

Absorbieren (Trennverfahren für fluide Phasen II)

- 1 Einleitung und Grundbegriffe
- 2 Technische Anwendungen
 - 2.1 Synthese chem. Verbindungen (Produkte)
 - 2.2 Exsorptionsverfahren
 - 2.2.1 Austreiben
 - 2.2.2 Strippen
 - 2.3 Physikalische Gaswäschen (Gasreinigung)
- 3 Apparate einschl. Absorptionsanlage
- 4 Kontinuierliche Gegenstrom-Absorption und -Exsorption von Zweistoffgemischen
 - 4.1 Gleichgewichtskurven für isotherme und nicht-isotherme Absorption
 - 4.2 Stofftransportvorgänge
 - 4.3 Berechnung des Trennaufwands
 - 4.3.1 Voraussetzungen
 - 4.3.2 Trennstufenmethode
 - 4.3.2.1 Bilanzlinien
 - 4.3.2.2 Grafische Ermittlung der Anzahl der Trennstufen
 - 4.3.3 Methode der Übertragungseinheiten (HTU-Methode)
 - 4.4 Chemische Absorption

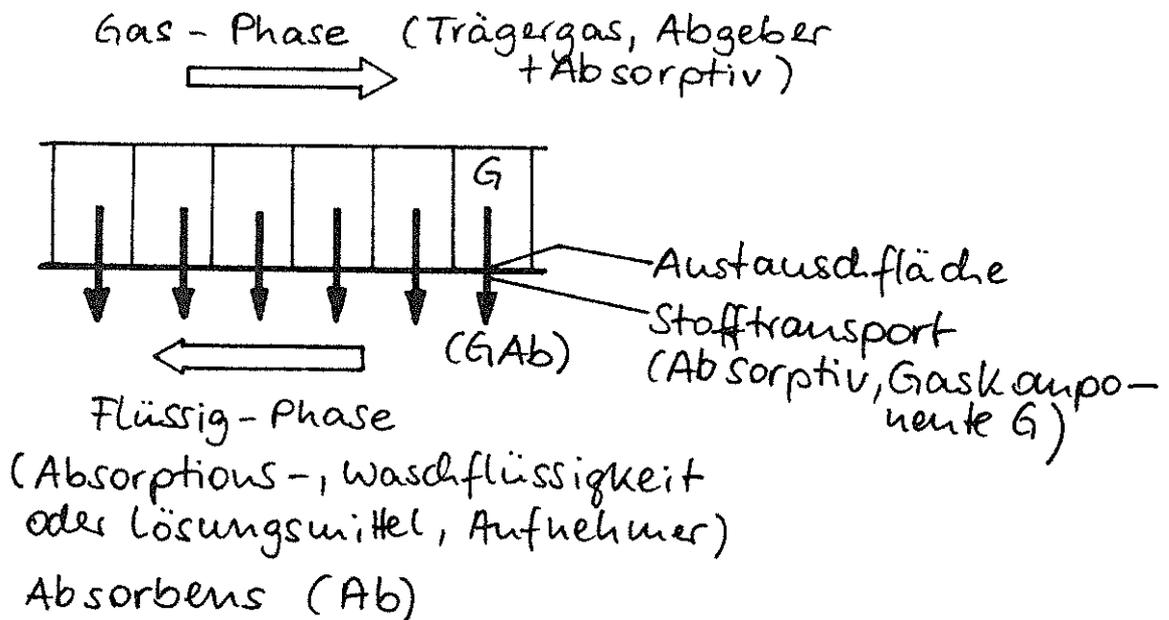
1 Einleitung und Grundbegriffe

Absorption: Aufnahme von Gasen (G) oder Dämpfen (Absorptive) in selektiv lösenden Flüssigkeiten (Absorptionsmittel oder Solvent) bis zum Gaslöslichkeitsgleichgewicht. Diese Aufnahme kann rein physikalisch (physikal. Absorption) oder mit chem. Reaktion (chem. Absorption) verknüpft sein.

oder: Verteilung eines Absorptivs zwischen einer Gasphase und einer flüssigen Phase ($\hat{=}$ Solventextraktion).

Konkurrierende Vorgänge: Adsorption, Desorption, Ausfrieren

(a)



(b)

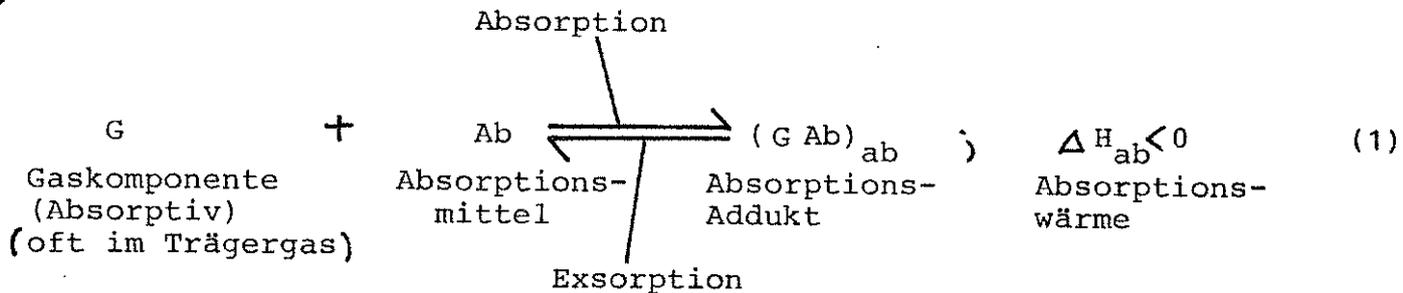


Abb. 1 (a) Prinzip der Absorptionsvorgänge
(b) Absorptions-Gleichgewicht

Folgerungen aus Gl.(1):

a) Absorption

Absorption von G wird begünstigt durch:

- Temperaturerniedrigung
- Druckerhöhung
- Entfernung des Addukts (G Ab) aus dem Gleichgewicht, d.h. in der Technik: ständige Erneuerung des Lösungsmittels durch kontinuierliche Betriebsweise

b) Exsorption

Exsorption von G wird begünstigt durch:

- Temperaturerhöhung
- Druckerniedrigung
- Entfernung von G aus dem Gleichgewicht mit Inertgas (z.B. mit Luft, H₂O-dampf), d.h. in der chem. Technik:
Strippen, Austreiben

c) Addukt (GAb)

physik. Addukt: physik. wirksames LM \Rightarrow LM unselektiv, leichte Exsorption von G

chem. Addukt: chem. wirksames LM \Rightarrow LM selektiv, schwierige Exsorption von G

d) Gegenstromprinzip

Zur Vervielfachung des Gleichgewichteffekts der Beziehung Gl.(1) wird – analog zur Rektifikation – in der chem. Technik i.a. das Gegenstromprinzip angewandt.

e) Regeneration

da i.a. das (beladene) LM im Kreislauf geführt wird und auch oft die absorbierten Gase G gewonnen werden sollen, wird in der Technik i.a. die Exsorption (Regeneration) ebenfalls durchgeführt.

Phasenregel

$$F = K + 2 - P \quad (2a)$$

$K = 3$ (Absorptiv; Trägergas; Flüssigkeit)

$P = 2$ (Gas, Flüssigkeit)

\Rightarrow $F = 3$: Absorption ist trivariantes System (P_{Σ}, T, c_i) (2b)

Kriterien für die Absorptionsmittelwahl:

Selektivität	hohe selektive Aufnahmefähigkeit für die abzutrennende Gaskomponente bei niederem Gesamtdruck, ohne störende Anteile weiterer im Gasgemisch enthaltener Komponenten zu lösen
Dampfdruck	niederer Dampfdruck und hohe Siedetemperatur, um die Trägergasphase nicht mit Absorptionsmitteldämpfen zu verunreinigen und Absorptionsmittelverluste gering zu halten
Rückgewinnung	wirtschaftliche Rückgewinnung durch Exsorption, d. h. keine Azeotropbildung oder chemische Reaktion zwischen Absorptionsmittel und Gaskomponente
Korrosion	keine korrosive Einwirkung auf die Werkstoffe der Absorptionsanlagen

Tab.1 : Kriterien der Absorptionsmittelwahl

2.1 Synthese chem. Verbindungen (Produkte)

Absorption eines Gases in einem Lösungsmittel, wobei das Gas – u.U. auch Reaktionspartner – das Endprodukt ist:

- Herstellung von H_2SO_4 nach dem Kontaktverfahren:
Absorption von SO_3 in konz. H_2SO_4 unter Bildung von $H_2S_2O_7$
- Herstellung von $(NH_4)_2SO_4$ durch Absorption von NH_3 in H_2SO_4
- Herstellung von Salzsäure durch Absorption von HCl in H_2O
- Herstellung von Salpetersäure durch Absorption von NO_2 /Luftgemischen in H_2O
- Stahlherstellung : Absorption von O_2 in der Schmelze, wobei der Kohlenstoff oxidiert wird

- Herstellung von Phosphorsäure durch Absorption von P_2O_5 -Rauch in konz. H_3PO_4
- Gasreinigung: Absorption von CO_2 , HCl , SO_2 , H_2S durch Natronlauge oder Alkalicarbonatlösungen;

2.2 Exsorptionsverfahren

Abtrennung des im Absorptionsmittel gelösten Absorptivs G aus (GAb)

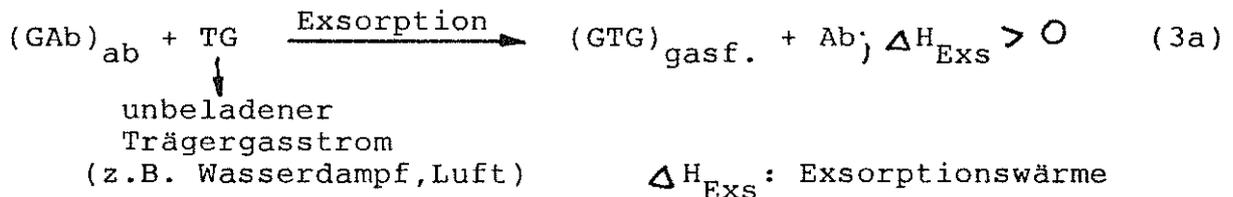
2.2.1 Austreiben

Austreiben durch:

- Überhitzten Wasserdampf (direkte Wasserdampf-Heizung)
- Auskochen der Lösung (reboiler): gekoppelt mit Gegenstromdestillation zur Trennung des verdampften Anteils der LM vom gewünschten Absorptiv G
- Entspannung: bei Druckabsorptionen, seltener, da teuer
↳ des LM

2.2.2 Strippen

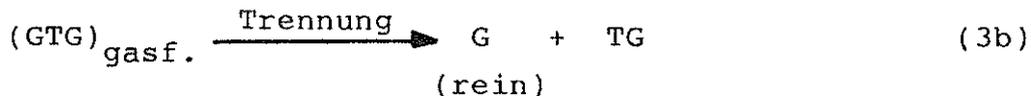
Strippen: analog Rückreaktion (1):



worin:

$$P_{G, \text{in GAb}} > P_{G, \text{in TG}}$$

Trennung Trägergas/Absorptiv:



reines Absorptiv G : wenn $TG \hat{=} \text{Wasserdampf}$, der kondensiert

kein reines Absorptiv G : wenn $TG \hat{=} \text{Luft}$

2.3 Physikalische Gaswäschen (Gasreinigung)

Entfernung von Gaskomponenten aus Gasgemischen mit einem LM:

- Entfernung von CO₂, Teeren u.a.: aus Rauch-, Kokerei- und
(Umweltschutz) Synthesegasen durch:
Druckwasserwäsche
Rektisol-Verfahren (mit Methanol als LM bei tiefer Temp.)
- Entfernung von SO₂: aus Abgasen (z.B. Kohlekraftwerke) durch
(Umweltschutz) katalyt. Oxidation zu SO₃ mit anschließender
Absorption von SO₃ in konz. H₂SO₄
- Entfernung von NH₃: aus NH₃/Luft-Gemischen mit Wasser
(Ammoniakwäsche); Umweltschutz (und bei NH₃-Herstellung)
- Entfernung von Butadien : aus Synthesegasen durch Absorption
in Petroleum
- Abtrennung von Ethin : aus Spaltgasen mit N-Methylpyrrolidon

3 Apparate einschl. Absorptionsanlage

Stoffaustauschfläche A des Absorbers

- soll mögl. groß sein
- soll sich ständig erneuern

- ① Austauschfläche A relativ klein \Rightarrow Hintereinanderschaltung
mehrerer Oberflächenabsorber
- ② wesentlich wirkungsvoller als ①. Auch häufig zur Absorption
von NH₃ in Kältemaschinen eingesetzt.
Filmdicke: $\geq 50 \mu\text{m}$.
- ③ ähnlich wie bei der Rektifikation; am meisten verbreitet, da
einfacher Aufbau, auch für aggressive Fluide geeignet;

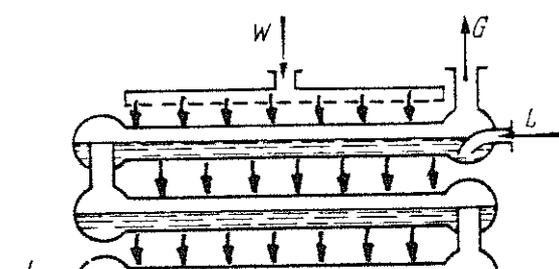
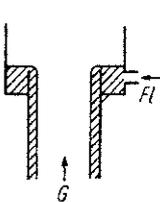
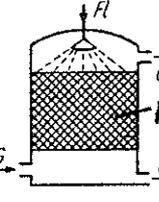
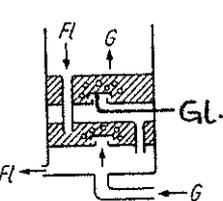
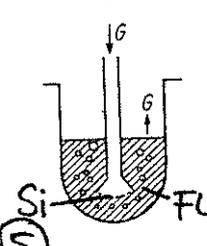
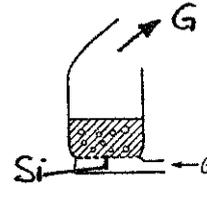
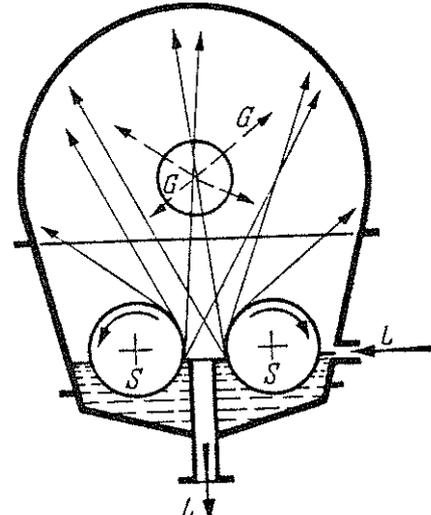
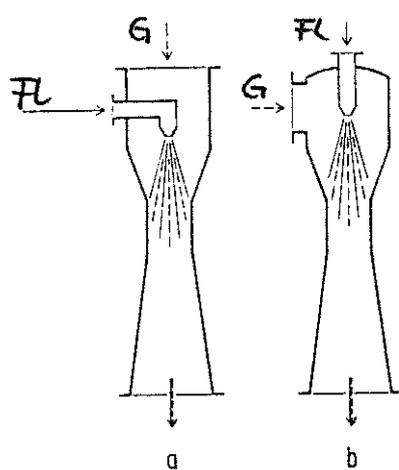
<p>Oberflächenabsorber</p>	<p>Dünnschichtabsorber (Fallstromabsorber)</p>	<p>Füllkörperkolonnen</p>
		
<p>① Oberflächenabsorber: Rohrabsorber mit Rieselkühlung. (Dickschichtabsorber)</p>	<p>Beispiel: HCl-Absorption in Kohlenstoffrohren</p> <p>②</p>	<p>Beispiel: Herstellung von Salz-, Schwefel- und Salpetersäure</p> <p>Füllkörperkolonne ③</p>
<p>Bodenkolonnen</p>	<p>Siebböden-Apparate</p>	
<p>Glockenboden</p> 	<p>Tauchglocke</p> 	<p>Konverter</p> 
<p>④ Beispiel: HCl-Absorption</p>	<p>⑤ Beispiel: CO₂-Wäsche</p>	<p>⑥ Beispiel: Stahlherstellung</p>
<p>Rotationsabsorber</p>	<p>Strahlwäscher</p>	
 <p>⑦</p> <p>Absorptionsapparat mit Flüssigkeitszerstäubung (STRÖDER-Wäscher)</p>	<p>Strahlwäscher (Bauart Körting)</p>  <p>⑧</p> <p>a Für niedrige Gas/Flüssigkeits-Verhältnisse b Für hohe Gas/Flüssigkeits-Verhältnisse</p>	

Abb. 2: Absorptionsapparate; L: Lösungsmittel; G: Gas; W: Kühlwasser; Fl: Flüssigkeit; FK: Füllkörper; Gl: Glocke; Si: Siebboden; S: rotierende Scheiben

- ④, ⑤, ⑥: Kolonnen oder Apparate mit Glocken- oder Siebböden; Bodewirkungsgrade sind kleiner als bei Rektifikation; große Austauschfläche durch kleine Bläschen: z.B. auch für schwerlösliche Gase
- ⑦ für leichtlösliche Gase, da flüssig-seitige Vermischung gering wegen der kleinen Flüssigkeits-Tröpfchen; großer Energieaufwand; für NH_3 - oder SO_3 -Absorption
- ⑧ besonders für chem. Absorption; auch zur Entstaubung von Gasen

Absorptionsanlage

Meistens gekoppelt mit Regeneration des LM, das im Kreislauf gefahren wird. Die Art der Regeneration entscheidet über die Wirtschaftlichkeit:

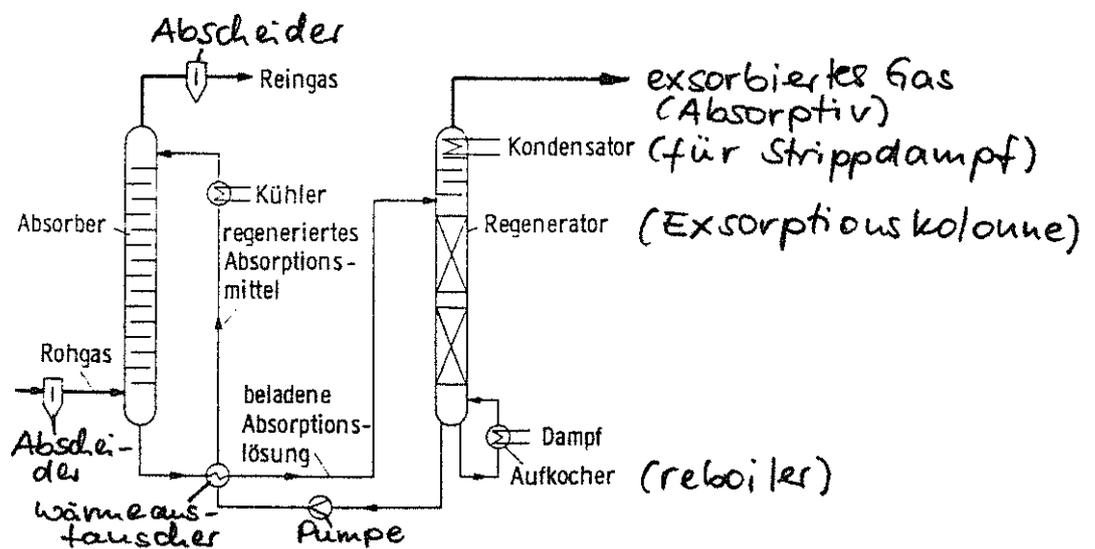


Abb. 3 : Absorptionsanlage mit Regeneration des LM durch direkte Wasserdampf-Heizung

4 Kontinuierliche Gegenstrom-Absorption und -Exsorption von Zweistoffgemischen

4.1 Gleichgewichtskurven für isotherme und nicht-isotherme Absorption

Für LM, in denen relativ geringe Konzentrationen des zu absorbierenden Stoffes physikal. gelöst sind, läßt sich das Henry-Gesetz

(→ TC II/10/11) anwenden, wenn die Absorptionsflüssigkeit als schwerflüchtig angenommen wird:

$$p_i = H_i x_i \quad (4a)$$

p_i : Partialdruck des Absorptivs i im Trägergas

x_i : Molanteil des Absorptivs i im Absorptionsmittel

y_i : Molanteil des Absorptivs i im Trägergas

Für die ideale Gasphase soll das Dalton'sche Gesetz gelten:

$$p_i = y_i p_\Sigma \quad (4b)$$

Gl.(4b) in (4a) liefert:

$$y_i = \frac{H_i}{p_\Sigma} x_i \quad (5a)$$

oder mit den Näherungen

$$\bar{x} = \frac{x}{1-x} \approx x \quad (6a)$$

$$\bar{y} = \frac{y}{1-y} \approx y \quad (6b)$$

erhält man das Gaslöslichkeitsgleichgewicht:

$$\boxed{\bar{y}(x) = \frac{H}{p_\Sigma} \bar{x}} \quad \underline{\text{Gleichgewichtskurve}} \quad (5b)$$

$$\bar{x} \equiv \frac{\dot{n}_l}{\dot{N}_l} = \frac{\text{kmol Absorptiv im Lösungsmittel}}{\text{kmol reines Lösungsmittel}}$$

$$\bar{y} \equiv \frac{\dot{n}_g}{\dot{N}_g} = \frac{\text{kmol Absorptiv im Trägergas}}{\text{kmol reines Trägergas}}$$

Bemerkungen zu Gl.(5b)

1. nur für $H/p_\Sigma = \text{const.}$ liegt im Beladungsdiagramm (→ Abschn. 4.2.2.2) eine Gleichgewichtsgerade vor.
2. i.a. ist $H(T, x_i) \implies \bar{y}(T, \bar{x}, p_\Sigma) \implies \underline{\text{Gleichgew.kurve}}$

3. $\bar{y}(\bar{x}, p_{\Sigma}, T_1)$: Gleichgew.kurve ist Isotherme für $T_1 = \text{const.}$

$\bar{y}(\bar{x}, T, p_{\Sigma, 1})$: Gleichgew.kurve ist Isobare für $p_{\Sigma, 1} = \text{const.}$

4. exakt gültig nur für ideal verdünnte Lösungen

Berücksichtigung von Wärmeeffekten

die frei werdende Absorptionswärme wird i.a. nur in speziellen Fällen zur Teilverdampfung oder Erwärmung des LM bzw. zur Erwärmung des Trägergasstroms verbraucht \implies in den meisten Fällen wird folglich das LM erwärmt, wodurch – entspr. Gl.(1)– das Lösungsvermögen abnimmt:

- häufig Abfuhr von ΔH_{ab} über Zwischenkühler (isotherme Absorption)
- nicht - isotherme Absorption \implies

Aus der Wärmebilanz wird Temp.erhöhung $\vartheta_{ex} - \vartheta_{in}$ des Lösungsmittels berechnet:

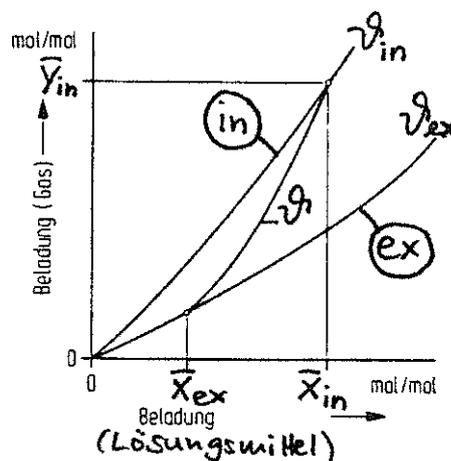


Abb. 4: Beladungsdiagramm für nichtisotherme Absorption;

$\textcircled{in}, \textcircled{ex}$ Gleichgewichtskurven bei Anfangs- und Endtemperatur $\vartheta_{in}, \vartheta_{ex}$ des Lösungsmittels; Gegenstromabsorption

4.2 Stofftransportvorgänge

Neben der Lage der Phasengleichgew. ist die Geschwindigkeit der Gleichgewichtseinstellung von großer Bedeutung. Die Absorptionsschwindigkeit hängt ab von Stofftransport innerhalb der Phasen (Diffusion, Konvektion \longrightarrow TC I/5) sowie durch die Phasengrenzflächen (Stoffüber- und Stoffdurchgang, \longrightarrow TC I/5).

Der langsamste Stofftransportvorgang bestimmt die Dimensionierung eines Absorbers.

4.3 Berechnung des Trennaufwands

4.3.1 Voraussetzungen

Es werden folgende, vereinfachende Annahmen gemacht:

- vom Lösungsmittel wird nur eine Komponente eines Gasgemisches absorbiert, d.h. LM und Restgas sind völlig ungemischt
- alle restlichen Komponenten (d.h. außer Absorptiv) bilden eine Trägergaskomponente, die praktisch im Lösungsmittel unlöslich ist (z.B. CO_2 -Absorption in Wasser aus Ammoniaksynthesegas $\text{N}_2 + \text{H}_2$; Ethin-Absorption in Aceton aus Pyrolysegasgemisch ($\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_4$)).
- Masse der Gasphase nimmt ab, Masse der Flüssigphase nimmt zu
- Masse Trägergas(TG) und Masse Lösungsmittel (LM) bleiben näherungsweise konstant wenn
 - Dampfdruck des LM klein ist, d.h. LM ist schwerflüchtig
 - Löslichkeit des Trägergasgemisches ^{im LM} klein ist

4.3.2 Trennstufenmethode

4.3.2.1 Bilanzlinien

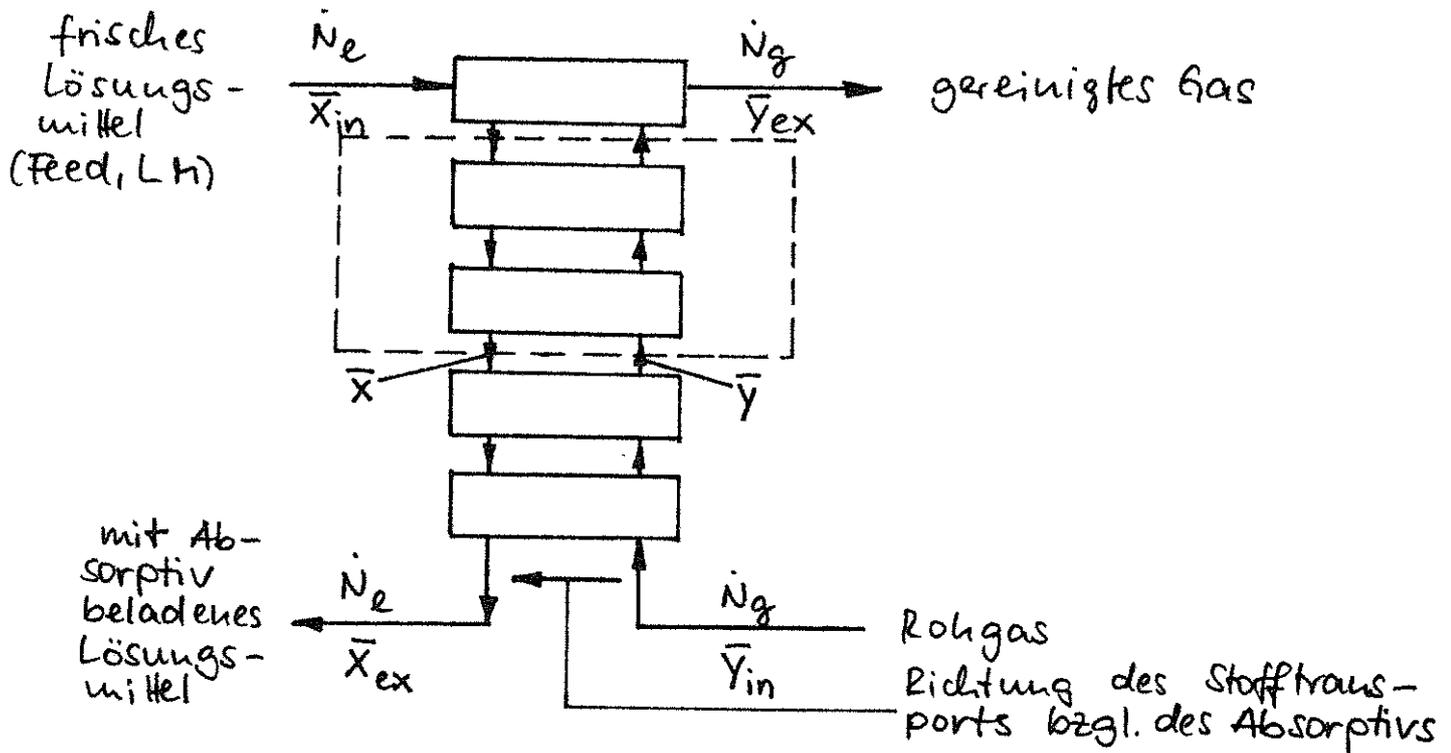


Abb. 5: Zur Berechnung von Bilanzlinien bei Gegenstromabsorption nach der Trennstufenmethode

Die Stoffmengenbilanz für das Absorptiv ist im Bilanzgebiet bei stationärem Betrieb:

$$\underbrace{\bar{x}_{in} \dot{N}_e + \bar{y} \dot{N}_g}_{\text{EIN ins Bilanzgebiet}} = \underbrace{\bar{x} \dot{N}_e + \bar{y}_{ex} \dot{N}_g}_{\text{AUS Bilanzgebiet}} \quad (6a)$$

oder

$$\bar{y}(\bar{x}) = \frac{\dot{N}_e}{\dot{N}_g} \bar{x} - \frac{\dot{N}_e}{\dot{N}_g} \bar{x}_{in} + \bar{y}_{ex} \quad (6b)$$

Bilanzgerade

$\bar{x}_{in} \equiv \frac{n_{l,in}}{N_l}$: Beladung des frischen Lösungsmittels (Feed) mit Absorptiv

$\bar{y}_{ex} \equiv \frac{n_{g,ex}}{N_g}$: Endbeladung mit Absorptiv des Trägergases am Absorberaustritt, d.h. des gereinigten Gases

$\bar{y}_{in} \equiv \frac{n_{g,in}}{N_g}$: Beladung mit Absorptiv des eintretenden Gasgemisches (Rohgas)

$\bar{x}_{ex} \equiv \frac{n_{l,ex}}{N_l}$: Endbeladung mit Absorptiv des Lösungsmittels am Absorberaustritt

\dot{N}_l, N_l : Stoffmengenströme bzw. Anzahl Mole des reinen LM

\dot{N}_g, N_g : " " " " " des reinen Trägergases

n_l, n_g : Anzahl Mole des Absorptivs im LM bzw. im Trägergas

Bemerkungen zu Gl.(6b)

1. $\frac{\dot{N}_l}{N_g} = \text{const.}$: Bilanzgerade (Verstärkungsgerade, Arbeitsgerade)

2. $\frac{\dot{N}_l}{N_g}$: Lösungsmittelverhältnis oder Trägerstoffverhältnis

3. Gl.(6b) gibt die Zus.setzung der Trägergasphase \bar{y} und der Lösungsmittelphase \bar{x} in jedem Absorber-Querschnitt zwischen den Stufen an.

4.3.2.2 Grafische Ermittlung der Anzahl der Trennstufen

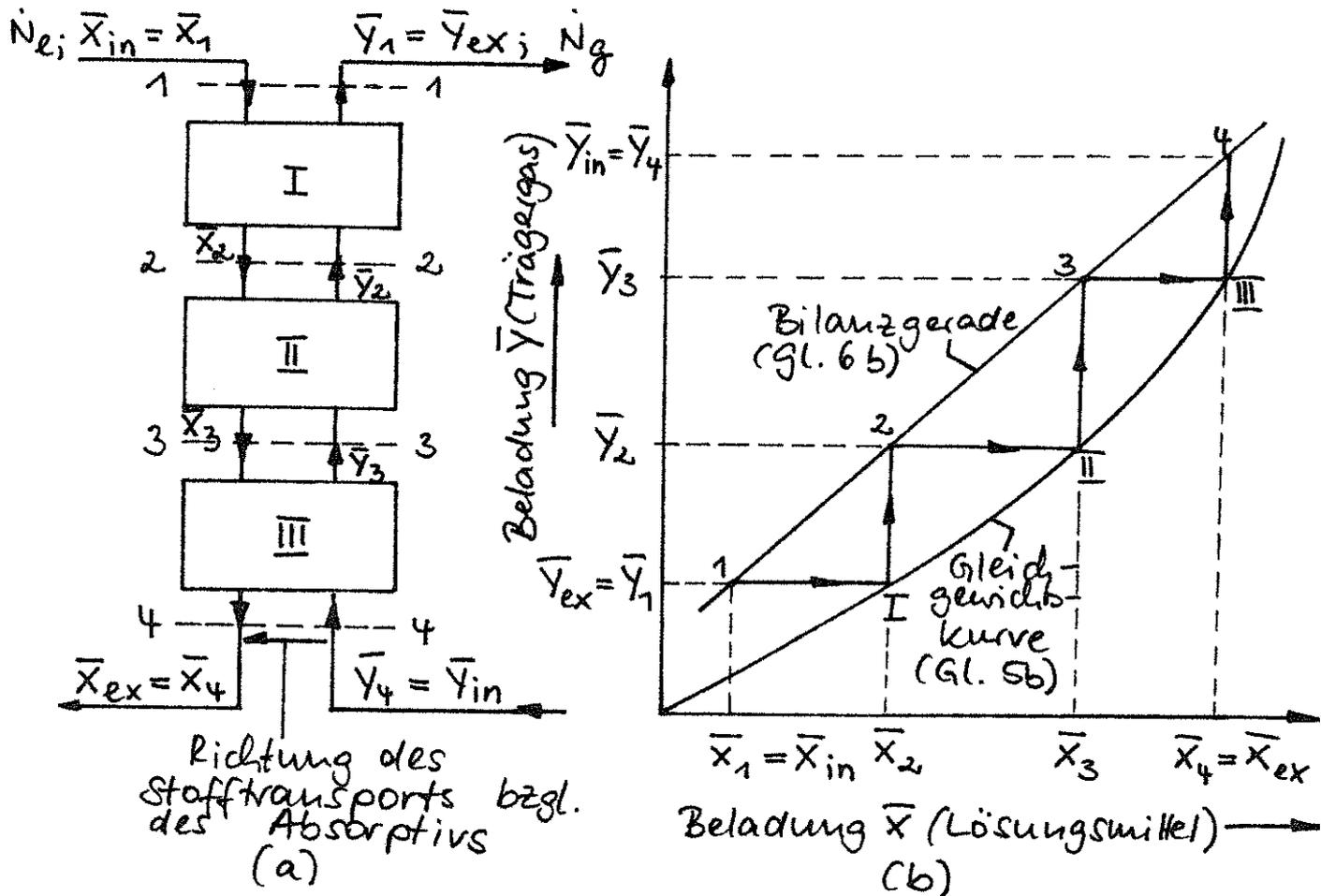


Abb. 6 : Zur Ermittlung der Trennstufen bei der Gegenstromabsorption
 (a) Absorptionskolonne, (b) Beladungsdiagramm mit Gleichgewichtskurve und Bilanzgerade

1. Die eine Stufe (z.B. Stufe II) verlassenden Phasen (\bar{x}_3, \bar{y}_2) befinden sich im Gleichgewicht, d.h. der entsprechende Zustandspunkt II liegt auf der Gleichgewichtskurve, wie die Punkte I, III. Auf den Stufen erfolgt also die Einstellung des Gaslöslichkeitsgleichgewichts, wobei Stoff- und Wärmetransportvorgänge ablaufen.
2. Die Zusammensetzungen (z.B. \bar{x}_2, \bar{y}_2) zwischen den Stufen sind nicht miteinander im Gleichgewicht und liegen auf der Bilanzgeraden (z.B. Punkt 2). Ebenso liegen die Zustandspunkte 1, 3, 4 auf der Bilanzgeraden. Infolge dieses Nicht-Gleichgewichts zwischen den beiden Phasen \bar{x}, \bar{y} kommt es teilweise zwischen den Stufen (insbesondere jedoch auf den Stufen) zu einem gegenseitigen Stoff- und Wärmeaustausch, wobei der Stofftransport des Absorptivs vom Trägergas zum Lösungsmittel erfolgt.

3. Die Wirkung einer Stufe (z.B. Stufe II) wird durch die Treppe 2-II-3 dargestellt.
4. Bilanzgerade verläuft bei der Absorption stets oberhalb der Gleichgewichtskurve, da der Partialdruck p_g des Absorptivs im Trägergas stets größer ist als der zugehörige Gleichgewichtspartialdruck $p_{g,gl}$ des Absorptivs:

$$p_g > p_{g,gl} \quad \text{bzw.} \quad \bar{y}_g > \bar{y}_{g,gl} \quad .$$

5. Liegen die Steigung der Bilanzgerade durch \dot{N}_e/\dot{N}_g sowie die Gleichgew.kurve fest, dann läßt sich bei vorgegebenem \bar{x}_{in} und \bar{y}_{ex} – analog zur Rektifikation – ein Treppenzug einzeichnen, aus dem sich die theoret. Stufenzahl n_{th} ergibt.
6. Sind Gleichgew.- und Bilanzkurve Geraden mit den Steigungen $m \equiv \frac{H}{p_\Sigma} = \text{const.}$ und $a \equiv \frac{\dot{N}_e}{\dot{N}_g} = \text{const.}$, dann läßt sich n_{th} berechnen nach:

$$n_{th} = \frac{\log \left[\left(1 - \frac{m}{a} \right) \frac{\bar{y}_{in} - m \bar{x}_{in}}{\bar{y}_{ex} - m \bar{x}_{in}} + \frac{m}{a} \right]}{\log \frac{a}{m}} \quad (7a)$$

7. Mindestlösungsmittelverhältnis a_{min}

Mit abnehmender Steigung a der Bilanzgeraden Gl.(6b), z.B. durch Verminderung des Lösungsmittelstroms \dot{N}_e (bei $\dot{N}_g = \text{const.}$), wird zur Erreichung der gleichen Endbeladung \bar{y}_{ex} (bei $\bar{y}_{in} = \text{const.}$) die erforderliche Stufenzahl immer größer und zwar so lange bis eine Mindeststeigung a_{min} (=Mindestlösungsmittelverhältnis) erreicht ist. Bei a_{min} ist die erforderliche Stufenzahl $n_{th} \rightarrow \infty$. Ist a_{min} erreicht, dann liegt gleichzeitig eine maximale Beladung $\bar{x}_{ex,min}$ des Lösungsmittels vor, da i.a. \dot{N}_e auch minimal ist:

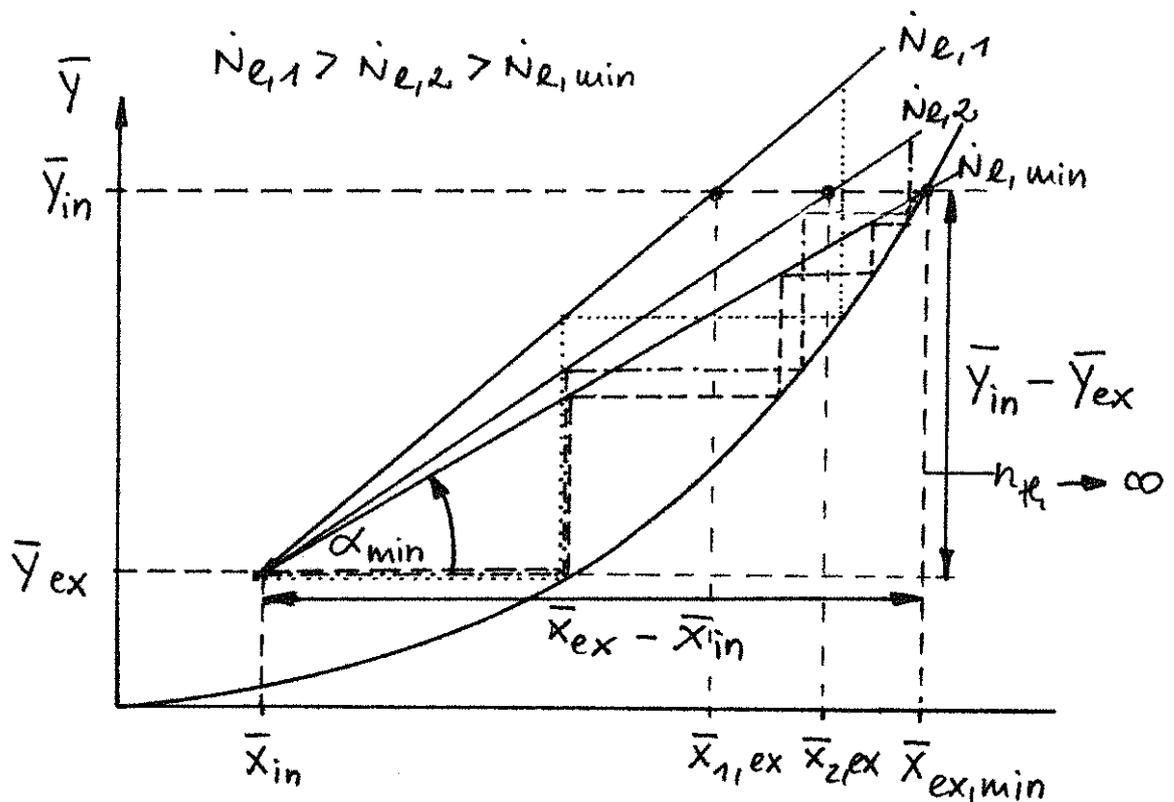


Abb. 7: Zur Ermittlung des Mindestlösungsmittelverhältnisses
 $a_{\min} = (\dot{N}_e / \dot{N}_g)_{\min}$ für eine vorgegebene Trennaufgabe
 $(\bar{y}_{in} - \bar{y}_{ex})$ bei einer Eintrittsbeladung \bar{x}_{in} des LM, wobei
das Verhältnis \dot{N}_e / \dot{N}_g variiert wurde.

Das Mindestlösungsmittelverhältnis läßt sich berechnen aus:

$$a_{\min} \equiv \left(\frac{\dot{N}_e}{\dot{N}_g} \right)_{\min} = \frac{\bar{y}_{in} - \bar{y}_{ex}}{\bar{x}_{ex,min} - \bar{x}_{in}} \quad (7b)$$

In der Praxis gilt:

$$a_{\text{real}} = (1.3 \text{ bis } 1.6) a_{\min} \quad (7c)$$

8. Effekte durch die Absorptionswärme ΔH_{ab}

- Trennwirkung nimmt ab, da Gleichgew.kurve dichter bei Bilanzlinie liegt
- neben Stoffaustausch zusätzlicher Wärmetransport zwischen den Phasen

4.3.3 Methode der Übertragungseinheiten (HTU-Methode)

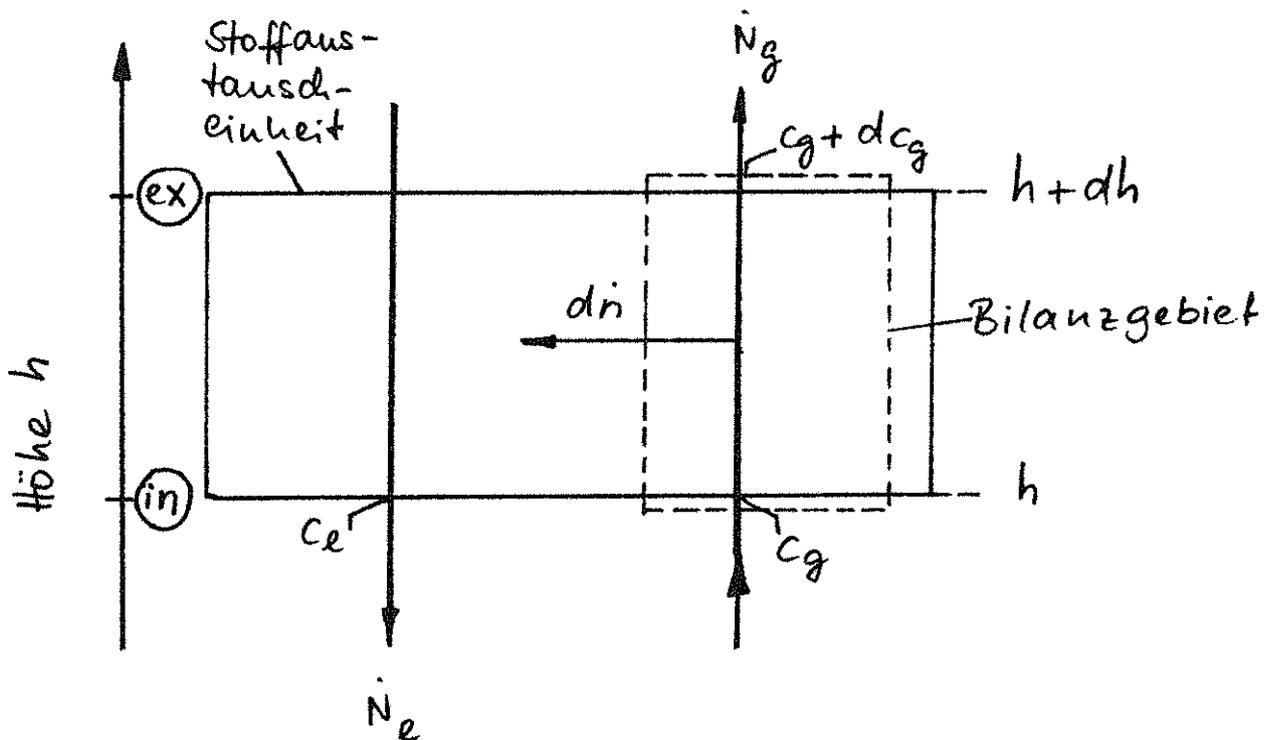


Abb. 9: Stoffdurchgang von der Gasphase g in die flüssige Phase l zur Beschreibung einer Absorptionskolonne mit der kinetischen Theorie der Gegenstromtrennung (HTU-Methode)

Für den Stoffmengenstrom \dot{n} des Absorptivs von der Trägergasphase in die flüssige Phase (LM) gilt nach der Theorie des Stoffdurchgangs (\rightarrow TC I/5) bezogen auf die Gasphase g :

$$\dot{n} = k_{c,g} A (c_g - c_{g,gl}) \quad (9a)$$

oder für einen differentiellen Kolonnenquerschnitt dA :

$$d\dot{n} = k_{c,g} dA (c_g - c_{g,gl}) \quad (9b)$$

worin

$$dA = A_v S dh \quad \text{ist} \quad (9c)$$

$k_{c,g}$: gasseitiger Stoffdurchgangskoeff.

$A_v \equiv \frac{A}{V}$: spezifische Phasengrenzfläche A pro Volumeneinheit des Absorbers

S: Querschnittsfläche des Absorbers, *senkrecht zur Höhenkoordin.*

h: Höhenkoordinate des Absorbers

c_g : Konz. des Absorptivs im Trägergas

$c_{g,gl}$ ($=Hc_l$): die zu c_l gehörende Gleichgew.konz. des Absorptivs im Trägergas

Es gilt folgende Stoffmengenbilanz für das Absorptiv bezügl. des Bilanzgebiets der Abb. 9 :

$$\underbrace{c_g \dot{N}_g}_{\text{EIN ins Bilanzgeb.}} = \underbrace{(c_g + dc_g) \dot{N}_g}_{\text{AUS Bilanzgebiet}} + k_{c,g} (c_g - c_{g,gl}) dA \quad (10a)$$

Mit Gl.(9c) folgt:

$$- \frac{1}{k_{c,g} A_v} \frac{\dot{N}_g}{S} \frac{dc_g}{c_g - c_{g,gl}} = dh \quad (10b)$$

Die Gl.(10b) läßt sich unter bestimmten Voraussetzungen integrieren, die häufig erfüllt sind:

$$\frac{1}{k_{c,g} A_v} \frac{\dot{N}_g}{S} \int_{c_{g,ex}}^{c_{g,in}} \frac{dc_g}{c_g - c_{g,gl}} = H \quad (10c)$$

mit

$$H \equiv \int_0^{\#} dh \quad (10d)$$

H: wirksame Höhe der Absorberkolonne

Eine Gl.(10c) entspr. Beziehung gilt für den Bezug auf die Flüssigphase l :

$$\frac{1}{k_{c,l} A_v} \frac{\dot{N}_l}{S} \int_{c_{l,ex}}^{c_{l,in}} \frac{dc_l}{c_{l,gl} - c_l} = H \quad (10e)$$

$k_{c,\ell}$: flüssigseitiger Stoff-
durchgangskoeff.

c_ℓ : Konz. des Adsorptivs in der Flüssigkeit

$c_{\ell,g1}$: die zu $c_g (=Hc_{\ell,g1})$ gehörende Gleich-
gew.konz. des Absorptivs in der Flüssigk.

Übergang von den Konzentrationen c_g, c_ℓ auf Beladungen \bar{y}, \bar{x} :

$$\underline{\underline{c_g}} = y \frac{\tilde{\rho}_g}{\tilde{M}_g} = \frac{y}{1+\bar{y}} \frac{\tilde{\rho}_g}{\tilde{M}_g} \approx \bar{y} \frac{\tilde{\rho}_g}{\tilde{M}_g} \quad (11a)$$

$$\underline{\underline{c_\ell}} = x \frac{\tilde{\rho}_\ell}{\tilde{M}_\ell} = \frac{x}{1+\bar{x}} \frac{\tilde{\rho}_\ell}{\tilde{M}_\ell} \approx \bar{x} \frac{\tilde{\rho}_\ell}{\tilde{M}_\ell} \quad (11b)$$

$\tilde{\rho}_g, \tilde{\rho}_\ell$: mittl. Dichte des Trägergases,
der Lösung

$\tilde{M}_g, \tilde{M}_\ell$: mittl. molare Massen des Träger-
gases, der Lösung

Mit Gl.(11a) folgt aus Gln. (10c), (10e)

$$\frac{1}{k_g A_v} \frac{\dot{N}_g}{S} \int_{\bar{y}_{ex}}^{\bar{y}_{in}} \frac{d\bar{y}}{\bar{y}-\bar{y}_{g1}} = H \quad (12a)$$

$$k_g \equiv k_{c,g} \tilde{\rho}_g / \tilde{M}_g \quad [\text{folgt aus Gln. (9a) und (11a)}]$$

oder

$$\boxed{HTU_{o,g} \cdot NTU_{og} \equiv H} \quad (12b)$$

worin gilt:

$$\boxed{HTU_{o,g} \equiv \frac{1}{k_g A_v} \frac{\dot{N}_g}{S}} : \underline{\text{Höhe einer Übertragungseinheit}} \quad (12c)$$

(height of a transfer unit)

Index o: overall Transportwiderstand in
beiden Phasen

$\frac{\dot{N}_g}{S}$: spezifischer Gasdurchsatz

und

$$NTU_{o,g} \equiv \int_{\bar{y}_{ex}}^{\bar{y}_{in}} \frac{d\bar{y}}{\bar{y} - \bar{y}_{gl}}$$

: Zahl der Übertragungseinheiten (12d)
(number of transfer units)

Völlig analog ergibt sich mit Gl.(11b) aus Gl.(10e) für einen Bezug auf die Flüssigphase l :

$$H \equiv HTU_{o,l} \cdot NTU_{o,l} \quad (13a)$$

mit

$$HTU_{o,l} \equiv \frac{1}{k_l A_v} \frac{\dot{N}_l}{S} \quad (13b)$$

und

\dot{N}_l/S : spezifischer Flüssigkeitsdurchsatz

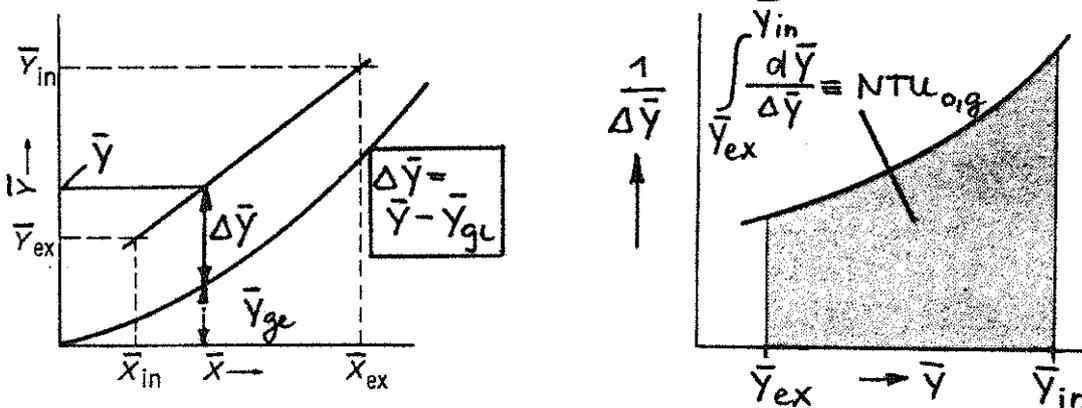
k_l : flüssigkeitsseitiger Stoffdurchgangskoeff.

$$NTU_{o,l} \equiv \int_{\bar{x}_{ex}}^{\bar{x}_{in}} \frac{d\bar{x}}{\bar{x}_{gl} - \bar{x}}$$

(13c)

Lösung des Integrals (12d)

1. Grafische Ermittlung für jede beliebige Gleichgew.kurve :



$\Delta \bar{y}$: "treibende" Beladungsdifferenz

Abb. 10: Zur grafischen Ermittlung des Integrals Gl.(12d) bei der Gegenstromabsorption nach der HTU-Methode

2. wenn Gleichgew.kurve linear ist (Henry Gesetz) ergibt sich folgende Lösung von Gl.(12d):

$$\boxed{NTU_{o,g} = \frac{\bar{y}_{in} - \bar{y}_{ex}}{\Delta \bar{y}_{me}}} \quad (14a)$$

worin ist:

$$\Delta \bar{y}_{me} \equiv \frac{\Delta \bar{y}_{in} - \Delta \bar{y}_{ex}}{\ln \frac{\Delta \bar{y}_{in}}{\Delta \bar{y}_{ex}}} \quad : \quad \frac{\text{mittlere logarithmische}}{\text{Beladungsdifferenz}} \quad (14b)$$

Herleitung von Gl.(14a):

für lineare Gleichgew.kurve und Bilanzgerade gilt:

$$\Delta \bar{y} = a \bar{y} \quad (15a)$$

$$\frac{d\Delta \bar{y}}{d\bar{y}} = a \quad (15b)$$

$$\int_{\bar{y}_{ex}}^{\bar{y}_{in}} d\Delta \bar{y} = a \int_{\bar{y}_{ex}}^{\bar{y}_{in}} d\bar{y}$$

$$\Delta \bar{y}_{in} - \Delta \bar{y}_{ex} = a (\bar{y}_{in} - \bar{y}_{ex}) \quad (15c)$$

Aus Gln.(15b) und (15c) wird a eliminiert:

$$\frac{d\Delta \bar{y}}{d\bar{y}} = \frac{\Delta \bar{y}_{in} - \Delta \bar{y}_{ex}}{\bar{y}_{in} - \bar{y}_{ex}} \quad (15d)$$

Gl. (15d) in Gl.(12d) ergibt durch Integration:

$$NTU_{o,g} = \frac{\bar{y}_{in} - \bar{y}_{ex}}{\frac{\Delta \bar{y}_{in} - \Delta \bar{y}_{ex}}{\ln \frac{\Delta \bar{y}_{in}}{\Delta \bar{y}_{ex}}}} \quad (15e)$$

Gl.(15e) $\hat{=}$ Gl.(14a)

4.4 Chemische Absorption

Das Absorptiv kann mit dem Lösungsmittel chemisch reagieren:

chem. Absorption:

- Erhöhung des Absorptionsvermögens des LM
- Erhöhung der Absorptionsgeschwindigkeit, da die Konz. des Absorptivs erniedrigt wird \implies Stoffdurchgangswiderstand verlagert sich in die Gasgrenzschicht: bei sehr schnellen Reaktionen, z.B. Natronlaugewaschen wird der Stofftransport ganz überwiegend durch gasseitige Grenzschicht bestimmt. \implies Absorber mit mögl. turb. Gasströmung, z.B. Füllkörpersäule, Venturi-Wäscher
- für das reagierende Absorptiv muß das chem. Gleichgewicht der Reaktion mit dem LM berücksichtigt werden, wobei im Henry'schen Gesetz Gl.(4a) bzw. in der Gleichgew.kurve Gl.(5b) allein der chem. nicht reagierende Anteil des Absorptivs auftritt.
- eine Regenerierung des LM ist bei irreversiblen Reaktionen unmöglich.