

PFAS- ENTFERNUNGSTECHNOLOGIEN



© CC0 (Vitor Serban/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

PFAS, auch als „ewige Chemikalien“ bezeichnet, stellen aufgrund ihrer hohen Persistenz, Mobilität und potentiellen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit eine erhebliche Herausforderung für die Aufbereitung von Trink- und Abwasser dar. Die Einführung verbindlicher Grenzwerte für PFAS erhöht den Bedarf an effizienten Entfernungstechnologien. Für zahlreiche Verfahren wurde die Wirksamkeit unter Laborbedingungen nachgewiesen, es existieren jedoch bislang keine skalierbaren, industriell einsetzbaren Lösungen, um PFAS-Moleküle zu zerstören und dauerhaft aus der Umwelt zu entfernen. Derzeit basieren etablierte Methoden hauptsächlich auf Adsorption an Aktivkohle und Ionenaustauschharzen sowie auf Membranverfahren, die PFAS zwar effektiv aus dem Wasser entfernen, jedoch nicht zerstören. Destruktive Verfahren werden derzeit intensiv untersucht, um die PFAS-Moleküle zu zerstören.

*PFAS-Entfernung
in Trink- und
Abwasseranlagen
noch nicht industriell
umgesetzt*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) bilden eine Klasse organischer Chemikalien, die in der Natur nicht vorkommen.¹ Sie weisen eine hohe thermische und chemische Stabilität auf und werden daher auch als „*ewige Chemikalien*“ bezeichnet. PFAS sind persistent und verbleiben nach ihrer Freisetzung über lange Zeiträume in der Umwelt, wo sie sich anreichern², nur sehr langsam abbauen und schwer zu entfernen sind. Aufgrund ihrer Stabilität sowie ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften werden PFAS in einem breiten Spektrum von Anwendungen eingesetzt. Dazu gehören zum Beispiel technische und wasserfeste Textilien, antihafbeschichtetes Kochgeschirr, Pestizide, Feuerlöschschaum sowie die Herstellung von Halbleitern und Lebensmittelverpackungen. PFAS werden außerdem in Kühlgeräten und Wärmepumpen eingesetzt, von denen erstere unter anderem in *Rechenzentren* angewendet werden.³ Insgesamt werden mehr als 1.400 verschiedene PFAS in industriellen Anwendungen eingesetzt (Glüge et al., 2020), die entweder direkt oder über ihre Abbauprodukte extrem persistent sind (BMLUK, 2024).

Die Freisetzung in die Umwelt erfolgt durch die Anwendung PFAS-haltiger Produkte, unbeabsichtigte industrielle Emissionen, die Abfallentsorgung sowie die Ausbringung kontaminierter Klärschlämme als Dünger. Auf europäischer Ebene wurden rund 23.000 Altlasten mit PFAS-Konzentrationen von bis zu 70.000 µg/L identifiziert sowie etwa 21.000 weitere potenzielle Altlasten, die zur Verschmutzung von Boden und Trinkwasser führen könnten.⁴

Die mehr als 4.700 bekannten PFAS weisen unterschiedliche Toxizität, Lebensdauer und Mobilität auf. Die Aufnahme von PFAS⁵ in den menschlichen Körper erfolgt überwiegend über Trinkwasser und Lebensmittel. Aufgrund ihrer Langlebigkeit reichern sie sich im Körper an und wirken auf verschiedene Organe. Die akute Toxizität von PFAS ist zwar gering, eine langfristige Exposition kann jedoch zu Störungen des Immunsystems, erhöhten Cholesterinwerten, Karzinogenität sowie zu Beeinträchtigungen der Entwicklung von Föten und Säuglingen führen.⁶ Die EU-Trinkwasserrichtlinie (2020/2184) definiert Grenzwerte für die Konzentrationen von PFAS im Trinkwasser. Dabei werden zwei Parameter berücksichtigt: Zum einen darf die Summe der Konzentrationen von 20 ausgewählten PFAS den Wert von 0,1 µg/L nicht überschreiten, zum anderen darf die Gesamtkonzentration aller PFAS 0,5 µg/L nicht überschreiten (BMLUK, 2024). Diese Vorgaben wurden in die österreichische Trinkwasserverordnung übernommen, wobei die Summe der 20 PFAS als maßgeblicher Parameter festgelegt wurde.

Messungen des Trinkwassers in Österreich zwischen 2021 und 2024 haben gezeigt, dass die Gesamtkonzentration von 20 PFAS bei 99 % der Messpunkte unterhalb des ab 2026 einzuhaltenden Grenzwerts von 0,1 µg/L liegt (AGES, 2025a). Allerdings spiegelt dieser Grenzwert nicht die neuesten toxikologischen Erkennt-

*Mehr als 1.400
verschiedene PFAS
in 200 Anwendungen*

*Die Evidenz für eine
chronische Toxizität
wächst*

*Ab Jänner 2026 gilt
ein neuer Grenzwert
für PFAS in
Trinkwasser*

*Trinkwasser in
Österreich unterhalb
des zukünftigen
Grenzwertes*

¹ umweltbundesamt.at/umweltthemen/stoffradar/pfas.

² echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas.

³ theguardian.com/environment/2025/oct/04/pfas-pollution-data-centers-ai.

⁴ eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/treatment-of-drinking-water-to-remove-pfas-signal.

⁵ eeb.org/eu-leaders-contaminated-with-pfas-forever-chemicals/.

⁶ ages.at/mensch/ernaehrung-lebensmittel/rueckstaende-kontaminanten-von-a-bis-z/per-und-polyfluorierte-alkylverbindungen-pfas.

nisse wider.⁷ Basierend auf potenziellen Auswirkungen auf das Immunsystem wurde ein Grenzwert für PFAS vom Typ GenX auf 0,02 µg/L für Erwachsene und 0,004 µg/L für Kinder vorgeschlagen (EFSA, 2020). Obwohl diese Werte in Österreich nicht überschritten wurden, liegen einige Messungen bei etwa der Hälfte des Grenzwerts (AGES, 2025b). Einige EU-Länder haben daher deutlich strengere Grenzwerte für Trinkwasser festgelegt (Dänemark: 0,002 µg/L; Niederlande: 0,004 µg/L; Deutschland: 0,02 µg/L). Diese beziehen sich jedoch auf vier PFAS statt auf zwanzig. Der von der EU-Kommission 2022 vorgeschlagene Grenzwert für Grund- und Oberflächenwasser von 0,004 µg/L für die Summe der 24 PFAS basiert auf der Stellungnahme der EFSA. Dieser Grenzwert wurde in Österreich in die Grundwasserrichtlinie übernommen.

Aufgrund ihrer Langlebigkeit sind PFAS nur sehr schwer abbaubar und reichern sich in der Umwelt an. Neben einer Reduzierung ihrer Anwendung und Freisetzung sind daher effektive Entfernungsmethoden erforderlich, um die Qualität des Trinkwassers langfristig zu gewährleisten.

Die Technologien zur PFAS-Entfernung sind entweder destruktiv oder nicht-destruktiv (Tshangana et al., 2025). Destruktive Verfahren zielen darauf ab, die chemischen Bindungen innerhalb der PFAS-Moleküle aufzubrechen, insbesondere die starke Bindung zwischen Kohlenstoff- und Fluoratomen. Nicht-destruktive Verfahren hingegen entfernen PFAS-Moleküle aus dem Wasser, ohne deren chemische Struktur zu verändern. Dabei entsteht als Nebenprodukt eine konzentrierte PFAS-Lösung, die einer weiteren Behandlung bedarf, um die Schadstoffe sicher zu entsorgen. Die Effizienz der einzelnen Verfahren hängt in der Regel von der Kettenlänge der PFAS (Länge der Kohlenstoffkette) sowie von der Anwesenheit anderer Chemikalien ab.

Destruktive und nicht-destruktive Technologien zur Entfernung bzw. Zerstörung von PFAS

Bei destruktiven Verfahren wird typischerweise eine Kombination aus mechanischer Zerstörung durch hohe Temperaturen und Drücke sowie chemischen Mechanismen, beispielsweise Oxidation, eingesetzt. Die *thermische Zersetzung* erreicht Zerstörungsraten von über 99,999 % bei Temperaturen über 850°C in Luft (Capodaglio et al., 2025). Vorbehandlungsschritte sind erforderlich um die PFAS zuvor aus dem Wasser zu entfernen.

Destruktive Verfahren zerstören die chemischen Verbindungen

Die *chemische Wasseroxidation* erfolgt direkt im kontaminierten Wasser und basiert auf die Oxidation der PFAS-Moleküle in einer Lösung von Wasser und Sauerstoff bei hohen Temperaturen (375°C) und Drücke (22 MPa). Dabei werden die PFAS vollständig in Wasser, CO₂ und nicht-toxische Produkte zersetzt. Unter Laborbedingungen wurden Zersetzungsraten von über 99% erreicht. Allerdings ist der Energieaufwand sehr hoch. Die Effizienz dieser Methode ist unabhängig von der PFAS-Konzentration im Wasser und ermöglicht die schnelle Zerstörung großer Mengen. Die extremen Prozessbedingungen stellen jedoch eine Herausforderung für die Konstruktion geeigneter Reaktoren dar.

Bei der *sonochemischen Oxidation* entstehen lokal hohe Temperaturen und Drücke sowie reaktive Sauerstoff-enhaltende Moleküle durch Schallwellen. Unter Laborbedingungen wurden Zersetzungsraten von bis zu 90 % erreicht. Die Effizienz hängt stark von den im Wasser enthaltenen Stoffen sowie von der Kettenlänge

⁷ eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-pollution-in-european-waters.

der PFAS ab; zudem müssen Parameter wie Schallwellenfrequenz und Leistung präzise angepasst werden.

Weitere destruktive Verfahren nutzen ebenfalls die Oxidation als Zerstörungsmechanismus, beispielsweise *photokatalytische* oder elektrochemische Oxidation, und *Plasmaprozesse*. Alternative Ansätze werden untersucht, um PFAS mithilfe hochenergetischer Strahlungsarten – wie *ionisierender Strahlung*, *UV-Strahlung* oder *Mikrowellen* – zu zerstören.

Trotz hoher Zerstörungsraten unter Laborbedingungen sind bislang keine Methoden für den industriellen Einsatz geeignet. Typische Herausforderungen destruktiver Verfahren umfassen einen hohen Energiebedarf, eine starke Abhängigkeit von Prozessparametern und anderen im Wasser enthaltenen Chemikalien, die Bildung potenziell toxischer Nebenprodukte sowie die Schwierigkeit, eine geeignete Infrastruktur für den industriellen Einsatz zu etablieren.

Herausforderungen bei der Industrialisierung destruktiver Verfahren

Die Alternative bilden nicht-destruktive Verfahren. Zu den am häufigsten eingesetzten nicht-destruktiven Methoden zählen *Ionenaustausch*, *Adsorption* und *Membrantechnik*. Sie erzeugen hoch-konzentrierte PFAS-haltige Lösungen, typischerweise 5- bis 10-mal höhere Konzentrationen als im Ausgangswasser (Tow et al., 2021), die einer weiteren Behandlung bedürfen, um eine Freisetzung in die Umwelt zu vermeiden.

Nicht-destruktive Methoden entfernen die Chemikalien aus dem Wasser, ohne sie zu zerstören

PFAS-Moleküle werden durch verschiedene physikalische Prozesse aus dem kontaminierten Wasser entfernt. *Ionenaustausch* basiert auf wasserabweisenden und elektrostatischen Wechselwirkungen zwischen PFAS-Molekülen und Ionenaustauscherharzen. Die *Adsorption* macht sich die große spezifische Oberfläche sowie die funktionellen Gruppen von Aktivkohle und Pflanzenkohle sowie die dreidimensionale poröse Struktur von metallorganischen Gerüstverbindungen (MOFs) zunutze. Unter Laborbedingungen erreichen Ionenaustausch und Adsorption eine Entfernungseffizienz von bis zu 100 %. Die Wirksamkeit ist jedoch stark materialabhängig und variiert zudem in Abhängigkeit vom Ladungszustand der PFAS. Unter realen Bedingungen wird die Effizienz jedoch durch den Präsenz anderer Substanzen im Wasser beeinträchtigt, was zu einer unvollständigen PFAS-Entfernung führen kann.

Membranverfahren wie *Nanofiltration* und *Umkehrosmose* (mit Porendurchmessern unter 0,01 µm) entfernen PFAS durch Größenausschlussmechanismen mit einer Effizienz von über 99 %. Diese Verfahren sind energieintensiv, da sie einen hohen Druck erfordern, um den Durchfluss durch die Membran aufrechtzuerhalten.

Die durch nicht-destruktive Methoden entfernten Stoffe reichern sich entweder auf den Filtrations- oder Adsorptionsmedien oder in hochkonzentrierten Lösungen an. Diese müssen anschließend entsorgt oder regeneriert werden. Mit der Zeit nimmt die Entfernungseffizienz aufgrund der Filtersättigung ab, insbesondere infolge anderer im Wasser enthaltener Stoffe. Da diese Verfahren nicht selektiv sind, konkurrieren PFAS mit anderen Chemikalien im Adsorptions- oder Filtrationsprozess.

Synergien zwischen destruktiven und nicht-destruktiven Methoden werden untersucht, um die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren, die entweder sequenziell oder parallel eingesetzt werden können. Bei einer sequenziellen Behandlung wird typischerweise zuerst eine nicht-destruktive Methode angewendet, um eine hochkonzentrierte PFAS-Lösung zu erzeugen; anschließend erfolgt die Zerstörung der PFAS durch ein destruktives Verfahren. Sequenzielle Behandlung ist jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden.

Bei parallelen Verfahren werden PFAS gleichzeitig filtriert und zerstört, beispielsweise durch *photokatalytische* oder *reaktive elektrochemische Membranen*. Solche Verfahren sind in der Regel kostengünstiger, verlängern die Lebensdauer der Membranen durch eine verlangsamte Sättigung und erfordern keine zusätzlichen Behandlungsschritte.

Bei der Auswahl einer geeigneten Methode sind verschiedene Parameter zu berücksichtigen. Unterschiedliche Wasserarten (Trinkwasser, Abwasser, Sickerwasser) weisen stark variierende Konzentrationsspektren auf und die PFAS-Konzentration ist geografisch sehr heterogen. Destruktive Verfahren zeigen ihre höchste Effizienz bei Konzentrationen zwischen 100 und 100.000 µg/L (Capodaglio et al., 2025), während Filtrationsverfahren schon bei deutlich niedrigeren Konzentrationen wirksam sind. Die Kosten hängen stark von der eingesetzten Methode ab und liegen zwischen 0,01 und 50 € pro m³ Wasser (Tshangana et al., 2025). Die derzeit fehlende industrielle Anwendung bietet künftig ein großes Potenzial zur Kostensenkung.

Kombination von destruktiven und nicht-destruktiven Methoden vereint die Vorteile beider Ansätze

Die Auswahl der Methoden sollte die PFAS-Konzentration berücksichtigen

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

In Österreich wurden bislang nur wenige PFAS-Altlasten identifiziert, insbesondere im Vergleich zu anderen europäischen Ländern. Dennoch werden PFAS weiterhin in industriellen Prozessen eingesetzt, sodass potenzielle Quellen für Freisetzungen bestehen, etwa in industrielle Produktionsstätten, Abfallentsorgungsanlagen oder auf Flugplätzen.

Die Projekte *POPMON* und *POPMON II* (AGES, BMSGPK und BMK) fördern die regionale Zusammenarbeit zur Identifikation potentieller Altlasten und zum Monitoring von PFAS in der Umwelt. Auf europäischer Ebene wurden im Rahmen des Horizon-Programms 15 Projekte zu PFAS-Entfernungstechnologien mit insgesamt 30 Millionen Euro gefördert. Etwa 2 % dieser Mittel gingen an teilnehmende österreichische Forschungseinrichtungen.⁸ Auf nationaler Ebene laufen mehrere Forschungsprojekte, darunter *PFASolve* (Johannes-Kepler-Universität Linz); *Vorkommen und Beseitigung von PFAS* und *PFASAN* (Universität Wien, TU Wien und Austrian Institute of Technology); *LaST-PFAS* und *Ufer-Los* (TU Wien); *PFAS removal from groundwater* (BOKU). Trotz dieser Forschungsaktivitäten werden derzeit noch keine Entfernungsmethoden auf industrieller Ebene angewendet.

Österreichische Universitäten erforschen Entfernungstechnologien

⁸ cordis.europa.eu.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Ein robustes PFAS-Überwachungssystem soll in der Lage sein, geringe Konzentrationen einzelner Moleküle zu messen, um Kontaminationsfälle frühzeitig zu identifizieren und die jeweils passende Entfernungsmethode einsetzen zu können. Kurzfristig sollten Wasserversorgungsanlagen und Gemeinden beim Aufbau eines zuverlässigen Monitoringsystems unterstützt werden, damit sie sich auf zukünftige regulatorische Anforderungen sowie auf den Einsatz von Entfernungstechnologien vorbereiten können.

Es wird eine vertiefte Analyse empfohlen, die potenzielle Verfahren mithilfe sozioökonomischer Bewertung und Lebenszyklusanalysen vergleicht, unter Berücksichtigung lokaler Parameter wie Energiekosten und Verfügbarkeit.

Zugleich sollte weiteres Forschungspotenzial identifiziert werden, um eine langfristige und gezielte Förderung zu ermöglichen, die die verschiedenen Aspekte der PFAS-Thematik abdeckt, etwa die Skalierbarkeit und Industrialisierung der Entfernungstechnologien sowie die Entwicklung alternativer Stoffe. Ein ambitioniertes Forschungsprogramm würde die Kosten der Entfernung senken und die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Umwelttechnologiebranche stärken. Die Kosten für die Entfernung bereits vorhandener PFAS wurden auf 2.000 Milliarden Euro auf europäischer Ebene geschätzt, während die Kosten für bestehende Emissionen ohne zukünftige Begrenzung über 100 Milliarden Euro pro Jahr liegen.⁹

*Monitoring und
gezielte Ausstattung
von Trink- und
Abwasseranlagen*

ZITIERTE LITERATUR

- Glüge, J., et al. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 22, 2345-2373. doi: [10.1039/d0em00291g](https://doi.org/10.1039/d0em00291g).
- BMLUK (2024). PFAS-Aktionsplan, bmluk.gv.at/dam/jcr:c161255b-b8c7-4122-b9e9-268f4b63e66b/PFAS-Aktionsplan_Fassung_2024_UA.pdf.
- AGES (2025a). Perfluorierte Alkylsubstanzen in Trinkwasser – Monitoring, ages.at/mensch/schwerpunkte/schwerpunktaktionen/detail/perfluorierte-alkylsubstanzen-in-trinkwasser-monitoring-1.
- EFSA (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal*, 18, 6. doi: [10.2903/j.efsa.2020.6223](https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223).
- AGES (2025b). Derivation of Provisional Drinking Water Tolerance Values for Several PFAS Not Included in the Austrian Drinking Water Regulation, efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2903/fr.efsa.2025.FR-0057.
- Tshangana, C. S., et al. (2025). Technology status to treat PFAS-contaminated water and limiting factors for their effective full-scale application. *Npj Clean Water*, 8(41). doi: [10.1038/s41545-025-00457-3](https://doi.org/10.1038/s41545-025-00457-3).
- Capodaglio, A. G., et al. (2025). Prospects of Novel Technologies for PFAS Destruction in Water and Wastewater. *Appl. Sci.*, 15, 9311. doi: [10.3390/app15179311](https://doi.org/10.3390/app15179311).
- Tow, E. W., et al. (2021). Managing and treating per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in membrane concentrates. *AWWA Wat Sci.*, e1233. doi: [10.1002/aws2.1233](https://doi.org/10.1002/aws2.1233).

⁹ lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2025/01/14/pfas-the-astronomical-cost-of-depolluting-europe_6737022_8.html.