

## Einsatz pulsierender und alternierender Strömung beim Cleaning-in-Place (CIP) von Membranen



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle(n):	Technische Universität München Zentralinstitut für Ernährungs- und Lebensmittelforschung (ZIEL) Abt. Technologie Prof. Dr. Ulrich Kulozik/M.Sc. Christian Kürzl
Industriegruppe(n):	VDMA-Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen e.V., Frankfurt Vereinigung zur Förderung der Milchwissenschaftlichen Forschung an der TU München e.V., Freising Deutsche Gesellschaft für Membrantechnik e.V. (DGMT), Essen
Projektkoordinator:	Jens Lipnizki Suez WTS Germany GmbH, Ratingen
Laufzeit:	2020 – 2022
Zuwendungssumme:	€ 245.877,--

### Ausgangssituation

Das Ablösen proteinhaltiger Ablagerungen bei der Reinigung von Membranen in der lebensmittelverarbeitenden Industrie ist ein zeit-, chemikalien- und energieintensiver Prozess. Die sich bei der Filtration bildenden Deckschichten sind das Resultat eines zur Membran gerichteten Massentransfers und der Konzentrationspolarisation zurückgehaltener Stoffe, wie Proteine. Abhängig von den Filtrationsbedingungen, den Membraneigenschaften und der Zusammensetzung des Konzentrats kommt es zur Proteindenaturierung, Gelierung, Aggregation und zu Protein-Protein- oder Protein-Membran-Interaktionen. Die unmittelbare Folge der Deckschichtbildung ist die Abnahme des Flux, da der Filtrationswiderstand steigt, so dass häufiger gereinigt werden muss, um die Membranen von Ablagerungen zu befreien. Auch in der nachfolgenden Reinigung, der ein mehrstufiger Prozess ist, führt die Deckschicht zu Einbußen in der Effizienz.

Der erste Schritt der Reinigung ist das Ausschleiben des Produktes mithilfe von Wasser. Auf diesen physikalischen Schritt folgt in der Regel die chemische Reinigung unter Einsatz von alkalisch-enzymatischen und sauren Zusatzstoffen. Der Abtrag von Biopolymeren, wie Protein, als vorwiegend deckschichtbildendes Material obliegt dabei im Wesentlichen dem ersten Schritt der Cleaning-in-Place (CIP)-Reinigung, dem alkalischen Schritt.

Die Vorgänge während der Laugenreinigung können in drei Phasen gegliedert werden. In der Schwellphase reagieren die Proteine mit dem Reinigungsmittel und bilden eine hochporöse Matrix aus. Anschließend wird die Deckschicht solange gleichmäßig abgetragen, bis die Proteinmatrix ihren flächendeckenden Charakter verloren hat und durch Unterspülung sowie Flockenabtrag entfernt wird. Wie schnell diese Phasen abgeschlossen sind, hängt von dem Zusammenspiel der chemischen Faktoren (Reaktionsgeschwindigkeit) und der physikalischen Faktoren (Diffusionsgeschwindigkeit, Massentransfer und Wandschubspannung) ab.

Üblicherweise wird die CIP-Reinigung von Membranen, wie das Filtrieren selbst, im Crossflow-Modus, d.h. mit überströmten Membranen, durchgeführt. Für überströmte Körper, Rohre und Wärmeübertrager mit nichtporösen Wänden wurde bereits gezeigt, dass eine unstete Scherbeanspruchung zu einer verbesserten Ablösung von Ablagerungen führt. Da bei der CIP-Reinigung von Membranen wegen der Durchlässigkeit der Membranen zum einen eine Strömungskomponente in Richtung der Membranen die Entfernung von Ablagerungen erschwert, andererseits aber chemische Vorgänge den Prozessverlauf beeinflussen, ist eine Übertragung dieser Ergebnisse auf Membranen bisher noch nicht erfolgt.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, den Bedarf an Ressourcen, wie Zeit, Energie und Chemikalien, durch den Einsatz einer pulsierenden und alternierenden Strömung während der Reinigung zugunsten eines erhöhten strömungsmechanischen Anteils im Rahmen des SINNER-Kreises zu reduzieren bzw. die Reinigungseffizienz zu erhöhen.

### **Forschungsergebnis**

Im Rahmen des Projektes wurden in einer speziell konzipierten Pilotanlage Reinigungskinetiken von polymeren Mikrofiltrationsmembranen mit enzymfreien Reinigungsauflösungen bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen aufgenommen, um die für die Reinigung mit pulsierender/alternierender Strömung relevanten Reinigungsparameter zu identifizieren und untersuchen.

Es konnte gezeigt werden, dass Reinigung mit pulsierender oder alternierender Strömung den Proteinabtrag im Vergleich zu stetiger Reinigung um bis zu 103 % erhöhen kann. Als relevante Einflussfaktoren wurden unter anderem die Pulsationsfrequenz und -amplitude, die Deckschichtmenge/-intensität, die Strömungsbedingungen sowie die Membraneigenschaften identifiziert. Aufgrund des geringeren Aufwands zur Realisierung pulsierender Strömung bei gleichzeitig ähnlich ausgeprägten Verbesserungen im Vergleich zu alternierender Strömung gegenüber stetiger Strömung wurde dieser Strömungsform die höchste Reinigungseffizienz zugeschrieben. Es zeigte sich hierbei auch, dass mittels pulsierender Strömung die mechanischen Abtragungskräfte deutlich effizienter gesteigert werden können als über eine Erhöhung der Überströmgeschwindigkeit bei stetiger Strömung. Somit kann bei gleichzeitig höherem Proteinabtrag mittels pulsierender Strömung der Energiebedarf um 58 % reduziert werden. Besonders ausgeprägte Verbesserungen konnten mit Membranen mit Spacer festgestellt werden. Visuelle Untersuchungen der gereinigten Membranen bestätigten dabei die Hypothese, dass alternative Strömungsformen hier einen verbesserten Zugang zu Spacer-bedingten Strömungsschatten und somit einen deutlich verbesserten Abtrag ermöglichen.

In einem nächsten Schritt wurde eine bestehende Filtrationsanlage für die Verwendung pulsierender Strömung mit Membranmodulen im Industriemaßstab umgerüstet, um die industrielle Anwendbarkeit bzw. Umsetzbarkeit zu überprüfen. Auch hier konnte pulsierende Strömung den Proteinabtrag, trotz der geringeren Überströmgeschwindigkeiten im Vergleich zum Labormaßstab, signifikant um bis zu 45 % verbessern.

Im Übertrag der Versuche auf industrielle Reiniger konnten mögliche Einsparungen des RM oder der Reinigungsdauer um > 90 % für einen vergleichbaren Proteinabtrag beobachtet werden. Aufgrund des hier vorliegenden vereinfachten Reinigungsfalls mit Magermilch und vollentsalztem Wasser sollten diese Versuche allerdings im industriellen Anwendungsfall wiederholt werden, um die Ergebnisse zu bestätigen.

Des Weiteren konnten anhand der neu gewonnenen Erkenntnisse und Wahl geeigneter Rahmenbedingungen auch positive Effekte alternativer Strömungsformen auf die Filtrationsleistung (Verbesserung des Molkenproteinmassenstroms um > 74 % sowie der Permeatreinheit um 14 %) gezeigt werden. Die Hürde einer Umrüstung bestehender Anlagen im Sinne finanzieller und arbeitstechnischer Aufwendungen sollte durch die möglichen Verbesserungen der gesamten Prozesskette aus Filtration und Reinigung also deutlich leichter zu überwinden sein.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alternative Strömungsformen sowohl in der Cross-flow-Filtration als auch in der Membranreinigung das Potential haben, eine deutlich höhere Prozesseffizienz zu erreichen und somit auch die finanzielle und ökologische Nachhaltigkeit im Sinne eines spezifischen Energiebedarfs pro

erzielter Produktmenge bzw. pro erzieltm Proteinaustrag verbessern zu können. Dieses Potential hängt jedoch stark von Deckschicht- und Membraneigenschaften ab.

### **Wirtschaftliche Bedeutung**

Unternehmen in der Lebensmittel- wie auch in der Pharmaindustrie sind i.d.R. gezwungen, ihre Produktionsanlagen mindestens einmal täglich Cleaning-in-Place (CIP) zu reinigen, um den erforderlichen hygienischen Zustand zu gewährleisten. Diese CIP-Phasen nehmen ca. 3 h in Anspruch und beinhalten mitunter 2-3 chemische Reinigungs- und mehrere Spülschritte. Aufgrund der Häufigkeit der Reinigung kumulieren sich die Kosten durch Ausfall an Produktionszeit und durch die Verbrauchsmengen an Chemikalien und Energie (Warmwasser) in einer beträchtlichen Größenordnung. Es ist daher von großem wirtschaftlichem Interesse, die Filtrationseffizienz zu erhöhen sowie den Zeit-, Temperatur-, Energie- und Chemikalienbedarf der CIP-Zyklen zu reduzieren, um eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Herstellung zu erzielen.

Die Konzepte pulsierender und alternierender Strömung haben hierbei im Vergleich zu stetiger Strömung das Potential, für die Reinigung bei gleichzeitig höherem Proteinaustrag den Energiebedarf signifikant zu reduzieren sowie für die Filtration den innerhalb eines Produktionszyklus (bis zur nächsten Reinigung) erfolgten Permeatdurchsatz annähernd zu verdoppeln.

Von den Forschungsergebnissen werden insbesondere Unternehmen der Milchindustrie profitieren, da im Fokus der Untersuchungen Membranen zur Milchproteinfraktionierung standen. Die erwarteten Erkenntnisse werden sich prinzipiell auch auf andere Einsatzbereiche von Membranen in der Lebensmittel- und Biotechnologie übertragen lassen. Neben der Milchindustrie eröffnet sich die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Nutzung auch für KMU im Bereich des (Sonder-)Maschinen- und Anlagenbaus sowie der Bauteil- und Membranherstellung.

### **Publikationen (Auswahl)**

1. FEI-Schlussbericht 2022
2. Kürzl, C., & Kulozik, U.: Alternating flow direction improves chemical cleaning efficiency in hollow fibre membranes following skim milk microfiltration. *J. Food Engineering*, 356, 111587, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2023.111587.10.1016/j.fbp.2023.03.012, (2023).
3. Kürzl, C., Hartinger, M., Ong, P., Schopf, R., Schiffer, S., & Kulozik, U.: Increasing performance of spiral-wound modules (SWMs) by improving stability against axial pressure drop and utilising pulsed flow. *Membranes*, 13(9), 791, doi: 10.3390/membranes13090791, (2023).
4. Kürzl, C., & Kulozik, U.: Influence of pulsed and alternating flow on the filtration performance during skim milk microfiltration with flat-sheet membranes. *Sep. Pur. Technol.*, 321, 124234, doi: 10.1016/j.seppur.2023.124234, (2023).
5. Kürzl, C., & Kulozik, U.: Einsatz pulsierender und alternierender Strömung beim Cleaning-in-Place (CIP) von Membranen. *Jahresb. Milchwiss. Forsch.* 34-35, ISBN 978-3-947492-20-6, (2022).
6. Kürzl, C., Tran, T. & Kulozik, U.: Application of a pulsed crossflow to improve chemical cleaning efficiency in hollow fibre membranes following skim milk microfiltration. *Sep. Pur. Technol.* 302, 122123 (2022).
7. Kürzl, C., Wohlschläger, H., Schiffer, S. & Kulozik, U.: Concentration, purification and quantification of milk protein residues following cleaning processes using a combination of SPE and RP-HPLC. *MethodsX* 9, 101695 (2022).
8. Kürzl, C.: Einfluss des Reinigungserfolges auf die Filtrationsperformance und mikrobielle Vorbelastung bei der Mikrofiltration von Magermilch. *Jahresb. Milchwiss. Forsch.* ZIEL 64, 47-51, ISBN 978-3-947492-27-5 (2021).
9. Kürzl, C.: Einfluss von Kreislauf bzw. Durchlauf von Reinigungsmitteln auf die Reinigung von Mikrofiltrationsmembranen. *Jahresb. Milchwiss. Forsch.* ZIEL 63, 65-67, ISBN 978-3-947492-20-6 (2020).
10. Kürzl, C.: Einfluss kleinster Produktrückstände auf den Wasserfluss bei der Membranfiltration. *Jahresb. Milchwiss. Forsch.* ZIEL 62, 91-92, ISBN 978-3-947492-16-9 (2019).

## Weiteres Informationsmaterial

---

Technische Universität München  
Zentralinstitut für Ernährungs- und Lebensmittelforschung (ZIEL)  
Abt. Technologie  
Weihenstephaner Berg 1, 85354 Freising  
Tel.: +49 8161 71-4205  
Fax: +49 8161 71-4384  
E-Mail: christian.kuerzl@tum.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)  
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn  
Tel.: +49 228 3079699-0  
Fax: +49 228 3079699-9  
E-Mail: fei@fei-bonn.de

## Förderhinweis

---

### *... ein Projekt der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)*

Gefördert durch:



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wird/wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bildnachweis - Seite 1: © Christian Kürzl/TU München

Stand: 24. März 2025