


Unstete Überströmung bei der Crossflow-Mikrofiltration und ihr Einfluss auf auftretendes Fouling

Maria E. Weinberger*

DOI: 10.1002/cite.202300069

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Der Einsatz und die Wirtschaftlichkeit der Crossflow-Mikrofiltration werden insbesondere durch das Auftreten von Fouling beeinträchtigt. Eine unstete Überströmung, beispielsweise durch eine pulsierende oder alternierende Betriebsweise, können die Bildung einer Deckschicht verringern und damit einen starken Fluxabfall und den Rückhalt von Gelöststoffen verhindern. Dadurch können insbesondere Prozesse mit geringer Überströmungsgeschwindigkeit oder hohem Transmembran-Druck deutlich verbessert werden. Das Ausmaß der Verbesserung hängt dabei stark von der Foulingneigung des zu filtrierenden Fluids ab.

Schlagwörter: Deckschichtbildung, Foulingverminderung, Pulsation, Strömungswechsel

Eingegangen: 13. April 2023; *akzeptiert:* 29. Juni 2023

Unsteady Crossflow during Microfiltration and Its Impact on Fouling Occurrence


The main disadvantage of crossflow microfiltration processes is the occurrence of fouling, which impedes its application and economic efficiency. Unsteady crossflow, e.g., due to pulsatile or alternating operating mode, can reduce the formation of a deposit layer and therefore prevent strong flux decay and retention of solutes. With this technique, especially processes run at low crossflow velocity or high transmembrane pressure can be significantly improved. The degree of improvement also largely depends on the fouling propensity of the fluid to be filtered.

Keywords: Alternating flow, Deposit layer formation, Fouling mitigation, Pulsation

1 Einführung

Membranprozesse sind in Bezug auf thermische und mechanische Belastung sensibler Produkte und Energieeffizienz anderen Trennprozessen wie beispielsweise thermischen Prozessen häufig überlegen. Sie spielen in vielen Industriezweigen eine wichtige Rolle. Drei der größten Anwender von membranbasierter Trenntechnik sind die lebensmittelverarbeitende Industrie, die Biopharmazie und der Umwelt- und Wasseraufbereitungsbereich. Jeder dieser Industriezweige bringt seine eigenen Herausforderungen an den Membranprozess mit. In der Lebensmittelindustrie kommt die Membrantrenntechnik bei der Fraktionierung und Konzentrierung von komplexen Nahrungsmitteln wie beispielsweise Milch sowie der Klärung von Getränken zum Einsatz. Dabei handelt es sich häufig um Flüssigkeiten mit hohem Protein- oder Kohlenhydratgehalt, welche stark zur Foulingbildung neigen. Des Weiteren gelten im lebensmittelverarbeitenden Bereich hohe Hygienestandards, was eine

häufige Reinigung, die wasser- und energieintensiv ist, notwendig macht. Bei der Herstellung von Biopharmazeutika liegt der Fokus hingegen auf der Prozessrobustheit, um regulatorischen Anforderungen zu genügen, sowie der schonenden und scherarmen Verarbeitung, da häufig schersensitive Zellen, wie CHO-Zellen, oder schersensitive pharmazeutische Wirkstoffe, wie Antikörper oder DNA, prozessiert werden sollen. Im Bereich der Umwelttechnik, wie beispielsweise bei der Abwasseraufbereitung, aber auch der Gewinnung biologischer Kraftstoffe, spielen membranbasierte Prozesse eine wichtige Rolle, welche in Zukunft

¹Dr.-Ing. Maria E. Weinberger
 <https://orcid.org/0000-0002-9781-7855>
(maria.weinberger@tum.de)

¹Technische Universität München, TUM School of Life Sciences, Lehrstuhl für Lebensmittel- und Bioprozesstechnik, Weihenstephaner Berg 1, 85354 Freising, Deutschland.

aufgrund der Energiewende sowie des Klimawandels weiter an Bedeutung gewinnen werden. Die Herausforderungen in diesem Bereich sind der hohe Kostendruck, die hohen Durchsätze sowie eine ständig wechselnde Zusammensetzung der zu filtrierenden Flüssigkeit.

Der Einsatz und die Wirtschaftlichkeit von membranbasierten Trennprozessen wird maßgeblich durch das Auftreten von Fouling beeinträchtigt. Unter Fouling versteht man die Ablagerung von Partikeln an der Membranoberfläche oder in den Poren. Die Deckschichtbildung ist, neben der Porenverblockung und der Adsorption, eine Art des Foulings und spielt insbesondere bei Mikrofiltrationsprozessen eine wichtige Rolle. Dabei lagern sich die aufgrund des Größenausschlusses zurückgehaltene Partikel auf der Membranoberfläche ab. Die so neu ausgebildete Deckschicht agiert häufig wie eine eigene Membran und führt zur Reduktion des Flux und zum Rückhalt von Stoffen, welche die Membran eigentlich passieren könnten. Diese Effekte reduzieren die Wirtschaftlichkeit von Mikrofiltrationsprozessen und machen die regelmäßige Reinigung oder den Ersatz der Membranen notwendig.

Das Fouling oder die Reduzierung von Fouling hängt von drei verschiedenen Gruppen an Faktoren ab: den membranbasierten Faktoren, den prozessabhängigen Faktoren und den stofflichen Faktoren. Es gibt zahlreiche Bestrebungen, Faktoren aus allen drei Gruppen zu optimieren, um eine Reduktion des Foulings und damit eine bessere Prozesseffizienz zu erreichen. Da es im Folgenden um den Einsatz unsteter Überströmung auf die Deckschichtbildung während der Mikrofiltration verschiedener Suspensionen geht, liegt hier der Fokus auf den prozessabhängigen und den stofflichen Faktoren. Eine Auflistung der Faktoren ist in Abb. 1 zu sehen.

Das Potenzial unsteter Überströmung wurde bereits für simple Ein-Komponenten-Modellsysteme gezeigt [1–4]. Der Fokus dieser Arbeit liegt darüber hinaus auf der Untersuchung des Einflusses der Strömungsform unter Berücksichtigung anderer prozessabhängiger Faktoren, wie der

Überströmgeschwindigkeit, dem Transmembrandruck und der Prozesszeit und deren gegenseitige Beeinflussung mit den stofflichen Faktoren, insbesondere der Zusammensetzung der zu filtrierenden Suspension, der Partikelgröße der zurückgehaltenen Partikel sowie weiterer Foulanteigenschaften.

2 Versuchsanlage

Zur Untersuchung der verschiedenen Strömungsformen wird eine Versuchsanlage benötigt, die bei ansonsten vergleichbaren Bedingungen verschiedene Strömungsformen generieren kann. Ein schematisches Fließbild einer derartigen Versuchsanlage ist in [5] zu finden. Herzstück der Anlage sind die Kreiselpumpen, die aufgrund ihres kontaktfrei magnetisch gelagerten und magnetisch angetriebenen Flügelrads kurze An- und Abfahrzeiten erreichen können und durch Vorgeben einer pulsierenden Pumpenleistung ein pulsierendes Strömungsprofil erzeugen. Bei Vorgabe einer konstanten Pumpenleistung ist das Strömungsprofil einer Kreiselpumpe stetig und pulsationsarm. Die alternierende Strömung lässt sich durch ein System aus pneumatischen Ventilen erreichen, die den Strömungsweg in regelmäßigen Abständen umlenken. Alternativ lässt sich die alternierende Strömung auch durch zwei Pumpen gegensätzlicher Förderichtung an beiden Enden eines Filtrationsmoduls erzeugen, wie in [6] gezeigt. Dieses Anlagendesign hat den Vorteil geringerer Totvolumina und Fließwege.

3 Modellsysteme

Um den Einfluss der Art und Eigenschaften des Foulings bzw. der Deckschicht auf die Effekte der unsteten Überströmung abschätzen zu können, wurden zwei verschiedene Modellsysteme mit unterschiedlichen Foulants betrachtet. Das erste Modellsystem war eine Zell-Protein-Mischung.

Zellen von Proteinen zu trennen, ist eine der Standardaufgaben in der Ernte von Biopharmazeutika, wie beispielsweise bei Perfusionsprozessen oder auch bei der Klärung von Bier. Für dieses Modellsystem wurde auf Zellen der Bier- oder Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* und das Modellprotein BSA zurückgegriffen. Die Hefezellen sind etwa 4–5 µm im Durchmesser und leicht ellipsoid. Aufgrund ihrer zellulären Struktur sind sie zwar zu einem gewissen Grad kompressibel, diese Kompression ist jedoch reversibel [7].

Das zweite Modellsystem war Magermilch. Magermilch besteht neben Milchzuckern und Milchsäuren aus

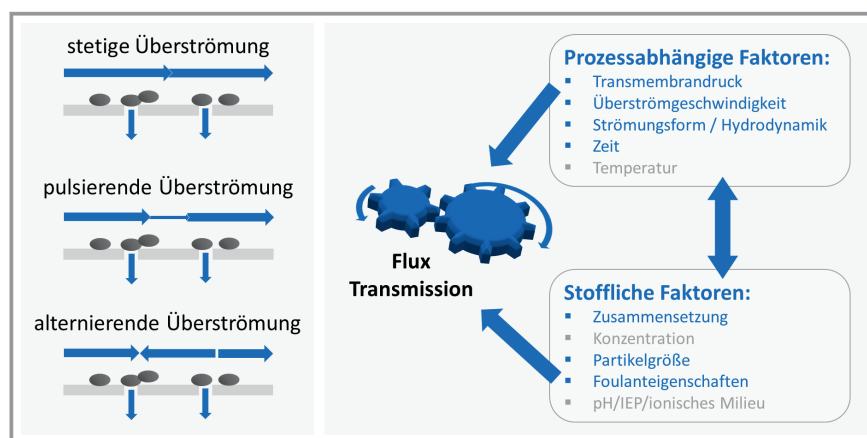


Abbildung 1. Übersicht über das Zusammenspiel prozessabhängiger und stofflicher Faktoren auf die Prozesseffizienz bei der Crossflow-Mikrofiltration unter Berücksichtigung der Strömungsform.

zwei verschiedenen Proteinfractionen, den Kaseinen und den Molkenproteinen. Die Kaseine, kurze peptidartige Strukturen, arrangieren sich in mizellarer Form. Diese Mizellen haben einen Durchmesser von etwa 50–200 nm [8] und werden daher von einer Mikrofiltrationsmembran zurückgehalten. Die Molkenproteine sind eine Mischung aus globulären Proteinen, wie beispielsweise α -Lactalbumin, β -Lactoglobulin, bovines Serumalbumin (BSA) und Lactoferrin. Nachdem Molke und damit auch die Molkenproteine lange Zeit als Neben- und Abfallprodukt der Käseherstellung betrachtet wurden, sind die Molkenproteine heute aufgrund ihrer hohen biologischen Wertigkeit ein wichtiger Teil der Wertschöpfung. Um Molkenproteine in möglichst nativer Form zu gewinnen und von den Kaseinen zu trennen, wird Membrantrenntechnik angewendet. Die zurückgehaltenen Kaseine neigen jedoch dazu, sich quervernetzen und gelartige Strukturen auszubilden, sodass die entstehende Deckschicht nur schwer durchlässig ist und maßgeblich die Transmission der globulären Molkenproteine verhindert [9, 10].

4 Ergebnisse der Filtrationsversuche

Bei der Filtration des Zell-Protein-Gemisches kann bei Anwendung pulsierender Überströmung eine signifikante Verbesserung der Prozesseffizienz im Vergleich zur stetigen Überströmung beobachtet werden. Der Flux kann bei gleicher mittlerer Überströmungsgeschwindigkeit und gleichem mittleren Transmembrandruck um bis zu 20 % erhöht werden und die Transmission des BSA kann sogar verdoppelt werden. Das Ausmaß dieses positiven Effekts hängt dabei von mehreren Faktoren ab: einerseits von der Frequenz und der Amplitude der Pulsation, andererseits aber auch von

der gewählten Überströmungsgeschwindigkeit und dem gewählten Transmembrandruck. Abb. 2 zeigt alle genannten Einflussgrößen.

Es ist zu sehen, dass bei größerer Amplitude der Pulsation sowohl der Flux als auch die BSA-Transmission steigen. Untersucht wurden Amplitudenwerte zwischen 75 und 93 %. Eine noch größere Amplitude (100 %) ist aus regelungstechnischen Gründen nur schwer umsetzbar. Jedoch kann die Amplitude weiter vergrößert werden, indem auf alternierende Strömung gesetzt wird. Der Einfluss der Frequenz ist in dem untersuchten Bereich weniger stark ausgeprägt. Der Flux zeigt keine signifikante Abhängigkeit von der Frequenz, während die BSA-Transmission einen geringen Effekt im unteren Bereich zeigt (von 0,1 auf 0,2 Hz) scheint eine weitere Erhöhung der Frequenz keine starke Verbesserung mehr mit sich zu bringen. An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass in früheren Untersuchungen teilweise in einem hochfrequenten Pulsationsbereich gearbeitet wurde, die hier erzielten Ergebnisse sowie die gefundenen Beziehungen aber nicht über den untersuchten Bereich hinaus extrapoliert werden sollten.

Ebenfalls in Abb. 2 zu sehen ist der Einfluss des Transmembrandrucks auf die Steigerung der Prozesseffizienz durch Anwendung pulsierender Überströmung. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich hoher Transmembrandrücke (bei einem maximalen Transmembrandruck von 1,0 bar und einem mittleren Transmembrandruck der sich aufgrund der Pulsation daraus ergibt und leicht niedriger ist als der maximale Transmembrandruck) der positive Effekt der Pulsation stark ausgeprägt ist, während im Bereich niedriger Transmembrandrücke (bei einem maximalen Transmembrandruck von 0,5 bar) nur bestimmte Pulsationsbedingungen (hohe Frequenz und hohe Amplitude) zu einer nur noch leichten Verbesserung führen.

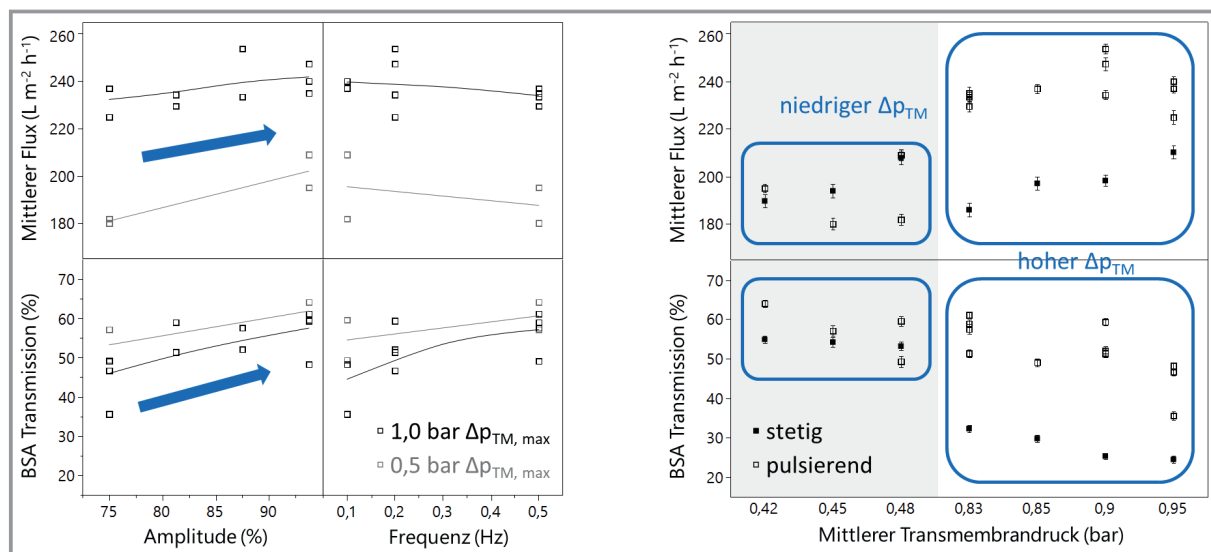


Abbildung 2. Prozesseffizienz (Flux und BSA-Transmission) bei pulsierender Crossflow-Mikrofiltration einer Zell-Protein-Mischung in Abhängigkeit der Amplitude und der Frequenz (links) sowie in Abhängigkeit des mittleren Transmembrandrucks im Vergleich zu stetiger Überströmung (rechts). Angepasst nach [11].

Vergleicht man den Einfluss der Pulsation bei unterschiedlicher Überströmgeschwindigkeit (hier gezeigt eine maximale Überströmgeschwindigkeit von $3,0 \text{ m s}^{-1}$), dann sieht man bei niedrigerer Überströmgeschwindigkeit einen deutlich stärkeren Effekt. Das zeigen Daten, die bei einer Überströmgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ aufgenommen wurden und einen bis zu sieben Mal kleineren Filtrationswiderstand aufgrund der aufgebrauchten Pulsation belegen [6]. Bei niedriger stetiger Überströmung sind die hydrodynamischen Kräfte, die eine Ablagerung der Partikel an der Membranoberfläche verhindern, deutlich schwächer ausgeprägt. Hierdurch ergibt sich einiges an Verbesserungspotenzial, das durch die Anwendung pulsierender Strömung genutzt werden kann. Solche milden Prozessbedingungen werden häufig bei Perfusionsprozessen angewendet, wenn scherpfindliche Säugerzellen in kontinuierlichen Fermentationen im Reaktor zurückgehalten werden sollen, während das extrazellulär produzierte Protein im Permeat kontinuierlich geerntet wird. Bei aktuellen Perfusionsprozessen ist Fouling aufgrund der geringen Überströmungsraten ein beträchtlicher Nachteil in Bezug auf Prozessrobustheit und Produktausbeute [12] und könnte durch Anwendung unsteter Strömungsbedingungen deutlich verringert werden [13, 14].

Um den positiven Effekt einer hohen Pulsationsamplitude zu verstärken, kann auf alternierende Strömung, also

Überströmung mit Richtungswechsel, zurückgegriffen werden. Bei identer Vorwärts- und Rückwärtsströmungsgeschwindigkeit entspräche das einer Amplitude von 200 %. Bei der Anwendung alternierender Strömung lässt sich ähnlich wie bei pulsierender Strömung ein starker positiver Effekt auf den Flux (s. Abb. 3) und auch die Proteintransmission [5] beobachten. Im direkten Vergleich mit pulsierender Strömung lassen sich neue Effekte über die Prozesszeit hinweg beobachten. Während der initiale Fluxabfall bei der pulsierenden Überströmung ähnlich ausgebildet ist wie bei der stetigen Überströmung, zeigt der zeitliche Verlauf bei alternierender Strömung einen anderen Verlauf. Zum einen ist der initiale Fluxabfall stärker ausgeprägt und zum anderen wird der quasistationäre Zustand erst deutlich später erreicht. Außerdem ist bei alternierender Überströmung die Filtrationseffizienz im Vergleich zur stetigen Überströmung zwar erhöht, aber nicht so sehr, wie basierend auf den Daten zur pulsierenden Überströmung und der nun angewendeten Amplitude von 200 % erwartbar gewesen wäre.

Diese Beobachtungen in Bezug auf die alternierende Überströmung lassen sich erklären, wenn man den Anteil reversiblen und irreversiblen Foulings untersucht, indem der Widerstand nach einer kurzen Überströmung mit Wasser, aber ohne Reinigungsmittel bestimmt wird. Während bei stetiger Überströmung der Anteil irreversiblen Foulings

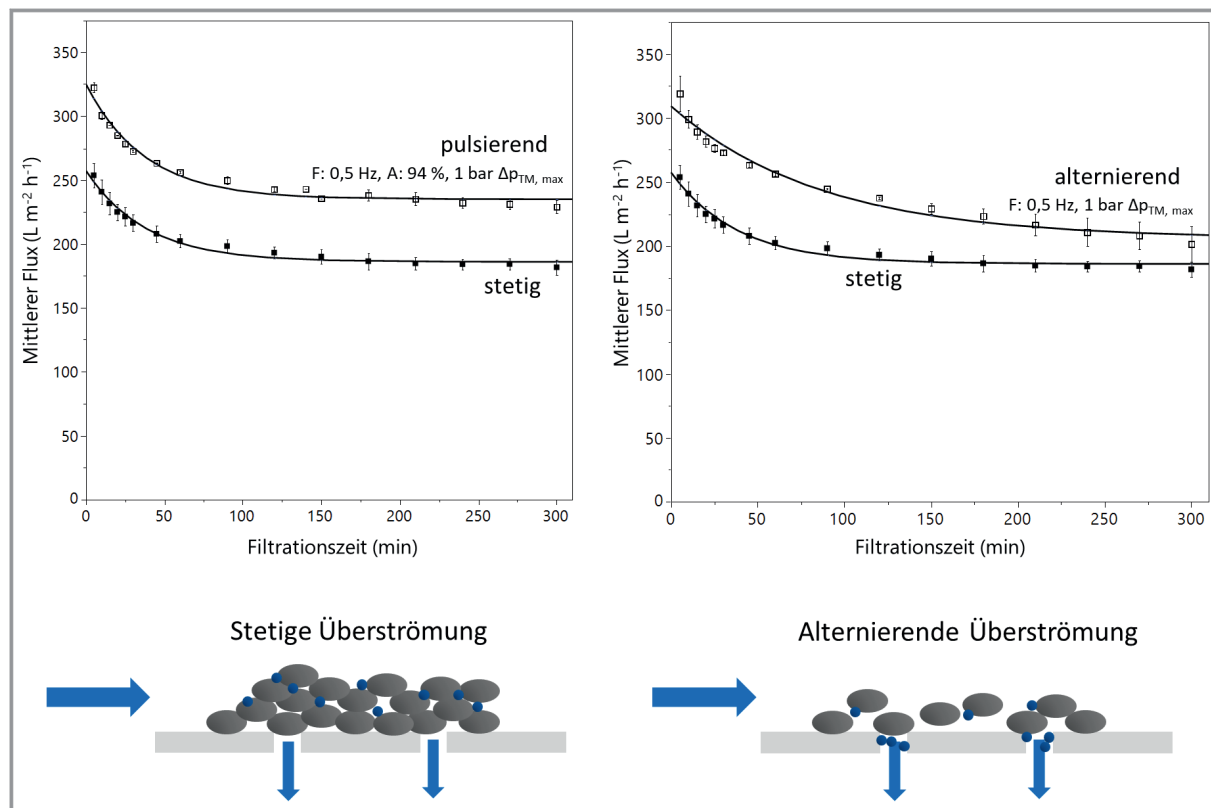


Abbildung 3. Mittlerer Flux über die Zeit bei der Filtration eines Zell-Protein-Gemisches für stetige, pulsierende und alternierende Strömungsbedingungen. Aufgrund der unterschiedlich stark ausgeprägten Deckschicht verändert sich der Anteil an internem Fouling. Angepasst nach [5, 11].

je nach Prozessbedingungen nur zwischen 5 und 15 % beträgt, ist er bei alternierender Überströmung in etwa doppelt so hoch [15]. Diese Daten sprechen dafür, dass die Deckschichtbildung aufgrund der alternierenden Überströmung stark vermindert ist, wodurch jedoch die Membranporen leichter zugänglich sind und es daher vermehrt zur Porenverblockung und Porenverengung kommen kann. Dieser Effekt ist schematisch in Abb. 3 gezeigt.

Bei der Filtration von Magermilch zeigt der Einsatz pulsierender und alternierender Überströmung keinen positiven Effekt. Zwar kann man im zeitlich aufgelösten Verlauf sehen, dass nach einer Phase geringer Überströmung und damit auch geringen Transmembrandrucks der Flux leicht überproportional bzw. der Filtrationswiderstand leicht reduziert ist, jedoch gleicht sich dieser Effekt durch den geringeren Flux während des Pulses aus. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Quervernetzung der abgelagerten Kaseinmizellen einen Abtrag der Mizellen durch die Pulsation verhindert. Darüber hinaus führt die Pulsation bei hohen maximalen Transmembrandrücken zu einer Reduktion der Transmission an Molkenproteinen. Dies ist vermutlich bedingt durch die wechselnde Beanspruchung, also dem Zyklus von Relaxation und Kompression der Deckschicht, was im Laufe der Zeit zu einer größeren Kompaktheit der Deckschicht und damit der beobachteten verringerten Transmission führt. [16]

Die Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Modellsystemen lassen sich auf verschiedene stoffliche Eigenschaften zurückführen. Einerseits hat die Partikelgröße der zurückgehaltenen Partikel einen Einfluss auf die auf das Partikel wirkenden Kräfte. Kleine Partikel werden demnach stärker durch diffusive Kräfte abgetragen, während größere Partikel durch hydrodynamische Kräfte beeinflusst werden (s. Abb. 4). Addiert man diese beiden Kräfte, so ergibt sich ein Minimum an Partikelabtrag für eine Größe von etwa 200 nm, was wiederum mit der Größe der Kasein-

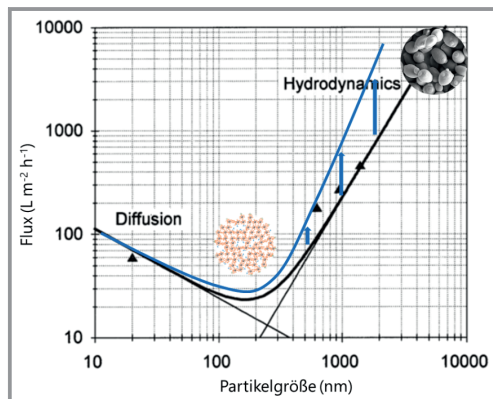


Abbildung 4. Die am Partikel wirkenden Kräfte durch Diffusion und Hydrodynamik bedingen eine Abhängigkeit des Flux von der Größe der abgelagerten Partikel. Die Fluxsteigerung, die sich durch unstete Überströmung erreichen lässt (blaue Linie), hängt dabei ebenfalls von der Partikelgröße ab. Angepasst nach [19].

mizellen übereinstimmt. Bei der Filtration von Magermilch wirken also deutlich weniger abtragende Kräfte am Partikel als bei der Filtration der Zell-Protein-Suspension. Andererseits spielen auch die Wechselwirkungen zwischen den abgelagerten Partikeln eine tragende Rolle. Während die Hefezellen zwar reversibel kompressibel sind, vernetzen sie sich, solange es nicht zur Ausbildung eines Biofilms kommt, nicht untereinander. Die Kaseinmizellen sind ebenfalls stark kompressibel und deformierbar [17, 18], bilden dabei aber untereinander auch echte chemische Bindungen und Wechselwirkungen aus [9], wodurch ein Abtrag der Kaseinmizellen erschwert wird.

5 Diskussion

Die dargestellten Einblicke zeigen das Potenzial, das pulsierende und auch alternierende Überströmung in der Cross-flow-Mikrofiltration haben. Den höchsten Effekt hat die unstete Überströmung, wenn die Referenzprozessbedingungen bereits eher ungünstig in Bezug auf die Deckschichtbildung sind, wie beispielsweise geringe Überströmungsgeschwindigkeit oder hoher Transmembrandruck. Insbesondere in Fällen, in denen aufgrund besonderer branchen- oder produktspezifischer Anforderungen die Überströmungsgeschwindigkeit nicht erhöht werden kann, können die Prozesseffizienz und -robustheit stark von der Anwendung unsteter Überströmung profitieren.

Dabei ist jedoch im einzelnen Anwendungsfall zu bedenken, welchen Einfluss verschiedene Foulants und insbesondere deren intrinsische Eigenschaften auf die Wirksamkeit der unsteten Überströmung als Foulingreduktionstechnik haben. Dabei sind einerseits die Partikelgröße, aber insbesondere auch die Reversibilität, d.h. die strukturellen Eigenschaften der Deckschicht zu untersuchen. Dazu gehören neben der Kompressibilität auch die Quervernetzung der zurückgehaltenen Partikel und Foulants. Generell ist davon auszugehen, dass eine höhere Komplexität des zu filtrierenden Mediums auch zu stärkeren Interaktionen führen kann, wodurch die Effizienz der Maßnahmen beschränkt sein kann. Darüber hinaus kann man durch eine Veränderung der Milieubedingungen, wie pH-Wert und das Ionenmilieu, Einfluss auf das Auftreten und die Stärke bestimmter Interaktionen nehmen. Um teure Versuche oder Investitionen zu sparen, können diese Eigenschaften im Vorhinein untersucht und zur Abschätzung des Verbesserungspotenzials der unsteten Überströmung herangezogen werden.

Während die Effizienzsteigerung durch unstete Überströmung maßgeblich durch die Deckschichtstruktur beeinflusst wird, beeinflusst auch die Art der Überströmung die Deckschichtstruktur selbst. Für die stark quervernetzte Deckschicht aus Kaseinmizellen zeigt sich, dass die Anwendung pulsierender Überströmung zu einer höheren Kompaktheit führt, die sich in einer niedrigeren Durchlässigkeit für Gelöststoffe manifestiert. Für die reversiblere Deck-

schicht aus Hefezellen hingegen zeigt sich, dass die Reduktion der Deckschichtintensität durch alternierende Überströmung so stark ist, dass die Membran deutlich zugänglicher für Foulants wird und so irreversibles Fouling in der Porenstruktur verstärkt auftritt. Die Ausprägung dieser Effekte ist wiederum abhängig von den vorliegenden Prozessbedingungen, wie beispielsweise dem Transmembrandruck. Es kann also von einer gegenseitigen Abhängigkeit aller hier beobachteten und beschriebenen Faktoren gesprochen werden.

6 Ausblick und industrielle Umsetzung

Die Anwendung des hier vorgestellten Konzepts unsteter Strömung kann und muss aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen und Fragestellungen in den verschiedenen Branchen variieren. Für die Lebensmittelindustrie hat sich anhand des Beispiels Milch gezeigt, dass die hohe Komplexität und der hohe Proteingehalt und Grad an Interaktionen einen positiven Effekt der unsteten Überströmung verhindern. Auch wenn die Molkereiindustrie intensiv Membrantechnik zur Konzentrierung und Fraktionierung anwendet, werden sich mit Foodtrends hin zu pflanzlichen Proteinen sowie im Allgemeinen immer stärker verbreiteter Fraktionierung zur Valorisierung von Inhaltsstoffen weitere Anwendungsfelder für membranbasierte Trennverfahren eröffnen. Ob diese von der hier gezeigten Technologie profitieren können, ist aufgrund der jeweiligen Foulant- und Deckschichteigenschaften zu untersuchen. Darüber hinaus spielen Reinigungsprozesse in der Lebensmittelindustrie bezogen auf die Anlagenszeit sowie den Energieverbrauch eine nicht zu unterschätzende Rolle. Hier kann durch den Einsatz von Reinigungsmitteln Einfluss auf die Deckschichteigenschaften genommen werden, sodass der Einsatz pulsierender Strömung alleine bei der Reinigung der Membranen einen positiven Effekt hervorrufen kann [20]. Der Einsatz alternierender Strömung ist aufgrund der Anlagendimensionen sowie aufgrund der höheren Komplexität im Vergleich zum Einsatz pulsierender Strömung vermutlich nicht gerechtfertigt.

In der Biopharmazie ist eine Anwendung sowohl pulsierender als auch alternierender Crossflow-Mikrofiltration gut vorstellbar, bzw. wird bereits umgesetzt [21]. Durch ein verbessertes Verständnis der Zusammenhänge kann hier eine höhere Prozessrobustheit erreicht werden. Bei der Umsetzung der unsteten Strömungsformen ist auf eine gute Reinigbarkeit, geringe Totvolumina und kurze Fließwege sowie geringe Scherbeanspruchung in der Pumpe zu achten. Die hier vorgeschlagenen Kreiselpumpen würden sich daher gut für diese Anwendung eignen. Die höhere Komplexität echter Fermentationsbrühen im Vergleich zu der hier verwendeten Modellsuspension aus Modellzellen und Modellprotein ist bei der Abschätzung der erwarteten Effekte zu beachten. Allerdings zeigen zahlreiche Studien bereits die

Überlegenheit alternierender Überströmung gegenüber herkömmlichen Perfusionsverfahren [13, 22–24].

Die Trennaufgaben in der Abwasseraufbereitung können je nach Herkunft des Abwassers stark variieren. Daher ist eine Pauschalisierung der Anwendung unsteter Überströmung in der Abwasseraufbereitung schwierig. Die Rolle der Abwasseraufbereitung wird jedoch in den nächsten Jahren aufgrund des Klimawandels und aufgrund von Nachhaltigkeitsbestrebungen immer weiter an Relevanz gewinnen. Dafür ist es wichtig, einen möglichst kosten- und energiesparenden Prozess zu implementieren. Der Einsatz pulsierender Überströmung könnte dabei dazu dienen, die benötigte Überströmungsgeschwindigkeit zu reduzieren, ohne starke Effizienzverluste durch stärkeres Fouling in Kauf nehmen zu müssen. Im Allgemeinen ist auch ein Übertrag der Ergebnisse auf andere membranbasierte Trennverfahren, wie beispielsweise der Ultra- oder Nanofiltration denkbar [4, 25].

Danksagung

Dieses IGF-Vorhaben des Forschungskreises der Ernährungsindustrie e.V. (FEI) wurde über die AiF (AiF 31 EWN) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] D. E. Hadzismajlovic, C. D. Bertram, *J. Membr. Sci.* **1998**, *142* (2), 173–189. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(97\)00319-0](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(97)00319-0)
- [2] D. E. Hadzismajlovic, C. D. Bertram, *J. Membr. Sci.* **1999**, *163* (1), 123–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00161-1)
- [3] B. B. Gupta, P. Blanpain, M. Y. Jaffrin, *J. Membr. Sci.* **1992**, *70* (2), 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(92\)80111-V](https://doi.org/10.1016/0376-7388(92)80111-V)
- [4] S. Curcio, V. Calabrò, G. Iorio, *Desalination* **2002**, *145* (1), 217–222. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00415-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00415-0)
- [5] M. E. Weinberger, U. Kulozik, *Food Bioprod. Process.* **2021**, *129*, 24–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.07.001>
- [6] M. E. Weinberger, L. Schoch, U. Kulozik, *Biotechnol. Progr.* **2022**, *39* (2), e3309. DOI: <https://doi.org/10.1002/btpr.3309>
- [7] M. E. Weinberger, U. Kulozik, *Membranes* **2022**, *12* (6), 603. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12060603>
- [8] D. G. Dalgleish, M. Corredig, *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* **2012**, *3* (1), 449–467. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101214>
- [9] M. E. Weinberger, D. J. Andlinger, U. Kulozik, *Int. Dairy J.* **2021**, *118*, 105044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105044>
- [10] S. Schiffer, M. Hartinger, A. Matyssek, U. Kulozik, *Sep. Purif. Technol.* **2020**, *247*, 116962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116962>
- [11] M. E. Weinberger, U. Kulozik, *J. Membr. Sci.* **2021**, *629*, 119295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119295>

- [12] S. S. Farid, J. Pollock, S. V. Ho, in *Continuous Processing in Pharmaceutical Manufacturing*, Wiley-VCH, Weinheim **2014**.
- [13] D. J. Karst et al., *Biochem. Eng. J.* **2016**, *110*, 17–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.02.003>
- [14] M.-F. Clincke et al., *BMC Proc.* **2011**, *5* (8), 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1186/1753-6561-5-s8-p105>
- [15] M. E. Weinberger, U. Kulozik, *Food Bioprod. Process.* **2022**, *131*, 136–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.11.003>
- [16] M. E. Weinberger, U. Kulozik, *Sep. Sci. Technol.* **2021**, *56* (6), 1112–1127. DOI: <https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1749080>
- [17] A. Bouchoux et al., *J. Chem. Phys.* **2009**, *131* (16), 165106. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3245956>
- [18] A. Bouchoux, G. Gésan-Guiziou, J. Pérez, B. Cabane, *Biophys. J.* **2010**, *99* (11), 3754–3762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2010.10.019>
- [19] S. Ripperger, J. Altmann, *Sep. Purif. Technol.* **2002**, *26* (1), 19–31. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(01\)00113-7](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(01)00113-7)
- [20] C. Kürzl, T. Tran, U. Kulozik, *Sep. Purif. Technol.* **2022**, *302*, 122123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122123>
- [21] J. Pollock, S. V. Ho, S. S. Farid, *Biotechnol. Bioeng.* **2013**, *110* (1), 206–219. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.24608>
- [22] M.-F. Clincke et al., *Biotechnol. Progr.* **2013**, *29* (3), 754–767. DOI: <https://doi.org/10.1002/btpr.1704>
- [23] J. Coronel et al., *Vaccine* **2019**, *37* (47), 7011–7018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2019.06.005>
- [24] G. Gränicher et al., *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2020**, *104* (11), 4877–4888. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10596-x>
- [25] M. Y. Jaffrin, B. B. Gupta, P. Paullier, *J. Membr. Sci.* **1994**, *86* (3), 281–290. DOI: [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(93\)E0151-9](https://doi.org/10.1016/0376-7388(93)E0151-9)

26.–28.9.2023

Nürnberg, Germany

POWTECH

International Processing Trade Fair for

POWDER
BULK SOLIDS
FLUIDS
and LIQUIDS

Erleben Sie auf der POWTECH den Puls der Verfahrenstechnik! Nutzen Sie die Chance, die neuesten Innovationen, Lösungen und Technologien zu entdecken. Lassen Sie sich von führenden Unternehmen und Experten inspirieren, knüpfen Sie Kontakte zu den Entscheidern und Innovatoren der Branche. Erleben Sie die Energie und Dynamik der POWTECH und tauchen Sie ein in die Welt rund um Pulver, Granulat, Schüttgut und Flüssigkeiten.

Wir freuen uns auf Ihren Besuch!

Im Verbund mit



PARTEC

International Congress
on Particle Technology

Ideelle Träger



Werden Sie Teil der
POWTECH-Community!
powtech.de/besucher-werden

NÜRNBERG MESSE