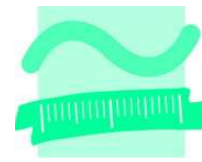


# Absorption

Labor für Thermische Verfahrenstechnik

bearbeitet von Prof. Dr.-Ing. habil. R. Geike



BEUTH HOCHSCHULE  
FÜR TECHNIK  
BERLIN

University of Applied Sciences

## 1. Grundlagen

Absorption ist die Abtrennung einer (oder mehrerer) Gaskomponenten aus einem Gasgemisch mit Hilfe einer Waschflüssigkeit. Ziel ist im Allgemeinen die Reinigung des Gasstromes von unerwünschten Komponenten (Schadstoffe aus Abluft), daneben kann aber auch die Wiedergewinnung der absorbierten Komponenten erwünscht sein (Kohlendioxid, Lösungsmitteldämpfe). An Kenntnissen sind für eine Auslegung erforderlich

- das Löslichkeits- oder Phasengleichgewicht der Gaskomponente in der Waschflüssigkeit,
- die Bilanzierung der absorbierten Komponente im Gas- und Flüssigkeitsstrom,
- die Auftragung von Bilanz- und Gleichgewichtslinien im Beladungsdiagramm,
- die Berechnung der Kolonnenhöhe für eine Füllkörperschüttung aus NTU und HTU.

Am Beispiel der Reinigung lösungsmittelhaltiger Luft soll das Verständnis für die thermische Grundoperation der Absorption vertieft werden. Zur Gaswäsche wird eine Füllkörperkolonne verwendet. Die Stoffwerte, die zur Auswertung der Messergebnisse benötigt werden, sind auf einen geeigneten Mittelwert aus den vier gemessenen Ein- und Ausgangstemperaturen zu beziehen. Die Anlage arbeitet bei Umgebungsdruck.

### Angabe der Zusammensetzung / Konzentration

Die Zusammensetzung sowohl der gasförmigen als auch der flüssigen Phase kann mit „Anteilen“ als auch mit „Beladungen“ angegeben werden. Die Anteile ( $x$ ,  $y$ ) sind dabei jeweils auf den Gesamtstrom der entsprechenden Phase bezogen, die Beladungen ( $X$ ,  $Y$ ) nur auf die Menge an „Trägerkomponente“, d.h. auf den reinen Luftstrom bzw. auf den reinen Wasserstrom. Dabei stehen  $x$  und  $X$  für die Zusammensetzung der flüssigen Phase und  $y$  und  $Y$  für die Gasphase.

$$X_A = \frac{\dot{n}_A}{\dot{n}_{\text{Wasser}}}, \quad Y_A = \frac{\dot{n}_A}{\dot{n}_{\text{Luft}}} \quad (1)$$

$$x_A = \frac{\dot{n}_A}{\dot{n}_A + \dot{n}_W}, \quad y_A = \frac{\dot{n}_A}{\dot{n}_A + \dot{n}_L} \quad (2)$$

Die Umrechnung von Beladungen in Anteile und umgekehrt ist damit nach Gl. 3 möglich.

$$y_A = \frac{Y_A}{Y_A + 1} \quad \text{bzw.} \quad Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad (3)$$

Wie groß ist der Fehler beim Gleichsetzen von Anteil und Beladung, beispielsweise bei einem Anteil von 1000 ppm? Die Verwendung von Molbeladungen bei Berechnungen zur Absorption ist praktisch, weil die beiden Bezugsgrößen Molstrom Wasser und Molstrom (reine) Luft konstante Größen über die Höhe der Kolonne sind (dies spielt insbesondere bei höheren Konzentrationen der zu absorbierenden Komponente eine Rolle).

### Phasengleichgewicht

Bei Gültigkeit des Henry'schen Gesetzes ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen  $y$  und  $x$  entsprechend Gl. 4. Dies ist für hinreichend kleine Konzentrationen gegeben. Tabelle 1 (aus [1]) enthält Werte verschiedener Stoffe. Die Temperatur ist nicht genannt, sie wird sehr wahrscheinlich im Bereich 20 – 25°C liegen. .

$$y_A = \frac{H}{p} \cdot x_A \quad (4)$$

Tabelle 1: Henrykoeffizienten	
Stoff	Henry-Koeffizient [ $10^5$ Pa]
Aceton	2,3
Ethanol	0,45
Methanol	0,38
Propanol	0,50
Essigsäure	0,066

### Angaben zur Kolonne und zu den Füllkörpern

Die Skizze der **Versuchsanlage** im Anhang zeigt schematisch Aufbau und Instrumentierung der für die Übung verwendeten Kolonne.

Gefüllt ist die Kolonne mit unterschiedlichen Füllkörpern aus Keramik, Kunststoff oder Metall und unterschiedlichen Füllhöhen. Dazu kommen möglicherweise Abstreifringe zur Minderung der Randgängigkeit. Wichtige zu erfassende Größen der Füllkörperschüttung sind:

Innendurchmesser der Kolonne  $D = 0,1$  m

Schütthöhe =

Abmessungen der Füllkörper:

Lückengrad/Porosität der Packung  $\varepsilon =$

gleichwertiger Füllkörperdurchmesser  $d_p = 6 \frac{\text{Volumen des Füllkörpers}}{\text{Oberfläche des Füllkörpers}} = \quad (5)$

trockene spezifische Packungsoberfläche pro Raumeinheit der Füllkörperschüttung

$$a = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_p} = \quad (6)$$

## 2. Versuchsdurchführung

Es werden drei Versuchsreihen durchgeführt. Bei der ersten und der letzten Versuchsreihe wird der Druckverlust in der trockenen und in der mit Wasser berieselten Kolonne gemessen. In dem zweiten (mittleren) Versuch soll das Betriebsverhalten der Kolonne beim Absorptionsprozess bei verschiedenen Belastungszuständen bestimmt werden.

Es sind die in der Skizze der Kolonne angegebenen Messgrößen zu messen und in einem Versuchsprotokoll zu registrieren (Verwendung des bereitgestellten Protokollblattes).

### 2.1 Druckverlustmessungen

Wenn ein Fluid (Gas oder Flüssigkeit) in Rohren oder Kanälen strömt, dann entsteht, verursacht durch die Reibung des strömenden Fluids, ein Reibungsdruckverlust. Änderungen des Strömungsquerschnittes (Erweiterung oder Verengung) verursachen durch Änderung des Impulses des strömenden Fluids ebenfalls Druckverluste (Beschleunigungsdruckverlust). Diese Druckverluste sind von der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids, von der Geometrie des Strömungskanals und von der Art des Fluids (Dichte und kinematische Viskosität) abhängig. Als Kennzahl bei der Erfassung des Druckverlustes dient die dimensionslose Reynolds-Zahl

$$\text{Re} = \frac{\text{Strömungsgeschwindigkeit} \times \text{charakteristische Länge}}{\text{kinematische Viskosität}}$$

Für das von unten nach oben in der Kolonne strömende Gas definieren wir die Re- Zahl nach

$$\text{Re}_G = \frac{u_G \cdot d_p}{(1-\varepsilon) \cdot \nu_G} \quad (7)$$

Hierbei bedeuten  $u_G$  die auf den Querschnitt des leeren Rohres bezogene Geschwindigkeit des Gases (Leerrohrgeschwindigkeit) und  $\nu_G$  die kinematische Viskosität des Gases.

Wenn nur Gas durch die Kolonne strömt, dann berechnet man den Druckverlust durch die unberieselte Füllkörperpackung (trockener Druckverlust) nach Gleichung 8.

$$\Delta p_{\text{trocken}} = \xi \cdot \frac{\rho_G \cdot u_G^2}{2} \cdot \frac{(1-\varepsilon) \cdot H}{\varepsilon^3 \cdot d_p} \quad (8)$$

Hierbei bedeuten  $H$  die Höhe der Packung oder der Füllkörperschüttung und  $\rho_G$  die Dichte des Gases. Aus dieser Gleichung kann der Reibungsbeiwert berechnet werden, wenn die anderen in der Gleichung angegebenen Größen aus den Messungen bzw. aus dem Datenblatt bekannt sind.

### Durchführung der Druckverlustmessungen

Es werden Messungen des trockenen Druckverlustes bei 6 Geschwindigkeiten der strömenden Luft durchgeführt (Einstellung der Lüfterleistung, Messung des Volumenstromes). Anschließend – nach Durchführung der Absorptionsuntersuchungen - werden bei einem bestimmten Flüssigkeitsdurchsatz (einer bestimmten Flüssigkeitsbelastung) in der berieselten Packung die Druckverlustmessungen wiederholt.

Notieren Sie bei allen Messungen die Schwankungsbreite der Messwerte und beziehen Sie diese in die Auswertung mit ein. Beobachten Sie die Strömungsverhältnisse in der Kolonne und beziehen Sie diese Beobachtungen ebenfalls in die spätere Auswertung mit ein.

### Auswertung der Druckverlustmessungen

Ermittlung des Volumenstromes aus den Messdaten der Messblende:

Aus der gemessenen Druckdifferenz der Normblende kann der Volumenstrom berechnet werden:

$$\dot{V} = A_{\text{Rohr}} \cdot m \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (9)$$

Dabei sind  $\alpha$  die Durchflusszahl (häufig vom Hersteller bereits angegeben) und  $m$  das Öffnungsverhältnis.

$$m = \left( \frac{d_{\text{Blende}}}{d_{\text{Rohr}}} \right)^2 \quad (10)$$

Gegebenenfalls müsste noch – bei kompressiblem Verhalten des strömenden Mediums - die Expansionszahl  $\varepsilon$  berechnet und berücksichtigt werden. Bei inkompressiblem Verhalten gilt  $\varepsilon=1$ .

$$\varepsilon = f\left(\frac{p_1}{p_2}, \kappa\right) = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot m^4 + 0,93 \cdot m^8) \cdot \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa}\right) \quad (11)$$

Der Adiabatenexponent für Luft beträgt  $\kappa=1,4$ .

Die Leerrohrgeschwindigkeit in der Kolonne ergibt sich als Quotient von Volumenstrom und Kolonnenquerschnitt.

Tragen Sie den auf die Höhe der Schüttung bezogen Druckverlust  $\Delta p/H$  über der Leerrohrgeschwindigkeit  $u_G$  für die trockene und die berieselte Packung in ein Diagramm ein. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den Diagrammen in [2, 3]. Interpretieren Sie die erhaltenen Kurven.

Den nach Gl. 8 berechneten Reibungsdruckverlustbeiwert für den trockenen Druckverlust  $\xi$  tragen Sie über der Re- Zahl nach Gl. 7 ein. Interpretieren Sie das Ergebnis.

## 2.2 Betriebsverhalten der Kolonne (Absorptionsversuche)

Vor Beginn der eigentlichen Absorptionsuntersuchungen, d.h. noch vor der Wasserzugabe, werden die Lösungsmittelkonzentrationen an drei Positionen in der Kolonne gemessen (2 x unten, 1 x oben). Anhand der Daten kann die Stabilität der Messungen beurteilt werden. Da die am Eingang der Kolonne gemessenen Rohgaskonzentrationen aus verschiedenen Ursachen eine große Schwankungsbreite aufweisen können, sollen diese Konzentrationen zusätzlich auch aus anderen Messgrößen berechnet werden (s. u.).

Die Durchführung der Messungen zur Aufnahme des Betriebsverhaltens der Kolonne erfolgt unterhalb der Flutgrenze, für einen Wassermassenstrom und zwei bzw. drei verschiedene Werte für den Luftmassenstrom. Geeignete Bereiche werden vorgegeben bzw. können aus den vorhergehenden Druckverlustmessungen ermittelt werden.

Für jeden dieser Zustände messen Sie die Lösungsmittelkonzentration (Volumenanteile in ppm) am Gaseingang und am Gasausgang der Kolonne und natürlich alle weiteren in der Protokollvorlage aufgeführten Größen.

Es wird immer Frischwasser zur Absorption des Lösungsmittels aus der Luft verwendet, daher ist die Beladung des Wassers mit Absorptiv am oberen Ende der Kolonne  $x_1 = 0$  bzw.  $X_1 = 0$ .

### Bewertung der gemessenen Gaseintrittskonzentration

Die am Kolonneneingang gemessenen Werte der Lösungsmittelkonzentration in der Luft können überprüft werden, indem ausgehend vom verdampften Lösungsmittelstrom die Beladung der Luft berechnet wird.

Dazu wird für den Luftstrom, der durch die Lösungsmittelvorlage perlt, angenommen, dass der Sättigungszustand erreicht wird. Zu der gemessenen Temperatur kann über die Dampfdruckgleichung für die verwendete Komponente (Gl. 22) der Sättigungsdampfdruck berechnet werden. Mit Hilfe des gemessenen Druckes am Ausgang der Vorlage ( $p_2$  im Schema, entspricht dem Gesamtdruck  $p$  in Gl. 12) kann die Beladung dieses Teilstromes (bzw. der Molenstrom Lösungsmittel) und daraus die Beladung des gesamten Luftstromes berechnet / abgeschätzt werden. Dabei wird von der Gültigkeit des idealen Gasgesetzes ausgegangen.

$$\dot{n}_E = \dot{n}_L \frac{p_{D,E}}{p - p_{D,E}} \quad (12)$$

Eine zweite Kontrollmöglichkeit ergibt sich aus der Bestimmung des Lösungsmittelverbrauches über die gesamte Versuchsdauer. Ermitteln Sie die verbrauchte Menge aus der Füllstandsdifferenz und beziehen Sie diese Menge auf die Zeit der Dosierung.

In beiden Fällen erhalten Sie die Beladung im Rohgas am Eingang der Kolonne durch Bezug auf den Molenstrom der vom Gebläse geförderten Luft entsprechend Gl. 1.

Bei größeren Abweichungen zwischen den so auf verschiedenen Wegen berechneten Mengenströmen oder Konzentrationen zu den gemessenen Rohgaskonzentrationen müssen Sie eine Entscheidung über die Eignung der ermittelten Werte treffen – und zwar vor Auswertung der Absorptionsversuche. Begründen Sie Ihre Entscheidung!

## Auswertung der Messungen

Die Beladungen  $Y_1$  und  $Y_2$  am Kolonneneingang bzw. am Kolonnenausgang lassen sich aus den Konzentrationsmessungen (Volumenanteile in ppm) berechnen. Da die gemessenen Anteile  $y_A$  auf den gesamten Gasstrom bezogen sind, müssen diese Anteile bei Bedarf zunächst auf Beladungen umgerechnet werden (Gl.3).

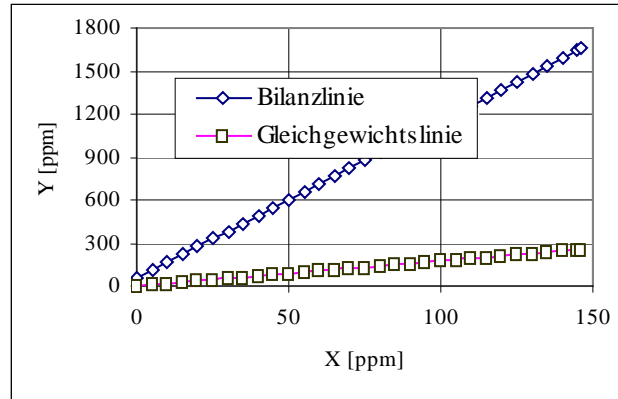


Abbildung 1: Bilanz- und Gleichgewichtslinie

Die Berechnung der Beladung des Waschmittels am Kolonnenaustritt  $X_2$  erfolgt durch die Bilanzgleichung:

$$\dot{n}_L \cdot (Y_1 - Y_2) = \dot{n}_W \cdot (X_2 - X_1) \quad (13)$$

Die Indizes „1“ und „2“ beziehen sich auf den Zustand der indizierten Größen jeweils am Kolonneneintritt bzw. -austritt.  $\dot{n}_L$  und  $\dot{n}_W$  stellen die Molenströme der Luft bzw. des Wassers dar. Diese Größen kann man aus den gemessenen Volumenströmen berechnen, bei der Luft unter Verwendung des idealen Gasgesetzes.

Im Y, X- Diagramm können nun die Bilanzlinie mit Hilfe der vier Beladungen von Luft und Wasser und die Gleichgewichtslinie unter Verwendung des ermittelten Henry-Koeffizienten gezeichnet werden. Es ergibt sich eine Darstellung analog zu Abb. 1.

Der Absorptionsprozess findet statt als stetiger Stoffaustausch über die gesamte Höhe der Füllkörperschüttung. Maßgebend für den übertragenen Stoffstrom der absorbierten Komponente ist die Triebkraft zwischen beiden Phasen. Auf Grund dessen, dass „Gleichgewicht“ nicht etwa gleiche Konzentration in beiden Phasen heißt, kann die Triebkraft nicht aus den Konzentrationen in den beiden Phasen gebildet werden. Die Beschreibung / Berechnung erfolgt entweder über die gaseitige Differenz (reale Gasphasenkonzentration – GGW-Gas-Konzentration) oder über die flüssigkeitsseitige Differenz (GGW-Sättigungskonzentration in der Flüssigkeit – reale Flüssigphasenkonzentration).

$$\dot{n}_{A,Abs.} = k_G \cdot A \cdot (Y_A - Y_A^*) \quad (14)$$

bzw.

$$\dot{n}_{A,Abs.} = k_F \cdot A \cdot (X_A^* - X_A) \quad (15)$$

Die Höhe einer Füllkörperschüttung kann z. B. berechnet werden nach

Höhe = Höhe einer Übertragungseinheit x Zahl der Übertragungseinheiten

$$H = HTU_G \cdot NTU_G = HTU_F \cdot NTU_F \quad (16)$$

Die Zahl der Übertragungseinheiten (engl. Transfer Unit) – gasseitig - lässt sich über das folgende Integral berechnen.

$$NTU_G = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} \quad (17)$$

Anschaulich erfolgt dies durch Ablesen der Differenzen ( $Y - Y^*$ ) aus dem  $Y - X$  - Diagramm (Abb. 1) und Auftragung des Kehrwertes in einem zweiten Diagramm (analog zu Abb. 2). Die Fläche unter der Kurve ist gleich dem Wert des obigen Integrals, sie kann beispielsweise ermittelt werden durch eine geeignete Trendkurve und deren Integration.

Alternativ kann aber auch Gl. 18 benutzt werden, die sich durch analytische Lösung des Integrals ergibt.

$$NTU_G = \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} = \frac{1}{1-K} \ln \left( \frac{(1-K) \cdot Y_1 + K \cdot Y_2}{Y_2} \right) \quad (18)$$

K ist dabei eine dimensionslose Zahl, die sich durch Zusammenfassung von Stoffwerten und Messgrößen ergibt.

$$K = \frac{H}{p} \cdot \frac{X_2}{Y_1 - Y_2} \quad (19)$$

Einsetzen und Umformen liefert Gl. 20:

$$NTU_G = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 - Y_2 - \frac{H}{p} X_2} \ln \left( \frac{Y_1 - \frac{H}{p} X_2}{Y_2} \right) \quad (20)$$

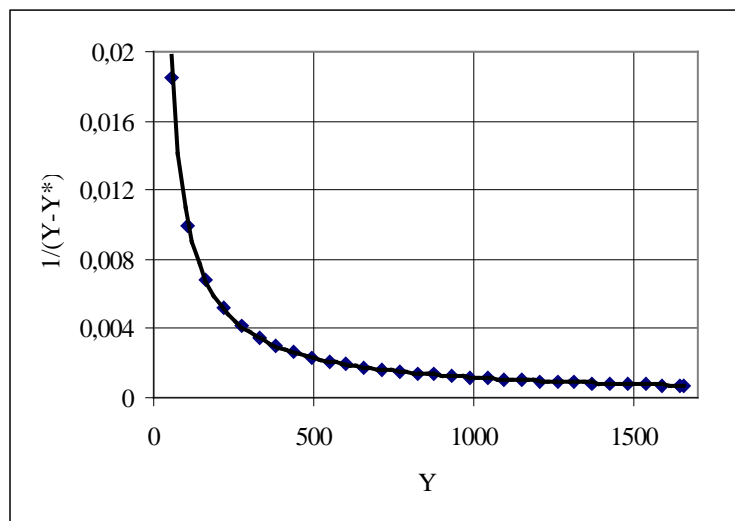


Abbildung 2: Diagramm zur Ermittlung des Integrals NTU

Da die Höhe der Füllkörperschüttung bekannt ist, kann mit Hilfe des berechneten NTU-Wertes nun der HTU-Wert berechnet werden. Dieser berechnet sich (vereinfacht für kleine Konzentrationen) nach der folgenden Beziehung (Gl. 21). Mit den bekannten Werten für die Gasleerrohrgeschwindigkeit  $u_G$  und die spezifische Oberfläche der Füllkörper  $a$  kann daraus nun der Stoffdurchgangskoeffizient (gasseitig)  $k_G$  berechnet werden.

$$HTU_G \approx \frac{u_G}{k_G \cdot a} \quad (21)$$

### 3. Stoffdaten

Der Dampfdruck des Lösungsmittels kann nach der folgenden Formel berechnet werden, die Koeffizienten können der Literatur entnommen werden, beispielsweise [4].

$$\lg\left(\frac{p}{\text{Torr}}\right) = A - \frac{B}{C + T[\text{°C}]} \quad (22)$$

Alternativ können aus Dampfdrucktabellen geeignete Werte entnommen und **logarithmisch** interpoliert werden.

Daten für die Berechnung mit Gl. 22

	A	B	C	Temp.-Bereich
Ethanol	8,65044	1892,02	249,472	-31°C ... +78°C
Wasser	8,07131	1730,63	233,426	1°C ... 100°C

Dichte Wasser:  $\rho_{W,20^{\circ}\text{C}} = 998,3 \text{ kg/m}^3$        $\rho_{W,30^{\circ}\text{C}} = 995,7 \text{ kg/m}^3$

Dichte Luft:

$$\rho_{\text{L}} = \frac{0,3482}{T} (p - 0,3785 \cdot p_{\text{D}}) \quad (23)$$

mit  $p$  in [mbar],  $T$  in [K],  $\rho$  in  $[\text{kg/m}^3]$  und  $p_{\text{D}} = \phi \cdot p_{\text{D,S}}$  mit  $p_{\text{D,S}} = f(T)$

Gaskonstante allg.:  $R = 8,314 \text{ J/mol K}$        $M_{\text{L}} = 28,97 \text{ g/mol}$

### 4. Literatur:

- [1] TÜV-Bericht Nr. 441/658007 Zusammenstellung von Techniken zur Einhaltung der im Luxemburger Ministeriellen Runderlass vom 27.5.1994 festgelegten Emissionsbegrenzungen, Institut für Umweltschutz und Energietechnik, S. A4
- [2] VDI-Wärmeatlas, 8. Auflage 1997, Springer Verlag
- [3] E. Löwe: Absorption, 1995
- [4] W. Fratzscher, H.-P. Picht: Stoffdaten und Kennwerte der Verfahrenstechnik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1993

weitere Literatur zum Thema

E.-U. Schlünder, F. Thurner: Destillation, Absorption, Extraktion, Georg Thieme Verlag

**Anlagenschema „Absorption“ / „Gebläsekennlinie“**

- EI 1 Motorleistung
- FIC 1 Volumenstromregelung des Teilluftstromes
- FI 2 Messung der Strömungsgeschwindigkeit (Anemometer)
- FI 3 Messung der Strömungsgeschwindigkeit (Staurohr)
- FI 4 Messung des Wasservolumens mit einer Wasseruhr
- FI 5 Rotameter zur Einstellung des Versuchspunktes (Wasser)
- GI 1 Drosselklappe mit Stellungsanzeige
- PDI 1 Druckdifferenz über die Füllkörperschüttung
- PI 2 Druck im Ausgang der Lösemittelvorlage (U-Rohr-Manometer)
- PDI 4 Messblende
- PDI 5 Druckerhöhung Gebläse
- PDI 6 Prandtl-Staurohr
- QI 0 Konzentration des Lösungsmittels im Rohgas (ppm Volumen)
- QI 1 Konzentration des Lösungsmittels im Rohgas (ppm Volumen)
- QI 2 Konzentration des Lösungsmittels im Reingas (ppm Volumen)
- S 1 Gebläsedrehzahl
- TI 1 Raumtemperatur
- TI 2 Temperatur des Rohgases
- TI 3 Temperatur des Reingases
- TI 4 Temperatur des Abwassers
- TI 5 Temperatur des Frischwassers
- TI 6 Temperatur der Lösemittelvorlage
- TI 7 Temperatur im Ansaugrohrrohr

