

Ausbeute

1 Ausbeute	2
2 Bilanzgleichung	2
3 Rückhalt	3
4 Zeichen und Einheiten	5

1 Ausbeute

Membrantrennverfahren teilen einen Feedstrom in zwei Ströme mit unterschiedlichen Zusammensetzungen auf. Auf der Permeatseite wird der durch die Membran transportierte Anteil gesammelt. Auf der Retentatseite verbleibt der zurückgehaltene Anteil. Die Ausbeute beschreibt, welcher Anteil einer betrachteten Substanz im gewünschten Produktstrom wiedergefunden wird. Sie ist damit eine zentrale Kenngrösse für die Bewertung der Stoffrückgewinnung. Die Ausbeute wird stets auf eine definierte Bezugsmenge im Feed zum Startzeitpunkt bezogen. Je nach Prozessziel kann das Produkt im Retentat oder im Permeat liegen. Bei Konzentrationsprozessen ist das Ziel häufig ein angereichertes Retentat. Bei Reinigungs- oder Klarifikationsschritten kann das Ziel hingegen ein bestimmtes Permeat sein. In der verfahrenstechnischen Auslegung ist die klare Definition des Produktstroms entscheidend.

Die Retentatausbeute wird als Verhältnis der im Retentat enthaltenen Stoffmenge zur ursprünglichen Stoffmenge im Feed definiert. Die Permeatausbeute wird entsprechend für den Permeatstrom definiert. Für Massen- oder Stoffmengenbilanzen werden die Grössen konsistent über Volumen, Konzentration und Dichte geführt. In vielen technischen Anwendungen wird vereinfachend von gleichen Dichten in allen Strömen ausgegangen. Diese Annahme ist für verdünnte wässrige Systeme oft ausreichend genau. Bei höheren Feststoffgehalten oder bei Lösemittelsystemen ist die Annahme zu prüfen. Die Ausbeute ist von Rückhalt, Volumenströmen und Betriebsstrategie abhängig. Sie ist daher keine reine Stoffeigenschaft, sondern eine prozessabhängige Grösse. Für Ingenieure ist die Ausbeute gleichzeitig eine Qualitäts- und eine Wirtschaftlichkeitskennzahl. Eine hohe Ausbeute reduziert Produktverluste und Entsorgungskosten.

2 Bilanzgleichung

Unter der Annahme gleicher Dichten gilt für die Gesamtbilanz der Volumina:

$$V_0 = V_R + V_P \quad (1)$$

Dabei ist V_0 das Ausgangsvolumen des Einsatzmaterials. V_R bezeichnet das Volumen des Retentats am Ende der Operation. V_P ist das kumulierte Volumen des Permeats am Ende der Operation. Die Gesamtbilanz ist die Grundlage für alle weiteren Stoffbilanzen. Für eine gelöste Komponente ergibt sich die Stoffbilanz:

$$V_0 c_0 = V_R c_R + V_P c_p \quad (2)$$

c_0 ist die Anfangskonzentration der gelösten Substanz im Feed. c_R ist die Endkonzentration der gelösten Substanz im Retentat. c_p ist die gemittelte Konzentration der gelösten Substanz im Gesamtpermeat. Diese Formulierung entspricht einer Integralbilanz über die gesamte Filtrationszeit. Sie setzt voraus, dass alle Teilströme korrekt erfasst und gemischt bilanziert werden. Messfehler in Volumen oder Konzentration wirken sich direkt auf die berechnete Ausbeute aus. Für validierte Prozesse werden deshalb Messmittel und Probenahmepläne spezifiziert. In der Schweiz ist dies insbesondere im GMP-Umfeld üblich. Die Bilanzgleichungen erlauben auch Plausibilitätsprüfungen während der Inbetriebnahme. Abweichungen deuten häufig auf Leckagen, Hold-up-Volumina oder Probenahmefehler hin.

Für Konzentrationsfiltrationen wird häufig das Volumenkonzentrationsverhältnis verwendet. Es ist definiert als:

$$\text{VCR} = \frac{V_0}{V_R} \quad (3)$$

Ein steigendes VCR entspricht einer stärkeren Einengung des Retentats. Das VCR ist eine rein volumetrische Kenngrösse und unabhängig von der betrachteten Komponente. Die Retentatausbeute

einer Komponente kann über Stoffmenge formuliert werden:

$$Y_R = \frac{c_R V_R}{c_0 V_0}. \quad (4)$$

Analog lässt sich eine Permeatausbeute definieren, wenn das Produkt im Permeat liegt:

$$Y_P = \frac{c_P V_P}{c_0 V_0}. \quad (5)$$

In der Praxis wird je nach Analytik auch mit Massenströmen oder Stoffmengen gerechnet. Wichtig ist, dass die Bezugsbasis eindeutig dokumentiert wird. Bei Batch-Prozessen ist die Bezugsbasis typischerweise der Feed zu Prozessbeginn. Bei kontinuierlichen Prozessen werden häufig zeitbezogene Mittelwerte verwendet. Für die Auslegung von Membrananlagen müssen beide Betrachtungen beherrscht werden.

3 Rückhalt

Die Konzentration einer Komponente im Retentat hängt vom VCR und vom Rückhalt ab. Der Rückhalt R beschreibt, welcher Anteil einer Komponente durch die Membran zurückgehalten wird. $R = 0$ bedeutet, dass die Komponente nicht zurückgehalten wird. $R = 1$ bedeutet, dass die Komponente vollständig zurückgehalten wird. Für viele Systeme liegt R zwischen 0 und 1 und ist vom Betriebszustand abhängig. Der Rückhalt kann von Konzentration, Temperatur und transmembranem Druck beeinflusst werden. Auch Konzentrationspolarisation und Fouling verändern den effektiven Rückhalt. Für eine idealisierte Betrachtung kann der Zusammenhang wie folgt geschrieben werden:

$$c_R = c_0 \cdot \text{VCR}^R. \quad (6)$$

Diese Beziehung erlaubt eine schnelle Abschätzung der erreichbaren Anreicherung. Durch Einsetzen in die Definition der Retentatausbeute ergibt sich:

$$Y_R = \text{VCR}^{R-1}. \quad (7)$$

Für vollständig zurückgehaltene Substanzen mit $R = 1$ folgt $Y_R = 1$. In diesem Grenzfall geht keine Stoffmenge der Komponente ins Permeat verloren. Gleichzeitig steigt die Retentatkonzentration proportional zum Volumenkonzentrationsverhältnis. Für den Grenzfall $R = 1$ kann dies als $c_R = c_0 \cdot \text{VCR}$ ausgedrückt werden. Für nicht zurückgehaltene Substanzen mit $R = 0$ bleibt $c_R = c_0$. In diesem Grenzfall wird die Komponente nicht angereichert. Ist das Produkt im Permeat und gilt näherungsweise $R = 0$, wird häufig eine vereinfachte Ausbeute verwendet. Dann entspricht die Produktausbeute dem Verhältnis der im Permeat gewonnenen Produktmenge zur eingesetzten Produktmenge. Bei konstantem Produktgehalt im Permeat kann dies als $Y = P/F$ formuliert werden. In der Praxis muss dabei geprüft werden, ob das Permeat tatsächlich die Feedkonzentration repräsentiert. Bei realen Anlagen spielen Hold-up-Volumina, Mischverhalten und Start-/Endverluste eine Rolle. Für die Auslegung werden daher Sicherheitsmargen und Messkampagnen eingeplant. Ingenieure nutzen die Ausbeute, um Zielwerte für VCR, Membranfläche und Betriebszeit abzuleiten. Für Anlagenbauer ist sie zudem eine Abnahmekennzahl im Rahmen von FAT und SAT. In der Schweiz werden entsprechende Kriterien oft in Pflichtenheften und Qualifizierungsdokumenten festgelegt. Eine saubere Definition der Ausbeute ist somit Voraussetzung für reproduzierbare Performance-Aussagen. Damit wird die Ausbeute zu einer zentralen Schnittstelle zwischen Verfahrenstechnik, Design und Betrieb.

4 Zeichen und Einheiten

Zeichen	Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
V_0	Startvolumen	Startvolumen der Flüssigkeit vor der Trennung (Feed)	m^3, L
V_R	Retentatvolumen	Volumen der Flüssigkeit, die am Ende übrig bleibt (Retentat)	m^3, L
V_P	Permeatvolumen	Gesamtvolumen der Flüssigkeit, die durch die Membran geht (Permeat)	m^3, L
c_0	Anfangskonzentration	Anfangskonzentration der betrachteten Substanz im Feed	$\text{kg m}^{-3}, \text{mol L}^{-1}$
c_R	Retentatkonzentration	Konzentration der Substanz im Retentat am Ende der Trennung	$\text{kg m}^{-3}, \text{mol L}^{-1}$
c_P	Permeatkonzentration	Durchschnittliche Konzentration der Substanz im Permeat	$\text{kg m}^{-3}, \text{mol L}^{-1}$
VCR	Volumenkonzentrationsverhältnis	Volumenkonzentrationsverhältnis V_0/V_R	–
R	Rückhaltegrad	Anteil der Substanz, der von der Membran zurückgehalten wird	–
Y_R	Retentatausbeute	Anteil der Substanz, der im Retentat bleibt	–
Y_P	Permeatausbeute	Anteil der Substanz, der ins Permeat gelangt	–
P	Stoffmenge im Permeat	Menge der Substanz im Permeat	kg, mol
F	Stoffmenge im Feed	Insgesamt eingesetzte Menge der Substanz im Feed	kg, mol

Tabelle 1. Verwendete Zeichen und einfache Erklärungen zur Beschreibung der Ausbeute in Membrantrennverfahren