

a: Biofilm auf einer UO-Membran (28-tägiger Wuchs).
 b und c: DAPI und Propidiumiodid-gefärbte Zellen auf der UO-Membran.

Hintergrund

Biofouling verursacht jährlich Schäden in Höhe von 15 Milliarden US-\$ allein in Entsalzungsanlagen. Die Ablagerung von Mikroorganismen, organischen und anorganischen Stoffen auf Umkehrosomemembranen führt zu der Bildung und Ausbreitung von **Biofilmen** (Abbildung a, links). Diese beeinflussen die Reinigungsleistung der Membran erheblich:

- **Flux und Permeabilität werden reduziert**
- **Permeatquantität und -qualität sinkt**
- **Kosten für Aufbereitungsprozess und Reinigung steigen**

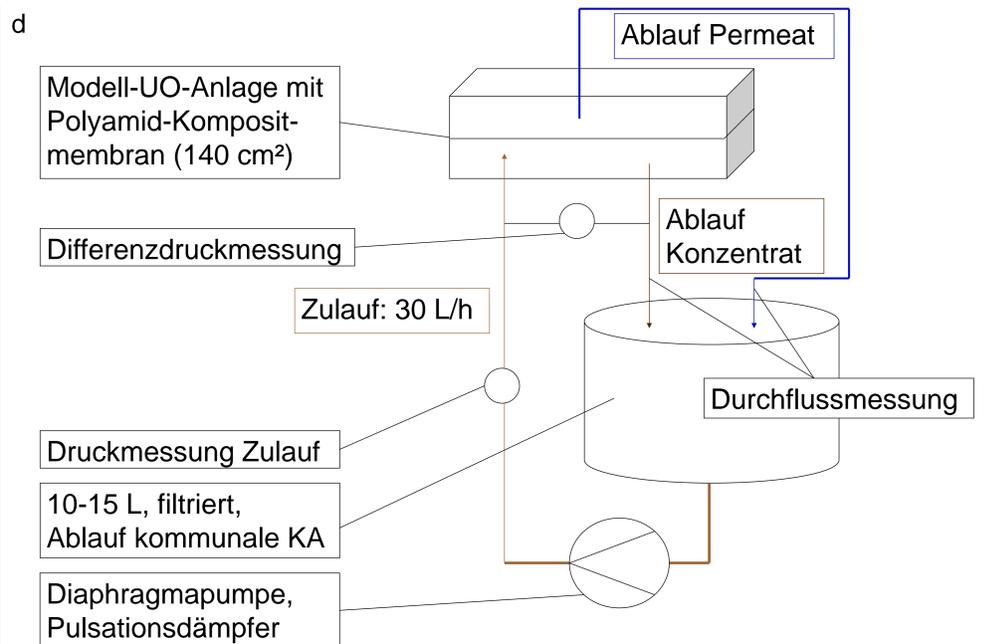
Die chemische Reinigung der Membran kann ihre Reinigungsleistung verbessern und wird bislang in zwei Stufen im Stillstand der Anlage durchgeführt: Natronlauge tötet die Mikroorganismen und löst sie aus der Membran, eine schwache Säure entfernt anschließend anorganische Stoffe.

Die Anwendung von **salpetriger Säure (HNO₂)** bei einem pH-Wert von 2 kann die Mikroorganismen töten und gleichzeitig auch anorganische Stoffe entfernen. Die Optimierung liegt in geringeren Stillstandzeiten und reduziertem Chemikalienbedarf, was zu Einsparungen in den Reinigungskosten und weniger Ausfällen führt.

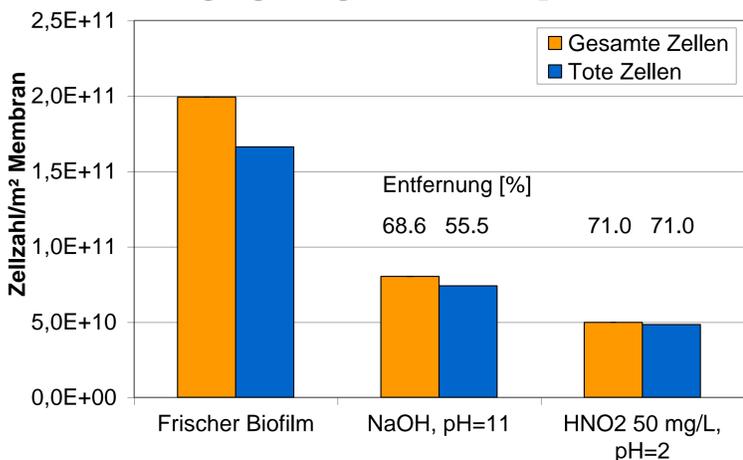
Versuche mit HNO₂

Reinigungsversuche mit HNO₂ als Reinigungssubstanz wurden durchgeführt. Der erforderliche Biofilm wurde auf 16 Polyamid-Kompositmembranen in einer Modell-UO-Anlage (Abbildung d, rechts) mit dem Ablauf einer kommunalen Kläranlage als Zulauf erzeugt (6-28 Tage). Die Entfernung des Biofilms fand in situ und ex situ statt. Eine Quantifizierung des Biofilms erfolgte vor und nach den Reinigungsversuchen über die Proteinkonzentration und die Anzahl der gesamten sowie der toten Zellen, um den Reinigungserfolg zu dokumentieren.

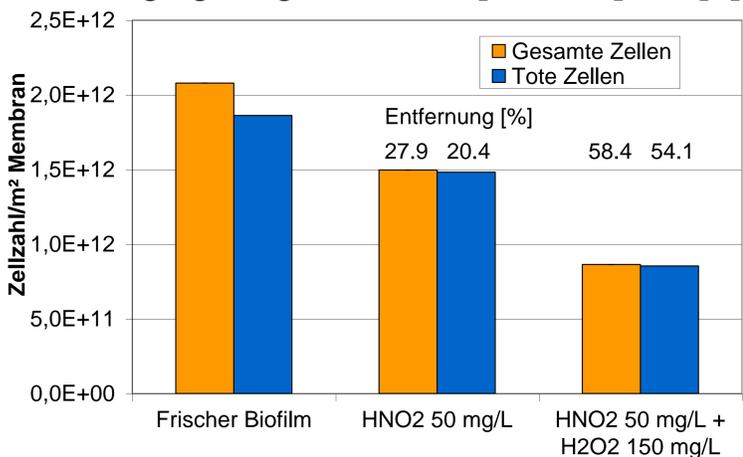
Die Quantifizierung der Zellen mit Hilfe der **Durchflusszytometrie** lieferte schnelle und gut reproduzierbare Ergebnisse für die Anzahl der gesamten und toten Zellen und wurde speziell für die Anwendung mit Biofilmpollen angepasst. Die Zellzahlen korrelierten mit der Abnahme von Flux und Permeabilität. Ergänzend wurden die mit DAPI und Propidiumiodid gefärbten Zellen fluoreszenzmikroskopisch auf ihre Verteilung auf der Membran untersucht (Abbildungen b und c, oben links).



e Anzahl der Zellen auf der Membran vor und nach der Reinigung - Vergleich von HNO₂ und NaOH



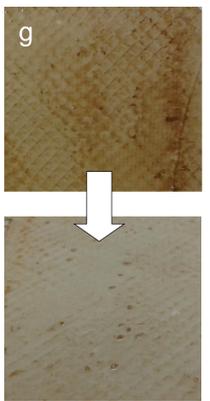
f Anzahl der Zellen auf der Membran vor und nach der Reinigung - Vergleich von HNO₂ und HNO₂ mit H₂O₂



Ergebnisse: Biofouling-Entfernung mit HNO₂

Von durchschnittlich $1,99 \cdot 10^{11}$ gesamten Zellen pro m² Membran nach 9-tägigem Wuchs des Biofilms konnten **71,0 % mit HNO₂ entfernt** werden (Abb. e, links). Parallel dazu wurde NaOH als Reinigungssubstanz getestet und entfernte 68,6 % der gesamten Zellen. Nach Reinigung mit HNO₂ waren **97 % der verbliebenen Zellen getötet**, mit NaOH 89 %. HNO₂ ist somit das effektivere Biozid und entfernt Zellen besser als NaOH.

Die Zugabe von H₂O₂ zu HNO₂ verbesserte die Reinigungsleistung erheblich (Abb. g, rechts). Nach 28-tägigem Wuchs des Biofilms entfernte **HNO₂ allein 27,9 %** der $2,08 \cdot 10^{12}$ Zellen (Abb. f, links unten). **HNO₂ und H₂O₂ entfernten 58,4 %** der Zellen eines dichten Biofilms. In beiden Fällen waren die verbliebenen Zellen zu **99 % getötet**.



g: UO-Membran vor und nach der Reinigung mit HNO₂ und H₂O₂.

Fazit

HNO₂ zur Entfernung von Biofouling auf Umkerhosmose-Membranen

- ist ein **effektiveres Biozid** als NaOH (97 % statt 89 % Anteil toter Zellen),
- entfernt die gesamten Zellen auf der Membran besser als NaOH (71,0 % statt 68,6 %),
- erfordert **kürzere Stillstandzeiten** für die Reinigung,
- erfordert **weniger Chemikalien**,
- ermöglicht **Kostensparnis** durch kürzeren Stillstand und Chemikalieneinsatz,
- ist in **Kombination mit H₂O₂** noch erfolgreicher, auch bei dichten Biofilmen.

Durchflusszytometrie zur Quantifizierung der gesamten und toten Zellen

- ermöglicht **schnelleres Zählen** als mit Fluoreszenzmikroskopie,
- liefert gut reproduzierbare Ergebnisse,
- bietet Ergebnisse, die mit der Abnahme von Flux und Permeabilität korrelieren