

Lernzettel

Gleichgewicht in mehrstufigen Trennprozessen:
Destillation, Extraktion, Absorption und
Kristallisation: Berechnungen von
Gleichgewichtanteilen

Universität: Technische Universität Berlin
Kurs/Modul: Thermodynamik II
Erstellungsdatum: September 6, 2025



Zielorientierte Lerninhalte, kostenlos!
Entdecke zugeschnittene Materialien für deine Kurse:

<https://study.AllWeCanLearn.com>

Thermodynamik II

Lernzettel: Thermodynamik II**(1) Ziel und Rahmen.**

Dieses Kapitel behandelt die Berechnung von Gleichgewichtanteilen in mehrstufigen Trennprozessen. Es werden Destillation, Extraktion, Absorption und Kristallisation als Anwendungsfelder betrachtet. Ziel ist es, die Anteile der einzelnen Komponenten in den Phasen zu bestimmen und daraus Trennleistungen abzuleiten.

(2) Allgemeine Gleichgewichtsrelationen.

Für mehrkomponentige, mehrphasige Systeme gilt im Gleichgewicht, dass Netto-Transferarbeit zwischen den Phasen Null ist. Typische Beziehungen:

Vapor–Liquid-Gleichgewicht (VLE) – ideale oder nicht-ideale Lösungen

$$y_i P = x_i \gamma_i P_i^{\text{sat}}(T), \quad i \in \mathcal{K},$$

wobei y_i = Molekülfaktor in der Dampfphase, x_i = Molekülfaktor in der Flüssigphase, $P = \sum_i y_i P$ (Totdruck) und $P_i^{\text{sat}}(T)$ der Sättigungsdampfdruck von Komponente i . Man erhält aus der Gleichung

$$y_i = \frac{x_i \gamma_i P_i^{\text{sat}}(T)}{P}.$$

Hinweis: γ_i ist der Aktivitätskoeffizient; bei idealer Lösung gilt $\gamma_i = 1$.

Gas–Flüssig-Gleichgewicht (Absorption) – einfache Näherung

Für Komponente i im Gleichgewicht zwischen Gasphase und absorbierender Flüssigkeit gilt oft Henrys Gesetz:

$$P_i^{\text{eq}} = H_i x_i \quad \implies \quad y_i = \frac{P_i^{\text{eq}}}{P} = \frac{H_i}{P} x_i.$$

Flüssig–Flüssig-Gleichgewicht (Extraktion) – Verteilungskoeffizient

Für eine Komponente i zwischen zwei Phasen gilt der Verteilungskoeffizient

$$D_i = \frac{x_i^E}{x_i^R}, \quad x_i^E = D_i x_i^R,$$

mit x_i^E und x_i^R als Molekelfractionen in Extrakt- bzw Raffinatephase.

Fest–Löslich-Gleichgewicht (Kristallisation)

Löslichkeit als Funktion der Temperatur:

$$x_i^{\text{soln}} \leq x_i^{\text{sat}}(T),$$

im Gleichgewicht oft

$$x_i^{\text{soln}} = x_i^{\text{sat}}(T).$$

(3) Destillation: Gleichgewichtanteile in mehrstufigen Systemen

McCabe–Thiele-Ansatz koppelt Gleichgewichtsrelationen mit Betriebsverhältnissen.

D = Destillateffluss, V = Vaporfluss, L = Liquidfluss, x_D = Zusammensetzung im Destillat.

$$y_k = \frac{L}{V} x_k + \frac{D}{V} x_D.$$

Gleichgewicht auf der Stufengrenze:

$$y_i^{(k)} = \frac{x_i^{(k)} \gamma_i P_i^{\text{sat}}(T)}{P}, \quad i \in \{\text{Key-Komponente}\}.$$

Anwendungsschritte (kurz)

- Gleichgewichtsrelationen pro Komponente anwenden.
- Betriebsverhältnisse (L/V , D/V) festlegen bzw. bestimmen.
- Gleichungssystem aus Gleichgewicht und Betriebslinien lösen.
- Aus den resultierenden x_i und y_i die Gleichgewichtanteile ableiten.

(4) Extraktion: Gleichgewichtanteile in mehrphasigen Systemen

$$D_i = \frac{x_i^E}{x_i^R}, \quad x_i^E = D_i x_i^R.$$

- Gesamtmassenbilanz pro Stufe:

$$F x_i^F = R x_i^R + E x_i^E,$$

mit Gesamtflussraten F (Feed), R (Raffinate), E (Extrakt).

(5) Absorption: Gleichgewichtsanteile in Gas-Flüssig-Systemen

- Gleichgewicht (Gas-Phase i) aus Henrys Gesetz:

$$y_i = \frac{H_i}{P} x_i.$$

- Gesamtmassenbilanz pro Stufe:

$$F_i + L x_i^{\text{ein}} = V y_i^{\text{Aus}} + L x_i^{\text{Aus}},$$

wobei die konkreten Variablen von der Prozesskonfiguration abhängen.

(6) Kristallisation: Gleichgewichtanteile in Fest-Flüssig-Phase

- Solubility-Linie:

$$x_i^{\text{soln}} = x_i^{\text{sat}}(T).$$

- Falls Reaktions-/Komplexbildung relevant ist, können Zusatzgleichungen notwendig werden.

(7) Vorgehen zur konkreten Berechnung der Gleichgewichtanteile

- Schritt 1: Relevante Gleichgewichtsrelationen je Prozess auswählen (VLE, VLE mit Aktivitätskoeffizienten, Verteilungskoeffizient, Henrys Gesetz, Solubility).
- Schritt 2: Massenbilanzen und Betriebsgrößen festlegen (Destillationsverhältnisse, Absorptions- bzw. Extraktionsverhältnis, Phasenanteile).
- Schritt 3: Gleichungssystem aus Gleichgewichtsbeziehungen und Bilanzen nach den unbekanntem Anteilen lösen (z. B. x_i , y_i , x_i^E , x_i^R , ...).
- Schritt 4: Aus den Gleichgewichtanteilen Trennleistung ableiten (Destillat-, Extrakt- oder Absorbat-Anteile).

(8) Beispiel (kurz, schematisch)

- Destillation eines binären Systems A–B bei konstantem Druck; Annahme idealer Lösung ($\gamma_A = \gamma_B = 1$).

- VLE-Beziehung:

$$y_A P = x_A P_A^{\text{sat}}(T), \quad y_B P = x_B P_B^{\text{sat}}(T),$$

mit $x_A + x_B = 1$ und $y_A + y_B = 1$.

- Betriebslinien (vereinfachte, konstanter Überfluss):

$$y_A = \frac{L}{V} x_A + \frac{D}{V} x_A^D.$$

- Gleichungssystem aus VLE und Betriebslinien lösen, um x_A, y_A (und entsprechend x_B, y_B) zu bestimmen.

- Aus den Ergebnissen lässt sich der Gleichgewichtanteil im Destillat ableiten:

$$x_A^D = \text{Destillationsanteil von A im Destillat}, \quad x_B^D = 1 - x_A^D.$$

Literaturhinweise (Auswahl)

- C. J. King, P. W. Seader, R. N. Henley: Separation Process Principles.

- D. M. Himmelblau, J. B. Riggs: Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering.

- P. H. Stidham: Distillation and Absorption Processes.