

# PFAS im Wasserkreislauf: Herkunft, Analytik, Regulierung und Behandlungstechnologien

## Einleitung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) bilden eine Stoffgruppe aus mehreren tausend synthetisch hergestellten chemischen Verbindungen, die seit den 1940er Jahren in zahlreichen industriellen Anwendungen eingesetzt werden. Charakteristisch für diese Substanzen ist die Substitution von Wasserstoffatomen durch Fluoratome entlang eines Kohlenstoffgerüsts. Bei vollständig perfluorierten Verbindungen sind sämtliche Wasserstoffatome der Kohlenstoffkette durch Fluor ersetzt. Die besondere Stabilität dieser Stoffklasse beruht auf der außergewöhnlich hohen Bindungsenergie der Kohlenstoff-Fluor-Bindung, die zu den stärksten kovalenten Bindungen der organischen Chemie zählt.

Aus dieser molekularen Struktur resultieren Eigenschaften, die PFAS für zahlreiche industrielle Prozesse attraktiv machen. Die Verbindungen sind sowohl hydrophob als auch lipophob und weisen dadurch eine ausgeprägte oberflächenaktive Wirkung auf. Gleichzeitig besitzen sie eine hohe thermische und chemische Stabilität und sind gegenüber Photolyse, Hydrolyse und mikrobiellem Abbau weitgehend resistent. Diese Kombination aus Stabilität und Funktionalität hat zu einer breiten Nutzung geführt, etwa in der Textil- und Papierindustrie, in Beschichtungen oder in Feuerlöschschäumen. Aufgrund ihrer extremen Persistenz werden PFAS in Wissenschaft und Öffentlichkeit häufig als „Ewigkeitschemikalien“ bezeichnet.

## Die ökologische und gesundheitliche Problematik

Die außergewöhnliche Beständigkeit von PFAS bringt jedoch erhebliche ökologische und gesundheitliche Herausforderungen mit sich. Gelangen diese Stoffe in die Umwelt, verbleiben sie dort über sehr lange Zeiträume und können sich über atmosphärische Prozesse sowie über Oberflächen- und Grundwasser weit verbreiten. Inzwischen wurden PFAS

selbst in abgelegenen Regionen wie der Arktis sowie in Organismen entfernter Ökosysteme nachgewiesen.

Für den Menschen erfolgt die Aufnahme hauptsächlich über kontaminiertes Trinkwasser sowie über Lebensmittel. Im menschlichen Körper binden PFAS bevorzugt an Blutproteine, insbesondere Albumin und können sich vor allem in Leber und Nieren anreichern. Verschiedene epidemiologische und toxikologische Studien bringen eine langfristige Exposition mit gesundheitlichen Effekten in Verbindung, darunter eine reduzierte Immunantwort auf Impfungen, hormonelle Veränderungen, erhöhte Cholesterinspiegel sowie ein erhöhtes Risiko für bestimmte Krebsarten wie Nieren- und Hodenkrebs. Eine besondere regulatorische Herausforderung besteht darin, dass die Stoffgruppe mehrere tausend einzelne Verbindungen umfasst. Eine Bewertung einzelner Substanzen ist daher nur begrenzt praktikabel. Aus diesem Grund wird zunehmend ein gruppenbasierter Ansatz verfolgt, bei dem ganze Stoffklassen reguliert oder beschränkt werden.

## Der Weg ins Wasser

PFAS gelangen über verschiedene Eintragspfade in die aquatische Umwelt. Eine wichtige Rolle spielen industrielle Anwendungen, beispielsweise in der Textil-, Papier- oder Galvanikindustrie. Werden PFAS-haltige Prozessabwässer ohne spezifische Aufbereitung eingeleitet, können die Substanzen direkt in Oberflächengewässer gelangen oder über kommunale Kläranlagen in den Wasserkreislauf überführt werden. Konventionelle Kläranlagen sind nur begrenzt in der Lage, PFAS zu entfernen, weshalb ein Teil der Verbindungen die Reinigungsstufen passiert und in Flüsse oder Seen gelangt. Zusätzlich können PFAS über Klärschlämme in Böden eingetragen werden. Werden diese als landwirtschaftlicher Dünger verwendet, können die Stoffe über Auswaschungsprozesse in das Grundwasser gelangen. Auch Feuerlöschschäume stellen eine bedeutende Quelle dar. Besonders an Flughäfen oder militärischen Standorten wurden über Jahrzehnte hinweg fluorhaltige Löschschäume eingesetzt, etwa sogenannte Aqueous Film Forming Foams (AFFF), die bei der Bekämpfung von Treibstoffbränden verwendet werden. Aufgrund der damit verbundenen Umweltproblematik wird der Einsatz solcher Schäume inzwischen zunehmend eingeschränkt oder durch fluorfreie Alternativen ersetzt.

Neben industriellen Quellen tragen auch zahlreiche Konsumprodukte zur Verbreitung von PFAS bei. Wasser- und schmutzabweisende Textilien, Teppiche, Kosmetika sowie fettabweisende Lebensmittelverpackungen können während der Nutzung oder beim Waschen PFAS freisetzen. Diese gelangen über Haushaltsabwässer in Kläranlagen und schließlich in den Wasserkreislauf.

Quelle: Herco

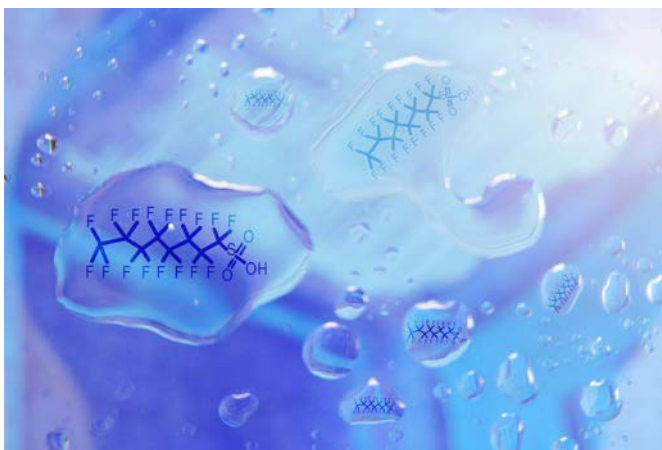


Bild 1: PFAS lagert sich im Wasser an und sorgt für Probleme.

Durch diese vielfältigen Eintragspfade sind PFAS mittlerweile weltweit in Gewässern nachweisbar. Ihre hohe Persistenz führt dazu, dass sie über lange Zeiträume in aquatischen Systemen verbleiben und sich über Fließgewässer und Strömungen weiter ausbreiten können.

### Analytik und Grenzwerte

Die analytische Bestimmung von PFAS im Spurenbereich stellt eine anspruchsvolle Aufgabe der modernen Umweltanalytik dar. Als Standardverfahren hat sich die Hochleistungsflüssigkeitschromatographie gekoppelt mit der Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) etabliert. Mit dieser Methode lassen sich einzelne PFAS-Verbindungen zuverlässig im Nanogramm-Bereich nachweisen.

Für die behördliche Überwachung von Trinkwasser wird in Europa häufig der sogenannte PFAS-20-Parameter verwendet. Dieser umfasst zwanzig ausgewählte Einzelsubstanzen, deren Summenkonzentration im Trinkwasser einen festgelegten Grenzwert nicht überschreiten darf. Diese Regelung wurde im Rahmen der europäischen Trinkwasserrichtlinie eingeführt und in nationale Regelwerke wie die deutsche Trinkwasserverordnung übernommen.

Für die technische Planung von Aufbereitungsanlagen ist eine Betrachtung dieser zwanzig Substanzen jedoch häufig nicht ausreichend. Auch PFAS-Verbindungen außerhalb dieses Parameters können mit Adsorptionsmedien wie Aktivkohle oder Ionenaustauschharzen interagieren und dadurch die Standzeit von Filtersystemen beeinflussen. Deshalb werden



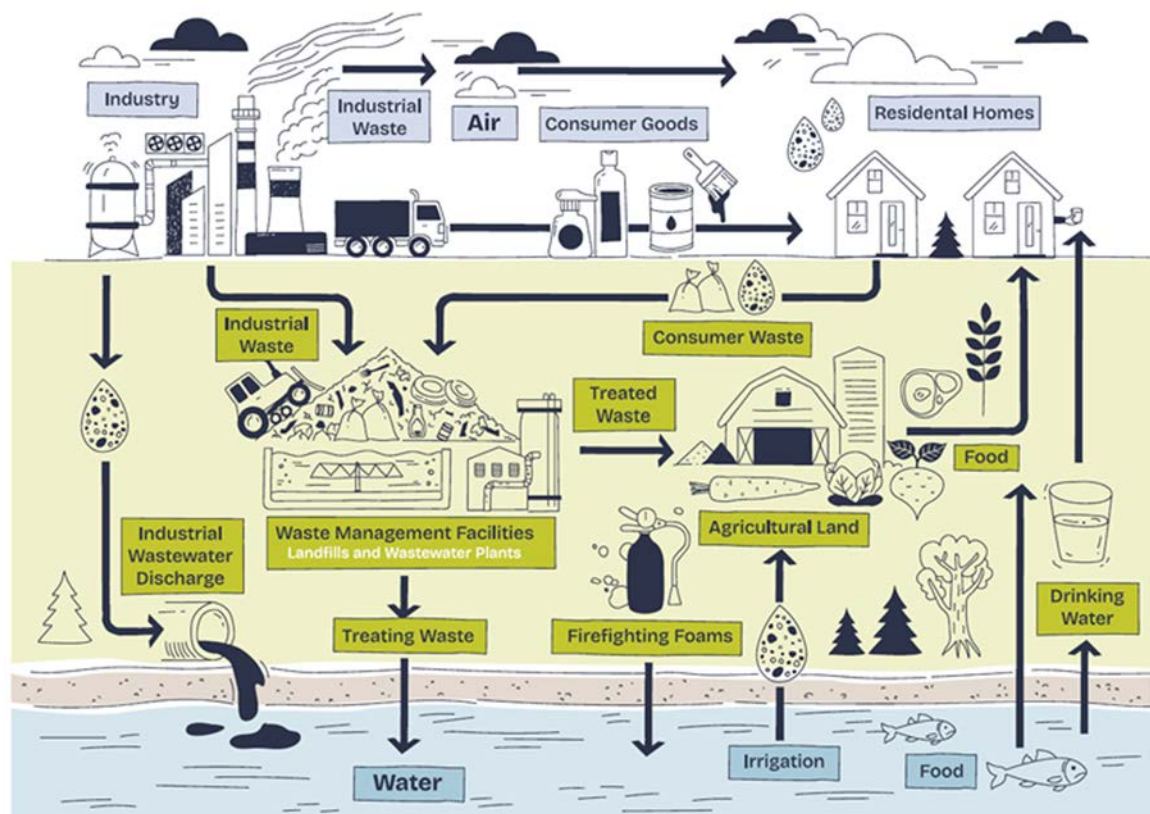
Quelle: Herco

Bild 2: Feuerbekämpfung mit Feuerlöschschaum

in der Praxis häufig umfangreichere analytische Ansätze eingesetzt.

Ein Beispiel hierfür ist die von der US-Umweltbehörde entwickelte EPA-Methode 1633, die eine deutlich größere Zahl einzelner PFAS-Verbindungen erfassen kann. Ergänzend dazu wird der sogenannte TOP-Assay (Total Oxidizable Precursors) verwendet, um Vorläuferverbindungen zu identifizieren, die in der Umwelt zu stabilen Perfluorcarbonsäuren umgewandelt werden können.

Parallel zu den analytischen Entwicklungen hat sich auch die regulatorische Landschaft deutlich verschärft. Während in Europa Summengrenzwerte für mehrere PFAS festgelegt wer-



Quelle: Herco

Bild 3: PFAS-Zyklus vom Hersteller bis ins Wasser

**Tabelle 1:** Liste der nach der Trinkwasserverordnung regulierten PFAS (PFAS 20)

Nr.	PFAS-Name	Abkürzung	Summenformel	Kettenlänge
1	Perfluorbutansäure	PFBA	C <sub>4</sub> HF <sub>7</sub> O <sub>2</sub>	C4
2	Perfluorpentansäure	PFPeA	C <sub>5</sub> HF <sub>9</sub> O <sub>2</sub>	C5
3	Perfluorhexansäure	PFHxA	C <sub>6</sub> HF <sub>11</sub> O <sub>2</sub>	C6
4	Perfluorheptansäure	PFHpA	C <sub>7</sub> HF <sub>13</sub> O <sub>2</sub>	C7
5	Perfluoroctansäure	PFOA	C <sub>8</sub> HF <sub>15</sub> O <sub>2</sub>	C8
6	Perfluornonansäure	PFNA	C <sub>9</sub> HF <sub>17</sub> O <sub>2</sub>	C9
7	Perfluordecansäure	PFDA	C <sub>10</sub> HF <sub>19</sub> O <sub>2</sub>	C10
8	Perfluorundecansäure	PFUnDA	C <sub>11</sub> HF <sub>21</sub> O <sub>2</sub>	C11
9	Perfluordodecansäure	PFDoDA	C <sub>12</sub> HF <sub>23</sub> O <sub>2</sub>	C12
10	Perfluortridecansäure	PFTrDA	C <sub>13</sub> HF <sub>25</sub> O <sub>2</sub>	C13
11	Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	C <sub>4</sub> HF <sub>9</sub> O <sub>3</sub> S	C4
12	Perfluorpentansulfonsäure	PFPeS	C <sub>5</sub> HF <sub>11</sub> O <sub>3</sub> S	C5
13	Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	C <sub>6</sub> HF <sub>13</sub> O <sub>3</sub> S	C6
14	Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	C <sub>7</sub> HF <sub>15</sub> O <sub>3</sub> S	C7
15	Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	C <sub>8</sub> HF <sub>17</sub> O <sub>3</sub> S	C8
16	Perfluornonansulfonsäure	PFNS	C <sub>9</sub> HF <sub>19</sub> O <sub>3</sub> S	C9
17	Perfluordecansulfonsäure	PFDS	C <sub>10</sub> HF <sub>21</sub> O <sub>3</sub> S	C10
18	Perfluorundecansulfonsäure	PFUnS	C <sub>11</sub> HF <sub>23</sub> O <sub>3</sub> S	C11
19	Perfluordodecansulfonsäure	PFDoS	C <sub>12</sub> HF <sub>25</sub> O <sub>3</sub> S	C12
20	Perfluortridecansulfonsäure	PFTrS	C <sub>13</sub> HF <sub>27</sub> O <sub>3</sub> S	C13

den, verfolgen andere Länder teilweise strengere Einzelstoffgrenzwerte. Diese unterschiedlichen Ansätze spiegeln verschiedene Strategien der Risikobewertung wider, zeigen jedoch gleichermaßen, dass PFAS zunehmend als prioritäre Schadstoffgruppe betrachtet werden.

### Technologien zur PFAS-Entfernung

Zur Entfernung von PFAS aus Wasser werden derzeit verschiedene technische Verfahren eingesetzt oder erforscht. Grundsätzlich lassen sich diese in drei Kategorien einteilen: Abtrennung, Konzentration und Zerstörung.

Zu den etablierten Abtrennungsverfahren zählt insbesondere die Adsorption an Aktivkohle. Diese Methode ist im Trinkwasserbereich weit verbreitet und vergleichsweise kostengünstig, zeigt jedoch vor allem bei langkettigen PFAS eine hohe Effizienz. Kurzkettige Verbindungen werden dagegen häufig weniger effektiv zurückgehalten. Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von Ionenaustauschharzen dar. Diese besitzen oftmals eine höhere Kapazität und schnellere Adsorptionskinetik als Aktivkohle, sind jedoch in der Anschaffung kostenintensiver.

Neben Adsorptionsverfahren werden Membranprozesse eingesetzt, insbesondere die Umkehrosmose. Diese Technologie kann ein breites Spektrum von PFAS mit hoher Effizienz entfernen, erzeugt jedoch einen konzentrierten Reststrom, der

anschließend weiterbehandelt werden muss. Auch die Schaumfraktionierung gewinnt zunehmend an Bedeutung. Aufgrund ihrer oberflächenaktiven Eigenschaften reichern sich PFAS bevorzugt an der Wasser-Luft-Grenzfläche an und können durch Schaumbildung konzentriert und anschließend entfernt werden.

Darüber hinaus werden Verfahren entwickelt, die PFAS nicht nur abtrennen, sondern chemisch zerstören. Hierzu zählen elektrochemische Oxidationsprozesse, bei denen hochreaktive Radikale entstehen, die PFAS-Moleküle schrittweise abbauen können. Ein weiterer Ansatz sind Plasmaverfahren, bei denen energiereiche Elektronen und Radikale zur Spaltung der stabilen Kohlenstoff-Fluor-Bindungen beitragen. Für hochkonzentrierte Abwässer wird zudem die superkritische Wasseroxidation untersucht, bei der organische Verbindungen unter extremen Temperatur- und Druckbedingungen weitgehend mineralisiert werden können.

In der Praxis werden häufig mehrere dieser Verfahren kombiniert. Beispielsweise kann eine Vorstufe zur Konzentration der PFAS eingesetzt werden, bevor die Schadstoffe in einem zweiten Schritt zerstört werden. Die Auswahl geeigneter Technologien hängt stark von der jeweiligen Wasserqualität, der Art der vorhandenen PFAS sowie von wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab.

### Fazit und Ausblick

PFAS stellen aufgrund ihrer außergewöhnlichen Stabilität eine langfristige Herausforderung für Umwelt und Wasserwirtschaft dar. Die gleiche chemische Beständigkeit, die PFAS für viele industrielle Anwendungen attraktiv macht, führt dazu, dass diese Stoffe in Gewässern und Böden über lange Zeiträume verbleiben und sich weltweit verbreiten können. Fortschritte in der Analytik haben gezeigt, dass PFAS mittlerweile selbst in sehr geringen Konzentrationen zuverlässig nachweisbar sind, wodurch das Ausmaß der Belastung zunehmend sichtbar wird.

Gleichzeitig stehen heute bereits verschiedene technische Verfahren zur Verfügung, um PFAS aus Wasser zu entfernen oder zu reduzieren. Dazu zählen insbesondere Adsorptionsverfahren wie Aktivkohle und Ionenaustausch sowie Membranverfahren oder neue Technologien zur chemischen Zerstörung der Verbindungen. In der Praxis zeigt sich häufig, dass eine Kombination dieser Methoden notwendig ist, um eine effektive und wirtschaftliche Behandlung zu erreichen.

Vor diesem Hintergrund gewinnt ein frühzeitiger und proaktiver Umgang mit möglichen PFAS-Belastungen zunehmend an Bedeutung. Eine gezielte Untersuchung von Wasserressourcen sowie eine fundierte Bewertung der lokalen Situation bilden die Grundlage, um geeignete Maßnahmen zur Reduktion der Belastung zu planen und umzusetzen.

Langfristig wird der verantwortungsvolle Umgang mit PFAS ein zentraler Bestandteil einer nachhaltigen Wasserwirtschaft sein. Wer frühzeitig handelt und geeignete Maßnahmen ergreift, kann nicht nur regulatorische Anforderungen erfüllen, sondern auch einen wichtigen Beitrag zum Schutz von Um-

welt, Gesundheit und der langfristigen Sicherung sauberer Wasserressourcen leisten.

#### Literatur:

- [1] Dobrzyńska, E.; Wasilewski, P.; Pośniak, M. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs): A Comprehensive Review of Environmental Distribution, Health Impacts, and Regulatory Landscape. *Applied Sciences* 2025.
- [2] Yeoh, C. S. L.; et al. PFAS and human health: exposure routes and toxicities across the lifespan. *Environmental Toxicology and Chemistry* 2025.
- [3] Mayilswami, S.; et al. Potential human health effects of PFAS prevalent in aquatic environments. *Environmental Science: Advances* 2025.
- [4] Safta, D. Per- and Polyfluorinated Substances (PFAS): A Literature Review. *Undergraduate Journal of Public Health* 2024.
- [5] Zhang, Y.; et al. Sources, distribution and treatment of PFAS in global groundwater. *Environmental Research* 2025.
- [6] Yang, M. W.; et al. PFAS in coastal water networks. *Frontiers in Marine Science* 2025.
- [7] Yang, Y.; et al. PFAS in consumer products: occurrence, migration and exposure. *Molecules* 2025.
- [8] Benskin, J. P.; et al. Targeted and suspect screening of PFAS using LC-MS/MS. *Analytical Chemistry* 2012.
- [9] European Union. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption.
- [10] Houtz, E. F.; Sedlak, D. L. Oxidative conversion as a means of detecting PFAS precursors. *Environmental Science & Technology* 2012.
- [11] OECD. Reconciling terminology of PFAS. Organisation for Economic Co-operation and Development 2021.
- [12] Rahman, M. F.; Peldszus, S.; Anderson, W. B. Behaviour and fate of PFAS in drinking water treatment. *Water Research* 2014.
- [13] Schultes, L.; et al. Total fluorine measurements as a tool for PFAS screening. *Environmental Science: Processes & Impacts* 2019.
- [14] U.S. Environmental Protection Agency. Method 1633: Analysis of PFAS in environmental samples by LC-MS/MS. EPA 2024.
- [15] Umweltbundesamt. PFAS im Trinkwasser – Bewertung und Grenzwerte in Deutschland. 2023.
- [16] Van Leuken, J. P. G.; et al. Removal of PFAS from water: adsorption, ion exchange and membrane separation. *Science of the Total Environment* 2020.
- [17] Radjenovic, J.; Sedlak, D. L. Electrochemical processes for treatment of contaminated water. *Environmental Science & Technology* 2015.
- [18] Kwon, S.; Brown, R. C. Plasma-based remediation of PFAS. *Journal of Hazardous Materials Advances* 2021.
- [19] Wang, T.; et al. Destruction of perfluorinated compounds by supercritical water oxidation. *Chemical Engineering Journal* 2019.

#### Auf der IFAT:

B2.441

#### Autoren:

Adrian Haradinaj, Tugay Cerit, Edwin Locker

Herco Wassertechnik GmbH

[www.hercowater.com](http://www.hercowater.com)