

Fragenkatalog für die Prüfung aus Therm. Verfahrenstechnik I

Version 1 (2.3.2001)

Ao.Univ.-Prof. Dr. Anton FRIEDL - 2 Stunden schriftlich

1) Grundlagen / Einleitung

- ✓ Beschreiben Sie eine Bilanzraum (was ermöglicht die Bilanzraumbetrachtung) (5 Punkte)
- ✓ Beschreiben Sie die Vorteile der Ähnlichkeitstheorie (5 Punkte)
- ✓ Beschreiben Sie die relevanten dimensionslosen Kennzahlen für den Stoff- und

2) Wärmeaustausch

- ✓ Wie lautet die Grundgleichungen des Wärme- und Stofftransports, erklären Sie die
- ✓ Diskutieren Sie die Vorgänge bei der Verdampfung durch indirekte Wärmezufuhr (10)
- ✓ Beschreiben Sie die Vorgänge bei der Kondensation von Dämpfen (5 Punkte)
- ✓ Beschreiben Sie die Prozeßführung Gleichstrom und Gegenstrom für Wärmeüberträger (graphisch), inklusive grundlegender Auslegung von indirekten Wärmeaustauschern (5)
- ✓ Rechenbeispiele (20 Punkte)

3) Stoffaustausch

- ✓ Welche treibenden Kräfte des Trennvorganges kennen Sie und diskutieren Sie diese im Vergleich mit dem Wärmeübergang (10 Punkte)
- ✓ Erklären Sie die Zusammenhänge zwischen dem Stoffübergangskoeffizienten und den Diffusionskoeffizienten am Beispiel eines sich auflösenden Feststoffes (10 Punkte)
- ✓ Erklären Sie die Zweifilmtheorie grafisch und formelmäßig (10 Punkte)
- ✓ Erklären Sie die Penetrationstheorien (10 Punkte)

4) Thermische Trennverfahren

- ✓ Diskutieren Sie die Unterschiede der kontinuierlichen und der diskontinuierlichen
- ✓ Erklären Sie den Unterschied zwischen Konzentrationen und Beladungen. Bei welchen Verfahren werden bevorzugt Beladungen verwendet (5 Punkte)
- ✓ Beschreiben Sie die Gleichstrom- und die Gegenstrombetriebsweise (Bilanzen und Was ist eine theoretische Trennstufe, zählen Sie die wichtigsten Theorien der Bestimmung von theoretischen Trennstufen auf (5 Punkte)
- ✓ Erläutern Sie das HTU/NTU-Konzept inkl. Skizze und Herleitung (10 Punkte)
Wie erfolgt die Beschreibung einer praktischen Trennstufe (5 Punkte)

5) Destillation / Rektifikation

- ✓ Wie wird die Nichtidealität in der Berechnung von Flüssig/Gas-Gleichgewichten
- ✓ Definieren Sie die relative Flüchtigkeit oder auch Trennfaktor Alpha (Gleichung und
- ✓ Stellen Sie das Dampfdruck-, Siede-, Gleichgewichts- und Aktivitätskoeffizientendiagramm eines idealen dem eines realen Gemisches mit positiver
- ✓ Erklären Sie den Unterschied zwischen Destillation und Rektifikation (5 Punkte)
- ✓ Beschreiben Sie graphisch und formelmäßig die diskontinuierliche offene Destillation
- ✓ Stellen Sie für eine Rektifikationskolonne die Massen- und Wärmebilanzen inkl. Skizze

Erklären Sie anhand der Rektifikation das McCabe-Thiele Diagramm unter Herleitung der notwendigen Gleichungen (10 Punkte)

Welchen Einfluß hat der Feed bei einer Rektifikationskolonne (Herleitung und Beschreibung der Schnittpunktsgerade) (10 Punkte)

Wie erfolgt die Bestimmung der Mindesttrennstufenanzahl und des Mindestrücklaufverhältnisses (graphisch und rechnerisch) (10 Punkte)

Welche Möglichkeiten der Trennung azeotroper Gemische gibt es (5 Punkte)

Ermitteln Sie die theoretische Trennstufenanzahl für das angegebene Beispiel im McCabe Thiele Diagramm: Binäres Stoffgemisch Benzol/Toluol ($MGB=78 \text{ g/mol}$, $MGT=92 \text{ g/mol}$), Feedzusammensetzung: 50 w% Benzol, siedende Flüssigkeit; $RVE \rightarrow \text{Benzol}$

X_{ew}

6) Kolonnen

Welche Anforderungen werden an Kolonneneinbauten gestellt (Auswahlkriterien) (5 Punkte)

Welche Grundtypen an Kolonneneinbauten gibt es (5 Punkte)

Erklären Sie die Berechnung des Druckverlustes bei Siebböden (5 Punkte)

Erklären Sie das Druckverlustverhalten und den Verlauf des spezifischen Flüssigkeitsinhaltes in der Füllkörperschüttung (Diagramme) (5 Punkte)

Erklären Sie die Berechnung des Druckverlustes bei Füllkörperkolonnen (5 Punkte)

7) Absorption

Erklären Sie den Zusammenhang der Gesetze von Raoult und Henry (auch grafisch) (5 Punkte)

Was versteht man unter Absorption: Definition und Prinzip (5 Punkte)

Erklären Sie anhand eines Beladungsdiagrammes den Unterschied zwischen Lösungsrückführung bzw. Frischzufuhr bei einer zweistufigen Gleichstrom Absorption (10 Punkte)

Bilanzieren Sie einen Gleichstrom- und einen Gegenstromabsorber (mit Skizze) (5 Punkte)

Wie ist bei der Absorption das Mindestlösungsmittelverhältnis definiert: grafisch und rechnerisch (5 Punkte)

Erklären Sie den Stoffübergang bei der physikalischen Absorption (5 Punkte)

Erklären Sie den Zusammenhang des Stoffübergangs und Reaktionsgeschwindigkeit bei der chemischen Absorption (5 Punkte)

Erklären Sie den Unterschied zwischen Absorption und Desorption, welche unterscheiden (5 Punkte)

Zählen Sie die wichtigsten Bauformen von Absorbern auf (5 Punkte)

Welche Möglichkeiten zur Regenerierung (Desorption) der Waschlösungen gibt es (5 Punkte)

Rechenbeispiel (20 Punkte)

8) fl/fl-Extraktion

Erklären Sie das Phasengleichgewicht Flüssigphase - Flüssigphase grafisch und rechnerisch (5 Punkte)

Erklären Sie die Konstruktion der GGK aus dem Gibb'schen Dreieck (5 Punkte)

Nennen Sie die wichtigsten Lösungsmittelanforderungen bei der fl/fl-Extraktion (5 Punkte)

Bilanzieren Sie eine einfache einstufige fl-fl-Extraktion (mit Skizze) (5 Punkte)

Erklären Sie die mehrstufige Kreuzstromextraktion (5 Punkte)

Bilanzieren Sie eine kontinuierliche Gegenstromextraktion (mit Skizze) (5 Punkte)

Erklären Sie das Verfahren der Trennstufenbestimmung nach Hunter und Nash mit Skizze (5 Punkte)

Erklären Sie die Ermittlung des Mindestlösungsmittelverhältnisses bei der fl/fl-Extraktion (5 Punkte)

Zählen Sie die wichtigsten Extraktionsapparate (flüssig-flüssig) mit den wichtigsten Vorteilen auf (5 Punkte)

$$\frac{1}{kg} = \frac{1}{\beta_B} + \frac{1}{K^* \beta_{Fe}} = \frac{1}{\beta_B} + \frac{T^*}{H_c \beta_{Fe}}$$

$$\text{Konz gegeben} \rightarrow Y = \frac{y}{1+y}$$

$$Y = \frac{y}{1+y}$$

9) Membrantechnik

Erklären Sie das Grundprinzip der Membrantrennverfahren und zählen Sie die wichtigsten Membrantrennprozesse auf (5 Punkte)

Welche Membranmaterialien gibt es und nennen Sie Prozeßbeispiele für die einzelnen

- | Erläutern Sie den Stofftransport bei Membrantrennverfahren (dichte Membran und poröse Membran) grafisch und formelmäßig (10 Punkte)

Beschreiben Sie die Einsatzgebiete der Mikrofiltration, der Ultrafiltration, Nanofiltration und der Umkehrosmose. Welcher Unterschied besteht zwischen diesen Verfahren (10 Punkte)

Beschreiben Sie die Einsatzgebiete der Pervaporation, Dampfpermeation und Gaspermeation. Welcher Unterschied besteht zwischen diesen Verfahren (10 Punkte)

Welche Modulbauformen gibt es für Membrantrennverfahren (5 Punkte)

10) Adsorption

Was versteht man unter Adsorption: Definition und Prinzip (5 Punkte)

- | Erklären Sie das Phasengleichgewicht Gasphase - Festphase grafisch und formelmäßig

Nennen Sie einige Anforderungen an Adsorbentien (5 Punkte)

Nennen Sie einige technisch wichtige Adsorbentien und skizzieren Sie deren

- | charakteristischen Adsorptionsisothermen (10 Punkte)

- | Welche Vorgänge treten beim Stofftransport bei der Adsorption auf (5 Punkte)

Stellen Sie die Massenübergangszone (LUB Modell) mit den wichtigsten Kenngrößen

Stellen Sie eine Adsorptivbilanz für eine Adsorption im Gegenstrom auf (mit Skizze) (5 Punkte)

Beschreiben Sie die Durchbruchskurve in einem Festbettadsorber – vergleichen Sie Adsorptionssysteme mit guter und schlechter Kinetik (5 Punkte)

Erklären Sie die Möglichkeiten der technischen Desorption beim Adsorptionsschritt (5 Punkte)

- | Zählen Sie die wichtigsten Bauformen von Adsorbern auf (5 Punkte)

11) Trocknen

- | Nennen Sie die unterschiedlichen Arten der thermischen Trocknung (5 Punkte)

Erklären Sie den Unterschied zwischen Verdampfen und Verdunsten (5 Punkte)

Wie kann Feuchtigkeit an das zu trocknende Gut gebunden sein (5 Punkte)

- | Beschreiben Sie das Mollier-Diagramm grafisch und formelmäßig (10 Punkte)

Erklären Sie die Bestimmung des Taupunktes grafisch im Mollier-Diagramm und

Erklären Sie das Mischen zweier Luftströme grafisch im Mollier-Diagramm und

- | Erklären Sie die das Zumischen von Feuchte in Form fl. Wasser (a) und Dampf (b) zu einem Luftstrom grafisch im Mollier-Diagramm und formelmäßig (10 Punkte)

Erklären Sie die Kühlgrenztemperatur (5 Punkte)

Beschreiben Sie die Kinetik der Trocknung grafisch für hygrokopische und nicht-

- | Nennen sie die wichtigsten Bauformen von Trocknern, unterteilt nach Trocknungsart (5 Punkte)

Rechenbeispiel (20 Punkte)

12) Kristallisation (wird bis WS 2001 nicht geprüft)

Erklären Sie die Prinzipien der Kristallisation (5 Punkte)

Erklären Sie die Ertragsformel mit und ohne Hydrathölle bei der

Stellen Sie die verschiedenen Kristallisierungsverfahren im

Nennen Sie die wichtigsten Bauformen kontinuierlicher Kristallisatoren (5 Punkte)

Beschr. Sie das Verf. d. fraktionierten Kristallisations

(10 P)

$$X_P - X_{PD} = \frac{MD}{MC} \cdot P_D$$

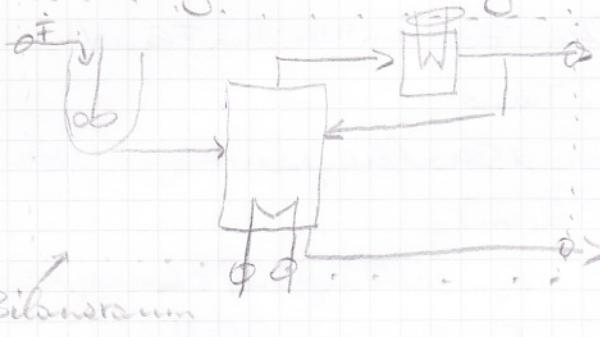
$$X_P = P_D \left(\frac{MD}{MC} + X \right)$$

$$P_D = \frac{X_P}{\frac{MD}{MC} + X}$$

1) Einleitung

• Beschreiben Sie einen Bilansraum.

Bilansraum ist der Teil eines Prozesses den man genauer betrachten will. Man "zieht" einen Bilansraum über einen Teil und betrachtet vor die Schnittstellen des Raumes mit Stoff-, Energieströmen. Es gilt Massen-, Energie- und Impulserhaltung. Er ermöglicht uns die genauere Beschreibung/Betrachtung dieses Teilstückes.



Bilansraum ist ein fiktiver nach außen abgegrenzte Komponente eines Prozesses

Ströme + Erzeugung \rightarrow Ströme + Speicher
ein Verbrauch aus

• Vorteile der Ähnlichkeitstheorie

Verringerung des Arbeitsaufwandes zur Darstellung des Sachverhaltes,
Verringerung des Versuchsauflusses für die Ermittlung des Zusammenhangs.
Kostensparung durch Modellversuche im Labor oder Technikum, umfasst.

Er muss jedoch eine Unrechnung auf die Großanlage möglich sein \rightarrow Ähnlichkeitstheorie
 $Q_x = \frac{x_q}{x_M} = \text{const}$ Maßstabsfaktor x_q x_M Größeder Groß-/Modellanlage

durch charakteristische Größen-Zusammensetzungen \rightarrow Kennzahlen, dimensionlos.

Für Bildung der Zusammenhänge unerlässlich

Totale Ähnlichkeit kann möglich (nur in sehr einfachen Fällen)

Senkung des Versuchsansatz auf 1%

• Kennzahlen

(mod) Grashoffsche für freie Strömung Grav 1/G₀

Reynolds erzwungene Strömung $Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$ (Stoff+Wärme)

Strömung: { Galilei $Ga = \frac{\rho \cdot g}{\nu \cdot \mu}$
 { Froude $Fr = \frac{w \cdot l}{\sqrt{\rho \cdot g}}$

} Stofftransport

w.. Fluidgesch.

Stoffgrößen: { Prandtl $Pr = \frac{\nu \cdot C_p \cdot P}{\lambda}$
 { Schmidt $Sc = \frac{\nu}{D}$

Wärmetrans.

D.. Wärmedämpf.

2-Phasentr.: { Weber $We = \frac{\sigma}{\rho \cdot w^2 \cdot l}$
 { Eötvös $Eö = \frac{\rho \cdot g \cdot l^2}{\sigma}$

} Stofftransport

D.. Diffusionskoeff.

zur Ber. der Übergangsstoff: { Nusselt $Nu = \frac{w \cdot l}{\lambda}$
 { Sherwood $Sh = \frac{C \cdot c}{D}$

Wärmetransport
Stofftransport

σ.. Oberflächengesch.

λ.. Wärmeübertragungskoeff.
β.. Stoffübergangskoeff.

2. Wärmeaustausch

- Wie lautet die Grundgleichung des Wärme- und Stofftransports?

Strom = Leitkoeff. \cdot Fläche \cdot Gleichgewichtsstörung

3 Arten des Wärmetransports:

- Wärmeleitung: hauptsächlich in Festkörpern, durch Bewegung von Ionen. $\dot{Q} = \lambda; A \cdot \frac{dT}{dx} \Rightarrow \dot{Q} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{S}$

Bei mehrschichtigen Wänden: $\dot{Q} = \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i}}$

- Konvektion: durch bewegte Schichten. Bsp. von Wind in Fluid

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T) \quad T_w \dots \text{Wandtemp}$$

- Durch Strahlung: bei hohem T kommt Strahlungsanteil Wärmestr. liegt im techn. IR-Bereich (0,8-15 μm).

$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{\epsilon_s \cdot A \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)}{\left(\epsilon_1 + \epsilon_2 - 1 \right)} \quad \begin{aligned} \epsilon_s &\dots \text{Strahlungskoeff. schwarze Körper} \\ \epsilon &\dots \text{Emissionsverhältnisse} \end{aligned}$$

3 Phasenreihen oft parallel vorhanden, selten gebunden. Leitung auch in dünnen, ruhenden oder lang durchströmten Schichten (≤ 1 mm) z.B. Prosthesen Grenzsch.

- = Vorgehensweise beim Verd. durch ind. Wärmeaustausch.

Siedetemperatur T_s , Wandtemp T_w

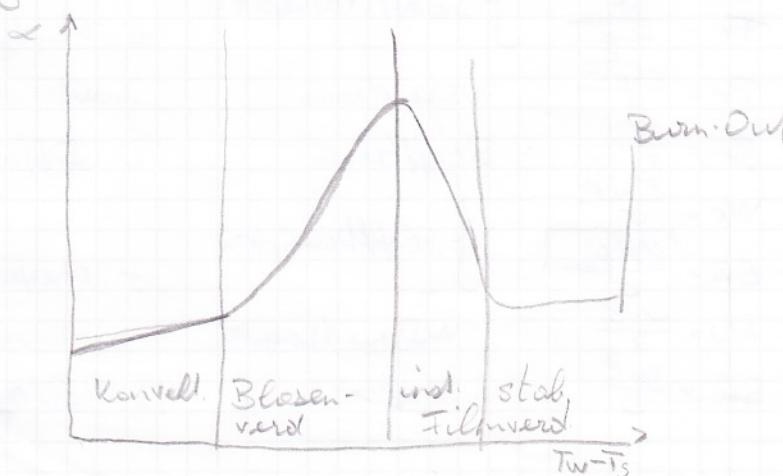
T_w wird leicht höher gewählt als $T_s \rightarrow$ Wärmeübertrag. durch Konvektion.

Bei höherer T_w kommt Blosenbildung, meist unregelmäßiger Wand.

Andere Grenzfälle d. Blöse verdängt weiter fl. in die Blöse. Mit zunehmender Blösenbildung bessere Durchmischung \rightarrow Zonendicke nimmt ab \rightarrow nimmt zu, weil Phasenwiderstand groß wird (Blösenwand) = Blösenverdampfung.

Schr. dichte Blösen \rightarrow Bildung einer Dampfschicht, die Wand und liq. trennt \rightarrow sinkt bis durch Erhöhung des ΔT die T_w die Wand von einem Film bedeckt ist. (instab. Filmverdampfung)

Begrenzt durch Durchbrennen des Wandmaterials



2.

Kondensation von Dämpfen

T_w unter T_s oder T_c → Kondensation auf Fläche. Kondensationswärme muss von der Wand abgeführt werden.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \alpha \cdot A \cdot (T_g - T_w)$$

Bei reinem Dampf läuft Wärmetransport über durch die Schicht an bereits kondensierter Flüssigkeit. Bei Gas-Dampf-Mischungen muss Wärme durch eine isolierende mit Gas angefüllte Schicht → bereits bei 1% Gas-Zahl → stark

2 Arten der Kond., hängt von Benetzbarkeit ab:

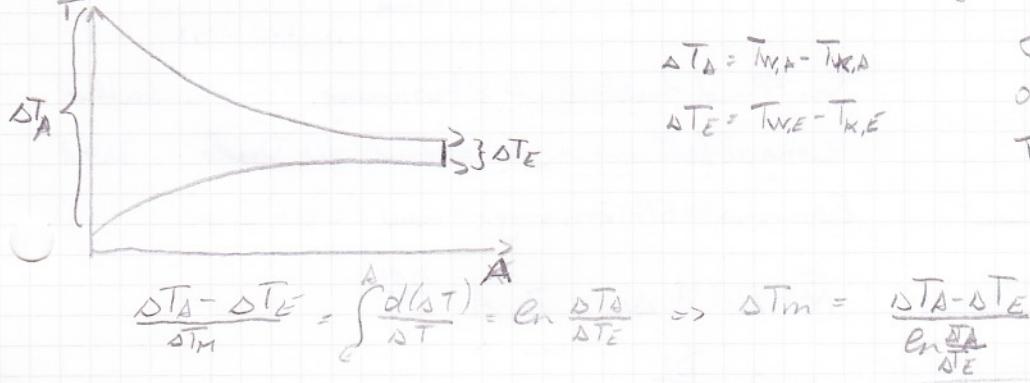
Filmkond. Durch vollständige Benetzung bildet sich ob. gewisser Schichtdiele eine unvollkommene Schicht über der laminaren



Bei Tröpfchenkond. keine Benetzbarkeit (z.B. H_2O auf Teflon)
→ viel freie Fläche um weiter zu kondensieren → sehr hoch
technisch überwieg. Filmkondensation

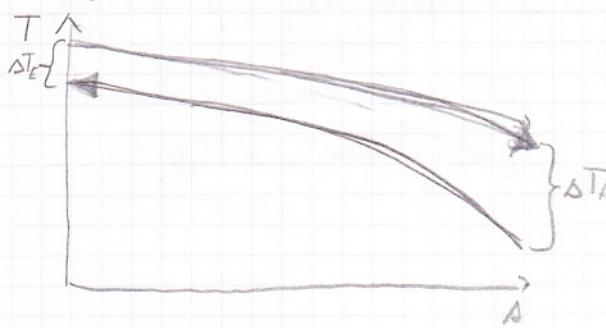
Gleich- / Gegenstromapparate

• Gleichstr.: beide Fluide fließen in gleiche Richtung



je länger Austauschfläche
desto mehr erhöht sich
Triebkraft ΔT gegen 0

• Gegenstrom



$$\Delta T_A = T_{w,A} - T_{k,A}$$

$$\Delta T_E = T_{w,E} - T_{k,E}$$

Austrittstemperat. des kalten
Stromes über der Austrittsst.
des warmen Stromes. Mit

Gleichstrom nicht mögl.

Für Auflegung von insl. Wärmetauschelein (Rektuperatoren) wird Austauschfl. A gesucht

$$A = \frac{\dot{Q}}{K \cdot \Delta T_m}$$

K hängt von τ, p, η, c_p und w ab. W jedoch erst aus Altmessungen feststellbar. τ von Werkstoff abhängig → mit iterativer Ansatz.

3. Stoffaustausch

- Treibende Kräfte

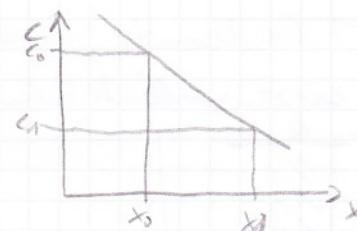
Treibende Kräfte für den Stoffaustausch stellen Konzentrationsgradienten dar. Gleichgewicht herrscht wenn das chem. Potential μ_i aller Komponenten in allen Phasen des Systems gleich ist. Daraus folgt dass die freie Energie nach Gibbs $G=0$. (sofern $T, p = \text{const}$). Um Gleichgewicht erfolgt der Transport zw. den Phasen reversibel $\dot{N}_{i,\text{A}} = \dot{N}_{i,\text{B}}$ $d\dot{N}_{i,\text{A}} = -d\dot{N}_{i,\text{B}}$

Treibende Kraft bei Wärmeübertr. ist die T -Differenz zw. 2 Phasen. Ggn. versch bei T -Ausgleich (thermisches Ggw.)

Stofftransport durch Diff. (sehr langsam):

$$\text{stationär: } \tilde{\dot{N}_i} = -D_i A \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} \rightarrow \tilde{\dot{N}_i} = -D_i A \frac{\Delta c_i}{\Delta x}$$

$$\text{instationär: } \frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i \cdot \left(\frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \right) \dots \text{Lösung nur für einfache Fällle}$$



$$\text{Vergleich zu Wärmeleitung: } \dot{Q} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (\gg \text{in Festkörpern})$$

- Stoffübergang

Analoger Ansatz zu Wärmeübergang:

$$\tilde{\dot{N}_i} = \beta_i \cdot A \cdot (c_s - c_f) = \beta_i \cdot A \cdot \Delta c_i$$

c_s ... Konz.-Feststoff

c_f ... Konz. in Fluid

Bsp. auflösender FS:



Im Fluid turbulente Strömung $\rightarrow c_f$ einheitlich
Konz. Abfall nur in Grenzschicht der Dicke δ . Durch laminare Strömung \rightarrow nur durch Diff.

$$\begin{aligned} \tilde{\dot{N}_i} &= \beta_i \cdot A \cdot \Delta c_i = D_i \cdot A \cdot \frac{\Delta c_i}{\delta} \\ &\Rightarrow \beta_f \frac{D_i}{\delta} \end{aligned}$$

Turbulenter und laminarer Teil jedoch ohne scharfe Grenze $\rightarrow \delta$ nur ca.

$$\beta_i \cdot A \cdot \Delta c_i = D_i \cdot A \frac{\Delta c_i}{\delta}$$

$$\Rightarrow SR = \frac{\beta_i \cdot l}{D_i}$$

Sh stellt Zusammenhang zw.

l ... char. Länge

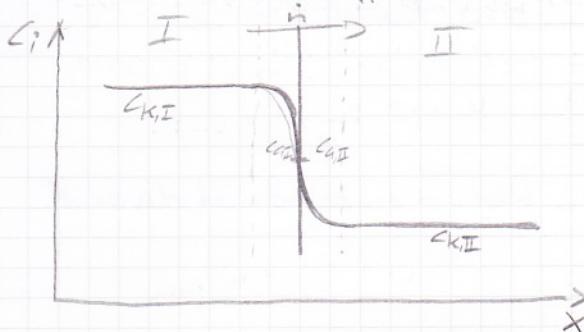
Konvektion und Diff her

3)

- Zweifilmtheorie

Modell für Stoffdurchgang zw. 2 Phasen

Kernströme turbulent $\rightarrow c_{K,i} = \text{const}$ über x . Widerstand für Stoffübergang nur in den Phasengrenzflächen liegenden Grenzschichten. Andere Phasengrenzfl. = fiktiv, stellt keinen Widerstand dar. In Grenzschichten laminare Strömung \rightarrow molekulare Diffusion.



$$\dot{N}_i = \beta_1 \cdot A \cdot (c_{K,i} - c_{G,i})$$

Transport von Grenzfläche aus in Kernströmung

$$\dot{N}_i = \beta_2 \cdot A \cdot (c_{G,II} - c_{K,II})$$

Gew. an der Grenzfläche: \rightarrow

$$k^+ = \frac{c_{G,II}}{c_{G,I}} \rightarrow c_{G,i} = c_{G,I} \cdot k^+$$

Zu $c_{K,1}/c_{K,2}$ gehörende fiktive cone = c_2^+/c_1^+

$$\Rightarrow K^+ = \frac{c_2^+}{c_{K,1}} \Rightarrow c_{K,1} = \frac{c_2^+}{K^+} \quad K^+ = \frac{c_{K,2}}{c_1^+} \Rightarrow c_{K,2} = K^+ \cdot c_1^+$$

$$c_{K,1} - c_{G,1} = \frac{\dot{N}}{\beta_1 \cdot A} \Rightarrow \frac{c_2^+}{K^+} - \frac{c_{G,2}}{K^+} = \frac{\dot{N}}{\beta_1 \cdot A} \quad K^+$$

$$c_{G,2} - c_{K,2} = \frac{\dot{N} K^+}{\beta_1 \cdot A}$$

$$c_2^+ - c_{K,2} = \frac{\dot{N}}{A} \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right) \quad \Rightarrow c_a \text{ eliminiert wäres schwer zugänglich}$$

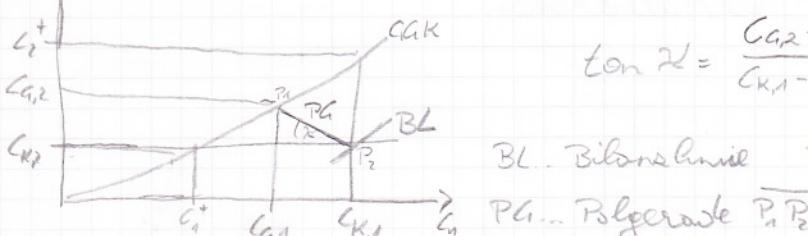
$$\frac{1}{K^+} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \Rightarrow c_2^+ - c_{K,2} = \frac{\dot{N}}{A K^+} \Rightarrow \dot{N} = k_2 \cdot A \cdot (c_2^+ - c_{K,2}) \quad (\text{für Phase II})$$

$$c_{K,1} - c_{G,1} = \frac{\dot{N}}{\beta_1 \cdot A} \quad c_{G,2} - c_{K,2} = \frac{\dot{N}}{\beta_2 \cdot A} = c_{G,1} \cdot K^+ - K^+ \cdot c_1^+$$

$$c_2^+ - c_{K,2} = \frac{\dot{N}}{A} \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right)$$

$$\frac{1}{K^+} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}$$

$$c_2^+ - c_{K,2} = \frac{\dot{N}}{A} \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right) \quad (\text{für Phase I} \dots \text{Abgaber})$$



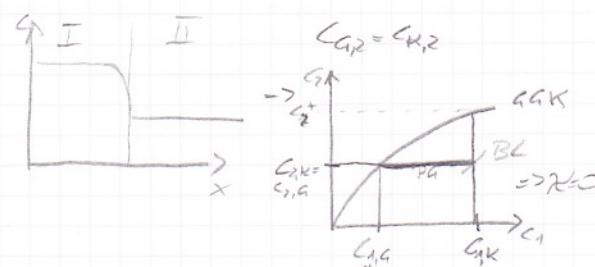
$$\tan \alpha = \frac{c_{G,2} - c_{K,2}}{c_{K,1} - c_{G,1}} = \frac{\beta_2}{\beta_1}$$

2 Film Theorie nicht ganz

Korrekt, aber meistengenau

Falsch, weil Phasengrenzfl. immer verdeckt wird, nicht feststeht.

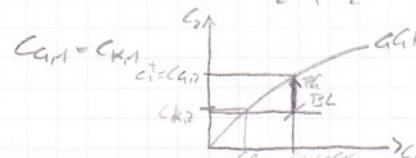
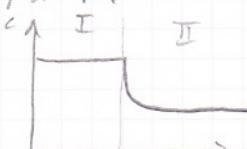
Alternative: Penetrationstheorie, nachgiebig, Oberflächenreakt. nach Doppelschicht



Falls $\beta_2 > \beta_1 \rightarrow$ Widerstand "nur" in Phase 1

$$k_1 \approx \beta_1$$

Falls $\beta_1 > \beta_2 \rightarrow$ Widerstand in Phase 2: $k_2 \approx \beta_2$



$$\Rightarrow \alpha = 90^\circ \rightarrow \tan \alpha \rightarrow \infty \Rightarrow \beta_2 \rightarrow 0$$

- Penetrationstheorie nach Higbie.

Verbessert 2-Film-Theorie, davon ständiger Erneuerung der Grenzfläche ausgegangen wird. Grenzfläche aus versch. Teilchen, erst gesammelte und bereits verschieden beladene Teilchen.



- Annahmen:
 - Verweilzeit für alle Teilchen gleich groß (τ)
 - nur Diffusion (keine Übertr. durch Konvektion)
 - Teilchen mit $t_{\text{ansiedl.}} = \infty$ haben $c_i = c_{i,\text{vern}}$

$$\beta_{\text{II}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot \tau}}$$

Ebenfalls vereinfacht durch Diff., $\tau = \text{const.}$... kann angewandt, da auch nicht ganz korrekt, aber komplizierter

4. Therm Trennverfahren

- Diskont / Kont Verfahren

Diskont. + erprob. einfache Konst.

- Größe begrenzt, mehrere parallele App. nötig, viel Betriebsmittel, hoher Totzeit
- Kont. + optim. Konstruktion möglich, ReB-/Regeltechnik einfacher, hohe Auslastung, oft höher Durchsätze, weniger Betriebsmittel
- Kreislauf braucht größeren Aufwand

- Konsentrationen / Beladung

Kons. = auf Gesamtmenge bezogen, Anteil der Gesamtmenge z.B.

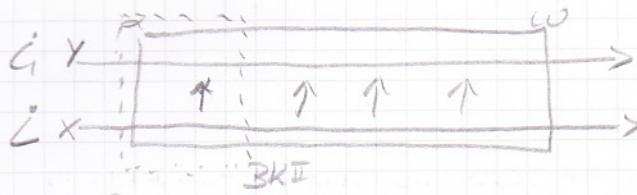
$$w_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad x_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$$

Beladung = bezogen auf Gesamtmenge oder die betrachtete Spezies = Rest

$$\text{z.B. Rassensbeladung } x_{m,i} = \frac{m_i}{(\sum m_i) - m_i} = \frac{m_i}{m_i}$$

Beladungen bei Absorption, Desorption, Adsorption, Extraktion üblich
Kons. bei Membrantrennverf., Dest./Trockifikation

-Gleich-/Gegenstrom



Bilanzübergreifender Prozess

$$\dot{L} \cdot x_a + \dot{C} \cdot y_a = \dot{L} \cdot x_w + \dot{C} \cdot y_w$$

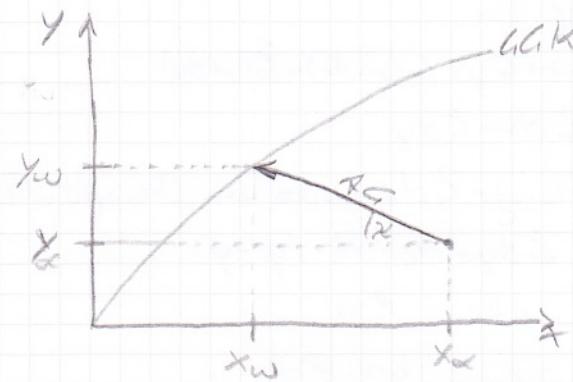
$$\dot{C} \cdot (x_a - x_w) = \dot{C} \cdot (y_w - y_a)$$

für BKII (Teilstück gilt)

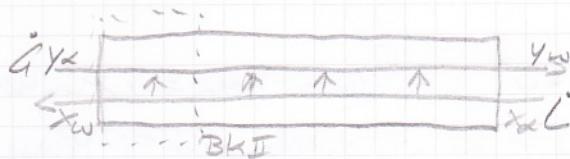
$$\dot{L} \cdot x_a + \dot{C} \cdot y_a = \dot{L} \cdot x + \dot{C} \cdot y$$

$$\dot{L} \cdot (x - x_w) = \dot{C} \cdot (y - y_a)$$

$$\Rightarrow AG: \underline{\underline{y = -\frac{\dot{C}}{\dot{L}} \cdot x + \frac{\dot{L}}{\dot{C}} x_a + y_a}}$$



Prozess am Ende im Ggw., nur 1. Trennstufe



über Gesamt-Prozess

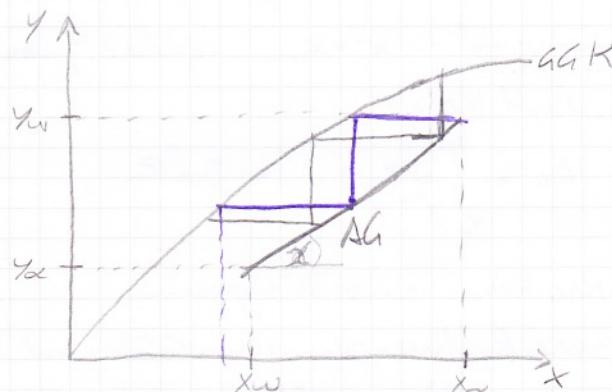
$$\dot{C} \cdot y_a + \dot{L} \cdot x_a = \dot{C} \cdot y_w + \dot{L} \cdot x_w$$

über BKII

$$\dot{C} \cdot y_a + \dot{L} \cdot x = \dot{C} \cdot y + \dot{L} \cdot x_w$$

$$\dot{L} \cdot (x - x_w) = \dot{C} \cdot (y - y_a)$$

$$\Rightarrow AG: \underline{\underline{y = \frac{\dot{C}}{\dot{L}} \cdot x - \frac{\dot{C}}{\dot{L}} x_w + y_a}}$$



mehr als 1. Trennstufe möglich.

-Trennstufe theoret.

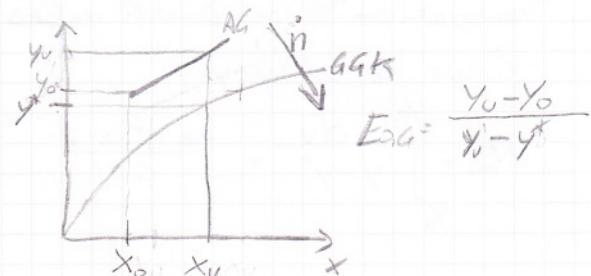
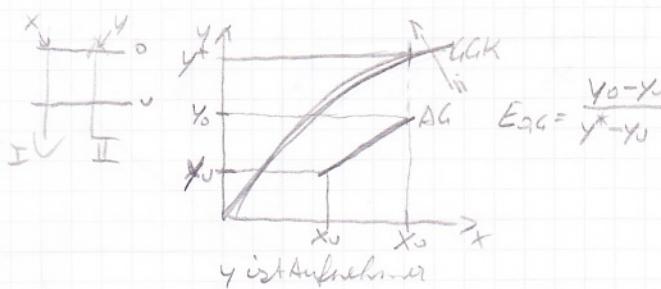
einer Kolonne

Theoret. Trennstufe ist der Abschnitt nach dem die Phasen im Ggw. sind. Der Zustandspunkt liegt auf der GGK. Bestimmung der Trennstufen aus McCabe-Thiele bzw. Befordungsdiagramm. $HETS = \frac{H}{NTR}$ $n_i = HETS^{-1} = \frac{NTR}{H}$

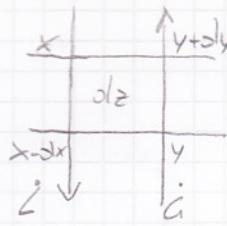
-Prakt. Trennstufe

Ggw. oft nicht erreicht \rightarrow prakt. Trennstufe. Beschrieben wird ihre Wirksamkeit in Form des Stufenwirkungsgrades oder ~~Wirkungsgrad~~ Wirkungsgrades E_{AG}

~~Wirkung der prakt. Stufe~~
EAG = Wirkung der theoret. Stufe



- HTU/NTU



Rektifikation:

$$L \cdot x + G \cdot y = L(x - \alpha x) + G(y + \alpha y)$$

$$\dot{L} dx = \dot{G} dy$$

Raum $\dot{G} dy$ wird von Grenzfläche abtransportiert (in Kernströmung)

$$\dot{G} dy = k_a \cdot dA \cdot (y_i - y)$$

$$dA = a \cdot P dz$$

$$\frac{dy}{y_i - y} = \frac{k_a a \cdot P dz}{\dot{G}}$$

$$\frac{y^* dy}{y_i - y} = \frac{k_a a \cdot P z}{\dot{G}} = N_a$$

N_a ... Zahl der gesetzigen Übergangseinheiten

$$a = \frac{A}{V}$$

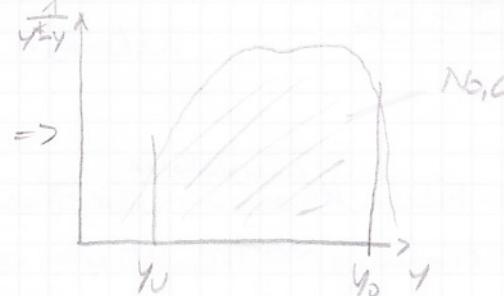
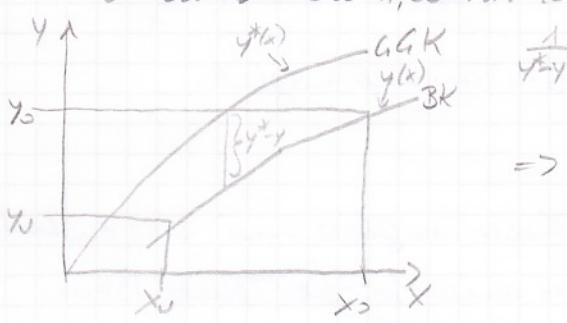
Sollt nichtlösbarste y_i unbekannt. Setze $y_i = y^*$ $y^* = y_{\text{gas}} - \text{Kone zur X im Kern}$
wenn $y_i = y^* \Rightarrow x_i = x_{\text{Kern}}$ (Siche Z-Film-Theorie) \rightarrow kein Widerstand in Fl-Phase
(einheitl. Kone)

$$\Rightarrow N_a = \frac{\int_{y_0}^{y^*} dy}{y^* - y} = \frac{k_a a \cdot P z}{\dot{G}}$$

$N_a = NTU$... Number of transfer units

$$HTU = \frac{R}{NTU} = \frac{R}{N_a} \quad \dots \text{Height of transfer units}$$

$$R = z \Rightarrow HTU = \frac{R}{k_a \cdot a \cdot P}$$



für Absorption

L = Aufnehmer

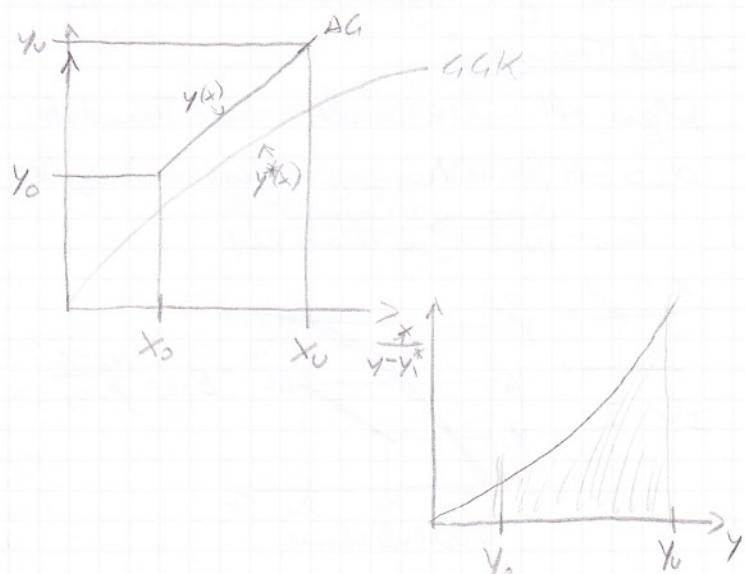
$$\dot{G} y + L x = \dot{G}(y - \alpha y) + L(x + \alpha x)$$

$$\dot{G} dy = L dx$$

Transport an Phasengrenzfl. in Gas:

$$\dot{G} dy = k_a \cdot dA \cdot (y - y_i)$$

$$N_a = \int_{y_0}^{y^*} \frac{dy}{y - y^*} = \frac{k_a \cdot P \cdot a \cdot z}{\dot{G}}$$



5) Destillation/Rektifikation

- Nichtidealität

Für Gasphase gilt ideal $p_i = y_i \cdot p_{ges}$... Dalton

real $p_i = \varphi_i y_i \cdot p_{ges}$ φ_i : Korrekturfaktor für $p \rightarrow p$

Fliessigphase ideal $p_i = x_i \cdot p_{oi}$... Raoult

real $p_i = x_i \cdot \delta_i f_{oi}$... δ_i : Aktivitätskoeff.

Bei $x_i \rightarrow 0 \Rightarrow$ Henry-Gesetz: $p_i = H_i x_i$

$x_i \rightarrow 1 \Rightarrow$ Raoult Gesetz: $p_i = x_i \cdot p_{oi}$ p_{oi} : Standarddruck der reinen Kompo.

Bei realem statt idealen Verhalten \rightarrow Korrekturfaktoren für p_i , $x_i \rightarrow$ aktl.

- Trennfaktor

$$\alpha = \frac{\text{Kontakt in Aufnahmephase}}{\text{restl. Kontakt}}$$

$$\alpha = \frac{\text{Kontakt in Abgashpase}}{\text{restl. Kontakt}}$$

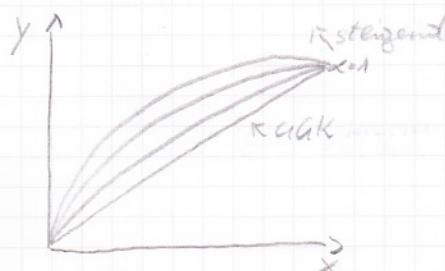
$$\alpha = \frac{\frac{y}{1-y}}{\frac{x}{1-x}}$$

Raoult: $p_i = p_{oi} \cdot x_i$

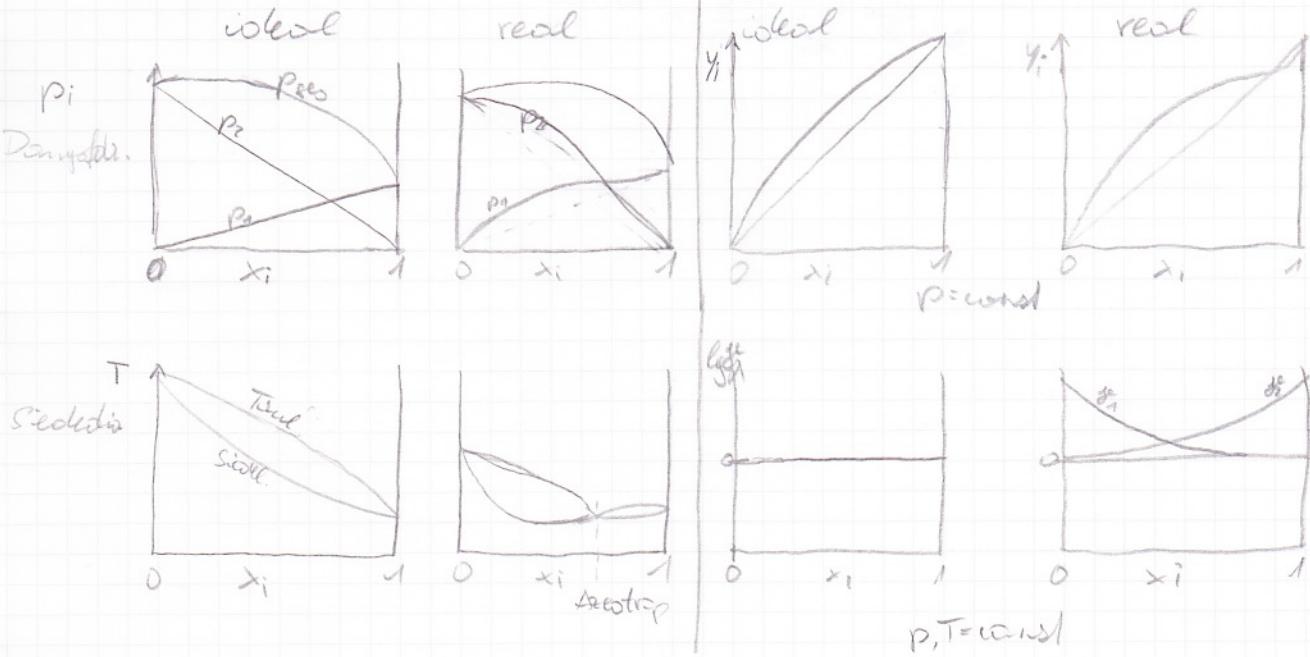
Dalton: $p_i = y_i \cdot p_{ges}$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{\frac{p_{o,1}x_1}{p_{ges}}}{\frac{(1-x_1)p_{o,2}}{p_{ges}}} = \frac{p_{o,1}}{p_{o,2}} = \frac{K_1}{K_2}$$

1. leichtsied. Komponente
2. schwer. - " -



- Diagramme



- Unterschiede Destillation / Rektifikation

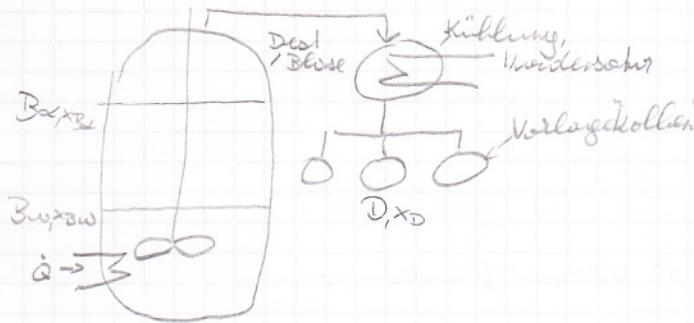
Destillation:

- einstufig
- kont./diskont.
- 1/2 Produktstromkreis, evtl. mehrere Verlageschleifen \rightarrow Fraktionen
- art: $v = \frac{F}{F}$

Rektifikation

- mehrstufig
- kont.
- versch. Massenversch. möglich
sichtbar
- Gegenstrom-Anlage
- versch. Rücklaufverhältnisse am Kopf + Boden möglich
- versch. Voraussetzungen zur Berechnung des Trennaufwands nötig

- Offene, diskont. Destillation



B ... Menge in Destblöse D ... Destillatmenge

x_B, w Anfangsmengen x_D, m Destillatmenge ($x_{D,m} \dots$ mittlere Konz.) y ... Dampfdruck

$$D = B_B - B_w$$

$$x_{D,m} = \frac{B_B x_B - B_w x_w}{B_B - B_w}$$

$$\underline{x_{D,m} = \frac{B_B x_B - B_w x_w}{B_B - B_w}}$$

für differentielle Mengenbilanz

$$-d(x_B \cdot B) = dD \cdot y$$

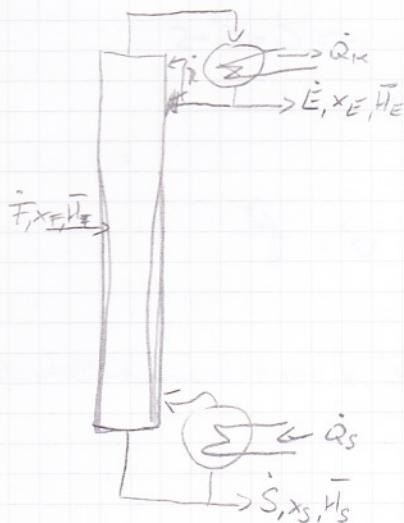
$$-dx_B \cdot B - x_B dB = dD \cdot y \quad dD = -dB$$

$$dB(y - x_B) = B dx_B$$

$$\frac{dB}{B} = \frac{dx_B}{y - x_B}$$

$$\int_{B_w}^{B_B} \frac{dB}{B} = \int_{x_w}^{x_B} \frac{dx_B}{y - x_B} = \ln \frac{B_B}{B_w}$$

- Rässen- & Wärmebilanz der Rektifikation



Mengenbilanz:

$$\dot{F} = \dot{E} + \dot{S}$$

für leichtförderndes: $\dot{F} \cdot x_F = \dot{E} \cdot x_E + \dot{S} \cdot x_S$

$$\dot{S} = \dot{F} - \dot{E} \Rightarrow \dot{E} = \dot{F} \cdot \frac{(x_F - x_S)}{(x_E - x_S)}$$

$$\dot{E} = \dot{F} - \dot{S} \Rightarrow \dot{S} = \dot{F} \cdot \frac{(x_F - x_E)}{x_S - x_E} = \dot{F} \cdot \frac{(x_E - x_S)}{(x_E - x_S)}$$

Wärmebilanz:

$$\dot{Q}_S + \dot{F} \cdot \bar{H}_F = \dot{Q}_K + \dot{E} \cdot \bar{H}_E + \dot{S} \cdot \bar{H}_S + \dot{Q}_{\text{Verlust}}$$

$$\Rightarrow \text{Wärmebedarf: } \dot{Q}_S = \dot{Q}_K + \dot{E} \cdot \bar{H}_E + \dot{S} \cdot \bar{H}_S + \dot{Q}_{\text{Verlust}} - \dot{F} \cdot \bar{H}_F$$

Kühlwasserbedarf:

$$\dot{Q}_K = (\dot{E} + \dot{R}) \cdot \Delta H_{\text{Kühlw}, E}$$

$$\frac{\dot{R}}{\dot{E}} = v \dots \text{Durchfluss} \Rightarrow \dot{Q}_K = \dot{E}(1+v) \cdot \Delta H_{\text{Kühlw}, E}$$

- McCabe-Thiele Diagramm

\forall : über x ; der Leichtflüssigkeitsanteil angefragt

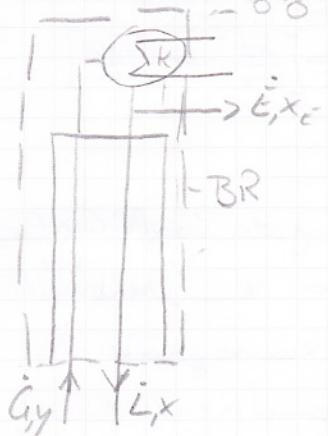
Damit kann $n_{\text{Th}, \text{min}}, n_{\text{min}}$ aufgelistet werden. Benötigt dafür eine gegebene Slog-Kurve (Literatur), sowie kolorische Faktoren F (d.h. Zustand des Feds), Rücklaufverhältnis (Kopftrom, Rücklaufstrom) und Fadstrom

Voraussetzungen

- $L_i = L$ - Molenströme, d.h. der Komp. = gleich \Rightarrow Trüben'sches Gesetz gilt $S_{\text{Th}} = \frac{R_{\text{Viel}}}{T_S} \approx 92 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
 $\Rightarrow x_{i,y} = \text{konst}$
- Enthalpieänderung der Flüssigkeit vernachlässigbar im Vergleich zu Verd.-Enthalpie
 $\Rightarrow \bar{H}_E$ nicht von T abhängig
- Keine Richtungsverluste \Rightarrow ideale bzw. annähernd ideale Richtung
- kein Wärmeverluste \Rightarrow Kolonne isoliert, d.h. $> 0,5 \text{ m}$

Arbeitsgeraden herleiten

Verstärkungsgerade:



Gesamtmengebilanz:

$$\dot{G} = \dot{E} + \dot{L}$$

für leichtförderndes Komp.: $\dot{G}_y = \dot{E}x_E + \dot{L}x_L$

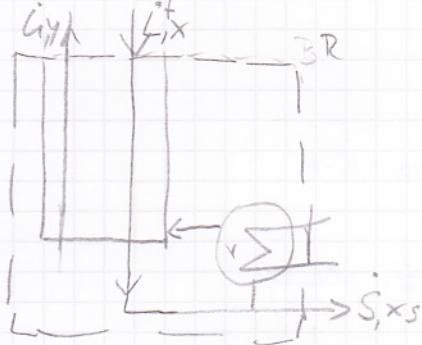
$$\Rightarrow \dot{E} \cdot y + \dot{L} \cdot y = \dot{E}x_E + \dot{L}x_L$$

$$y_L = \frac{\dot{L}}{\dot{E} + \dot{L}} x + \frac{\dot{E}x_E}{\dot{E} + \dot{L}}$$

$$v = \frac{\dot{R}}{\dot{E}} = \frac{\dot{L}}{\dot{E}}$$

$$y_{V,G} = \frac{v}{(v+1)} x + \frac{x_E}{(v+1)}$$

Abtriebsgerade



$$\text{Gesamtbilanz: } \dot{L}^+ = \dot{G} + \dot{S} \rightarrow \dot{G} = \dot{L}^+ - \dot{S}$$

$$\text{Für Leichtsider: } \dot{L}^+ x = \dot{G} y + \dot{S} x_S$$

$$\dot{L}^+ x = \dot{L}^+ y - \dot{S} y + \dot{S} x_S$$

$$y = \frac{\dot{L}^+}{\dot{L}^+ - \dot{S}} x - \frac{\dot{S} x_S}{\dot{L}^+ - \dot{S}}$$

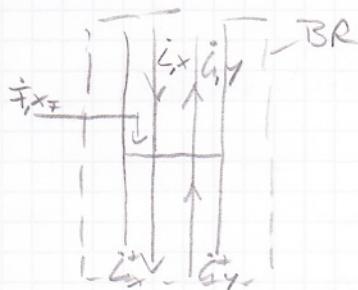
$$V^+ = \frac{\dot{L}^+}{\dot{S}}$$

$$y = \frac{V^+}{V^+ - 1} x - \frac{x_S}{V^+ - 1}$$

da \dot{L}^+, V^+ unbekannt \rightarrow Schnittgerade

Schnittpunktsgerade

Betracht Boden, indem Feed zuläuft



$$\text{Gesamtbilanz: } \dot{F} + \dot{L}^+ + \dot{G}^+ = \dot{G} + \dot{L}^+$$

$$\text{Für Leichtsider Komp.: } \dot{F} x_F + \dot{L}^+ x + \dot{G}^+ y = \dot{G} y + \dot{L}^+ x$$

f = kolor. Faktor, beschreibt therm. Zustand des Feeds

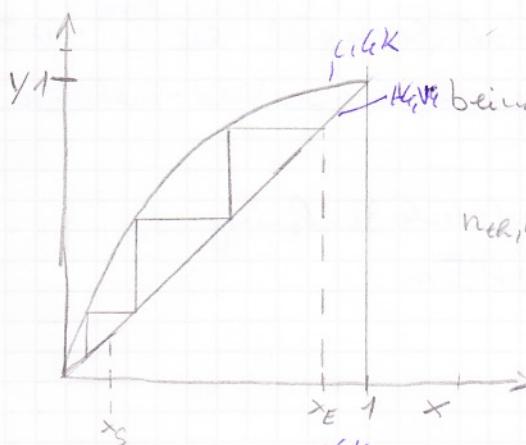
$$\dot{L}^+ - \dot{L} = f \cdot \dot{F} \quad \dot{G}^+ - \dot{G} = (f-1) \dot{F}$$

$$\Rightarrow \dot{F} x_F + \dot{L}^+ x + (f-1) \dot{F} y + \dot{G} y = \dot{G} y + f \cdot \dot{F} x + \dot{L}^+ x \quad 1: \dot{F}$$

$$x_F + (f-1)y = F x$$

$$y = \frac{F}{f-1} x - \frac{x_F}{f-1}$$

Durch Punkte $(\frac{x_F}{f-1}, 0)$ und $(x_F, \frac{x_F}{f-1})$



GJK

Al, VG bei unendl. Druckfuß: $E=0 \Rightarrow v=\infty \Rightarrow y_{VG}=x$

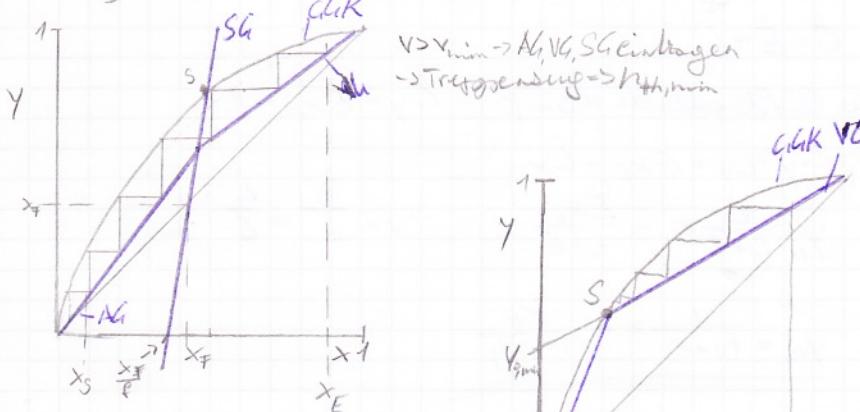
$\dot{S}=0 \Rightarrow v=\infty \Rightarrow y_{AG}=x$

ner/min durch Einschränken des Trenngrenzenzuges

Fenske-Underwood

$$n_{th} = \frac{\log \left[\frac{x_E}{x_F} - \frac{1-x_S}{x_S} \right]}{\log \alpha}$$

$$y_{min} = \frac{1}{\alpha-1} \left[\frac{x_E}{x_F} - \frac{1-x_S}{x_S} \right]$$

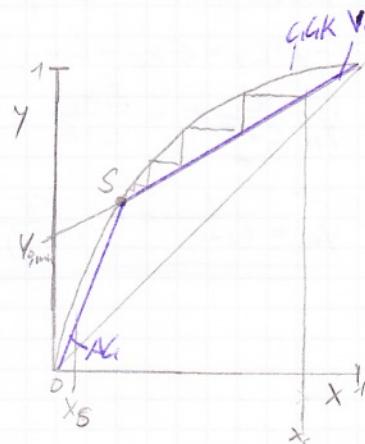


VG, SG, GJK
Trenngrenze $\Rightarrow n_{th,min}$

$y > y_{min} \rightarrow$ Al, VG, SG eintreten

\rightarrow Trenngrenze $\Rightarrow n_{th,min}$

Feed-Zulauf auf dem Boden
schließen Schnittpunkt mit GJK oder
Schnittpunkt S oder SG und GJK
um möglichst klein



Zwischenbildung, da Saug GJK liegt

$\rightarrow n_{th,min} \rightarrow y_{min}$ Grenzwert bei

$y_{min} \rightarrow \infty$, v muss größer als

y_{min} sein, damit n endlich wird

Oft $v = 1,3 \cdot v_{min}$

Graphisch y_{min} : in Fkt der VG y_0, min für v und
für v einsetzen $\rightarrow v = v_{min} \rightarrow y_{min}$ feststellen

- Azeotrop Trennung

- Druckminderung \rightarrow Azeotrop verschiebt sich im Siedebildrogramm nach rechts. 2. Kolonnen nacheinander. 1. Kolonne p₁ \rightarrow hohes Anteil an leichter siedender Komponente im Kopf. Schwereidler im Sumpf. 2. Kolonne auf Normalkurve \rightarrow Azeotrop weiter links \rightarrow Rest des Schwereidlers als azeotrope Zusammensetzung im Kopf \rightarrow retourniert in 1. Kolonne. Leichtsiedler als Sumpf.
- mit Hilfsmittel:
 - Azeotroprekt: bildet neues Azeotrop bzw. verschiebt dieses, soll tafidend sein (\rightarrow Energie) und Retrogen-2phase \rightarrow leicht trennbar
 - Extraktionsmittel: Hilfsmittel bindet an schwerflüchtige Komponente \rightarrow Leichtsieder weg.
 \hookrightarrow Dampfdruck

Hilfsmittelforderungen: altrenbar, günstig, selektiv, Effektiv (veränderte viel), Δh_f klein, stabil, ungiftig, Stoffigenschaften angepasst an Gemisch (p, n, Ts...), nicht korrosiv

6. Kolonnen einbauen

- Anforderungen an Kolonnen einbauen

Trennwirkungsgrad (α, E_g), niedriger Druckverlust, hohe Belastbarkeit (Durchflussbereich), Flexibilität bei Veränderungen, unempfindlich gegen Verschmutzung und Korrosion, versch. Werkstoffe (\rightarrow Beständigkeit), Kostenniedrig, hohe spez. Oberfläche, soll Phasengleichheit ausgleichen (\rightarrow Wandabwärmen), geringe Backbildung, Benetzbarkeit, mechanische Festigkeit

- Grundtypen von Kolonnen einbauen

- Benetzungskolonnen: Füllkörper-/Packing Kolonne (ungetrennt, getrennt), Bsp. Pall-, Roschitz-Ringe, Intalox-, SuperSpiral, Sinterfach, Optiflow (Sulzer), Kühlriß Trommelpack
- Bodenkolonnen: spez. Böden, z.B. Bläser; Sieb-, Ventil-, Tunnelböden

- Druckverlust auf Siebböden

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_\sigma + \Delta p_L$$

$$\Delta p_\sigma = \frac{40}{d_0}$$

$$\Delta p_L = \beta (R_w + R_{hw})$$

$$\Delta p_t = 51 \cdot k \cdot w_s^2 \left(\frac{p_e}{p_e} \right) \cdot \left[0,4 \cdot \left(125 \cdot \frac{A_2}{A_1 A_3} \right) + \left(1 - \frac{10}{A_2 A_3} \right) \right]$$

Δp_t ... trockener Sp durch Strömung durch Bohrung

Δp_σ ... Sp durch Überwindung der Oberflächenspannung

Δp_L ... Sp wegen Überwind. des hydrostatischen Drucks zw. Gasaustritt bis

Wehrkontakt & Wehrüberhöhung, 3. hydrostatischer Druck (Fl-Gefälle)

vernachlässigbar

d_o ... Durchmesser d. Bohrung

R_w ... Wehrhöhe R_{hw} ... Wehrüberhöhung

B ... Begrenzungsfaktor $B = \frac{R_F}{R_w + R_{hw}}$

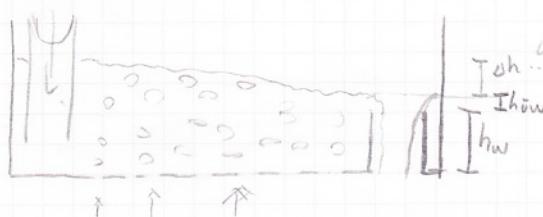
R_F ... Höhe des freien Fluids

w_s ... Gegenstrom und Bohrung

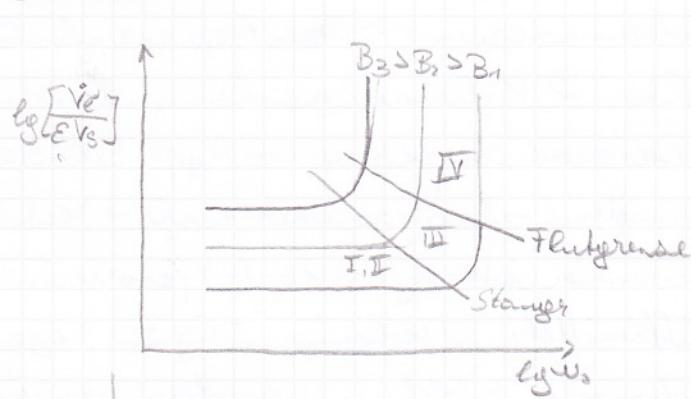
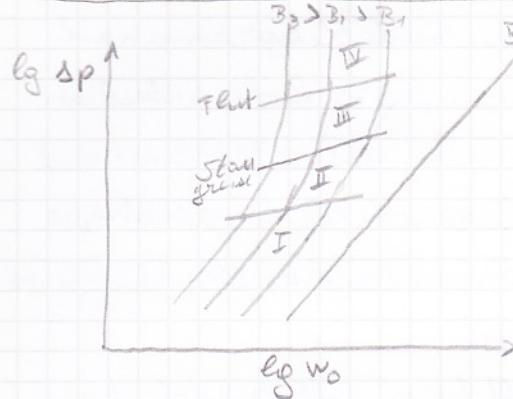
A_F ... Fläche Abflusssegment

A_o ... Gesamtbearbeitungsfläche

A_B ... Bodenfläche



- Druckverlust verhalten und spez. Flüssigkeitsinhalt



Druckverlust Δp (B_0) ist linear um Δp_{Stau} bei $\lg w_s = 0$

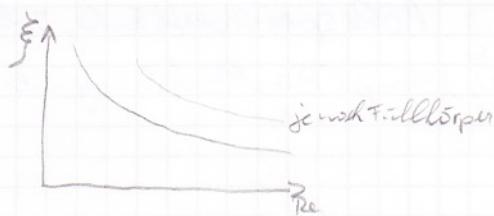
Durch Berieselung \rightarrow Verkleinerung des Porenraum (evtl sogar Auffüllung des Hohlraumes) $\rightarrow \Delta p$ steigt bei der Staugrenze weisen Kurven einen Knick auf Δp steigt schneller. Δp Flutgrenze fast senkrechter Anstieg von Δp mit w_s

Flüssigkeitsinhalt vor Staugrenze fast unabh von w_s , dann sehr starker Anstieg mit w_s . Bei Überschreiten der Flutgrenze füllt sich Porenraum sehr schnell mit Flüssigkeit \rightarrow extrem Anstieg. Führungsregeln abfließen \rightarrow in Praxis Bereich IV vermeiden

- Druckverlust in Füllkörperporosanen

unberieselte Packung:

$$\Delta p = \Delta p_t = \xi \frac{\rho_a \cdot w_s^2 \cdot (1-\epsilon)}{\epsilon^3 \cdot 2 \cdot \Delta p}$$



ϵ ... Porosität R ... Höhe der Schüttung

$$\Delta p_t \text{ der Durchmesser } \Delta p = 6 \cdot \frac{R}{S}$$

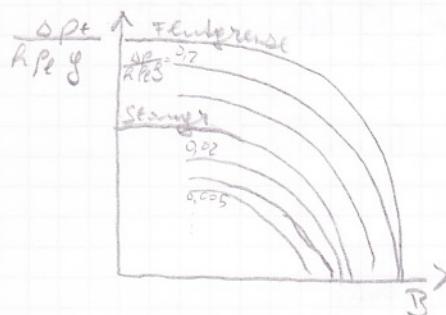
ξ ... Widerstandskennzahl $\xi = f(Re)$

$$Re = \frac{w_s \cdot \Delta p}{(1-\epsilon) \cdot \eta_g}$$

η_g ... kin. Viskosität des Gases

berieselte Packung \rightarrow Flutpunkt-Diagramm

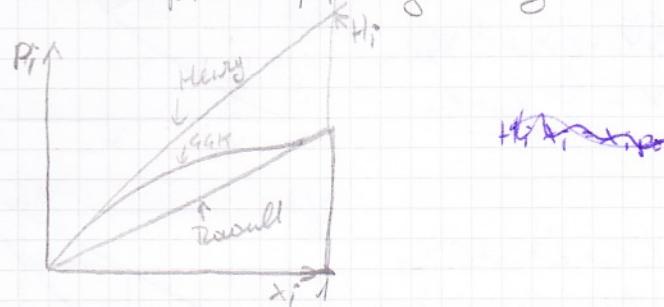
B ... Berieselungsdichte [-]



7. Absorption

Henry: $p_i = H_i \cdot x_i$... gilt im Grenzbereich $x_i \rightarrow 0$

Prausl: $p_i = x_i \cdot p_{\text{gas}}$... gilt im Grenzbereich $x_i \rightarrow 1$



- Absorption: Def und Prinzip

beruht auf Stoffaustausch zw. L und g-Phase, Übergangskompo=Gas

Absorption: Übergang in LM (Absorbens), Desorption: Retorn in Gasphase (z.B. Strichen)

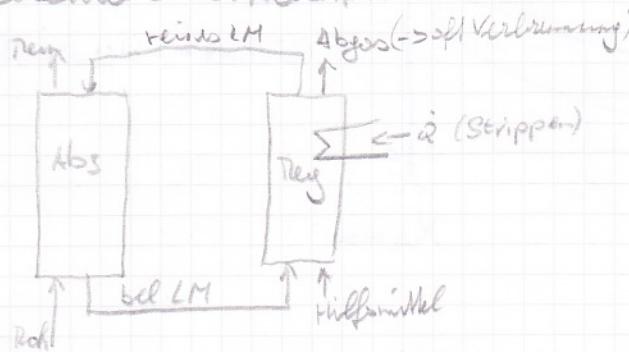
phys. Absorption: "Lösung" des Gases in LM.

$$p_i = H_i \cdot x_i \quad Y_i = \frac{p_i}{p_{\text{gas}}} = \frac{H_i \cdot x_i}{p_{\text{gas}}} \quad K^+ = \frac{Y_i}{x_i} = \frac{H_i}{p_{\text{gas}}} \quad \text{Beladungen: } \frac{Y_i}{1+Y_i} = \frac{H_i}{p_{\text{gas}}} \frac{x_i}{x_i + 1}$$

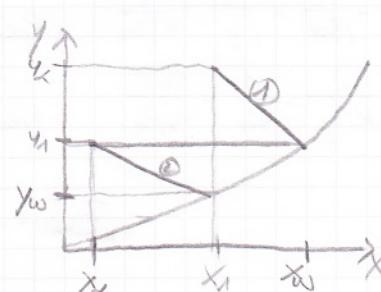
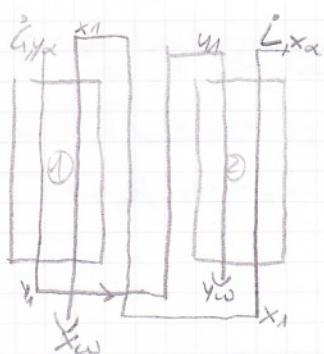
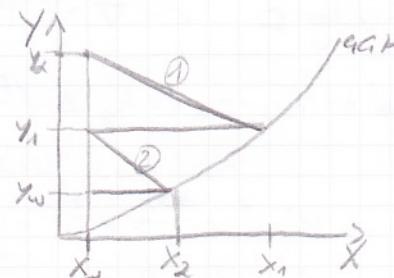
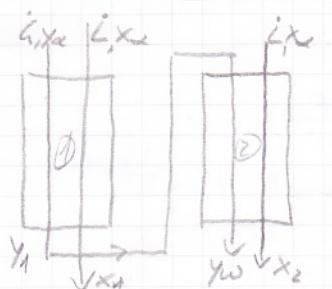
chem. Absorption: Gas reagiert mit Stoff in Lösung unter Bildung einer neuen Verbindung

→ schwierigere Regenerierung, dafür um vieles selektiver & höhere Abs.-geschw.

Schematische Darstellung einer Absorption



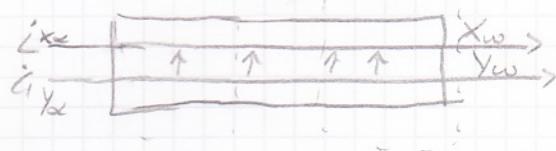
- Gleichstrom-Absorption



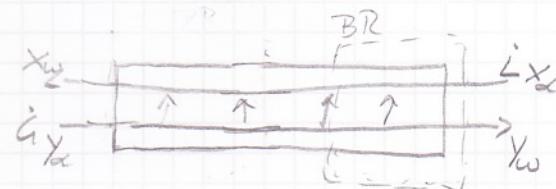
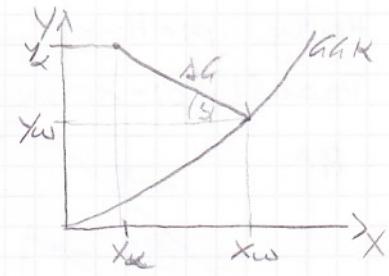
2 Ströme mit je frischem LM → bessere Leistung, jedoch viel LM zu regenerieren → Kosten hoch

Vorteil weniger LM, zuerst reines LM mit schwach konzentriertem Gas dann bereits bel. LM im Rohstrom, fies

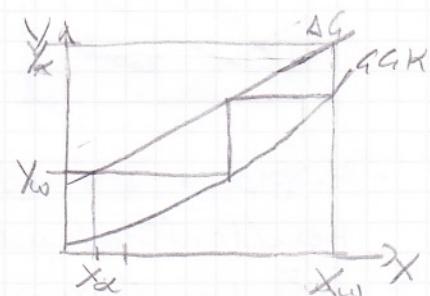
-Blasen: Gleich- & Gegenstromabsorber



$$\begin{aligned} L \cdot X + G \cdot Y &= L \cdot X_w + G \cdot Y_w \\ BR \cdot L \cdot X + G \cdot Y &= L \cdot X_w + G \cdot Y_w \\ Y &= -\frac{L}{G} X + \frac{L}{G} X_w + Y_w \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} G \cdot Y_w + L \cdot X_e &= L \cdot X_w + G \cdot Y_w \\ BR \cdot G \cdot Y + L \cdot X_e &= L \cdot X_w + G \cdot Y_w \\ Y &= \frac{L}{G} X - \frac{L}{G} X_w + Y_w \end{aligned}$$



- Volumestrom-Lösungsmittelverhältnis

Technischer aus Gesamtbilanz: $G \cdot X + L \cdot X_e = G \cdot Y_w + L \cdot X_w$

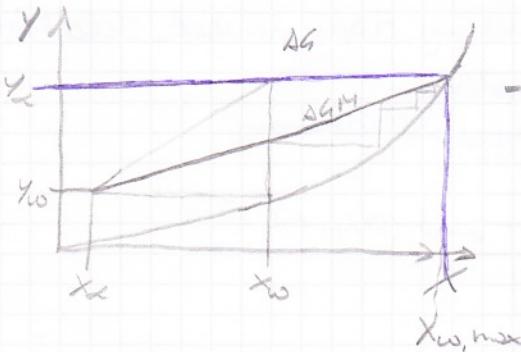
$$L = G \cdot \frac{Y_w - Y_e}{X_w - X_e} \dots \text{Lösungsmittelstrom}$$

bei L_{min} ist $X_w = X_{w,max}$, d.h. am Schluss ist Fl-Phase gesättigt \rightarrow GGW \rightarrow AG \times GGK

$$L_{min} = G \cdot \frac{Y_e - Y_w}{X_{w,max} - X_e}$$

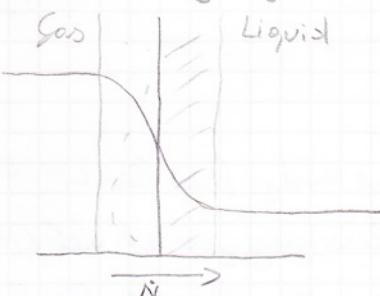
$$D = \frac{L}{G}$$

$$\frac{L_{min}}{D_{min}} = \frac{L_{min}}{G}$$



$\Rightarrow n_{th} \rightarrow \infty$, prothrich wird
lösbar $\Leftrightarrow L_{proth} = 135 \cdot L_{min}$

- Stoffübergang bei phys. Absorption



Gassseitig: p_i $pV = nRT$

$$\text{Flüssigkeitssseite: } c_i \quad L_i = \frac{n_i}{V} = \frac{p_i}{RT}$$

$$\dot{N} = k_{fg} \cdot A \cdot (c_{i,g} - c_{i,l}) = k_g \cdot A \cdot \left(\frac{p_{ik} - p_{ig}}{RT} \right)$$

$$p_i = X + H_X \quad H_X \dots \text{mol. Henrykonst.} \quad H_X = \frac{H_c \cdot P}{RT}$$

$$p_i^0 = Y \cdot p \quad \Rightarrow K^* = \frac{Y}{X} = \frac{H_X}{P} = \frac{H_c}{P} = \underline{\underline{\frac{H_c}{RT}}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{k_g} = \frac{1}{\beta_{fg}} + \frac{K^*}{\beta_{fe}} = \frac{1}{\beta_{fg}} + \frac{H_c}{RT \beta_{fe}}$$

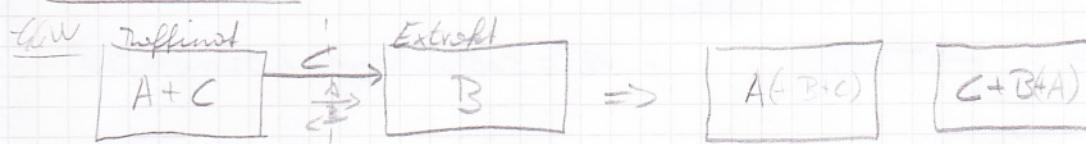
$$\frac{1}{K_{fe}} = \frac{1}{\beta_{fe}} + \frac{1}{K^* \beta_{fg}} = \frac{1}{\beta_{fe}} + \frac{RT}{H_c \beta_{fg}}$$

Bei geringer Löslichkeit: $H_c \rightarrow 0$
 $\Rightarrow k_g = \beta_{fg}$, $K_{fe} \rightarrow 0$

Bei starker Löslichkeit $H_c \rightarrow \infty$

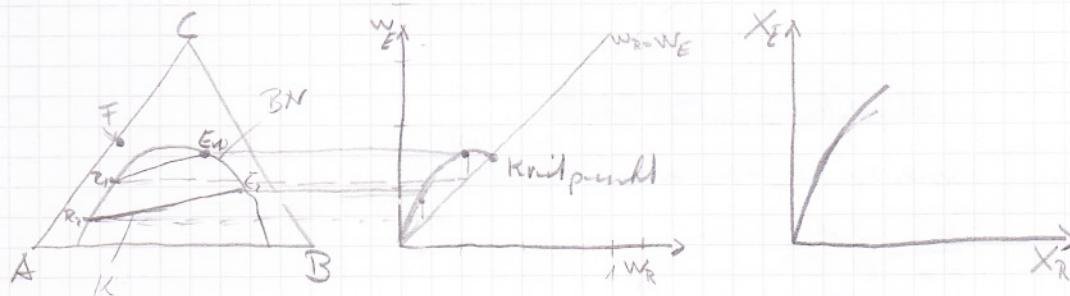
$$\Rightarrow K_{fe} = \beta_{fe}, \beta_{fg} \rightarrow 0$$

§) Extraktion



$$\text{Gew: } K^+ = \frac{C_{\text{Extract}}}{C_{\text{Rohstoff}}}$$

-Gibb'sches 3 Phasen-Diagramm

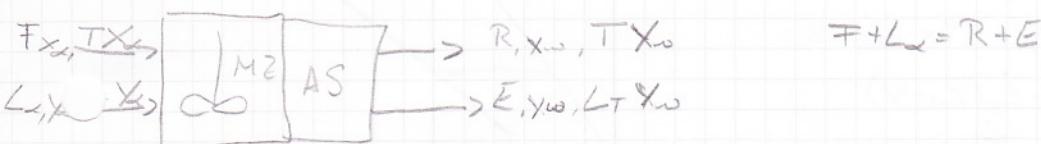


Standpunkte im 3Phasen-Diagramm geben (massen-)Anteile der 3 Phasen im Rohstoff bzw. Extrakt wieder \rightarrow Konz des Werkstoffes im Anteil-Diagramm. Dessen Unterschiede in Beladungen, daher Extraktion bevorzugt verwendet.

Anforderungen an LM

- Aufnahmefähigkeit hoch
- Selektiv
- nicht mischbar mit Träger-LM.
- Reicht ab trennbar durch Dest/Trenn \rightarrow bp von Prod. verschieden
- ungiftig, billig
- Dichte unterschied zw. LM hoch
- η niedrig
- Stabilität

-1 Stufen-Gleichstrom-Extraktion



$$T x_\alpha + L_\omega y_\alpha = T x_\omega + L_\omega y_\omega$$

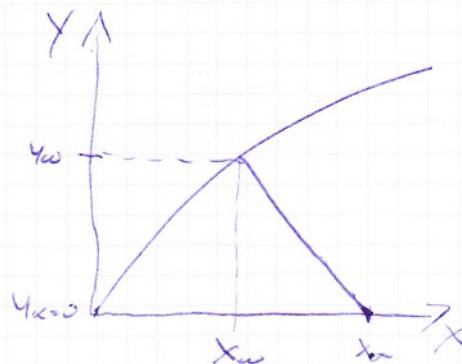
$$T = \frac{\dot{F}}{1+x_\alpha} \quad L_\omega = \frac{\dot{L}_\omega}{1+y_\omega}$$

$$K^+ = \frac{y_\omega}{x_\omega} \quad Y_\omega = X_\omega \cdot K^+ \quad Y_\alpha = 0$$

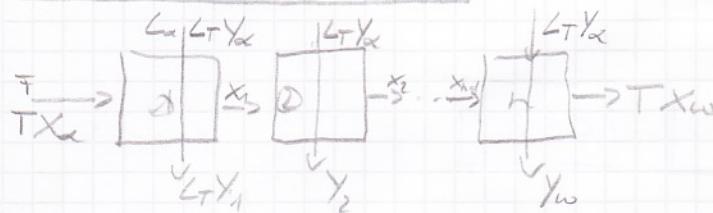
$$T x_\alpha = T x_\omega + L_\omega x_\omega \cdot K^+$$

$$X_\omega = X_\alpha \cdot \frac{T}{T + K^+ L_\omega} \quad \varepsilon = \frac{K^+ L_\omega}{T} \quad v = \frac{L_\omega}{T} \Rightarrow \varepsilon = K^+ v$$

$$X_\omega = X_\alpha \cdot \frac{1}{1+\varepsilon}$$



Kreuzstromabstraktion



jeweils selbe Menge Lösungsmittel

$$\text{Stufe 1: } \dot{T}X_w + \dot{L}_T Y_w = \dot{L}_T Y_1 + \dot{T}X_1$$

$$K^+ = \frac{Y_1}{X_1} \Rightarrow Y_1 = K^+ X_1 \quad X_1 \neq 0$$

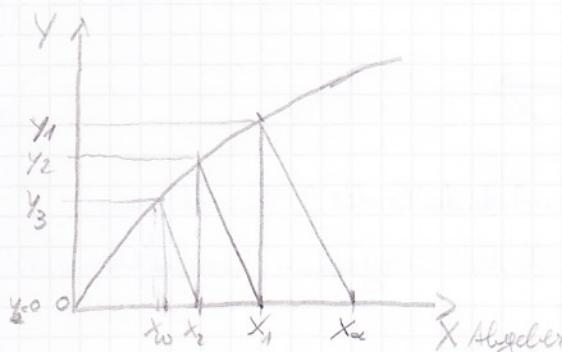
$$\Rightarrow \dot{T}X_w = \dot{L}_T K^+ X_1 + \dot{T}X_1$$

$$X_1 = X_1 \cdot \frac{1}{\dot{T} + K^+ \dot{L}_T} = X_w \cdot \frac{1}{1 + \epsilon}$$

$$\epsilon = \frac{K^+ \dot{L}_T}{\dot{T}}$$

$$\text{Stufe 2: } X_2 = X_1 \cdot \frac{1}{1 + \epsilon}$$

$$\text{Stufen: } X_w = X_{n+1} \cdot \frac{1}{1 + \epsilon}$$

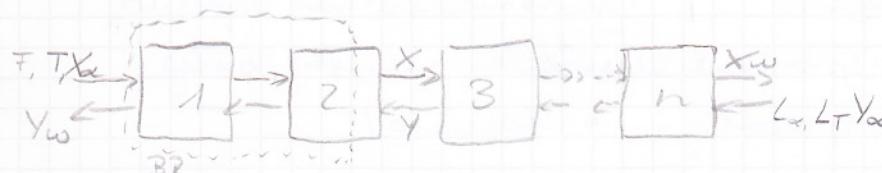


Multiplikationeller Stufen:

$$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdots X_w = X_w \cdot X_1 \cdot X_2 \cdots X_{n+1} = \frac{1}{(1+\epsilon)^n}$$

$$\frac{X_w}{X_w} = \frac{1}{(1+\epsilon)^n}$$

Gegenstromabstraktion

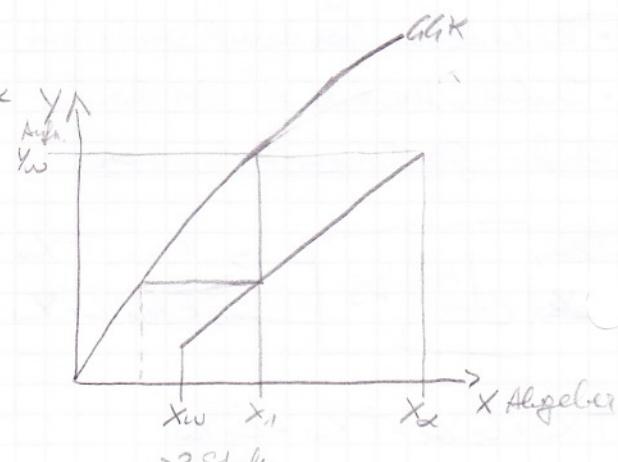


$$\text{Gesamtbilanz: } \dot{T}X_w + \dot{L}_T Y_w = \dot{T}X_w + \dot{L}_T Y_w$$

$$\text{Bilanzraum: } \dot{T}X_w + \dot{L}_T \cdot Y = \dot{T} \cdot X + \dot{L}_T \cdot Y_w$$

$$\dot{T}(X_w - X) = \dot{L}_T (Y_w - Y)$$

$$X = \frac{\dot{T}}{\dot{T}} \cdot Y - \frac{\dot{T}}{\dot{T}} Y_w + X_w$$



-Mindestlösungsmitteleinhaltung

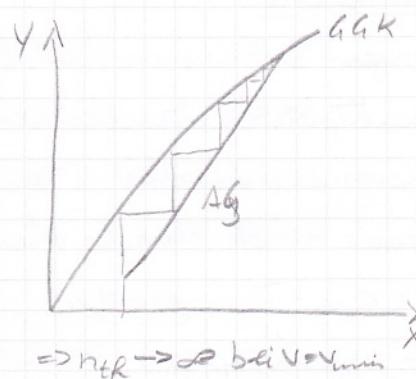
Gegenstromextraktion:

$$T \cdot X_a + L_f Y_a = T X_w + L_f Y_w$$

$$T(X_a - X_w) = L_f(Y_w - Y_a)$$

$$L_f = T \cdot \frac{(X_a - X_w)}{(Y_w - Y_a)}$$

$$\underline{L_{f,\min} = T \cdot \frac{(X_a - X_w)}{(Y_{w,\text{max}} - Y_a)}}$$



$\Rightarrow n_{\text{th}} \rightarrow \infty$ bei $V = V_{\min}$

$$Y_{w,\text{max}} = \cancel{Y^*(X_w)}$$

(Sitzungswert bei x)

-Apparate

Einstufig, rehstufig: Rührer-Alscheider (gute Anpassung an Durchsatz, späteres Zufügen von Stufen möglich, Nachteil: großer Energie- und Regelarbeitsaufwand) MSB oder Segmente (kleine Durchsätze, Trennung von Gemisch mit großem Druck Zentrifugalkraft)

Rehstufig, Gegenstrom: Zentrifugalk-Extraktor: kleine Verweilzeiten, konzentrische Röhren -> waagrechte Rot-Achse, SP in Mitte, Dämmering eingeschoben, Ablaufgewebe umgedreht

Kolonnenextr. mit Energiedurchfuhr: mit Rührer: Kükni-Extraktor, RDC (Gebrochene Sichtewandraum, Problem: Unempfindlichkeit)

Problem: begrenzte Höhe), APD (exzentrische Welle)

mit Pulsation

ohne Energiedurchfuhr: Siebboden (durch Siebeinheiten getrennt), Sprühkolonne (selten, da schlechte Phasenauftrennung, großer Tropfbildungsraum), Füllkörper -> Packungskolonne

9) Membranteknik

Trennung erfolgt durch Konzentrationsunterschied. Konz. versch. Widerstand entgegengesetzt. Feedstrom in Permeat und Retentat geteilt. je nach Prozess sehr selektive Trennung möglich -> Membranen zu diesem Trennverfahren.

(Ultra, Ultra, Nanofiltration (undporös), Umkehrsmose, Dialyse, Elektrodialyse, Permeation, Gaspermeation dichten Membranen)

-Membranmaterialien

- dichte und poröse Membranen, aus aus synthet. oder natürlichen Polymeren. Cellulose stark verbaut, jedoch in modifizierten Formen, damit vorhersehbar bzw. löslich.
- Phaseninversionsmembranen: Membraneigenschaften gezielt erzeugt durch Fällen des gelösten Polymeren im Füllbad an best. Stelle der Lösungslücke im 3-Phasen-Diagramm. Hat dünne aktive Trennschicht und direkt verbundene poröse Stützsicht z.B. Dialyse
- Kompositmembranen: einzelne Schichten optimiert, versch. Materialien möglich (Umkehrsmose, H₂O-Abkrempfung)
- Glas-, Metall- und Keramikmembranen durch Sintern oder Heransetzen einer Regierungskomponente. Für spez. Anforderungen geeignet, da therm. stabil, gegen Aggr. chem. stabil, mech. Festigkeit -> Reißfestigkeit, aggress. Gase
- Glas: gute Selektivität (Oberflächenmodifizierung), eng Porenverteilung, T-Stabil, ergibt H-Stabil -> spez. Anwendungsfeld

- Stofftransport

• Lösungs-Diffusionsmodell

für nichtporöse Membranen. Stoff löst sich in Membran und wird durch Diffusion transportiert (Trennung durch versch. D_i)

Treibende Kräfte durch chem. Pot gegeben

$$j_i = C_{i,m} \cdot D_{i,m} \cdot \text{grad } u_i$$

$$\mu_i = \mu_{i,0} + v_i(p - p_i) + RT \ln(a_i)$$

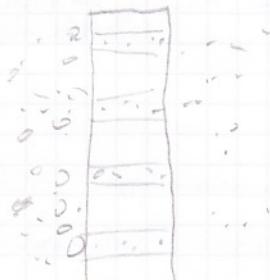
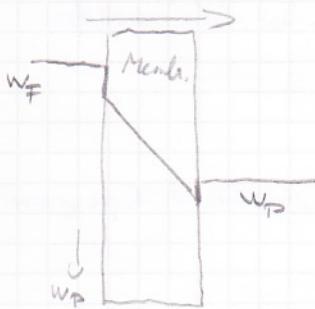
$$\pi = \frac{RT \ln(a_i)}{v_i}$$

$$\Rightarrow j_m = \frac{C_{M,m} \cdot D_{M,m} \cdot \frac{1}{v_i} (\Delta p - \Delta \pi)}{\Delta x} = A \cdot (\Delta p - \Delta \pi)$$

$$j_S = \frac{C_{S,M} \cdot D_{S,M} \cdot R \cdot T \Delta C_S}{S \cdot \Delta x} = B \cdot \Delta C_S$$

Treibkraft für LM: Differenz zw. Druckdift (hydrostatisch) und osmot. Druckdifferenz.

\rightarrow - gelöster Stoff S: Differenz der Konz.



• Porenflußmodell

für poröse Membranen (Roho; Ultra; Nanofilter) \rightarrow Strömung durch Schüttungen

ell. kom. Strömung und zeitl. Poren \rightarrow Hagen Poiseuille:

$$j_i = \frac{n \cdot p \cdot \pi \Delta p}{8 \eta \cdot \alpha} \quad n \dots \text{Poren/Flkt} \quad \alpha \dots \text{Poredurchmesser} \quad \Delta p \dots \text{Membrandrücke}$$

bei unregelmäßig. Rigen Schüttungen \rightarrow Karmann-Kozenski

$$j_i = \frac{\epsilon^3 \cdot p \cdot \Delta p}{(1-\epsilon) \eta \alpha^2 K_{\text{Koz}}} \quad \epsilon \dots \text{Porosität} \quad \alpha \dots \text{innere Oberfläche} \quad K \dots \text{Konstante}$$

Rubo-, Ultra-, Nanofiltr., Umkehrsmose

am ehesten als Weiterführung der keramischen Filtration zu sehen, Triebkraft: Δp

• Rubo: Abtrennen von Kolloidalen Teilchen (Partikeln, Zellen), Poren: $0,05\text{--}100\mu\text{m}$

• Ultra: Übergang zw. Rubo- und NanoFiltr., $\varnothing: 1\text{--}100\text{nm}$, zur Abtrennung von Makromolekülen aus Lösungen, meist Phaseninversions-Membranen. Abtrennung von z.B. Proteinen, Öl/H₂O Emulsionen in Detoxikationsindustrie

• Nano: Abtrennung von u.a. org. Sulfaten mit mittlerer molaler Masse (200–500 g/mol) Raum Reaktion für anorg. Salze. Typisch für Abt. von Farbstoffen, Zuckern.

Materialien: PVDF, Polysulfon, Celluloseacetat, Polyamid, PAN, Al₂O₃, Zr₂O₃ (Rubo)

• Umkehrsmose: Triebkraft = $\Delta p - \Delta t$, bei $\Delta p > \Delta t$: Umkehrsmose, sonst Osmose Lösungs-Diffusionsmodell (bei Filtr. Porenflussmodell) zur Abtrennung von LM aus Lösungen niedermolekularer Stoff (Salze, Zucker) Bsp. Entalkoholisierung von Bier, Entsalzung von Meerwasser...

Pervaporation, Gas- und Dampfpermeation

Triebkraft bei allen Δp , bei Pervaporation; diffus entscheidend, dichte Membranen → $\frac{P_i(T)}{P_j(T)}$

• Pervap.: Trennungen LM-Gemischen aufgrund versch Löslichkeiten und Diffuschw. in Membr. 3 Schritte: Adsorption-Diffusion-Desorption durch Verdampfung ins Permeatsitzschlamm oder Trägergasstrom. Feed oft kühlt für Zuführung der Verdampfungswärme. durch Polyvinylchlorid-Membranen sehr selektiv für H₂O → Absolutierung von Ester sehr energieintensiv als durch Zeit.

• Gaspermeation: Trennung von Gasgemischen, da versch Permeabilität (P_i) im Polymer oft Tiefenkühlung Überdampf und Vak. auf Permeabilität um Δp zu erhöhen. Kann durch Materialwechsel sehr selektiv sein $\propto \frac{P_i(T)}{P_j(T)}$

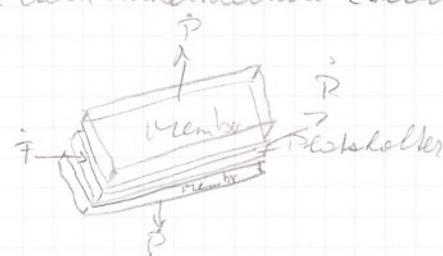
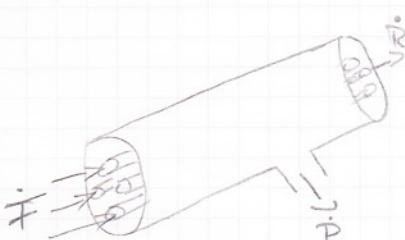
Bsp. H₂S aus Erdöl, Luftverlegung, H₂

• Dampfpermeation: Lösungsmitteldampf-Abtrennung analog zu Gaspermeation, z.B. Benzindämpfe aus Luft.

Rohrbauförmen

◦ Rohr, Kapillarmodul, Hohlfasermodul (Bemerkung von Rohrmembranen)

◦ Platten-, Falten-, Spiral- oder Wickelmodul (Flächmembranen)

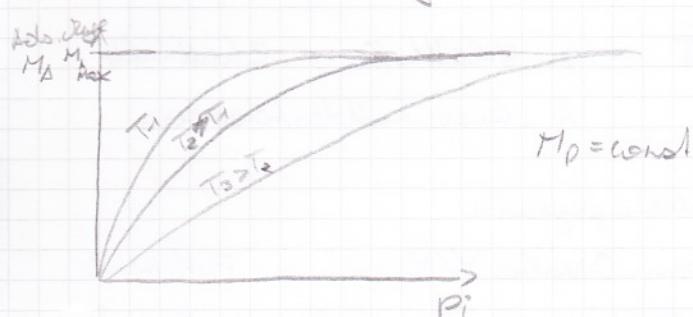


10) Adsorption

- Bindung eines freien Stoffes (Adsorptiv) an die Oberfläche des Adsorbens. Da die Bewegungsfreiheit durch Adsorption verringert wird und damit auch die Energie. Ist Adsorption ein exothermer Vorgang. Bindung erfolgt entweder physikalisch (Physisorption) oder chemisch (Chemisorption). Chemisorption ist selektiver.

- Law.

für Beschreibung: Adsorptionsisothermen



$$M_A = \text{const}$$

bei geg. Temp steigt mit ρ auch M_A
Werte M_A bis zur Sättigungsgröße $M_{A,\max}$
steiger, desto höher muss ρ sein, um
 $M_{A,\max}$ zu erreichen (da Ads. - exotherm)

Möglichkeiten zur Beschreibung:

- Fröhlich (Langwelle) - Langmuir (monolagenbedeckung)
- BET (Multilagen bis zur Koagulation)

$$\frac{n}{n_m} = \frac{C \cdot \varphi}{(1-\varphi)(1-P+C\varphi)}$$

$$\varphi = \frac{P_i}{P_i^0}$$

P_i^0 ... Sättigungsdampfdruck bei $T=\infty$

C ... Konst. (Ads.-Energien)

n ... ads. Menge n_m ... ads. Menge zur
monolagenbedeckung

Anforderungen an Adsorbentien

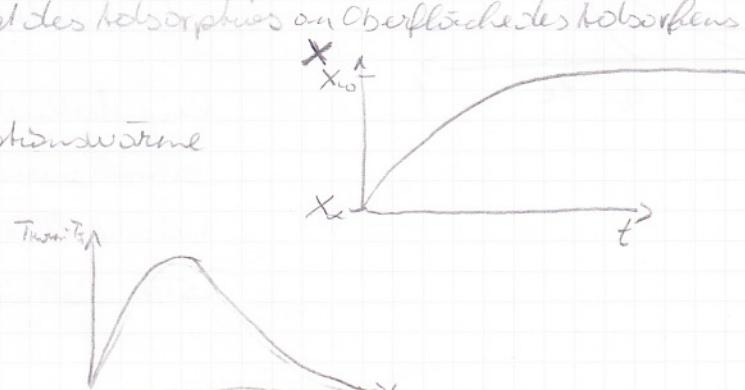
- hohe Zuschlagsbeladung für Adsorptiv
- Selektivität
- hohe Nutzbarkeit
- gr. Ads.-Geschw. (\rightarrow hohe spez. Oberfläche)
- günstige Desorptionsverhältnisse
- chem. & mech. Beständigkeit + therm. Beständigkeit
- günstig im Preis
- geringer Druckverlust

wichtige Adsorbentien

- Aktivkohle
- Aktivkohle
- Kohlenstoff-Kohlesieb
- Kohlesieb-Zeolith
- Kieselgel
- Aktivkohle

Vorgänge beim Stofftransport

- Konvektiver / Diffusiver Transport des Adsorptivs an die Oberfläche des Adsorbens durch ρ
- Brenndiffusion (B oft größer)
- Adsorption, Freiwerden der Sorptionswärme
- Wärmeleitung im Partikel
- Wärmeübertragung in das Fluid

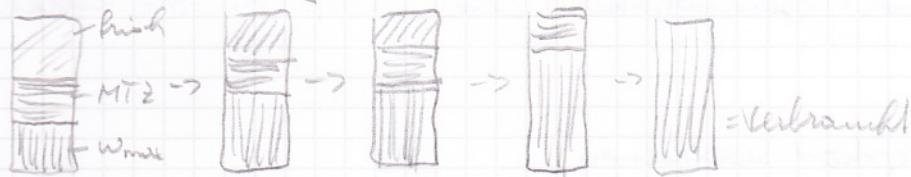


- LUB-Modell

Bei Adsorption verarmt Gasstrom von Y_a in der MTZ (mass transfer zone) auf Y_w .

MTZ besteht aus Sättigungsbereich und einem unbeladenen Teil (LUB = length of unused bed).

MTZ wandert langsam vom Gasaustritt mit Fortschreiten der Adsorption Richtung einström.



$$\text{Vergleich benötigtem Adsorptions } S_t \Rightarrow z = \frac{S_t}{\rho \cdot A}$$

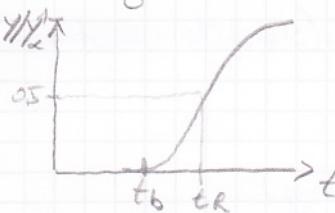
z ... Schüttmasse ρ ... Schüttdichte

A ... Querschnitt des Adsorbers

$$LUB = w_{MTZ} (t_a - t_b) = \frac{z}{\rho A} (t_a - t_b)$$

nur bei gleichmäßiger w_{MTZ}

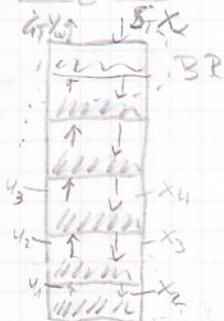
w_{MTZ} ... Wandlerungsgrad



t_a ... Zeit bis zum Erreichen $Y/Y_a = 0,5$ am Festbettende

t_b ... Zeit bis Beginn des Durchbruchs (d.h. Y vom Festbett über Y_w)

- Gegenstrom-Adsorber

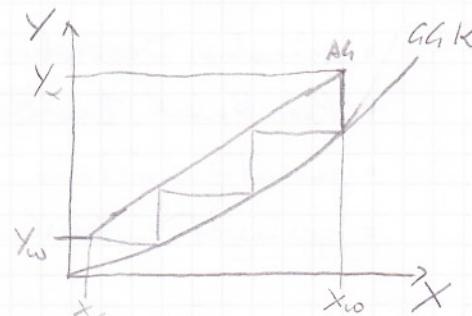


$$\text{Sextantbilanz: } G_T \cdot Y_a + S_T X_a = G_T Y_w + S_T X_w$$

$$\text{BR: } G_T \cdot Y + S_T X_a = G_T Y_w + S_T X$$

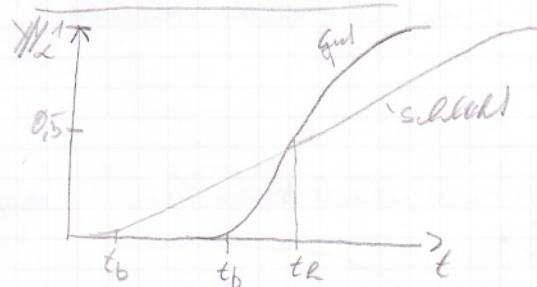
$$\text{AG: } Y = \frac{S_T}{G_T} X - \frac{S_T}{G_T} X_w + Y_w$$

$$G_T \cdot Y_a = S_T X_w - X_a$$



$$V_{ad} = \frac{S_T}{G_T} \quad \dots \text{Adsorptionsverhältnis?}$$

- Durchbruchskurve



Durchbruchskurve: Y/Y_a am Festbettende über t

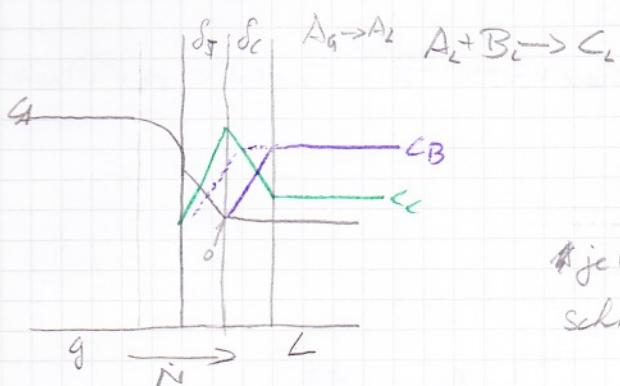
t_b ... Zeit bis Durchbruch am Festbettende (d.h. $Y/Y_a > Y_w$)

t_a ... Zeit bis Feststoffbeladung am Festbettende $Y/Y_a = 0,5$

Leichter Kinetik \rightarrow schnelle Ads. \rightarrow t_b viel später, dann dafür schnell gesättigtes Festbett gesättigt $\rightarrow Y/Y_a = 1$

bei schlechter Kinetik \rightarrow langsame Ads. \rightarrow bricht sehr früh durch, \rightarrow Trennschicht nicht mehr erreicht, da $Y/Y_a > Y_w$, weil

- Stoffübergang - Reaktionsgeschwindigkeit beachten... Absorption

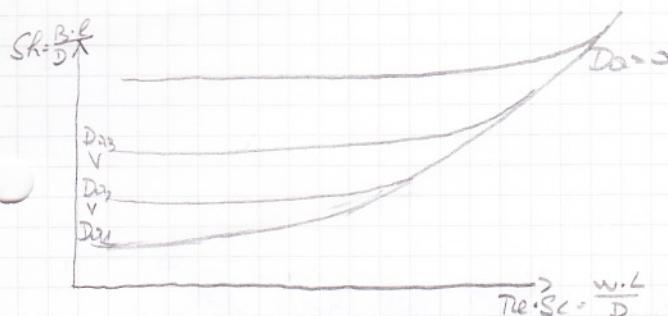


S_T - Grenzschicht durch Stofftransport

S_c .. - || - durch Konz.-Unterschiede

* je nach D_B kann c_B auch schon in S_T steigen, da schneller herandiffundiert als abreagieren kann

$$D_{A_2} = \frac{k \cdot L}{D_A} \quad \dots \text{Zusammenhang zw. Reaktionsgeschw. und Diffusion}$$



ist $D_{A_2} = 0 \rightarrow$ keine Reaktion, phys. Abs.

$Re \cdot Sc \rightarrow 0$, Stoffaustausch erhöhen durch Erhöhung der Reaktionsgeschw.

$Re \cdot Sc \rightarrow \infty$, Daegal $Re \cdot Sc \rightarrow \infty \Rightarrow Sh = \max$

bei $Re \cdot Sc = \text{const.}, Da \rightarrow \infty \Rightarrow Sh = \max$

$Da \rightarrow 0, Sh$ erhöhen durch Erhöhen von $Re \cdot Sc$, z.B. durch

- Absorption / Desorption

Abs: $G \rightarrow L$ durch Röhren, T niedrig

Des: $L \rightarrow G$ Röhren p, Th h, evtl. ströppern mit Luft (Leichtsiedee) oder H_2O -Dampf (Schwersiedee)

- Bauformen

Sprühapparate \rightarrow Tropfen- oder Filmregime : Sprühurm, Venturi, Strahlweiter
Darmschicht- und Tröpfelabsorber

Blasenregime: Blasensäule (Strohlotlöseringichter), Pulkkessel

- Desorption

Absolut bei $p \uparrow, T \downarrow$ zur Desorption zuerst durch Wärmetauscher erwärmen und entspannen \rightarrow Druckwechselverfahren

Auswaschendes LM (bei erniedrigtem Druck) geschöpft mit Rektifikation \rightarrow T-Wechselverf.

Strichen: Luftspritzen für Leichtsied. Kompo (nicht kondensierbar, darf kein Kond., Korrosion, nur Kompressor nötig, Nachreinigung nötig)

H_2O -Dampf-Spritzen für Schwersiedler (kondensierbar, aber höher Energie Kosten, da Heizen/kühlen, Korrosiv, Schaumbildung nachteilig, Kond., keine Nachreinigung)

Rechenbeispiel

Geg: Gasstrom: 20 Vol% N₂, 60 Vol% H₂, 20 Vol% CO₂

CO₂ auf 0,9% absorbiert, N₂, H₂ "inert" $\dot{c}_{\text{Roh}} = 3000 \frac{\text{kmol}}{\text{K}}$ $T_0 = 40^\circ\text{C}$ $p_0 = 69 \text{ bar}$

$x_{\text{CO}_2} = 0,1 \text{ mol\%}$ $T = 40^\circ\text{C}$ $p_L = 100 \text{ bar}$

Scigastrom

Ges: $n_{\text{H}_2} = ?$

Boden:

Konk. Beladung umrechnen: $y_{\text{CO}_2,3} = 0,2$ $y_{\text{CO}_2,3} = \frac{0,2}{1-y_{\text{CO}_2}} = \frac{0,2}{0,8} = 0,25$

CO₂-Gasstrom $\dot{c}_{\text{CO}_2,B} = 0,2 \cdot 3000 = 600 \frac{\text{kmol}}{\text{K}}$

Durchgasstrom $\dot{c}_T = 3000 - 600 = 2400 \frac{\text{kmol}}{\text{K}}$

Kopf

$$y_{\text{CO}_2,K} = 0,009$$

$$y_{\text{CO}_2,K} = \frac{0,009}{1-0,009} = 0,0091$$

$$x_{\text{CO}_2,K} = 0,001$$

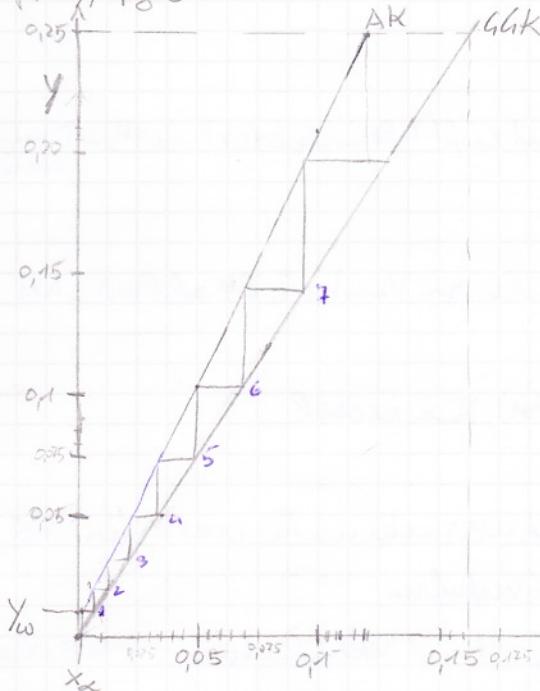
$$x_{\text{CO}_2,K} = \frac{0,001}{1-0,001} = 0,001$$

$$p_i^* = H_i \cdot x_i \Rightarrow y_i = \frac{H_i \cdot x_i}{p_{\text{ges}}} \quad \frac{y_i}{1+y_i} = \frac{H_i}{p_{\text{ges}}} \cdot \frac{x_i}{1+x_i}$$

y_i	0	0,05	0,1	0,25
x_i	0	0,038	0,065	0,1574

$$\dot{c}_T = y_i \cdot p_{\text{ges}}$$

$$0,25 = y_i \cdot p_{\text{ges}}$$



$$y_i = 0,25 \Rightarrow x_{\text{w,max}} = 0,1574$$

$$\dot{L}_{T,\text{min}} = \dot{c}_T \frac{y_{\text{CO}_2,w} - y_{\text{CO}_2,w}}{x_{\text{CO}_2,\text{max}} - x_{\text{CO}_2,w}}$$

$$= 2400 \cdot \frac{0,25 - 0,0091}{0,1574 - 0,001} = 3696,7 \frac{\text{kmol}}{\text{K}}$$

$$\dot{L}_{T,\text{pr}} = 1,35 \quad \dot{L}_{T,\text{min}} = 4990,5 \frac{\text{kmol}}{\text{K}}$$

$$\text{AG: } Y = \frac{\dot{L}_T}{\dot{c}_T} X - \frac{\dot{L}_T}{\dot{c}_T} Y_w + Y_w$$

X_{CO_2}	0,001	0,05	0,1	0,1574
Y_{CO_2}	0,0091	0,111	0,21	0,25

$$\Rightarrow n_{\text{H}_2} = 7$$

Dessorptionsvorgänge

- da das bei T niedrig und p hoch \rightarrow Das Gleichgewicht und p↓
- beim Temperaturwechselverf. hohe T \rightarrow auf Heißflächen oder Heißgas (Bsp H₂O, CO₂ an rostig, aktiviert)
- bei Druckwechselverfahren niedriger p durch Verd. oder Entspannen nach AdS bei hohem p (Bsp H₂O, CO₂ aus Sauerstoff entzieht)
- Verdunstungsverz.: Adsorption eines anderen Stoffes der ersten verdrängt 2ter Stoff muss leicht entfernt sein
- Extraktionsverfahren extraktions des Adsorbates mit fl. Phase (bei hoher T), bei therm engel. Stoffen (\Rightarrow B. SiO₂)

Bauformen

- diskont. Absorber im Festbett, Wabenkörper, oder Adsorbensring, randlose Wirbelschicht (gleichm. Auströmung und Verteilungswirkung)
- kont. Verfahren meist in einer oder mehrstufiger Wirbelschicht auf Siebböden mit oder ohne Übergang (ohne \rightarrow durch weites maschiges Sieb) \hookrightarrow geringer p

11) Trocknen

- A therm. Trocknen = Trocknen durch Wärmeaustausch über Wärmeleitung, Konvektion und z.T. auch Strahlung von Außen oder auch von innen. Führt zu
- Verdunstung: im Raum überhalb des zu trocknenden Gutes nicht nur Dampf, sondern auch andere Gase. $p_{ges} > p_{Dampf}$
 - Verdampfung: Gasphase überhalb des Gutes um vom entstehenden Dampf. $p_{ges} = p_{Dampf}$ sonst Trocknung durch Hilfsmittel (hygroskopische Mittel, als Kristall-Wasser, oder adsorptiv gebunden) oder mechanisch ohne Phasenumwandlung (Filtration, Zentrifug...)
 - \rightarrow Konvektionstrahler / Kontaktrohre / Strahlungsröhren
 - Hofflüssigkeit: Zusammenfließen der Flüssigkeitsfilme an der Oberfläche
 - Kapillarflüssigkeit: durch Druckunterschied in Kapillaren versch. Flüssigkeitshöhe. Kapillarkräfte transportieren Flüssigkeiten Oberfläche. Bei hygroscop. wird Fl. in schrötigen Kapillaren zurückgehalten
 - Quellflüssigkeit: Feuchtigkeit löst Volumenzuwachs, verringert wasserabdeutende festphasengebundenes hygroscopisches Verhalten
 - Kristallwasser: fester Gutsbestandteil. Abspaltung erst bei $T =$ Zersetzungstemperatur

Rollier-Diagramm

Dampf-Luftgemisch ideal angenommen

$$\rightarrow \frac{n_D}{n_L} = \frac{p_D}{p_L}$$

$$\text{Feuchtigkeitsgehalt } x = \frac{w}{L} \quad \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Luft}} \right]$$

$$\frac{p_D}{p_L} = \frac{p_D}{1-p_D} = \frac{n_D}{n_L} = \frac{\frac{w}{L}}{\frac{M_D}{M_L}} = x \cdot \frac{M_L}{M_D} \rightarrow x = \frac{M_D}{M_L} \cdot \frac{p_D}{1-p_D}$$

M_D ... RollmasseDampf
 M_L ... RollmasseLuft

Sättigungsgrad:

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S} \quad p_S = p_i^{\circ} \quad \text{-- Sättigungsdruck bei der zugeh. Temperatur}$$

Inhaltsgr. (auf trockene Luft bezogen) $\bar{r} = r_L + x \cdot r_D$

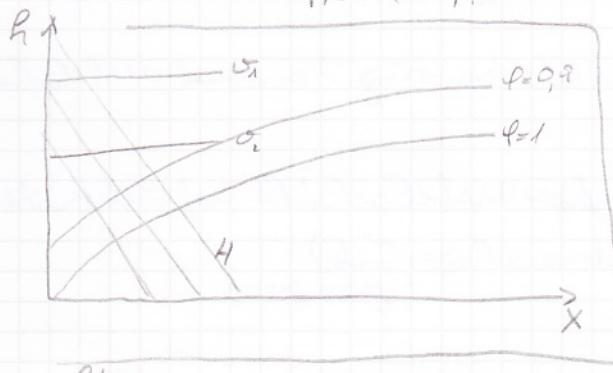
$$\bar{r} = v \cdot (c_{p,L} + x \cdot (v \cdot 1,9262500))$$

$$r_L = \vartheta \cdot c_{p,L}$$

$$c_{p,D} = 1,926 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

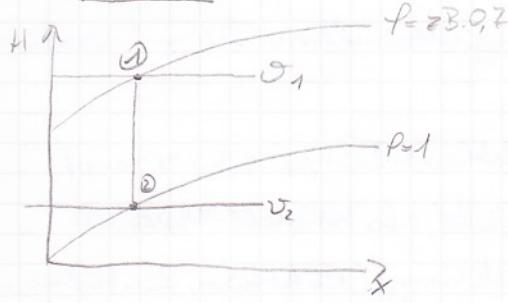
$$r_D = v \cdot c_{p,D} + h_{v,0}$$

$$h_{v,0} = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



aufgetragen \bar{r} führt, weiter ϑ und φ eingesenkt, am Zustandmaßstab $\Delta H/\Delta x$ durch 2 oder 4 Größen (H, x, ϑ, φ) kann ein Zustandspunkt bestimmt werden.

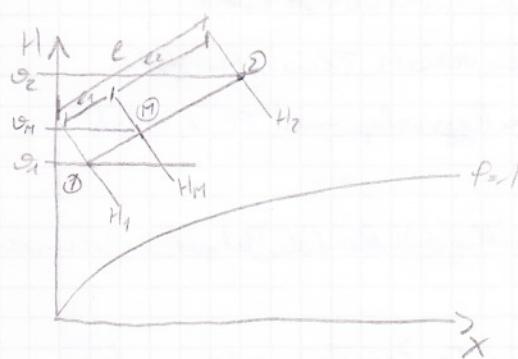
Taupunkt



men geht vom Zustandspunkt ① horizontal nach unten, bis $\varphi=1$ geschnitten wird. Temperatur des Schnittpunktes ist die Taupunktstemperatur

$$p_0 = \frac{p_{\text{ges}} \cdot x}{\frac{M_D}{M_L} + x} \quad \text{aus entsprechender}$$

Nischen der Ströme



$$\frac{m_{1,1}}{m_{1,2}} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{l - l_1}{l_1}$$

⇒ Abmessungen l nach einsetzen von 1,2
→ berechnen von l_1 → einsetzen → Werte eingesetzen

Berechnen:

Gesamtbilanz: $m_{1,1} + m_{1,2} = m_1$

Trockengas: $m_{1,1} + m_{1,2} = m_1$

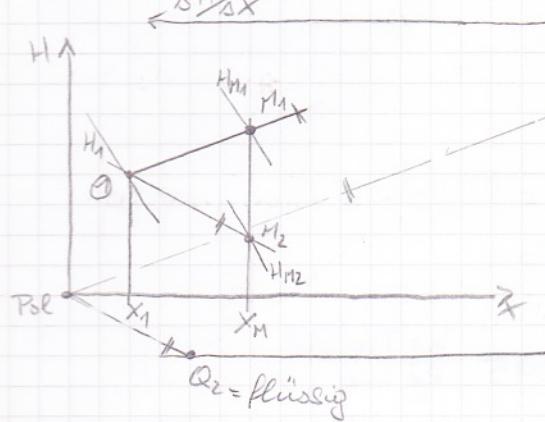
Feuchte: $m_{1,1}x_1 + m_{1,2}x_2 = m_1 X_M$

Wärme: $m_{1,1}H_1 + m_{1,2}H_2 = m_1 H_M$

$$\Rightarrow X_M = \frac{m_{1,1}x_1 + m_{1,2}x_2}{m_{1,1} + m_{1,2}}$$

$$H_M = \frac{m_{1,1}x_1 + m_{1,2}x_2}{m_{1,1} + m_{1,2}}$$

Zusammen von Feucht



$$\text{Feuchtigkeitsbilanz: } m_2 \cdot x_1 + m_f = m_2 \cdot x_M$$

$$Q_1 = \text{dampfzufüllung} \quad \text{Wärmebilanz: } m_2 \cdot H_1 + m_f \cdot h_f = m_2 \cdot H_M$$

$$\Rightarrow m_f \cdot h_f = m_2 \cdot H_M - m_2 \cdot H_1 \quad \dots$$

$$m_f = m_2 \cdot x_M - m_2 \cdot x_1 \quad \dots$$

$$h_f = \frac{H_M - H_1}{x_M - x_1} = \frac{\Delta H}{\Delta X}$$

h_f berechnen und

am Raumtemperaturstab eintragen,

gerade QP parallel in \mathbb{D} verschieben.

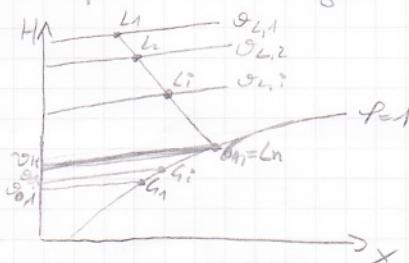
Schnittpunkt mit Senkrechten in x_M ergibt M

Kühlgrenztemperatur

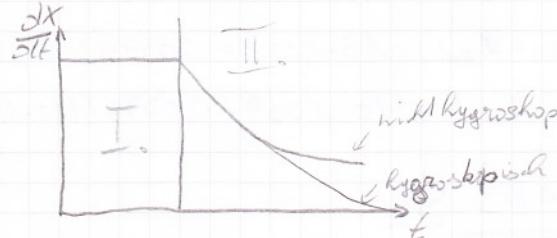
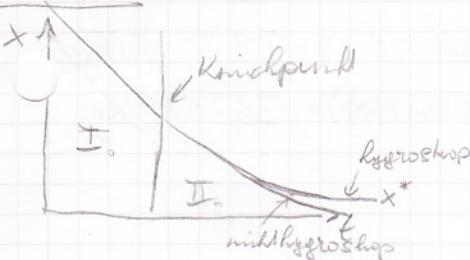
Reines trockenes Gas + feuchtes Fest \rightarrow Luft gibt Wärme ab, \rightarrow Luft kühlt ab, Wärme für Verdunstung der Feuchtigkeit genutzt \rightarrow Fest erwärmt nur geringfügig auf.

Nach unendlich langem Austauschweg erreichen Feuchtgas und Feuchtluft die selbe Oberfläche

Temperatur = Kühlgrenze- oder gew. -Temperatur ϑ_k



Kinetic



Abschnitt I: Oberflächenverdunstung bestimmt kinetisch \rightarrow schnell

-/- II. Vorgänge im Inneren \rightarrow Trocknungs geschw. nimmt ab.

Trockner

Kontakttrockner: auf bewegter Unterlage: Walzentrockner

- durch Förderbewegung: Tellertröckner, Schneckentröckner

- durch Schwerkraft: Röhrtröckner

Volumentrockner: Vak.-Trägenschw., Vak.-Walzentrockner, Vak.-Tellertr.

Vibrationströckner: Beadtr.

Konvektionströckner: nicht bewegt: Trägenschrank, konvektionsfrei

Strohleistung: Beadtr.

bewegt: befestigt: Beadtr.; Trommeltr.
durch Förderbewegung: Teller, Tisch
durch Luft: Wind-/Fließbleattrockner

Rechenbsp

$$V = 10000 \text{ m}^3 / R$$

$$\varphi = 0,9 \quad \vartheta_1 = 15^\circ \text{C} \quad p_{\text{ges}} = 1,013 \text{ bar} \quad \vartheta_2 = 110^\circ \text{C}$$

Taupunkt

rechnerisch

$$x = \frac{M_D}{M_L} \cdot \frac{P_D}{P_0 - P_D} \quad \varphi = \frac{P_D}{P_0} \Rightarrow P_D = \varphi P_0$$

$$\rightarrow x = \frac{18}{29} \cdot \frac{\varphi \cdot P_0(\vartheta_1)}{p_{\text{ges}} - \varphi P_0(\vartheta_1)} = \frac{18}{29} \cdot \frac{0,9 \cdot 0,9217}{1,013 - 0,9 \cdot 0,9217} = 0,0095 \quad \frac{\text{kg Dampf}}{\text{kg Luft}}$$

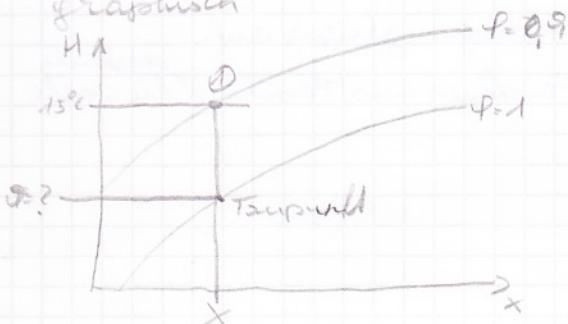
Für Taupunkt gilt $P_D = P_{D,0}$ da $\varphi = 1$

$$P_D - x \cdot P_0 = P_0 \frac{M_D}{M_L}$$

$$\Rightarrow P_0 = \frac{P_D \cdot x}{M_D + x} \quad P_0 = \frac{1,013 \cdot 0,0095}{\frac{18}{29} + 0,0095} = 0,0153 \text{ bar}$$

aus Dampftafel zugehörige Temperatur ablesen

graphisch



Wärmebedarf

$$m_L = \frac{(p_{\text{ges}} - \varphi \cdot p_0(\vartheta_1)) \cdot V}{R_L \cdot T_1} = \frac{(1,013 - 0,9 \cdot 0,9217) \cdot 10000 \cdot 10^5}{0,287 \cdot 288 \cdot 10^3} = 120,713 \frac{\text{kg Luft}}{\text{R}}$$

$$h_1 = \vartheta_1 \cdot (c_{p,L} + x(c_{p,D} + R_{\text{vent}})) = 15 \cdot 1,009 + 0,0095(15 \cdot 1,926 + 2500) = 39,16 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = \vartheta_2 \cdot (c_{p,L} + x(c_{p,D} + R_{\text{vent}})) = 110 \cdot 1,009 + 0,0095(110 \cdot 1,926 + 2500) = 136,75 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q} = m_L \cdot \Delta h = 117741,13 \frac{\text{kJ}}{\text{R}}$$

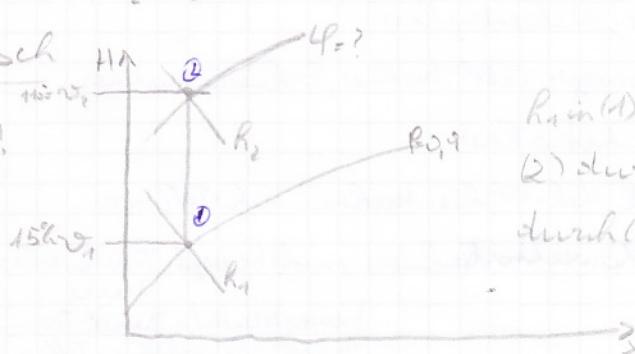
relative Feuchtigkeit bei 110°C

$$x = \frac{M_D}{M_L} \cdot \frac{\varphi P_0(\vartheta)}{p_{\text{ges}} - \varphi P_0(\vartheta)} \Rightarrow x_{\text{ges}} - x \cdot \varphi_{P_0} = \frac{M_D}{M_L} \cdot \varphi(P_0) \Rightarrow x_{\text{ges}} = \varphi P_0 \cdot \left(\frac{M_D}{M_L} + x \right)$$

$$\Rightarrow \varphi = \frac{x \cdot P_{\text{ges}}}{P_{\text{ges}} \left(\frac{M_D}{M_L} + x \right)} \quad \varphi(110^\circ \text{C}) = \frac{0,0095 \cdot 1,013}{1,013 \cdot \left(\frac{18}{29} + 0,0095 \right)} = 0,0107$$

graphisch

zu berechnen:



R_1 in (1) ablesen, R_2 in (2) → zu berechnen

(2) durch Schnittpunkt von $\vartheta_2 = 110^\circ \text{C}$ mit Senkrechter durch (1), in (2) Polwinkel ablesen

$$A = 42 \text{ m}^2 \quad T_1 = 12^\circ\text{C} \quad T_2 = -3^\circ\text{C}$$

$$S_1 = 0,5 \text{ cm} \quad \lambda_{1,1} = 0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$S_2 = 24 \text{ cm} \quad \lambda = 0,76 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$S_3 = 1 \text{ cm} \quad \lambda = 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\dot{Q} = k \cdot \Delta T \cdot A = \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}} = \frac{42 \cdot 15}{\frac{0,005}{0,79} + \frac{0,24}{0,76} + \frac{0,01}{0,14}} = 1600 \text{ W} = 1,6 \text{ kW}$$

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{15}{1600} = 0,0094 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$T_w' : \dot{Q} = \frac{\lambda_1}{S_1} \cdot (T_1 - T_w') \cdot A \Rightarrow T_w' = \frac{\dot{Q} \cdot S_1}{\lambda_1 \cdot A} = 11,78^\circ\text{C}$$

$$T_w'' = T_w' - \frac{\dot{Q} \cdot S_2}{\lambda_2 \cdot A} = -0,27^\circ\text{C}$$

$$S_1 = 150 \text{ mm} \quad \lambda_1 = 4 \text{ W/Km}$$

$$T_1 = 1400^\circ\text{C}$$

$$S_2 = 300 \text{ mm} \quad \lambda_2 = 0,5 \frac{1}{2200}$$

$$[T] = ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 20^\circ\text{C}$$

$$S_3 = 10 \text{ mm} \quad \lambda_3 = 20 \text{ W/Km}$$

$$\alpha_1 = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_2 = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T \cdot A}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$$

$$\text{Schätzung: } \overline{T_{w2}} = 900^\circ\text{C} \Rightarrow \lambda_2 = 0,904 \text{ W/Km}$$

$$\Rightarrow \dot{q} = \frac{1380}{0,904} = 3293 \text{ W}$$

$$\overline{T_{w1}} = \overline{T_1} - \frac{\dot{q}}{\alpha_1} = 1400 - \frac{3293}{1000} = 1396,7^\circ\text{C}$$

$$T_{w2} = \overline{T_{w1}} - \frac{\dot{q} \cdot S_1}{\lambda_1} = 1396,7^\circ\text{C} \Rightarrow \overline{T_{w2}} = \overline{T_{w1}} - \frac{\dot{q} \cdot S_2}{\lambda_2} = 729,8^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow \lambda_2 = 0,83 \text{ W/Km}$$

$$\Rightarrow \dot{q} = \frac{1380}{0,83} = 3066,7 \text{ W}$$

$$\Rightarrow \overline{T_{w1}} = 1396,7^\circ\text{C} \Rightarrow \overline{T_{w2}} = 1281,93^\circ\text{C} \quad \overline{T_{w2}} = 727,709^\circ\text{C} \Rightarrow \lambda_2 = 0,83 \Rightarrow \dot{q} = 3066,7 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = \dot{L} \cdot C_{p,\text{He}} \cdot \Delta T_E = \dot{F} \cdot C_{p,F} \cdot \Delta T_F$$

$$T_{F,W} \approx 40^\circ C \Rightarrow \Delta T_F = 30^\circ C$$

$$0,5 \cdot 2 \cdot 60 = \dot{F}_{\min} \cdot 4 \cdot 30$$

$$\dot{F}_{\min} = 5,5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{F} = 1,5 \cdot \dot{F}_{\min} = 0,75 \text{ kg/s}$$

$$F = \rho \cdot A \cdot v = 1000 \cdot A \cdot 1 = 0,75$$

$$\Rightarrow A = \frac{0,75}{1000} = 0,00075 \text{ m}^2 = 750 \text{ mm}^2 \quad A = r^2 \pi \Rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 15,45 \Rightarrow d_1 = 2 \cdot r = 30,9 \text{ mm}$$

\rightarrow wähle Rohr mit $d_1 = 31 \text{ mm}$

$$\dot{Q} = \dot{L} \cdot C_{p,\text{He}} \cdot \Delta T_E = 0,5 \cdot 2 \cdot 60 = 60 \text{ kg/s} = 60 \text{ kW}$$

$$\dot{Q} = \dot{F} \cdot C_{p,F} \cdot (T_{F,W} - T_{F,\infty}) \Rightarrow T_{F,W} = T_{F,\infty} + \frac{\dot{Q}}{\dot{F} \cdot C_{p,F}} = 30^\circ C \Rightarrow T_F = 20^\circ C$$

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T = 800 \cdot A \cdot (50 - 20) = 800 \cdot A \cdot (40 - 20)$$

$$\Rightarrow A = \frac{60000}{800 \cdot 20} = 3,75 \text{ m}^2 \quad A = d \cdot \pi e \Rightarrow e = \frac{A}{d \cdot \pi} = \cancel{0,024} \cancel{0,024} \underline{34,1 \text{ m}}$$

$$k_{\text{WAT}} = 600 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_A - \Delta T_E}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_E}}$$

$$\text{Strom: } \Delta T_A = 100 - 10 = 90 \quad \Delta T_E = 40 - 30 = 10$$

$$\Delta T_m = 36,41^\circ C$$

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m \Rightarrow A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta T_m} = \frac{60000}{600 \cdot 36,41} = \underline{2,74 \text{ m}^2}$$

Gegebastrom:

$$\Delta T_A = 100 - 30 = 70$$

$$\Delta T_E = 40 - 10 = 30$$

$$\Delta T_m = 47,21^\circ C$$

$$A = \frac{60000}{600 \cdot 47,21} = \underline{2,12 \text{ m}^2}$$

$$X_i = \frac{\varphi_i \cdot p_{0,D} \cdot M_D}{(p - \varphi_i p_{0,D}) \cdot M_L} = 0,00952$$

$$M_L X_i \cdot p = X_i \cdot \varphi_i \cdot p_{0,D} \cdot \frac{M_D}{M_L}$$

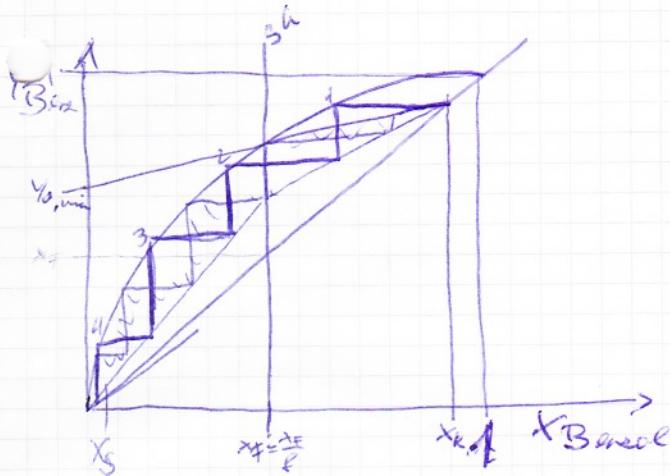
$$M_L X_i \cdot p = p_{0,D} (\varphi_i M_D + X_i \varphi_i \cdot M_L)$$

$$p_{0,D} = \frac{M_L X_i \cdot p}{\varphi_i M_D + X_i \varphi_i M_L} \quad \varphi = 1 \quad X$$

Deklitionierung-Bsp

Fest: 50 w% Toluol/Benzol

5% Verunreinigung erlaubt, Siedende Fl.



$$x_F = \frac{\frac{50}{78} + 5\%}{\frac{78}{92}} = 0,541$$

$$x_K = \frac{\frac{45}{78} + 5\%}{\frac{78}{92}} = 0,457$$

$$x_S = \frac{\frac{5}{78}}{\frac{45}{78} + \frac{95}{92}} = 0,056$$

$$f=1$$

$$v = 1,3 \cdot v_{min}$$

$$\text{NC: } C \cdot Y = L \cdot X + E \cdot x_E \quad C = L + E$$

$$Y = \frac{L}{L+E} X + \frac{E}{L+E} x_E \quad \frac{E}{E} = v$$

$$Y = \frac{v}{1+v} X + \frac{1}{1+v} x_E$$

y_0 messen \rightarrow einsetzen \rightarrow v berechnen

$$y_0 = v + v \cdot v = v \cdot x + x_E$$

$$y_0 - x_E = v \cdot \frac{x - x_E}{x - y}$$

$$v = \frac{y_0 - x_E}{x - y} \quad v_{min} = \frac{y_0 - x_E}{x - y_0} \Rightarrow v_{min} = \underline{\underline{v = 1,3 \cdot v_{min}}}$$

$$y_0 = 0,4 \Rightarrow x = 0 \Rightarrow v_{min} = 1,4 \Rightarrow v = \underline{\underline{1,82}}$$

\Rightarrow NC konstruieren