

Druckgetriebene Membranprozesse - Berechnungsformeln

Wichtige Werkzeuge für die Entwicklung von Membranverfahren sind neben der geeigneten Membran, die nach Grösse und anderen Kriterien passende Versuchsanlage und die Nutzung einfacher Berechnungsformeln, um die Resultate auf andere Prozesssituationen zu übertragen.

Der momentane Rückhalt:

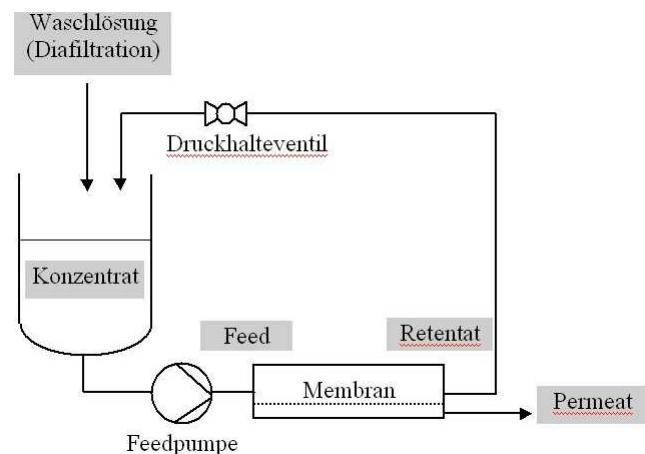
Für alle Rechnungen wird ein konzentrationsunabhängiger Rückhalt angenommen:

$$R = 1 - \frac{c_P}{c_F}$$

mit R = momentaner oder Spot- Rückhalt, c_P = momentane Permeatkonzentration,
 c_F = Feedkonzentration

Batchprozess:

Beim Batchprozess wird der Vorlagebehälter (Feedbehälter) mit einem Anfangsvolumen gefüllt, danach aufkonzentriert und/oder diafiltriert (ausgewaschen). Am Ende des Prozesses wird das Produkt (entweder mit dem gesammelten Permeat oder dem Feedbehälter) entnommen.



Aufkonzentrierung:

$$X = \frac{V_0}{V_K}$$

mit X = Aufkonzentrierfaktor, V_0 = Anfangsvolumen, V_K = Konzentratvolumen

$$c_K = c_0 \cdot X^R$$

mit c_K = Endkonzentration des Konzentrats

$$\bar{c}_P = c_0 \cdot \frac{X}{X-1} (1 - X^{R-1})$$

mit \bar{c}_P = Konzentration des Gesamtpermeats

$$\eta_K = X^{R-1}$$

mit η_K = Ausbeute im Konzentrat

Erläuterungen dazu an einem Beispiel: Wenn man einen Batch mit $c_0=10\text{g/l}$ Produkt um den Faktor $X=5$ aufkonzentriert, also z.B. von 500ml auf 100ml und der momentane Rückhalt für das Produkt 95% beträgt, dann wird die Endkonzentration im Konzentrat $c_K=46.1\text{ g/l}$, die Permeatkonzentration des gesammelten Permeats $\bar{c}_P = 0.966\text{ g/l}$ (Produktverlust) und die Ausbeute an Produkt im Konzentrat $\eta_K = 92.3\%$ betragen. Wichtig hier also die Unterscheidung zwischen Ausbeute und Rückhalt.

Diafiltration (bei konstantem Niveau):

$$D = \frac{V_{LM}}{V_K} \text{ mit } D = \text{Diafiltrationsfaktor, } V_{LM} = \text{Diafiltrationsvolumen, } V_K = \text{Konzentratvolumen}$$

$$\frac{c_K}{c_0} = e^{(D \cdot (R-1))}$$

Erklärung der Symbole Anhand eines Beispiels: Eine Konzentratmenge von $V_K = 500\text{ml}$ werde mit einer Waschwassermenge $V_{LM} = 1000\text{ml}$ ausgewaschen, der Diafiltrationsfaktor D ist somit 2. Der Rückhalt R der auszuwaschenden Komponente z.B. eines Salzes aus einer Lösung eines grösseren Moleküls sei 0. Dann ergibt sich aus obiger Formel eine Erniedrigung der Konzentration dieses Salzes auf $c_K/c_0 = 13.5\%$ des Anfangswertes.

Die gleiche Rechnung für das Produkt das mit $R=95\%$ zurückgehalten werde, ergibt für die Endkonzentration des Produktes $c_K/c_0 = 90.5\%$ der Anfangskonzentration.

Die mittlere Permeatkonzentration für eine gelöste Komponente bei der Diafiltration errechnet sich analog:

$$\bar{c}_P = \frac{c_0}{D} \cdot (1 - e^{(D(R-1))})$$

Un die Ausbeuten:

$$\eta_K = e^{(D \cdot (R-1))} \text{ mit } \eta_K = \text{Ausbeute im Konzentrat}$$

$$\eta_P = 1 - e^{(D \cdot (R-1))} \text{ mit } \eta_P = \text{Ausbeute im Permeat}$$

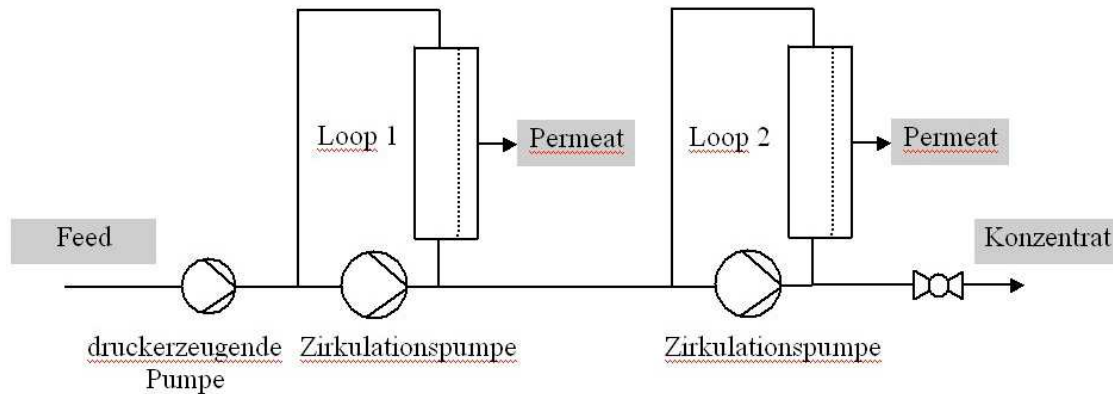
Erläuterungen auch dazu am Beispiel: unsere obige Auswaschung von Salz aus einem Produkt ergibt eine Ausbeute des Produkts von 90.5 %.

Die Ausbeute des ausgewaschenen Salzes im Permeat ist 86.5%. Ausbeute kann für diesen Fall einerseits heissen, Effizienz der Waschung (wenn eine unerwünschte Nebenkomponente aus einem Produkt ausgewaschen wird) oder Ausbeute eines niedermolekularen Produktes im Permeat.

Man kann nun natürlich für kombinierte Prozesse aus Aufkonzentrierung und Diafiltration die Formeln kombinieren.

Konzentrierung im Kontiprozess:

Im Folgenden ist das Prinzip einer Kontianlage mit 2 Loops gezeigt. Prinzipiell kann die Anlage mehr Loops oder nur einen haben



Folgende Formeln ergeben sich aus Stoffbilanzen für den Kontiprozess mit einem einzigen Loop.

$$\frac{c_K}{c_F} = \frac{X}{(1-R) \cdot (X-1) + 1} \quad \eta_K = \frac{1}{(1-R) \cdot (X-1) + 1}$$

Und wieder im Beispiel: unsere Membran habe wieder einen Produktrückhalt (Spotrückhalt) von 95%, die Anlage konzentriere um den volumetrischen Faktor 5 auf, d.h. ein Feedvolumenstrom wird in 1/5 Konzentratvolumenstrom und 4/5 Permeatvolumenstrom aufgeteilt. Die Konzentratkonzentration beträgt dann das 4.16-fache der Feedkonzentration und die Ausbeute 83.3 %.

Kontiprozesse in grösseren Anlagen haben zwecks Optimierung der Verhältnisse mehrere Loops (Stufen) in Serie und können damit im besten Fall wieder annähernd die Leistung eines Batchprozesses erreichen. Die Ausbeute eines n-stufigen Kontiprozesses mit X als dem gesamten Aufkonzentrierfaktor (gleichmässig verteilt auf alle Stufen) ergibt sich zu:

$$\eta_K = \left(\frac{1}{(1-R) \cdot \left(X^{\frac{1}{n}} - 1 \right) + 1} \right)^n$$

Mit einem 4-stufigen Kontiprozess ergäbe sich also für eine 5-fache Aufkonzentrierung und Produktrückhalt 95% eine Gesamtausbeute von 90.6%. Zum Vergleich: unsere Batchkonzentrierung mit den gleichen Daten lieferte eine Ausbeute von 92.5%.