

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

✉ info@membranfiltration.ch

☎ +41 79 390 60 48



Membrantechnik - Konzepte und Anwendungen



# Massstabsvergrößerung

<b>1 Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2 Einflussfaktoren</b>	<b>3</b>
2.1 Betriebszustände . . . . .	3
2.2 Strategien zur Massstabsvergrößerung . . . . .	3
<b>3 Methodische Ansätze</b>	<b>4</b>
3.1 Reinigung . . . . .	5
3.2 Energie . . . . .	5

# 1 Einleitung

Bei der Entwicklung von Membranprozessen geht man in der Regel den Entwicklungsweg: Labor → Pilotanlage → industrielle Anlage.



**Abbildung 1.** Typischer Entwicklungsweg von Membranprozessen

Mit jeder Entwicklungsstufe nehmen die installierte Membranfläche, Durchsatz sowie die Anforderungen an die Produktionsdauer zu. Damit verändern sich aber nicht nur die Randbedingungen des Prozesses.

Die Skalierung von Labor- oder Pilotanlagen auf grössere Anlagen ist keineswegs ein einfacher linearer Prozess. Eine Reihe von Faktoren, die für unerfahrene Techniker möglicherweise nicht sofort ersichtlich sind, unterscheiden sich in grösserem Maßstab erheblich und viele davon können einen enormen Einfluss auf die Prozessleistung haben.

Es mag den Anschein haben, als würde durch die Beibehaltung der dynamischen Ähnlichkeit während der Skalierung (Beibehaltung der gleichen Mischgeschwindigkeiten, Temperaturen, Konzentrationen usw.) eine gleichwertige Leistung erzielt, aber das ist bei weitem nicht der Fall.

Häufig wird übersehen, dass Verfahrensschritte wie das Einfüllen von Rohstoffen oder ein Erhitzungs- beziehungsweise Kühlschritt, die im Labormassstab in wenigen Minuten durchgeführt sind, im Grossmassstab mehrere Stunden in Anspruch nehmen.

Die Übertragung der in einem bestimmten Massstab gewonnenen verfahrenstechnischen Erkenntnisse auf den nächst grösseren Massstab kann nicht durch eine einfache, proportionale Umrechnung der Prozessparameter erfolgen.

Mit zunehmendem Massstab verändern sich schwer erfassbare Einflussgrössen, welche die massgebenden physikalischen und hydrodynamischen Effekte bestimmen.

Zu den schwer erfassbaren **Einflussgrössen**, die sich mit zunehmendem Massstab ändern, zählen insbesondere lokal wirkende und zeitabhängige Effekte, welche die physikalischen und hydrodynamischen Prozesse massgeblich bestimmen. Dazu gehören unter anderem:

- › **Lokale Schubspannungen** an der Membranoberfläche, die entlang der Modulachse variieren und nicht direkt aus globalen Betriebsparametern abgeleitet werden können,
- › **Inhomogene Strömungs- und Flussverteilungen** innerhalb von Modulen, insbesondere bei paralleler Verschaltung mehrerer Membranelemente,
- › Die Ausbildung und Dynamik von → **Grenzschichten**, deren Dicke und Zusammensetzung lokal vom Stofftransport abhängen,
- › Lokale **Stofftransportkoeffizienten**,
- › **Fouling** (zeitabhängig)
- › Transiente Effekte während **Anfahren** oder Lastwechseln, die im stationären Betrieb

nicht beobachtet werden,

- › Wechselwirkungen zwischen **Modulgeometrie**, Packungsdichte und Druckverlust, die mit zunehmender Anlagengröße an Bedeutung gewinnen.

## 2 Einflussfaktoren

In Pilotanlagen werden häufig kurze Module oder kleine Membranfläche eingesetzt. **Eintrittseffekte** dominieren einen grossen Teil der Strömung in einem Membranmodul. In industriellen Anlagen sind die Module deutlich länger. Dadurch gewinnt die axiale Entwicklung der Konzentrationspolarisation an Bedeutung.

In Pilotanlagen werden diese Gradienten häufig unterschätzt. Kurzmodule suggerieren eine stabilere und homogenere Betriebsweise. Bei der Übertragung auf lange Industriemodule treten diese Effekte jedoch kumulativ auf.

Mit zunehmender Modullänge steigt die lokale **Retentatkonzentration** entlang der Strömungsrichtung kontinuierlich an. Dadurch verstärkt sich die **Konzentrationspolarisation** an der Membranoberfläche. Aufgrund der Reibung nimmt der **Druckverlust** in axialer Richtung zu. Gleichzeitig steigt bei NF- und RO-Prozessen der lokale **osmotische Druck** infolge der zunehmenden Konzentration an. Beide Effekte führen dazu, dass der effektive treibende Druck entlang des Moduls abnimmt. Der lokale Permeatfluss ist daher nicht konstant, sondern variiert entlang der Modullänge.

Die Modullänge beeinflusst die effektive **Reynolds-Zahl** und **Sherwood-Zahl** entlang des Kanals. Mit zunehmender Länge ändern sich Strömungsgeschwindigkeit, Viskosität und Stoffeigenschaften. Die lokalen Stoffübergangsbedingungen verschlechtern sich stromabwärts. Dies reduziert die Wirksamkeit der hydrodynamischen Durchmischung. Eine gleichbleibende Skalierung über dimensionslose Kennzahlen ist daher nur eingeschränkt möglich.

### 2.1 Betriebszustände

Ein weiterer Aspekt beim Upscaling sind **transiente Betriebszustände**. Anfahr- und Abfahrprozesse spielen in industriellen Anlagen eine wesentlich grössere Rolle als in Pilotanlagen. Während Pilotanlagen häufig unter stationären Bedingungen betrieben werden, sind Industrieanlagen regelmässigen Start- und Stillstandszyklen ausgesetzt. Während des Anfahrens treten kurzfristig erhöhte lokale Flüsse auf. Diese können oberhalb des kritischen Flux liegen.

Während der **Anfahrphase** ist die Membranoberfläche zunächst frei von Deckschichten. Dies führt zu sehr hohen Anfangspermeabilitäten. In langen Modulen resultiert daraus eine extreme Belastung des ersten Modulabschnitts. Die Konzentrationspolarisation baut sich dort besonders schnell auf. Dies begünstigt irreversible Foulingmechanismen.

Die gewählte **Anfahrstrategie** hat daher einen erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer der Membranen. Ein zu schnelles Hochfahren des transmembranen Drucks kann zu frühzeitiger Schädigung führen. Sanfte Anfahrstrategien mit kontrolliertem Druck- oder Flussanstieg sind daher essenziell. Insbesondere bei NF- und RO-Prozessen ist eine abgestufte Druckrampe notwendig. Auch bei MF und UF beeinflusst das Anfahrverhalten die initiale Deckschichtbildung.

Zusätzlich unterscheidet sich das **Reinigungsregime** zwischen Pilot- und Industrieanlagen. In Pilotanlagen erfolgen Reinigungen häufig manuell und sehr häufig. Industrielle Anlagen unterliegen hingegen wirtschaftlichen Restriktionen. Reinigungsintervalle sind länger, und Stillstandszeiten teurer. Daher wirken sich kleine Fehlannahmen im Upscaling langfristig stark aus.

Der **Serien- und Parallelbetrieb** von Membranmodulen in industriellen Anlagen führt zu komplexen Druck- und Strömungsverteilungen, die in Pilotanlagen kaum realistisch nachgebildet werden können.

## 2.2 Strategien zur Massstabsvergrößerung

Upscaling ist kein rein geometrisches Vergrößerungsproblem. Vielmehr beruht es einerseits auf empirischen Korrelationen und Heuristiken und andererseits auf der systematischen Analyse der massgebenden Einflussgrößen. Aus Sicht des **Engineerings** erfordert dies ein grundlegendes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen, hydrodynamischen und stofftransportbedingten Mechanismen. **Pilotversuche** sind daher so zu planen, dass sie die für den industriellen Betrieb relevanten Betriebszustände sowie kritische Grenzfälle abbilden.

Beim Entwurf von **Pilotanlagen** sollte das Engineering idealerweise bereits konsequent auf die Zielsetzungen des Upscalings ausgerichtet sein. Insbesondere sind der Einfluss der Modullänge, die Flussverteilung entlang der Membran sowie transiente Effekte, etwa während An- und Abfahrvorgängen, frühzeitig in der Planung zu berücksichtigen.

Die Pilotanlage dient nicht nur der Erzeugung von Versuchsdaten im Kleinmassstab, sondern soll auch Aussagen über die zugrunde liegenden Entstehungsmechanismen ermöglichen.

Eine zuverlässige Massstabsvergrößerung erfordert die Kombination experimenteller Untersuchungen mit geeigneten Modellierungsansätzen. Versuchsdaten sind mit hydrodynamischen und stofftransportbasierten Modellen zu verknüpfen, um darauf aufbauend belastbare Skalierungskriterien abzuleiten.

Ziel der Massstabsvergrößerung ist es, die wesentlichen **Prozesseigenschaften** eines Membranfiltrationsverfahrens beim Übergang vom Labor- oder Pilotmassstab auf den industriellen Massstab zu erhalten und gleichzeitig einen sicheren, stabilen und wirtschaftlichen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

Siehe auch: → [Zustandsgrößen](#).

Upscaling erfordert somit eine verfahrenstechnische **Methodensammlung**, die theoretisches Wissen mit praktischer Erfahrung verbindet. Eine erfolgreiche Massstabsvergrößerung basiert daher auf der Kombination mehrerer komplementärer Ansätze.

## 3 Methodische Ansätze

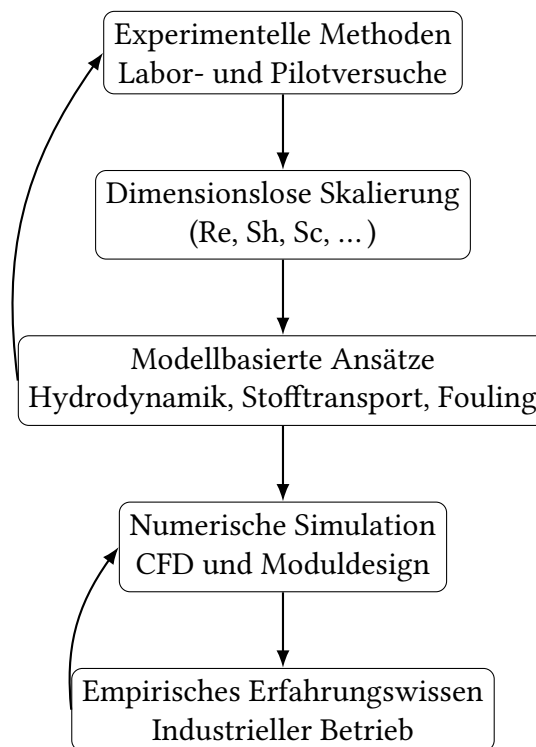
Am besten werden verschiedene Ansätze verwendet:

- › **Experimentelle Ansätze**, wie **Laborversuche** und **Pilotversuche**,
- › **Theoretische Ansätze**, die auf **dimensionslosen Kennzahlen** beruhen,

- **Modellbasierte Ansätze**, bei denen experimentelle Messdaten mit physikalisch begründeten **Prozessmodellen** verknüpft werden,
- **Empirische Ansätze**, die auf praktischen Erfahrungen aus dem industriellen Anlagenbetrieb basieren und zur **Überprüfung** sowie Ergänzung der Modellannahmen eingesetzt werden.

Die genannten Methoden werden dabei nicht sequenziell abgearbeitet, sondern stehen in einem engen wechselseitigen Zusammenhang. Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen fließen in die theoretische Modellierung ein und werden durch praktische Betriebserfahrung ergänzt und validiert. Umgekehrt liefern Modellrechnungen wichtige Hinweise für die Auslegung weiterer Versuchsreihen.

Upscaling stellt somit einen **iterativen Prozess** dar, der experimentelle Untersuchungen, theoretische Modellierung und praktische Betriebserfahrung integriert und weit über eine reine geometrische Vergrößerung hinausgeht.



**Abbildung 2.** Iteratives Vorgehen bei der Massstabsvergrößerung von Membranfiltrationsprozessen: Methoden werden nicht sequenziell abgearbeitet, sondern über Rückkopplungsschleifen zwischen Experiment, Modellierung, Simulation und Betriebserfahrung verknüpft.

### 3.1 Reinigung

Nicht alle im Labormassstab erzielten Ergebnisse sind direkt skalierbar. Insbesondere Reinigungszyklen müssen im grossen Massstab neu bewertet werden.

### 3.2 Energie

Der Energiebedarf steigt oft überproportional mit der Anlagengröße. Materialbeständigkeit gewinnt bei langen Betriebszeiten an Bedeutung. Auch wirtschaftliche Aspekte wie Investitions- und Betriebskosten beeinflussen die gewählte Upscaling-Strategie.