{m,i,Verd}}{R} * \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \rightarrow \Delta h_{m,i,Verd} = -\frac{R * \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} = -\frac{8,314 * \ln\frac{1,2}{0,5}}{\frac{1}{350} - \frac{1}{320}}$$

$$\rightarrow \Delta h_{m,i,Verd} = 27173 \text{ J/mol}$$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

3. Aufgabe

Berechne mit Hilfe der Clausius-Clapeyron-Gleichung die Dampfdrücke von Wasser bei $T = 80^\circ\text{C}$ und bei 40°C .

Gegeben ist: $\Delta h_{m,i,Verd} = 40,7 \text{ kJ/mol}$ und $R = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

Zum Vergleich: Berechne mittels der Antoine-Gleichung diese Dampfdrücke.

Gegeben sind die Konstanten: $A = 8,07131$; $B = 1730,63$; $C = 233,426$

Hinweis: Antoine-Gleichung rechnet p in mmHg und T in $^\circ\text{C}$

Lösung:

$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = -\frac{\Delta h_{m,i,Verd}}{R} * \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Es fehlt offensichtlich ein Datenpaar (Druck und Temperatur), um die gesuchten Drücke zu berechnen.

→ Wir können als Referenzdaten den Dampfdruck von Wasser bei 100°C verwenden ($p(100^\circ\text{C}) = 1 \text{ bar}$)

$$\ln\left(\frac{p_2}{1 \text{ bar}}\right) = -\frac{407000 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{373,15}\right)$$

Bei 80°C ($=353,15 \text{ K}$): $p(80) = 0,476 \text{ bar}$

Bei 40°C ($=313,15 \text{ K}$): $p(40) = 0,0810 \text{ bar}$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

3. Aufgabe (Fortsetzung)

Berechne mit Hilfe der Clausius-Clapeyron-Gleichung die Dampfdrücke von Wasser bei $T = 80^\circ\text{C}$ und bei 40°C .

Gegeben ist: $\Delta h_{m,i,\text{Verd}} = 40,7 \text{ kJ/mol}$ und $R = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

Zum Vergleich: Berechne mittels der Antoine-Gleichung diese Dampfdrücke.

Gegeben sind die Konstanten: $A = 8,07131$; $B = 1730,63$; $C = 233,426$

Hinweis: Antoine-Gleichung rechnet p in mmHg und T in $^\circ\text{C}$

Lösung:
$$\lg p(80^\circ\text{C}) = A - \frac{B}{C+T} = 8,07131 - \frac{1730,63}{233,426+80} = 2,550 \rightarrow p(80^\circ\text{C}) = 0,473 \text{ bar}$$

$$\lg p(40^\circ\text{C}) = 8,07131 - \frac{1730,63}{233,426+40} = 1,742 \rightarrow \lg p(40^\circ\text{C}) = 0,0736 \text{ bar}$$

Kommentar:

Bei 80°C liegt Clausius-Clapeyron recht gut, da sich der Zustandspunkt in der Nähe der Referenz.

Bei 40°C ist die Abweichung größer, weil

- die Verdampfungswärme größer ist als bei 100°C

- das Gas sich weniger ideal verhält

- die Integration mit konstanter Verdampfungswärme gemacht wurde

Diskussion:

Temperatur	$p_{\text{Clausius}}/\text{bar}$	$p_{\text{Antoine}}/\text{bar}$	$p_{\text{Dampfdrucktab.}}/\text{bar}$	Abweichung „Clausius“	Abweichung „Antoine“
80°C	0,476	0,473	0,4736	+0,5%	-0,13%
40°C	0,0810	0,0736	0,0737	+9,9%	-0,14%

3.1 Verdampfen / Kondensieren

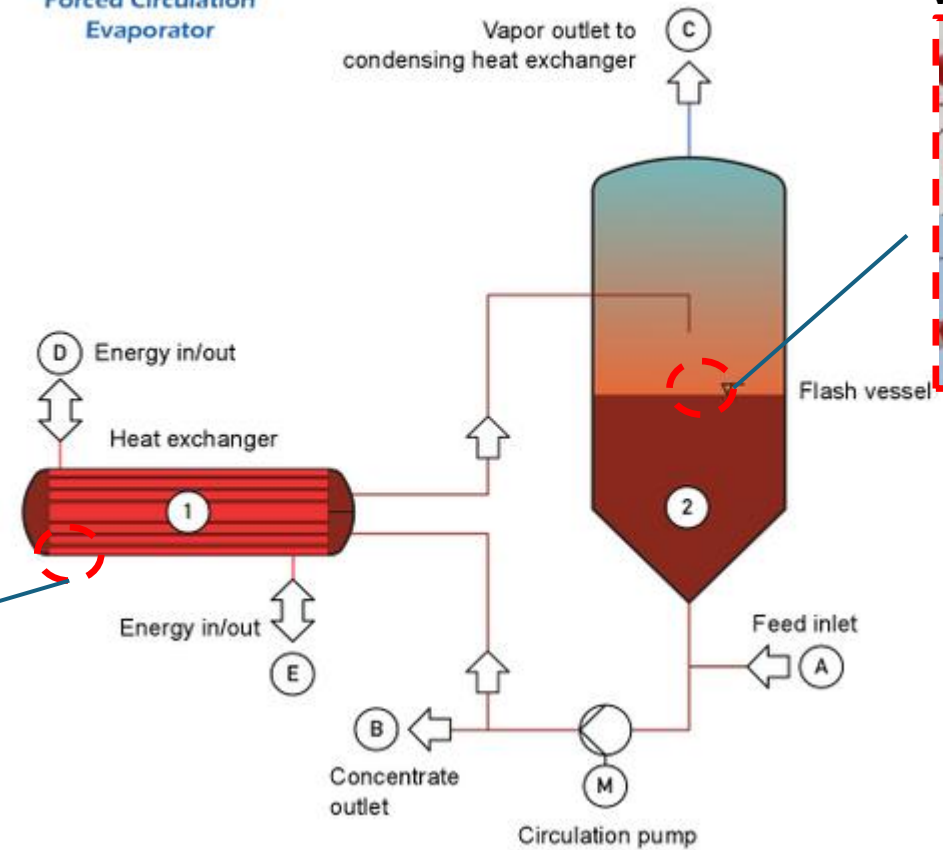
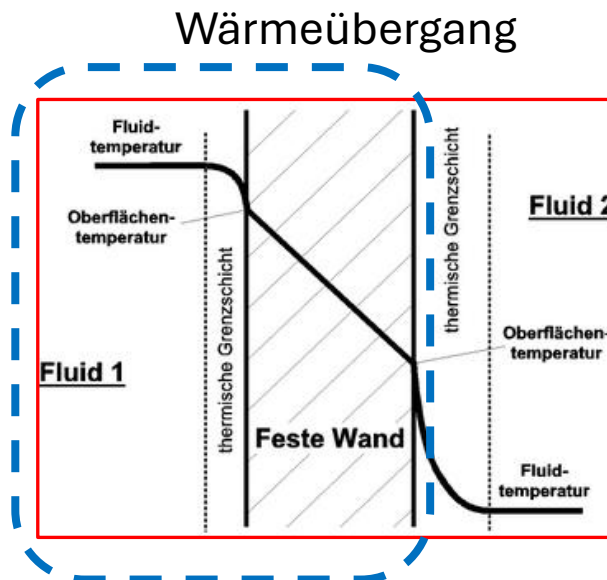
3.1.1 Grundlagen

Welche Grundlagen werden benötigt?

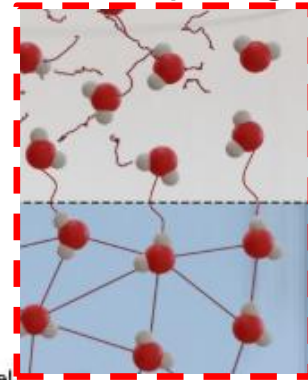
→ Was ist das Ziel?

→ Welche Aufgabenstellungen sind zu lösen?

schulz partner
verfahrenstechnik GmbH
**Forced Circulation
Evaporator**



**Dampf/
Verdampfung**



3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

3.1.2 Wärmeübertragung

Wärmeübertragung

```
graph TD; A[Wärmeübertragung] --> B[Wärmeleitung]; A --> C[Konvektion]; A --> D[Wärmestrahlung];
```

Wärmeleitung

Wärmetransport im atomaren bzw. molekularen Bereich.

In der Regel wird das Transportmedium als homogen und isotrop angenommen.

Bei eindimensionaler, stationärer Wärmeleitung in Richtung des Wärmestroms gilt die 1.

Fouriersche Gleichung für Wärmeleitung:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dz}$$

Mit: $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$ Wärmestromdichte

A Wärmeaustauschfläche; λ Wärmeleitfähigkeit bzw. -koeffizient

Konvektion

Wärmetransport durch Bewegung von Material. Beispielsweise in strömenden Fluiden. (→ Fluidodynamik)

Man unterscheidet freie Konvektion aufgrund von Dichteunterschieden und erzwungene Strömung z.B. durch Pumpen oder Rühren.

Der Wärmeübergang von einem Feststoff auf ein Fluid und umgekehrt wird maßgeblich durch eine laminare Grenzschicht (Prandtlsche Grenzschicht) beeinflusst.

Wärmestrahlung

Wärmestrahlen sind elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 0,8 μm bis 0,8 mm.

Feststoffe, Flüssigkeiten oder Gase können Wärme in Form von Strahlung absorbieren, reflektieren oder durchlassen.

In der Technik wird die Wärmestrahlung erst ab einer Temperatur $T > 500^\circ\text{C}$ für die Berechnung relevant.

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Wärmeleitung durch eine ebene Wand

$$\dot{Q} = -\lambda * A * \frac{dT}{dz}$$

Für eine konstante Austauschfläche ergibt sich:

$$\int_1^2 \dot{Q} dz = \int_1^2 -\lambda * A * dT$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} * A * (T_1 - T_2)$$

Mit $s = z_2 - z_1$

Wärmeleitung durch ein Rohr

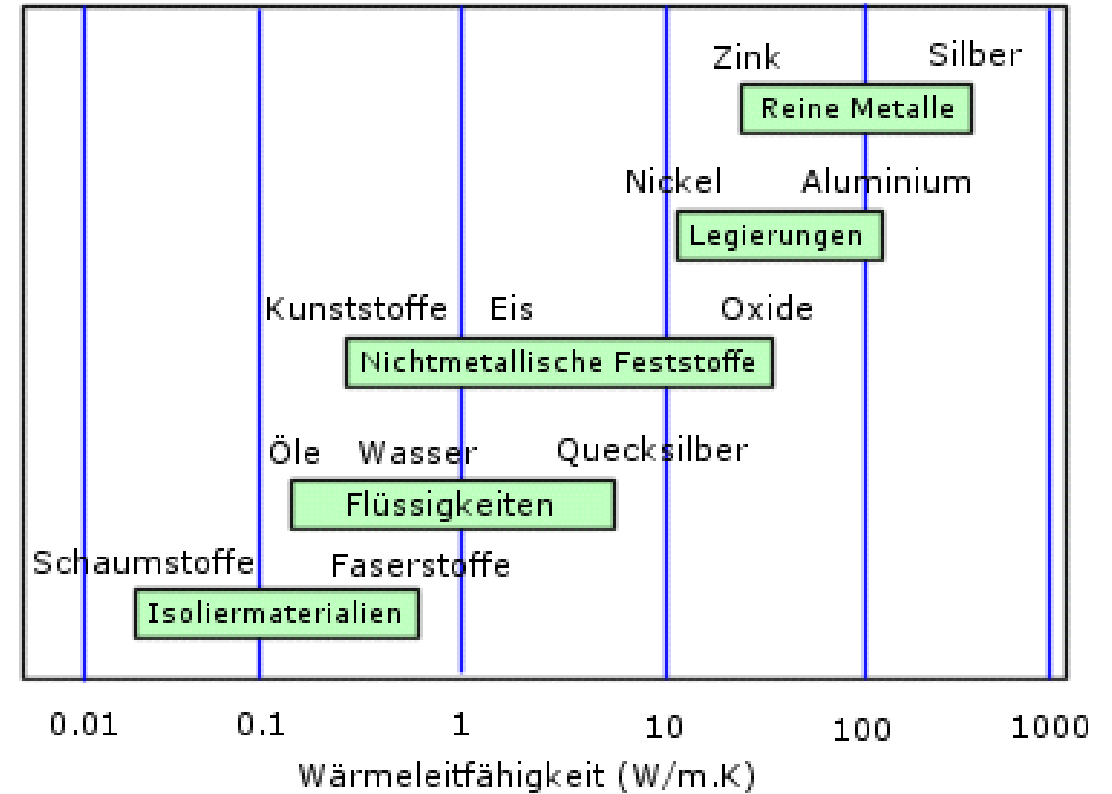
Beim Rohr ändert sich die Wärmeaustauschfläche in Abhängigkeit vom Radius:

$$A = 2 * r * \pi * L$$

$$\dot{Q} = -\lambda * 2 * r * \pi * L * \frac{dT}{dr}$$

→

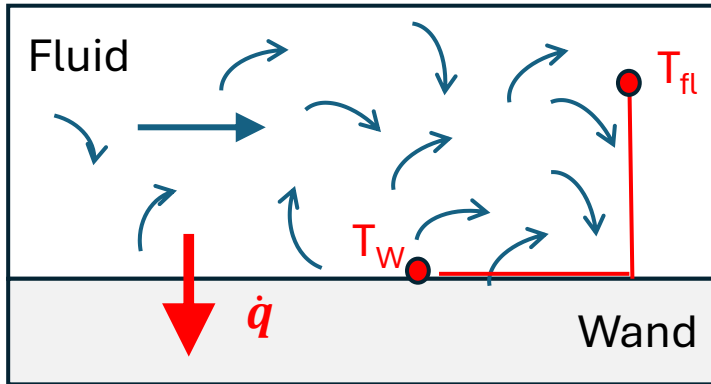
$$\dot{Q} = \lambda * \frac{2 * \pi * L}{\ln \frac{r_a}{r_i}} * (T_i - T_a)$$



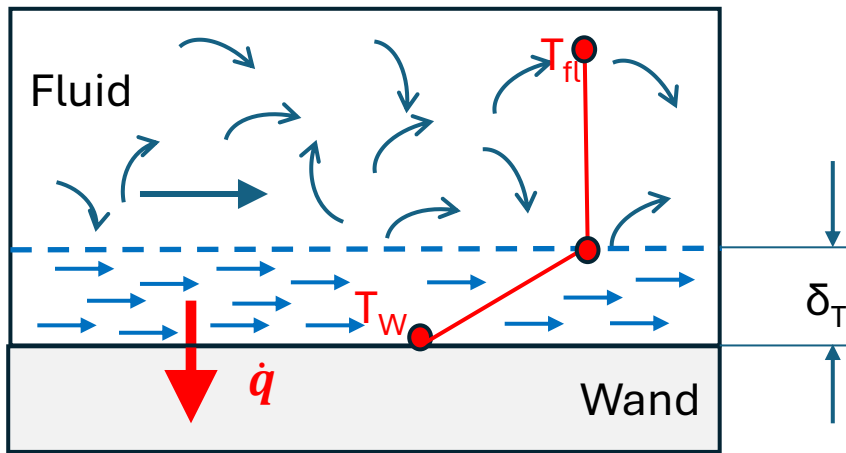
3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Konvektion



Idealisierter Temperaturverlauf



Temperaturverlauf mit thermischer
Grenzschicht δ_T (Prandtl 1910)

Der Wärmeübergang eines bewegten Fluids mit einer mittleren Temperatur T_{fl} an eine feste Wand mit der Temperatur T_w wird definiert als:

$$\dot{Q} = \alpha * A * (T_{fl} - T_w)$$

Mit α : Wärmeübergangskoeffizient

Ist die Fluidtemperatur entlang der Wandfläche A nicht konstant, wie beispielsweise bei Wärmetauschern mit einer Eintrittstemperatur T_α und einer Austrittstemperatur T_ω , dann ist mit einer logarithmischen Temperaturdifferenz zu rechnen.

Für eine konstante Wandtemperatur T_w ist die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ΔT_{lm} definiert als:

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_\alpha - T_\omega}{\ln \frac{T_w - T_\omega}{T_w - T_\alpha}}$$

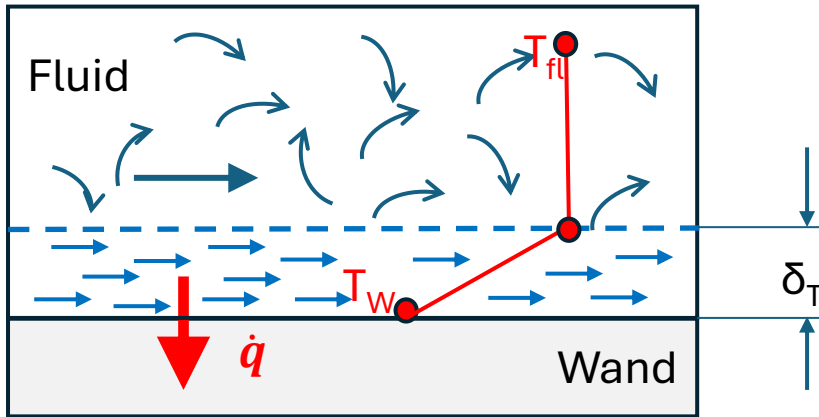
Somit ergibt sich für den Wärmestrom $\dot{Q}$:

$$\dot{Q} = \alpha * A_{ges} * \Delta T_{lm}$$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Konvektion



Temperaturverlauf mit thermischer
Grenzschicht δ_T

Somit folgt mit Hilfe der Definitionsgleichung für den Wärmeübergang

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \alpha * A * (T_{fl} - T_w) \\ \alpha * A * (T_{fl} - T_w) &= \frac{\lambda}{\delta_T} * A * (T_{fl} - T_w) \\ \alpha &= \frac{\lambda}{\delta_T}\end{aligned}$$

Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α ist nun auf die Bestimmung der thermischen Grenzschicht δ_T und der Wärmeleitfähigkeit λ zurückgeführt.

Wie groß ist der Wärmeübergangskoeffizient α ?

Angenommen, der gesamte Wärmestrom wird nur durch die Wärmeleitung in der Grenzschicht übertragen, so ergibt sich aus

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{s} * A * (T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta_T} * A * (T_{fl} - T_w)$$

In der Strömungslehre ist es vorteilhaft, die Erkenntnisse aus einer Strömungssituation mittels der Ähnlichkeitsgesetze auf eine andere zu übertragen. So lassen sich mit wenigen Kennzahlen ähnliche Strömungsvorgänge miteinander vergleichen.

Der dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient wird als Nübeltzahl bezeichnet und ist definiert:

$$Nu_x = \alpha * \frac{x}{\lambda}$$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

Exkurs: Ähnlichkeitsgesetze

Um zwei Strömungsräume vergleichen zu können, müssen sie geometrisch und physikalisch ähnlich sein:

Geometrische Ähnlichkeit	
Strömung 1	Strömung 2
Länge L_1 Fläche A_1 Volumen V_1 Mittlere Rauigkeit k_1	Länge L_2 Fläche A_2 Volumen V_2 Mittlere Rauigkeit k_2
Verhältnisse: $\frac{A_1}{A_2} = \frac{L_1^2}{L_2^2}; \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{L_1^3}{L_2^3}; \quad \frac{k_1}{k_2} = \frac{L_1}{L_2};$	

Die thermischen Eigenschaften wie Temperatur, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit etc. kämen noch hinzu. Für inkompressible Strömungen spielen diese keine Rolle.

Physikalische Ähnlichkeit	
Strömung 1	Strömung 2
Geschwindigkeit w_1 Beschleunigung a_1 Masse m_1 Zeit t_1 Kraft F_1 Dichte ρ_1 Dynamische Viskosität η_1 Kinematische Viskosität ν_1	Geschwindigkeit w_2 Beschleunigung a_2 Masse m_2 Zeit t_2 Kraft F_2 Dichte ρ_2 Dynamische Viskosität η_2 Kinematische Viskosität ν_2
Mit	$\frac{a_1}{a_2} = \frac{w_1/t_1}{w_2/t_2} = \frac{w_1 \cdot t_2}{w_2 \cdot t_1}$ $w_1 = \frac{L_1}{t_1} \rightarrow t_1 = \frac{L_1}{w_1} \text{ und } \rightarrow t_2 = \frac{L_2}{w_2}$
Wird	$\frac{a_1}{a_2} = \frac{w_1 \cdot t_2}{w_2 \cdot t_1} = \frac{w_1 \cdot \frac{L_2}{w_2}}{w_2 \cdot \frac{L_1}{w_1}} = \frac{w_1^2 \cdot L_2}{w_2^2 \cdot L_1}$ $\frac{m_1}{m_2} = \frac{\rho_1 \cdot V_1}{\rho_2 \cdot V_2} = \frac{\rho_1 \cdot L_1^3}{\rho_2 \cdot L_2^3}$

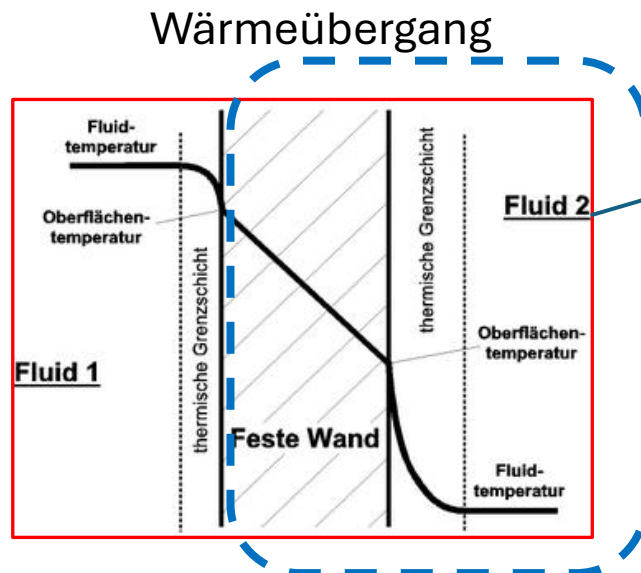
3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

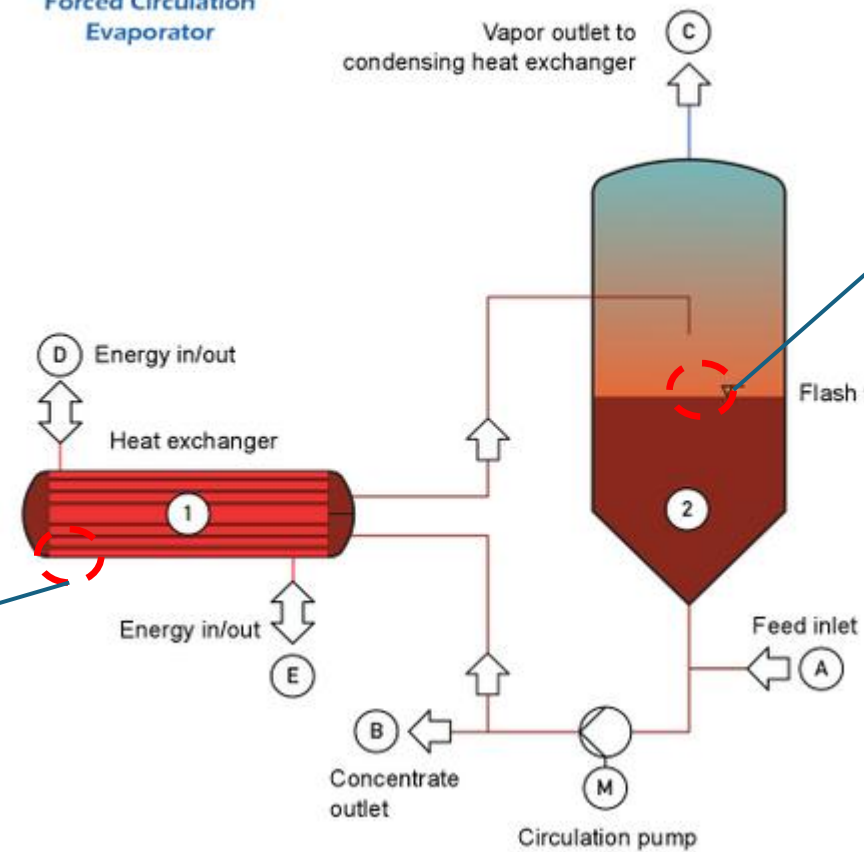
Welche Grundlagen werden benötigt?

→ Was ist das Ziel?

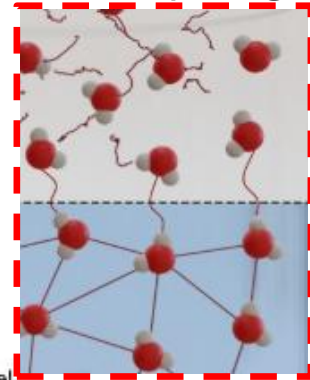
→ Welche Aufgabenstellungen sind zu lösen?



schulz partner
verfahrenstechnik GmbH
Forced Circulation
Evaporator



Dampf/
Verdampfung

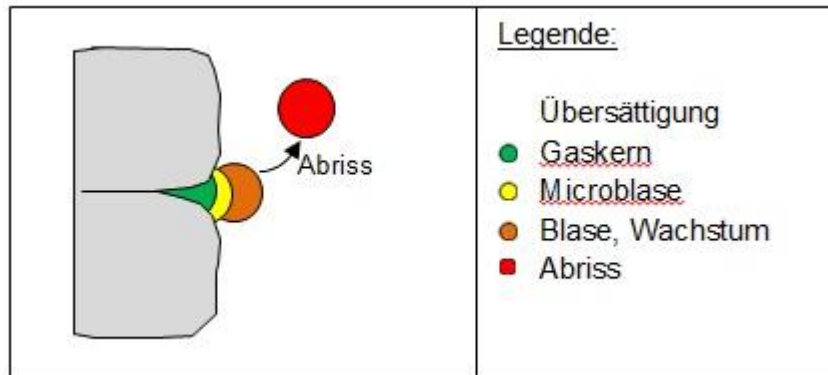


3.1 Verdampfen / Kondensieren

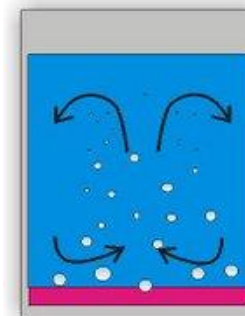
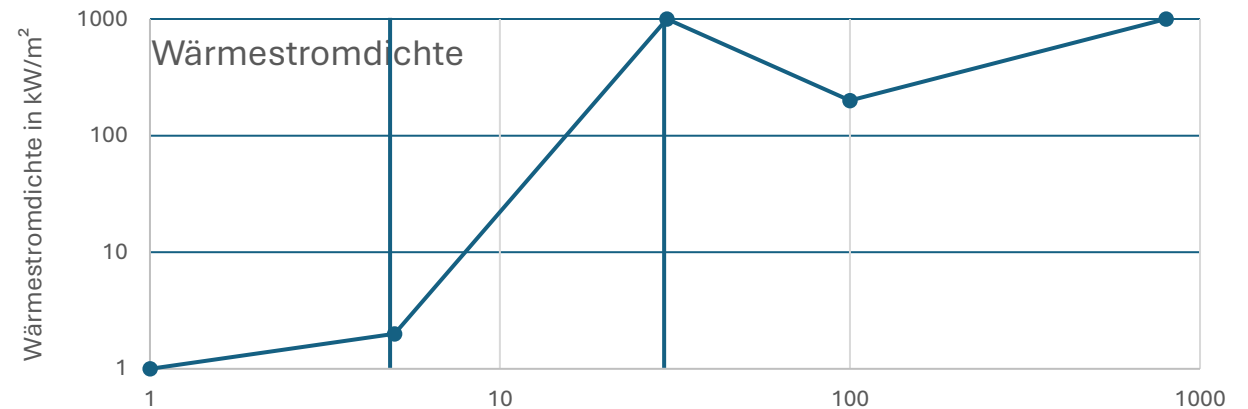
3.1.1 Grundlagen

3.1.2 Wärmeübertragung

Wärmeübergang beim Verdampfen



Bildung einer Dampfblase



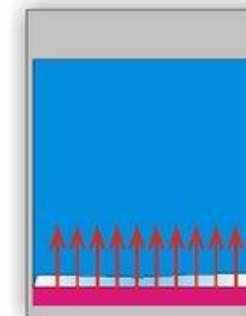
Stilles Sieden

$T_{\text{wand}} - T_{\text{wasser}} < 5 \text{ K}$
 $q < 2 \text{ kW/m}^2$



Blasensieden

$T_{\text{wand}} - T_{\text{wasser}} = 5 \dots 30 \text{ K}$
 $q = 20 \dots 1000 \text{ kW/m}^2$



Filmsieden

$T_{\text{wand}} - T_{\text{wasser}} = 200 \dots > 1000 \text{ K}$
 $q = 200 \dots > 1000 \text{ kW/m}^2$

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

3.1.2 Wärmeübertragung: Wärmeübergang beim Verdampfen: Freie Konvektion

Entsteht eine Strömung in einem Fluid und damit auch die Grenzschicht nur durch die Temperatur, spricht man von freier Konvektion

Potenzielle Energie der Auftriebskräfte: $E_{\text{pot}} = \Delta \rho * g * L$

Kinetische Energie der freien Strömung: $E_{\text{kin}} = K * \frac{\rho}{2} * w_m^2$

Faktor K erfasst die Verluste durch Reibung in der laminaren Strömung.

Aus Versuchen ergibt sich für $K = 5$

Energieerhaltung:

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{kin}}$$

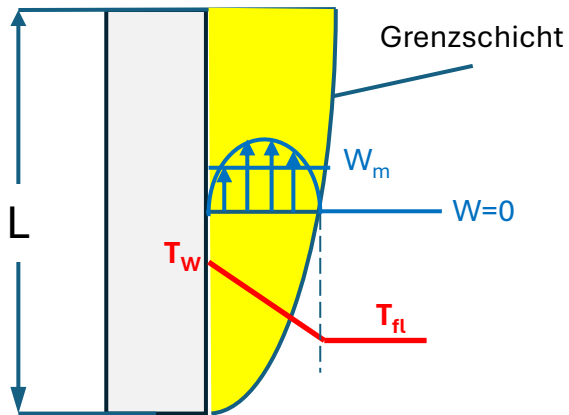
$$\rightarrow \frac{\Delta \rho}{\rho} * g * \frac{L^3}{v^2} = 2,5 * \frac{L^2}{v^2} w_m^2$$

Für $0,5 < Pr (= \frac{\text{Strömungsgrenzschicht}}{\text{thermischer Grenzschicht}}) = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu * c_p * \rho}{\lambda} < 50$ gilt:

Mit Grashofzahl $Gr = \frac{g * L^3 * \frac{\rho_{\text{fl}} - \rho_{\text{W}}}{\rho_{\text{W}}}}{v^2}$ [Gr-Zahl ist eine Art Re-Zahl für freie Konvektion]

ergibt sich:

$$Gr = 2,5 Re^2$$



3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

3.1.2 Wärmeübertragung: Wärmeübergang beim Verdampfen: Freie Konvektion

Für laminare Strömung gilt: $Nu_{\text{lam}} \approx 0,6 * \sqrt[4]{Gr * Pr}$ mit $0,5 < Pr < 1000$ und $Gr * Pr < 10^9$

Für turbulente Strömung gilt: $Nu \approx 0,14 * \sqrt[3]{Gr * Pr}$ mit $Gr * Pr > 10^9$

Setzt man in die obere Gleichung die Definition für die Grashof-Zahl ein, kürzt sich die charakteristische Länge L heraus und man erhält:

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda} * \sqrt[3]{\frac{v^2}{g}}$$

Was sagt diese Gleichung über die freie Konvektion im turbulenten Bereich?

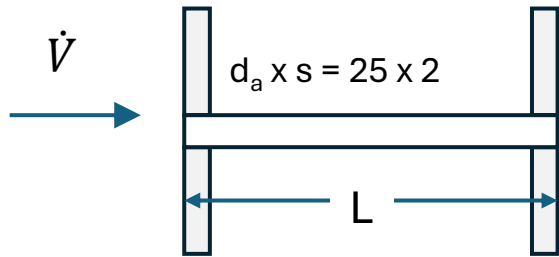
Man erkennt, dass der Wärmeübergang freier turbulenter Plattenströmung unabhängig ist von einer Geometrie

3.1 Verdampfen / Kondensieren

3.1.1 Grundlagen

4. Aufgabe

Durch ein Wärmetauscherrohr mit der Abmessung $d_a \times s = 25 \times 2$ strömt Wasser mit einer mittleren Geschwindigkeit $w_{fl} = 1 \text{ m/s}$ und einer mittleren Temperatur $T_{fl} = 60 \text{ °C}$



Es soll der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt werden.

Außerdem sollen folgende Randbedingungen untersucht werden:

- a) Wie ändert sich der α -Wert beim Heizen bzw. Kühlen, wenn $T_{fl} - T_w = \pm 20 \text{ °C}$ ist?
- b) Bei einer Rohrlänge von 2500 mm und 250 mm
- c) Bei einem rauhen Rohr mit $\xi_{\text{rauh}} / \xi = 2$

Die Definitionsgleichung für α lautet:

$$Nu_x = \alpha * \frac{x}{\lambda}$$

wobei x die charakteristische Länge ist und bei Rohren dem inneren Durchmesser entspricht, wenn das Rohr durchströmt wird.

→ $\alpha = Nu_{\text{Rohr}} * \frac{\lambda}{d_i}$ → Rohrinne Durchmesser = 0,021 m; die Wärmeleitfähigkeit von Wasser bei 60 °C $\lambda = 0,654 \text{ W/(m*K)}$
(Werte können aus Tabellenwerken entnommen werden)

Für den Wärmeübergangskoeffizienten ist der Strömungszustand entscheidend → Re-Zahl berechnen

$Re = \frac{w_{fl} * d_i}{\nu}$ → mit $\nu (60 \text{ °C}) = 0,4709 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ folgt $Re = 4,46 * 10^4 \gg 2300$ → turbulente Strömung