

1 Einleitung und Problemstellung

Die Produktaufarbeitung in der Prozesstechnik beinhaltet oftmals die Aufgabe, Flüssigkeiten von Feststoffen zu klären oder verdünnte Suspensionen aufzukonzentrieren. Mit der steten Weiterentwicklung neuer Membranwerkstoffe kommen zu diesem Zweck immer häufiger auch Querstromfiltrationsverfahren zum Einsatz. So werden in der Lebensmittelindustrie durch Querstromfiltration (insbesondere Ultra- und Mikrofiltration) Fruchtsäfte, Bier und Wein geklärt, in der Biotechnologie wertvolle Proteine aus Fermenterbrühen gewonnen und in der Sicker- und Abwasseraufbereitung Schwermetalle und andere Schadstoffe zurückgehalten.

Einer effizienten Prozessführung oder der Erschließung neuer Aufgabenfelder steht durch die Bildung unerwünschter Deckschichten auf der Membran oftmals eine sehr geringe Filtratstromdichte ($<100 \text{ l/m}^2 \text{ h}$) entgegen. Der Steigerung der Filtratstromdichte durch Erhöhung des transmembranen Druckes oder der Überströmgeschwindigkeit sind dabei physikalische, technische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt.

Neuere technische Entwicklungen zielen deshalb darauf ab, bei moderaten Durchströmungsgeschwindigkeiten durch Nutzung zusätzlicher physikalischer und strömungsmechanischer Effekte eine Partikelablagerung auf dem Filtermittel zu vermindern bzw. soweit möglich vollständig zu verhindern. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Untersuchung des Einflusses von Sekundärströmungen.

Insbesondere Taylor- und Dean-Wirbel, die bei der Durchströmung gekrümmter Geometrien entstehen, haben sich bei einer Vielzahl von Membranprozessen positiv auf das Prozessergebnis ausgewirkt. Gegenüber der geraden Strömungsführung in üblichen Kapillar- bzw. Rohrmodulen sorgen die Sekundärströmungen für eine erhöhte Scherbeanspruchung am Filtermedium und einen besseren Stoffaustausch zwischen Bulk-Phase und Deckschicht und können eine deutliche Steigerung der Filtrationsgeschwindigkeit bewirken.

Im Gegensatz zu sogenannten Rotationsscherspaltfiltern weisen Dean-Wirbel zwar ein geringeres Steigerungsvermögen im spezifischen Filtratfluss auf, zudem ist die Scherbeanspruchung an der Membran deutlich niedriger und mit der Durchströmungsgeschwindigkeit in einem gewissen Rahmen gekoppelt, auf der anderen Seite aber bieten sie den großen Vorteil einer einfachen Apparate- bzw. Modultechnik.

Für Modifikationen, die zu einer Leistungssteigerung bei der Querstromfiltration führen sollen, ist es wichtig, die grundlegenden physikalischen Mechanismen bei der Partikelablagerung und Deckschichtbildung an überströmten Membranen zu identifizieren und möglichst zu quantifizieren. Zahlreiche Forschungsarbeiten haben dazu beigetragen, das Verständnis über die Partikelablagerung zu erweitern. Die am weitesten entwickelten Beschreibungsmodelle gehen davon aus, dass die Ablagerung von Partikeln im Größenbereich $> 200 \text{ nm}$ im wesentlichen von Strömungskräften, van-der-Waals- und elektrostatischen Wechselwirkungskräften in unmittelbarer Nähe zur Deckschichtoberfläche, bei kleineren Partikel zusätzlich von Diffusionskräften, abhängt. Es ist jedoch bislang noch nicht gelungen,

nicht zuletzt aufgrund der zahlreichen einfließenden Parameter, eine allgemeingültige Beschreibung der ablaufenden Vorgänge zu entwickeln. Vielmehr sind die Modellierungsansätze auf die jeweiligen speziellen Versuchsbedingungen beschränkt. Zudem gelten die Modelle nur für den Fall einer sehr einfachen Hydrodynamik, komplexe Strömungen können derzeit noch nicht berücksichtigt werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, neben der detaillierten experimentellen Analyse der Wirkung von Dean-Strömungen auf die Deckschichtbildung, die Modellierung auf das hierbei auftretende komplexe Zusammenspiel zwischen Hydrodynamik, Stofftransport und Partikelablagerung und damit der Filtrationsgeschwindigkeit für den Bereich der Mikrofiltration auszuweiten. Wesentlicher Schritt dabei ist die Kombination der numerischen Strömungsmechanik mit der mikroskopischen Betrachtungsweise der physikalischen Einflussgrößen, die bei der Partikelablagerung eine Rolle spielen.

Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, im Gegensatz zu bisherigen Modellen, die sich an integralen Prozessgrößen orientieren, die Deckschichtbildung unter dem Einfluss einer sich lokal verändernden Hydrodynamik zu beschreiben. Der Vergleich zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen gibt dabei Auskunft über die Güte der Modellbildung.

2 Stand der Forschung und Technik

Bei der druckgetriebenen Querstromfiltration handelt es sich um ein Filtrationsverfahren, bei dem die Membran tangential überströmt und das Filtrat senkrecht dazu durch die Membran abgezogen wird. Die Tangentialströmung soll einem Deckschichtaufbau, der zu einer Verminderung des Filtratflusses führt, entgegen wirken. In **Abbildung 1** ist das Prinzip der Querstromfiltration in einer Kapillarmembran (rechts) in Abgrenzung zur Dead-End-Filtration (links) dargestellt.

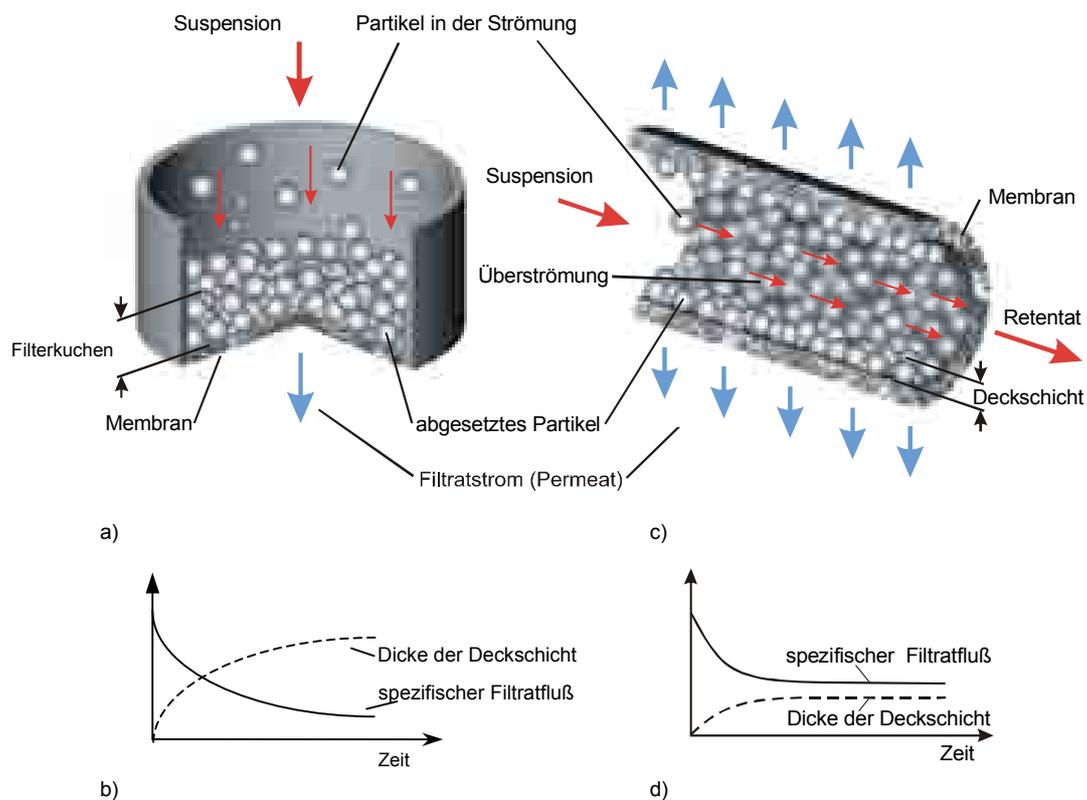


Abbildung 1: Prinzip der Dead-End- und der Querstromfiltration

Im Gegensatz zur Dead-End-Filtration wird bei einer Querüberströmung der Membran nach einer instationären Phase der Deckschichtbildung ein stationärer Filtratstrom und eine endliche Dicke der Deckschicht erreicht. Ein in der stationären Phase oft zu beobachtender leichter stetiger Abfall im Filtratfluss wird durch Einlagerung feinsten Partikel in die Deckschicht, durch Fouling-Prozesse an der Membran und/oder Umlagerungsprozesse innerhalb der Deckschicht hervorgerufen.

Trotz der begrenzten Deckschichtbildung kommt es in der Anfangsphase der Querstromfiltration zu einem starken Abfall des Filtratflusses, teilweise um mehrere Größenordnungen. Um einen Filtrationsprozess möglichst effizient zu gestalten, ist es von entscheidender Bedeutung, die Deckschichtbildung möglichst gering zu halten. Diese Forderung bedingt jedoch ein genaues Verständnis der physikalischen Mechanismen, die bei der Partikelablagerung eine wesentliche Rolle spielen. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Modellansätze entwickelt, um die maßgeblichen Mechanismen der

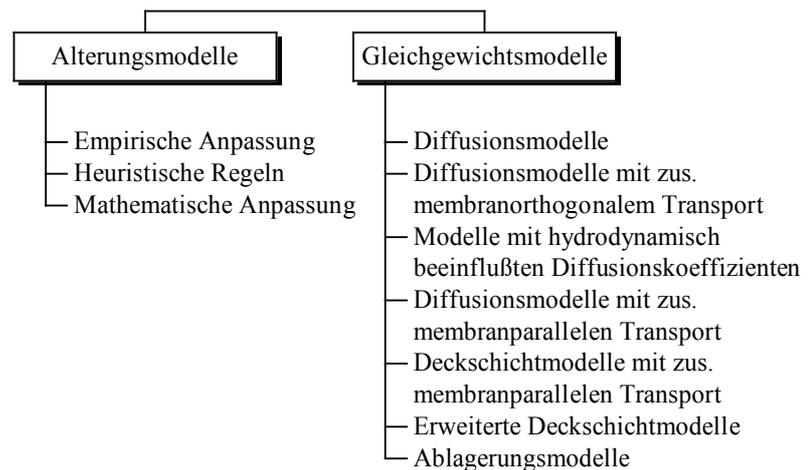
Deckschichtbildung zu identifizieren und Schlussfolgerungen für eine gezielte Veränderung der Prozessparameter ziehen zu können. Diese Ansätze unterscheiden sich in Herangehensweise und Modellierungstiefe sehr stark. Im folgenden Abschnitt werden einige Modellvorstellungen diskutiert.

2.1 Modelle der deckschichtbildenden Querstromfiltration

In der Literatur lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Modellierungsansätze zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Filtrationsprozesses bzw. zur Berechnung des quasistationären Filtratvolumenstromes bei der Ultra- und Mikrofiltration finden. Grundsätzlich beziehen sich diese Modelle auf jeweils nur ein einziges Stoffsystem, so dass eine Allgemeingültigkeit der Modellbildung nicht unbedingt gegeben ist.

Die existierenden Modellansätze werden von Kracht /Kra96/ in Alterungsmodelle und Gleichgewichtsmodelle unterteilt. Alterungsmodelle beschreiben den gesamten zeitlichen Verlauf des Filtrationsprozesses, die sogenannten Gleichgewichtsmodelle umfassen Parameterabhängigkeiten auf Basis des quasistationären Filtratflusses, siehe **Abbildung 2**.

Abbildung 2: Einteilung der Modellansätze nach Kracht /Kra96/.



Eine universelle Modellierung des Filtrationsprozesses erscheint auch aufgrund der Vielschichtigkeit der einfließenden Prozessparameter nicht möglich. Hieraus ergibt sich die Konsequenz, dass die bestehenden Modelle sehr unterschiedlicher Natur sind und tendenzielle Aussagen oft nur für das jeweilige Stoffsystem gemacht werden können. Dieses betrifft vor allem diejenigen Modelle, die auf einer empirischen Anpassung an experimentelle Ergebnisse basieren.

In jüngerer Zeit wurden einige Modelle entwickelt, die nicht mehr eindeutig den o.g. Kategorien zuzuordnen sind. Es handelt sich hierbei um Modellansätze, die den dynamischen Filtrationsprozess über eine Abfolge von quasistationären Zuständen beschreiben. Zu diesen Ansätzen zählen die Modelle von Altmann und Ripperger /Alt96/ und Yoon et al. /Yoo99/. Diese Modelle gehen von einer Kräftebilanz am Einzelpartikel aus und berücksichtigen sowohl hydrodynamische Kräfte als auch interpartikuläre Wechselwirkungen. Eine auch unter Berücksichtigung dieser neueren Modellansätze zutreffendere Einteilung wird von Oetjen /Oet98/ gegeben. Hier werden die Modelle nach makroskopischer und mikroskopischer Betrachtungsweise unterschieden, vgl. **Abbildung 3**.

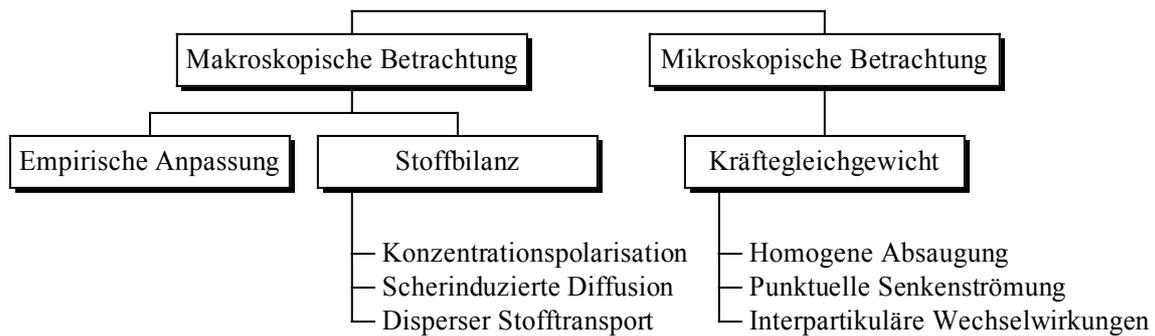


Abbildung 3: Einteilung der Modellansätze nach Oetjen /Oet98/

Innerhalb der mikroskopischen Betrachtungsweise kann zusätzlich zwischen homogener Absaugung oder punktueller Senkenströmung („track-etched“-Membranen) und zwischen einer Bilanzierung von Kräften oder Transportgeschwindigkeiten unterschieden werden. Zudem beinhalten die Modelle nur teilweise interpartikuläre Wechselwirkungen.

2.1.1 Makroskopische Betrachtung

Historisch gesehen zählen die Diffusionsmodelle zur Berechnung des quasistationären Filtratflusses zu den ältesten Ansätzen, die der Literatur zu entnehmen sind. Unter Berücksichtigung der Einteilung nach Oetjen /Oet98/ handelt es sich hierbei um eine makroskopische Betrachtungsweise. Diese Modelle sind angelehnt an das klassische Konzentrations-Polarisations-Modell, das ursprünglich zur Beschreibung der Vorgänge bei der Ultrafiltration von Makromolekülen entwickelt wurde. Der Modellbildung liegt die Vorstellung zugrunde, dass sich über einer direkt auf der Membran liegenden dünnen Deckschicht eine Schicht befindet, in der es zu einer Konzentrationspolarisation kommt und in der der konvektive Antransport und der diffusive Rücktransport von Partikeln stattfindet. Porter /Por72/ entwickelte eine einfache Gleichung zur Berechnung des quasistationären Filtratflusses $v_{F,stat}$:

$$v_{F,stat} = K \cdot \ln \left(\frac{\phi_W}{\phi_B} \right). \quad (\text{Gleichung 1})$$

In dieser Gleichung bezeichnen ϕ_W und ϕ_B den Volumenanteil der Partikel am Rande der Deckschicht bzw. in der Bulk-Phase. Die Größe K ,

$$K = 0,81 \cdot \left(\frac{\dot{\gamma} \cdot D_B^2}{L} \right)^{1/3}, \quad (\text{Gleichung 2})$$

ist ein über die Lauflänge L gemittelter Stofftransportkoeffizient bei laminarer Strömung in Abhängigkeit vom Schergradienten $\dot{\gamma}$ und dem Diffusionskoeffizienten D_B , der über die Stokes-Einstein-Beziehung