

---

Messinger Engineering  
David-Hess-Weg 34  
CH-8038 Zürich

✉ info@membranfiltration.ch

📞 +41 79 390 60 48

---



Membrantechnik - Konzepte und Anwendungen

# Grenzschicht

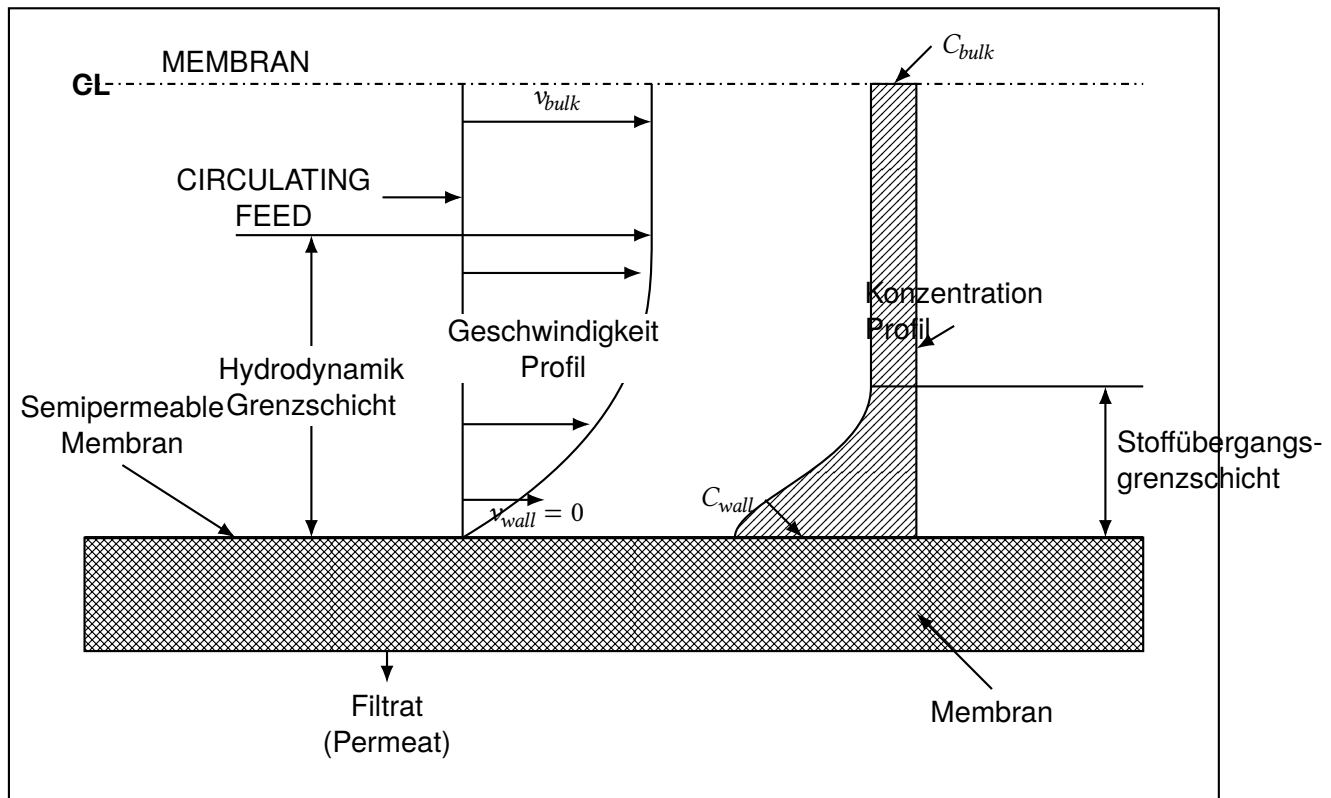
|  |          |
|--|----------|
| <b>1 Grenzschicht</b>                                  | <b>2</b> |
| <b>2 Entstehung und Eigenschaften der Grenzschicht</b> | <b>2</b> |
| <b>3 Grenzschicht und Fouling</b>                      | <b>3</b> |
| <b>4 Einfluss auf Trennleistung und Prozessführung</b> | <b>4</b> |
| <b>5 Reinigung und Entfernung der Grenzschicht</b>     | <b>4</b> |

## 1 Grenzschicht

Die Grenzschicht (engl. *boundary layer*) ist ein zentrales Phänomen in der Membranfiltration. Sie bildet sich während des Filtrationsprozesses direkt auf der Membranoberfläche. Die Entstehung erfolgt durch die Anlagerung von suspendierten Feststoffen oder gelösten Molekülen. Diese Bestandteile werden durch den Fluidstrom zur Membran transportiert. Dort verbleiben sie, wenn sie die Porenstruktur nicht passieren können. Die Grenzschicht ist somit das Resultat von Transport-, Abscheide- und Wechselwirkungsprozessen. Sie tritt bei nahezu allen druckgetriebenen Membranverfahren auf. Besonders ausgeprägt ist sie bei der Mikrofiltration und Ultrafiltration. Die Eigenschaften der Grenzschicht beeinflussen massgeblich das Filtrationsverhalten. Daher ist sie von grosser technischer Bedeutung.

## 2 Entstehung und Eigenschaften der Grenzschicht

Die Ausprägung der Grenzschicht hängt stark von der Zusammensetzung der Lösung ab. Wichtige Einflussgrössen sind Partikelgrösse und Molekülstruktur. Auch die Konzentration der gelösten oder suspendierten Stoffe spielt eine wesentliche Rolle. Mit zunehmender Konzentration nimmt die Grenzschichtdicke in der Regel zu. Die Fliessgeschwindigkeit bestimmt den Abtransport angelagerter Teilchen. Ein niedriger Schergradient begünstigt den Aufbau der Grenzschicht. Der transmembrane Druck beeinflusst die Anlagerungsrate zusätzlich. Je höher der Druck, desto schneller wachsen Schicht und Verdichtung. Typischerweise beträgt die Dicke der Grenzschicht nur wenige Mikrometer. Trotz ihrer geringen Dicke besitzt sie eine relevante hydraulische Wirkung.



**Abbildung 1.** Schematische Darstellung der hydrodynamischen Grenzschicht und der Stoffübergangsgrenzschicht an einer semipermeablen Membran während der Filtration. Die Anströmung führt zur Ausbildung eines Geschwindigkeitsprofils mit  $v_{wall} = 0$  an der Membranoberfläche und  $v_{bulk}$  im Zentrum. Gleichzeitig entsteht eine Konzentrationsgrenzschicht, in der die Stoffkonzentration von  $C_{bulk}$  im Bulk bis zur erhöhten Konzentration  $C_{wall}$  an der Membranoberfläche ansteigt. Die resultierende Grenzschicht wirkt als zusätzlicher hydraulischer Widerstand und beeinflusst Selektivität und Permeatfluss.

### 3 Grenzschicht und Fouling

Die Begriffe Grenzschicht und Fouling sind in der Membrantechnik eng miteinander verknüpft, beschreiben jedoch unterschiedliche Aspekte desselben Phänomens. Unter Fouling wird allgemein die unerwünschte Ablagerung von Stoffen auf oder in einer Membran verstanden, die zu einer Verringerung der Permeabilität führt. Die Grenzschicht stellt dabei eine spezifische Form des Fouling dar, bei der sich abgetrennte Partikel oder Makromoleküle als zusammenhängende Schicht auf der Membranoberfläche ablagern. Während Fouling sowohl reversible als auch irreversible Effekte umfasst, ist die Grenzschicht in vielen Fällen überwiegend reversibel. Sie entsteht durch den konvektiven Stofftransport zur Membran und das Zurückhalten von Teilchen, die die Poren nicht passieren können. Mit zunehmender Filtrationsdauer verdichtet sich die Grenzschicht und erhöht den hydraulischen Widerstand. Dadurch sinkt der Permeatfluss, selbst wenn der transmembrane Druck konstant bleibt. Im Unterschied zur Porenblockierung bleibt die eigentliche Membranstruktur bei einer Grenzschicht meist unverändert. In der Literatur wird die Grenzschicht daher häufig als oberflächennahes Fouling oder Cake-Fouling bezeichnet. Abhängig von den Prozessbedingungen kann die Grenzschicht jedoch auch gezielt genutzt werden. In der Mikro-

und Ultrafiltration führt sie oft zu einer erhöhten Trennschärfe und wird als dynamische Membran interpretiert. Fouling im engeren Sinn wird hingegen dann problematisch, wenn irreversible Ablagerungen oder Adsorptionen auftreten. Diese lassen sich durch hydraulische Massnahmen nicht mehr vollständig entfernen. Die klare Unterscheidung zwischen Grenzschichtbildung und irreversibler Foulingmechanismen ist daher entscheidend für das Prozessdesign. Ein kontrollierter Umgang mit der Grenzschicht erlaubt eine optimierte Prozessführung bei gleichzeitiger Minimierung von Foulingeffekten.

## 4 Einfluss auf Trennleistung und Prozessführung

Die Grenzschicht wirkt als zusätzliche Barriere zur eigentlichen Membran. Dadurch verändert sich der effektive Rückhalt der Gesamtstruktur. In vielen Fällen führt dies zu einer erhöhten Selektivität. Dieses Phänomen wird als dynamische Membran bezeichnet. Insbesondere bei der Ultrafiltration kann der scheinbare Trenngrad steigen. Gleichzeitig nimmt der Permeatfluss meist ab. Der zunehmende Strömungswiderstand reduziert den Flux. Dieser Effekt wird häufig als Konzentrationspolarisierung oder Fouling wahrgenommen. Eine kontrollierte Grenzschicht kann jedoch prozesstechnisch vorteilhaft sein. Sie ermöglicht eine feinere Trennung ohne Austausch der Membran.

## 5 Reinigung und Entfernung der Grenzschicht

Rückspülung (Backflushing) ist eine häufig verwendete Massnahme zur Reduktion der Grenzschicht. Auch Erhöhung der Scherkräfte kann wirksam sein.

Letztendlich wird die Grenzschicht erst bei der Reinigung (CIP) vollständig entfernt. Dies löst die organischen / anorganischen Ablagerungen gezielt ab. Die Wahl der Reinigungsstrategie hängt von der Zusammensetzung der Grenzschicht ab.

## Literatur

- [1] R. Ouyang, Y. Zhang, X. Li, *Cake Layer Fouling Potential Characterization for Reverse Osmosis via Gradient Filtration*, Membranes, Vol. 12, Nr. 8, Artikel 810, 2022.  
<https://www.mdpi.com/2077-0375/12/8/810>
- [2] A. Charfi, J. Harmand, P. Schmitz, *Deposit Membrane Fouling: Influence of Specific Cake Layer Resistance and Tangential Shear Stresses*, Water Science & Technology, Vol. 69, Nr. 3, S. 498–505, 2014.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2013.645>
- [3] M. Cheryan, *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*, 2. Auflage, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1998.
- [4] K. Strathmann, *Introduction to Membrane Science and Technology*, Wiley-VCH, Weinheim, Deutschland, 2011.

- [5] A. L. Zydney, *Protein Fouling during Ultrafiltration*, Journal of Membrane Science, Vol. 96, S. 1–16, 1994.
- [6] A. L. Zydney, *Membrane fouling due to protein adsorption*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 113, S. 1–10, 1996.
- [7] A. L. Zydney, *Ultrafiltration of Proteins*, in: A. S. Michaels (Hrsg.), *Membrane Science and Technology*, Elsevier, 1998.
- [8] A. L. Zydney, *Fouling in bioprocessing applications*, Separation Science and Technology, Vol. 35, Nr. 6–7, S. 929–942, 2000.