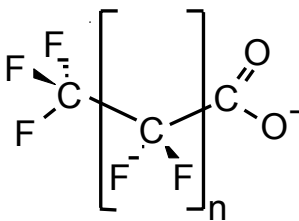


Perfluorierte Alkylverbindungen - ein globales Thema

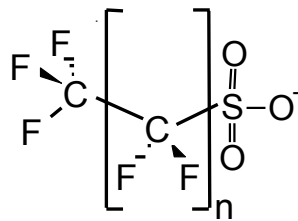
Frank Thomas Lange
DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW) Karlsruhe

Einleitung

In perfluorierten Verbindungen (PFCs = Perfluorochemicals) wie den Perfluoralkylsulfonaten (PFASs) und -carboxylaten (PFCAs) sind alle Wasserstoffatome der entsprechenden Kohlenwasserstoffverbindungen durch Fluor- atome ersetzt (Bild 1). Es handelt sich um Substanzen, die ausschließlich synthetisch hergestellt werden. Wichtige fluororganische Chemikalien sind die Fluorpolymere, wie Polytetrafluorethylen, das insbesondere unter dem Markenname Teflon bekannt geworden ist. Wegen ihrer thermischen Beständigkeit sowie ihrer außerordentlichen Stabilität gegenüber aggressiven Chemikalien galten diese Stoffe nach ihrer Einführung in den 1950er-Jahren einige Jahrzehnte lang als sehr nützlich und ungefährlich gegenüber der Umwelt. Diese Einschätzung änderte sich schlagartig, nachdem vor einigen Jahren bekannt wurde, dass sich verschiedene niedermolekulare Vertreter perfluorierter Verbindungen u. a. im Blut von Tieren und Menschen anreichern und toxische Eigenschaften aufweisen. Hierzu gehören auch die PFASs und PFCAs.



Perfluorierte Alkylcarboxylate
 $n = 4-10$ (C_6-C_{12})



Perfluorierte Alkylsulfonate
 $n = 5-11$ (C_6-C_{12})

Bild 1: *Strukturformeln von perfluorierten Alkylsulfonaten (PFASs) und perfluorierten Alkylcarboxylaten (PFCAs); in technischen Produkten können auch Moleküle mit kürzeren und längeren sowie verzweigten Alkylketten auftreten.*

Die am besten untersuchten Schlüsselverbindungen dieser beiden Stoffklassen sind die Vertreter mit jeweils acht Kohlenstoffatomen in der Alkylkette, Perfluoroctanoat (PFOA) und Perfluoroctylsulfonat (PFOS). PFOS wird mittlerweile zu den sog. POPs gezählt (POP = Persistent Organic Pollutant), die dadurch charakterisiert sind, dass sie persistent, bioakkumulierbar und toxisch sind (PBT-Chemikalien). PFOS sowie eine Reihe von ihr abgeleiteter Verbindungen wurden kürzlich von der deutschen Bundesregierung der EU-Kommission zur Aufnahme in die Richtlinie 76/769/EEC vorgeschlagen. Diese Richtlinie schränkt das EU-weite Inverkehrbringen und die Verwendung einer Reihe gefährlicher Chemikalien ein. Für PFOA ist derzeit eine ausführliche Risikobewertung durch die U. S.-amerikanische Umweltbehörde (U.S. EPA = U. S. Environmental Protection Agency) im Gange.

Bei normalen pH-Werten um den Neutralpunkt liegen PFOS und PFOA sowie ihre kürzer- und länger-kettigen Verwandten (sog. Homologe) als Anionen der zugehörigen Sulfon- bzw. Carbonsäuren in der aquatischen Umwelt überwiegend in der Wasserphase gelöst vor. Aufgrund ihrer Struktur ist zu erwarten, dass derartige Verbindungen im Untergrund mobil sind und daher sowohl beim Versickern von verunreinigtem Wasser als auch bei der Uferfiltration und Untergrundpassage in die Rohwässer der Wasserwerke gelangen können. Anhand von Beispielen von versickernden Löschwässern, die PFASs und PFCAs enthalten sowie durch Sickerwässer von Deponien, die das zur Trinkwassergewinnung verwendete Grundwasser verunreinigen, ist die Mobilität dieser Verbindungen an verschiedenen Standorten in den USA bereits nachgewiesen worden. Teilweise stehen diese Grundwasserverunreinigungen in den USA im Zusammenhang mit hohen Ausgleichszahlungen der verursachenden Firmen in Millionenhöhe. Obwohl signifikante Verunreinigungen der Trinkwasserressourcen und des Trinkwassers wie in den durch Chemiealtlasten verursachten Fällen in den USA in Deutschland nicht anzunehmen sind, beschäftigt sich das TZW derzeit im Rahmen eines vom DVGW geförderten Forschungsvorhabens mit der präventiven Aufklärung diesen Fragen.

Da die PFASs und PFCAs bei den deutschen Wasserversorgern bislang noch wenig bekannt sind, werden in diesem Beitrag literaturbekannte Daten und Fakten sowie erste eigene Ergebnisse zu diesem Thema zusammenfassend vorgestellt.

Eigenschaften von PFASs und PFCAs

Physikalisch-chemische Eigenschaften

Derzeit sind die physikalisch-chemischen Daten einer Reihe von PFASs und PFCAs nur unvollständig bekannt. Dies liegt größtenteils daran, dass diese Daten aufgrund der tensidartigen Eigenschaften dieser Chemikalien mit Standardmethoden nur schwierig oder überhaupt nicht bestimmt werden können. Beispielsweise kann der Oktanol-Wasser-Koeffizient, der üblicherweise als Maß für die Neigung einer Chemikalie zur Anreicherung im Fettgewebe dient, nicht bestimmt werden, wenn die zu untersuchende Chemikalie eine dritte Phase neben Oktanol und Wasser ausbildet.

Qualitativ lassen sich die Eigenschaften von PFASs und PFCAs, die ihr Verhalten bei der Anwendung, in der Umwelt und bei der spurenanalytischen Bestimmung dominieren, anhand von drei Fakten verstehen:

- Die freien perfluorierten Säuren sind vergleichsweise starke Säuren, die in wässrigem Medium in die entsprechenden Anionen und Protonen dissoziieren.
- Die perfluorierten Alkylreste besitzen gleichzeitig sowohl Wasser abweisende (hydrophobe) als auch Fett abweisende (lipophobe) Eigenschaften.
- Die Kohlenstoff-Fluor-Bindung ist die stärkste in der Natur vorkommende Kohlenstoff-Element-Bindung (Bindungsenergie ≈ 110 kcal/mol).

Die Tatsache, dass PFASs und PFCAs im Wasser anionisch vorliegen, erklärt warum zumindest die Vertreter mit kurzen Kettenlängen in der Umwelt überwiegend in der Wasserphase gelöst sind, sich offensichtlich weniger gut als ihre längerkettigen Homologen im Blut und anderen Organen anreichern und bei der analytischen Bestimmung um so schwieriger aus der Wasserprobe zu extrahieren sind, je kürzer die perfluorierte Alkylkette ist. Diese Eigenschaften geben auch einen Hinweis auf das bei der Wasseraufbereitung durch Adsorption an Aktivkohle zu erwartende abgestufte Verhalten.

Das hohe Ionisationspotential von Fluor (401,8 kcal/mol) und seine niedrige Polarisierbarkeit führen zu schwachen Wechselwirkungen innerhalb der Moleküle und zwischen den Molekülen. Dies äußert sich in den niedrigen Siedepunkten perfluorierter Verbindungen bezogen auf das Molekulargewicht sowie ihrer extrem niedrigen Oberflächenspannung und dem niedrigen Brechungsindex. Werden die perfluorierten Molekülteile mit einer Sulfonsäure- oder Carbonsäureeinheit kombiniert, entstehen sehr wirksame Tenside. Polymere Derivate, die Perfluoralkylketten enthalten, haben Schmutz und Wasser abweisende Eigenschaften und werden daher zur Imprägnierung von Papier, Teppichen, Textilien und Leder verwendet.

Die außergewöhnlich starke Kohlenstoff-Fluor-Bindung macht perfluorierte Verbindungen sehr widerstandsfähig gegen einen chemischen oder biochemischen Angriff. Wegen ihrer Stabilität können PFASs und PFCAs unter extremen Bedingungen, z. B. als Additive in Feuerlöschschäumen oder als Schaumbildner zur Unterdrückung von Säurenebeln in galvanischen Bädern zur Verchromung eingesetzt werden. Unter Umweltbedingungen werden PFOS, PFOA und ihre Homologen als Endprodukte des Abbaus einer Reihe von Vorläuferverbindungen angesehen.

Bioakkumulation

Ausgedehnte Untersuchungen haben gezeigt, dass PFASs und PFCAs in tierischen Geweben auf der ganzen Erde vorkommen. Im Gegensatz zu chlorierten und bromierten POPs werden PFASs und PFCAs nicht im Fettgewebe angereichert. Vielmehr reichern sich diese Verbindungen bevorzugt in Leber, Niere und Muskelgewebe an und binden sich an Proteine des Blutserums. Die Quellen dieser Verunreinigungen in Tieren und Menschen sind noch nicht vollständig aufgeklärt.

Es wurden geographische Trends der PFAS- und PFCa-Verteilung in Wildtieren gefunden. Die höchsten Konzentrationen von PFOS and PFOA werden in Meeressäugetieren und Fisch fressenden Tieren in industrialisierten Gebieten, z. B. in der Ostsee, im Mittelmeer, in den Großen Seen Nordamerikas und entlang asiatischer Küsten angetroffen.

Am häufigsten und meistens mit den höchsten Konzentrationen wird PFOS bei den Analysen auf PFASs und PFCAs angetroffen. Heutzutage wird PFOS

in jeder untersuchten Probe von Wildtieren nachgewiesen. Typische PFOS-Konzentrationen im Lebergewebe von Fischen, Vögeln und Säugetieren überstreichen einen weiten Bereich von einigen ng/g bis zu mehreren tausend ng/g.

Säugetiere am oberen Ende der Nahrungskette weisen in der Regel höhere Konzentrationen an PFOS und PFCAs auf als tiefer stehende Säugetiere. In der Leber von Eisbären aus der Arktis wurden beispielsweise PFOS-Konzentrationen über 4000 ng/g gefunden. Die höchsten PFOS-Konzentrationen (470 ng/g bis 179 µg/g) wurden in den Lebern von Waldmäusen in Belgien in der Nähe einer Fluorchemikalienfabrik der Firma 3M in Antwerpen gemessen. Die Anreicherung bestimmter perfluorierter Chemikalien in der Nahrungskette stellt einen möglichen Expositionspfad für Menschen dar.

Einige Untersuchungen berichten über zeitliche Entwicklungen der PFOS- bzw. PFCA-Konzentrationen. Im Verlauf der etwa letzten 30 Jahre scheinen die PFOS-Gehalte in tierischen Geweben exponentiell zugenommen zu haben. Diese Beobachtung geht einher mit der Zunahme der Produktion der Ausgangsverbindung POSF (Perfluorooctylfluorid), aus der PFOS und verwandte Verbindungen hergestellt werden, zwischen den 1980er Jahren und dem Auslaufen dieser Produktion seit Anfang des Jahres 2001.

Menschliche Belastung und Toxizität

Erste Hinweise auf eine menschliche Belastung durch Organofluorverbindungen wurde bereits Ende der 1960er-Jahre erhalten. Darauf folgende weitere Untersuchungen wiesen mehrere PFCs im Blut beruflich exponierter Arbeiter verschiedener Produktionsstandorte für Fluorchemikalien nach. Typische PFOS- und PFOA-Konzentrationen dieser Personengruppe liegen im unteren mg/L-Bereich.

Zur Beurteilung des möglichen Expositionspfads Trinkwasser-Mensch ist nur die Exposition nicht beruflich exponierter Menschen von Bedeutung. Die meisten Daten hierzu existieren für PFOS und PFOA. Die Konzentrationen im Blut liegen üblicherweise in der Größenordnung von einigen bis zu maximal wenigen hundert µg/L. Weitere PFC mit sechs bis zwölf Kohlenstoffatomen wurden in den letzten Jahren in Blutproben ebenfalls in µg/L-Konzentrationen entdeckt. Des Weiteren wurden perfluorierte Metaboliten von Zwischen-

produkten, die überwiegend für die Herstellung von Produkten für Endverbraucher eingesetzt wurden, im menschlichen Blut nachgewiesen. Zu diesen Produkten gehören vor allem Mittel aus dem Bereich der Imprägniermittel für Papier und Verpackungen, für Teppiche und Textilien. Der Nachweis dieser Indikatoren ist ein Hinweis darauf, dass typische Anwendungen perfluorierter Chemikalien durch den Endverbraucher möglicherweise einen wichtigen Expositionspfad für den Menschen darstellen.

In der Literatur finden sich zahlreiche Informationen zur Toxizität und Toxikokinetik, insbesondere für die intensiv untersuchten Verbindungen PFOS und PFOA. Danach werden PFOS und PFOA von Säugetieren nach oraler Aufnahme leicht absorbiert und verteilen sich dann hauptsächlich auf Serum und Leber. PFOS und PFOA können auch wichtige körpereigene Schutzbarrieren wie die Blut-Hirn-Schranke und die Plazentarschranke überwinden. PFOS und PFOA werden im Körper nicht metabolisiert oder abgebaut. Beide Chemikalien werden nur sehr langsam über Urin und Fäzes ausgeschieden. Für PFCAs wurde im Rattenversuch eine Zunahme der Ausscheidungsrate über den Urin mit abnehmender Kettenlänge beobachtet. Aus Untersuchungen ehemaliger Arbeiter aus der Fluorchemikalien-Produktion wurden lange biologische Halbwertszeiten im Menschen von 8,7 Jahren für PFOS und 4,4 Jahren für PFOA ermittelt.

PFOS und PFOA gelten als möglicherweise karzinogen. Für genotoxische Eigenschaften von PFOS und PFOA gibt es bisher keine Anhaltspunkte. Bei den in der Umwelt vorliegenden Konzentrationen spielt auch die akute Toxizität dieser Verbindungen eine untergeordnete Rolle. Im Rattenversuch wurden beispielsweise LD_{50} -Werte von 251 mg/kg für PFOS und von >500 (männliche Versuchstiere) und 250-500 mg/kg (weibliche Versuchstiere) ermittelt.

Bei subchronischen Toxizitätsstudien mit PFOS und PFOA an Nagetieren und Primaten wurde eine signifikante Erhöhung der Sterblichkeit der Versuchstiere beobachtet. Bei niedrigeren Konzentrationen traten hepatotoxische, immunotoxische und neurotoxische Effekte sowie Verhaltensstörungen auf.

Von besonderer Bedeutung sind reproduktionstoxische Effekte, die im Rattenversuch schon bei Konzentrationen im Serum auftraten, die teilweise um weniger als den Faktor 100 größer waren als die im menschlichen Blut der allgemeinen Bevölkerung gefunden Konzentrationen. Dieser Abstand wird

häufig bei Risikobewertungen angesetzt, um die Unterschiede zwischen Mensch und Tier sowie innerhalb der Bevölkerung zu berücksichtigen. Da die Toxizitätsprofile von PFOS und PFOA teilweise überlappen, sollte die Umweltbelastung aus Gründen der Vorsorge minimiert werden.

Die Aufnahme von PFCs wie PFOS und PFOA über den Trinkwasserspfad stellt nur einen möglichen Expositionspfad dar. Beispielsweise wurde in einer japanischen Studie gezeigt, dass bei einer angenommenen PFOS-Konzentration von 50 ng/L, die etwa dem höchsten in einem japanischen Trinkwasser gemessenen Wert entspricht, zu einem Anstieg des PFOS-Gehalts im menschlichen Serum von 8-16 µg/L oder etwa 25-50% des mittleren Gehalts im Serum beträgt.

Ökotoxizität

In zahlreichen Ökotoxizitätstests mit aquatischen Organismen verschiedener PFASs und PFCAs traten toxische Effekte durchweg erst im mg/L-Bereich auf. Basierend auf dem Vergleich mit den in den Oberflächengewässern üblicherweise vorkommenden Konzentrationen im ng/L- bis zum unteren µg/L-Bereich können ökotoxische Wirkungen auf aquatische Organismen daher nicht erwartet werden.

Industrielle Herstellung von PFASs und PFCAs

PFASs, PFCAs und ihre Derivate können grundsätzlich auf zwei Arten hergestellt werden, die jeweils zu technischen Substanzmischungen mit unterschiedlichen Mustern an Kettenlängen und Verzweigung der Molekülketten führen.

Elektrochemische Fluorierung

Die elektrochemische Fluorierung wurde in der Vergangenheit hauptsächlich von der Firma 3M angewandt und läuft nach den Reaktionsschemata (1) bzw. (2) ab.



Dabei werden sämtliche Wasserstoffatome eines Sulfonyl- oder Carbonyl-Ausgangsmaterials, z. B. der Säurefluoride, durch Fluoratome ersetzt. Auf diese Weise entstehen etwa 70 % **lineare** und 30 % **verzweigte** Moleküle, mit **gerader** und **ungerader** Anzahl von Kohlenstoffatomen im Molekül. Durch weitere Reaktionen am Sulfonyl- bzw. Carbonylrest können eine Vielzahl von Derivaten mit einzigartigen Anwendungseigenschaften hergestellt werden. Dies ist am Beispiel der Sulfonylverbindungen in Bild 2 gezeigt. Alle diese Derivate sind grundsätzlich potentielle Vorläuferverbindungen, die zu den entsprechenden Sulfonaten und Carboxylaten wie PFOS und PFOA abgebaut werden können. Für verschiedene Einzelverbindungen wurde dies in Abbau-studien bereits nachgewiesen.

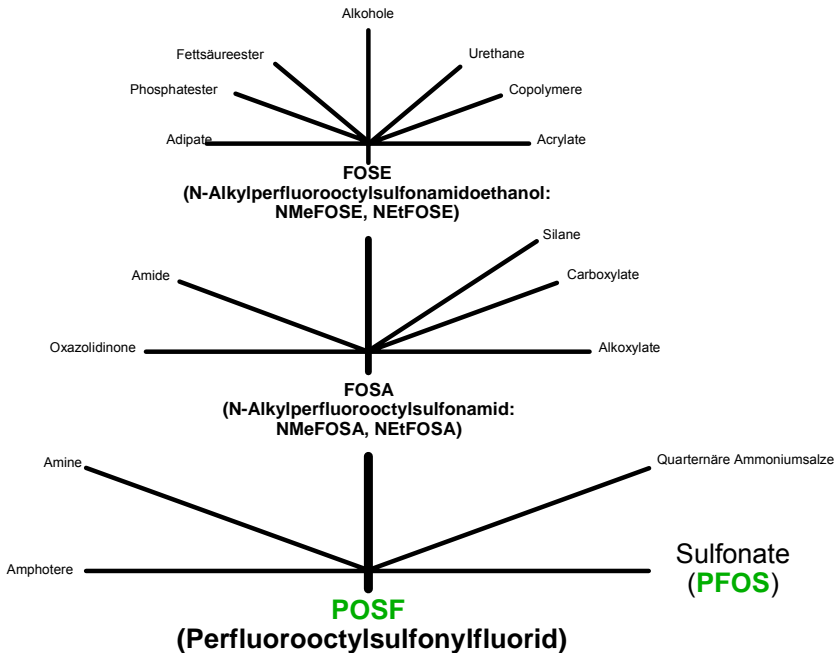


Bild 2: Reaktionsstammbaum der Ausgangsverbindung Perfluorooctylsulfonylfluorid (POSF)

Anwendung perfluorierter Verbindungen und potentielle Eintragspfade in die Gewässer

In Bild 4 sind verschiedene typische Einsatzgebiete perfluorierter Chemikalien dargestellt. In PFC-Produkten können PFASs und PFCAs entweder als Wirkstoffe oder als Verunreinigungen vorkommen. Des Weiteren enthalten solche Produkte Vorläuferverbindungen, die zu PFASs oder PFCAs abgebaut werden können. Endprodukte des Abbaus sind die Sulfonate und Carboxylate wie PFOS und PFOA.



Bild 4: *Typische Anwendungsgebiete von Fluoropolymeren und Fluortensiden*

PFOS-verwandte Chemikalien

Die weltweite jährliche Produktion von PFASs nach dem elektrochemischen Verfahren wird für das Ende des letzten Jahrzehnts auf 4650 t geschätzt. Die geschätzte Menge an PFASs, die pro Jahr in der EU eingesetzt werden, beträgt ca. 500 t und verteilt sich auf die in Bild 5 gezeigten Anwendungen.

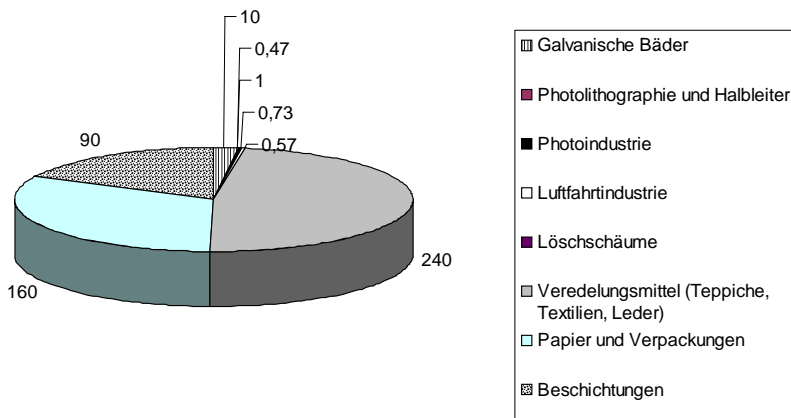


Bild 5: *Geschätzte jährlicher Verbrauch an PFASs in der EU; für Löschschäume ist nur die geschätzte freigesetzte Menge aufgeführt*

Trotz der Vielzahl der Anwendungen können PFOS-verwandte Chemikalien entsprechend ihren Einsatzgebieten grob in drei Kategorien eingeteilt werden: (i) Chemikalien zur Oberflächenbehandlung, (ii) Chemikalien zur Papier- und Verpackungs Imprägnierung und (iii) sonstige Spezialchemikalien. Dabei basieren die Anwendungen dieser Verbindungen auf deren Wasser, Fett und Schmutz abweisenden Eigenschaften und oder auf ihrem tensidartigen Charakter, gepaart mit der außergewöhnlichen Stabilität perfluorierter Verbindungen. Polymere Verbindungen werden hauptsächlich zur Imprägnierung von Teppichen, Textilien, Leder sowie Papier und Verpackungen eingesetzt, während niedermolekulare Perfluortenside z. B. in Feuerlöschschäumen oder zum Unterdrücken korrosiver und gesundheitsschädlicher Nebel in galvanischen Bädern zur Verchromung dienen.

Die Imprägniermittel auf Polymerbasis und die darin enthaltenen niedermolekularen Verunreinigungen können grundsätzlich während ihres gesamten Lebenszyklus in die Umwelt und speziell in die Gewässer gelangen, angefangen von der Herstellung der Chemikalien selbst, über ihre Anwendung bei der Herstellung von Fasern und Textilien bis hin zur Reinigung von imprägnierten Gütern und schließlich deren Entsorgung. Bei niedermolekularen Perfluortensiden, die bereits in wässriger Lösung eingesetzt werden, ist der Eintrag in die Umwelt über den Abwasserpfad am wahrscheinlichsten.

Perfluoralkylcarboxylate

PFCAs, wie z.B. PFOA und seine Homologen, werden in geringeren Mengen als die PFOS-verwandten Verbindungen hergestellt. Die weltweite Produktion zwischen 1951 und 2004 beträgt zwischen 4400 und 8000 t.

Direkte Quellen für deren Eintrag in die aquatische Umwelt sind die Produktion der Ammoniumsalze von PFOA und PFNA und deren Einsatz als Dispergiermittel bei der Fluorpolymerherstellung, als Tenside in Feuerlöschschäumen und in zahlreichen Produkten für private Haushalte und Industrie. Allein zur Herstellung von Fluorpolymeren wird für das Jahr 2000 eine weltweite Verbrauchsmenge von 230-375 t PFCAs geschätzt.

Indirekte Quellen für PFCAs in der Umwelt umfassen Verunreinigungen und Abbauprodukte in PFOS-verwandten Verbindungen (s. Bild 2) und Fluortelomer-basierten Produkten (s. Bild 3). PFOS-verwandte Chemikalien enthalten Spuren von PFOA und anderen PFCAs vom ppm-Bereich bis zu etwa einem Gewichtsprozent. Kürzlich wurde gezeigt, dass PFOS-verwandte Verbindungen zu verschiedenen PFCAs abgebaut werden können. Fluortelomer-basierte Produkte enthalten ebenfalls PFCAs als unerwünschte Reaktionsnebenprodukte im ppm-Bereich. Außerdem wird geschätzt, dass Fluortelomer-basierte Produkte etwa 2 % Fluortelomeralkohole (FTOHs) und Fluortelomerolefine (FTOs) enthalten. FTOHs und FTOs sind flüchtige Verbindungen, die in der Atmosphäre - initiiert durch OH-Radikale - zu PFCAs abgebaut werden können. Die atmosphärische Verfrachtung dieser Vorläuferverbindungen liefert möglicherweise eine Erklärung dafür, dass PFCAs selbst in Wildtieren entlegener Gebieten der Erde, z. B. in Eisbären in der Arktis, nachgewiesen werden.

Mengenmäßig werden die indirekten Quellen gegenüber den direkten PFCA-Quellen als geringfügig angesehen.

Vorkommen in Grund-, Oberflächen- und Trinkwasser

Eine Reihe von PFASs und PFCAs sowie einige ihrer Vorläuferverbindungen wurden weltweit in Abwasser, Klärschlamm, Oberflächenwasser, Grundwasser, Meerwasser, Meeressedimenten und in Trinkwasser nachgewiesen.

Momentan gilt der Abwasserpfad als wichtigster Eintragungspfad in die Oberflächengewässer.

Grundwasserbelastungen sind aus den USA bekannt und gehen dort auf lokale Verunreinigungen durch Fluorchemikalienfabriken bzw. deren Chemikalienablagerungen auf Deponien zurück. Weitere Grundwasserbelastungen sind durch versickerndes Löschwasser entstanden, das auf U. S. Militärflughäfen im Rahmen von Feuerlöschübungen anfiel.

Die weltweit gemessenen Konzentrationen der Einzelverbindungen in Oberflächenwasserproben liegen typischerweise im ng/L-Bereich. Dies trifft auch für Deutschland zu, wo das TZW bereits im Jahre 2004 erste Messungen an Proben aus deutschen Fließgewässern durchgeführt hatte (Bild 6). Bei diesen Messungen wurden überwiegend Verbindungen mit gerader Anzahl an Kohlenstoffatomen in der Alkylkette gefunden. PFOS und PFOA mit acht Kohlenstoffatomen stellten dabei die mengenmäßig wichtigsten Verbindungen dar. Dies wurde auch durch nachfolgende Messungen in den Jahren 2005 und 2006 bestätigt und ist ein Hinweis darauf, dass die nach dem Telomerisierungsprozess hergestellten Verbindungen mittlerweile eine wichtigere Rolle spielen als die nach dem elektrochemisch produzierten.

Auch im Trinkwasser wurden perfluorierte Verbindungen inzwischen nachgewiesen. Hohe und bereits gesundheitlich bedenkliche Konzentrationen im Trinkwasser im µg/L-Bereich sind durch Emissionen der großen Firmen 3M Company und DuPont in der Nähe wichtiger Produktionsstandorten für perfluorierte Verbindungen in den USA bekannt. Hier werden bereits Ausgleichszahlungen an die betroffenen Einwohner in Form von Flaschenwasserprogrammen, einer großen Gesundheitsstudie sowie der Finanzierung des Anschlusses von Eigenwasserversorgern an das öffentliche Trinkwassernetz und der Bereitstellung von Aktivkohlefiltern geleistet. Wesentlich geringere Konzentrationen im Trinkwasser im unteren ng/L-Bereich wurden aus Japan berichtet. Ob die in Japan gemessenen Konzentrationen auch typisch für die Situation in Deutschland sind, soll im Rahmen eines am TZW bearbeiteten DVGW-Projekts durch Messungen im Jahr 2006 geklärt werden.

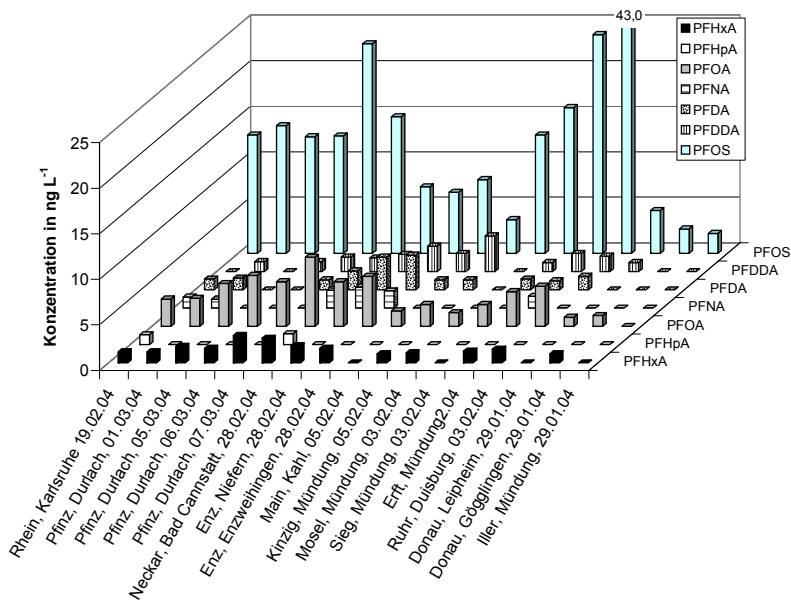


Bild 6: Konzentrationen von PFOS und homologen PFCAs in deutschen Fließgewässern

Interessanterweise liegen noch keine quantifizierbaren Aussagen zum Verhalten von PFASs und PFCAs bei typischen Wasseraufbereitungsschritten wie der Uferfiltration, der Ozonung oder der Adsorption an Aktivkohle vor. Aufgrund der Stabilität der Verbindungen ist zu erwarten, dass die Adsorption an Aktivkohle das am ehesten geeignete Verfahren sein dürfte, wenn auch ein abgestuftes Verhalten der einzelnen Verbindungen entsprechend der Molekülgröße anzunehmen ist. Auf diesem Gebiet besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Danksagung

Der Autor dankt dem DVGW für die Förderung der Arbeiten zu den perfluorierten Verbindungen im Rahmen des Projekts "Untersuchungen zum Vorkommen perfluorierter Alkylverbindungen" in deutschen Trinkwasserressourcen (W7/01/04) sowie der RIWA für die Finanzierung der Literatur-

studie "Perfluoroalkylcarboxylates and -sulfonates - Emerging Contaminants for Drinking Water Supplies?".

Literatur

- [1] 3M Company.
Sulfonated perfluorochemicals in the environment: sources, dispersion, fate and effects.
U.S. EPA public docket AR226-0620. 1-3-2000.
- [2] Environmental Working Group.
PFCs - A family of chemicals that contaminate the planet.
<http://ewg.org:16080/reports/pfcworld/> . 15-2-2006.
- [3] Fluoride Action Network (F.A.N.)
Pesticide Project. PFOS: Perfluorooctane sulfonate and PFOA: Perfluorooctanoic acid, Perfluorinated chemicals.
<http://www.fluoridealert.org/pesticides/pfos.pfoas-page.htm> . 22-8-2005.
- [4] Fricke, M.; Lahl, U.
UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox. 2005, 17, 36-49.
- [5] Hekster, F. M., Voogt, P. de, Pijnenburg, A. M. C. M, and Laane, R. W. P. M. Perfluoroalkylated substances - aquatic environmental assessment. 1-7-2002.
- [6] Kissa, E.
Fluorinated surfactants and repellents;
Marcel Dekker: New York, 2001.
- [7] Kudo, N.; Kawashima, Y. J Toxicol. Sci. 2003, 28, 49-57.
- [8] Lehmler, H. J. Chemosphere 2005, 58, 1471-1496.
- [9] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Environment Directorate, and Joint Meeting of the Chemicals Committee and the Working Party on Chemicals, Pesticides and Biotechnology.
Co-operation on existing chemicals, Hazard assessment of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and its salts. 21-11-2002.

- [10] Prevedouros, K.; Cousins, I. T.; Buck, R. C.; Korzeniowski, S. H.
Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 32-44.
- [11] Risk & Policy Analysts Ltd. and BRE Environment.
Risk reduction strategy and analysis of advantages and drawbacks
for perfluorooctane sulphonate (PFOS), prepared for Department for
Environment,
Food and Rural Affairs and the Environment Agency for England and
Wales. 3-8-2004.
- [12] Siegemund, G.; Schwertferger, W.; Feiring, A.; Smart, B.; Behr, F.;
Vogel, H.; McKusik, B.
Fluorine Compounds, Organic; in Gerhartz, W., ed.: Ullmann's
encyclopedia of industrial chemistry,
VCH: Weinheim, 1988; pp 349-392.
- [13] Schultz, M. M.; Barofsky, D. F.; Field, J. A.
Env. Eng. Sci. 2003, 20, 487-501.
- [14] U. S. Environmental Protection Agency (EPA).
Revised draft hazard assessment of perfluorooctanoic acid and its
salts.
U. S. EPA public docket AR226-1136. 4-11-2002.
- [15] U. S. Environmental Protection Agency (EPA).
Preliminary risk assessment of the developmental toxicity associated
with exposure to perfluorooctanoic acid and its salts. 10-4-2003.