

Artikel

Dampfgetriebenes vernetztes Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin Elektrogesponnene Nanofasermembranen zur ultraschnellen Farbstoffentfernung

Xinmiao Xu, Yi Zhang, Yong Chen * und Yu Liu *

Fakultät für Chemie, Staatliches Schlüssellabor für Elementar-Organische Chemie, Nankai-Universität, Tianjin

300071, China * Korrespondenz: chen Yong@nankai.edu.cn (YC); yuliu@nankai.edu.cn (YL)

Zusammenfassung: Herkömmliche Trennmembranen zur Farbstoffentfernung leiden häufig unter einem Kompromiss zwischen Trennleistung und Wasserdurchlässigkeit. Hier schlagen wir einen einfachen Ansatz zur Herstellung von Cyclodextrin-basierten Hochfluss-Nanofasermembranen durch Elektrospinnen und dampfbetriebene Vernetzungsprozesse vor. Die Anwendung von Glutaraldehyddampf zur Vernetzung von elektrogesponnenen Membranen aus Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin (HP- β -CD)/Polyvinylalkohol (PVA)/Laponit kann miteinander verbundene Strukturen aufbauen und zur Bildung einer porösen hierarchischen Schicht führen. Darüber hinaus kann die Einarbeitung des anorganischen Salzes Laponit den Vernetzungsprozess verändern und Membranen mit verbesserter Hydrophilie und hochkonservierter elektrogesponnener Nanofasermorphologie ergeben, die zu einem ultraschnellen Wasserfluss von $1,0 \times 10^5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^2 \text{ bar}^{-1}$ beiträgt. Aufgrund des synergetischen Effekts der starken Wirt-Gast-Wechselwirkung und der elektrostatischen Wechselwirkung weisen die Membranen innerhalb kurzer Zeit eine geeignete Rückweisung anionischer Farbstoffe mit einer hohen Entfernungseffizienz von >99 % auf und erreichen eine genaue Trennung kationischer von anionischen Farbstoffen, begleitet von einer geeigneten Recyclingfähigkeit mit einer Trenneffizienz von >97 % nach mindestens vier Trennungs-Regenerationen. Die hergestellten Membranen mit bemerkenswerter Trenneffizienz und ultraschnellen Permeationseigenschaften könnten ein vielversprechender Kandidat für Hochleistungsmembranen in der Wasseraufbereitung sein.

Schlüsselwörter: Cyclodextrin; supramolekulare Adsorption; Elektrospinnen; Nanofasermembranen; ultraschnelle Permeation



Zitat: Xu, X.; Zhang, Y.; Chen, Y.; Liu, Y.

Dampfgetriebene vernetzte Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin-elektrogesponnene nanofaserige Membranen zur ultraschnellen Farbstoffentfernung. *Chemistry* **2024**, *6*, 506–516. <https://doi.org/10.3390/chemistry6040029>

Empfangen: 22. Mai 2024

Überarbeitet: 19. Juni 2024

Akzeptiert: 21. Juni 2024

Veröffentlicht: 25. Juni 2024



Copyright: © 2024 bei den Autoren.

Lizenznehmer MDPI, Basel, Schweiz.

Dieser Artikel ist ein Open Access-Artikel
vertrieben unter den Bedingungen und

Bedingungen der Creative Commons

Namensnennungslizenz (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Einleitung

Viele synthetische organische Farbstoffe, die in der Lebensmittel-, Kosmetik-, Leder- und Textilindustrie verwendet werden, sind mutagen und krebserregend [1,2]. Wasserökosysteme und die menschliche Gesundheit sind durch die weit verbreitete Freisetzung von Farbstoffabwässern im Zuge der schnell voranschreitenden Industrialisierung ernsthaft bedroht [3]. Es ist sehr wichtig, effiziente Techniken zur Farbstoffentfernung für die Abwasserbehandlung zu finden. Zahlreiche Taktiken wie chemische Oxidation [4], biologischer Abbau [5] und Adsorption [6,7] wurden gründlich untersucht. Unter diesen hat die Membrantrenntechnologie aufgrund ihrer Erschwinglichkeit, Benutzerfreundlichkeit und Umweltfreundlichkeit immer mehr Interesse geweckt [8]. Daher werden große Anstrengungen unternommen, um Hochleistungsmembranen zu entwickeln, die

gleichzeitig eine starke Rückweisung und einen hohen Fluss aufweisen [9,10]. β -Cyclodextrin (β -CD) ist kostengünstig und nachhaltig, besitzt den hydrophoben Hohlraum, um durch Wirt-Gast-Wechselwirkungen stabile Einschlusskomplexe mit bestimmten organischen Molekülen zu bilden und wird häufig zur Schadstoffadsorption eingesetzt [11–14]. Darüber hinaus kann durch die Verwendung des Hauptbausteins der Membranen, der intrinsischen Mikroporosität von β -CD, eine genaue Trennung durch Größenausschluss erreicht werden und als zusätzlicher Wassertransportkanal dienen [15,16]. Peinemann et al. entwickelten eine Methode mit Per-6-Amino- β -CDs anstelle von Diamin, die mit Terephthalsäurechlorid reagieren, um durch Grenzflächenpolymerisation eine Cyclodextrin-basierte Trennschicht zu bilden, die eine präzise formselektive Permeabilität und eine Wasserdurchlässigkeit von $20 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ zeigte [17]. Diese CD-basierten vernetzten Membranen, die durch traditionelle Grenzflächenpolymerisationsreaktionen in Lösung hergestellt werden, sind jedoch immer noch zu dicht, um einen schnellen Lösungsmitteltransport zu ermö-

Permeabilität und eine Wasserdurchlässigkeit von 20 $\text{Lm}^2\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$ [17]. Allerdings sind diese CD-basierten vernetzten Membranen, die durch traditionelle Grenzflächenpolymerisationsreaktionen in Lösung hergestellt werden, immer noch zu dicht, um einen schnellen Lösungsmitteltransport zu ermöglichen [18–21].

Zu den allgemeinen Methoden zur Koordinierung der Wasserdurchlässigkeit von Membranen gehören die Verbesserung der Hydrophilie der Membranoberfläche [22,23], die Einführung eines Wassertransferkanals

[24,25], die Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit von Membranen [26,27], die Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit von Membranen [27,28], die Verbesserung der Wasserdurchlässigkeit von Membranen [28,29],

nel [24,25] und die Erhöhung der spezifischen Oberfläche [26]. Elektrosponnen, als vielseitige und

Kostenersparnis-Methoden zur Herstellung hydrophiler Nanofasern, die mit einer Wassertransferrate

Verhältnis [24,25], und zur Erhöhung der spezifischen Oberfläche [26]. Elektrosponnen ist eine vielseitige

Regelmäßigkeit [28]. Natürlich ist es schwer, eine bestimmte Viskosität für das Elektrosponnen zu erreichen,

während das Polymer in HP- γ -CD mit hoher Wasserlöslichkeit in Rotationsfeldern in Wasser gelöst wird und

verschiedene elektrosponnenen Nanofasern eine bestimmte Viskosität für das Elektrosponnen nur schwer.

verschiedenen wässrigen Polymeren wird HP- γ -CD mit einer hohen Viskosität für das Elektrosponnen nur schwer.

Vernetzung sind, wenn die elektrosponnenen Nanofasern einen Unterschied in der Vernetzungsmethode zur Vernetzung der wasser

elektrosponnenen Nanofasern, die die Nanofasern vernetzen, und die chemische Vernetzung mit

Vernetzung mit Vernetzungsmitteln wie NHS/EDC [31,32] und thermische Vernetzung [30], die beide die wasserbasierten elektrosponnenen

Nanofasern und gefährliche Reagenzien. Auf der anderen Seite ist die Verwendung von

Glutaraldehyd (GA) als Vernetzungsmittel wie NHS/EDC [31,32] und thermische Vernetzung [30], die beide viel

zur Vernetzung kann die Betriebskomplexität erheblich reduzieren und Energie und gefährliche Reagenzien eliminieren.

Andererseits kann die Verwendung von Glutaraldehyd (GA) Dampf

bedarf an teuren und gefährlichen organischen Lösungsmitteln wie Hexan, was die Vernetzung verbessert, kann die

betriebl. Komplexität deutlich reduzieren und den Bedarf eliminieren.

Die Vernetzung ist ausreichend, um die Morphologie der wasserlöslichen Nanofasern hinsichtlich

Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit zu bewahren [33–35]. Wichtiger noch ist die Dampfphasenvernetzung

so weit wie möglich und schaffen eine vernetzte Struktur, die die Menge erhöht ist ausreichend, um die Morphologie der

wasserlöslichen Nanofasern in vollem Umfang zu bewahren

von Wassertransportkanälen und beschleunigt den Wasserfluss [36–38]. soweit

möglich und schaffen eine miteinander verbundene Struktur, die die Wassermenge erhöht

Da durch die Einlagerung von anorganischem Salz die Hydrophilie weiter verbessert werden kann, werden

auch dotiertes Laponit, ein billiger Ton mit negativen scheibenartigen Oberflächen und positiven Kanten, in Da die Einarbeitung

von anorganischem Salz die Hydrophilie weiter verbessern kann,

die Membranen [39,40]. Hier haben wir HP- γ -CD, PVA und Laponit auf Polyacrylat elektrosponnen, ebenfalls dotiertes

Ionitil (PAN)/Polyethylenimin (PEI) Elektrosponns substrat und verwendeten GA-Dampf- die

Membranen [39,40]. Hier haben wir HP- γ -CD, PVA und Laponit auf Polyacrylat- por als

Vernetzungsreagenz elektrosponnen, um mehrschichtige HP- γ -CD vernetzte Nanofasern

(CD- Ionitil (PAN)/Polyethylenimin (PEI) Elektrosponns substrat und verwendeten GA-Dampf- (CD-CNF)

(Abbildung 1a). Der relativ hohe Gehalt an HP- γ -CD war ein Hinweis darauf, dass die Verwendung von mehrschichtigen HP-

CD- γ -CD vernetzten Nanofasern (CD-CNF) als Vernetzungsreagenz zur Herstellung von mehrschichtigen HP- γ -CD vernetzten Nanofasern (CD-CNF)

Adsorptionskapazität mit starker Wirt-Gast-Wechselwirkung, während PVA an einer Membran fixiert war

(Abbildung 1a). Der relativ hohe Gehalt an HP- γ -CD stellte eine ausgeprägte

niedrige Konzentration zur Unterstützung des HP- γ -CD-dominierten Elektrosponnsprozesses. Die Massenadsorptionskapazität

mit starker Wirt-Gast-Wechselwirkung, während PVA auf eine niedrige Konzentration fixiert war, um den HP- γ -CD-dominierten

Elektrosponnsprozess zu unterstützen. Der Massenanteil von Laponit zu HP- γ -CD wurde von 0, 1 Gew.-%, 2 Gew.-% und 3

Gew.-% geändert, was den HP- γ -CD-dominierten Elektrosponnsprozess unterstützt. Der Massenanteil von

produzierte vier Arten von elektrosponnenen Membranen, CD/PVA/Lap0, CD/PVA/Lap1, CD/PVA/Lap2, CD/PVA/Lap3 und

CD/PVA/Lap4, Laponit zu HP- γ -CD wurde von 0, 1 Gew.-%, 2 Gew.-% und 3 Gew.-% geändert, was vier

elektrosponnenen Membranen, CD/PVA/Lap0, CD/PVA/Lap1, CD/PVA/Lap2, CD/PVA/Lap3 und

CD/PVA/Lap4 bezeichnet. Interessanterweise wurden die und CD/PVA/Lap3%

und die entsprechenden Membranen nach der Vernetzung als

dotiertes Laponit hatte einen Einfluss auf das Elektrosponnen und beeinflusste weiter die Dampf- als CD-CNF1, CD-CNF2,

CD-CNF3 und CD-CNF4. Interessanterweise hatte das dotierte Laponit

angetriebene Vernetzungsphase. Im salzvermittelten Vernetzungsprozess (Abbildung 1b,c) wirkt sich der Ex- Effekt auf das

Elektrosponnen aus und beeinflusst darüber hinaus die dampfgetriebene Vernetzungsphase.

Die Anwesenheit von Laponit würde die Vernetzungsreaktivität verringern und zu einer hohen Erhaltung der

im salzvermittelten Vernetzungsprozess (Abbildung 1b,c) wurde die Anwesenheit von Laponit

niedrig der ursprünglichen elektrosponnenen Nanofasern. Im Gegensatz zur kompakten Struktur herkömmlicher Fasern

verringern die Vernetzungsreaktivität und führen zu einer hohen Erhaltung der ursprünglichen elektrosponnenen

Im Gegensatz zu herkömmlichen Filtrationsmembranen wurde von unseren Nanofasermembranen erwartet, dass sie Ultra-

schneller Wasserfluss.

Von Nanofasermembranen wurde erwartet, dass sie einen ultraschnellen Wasserfluss erreichen.

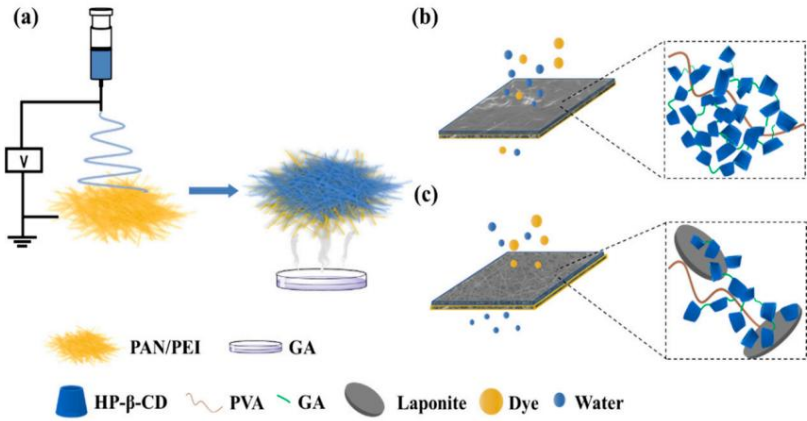


Abbildung 1. (a) Schematische Darstellung der Herstellung von HP- γ -CD- Nanofasermembranen. Schematische Darstellung des Vernetzungs- und Abwasserfiltrationsprozesses von CD-CNFs (b) ohne Laponit und (c) mit Laponit.

2. Materialien und Methoden

2.1. Materialien

Alle Reagenzien wurden ohne weitere Reinigung verwendet. Polyacrylnitril (PAN, durchschnittliches $M_w = 150.000$), Polyethylenimin (PEI, durchschnittliches $M_w = 45.000$, 50 %ige wässrige Lösung), Polyvinylalkohol (PVA, 99 % hydrolysiert, Polymerisationsgrad = 1700), Hydroxypropyl- β -Cyclodextrin (HP- β -CD, durchschnittlicher Substitutionsgrad = 7, $M_w = 1541,54$), Laponit, Glutaraldehyd (GA, 25 %ige wässrige Lösung) und Rinderserumprotein (BSA) wurden von Macklin Reagent Co., Ltd. (Tianjin, China) bezogen. Tropaeolin O, Indigokarmin, Carmoisin, Direktgelb 12, Reaktivschwarz 5, Basic Red 2, Rhodamin B, Kristallviolett und Thioflavin T wurden von Aladdin Reagent Company bezogen.

2.2. Herstellung von Nanofasermembranen

Elektrospinnen: 9,6 % w/v PAN und 2,4 % w/v PEI wurden in N, N-Dimethylformamid (DMF) gelöst und 6 h bei 80 °C gerührt, um eine homogene Lösung herzustellen. Insgesamt 8 ml der Lösung wurden in eine Spritze mit einem 20-Gauge-Messgerät mit einer Durchflussrate von 4 mL/h gefüllt.

und eine Hochspannung (15 kV) wurde angelegt. Der Abstand zwischen der Spritze und dem mit Aluminium (Al)-Folie beschichteten Kollektor betrug 20 cm, und die Rotationsgeschwindigkeit des zylindrischen Kollektors betrug 125 U/min. Insgesamt 1 g HP- β -CD, 80 mg PVA und verschiedene Gewichte von Laponit, 0 mg, 10 mg, 20 mg und 30 mg, entsprechend dem Gewichtsverhältnis zu HP- β -CD von 0, 1 %, 2 % und 3 %, wurden in 2 ml deionisiertem Wasser gelöst und jeweils über Nacht gerührt. Die obigen Lösungen wurden in die Spritze mit einer 23er-Gauge überführt und direkt auf die PAN/PEI-beschichtete Al-Folie elektrogenesponnen. Die Spannung wurde auf 25 kV eingestellt, und die Flussrate betrug 1 ml pro Stunde. Abhängig vom Verhältnis von Laponit zu HP- β -CD wurden die vier Membranarten als CD/PVA/Lap0, CD/PVA/Lap1%, CD/PVA/Lap2% und CD/PVA/Lap3% bezeichnet.

Insgesamt 20 ml GA-Lösung (25 %ige wässrige Lösung) in einer Petrischale wurden in einen Vakuumexsikkator gegeben, und die erhaltenen elektrogenesponnenen Nanofasern auf Al-Folie wurden über die Petrischale hinaus abgedeckt, ohne die Lösung zu berühren. Nach Anlegen des Vakuums für 24 h wurden die Membranen von der Folie entfernt, mehrere Minuten lang mit deionisiertem Wasser gewaschen und über Nacht bei 50 °C vakuumgetrocknet. Die vernetzten Membranen wurden als CD-CNF1 (CD/PVA/Lap0), CD-CNF2 (CD/PVA/Lap1 %), CD-CNF3 (CD/PVA/Lap2 %) und CD-CNF4 (CD/PVA/Lap3 %) dargestellt.

2.3. Charakterisierungsmethoden

Zur Erfassung der Oberflächenmorphologien von Nanofasermembranen wurde ein Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (Merlin Compact, Oberkochen, Deutschland) verwendet. Zur Erhöhung der Leitfähigkeit wurde eine dünne Goldschicht auf die Beschichtung aufgetragen. Die Beschleunigungsspannung betrug 30 kV. Die durchschnittlichen Durchmesser der Fasern wurden mit der Software Image J 1.46 r gemessen. Ein Fourier-Transformations-IR-Spektrometer (Bruker Tensor II, Ettlingen, Deutschland) wurde verwendet, um die IR-Spektren von Proben zwischen 4000 und 400 cm^{-1} bei Raumtemperatur zu erhalten. Die Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) wurde an einem Instrument (Kratos Analytical Ltd.-Axis Ultra DLD, Manchester, UK) durchgeführt, das mit einer monochromatisierten Al-K α -Röntgenquelle ausgestattet war. Die Daten wurden mit der CASA XPS-Software (Versionsnummer Casa2319PR1-0) analysiert. Die thermogravimetrische Analyse (TGA) wurde mit einem thermogravimetrischen Analysator (NET-ZSCH, Selb, Deutschland) im Temperaturbereich von 25 bis 800 °C bei einer Heizrate von 10 °C/min mit N₂ als Spülgas bei einer Flussrate von 25 mL min⁻¹ durchgeführt. Der Winkel (WCA) Der Wasserkontakt wurde mit einem Goniometer bestehend aus einem Analysator (Dataphysics OCA20, Filderstadt, Deutschland) bestimmt. Die Oberflächenladung der Membranen wurde mittels Zetapotenzialanalyse mit einem SurPASS 3 Elektrokinetic Analyzer-Instrument ausgewertet.

2.4. Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit

Die Gesamtporosität der hergestellten Membranen wurde mit der gravimetrischen Wassersorptionsmethode ermittelt. Die Membranen wurden in 10 mm × 10 mm große Stücke geschnitten. Das Trockengewicht (W_d) wurde ermittelt und die Membranen anschließend 24 h in deionisiertes Wasser eingeweicht.

Durch leichtes Abtupfen der Membranoberfläche mit Filterpapier, um Wasser zu entfernen, wurde das Gewicht der nassen Membranen (W_w) ermittelt. Der prozentuale Wassergehalt der Membranen wurde mit der Formel berechnet

$$\text{Wassergehalt \%} = \times 100 \frac{W_w - W_d}{W_d} \quad (1)$$

Nach dem Einweichen in deionisiertem Wasser für 24 h wurden die Membranen auf 20 mm × 20 mm große Quadrate zugeschnitten. Die Membranen wurden 10 min lang mit 1 bar vorgedrückt, um die Flussrate zu stabilisieren. Für die Leistungsanalyse wurden reines Wasser und organische Lösungsmittel, darunter Ethylalkohol, Petrolether und Dichlormethan, verwendet. Die Permeatflussrate (J) für alle hergestellten Membranen wurde mit Gleichung (2) berechnet.

$$J = \frac{Q}{t \cdot A} \quad (2)$$

Dabei bezeichnet Q das Volumen des durchgedrungenen gelösten Stoffes (in l), t die für die Permeation benötigte Zeit (in h) und A die effektive Filtrationsfläche der Membranen (in m^2).

2.5. Farbstofffiltrationsexperimente

Unter Verwendung einer Vakuumpumpe wurde eine Reihe von Filtrationsexperimenten mit einem Sackgassen-Sandkern eines Mikrolösungsmittelfiltergeräts durchgeführt. Bei den fünf anionischen Farbstoffen handelte es sich um Indigokarmin, Tropaeolin O, Reaktivschwarz 5, Direktgelb 12 und Carmoisin und bei den vier kationischen Farbstoffen um Basic Red 2, Kristallviolett, Rhodamin B und Thioflavin T. Die effektive Fläche der Membranen betrug 1,77 cm^2 . Die Farbstoffkonzentration war fest auf 25 μM eingestellt und das Volumen der Zulauflösung betrug 5 ml. Die Recyclingfähigkeit der Membranen wurde ebenfalls unter Verwendung der oben genannten fünf anionischen Farbstoffe (10 μM) bewertet und die Zulauflösung betrug jedes Mal 20 ml. Nach der Filtration wurden die Membranen in 1 mol/l NaOH-Lösung eingeweicht, 5 Minuten lang oszilliert und mehrere Male mit reinem Wasser gewaschen. Die Filtrations-/Regenerationszyklen wurden viermal wiederholt.

Antifouling-Experimente wurden unter Verwendung einer wässrigen BSA-Lösung (500 ppm) als Modellfoulant bei 1 bar durchgeführt. Insgesamt wurden jedes Mal 40 ml 500 ppm BSA-Zufuhrlösung verwendet, um den Permeatfluss zu erreichen, und die Membranen wurden eine Minute lang mit deionisiertem Wasser gewaschen. Die Prozesse wurden viermal wiederholt. Der anfängliche Wasserfluss wurde als J_w gewählt und der Fluss nach einem Zyklus als J_0 . Der Wasserfluss nach dem Waschen mit reinem Wasser wurde als $J_{w,1}$ bezeichnet. Die Leistung aller Membranen wurde 4 Zyklen lang untersucht.

Unter Verwendung der Gleichungen (3) und (4) wurden die erhaltenen Flusswerte verwendet, um den Gesamtverschmutzungsprozentsatz (FT) % und den Wiederherstellungsprozentsatz (FRR) % abzuschätzen.

$$FT(\%) = \frac{J_w - J_0}{J_w} \times 100 \quad (3)$$

$$FRR(\%) = \frac{J_{w,1}}{J_w} \times 100 \quad (4)$$

3. Ergebnisse

3.1. Strukturelle und morphologische Charakterisierungen der CD-CNFs

Die FTIR-Spektren der Membranen CD/PVA/Lap0, CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 und CD-CNF4 sind in Abbildung 2a dargestellt. Die Dehnungsschwingungsadsorption von Mg-OH aus Laponit trat bei 655 cm^{-1} in den Membranen CD-CNF2, CD-CNF3 und CD-CNF4 auf. Darüber hinaus erschien der charakteristische Peak von 2240 cm^{-1} von -C $\equiv$ N in der Substratschicht in CD-CNF2, CD-CNF3 und CD-CNF4, verursacht durch den am Elektrospleinprozess des Laponits beteiligten Prozess, der Oberflächendefekte erzeugte. Mit Ausnahme von CD/PVA/Lap0 erschien in CD-CNFs ein neuer Peak bei 2820 cm^{-1} , der zur Streckschwingung von CH in der Acetalbindung gehörte, und die OH-Streckadsorption bei 3200–3600 cm^{-1} nahm ab, was darauf hindeutet, dass die Hydroxylgruppen in HP- γ -CD und PVA mit Aldehydgruppen aus GA reagierten. Die Peaks

traten in CD-CNFs auf, die zur Streckschwingung von CH in der Acetalbindung gehören, und die OH-Streckadsorption bei 3200–3600 cm^{-1} nahm ab, was darauf hindeutet, dass die Hydroxylgruppen in HP- γ -CD und PVA mit Aldehydgruppen aus GA reagierten. Die Peaks bei 1030 cm^{-1} , 1252 cm^{-1} und 586 cm^{-1} , die HP- γ -CD zugeschrieben werden, blieben nahezu unverändert, was darauf hindeutet, dass bei 1030 cm^{-1} 1252 cm^{-1} und 586 cm^{-1} , die HP- γ -CD zugeschrieben werden, blieben nahezu unverändert. Dies zeigt, dass die charakteristische Struktur des Cyclodextrins auch nach der Vernetzung erhalten blieb. Nach der Behandlung mit GA-Dampf entstand der Adsorptionspeak bei 1729 cm^{-1} , der auf die Schwingungs-Peak für Carbonyl, wo die Membran ohne Laponit (CD-CNF1) ...

höchste Intensität, was zeigt, dass das dotierte Salz den Vernetzungsprozess behindern könnte. höchste Intensität, was zeigt, dass das dotierte Salz den Vernetzungsprozess behindern könnte.

Nach der GA-Behandlung (Abbildung S1) verschwand der der -NH-Gruppe zugeschriebene Peak bei 1561 cm^{-1} in PEI.

erschien, was darauf hindeutet, dass die Vernetzungsreaktion in der Substratmembran stattfindet. In der TGA-Ergebnisse (Abbildung 2b), die Verdunstung von Lösungsmitteln, einschließlich DMF und Wasser, verursachte der Gewichtsverlust unter 300 °C. Der Massenverlust-Peak bei 367 °C gehörte zur Zersetzung der Temperatur von HP- γ -CD. Alle CD-CNF-Membranen waren mit besseren thermischen Stabilität als CD/PVA/Lap0, und CD-CNF1 zeigte am besten in Bezug auf den Gewichtsverlust Bühne Stabilität zwischen 350 °C und 400 °C. Die Ergebnisse zeigten, dass die thermische Stabilität von CD-CNFs zwischen 350 °C und 400 °C liegt. Die Ergebnisse zeigten, dass die thermische Stabilität von

CD-CNFs nahmen mit zunehmender Laponitmenge ab.

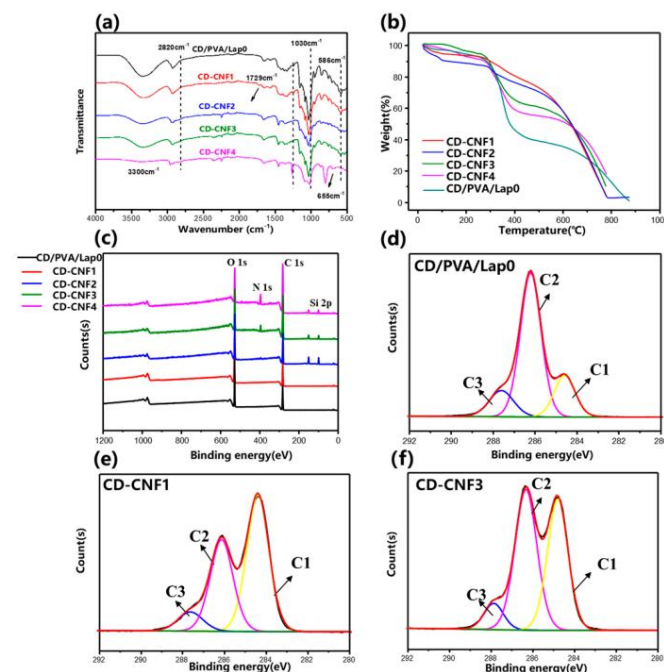


Abbildung 2. (a) FTIR-Spektren und (b) TGA-Kurven von CD/PVA/Lap0 und CD-CNFs. (c) XPS-Breitbild-Spektren und dekonvolvierte XPS-Spektren auf C 1s-Kernniveaus für (d) CD/PVA/Lap0, (e) CD-CNF1 und (f) CD-CNF3-Membranen. Die Gruppen, die der C-2- und C-3-Becken zugeordnet werden könnten, sind CC und CH für C1, CO, C=O, C=N, C=C und C=O für C2 sowie C=O und C=O für C3 [19].

Um Einblick in den Vernetzungsprozess zu erhalten, wurde Röntgen-Photoelektronenspektroskopie eingesetzt. Die Ergebnisse des Wide-Scans von CD/PVA/Lap0 (Abbildung 2c) zeigten, dass in allen Membranen die Hauptspitzen von C 1s und O 1s bei 285 eV und 532 eV auftraten. Das Element Si wurde auf den Membranen mit Zusatz von Laponit bei 150 eV und 99,7 eV nachgewiesen. Bei Zugabe von Lapo-Si wurde auf den Membranen Si bei 150 eV und 99,7 eV nachgewiesen. Darüber hinaus trat bei CD-CNF3 und CD-CNF4 der Bindungsenergiepeak bei 400 eV auf, der dem N-Element des Substrats zugeordnet wurde, was die Existenz von Oberflächendefekten bestätigte. Zum N-Element des Substrats traten auf, was die Existenz von Oberflächendefekten in der HP- γ -CD-Schicht bestätigte. Die dekonvolvierten C 1s XPS-Kernniveauspektren von CD/PVA/Lap0 und CD-CNFs zeigten (Abbildung 2d–f; Abbildung S3a,b), dass nach der Vernetzung C1(CC, CH)-Spitzenintensität nahm zu und C2(CO)-Spitzenintensität nahm in CD-CNF1 ab. Die Peakintensität nahm zu und die C2(CO)-Peakintensität sank in CD-CNF1. Mit zunehmendem Laponitgehalt neigte das Verhältnis von C1/C2 dazu, zu sinken, was auf eine geringere Vernetzung hindeutet. Mit zunehmendem Laponitgehalt nahm das C1/C2-Verhältnis tendenziell ab, was auf einen niedrigeren Vernetzungsgrad hindeutet.

Der Vernetzungsprozess hatte direkte Auswirkungen auf die Morphologie der Membranen. Die Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie (SEM) der Oberflächenmorphologie von HP- γ -CD-Schichten vor und nach der GA-Dampfbehandlung sind in Abbildung S4 dargestellt. Mit einem erhöhten Massenanteil von Laponit zu HP- γ -CD, der Durchmesser der elektrogesponnenen Nanofasern erhöhte sich

Hydrophilie ist auch ein wichtiger Faktor in Zusammenhang mit der Wasserdurchlässigkeit. Das Wasser-Wasserkontaktwinkel des PAN/PEI-Substrats und der Glycerol-Diole-Extremer-Schichten sind in Abbildung 6a gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass alle Membranen superhydrophil waren, da Wasser Tröpfchen könnten nicht stabil auf der Oberfläche verbleiben und würden in die Membranen eindringen innerhalb von Sekunden oder weniger. Der Wasserkontaktwinkel in den ersten 0,5 s wurde mit 104,3° gemessen für PAN/PEI-Substrat, 69,1° für CD-CNF1, 63,1° für CD-CNF2, 45,1° für CD-CNF3 und 51,5° für CD-CNF4. Die Oberflächenrauheit verursachte die Hysterese der Permeation und

dauerhaft auf der Oberfläche verbleiben können und innerhalb von Sekunden oder weniger in die Membranen eindringen. Der Wasserkontaktwinkel in den ersten 0,5 s betrug 104,3° für PAN/PEI-Substrat, 69,1° für CD-CNF1, 63,1° für CD-CNF2, 45,1° für CD-CNF3 und 51,5° für CD-CNF4. Die Oberflächenrauheit verursachte die Hysterese der Permeation, und der Wasserkontaktwinkel für CD-CNF4 war höher als für CD-CNF3. Die obigen Ergebnisse zeigten, dass das dotierte Laponit die Hydrophilie der Membranen verbessern konnte.

Der Wasserkontaktwinkel für CD-CNF4 war höher als für CD-CNF3. Die obigen Ergebnisse zeigten, dass das dotierte Laponit die Hydrophilie der Membranen verbessern konnte.

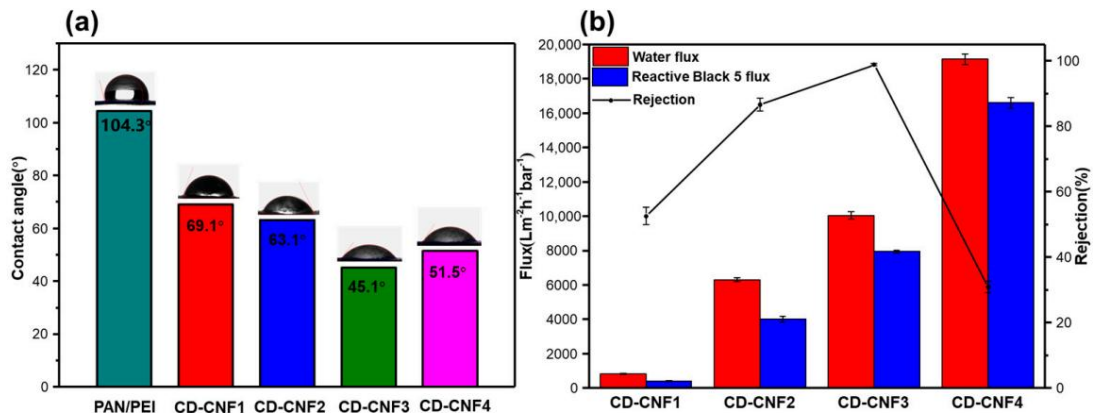


Abbildung 4. (a) Der Wasserkontaktwinkel von PAN/PEI, CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 und CD-CNF4

Abbildung 4. (a) Der Wasserkontaktwinkel von PAN/PEI, CD-CNF1, CD-CNF2, CD-CNF3 und CD-CNF4 Membranen; **(b)** Durchlässigkeit für reines Wasser, Durchlässigkeit und Rückhalt der Reactive Black 5-Lösung (10⁻⁵ mol L⁻¹) der CD-CNF1-, CD-CNF2-, CD-CNF3- und CD-CNF4-Membranen

Dank der verbesserten Hydrophilie und hohen Porosität können CD-CNF-Membranen zeigten alle einen überraschend ultraschnellen Wasserfluss. Der Permeatfluss von CD-CNF1, CD-CNF2, Aufgrund der verbesserten Hydrophilie und der hohen Porosität wurden für CD-CNF1, Membranen für reines Wasser CD-CNF3 und CD-CNF4 mit 815 ± 45 , 6308 ± 118 , Membranen zeigten alle einen überraschend ultraschnellen Wasserfluss. Der Permeatfluss von CD-CNF1

CD-CNF2, CD-CNF3 und CD-CNF4 für reines Wasser wurden mit 815 ± 45 , 6308 ± 118 , $10,047 \pm 221$ bzw. $19,142 \pm 905$ Lm⁻²h⁻¹bar⁻¹ (Abbildung 4b). Der inhärente Hohlraum CNF2, CD-CNF3 und CD-CNF4 für reines Wasser wurden mit 815 ± 45 , 6308 ± 118 , $10,047 \pm 221$ bzw. $19,142 \pm 905$ Lm⁻²h⁻¹bar⁻¹ (Abbildung 4b). Die Beschleunigung der Wasserbewegung bot reichlich Cyclodextrin und die vernetzte CD-CNF-Fluss des organischen Lösungsmittels (Tabelle S1). Beispielsweise betrug der Fluss der CD-CNF3-Membran für Dichlormethan $11,842 \pm 1,1$ Lm⁻²h⁻¹bar⁻¹ die Anwendung der Membranen zur Farbstofffiltration zeigte die CD-CNF3-Membran einen Fluss von 7942 ± 81 Lm⁻²h⁻¹bar⁻¹ für Reactive Black 5-Lösung (10⁻⁵ mol L⁻¹) mit anionischen Farbstoffen (Tropaeolin O, Indigo Carmine, Carmoisine, Direct Yellow 12 und Reactive Schwarz 5) (Abbildung 5a). Bei einer Konzentration von $2,5 \times 10^{-5}$ mol

Die Abstoßungsleistung der CD-CNF-Membranen gegenüber anderen CD-CNF-Membranen eine anionische Farbstoffe (Tropaeolin O, Indigo Carmine, Carmoisine, Direct Yellow 12 und Reactive Schwarz 5) (Abbildung 5a). Wenn die Konzentration der Farbstoffe auf $2,5 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹ festgelegt wurde, sind die Trennmechanismen elektrostatischer Effekt und Molekularsiebung [37]. Molekularsiebung, die Siebung den Hohlraum von HP- γ -CD umfasste und das Einfangen durch die nanofaserige Struktur erfolgte. ultraschnelle Permeation. Beispielsweise wurden 20 ml Carmoisin-Lösung filtriert, um Porosität zu erreichen. Aufgrund seines schnellen Transits und der minimalen Interaktion mit Verunreinigungen ist CD-CNF4, farblores Wasser durch CD-CNF3 in 10 s (Abbildung 5b; Video S1). Die beiden Trennungsarten, die am wenigsten vernetzte der drei, zeigten eine niedrige Farbstoffrückweisungsrate zwischen 30 und 60 %. Mechanismen sind der elektrostatische Effekt und die Molekularsiebung [37]. Die Molekularsiebung umfasste insbesondere der Hohlraum von HP- γ -CD und das Einfangen durch die nanofaserige Struktur. Die beiden Trennungsarten zeigten CD-CNF1-, CD-CNF2- und CD-CNF3-Membranen eine hohe Abstoßungsleistung gegenüber anderen CD-CNF-Membranen.

Aufgrund seines schnellen Transits und der minimalen Interaktion mit Verunreinigungen ist CD-CNF4, farblores Wasser durch CD-CNF3 in 10 s (Abbildung 5b; Video S1). Die beiden Trennungsarten, die am wenigsten vernetzte der drei, zeigten eine niedrige Farbstoffrückweisungsrate zwischen 30 und 60 %. Mechanismen sind der elektrostatische Effekt und die Molekularsiebung [37]. Die Molekularsiebung umfasste insbesondere der Hohlraum von HP- γ -CD und das Einfangen durch die nanofaserige Struktur. Die beiden Trennungsarten zeigten CD-CNF1-, CD-CNF2- und CD-CNF3-Membranen eine hohe Abstoßungsleistung gegenüber anderen CD-CNF-Membranen. Die am meisten vernetzte der drei Membranen positiv geladene (Abbildung S10). Das CD-CNF4 war weniger positiv geladen aufgrund der Agglomeration des Tons. CD-CNF1 und CD-CNF2, die Membranen mit weniger elektrostatischer Wechselwirkung (weniger Laponit) zeigten eine moderate Rückweisungsrate von etwa 80 % gegenüber anderen Farbstoffen, während bei CD-CNF3 eine salzvermittelte Vernetzung

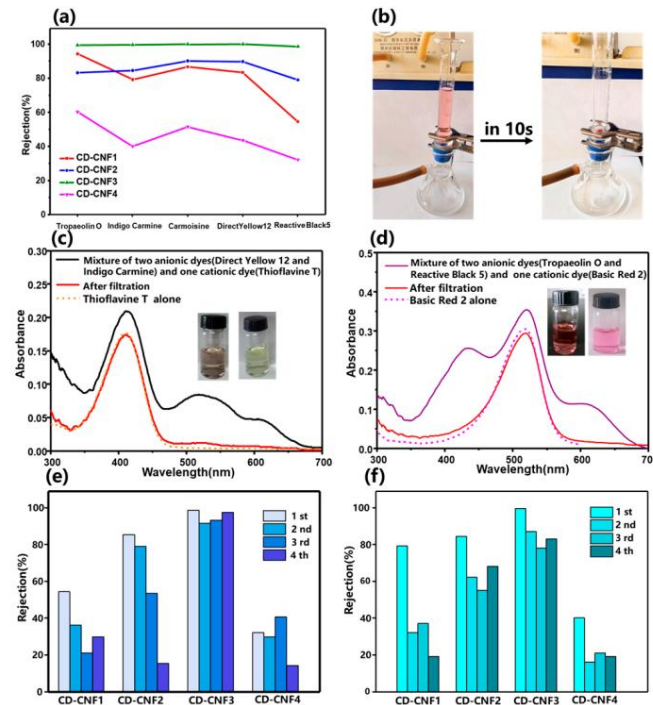


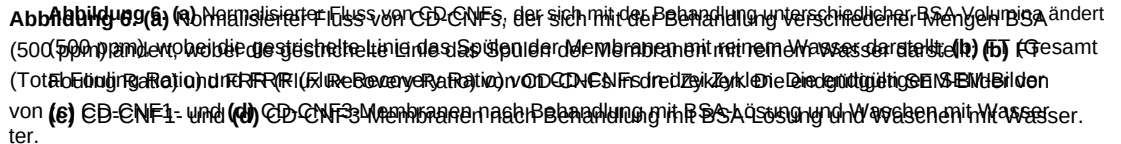
Abbildung 5. (a) Ablehnung von CD-CNFs gegenüber Tropaeolin O, Indigokarmin, Carmoisin, Direkt Yellow 12 und Reactive Black 5-Lösung (die Konzentration der Farbstoffe wurde auf $2,5 \times 10^{-5}$ mol festgelegt); (b) Filterausrüstung und Foto von Carmoisin (10^{-5} mol/L) vor und nach der Filtration; (c) UV-Vis-Spektrum einer Mischung aus Direktgelb 12 (5×10^{-6} mol/L) und Indigokarmin (5×10^{-6} mol/L) vor und nach der Filtration mit CD-CNF3; (d) UV-Vis-Spektrum einer Mischung aus Tropaeolin O (5×10^{-6} mol/L) und Reactive Black 5 (5×10^{-6} mol/L) vor und nach der Filtration mit CD-CNF3; (e) UV-Vis-Spektrum einer Mischung aus Tropaeolin O (5×10^{-6} mol/L) und Reactive Black 5 (5×10^{-6} mol/L) vor und nach der Filtration mit CD-CNF3; (f) UV-Vis-Spektrum einer Mischung aus Tropaeolin O (5×10^{-6} mol/L) und Reactive Black 5 (5×10^{-6} mol/L) vor und nach der Filtration mit CD-CNF3.

Darüber hinaus zeigten die Membranen eine ausgezeichnete elektrostatische Abstoßung. Darüber hinaus zeigten geringere Rückhalteigenschaften gegenüber kationischen Farbstoffen (Abbildung S11). Daher können die Membranen zur Trennung von kationischen und anionischen Farbstoffen verwendet werden. Die Trennfähigkeit von CD-CNF3 wurde mit einer Mischung aus zwei anionischen Farbstoffen und einem kationischen Farbstoff getestet, um eine ausgezeichnete Rückweisung für zwei anionische Farbstoffe (Direktgelb 12, Indigokarmin) und einen kationischen Farbstoff (Thioflavin T) im Filtrat zu erreichen (Abbildung 5c). Ähnliche Ergebnisse wurden mit verschiedenen Mischungen von Mischfarbstoffen von Reactive Black 5, Tropaeolin O und Basic Red 2 (Abbildung 5d) erzielt. Das CD-CNF3 zeigte auch eine schnelle Trennung, wie im Video gezeigt, dass 10 mL Farbstoffmischungs-Lösung in 8 Sekunden durch die Membran gelangen konnten (Video S2). Die Membranen nach der Farbstofffiltration konnten einfach mit NaOH-Lösung gewaschen und wiederverwendet werden. Nach vier Filtrations-/Regenerationszyklen (Abb. 5e, f) wiesen die Membranen gegenüber Reactive Black 5 immer noch eine Rückweisung von 97,4 % auf. Darüber hinaus zeigte die CD-CNF3-Membran auch eine geeignete Rückweisung für drei andere anionische Farbstoffe in vier Filtrations-/Regenerationszyklen (Abbildung S12), mit einer Rückweisung von 98 % gegenüber Tropaeolin O nach vier Filtrationszyklen, was die universelle Recyclingfähigkeit der Membranen für die Filtration anionischer Farbstoffe zeigt.

3.3. Die Antifouling-Eigenschaften der CD-CNFs

Kommerzielle Trennmembranen mit inhärenter Hydrophobie weisen häufig ein Fouling von Biomakromolekülen auf [34]. Die Oberflächenhydrophilie unserer Membranen wurde deutlich erhöht. Es wurde untersucht, wie das Volumen der BSA-Lösung die Penetration der Membran unter Verwendung von BSA als Modellbiomakromolekülverschmutzung beeinflusst.

CD-CNF3-Membran



4. Diskusjon

Ergänzende Materialien: Die folgenden ergänzenden Informationen können unter [https](https://www.forschungszentrum-wasser.de/de/aktuelles/aktuelle-projekte/aktuelle-projekte-2023/2023-01-24-aktuelle-projekte-2023) heruntergeladen werden:

[//www.mdpi.com/article/10.3390/chemistry6040029/s1](https://www.mdpi.com/article/10.3390/chemistry6040029/s1), Abbildung S1: FTIR-Spektren von Substratmembranen ; Abbildung S2: SEM von Substratmembranen; Abbildung S3: Auf C 1s-Kernebene dekonvolutierte XPS-Spektren für CD-CNF2- bzw. CD-CNF4-Membranen; Abbildung S4: SEM-Ergebnisse und Nanofaserdurchmesser Verteilung von CD-CNFs; Abbildung S5: Querschnittsbilder von CD-CNFs; Abbildung S6: Die SEM-Ergebnisse der Membranen nach dem Einweichen in Wasser; Abbildung S7: Der Wassergehalt der CD-CNF-Membranen; Abbildung S8: Fotografien der hergestellten Membranen nach der Filtration; Abbildung S9: UV–Vis-Spektrum von anionische Farbstoffe nach CD-CNF-Filtration; Abbildung S10: Das Oberflächen-Zetapotenzial der CD-CNFs bei pH 7;

Abbildung S11: UV–Vis-Spektrum kationischer Farbstoffe nach CD-CNF-Filtration; Abbildung S12: Die Zurückweisung von CD-CNF-Membranen für drei Farbstoffe in vier Filtrations-/Regenerationszyklen; Tabelle S1: Permeanzen von CD-CNFs für drei Arten organischer Lösungsmittel; Video S1: Der Filtrationsprozess einer Carmoisin-Lösung durch eine CD-CNF3-Membran; Video S2: Die Trennung gemischter Farbstoffe durch eine CD-CNF3-Membran.

Beiträge der Autoren: Konzeptualisierung, XX und YC; Methodik, XX und YZ; Validierung, XX; formale Analyse, XX und YZ; Untersuchung, XX; Ressourcen, XX; Datenkuratierung, XX; Schreiben – Vorbereitung des Originalentwurfs, XX; Schreiben – Überprüfung und Bearbeitung, XX, YC und YL; Projektverwaltung, YC und YL; Mittelbeschaffung, YC. Alle Autoren haben die veröffentlichte Version des Manuskripts gelesen und stimmen ihr zu.

Finanzierung: Diese Forschung wurde von der National Natural Science Foundation of China (Zuschuss- Nr. 22131008), dem Haihe Laboratory of Sustainable Chemical Transformation und den Fundamental Research Funds for the Central Universities (Nankai University) finanziert.

Datenverfügbarkeitserklärung: Die in dieser Studie präsentierten Daten sind auf Anfrage beim entsprechenden Autor erhältlich.

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Verweise

- Lin, J.; Ye, W.; Xie, M.; Seo, DH; Luo, J.; Wan, Y.; Van der Bruggen, B. Umweltauswirkungen und Sanierung von farbstoffhaltigem Abwasser. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2023**, *4*, 785–803. [\[CrossRef\]](#)
- Shanker, U.; Rani, M.; Jassal, V. Abbau gefährlicher organischer Farbstoffe im Wasser durch Nanomaterialien. *Environ. Chem. Lett.* **2017**, *15*, 623–642. [\[CrossRef\]](#)
- Tkaczyk, A.; Mitrowska, K.; Posyniak, A. Synthetische organische Farbstoffe als Schadstoffe in der aquatischen Umwelt und ihre Auswirkungen für Ökosysteme: Eine Übersicht. *Sci. Total Environ.* **2020**, *717*, 137222. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Samuchiwal, S.; Naaz, F.; Kumar, P.; Ahammad, SZ; Malik, A. Lebenszyklusanalyse der sequentiellen mikrobiellen anaeroben- aeroben Reaktortechnologie, die vor Ort zur Behandlung von Textilabwässern entwickelt wurde. *Environ. Res.* **2023**, *234*, 116545. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Giannakis, S. Ein Überblick über die Konzepte, jüngsten Fortschritte und Nischenanwendungen des (Foto) Fenton-Verfahrens, über die Wasser- /Abwasserbehandlung hinaus: Oberflächenfunktionalisierung, Biomassebehandlung, Krebsbekämpfung und andere medizinische Anwendungen. *Appl. Catal. B Environ.* **2019**, *248*, 309–319. [\[CrossRef\]](#)
- Yan, J.; Huang, Y.; Miao, YE; Tjiu, WW; Liu, T. Mit Polydopamin beschichtete elektrogenesponnene Polyvinylalkohol-/Polyacrylsäuremembranen als effizientes Farbstoffadsorbent mit guter Recyclingfähigkeit. *J. Hazard. Mater.* **2015**, *283*, 730–739. [\[CrossRef\]](#)
- Leudjo Taka, A.; Fosso-Kankeu, E.; Pillay, K.; Yangkou Mbianda, X. Mit Metallnanopartikeln dekorierter phosphorylierter Kohlenstoffnanoröhren- /Cyclodextrin-Nanoschwamm zur Adsorption von Trichlorethylen und Kongorot-Farbstoff aus Abwasser. *J. Environ. Chem. Eng.* **2020**, *8*, 103602. [\[CrossRef\]](#)
- Sarkar, P.; Modak, S.; Karan, S. Ultraschall- und hochdurchlässige Polyamid-Nanofilme für ionische und molekulare Nanofiltration. *Adv. Funct. Mater.* **2021**, *31*, 2007054. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, L.; Guan, H.; Zhang, N.; Jiang, B.; Sun, Y.; Yang, N. Eine lockere NF-Membran durch Aufpfropfen von TiO₂-HMDI-Nanopartikeln auf PES/γ-CD-Substrat zur Farbstoff-/Salztrennung. *Sep. Purif. Technol.* **2019**, *218*, 8–19. [\[CrossRef\]](#)
- Karki, S.; Gohain, MB; Yadav, D.; Thakare, NR; Pawar, RR; Hazarika, S.; Ingole, PG Aufbau schneller Wassertransportkanäle innerhalb dünner Nanokompositmembranen auf Basis von 2D-mesoporösen Nanoschichten. *Desalination* **2023**, *547*, 116222. [\[CrossRef\]](#)
- Xu, W.; Chen, Y.; Xu, W.; Wu, X.; Liu, Y. Elektrospinnen eines orientierten, selbstreinigenden, porösen, vernetzenden Polymers für effiziente Farbstoffe Entfernung. *Adv. Mater. Interfaces* **2020**, *7*, 2001050. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, W.; Zheng, Z.; Lin, L.; Zhang, X.; Bae, M.; Lee, J.; Xie, J.; Diao, G.; Im, H.-J.; Piao, Y.; et al. Ultraschnelle Synthese eines Graphen-eingebetteten Cyclodextrin-Metall-Organischen-Gerüsts für supramolekulare selektive Absorption und Superkondensatorleistung. *Adv. Sci.* **2023**, *10*, 2304062. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Zhang, S.; Zhou, J.; Li, H. Mit chiralen kovalenten organischen Gerüsten gepackte Nanokanalmembran zur Enantioseparation. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202204012. [\[CrossRef\]](#)
- Zhang, S.; Boussouar, I.; Li, H. Selektive Erfassung und Transport in bionischen Nanokanälen basierend auf makrozyklischer Wirt-Gast-Chemie. *Chin. Chem. Lett.* **2021**, *32*, 642–648. [\[CrossRef\]](#)
- Jiang, Z.; Dong, R.; Evans, AM; Biere, N.; Ebrahim, MA; Li, S.; Anselmetti, D.; Dichtel, WR; Livingston, AG Ausgerichtete Makrocyclenporen in ultradünnen Filmen für genaues Molekularsieben. *Nature* **2022**, *609*, 58–64. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Alsbaiee, A.; Smith, BJ; Xiao, L.; Ling, Y.; Helbling, DE; Dichtel, WR Schnelle Entfernung organischer Mikroverunreinigungen aus Wasser durch ein poröses γ-Cyclodextrin-Polymer. *Nature* **2016**, *529*, 190–194. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Huang, T.; Puspasari, T.; Nunes, SP; Peinemann, K.-V. Ultradünne 2D-geschichtete Cyclodextrinmembranen für Hochleistungs- Nanofiltration organischer Lösungsmittel. *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 1906797. [\[CrossRef\]](#)
- Zhu, B.; Shao, R.; Li, N.; Min, C.; Liu, S.; Xu, Z.; Qian, X.; Wang, L. Fortschritt von Cyclodextrin-basierten Membranen in der Wasseraufbereitung: Spezielle 3D-schalenartige Struktur für hervorragende Trennung. *Chem. Eng. J.* **2022**, *449*, 137013. [\[CrossRef\]](#)

19. Villalobos, L.F.; Huang, T.; Peinemann, K.-V. Cyclodextrinfilme mit schnellem Lösungsmitteltransport und formselektiver Permeabilität. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1606641. [\[CrossRef\]](#)
20. He, Y.; Miao, J.; Jiang, Z.; Tu, K.; Yang, H.; Chen, S.; Zhang, L.; Zhang, R. Verbesserung der Antifouling-Eigenschaft und des Permeatflusses einer Hohlfaser-Verbund-Nanofiltrationsmembran unter Verwendung von γ -Cyclodextrin. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 12435. [\[CrossRef\]](#)
21. Mao, H.; Zhang, H.; Li, Y.; Xue, Y.; Pei, F.; Wang, J.; Liu, J. Einstellbare Lösungsmittelpermeationseigenschaften einer dünnen Nanokompositmembran durch Konstruktion von Doppelpfaden unter Verwendung von Cyclodextrinen für die Nanofiltration organischer Lösungsmittel. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2015**, *3*, 1925–1933. [\[CrossRef\]](#)
22. Gozali Balkanloo, P.; Mahmoudian, M.; Hosseinzadeh, M.T. Eine vergleichende Studie zwischen MMT-Fe₃O₄/PES, MMT-HBE/PES, und MMT-säureaktivierte/PES-Mischmatrixmembranen. *Chem. Eng. J.* **2020**, *396*, 125188. [\[CrossRef\]](#)
23. Wu, H.; Liu, Y.; Mao, L.; Jiang, C.; Ang, J.; Lu, X. Dotierung einer Polysulfon-Ultrafiltrationsmembran mit TiO₂-PDA-Nanohybrid für gleichzeitige Selbstreinigung und Selbstschutz. *J. Membr. Sci.* **2017**, *532*, 20–29. [\[CrossRef\]](#)
24. Shen, L.; Cheng, R.; Yi, M.; Hung, W.-S.; Japip, S.; Tian, L.; Zhang, X.; Jiang, S.; Li, S.; Wang, Y. Polyamidbasierte Membranen mit struktureller Homogenität für ultraschnelles Molekularsieben. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 500. [\[CrossRef\]](#)
25. Zhao, Q.; Liu, Y. Makrocyclische vernetzte mesoporöse Polymere zur ultraschnellen Trennung organischer Farbstoffe. *Chem. Commun.* **2018**, *54*, 7362–7365. [\[CrossRef\]](#)
26. Xu, W.; Li, G.; Qu, H.; Ma, C.; Zhang, H.; Cheng, J.; Li, H. Die spezifische Entfernung von Perfluorooctansäure auf Basis von Pillar[5]aren-Polymergepackte Nanokanalmembran. *ACS Nano* **2023**, *17*, 19305–19312. [\[CrossRef\]](#)
27. Xu, W.; Chen, Y.; Liu, Y. Richtungsgebundene Janus-Nanofaser-Porenmembranen zur Filtration von Partikeln und zur Adsorption flüchtiger organischer Verbindungen. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 3109–3118. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Zhang, W.; Chai, H.; Diao, G. Hochporöse, cyclodextrinfunktionalisierte Nanofasermembran durch Säureätzen. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **2019**, *582*, 123907. [\[CrossRef\]](#)
29. Celebioglu, A.; Uyar, T. Elektrosponnen von Nanofasern aus nicht-polymeren Systemen: Polymerfreie Nanofasern aus Cyclodextrin Derivate. *Nanoscale* **2012**, *4*, 621–631. [\[CrossRef\]](#)
30. Zhao, R.; Wang, Y.; Li, X.; Sun, B.; Wang, C. Synthese von beta-Cyclodextrin-basierten elektrogenesponnenen Nanofasermembranen für hocheffiziente Adsorption und Trennung von Methylblau. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, *7*, 26649–26657. [\[CrossRef\]](#)
31. Li, R.; Dou, J.; Jiang, Q.; Li, J.; Xie, Z.; Liang, J.; Ren, X. Herstellung und antimikrobielle Aktivität von γ -Cyclodextrin-Derivaten Copolymere/Celluloseacetat-Nanofasern. *Chem. Eng. J.* **2014**, *248*, 264–272. [\[CrossRef\]](#)
32. Tang, Y.-J.; Shen, B.-J.; Huang, B.-Q.; Zhan, Z.-M.; Xu, Z.-L. Dünnschicht-Verbund-Nanofiltrationsmembranen mit hoher Permselectivität und 3D-Mikrostruktur, hergestellt durch Einbau von Beta-Cyclodextrin. *Sep. Purif. Technol.* **2019**, *227*, 115718. [\[CrossRef\]](#)
33. Shang, S.; Chiu, K.-L.; Jiang, S. Synthese von immobilisiertem Polyvinylalkohol/Cyclodextrin-Ökoadsorbent und seine Anwendung für die Entfernung von Ibuprofen aus pharmazeutischen Abwässern. *J. Appl. Polym. Sci.* **2017**, *134*, 44861. [\[CrossRef\]](#)
34. Ahmad, J.; Wen, X.; Li, F.; Wang, B. Neuartige, mit dreieckigen Silbernanopartikeln modifizierte Membranen für verbessertes Antifouling Leistung. *RSC Adv.* **2019**, *9*, 6733–6744. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
35. Wang, Q.; Ju, J.; Tan, Y.; Hao, L.; Ma, Y.; Wu, Y.; Zhang, H.; Xia, Y.; Sui, K. Kontrollierte Synthese von elektrogenesponnenen Nanofasermembranen aus Natriumalginat für die mehrmalige Adsorption und Trennung von Methylblau. *Carbohydr. Polym.* **2019**, *205*, 125–134. [\[Querverweis\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Tian, H.; Yuan, L.; Wang, J.; Wu, H.; Wang, H.; Xiang, A.; Ashok, B.; Rajulu, A.V. Elektrosponnen von Polyvinylalkohol zu vernetzten Nanofasern: Ein Ansatz zur Herstellung eines funktionellen Adsorbens für Schwermetalle. *J. Hazard. Mater.* **2019**, *378*, 120751. [\[Querverweis\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Yadav, D.; Karki, S.; Gohain, M.B.; Ingole, P.G. Entwicklung eines Prozesses zur Entfernung von Mikroschadstoffen unter Verwendung von Dünnschicht-Nanokompositmembranen, die durch eine neue umweltfreundliche Methode der Grenzflächenpolymerisation in der Dampfphase hergestellt werden. *Chem. Eng. J.* **2023**, *472*, 144940. [\[CrossRef\]](#)
38. Gruppuso, M.; Iorio, F.; Turco, G.; Marsich, E.; Porrelli, D. Hyaluronsäure/Laktose-modifiziertes Chitosan, elektrogenesponnene Wundaufgaben – Vernetzung und Stabilitätskritikalität. *Carbohydr. Polym.* **2022**, *288*, 119375. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
39. Prasannan, A.; Udomsin, J.; Tsai, H.-C.; Wang, C.-F.; Lai, J.-Y. Robuste superoleophobe Unterwassermembranen mit biologisch inspirierten Carrageenan/Laponit-Mehrfachschichten zur effektiven Entfernung von Emulsionen, Metallionen und organischen Farbstoffen aus Abwasser. *Chem. Ing. J.* **2020**, *391*, 123585. [\[CrossRef\]](#)
40. Yang, X.; Lin, L.; Liu, Z.; Yang, J.; Cheng, Q.; Ma, W.; Xu, M.; Tang, F.; Wang, Q.; Li, X.; et al. Herstellung lösungsmittelbeständiger Polyimidmembranen zur effizienten Trennung von Farbstoffen und Salzen mittels einer „Internal Drive“-Strategie. *Sep. Purif. Technol.* **2024**, *332*, 125843. [\[CrossRef\]](#)

Haftungsausschluss/Anmerkung des Herausgebers: Die in allen Veröffentlichungen enthaltenen Aussagen, Meinungen und Daten sind ausschließlich die der einzelnen Autoren und Mitwirkenden und nicht die von MDPI und/oder den Herausgebern. MDPI und/oder die Herausgeber lehnen jegliche Verantwortung für Personen- oder Sachschäden ab, die aus den im Inhalt erwähnten Ideen, Methoden, Anweisungen oder Produkten resultieren.