

1. EINFÜHRUNG

Anwendungen der Verfahrenstechnik:

- Aufarbeiten von natürlichen Rohstoffen
- Verbesserung und Optimierung von Prozessen
- Nutzung neuer Energiequellen
- Verarbeitung von Nahrungsmitteln
- Aufbereitung von Abfällen und Rückgewinnung

Stoffumwandlungen können erfolgen durch:

- Änderung der Stoffzusammensetzung (phys.)
- Änderung der Stoffeigenschaften (phys.)
- Änderung der Stoffart (chem. & bio.)

Unterteilung von Stoffumwandlungsverfahren:

- Vorbereitung der Rohstoffe
- Stoffumwandlung (chem. bio. phys.)
- Aufarbeiten und Trennen der Produkte

Arten von Grundverfahren:

- mechanische, thermische, chemische und biologische Grundverfahren

Grundverfahren zur Änderung der Stoffzusammensetzung:

- Trennen (Filtration, Abscheiden, Sortieren etc.)
- Thermisches Trennen (Destillation, Extraktion)
- Elektrisch (Magnetabscheiden, Elektroosmose)
- Mischen, Vereinen (Rühren, Kneten etc.)

Grundverfahren zur Änderung der Stoffeigenschaften:

- Mechanisch (Fördern, Zerkleinern, Pressen etc.)
- Thermisch (Erwärmen, Verdampfen, Sintern etc.)

Betriebsweise von Verfahrensstufen:

- diskontinuierlicher Betrieb (Chargenbetrieb)
(Kochen, Waschmaschine, Kristallisation)
Vorteile:
 - o *Kleine Produktmengen*
 - o *Anlage für verschiedene Verfahren genutzt*
 - o *Ausbeute besser als bei kont. Betrieb*Nachteile:
 - o *Totzeiten bei Füllen, Anfahren, Entleeren*
 - o *Höhere Energiekosten und Belastung*
- kontinuierlicher Betrieb (stationär, Fließbetrieb)
(Meerwasserentsalzung, Raffinerie)
Vorteile:
 - o *Produktivität sehr hoch*
 - o *Gleichmässige Produktqualität*
 - o *Optimierung jeder einzelnen Komponente*Nachteile:
 - o *Geringe Flexibilität*

<ul style="list-style-type: none"> - halbkontinuierlicher Betrieb <p>Projektierung einer verfahrenstechnischen Anlage: Bekannt sind Ausgangsstoffe und das geforderte Endprodukt. Gesucht ist die optimale Produktionsanlage.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wahl des Verfahrens, Standorts & Anlagengrösse Grobes Grundfliessbild $\text{Wirtschaftlichkeit } HK_2 = HK_1 \cdot \left(\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \right)^\varepsilon$ <ul style="list-style-type: none"> - Auswahl und verfahrenstechn. Dimensionierung Verfahrensflussbild, Liste der Hauptkomp. - Produktionskostenschätzung - Überprüfung der Unterlagen - Ausarbeitung der Spezifizierungen Detailengineering, RI-Schema - Anordnung der Apparate, Rohrleitungen - Spezialapparate - Termine - Überwachung - Montage - Inbetriebsetzung 	<p>ε : Degressionskonstante $\varepsilon \approx 0.5 - 0.75$</p>
---	--

2. MEHRSTOFF- UND MEHRPHASEN-SYSTEME

<p>Homogene und heterogene Gemische: Gemische bezeichnet man als Homogen, wenn für jedes Volumenelement die Zusammensetzung, Dichte, Temperatur und der Druck gleich sind. Bei heterogenen Gemischen treten an den Phasengrenzen Unstetigkeiten der Zustandsgrössen auf.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Beispiele homogener Gemische: (Luft, Zucker in Wasser, Kochsalz in Wasser) - Beispiele heterogener Gemische: (Schlamm, Eiswasser, Emulsion, Nebel) <p>Phase und Komponente:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Komponente: Einheitlicher Stoff eines Gemisches - Phase: Physikalisch gleichartiger homogener Bereich eines Systems <p>Bei Mehrphasensystemen wird zwischen kontinuierlicher und disperser Phase unterschieden.</p> <p>Zustand von Mehrkomponenten- und Mehrphasengemischen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Thermodynamische Zustandsgrössen: Druck (p), Temperatur (T), Volumen (V) - Zusammensetzung der Phasen: fest (solid = s), flüssig (liquid = l), gasförmig (gas = g), kontinuierliche Phase (k), disperse Phase (d) 	
--	--

Kennzeichnung von homogenen Systemen:

$$\text{Konzentrationsmass} = \frac{\text{Menge der betreffenden Komponente}}{\text{Bezugsmenge}}$$

Mengenmass	Masse [kg]	Stoffmenge [mol]
Gesamtmenge (Masse m, Stoffmenge n)	Massenanteil $w_i = \frac{m_i}{\sum m_j} = \frac{m_i}{m}$	Stoffmengenanteil $x_i = \frac{n_i}{\sum n_j} = \frac{n_i}{n}$
Menge einer Bezugskomp. B	Massenbeladung $X_i = \frac{m_i}{m_B}$	Stoffmengenbeladung $Y_i = \frac{n_i}{n_B}$
Volumen V	Massenkonz. $\rho_i = \frac{m_i}{V}$	Stoffmengenkonz. $c_i = \frac{n_i}{V}$

x_i : Flüssigkeit
 y_i : Gasphase

Kennzeichnung von Mehrphasensystemen:

- Kontinuierliche und disperse Phase
- Mengenverhältnis der Phasen

$$\text{Massenanteil } \alpha_1 = \frac{\text{Mass der Phase 1}}{\text{Gesamtmasse}}$$

$$\text{Volumenanteil } \theta_1 = \frac{\text{Volumen der Phase 1}}{\text{Gesamtvolumen}}$$

- Porosität

$$\text{Porosität} = \frac{\text{Leervolumen}}{\text{Gesamtvolumen}}$$

- Phasengrenzfläche pro Volumeneinheit

$$a = \frac{\text{Oberfläche der Tröpfchen}}{\text{Volumen}} = \frac{6}{d}$$

3. ERHALTUNGSSÄTZE UND BILANZGLEICHUNGEN

Allgemeingültige Erhaltungssätze:

Erhaltung der:

- Materie (Masse)
- Energie (1. HS)
- Elektrische Ladung

Erhaltung unter bestimmten Voraussetzungen:

Erhaltung der:

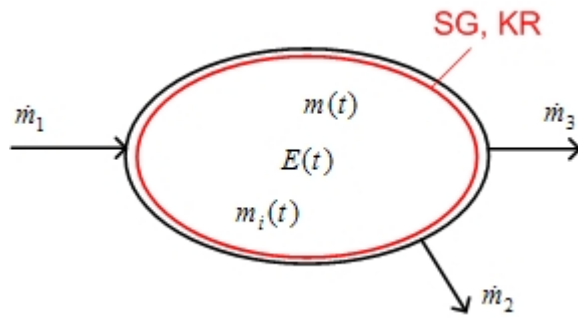
- Entropie (für reversible Prozesse)
- Impulse (ohne äussere Kräfte)

Allgemeine Bilanzgleichung:

Zeitliche Änderung der Menge im System

$$= \text{Zugeführte Menge} - \text{Abgeführte Menge}$$

Bilanzgebiet:



Massenbilanzgleichung:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \sum_{\alpha} \dot{m}_{\alpha} - \sum_{\omega} \dot{m}_{\omega}$$

Stoffbilanzgleichung:

$$\frac{\partial}{\partial t} (n \cdot x_i) = \sum_{\alpha} \dot{n}_{\alpha} \cdot x_{i\alpha} - \sum_{\omega} \dot{n}_{\omega} \cdot x_{i\omega}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m \cdot w_i) = \sum_{\alpha} \dot{m}_{\alpha} \cdot w_{i\alpha} - \sum_{\omega} \dot{m}_{\omega} \cdot w_{i\omega}$$

Allgemeine Energiebilanzgleichung:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \sum_{\alpha} \dot{E}_{\alpha} - \sum_{\omega} \dot{E}_{\omega}$$

Energieströme setzen sich zusammen aus:

- Enthalpiestrom $\dot{H} = \dot{m} \cdot h$
- Wärmestrom \dot{Q}
- Mechanische Leistung P_{mech}
- Elektrische Leistung P_{el}
- kin. & pot. Energiestrom $\dot{E}_{kin} = \dot{m} \frac{c^2}{2}$ & $\dot{E}_{pot} = \dot{m}gz$

Einfachere Energiebilanzgleichung:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \sum P + \sum Q + \sum \dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)$$

SG : Systemgrenze
KR : Kontrollraum

\dot{m}_{α} : eintretender
Massenstrom
 \dot{m}_{ω} : austretender
Massenstrom

\dot{n}_{α} : eintretender
Stoffmengenstrom
 \dot{n}_{ω} : austretender
Stoffmengenstrom

Zugeführte Energieströme
sind positiv
Abgeführte Energieströme
sind negativ

4. THERMODYNAMIK DER STOFFGEMISCHTE

Heterogene Stoffgemische können durch mechanische Trennverfahren getrennt werden. Homogene Stoffgemische wie Wasser-Alkohol können mit mechanischen Verfahren nicht in ihre Komponenten zerlegt werden.

Zustandsgleichung des idealen Gases:

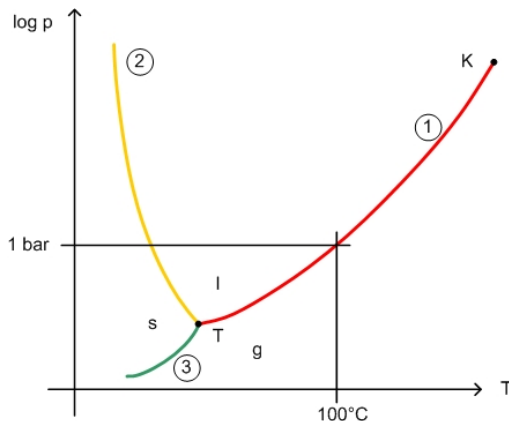
$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \psi$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$R = 8.314 \text{ J/molK}$

Phasengleichgewicht reiner Stoffe:

Thermische Zustandsgleichung $f(p, v, T) = 0$



Clausius-Clapeyron'sche Gleichung:

Zur Beschreibung der Dampf-, Schmelz- und Sublimationsdruckkurve.

$$\frac{dp^0}{dT} = \frac{\Delta h}{T(v'' - v')}$$

$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \frac{\Delta h_v}{R_i} \left(\frac{1}{T_1^0} - \frac{1}{T_2^0}\right)$$

August-Gleichung:

Beschreibt eine lineare Beziehung zwischen dem Log. des Druckes, und dem Kehrwert der Temperatur.

$$\log(p^0) = A - \frac{B}{T}$$

Antoine-Gleichung:

Exakter als August-Gleichung

$$\log(p^0) = A - \frac{B}{C + T}$$

Nach Perry's Handbook:

$$p^0 = \exp\left[C1 + \frac{C2}{T} + C3 \cdot \ln(T) + C4 \cdot T^{C5}\right]$$

Stoffgemische

Gibbs'sche Phasenregel:

Gibt an, wie viele den Zustand eines mehrphasigen Systems beschreibende Grössen frei variiert werden dürfen.

$$F = K + 2 - P$$

(Wasser)

- 1: Dampfdruckkurve
- 2: Schmelzdruckkurve
- 3: Sublimationsdruckkurve

- l : liquid
- s : solid
- g : gas

p^0 : Dampfdruck

v'' : spez. Volumen der energiereicheren Phase

v' : spez. Volumen der energieärmeren Phase

Δh : Verdampfungs-, Schmelz-, Sublimations-Enthalpie

T in [K]

p in [Pa]

F : Freiheitsgrade

P : Anzahl Phasen

K : Anzahl Komponenten

Gasgemische

Gesetz von Dalton:

Der Gesamtdruck einer Gasmischung ist gleich der Summe der Partialdrücke.

$$p = p_A + p_B + p_C \quad p = \sum p_i \quad \text{Dalton 1}$$

$$p_i = \frac{v_i}{v} p = \frac{n_i}{n} p = y_i p \quad \text{Dalton 2}$$

Gas/Dampf-Gemisch:

- ungesättigt: $p = p_L + p_D \quad ; \quad p_D < p_{H_2O}^0$
- gesättigt: $p_D = p_{H_2O}^0$
- übersättigt: gesättigte feuchte Luft + Tropfen

Das Raoult'sche Gesetz für Lösungen:

Das Raoult'sche Gesetz beschreibt das Gleichgewicht zwischen deiner Lösung und dem mit ihr in Berührung stehenden Dampf.

$$p_i = x_i \cdot p_i^0(T)$$

Für eine ideale Lösung müssen alle Komponenten das Raoult'sche Gesetz erfüllen.

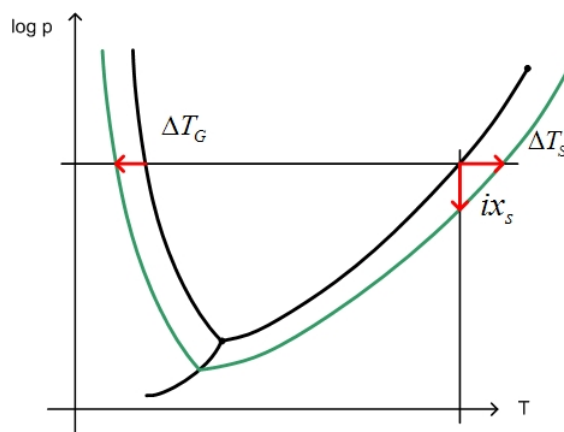
Lösungen mit einer nicht-flüchtigen Komponente

(z.B. Salz)

Dissoziationsgrad i : $x'_s = ix_s$

Der Dampf über der Lösung besteht praktisch nur aus Lösungsmittel, da $p_s^0 \ll p_{LM}^0$

$$p_L^0 \approx p_{LM}^0 = (1 - ix_s) \cdot p_{LM}^0$$



Siedepunkterhöhung:

$$\Delta T_s = \frac{R \cdot T^2}{M \cdot \Delta h_v} \cdot ix_s$$

Gefrierpunktserniedrigung

$$\Delta T_G = \frac{R \cdot T^2}{M \cdot \Delta h_s} \cdot ix_s$$

x_i : Stoffmenganteil der Komponente i in der Flüssigkeit
 p_i : Partialdruck der Komponente i im Dampf
 p_i^0 : Dampfdruck der reinen Komponente i bei der betreffenden Temp.

Δh_v : Verdampfungsenthalpie
 Δh_s : Schmelzenthalpie
 T : Schmelztemperatur des Lösungsmittels
 M : Molmasse des Lösungsmittels

Lösungen mit zwei flüchtigen Komponenten

Bei der Siedenden Lösung ist der Gleichgewichtsdampf selbst wieder ein Gemisch, d.h. er enthält beide Komponenten.

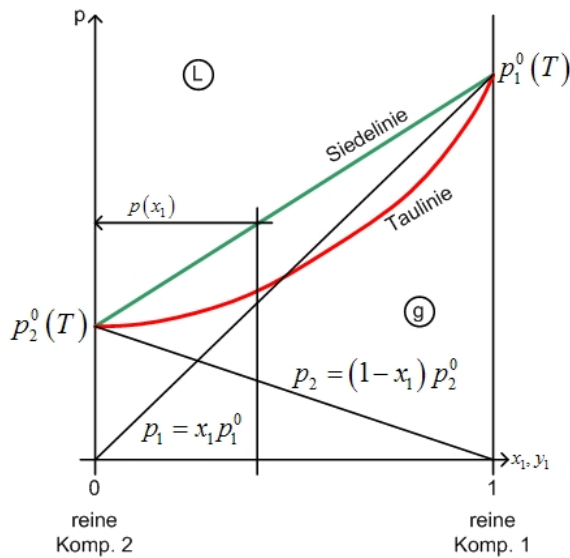
Druckdiagramm (T=konst.)

- Siedelinie:

$$p(x_1) = p_2^0 + x_1 \cdot (p_1^0 - p_2^0)$$

- Taulinie:

$$p(y_1) = \frac{p_1^0 \cdot p_2^0}{p_1^0 - y_1 \cdot (p_1^0 - p_2^0)}$$



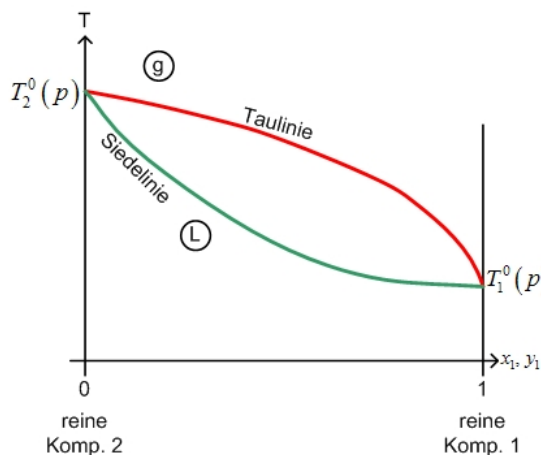
Temperaturdiagramm (p=konst.)

- Siedelinie:

$$x_1(T) = \frac{p - p_2^0(T)}{p_1^0(T) - p_2^0(T)}$$

- Taulinie:

$$y_1(T) = \frac{p_1^0(T)}{p} \cdot x_1(T) = \frac{p_1^0(T)}{p} \cdot \frac{p - p_2^0(T)}{p_1^0(T) - p_2^0(T)}$$



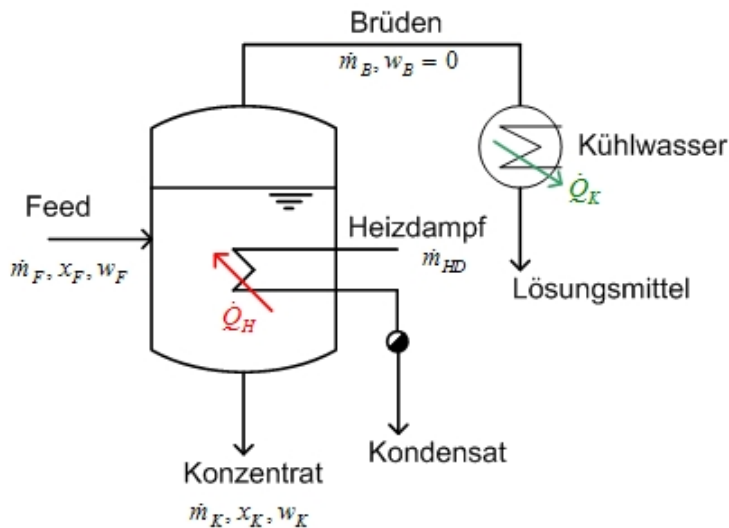
Index 1: Leichterflüchtige Komponente

$x_1 = x$ Stoffmengenanteil
in Flüssigphase

$y_1 = y$ Stoffmengenanteil
in Gasphase

5. TRENNEN BEI GROSSEM UNTERSCHIED DER FLÜCHTIGKEIT (SALZLÖSUNGEN)

Eindampfung und Verdampfung sind thermische Trennverfahren zur Aufkonzentrierung von Lösungen. Ist man an der aufkonzentrierten Lösung interessiert, spricht man von Eindampfen (Trinkwasser, Absorptionsanlage), ist man am Lösungsmittel interessiert vom Verdampfen (Aufkonzentrieren, Eindicken, Kristallisation).



Ideale Lösung:

$$p_i = x_i \cdot p_i^0 \quad \text{nach Raoult}$$

Nichtideale Lösung:

Die Abweichung vom idealen Verhalten wird durch den Aktivitätskoeffizient γ berücksichtigt.

$$\gamma_1 = \frac{p_1}{x_1 \cdot p_1^0}$$

Siedepunktserhöhung:

$$\Delta T_s = \frac{R_i \cdot T^2}{\Delta h_v} \cdot i x_s$$

Auslegung von einstufigen Verdampfern:

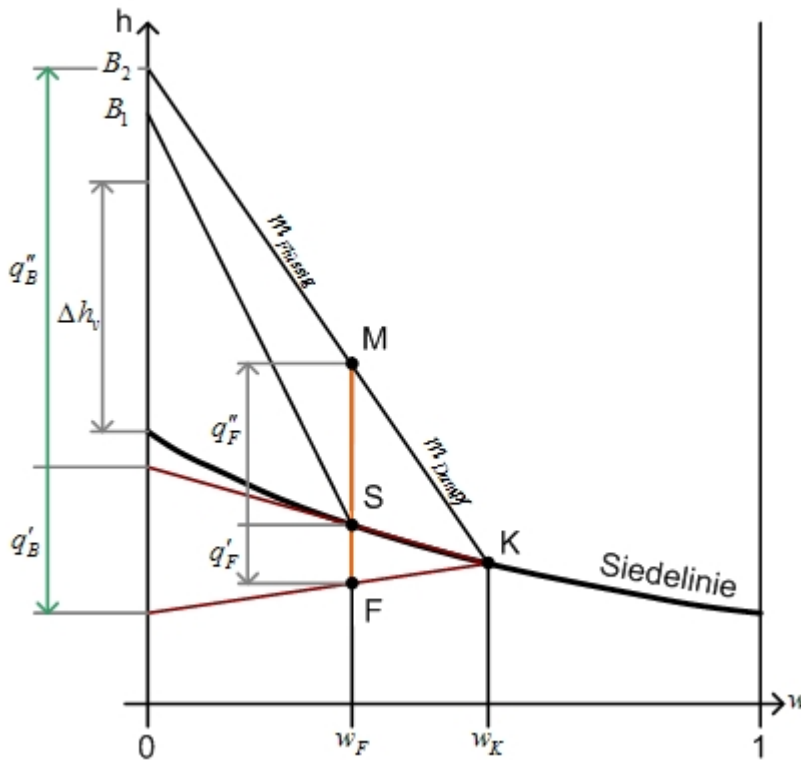
Einstufige Verdampfer verwendet man bei kleinen Verdampferleistungen und bei Lösungen mit einer hohen Siedepunktserhöhung.

Diskontinuierliche Verdampfung:

Die Ausgangslösung mit der Masse m_F wird im Verdampfer vorgelegt. Ein Teil des Lösungsmittels verdampft, die nichtflüchtige Komponente sammelt sich im Behälter an.

$R_i T^2 / \Delta h_v$ wird als ebullioskopische Konstante bezeichnet (für Wasser 28.49K)

Enthalpie-Konzentrations Diagramm für diskontinuierliche Verdampfung:



Bezug Ausgangslösung:

Erwärmung auf Siedetemperatur

$$q'_F = h_s - h_F$$

Verdampfung des Lösungsmittels

$$q''_F = h_M - h_S$$

Bezug Brüdendampf:

$$q'_B, q''_B$$

Gesamte Wärmemenge:

$$q_F = h_M - h_F \text{ pro kg Feed}$$

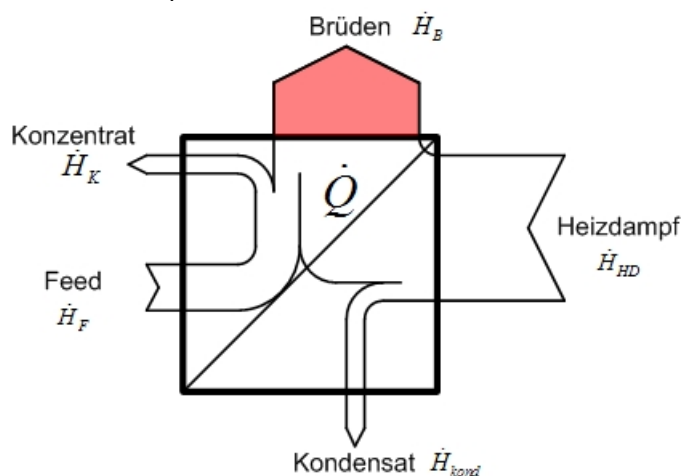
$$q_B = q'_B + q''_B \text{ pro kg Brüde}$$

Kontinuierliche Verdampfung:

Die Ausgangslösung mit dem Massenstrom \dot{m}_F und der Konzentration w_F wird dem Verdampfer kontinuierlich zugeführt.

Energieregeneration:

Zum Verdampfen werden grosse Energiemengen benötigt. Der grösste Teil der Energie verlässt den Verdampfer über den Brüdendampf:



Möglichkeiten zur Energieregeneration:

Brüdenverdichtung:

Die gesamten entstehenden Brüden werden im gleichen Verdampfer als Heizdampf verwendet. Sie müssen zuvor allerdings auf einen höheren Druck und damit auf eine höhere Kondensationstemperatur gebracht werden. Der Verdichtungsdruck p_H muss so hoch sein, dass die Siedepunkterhöhung ΔT_s überwunden wird.

Die Antriebsenergie des Verdichters liegt bei weniger als 10% der bei direkter Heizung zuzuführenden Wärme.

$$P = \dot{m}_B \cdot \Delta h_s \cdot \frac{1}{\eta_{is}}$$

Spezifische isentrope Verdichtungsarbeit:

$$w_s = \Delta h_s = R_B \cdot T_B \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \left[\left(\frac{p_H}{p_B} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]$$

Mehrstufenverdampfung

Mehrere Verdampfer werden so hintereinander geschaltet, dass die in einer Stufe erzeugten Brüden in der darauf folgenden als Heizdampf benutzt werden.

Parallelschaltung:

In allen Stufen gleiche Konzentration

+ günstig für Ausdampfprozesse, hohe Stufenzahl möglich,
keine Gefahr des Auskristallisierens

Gleichstromschaltung:

Tiefste Temperatur bei höchster Konzentration

+ günstig für Eindampfprozesse & temperaturempfindliche Stoffe (z.B. O-Saft)
- Gefahr des Auskristallisierens, hohe Viskosität in letzter Stufe

Gegenstromschaltung:

Höchste Temperatur bei höchster Konzentration

+ geeignet für Eindampfprozesse, günstig für hochviskose Stoffe, keine Gefahr des Auskristallisierens
- ungünstig bei Temperaturempfindlichen Stoffen, apparativ aufwändig, Pumpenergie

Bauarten von Verdampfern:

- Umlaufverdampfer (Natur / Erzwungen)
- Dünnschichtverdampfer (Fallstrom, Rotation)

Entspannungsverdampfung:

6. WÄRMEÜBERTRAGUNG

Das Temperaturgefälle ist die treibende Grösse für den Wärmestrom.

Arten des Wärmetransports

- Kontakt (Leitung & Konvektion)
- Strahlung

Wärmeleitung

Stationär: 1. Fourier-Gesetz $\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$

Instationär: 2. Fourier-Gesetz $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$

Wärmeleitung durch ebene Wand:

$$U = R \quad I$$

Analogie zum Ohm'schen Gesetz: $\Delta T = \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{1}{A} \quad \dot{Q}$

Mehrschichtig: $\vartheta_0 - \vartheta_3 = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) \cdot \frac{1}{A} \cdot \dot{Q}$

Wärmeleitung durch zylindrische Wand:

Einschichtig: $\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda \cdot \frac{\vartheta_0 - \vartheta_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}}$

Konvektion:

Freie Konvektion (Strömung durch Temperaturdifferenz) und erzwungene Konvektion (z.B. durch Pumpe oder Ventilator)

Ansatz nach Newton: $\dot{q} = \alpha \cdot (T_{Fl} - T_W)$

Wärmeübergangskoeff.: $\alpha = \alpha(\rho, \nu, w, L_c, \lambda, c_p, \text{Rauigkeit})$

Nusseltzahl: $Nu = \frac{\alpha \cdot L_c}{\lambda} = Nu(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Geometrie})$

Die Prandtlzahl beschreibt das Verhältnis zwischen Temperatur und Geschwindigkeitsprofil. (für Gase $\text{Pr} \approx 1$)

Strahlung:

Nach Stefan Boltzmann: $\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma_s \cdot T^4$

Grössenordnung für α -Werte:

freie Konvektion Gase	$10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
erzwungene Konvektion Gase	$100 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
erzwungene Konvektion Flüssigkeiten	$1'000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Verdampfen	$10'000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Kondensieren	

λ : Wärmeleitfähigkeit

\dot{q} : Wärmestromdichte

ρ : Dichte

c_p : spez. Wärmekapaz.

T : Temperatur

U : Spannung

R : Widerstand

I : Strom

ϑ : Temperatur

δ : Wanddicke

A : Wandfläche

\dot{Q} : Wärmestrom

l : Rohrlänge

r_0 : Innenradius

r_1 : Aussenradius

L_c : Char. Länge

w : Geschwindigkeit

ν : kin. Viskosität

Re : Reynoldszahl

Pr : Prandtlzahl

σ_s : Strahlungskoeff.

ε : Emissionsverhältnis

Hinweis:

$\lambda_{\text{Metall}} > \lambda_{\text{Flüssigkeit}} > \lambda_{\text{Gas}}$

Wärmedurchgang:

Wärmestrom von einem Fluid durch eine Wand an ein anderes Fluid.

Allgemein:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m$$

k : Wärmedurchgangskoeffizient

Mittlere Temperaturdiff.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}$$

Durch ebene Wand:

$$g_1 - g_2 = \underbrace{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}_{1/k} \cdot \frac{1}{A} \cdot \dot{Q}$$

Durch zylindrische Wand:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot r_1} + \sum \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_a}{r_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot r_2}}$$