Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC): Einsatz mit Konsequenzen

Per- and polyfluorinated chemicals (PFC): use with consequences

Annegret Biegel-Engler, Claudia Staude, Lena Vierke, Christoph Schulte

Abstract
Per- and polyfluorinated chemicals (PFC) are used in a variety of consumer products and are ubiquitously present in the environment. The chemicals are not degradable and remain for centuries in the environment. PFC are also present in human blood and breast milk. Humans are mainly exposed to PFC via nutrition, contaminated drinking water and air. The results of the largest epidemiological study on PFC with 69,000 subjects illustrate the health risks of PFC. The German Federal Environment Agency is therefore working on the regulation of these chemicals.

Zusammenfassung
Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) werden in einer Vielzahl von Verbraucherprodukten eingesetzt. Gleichzeitig führte dies bereits zu einer weltweiten Verbreitung in allen Umweltmedien. PFC sind kaum abbaubar und verbleiben deshalb für Jahrhunderte in der Umwelt und reichern sich dort an. Auch im menschlichen Blut und in Muttermilch sind PFC nachweisbar. Die Aufnahme in den menschlichen Organismus erfolgt hauptsächlich über Nahrung, kontaminiertes Trinkwasser und die Atemluft in Innenräumen. Die Ergebnisse der bisher größten epidemiologischen PFC-Studie mit 69.000 Menschen verdeutlichen die gesundheitsschädlichen Wirkungen der PFC. Das Umweltbundesamt arbeitet deshalb an der Regulierung dieser Chemikalien.

Einleitung

Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) geraten immer wieder in den Fokus der Öffentlichkeit. Neben Meldungen zu PFC-Funden in Grund- und Oberflächenwasser in verschiedenen Regionen Deutschlands erregte die Greenpeace-Studie zu umweltschädlichen PFC in Outdoor-Kleidung im Oktober 2012 Aufsehen (Greenpeace 2012). Alle in dieser Studie untersuchten Kleidungsstücke waren mit PFC belastet.

Dies kommt nicht von ungefähr, denn PFC verleihen Kleidungsstücken atmungsaktive, wasser-, schmutz- und fettabweisende Eigenschaften. Wegen dieser besonderen Eigenschaften und ihrer chemischen und thermischen Stabilität werden PFC auch in vielen anderen Verbraucherprodukten eingesetzt.

Perfluorierte Chemikalien sind weltweit im Blut der Allgemeinbevölkerung verbreitet (Schröter-Kermani et al. 2012; Fromme et al. 2009). Perfluorierte Oktansäure (PFOA), einer der bekanntesten Vertreter der PFC, verbleibt lange im menschlichen Blut: Die Halbwertszeit beträgt circa 3,5 Jahre. PFOA reichert sich auch in anderen Organen, zum Beispiel in Lunge, Leber und Niere, an. Es ist schädlich für die Fortpflanzung und gilt als krebserregend (Fromme et al. 2009). Zusätzlich gibt es Hinweise auf endokrine Wirkungen dieser Chemikalie. Erst kürzlich wurde im Umkreis der Produktionsanlage eines bedeutenden fluorchemischen Unternehmens die bisher größte epidemiologische Studie mit 69.000 Probanden abgeschlossen. Es wurde deutlich: Erhöhte PFOA-Expositionen begünstigen eine Reihe von Krankheiten.

1. Wirkungen von PFOA auf den Menschen

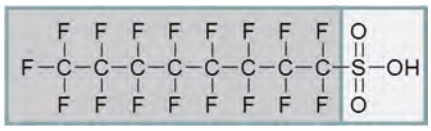
In der Nähe des Chemieunternehmens DuPont (West Virginia Washington Works) im Südwesten Parkersburgs (USA) wurden circa 500-fach höhere PFOA-Konzentrationen im Blut der Bevölkerung als bei der Allgemeinbevölkerung gemessen. Seit den 1950er Jahren emittierte dieses Chemieunternehmen PFOA in die Luft und in den Ohio River.

Was sind per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC)?

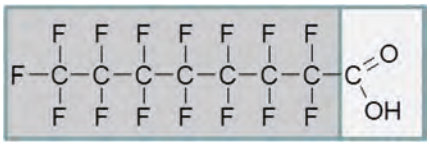
PFC kommen nicht natürlich vor, sondern haben einen anthropogenen Ursprung. Chemisch gesehen bestehen PFC aus Kohlenstoffketten verschiedener Längen, bei denen die Wasserstoffatome vollständig (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert) durch Fluoratome ersetzt sind (**Tabelle 1**). Diese extrem starke Bindung zwischen Kohlenstoff und Fluor trägt zu ihrer hohen Stabilität bei.
Neben den in **Tabelle 1** dargestellten Stoffen sind noch eine Vielzahl anderer PFC am Markt erhältlich, zum Beispiel per- und/oder polyfluorierte Phosphon- und Phosphorsäuren, Acrylate, Amine, Iodide und so weiter. Unter den mehr als 650 verschiedenen PFC sind die perfluorierte Oktansulfonsäure (PFOS) und die perfluorierte Oktansäure (PFOA) die bekanntesten Verbindungen.
PFOS wurde bereits wegen der persistenten, bioakkumulierenden und toxischen Eigenschaften als langlebiger organischer Schadstoff (POP, persistent organic pollutant) identifiziert und somit in den Anhang B der Stockholmer Konvention aufgenommen. Bis auf wenige Ausnahmen darf PFOS weder hergestellt noch verwendet werden.
PFOA ist genau wie PFOS nicht abbaubar, reichert sich in Organismen an und ist toxisch. PFOA bindet an Proteine im Blut und reichert sich so in Blut, Niere, Leber und anderen Organen an.
Polyfluorierte Chemikalien können zu perfluorierten Stoffen abgebaut werden. Daher werden sie weitläufig als Vorläufer bezeichnet. Sie sind zum Teil flüchtig und werden deshalb vorwiegend in der Luft gemessen (Vierke et al. 2012).

Tabelle 1: Beispiele per- und polyfluorierter Verbindungen und ihre chemische Struktur.

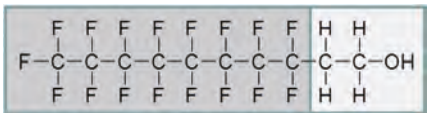
Perfluorierte Sulfonsäuren (PFSAs)
z. B.perfluorierte Oktansulfonsäure (PFOS)



Perfluorierte Carbonsäuren (PFCAs)
z. B. perfluorierte Oktansäure (PFOA)



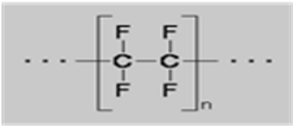
Polylfuorierte Vorläuferverbindungen z. B. Fluortelomeralkohole (FTOHs)
8:2 Fluortelomeralkohol (FTOH)



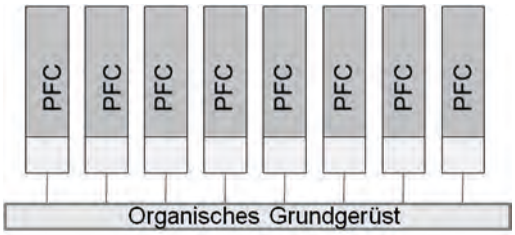
In Verbraucherprodukten werden überwiegend Polymere verwendet (**Tabelle 2**). Dies können zum einen Fluorpolymere sein, wie zum Beispiel PTFE (Teflon). PFOA wird als Hilfsstoff in der PTFE-Herstellung verwendet, wobei manche Fluorpolymerhersteller PFOA bereits ersetzt haben. Darüber hinaus werden häufig fluorierte Polymere eingesetzt, die aus einem organischen Grundgerüst bestehen und in den Seitenketten kovalent gebundene PFC aufweisen, die sogenannten Fluorcarbonharze. Diese Seitenketten können poly- oder auch perfluoriert sein. Die Polymerisierungsreaktion erfolgt nicht vollständig. Deshalb können diese Polymere Spuren von freien PFC enthalten, die dann entweder aus dem Verbraucherprodukt ausgasen oder ausgewaschen werden (Prevedouros et al. 2006). Unter Wissenschaftlern wird außerdem debattiert, welchen Einfluss der Abbau der fluorierten Polymere an den Umweltkonzentrationen der PFC hat und ob ein solcher Abbau überhaupt möglich ist.

Tabelle 2: Beispiele von Fluorpolymeren und fluorierten Polymeren und ihre chemische Struktur.

Fluorpolymere
z. B. Polytetrafluorethylen (PTFE)



Fluorierte Polymere
z. B. Fluorcarbonharze



Im Jahr 2002 bemerkten sechs Wasserversorger der Region erstmalig, dass PFOA auch im Trinkwasser der Region verbreitet ist. Wie lange die Bevölkerung dem verunreinigten Trinkwasser ausgesetzt war, ist unbekannt. Die betroffenen Gemeinden klagten gegen DuPont. Ein Ergebnis dieses Prozesses war die Durchführung einer einjährigen Studie – das PFOA-Gesundheitsprojekt (C8 Health Project: http://www.c8sciencepanel.org/index.html [Abrufdatum: 31.01.2013]). Von August 2005 bis Juli 2006 sammelten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Informationen über den Gesundheitszustand der Bevölkerung durch Interviews und Fragebögen. Auch Blutproben von rund 69.000 Menschen, die in der Nähe der DuPont-Fabrik in West Virginia leben, wurden untersucht (Frisbee et al. 2009). Unabhängige Epidemiologen wiesen einen möglichen Zusammenhang zwischen verschiedenen Krankheiten und der langen PFOA-Exposition nach. Neben hohen Cholesterinwerten, chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen (Colitis Ulcerosa), Schilddrüsenerkrankungen, Hoden- und Nierenkrebs, wurde

auch Präeklampsie und erhöhter Blutdruck während der Schwangerschaft durch erhöhte PFOA-Blutwerte begünstigt (Knox et al. 2011; Lopez-Espinosa et al. 2011; Lopez-Espinosa et al. 2012; Frisbee et al. 2010; Savitz et al. 2012).

Eine kürzlich veröffentlichte Studie mit 656 Kindern zeigt, dass der langfristige Impferfolg bei den Kindern vermindert ist, die PFC stärker ausgesetzt waren und dementsprechend höhere PFC-Konzentrationen im Blut aufwiesen. Gegenstand der Untersuchungen aus dem Zeitraum von 1997 bis 2000 waren Impfungen gegen Diphterie und Tetanus. Die im Säuglingsalter geimpften Kinder wurden im Alter von fünf und sieben Jahren auf ihre Serum-Antikörperkonzentrationen gegen Diphterie und Tetanus und gleichzeitig auf die PFC-Konzentration untersucht (Grandjean et al. 2012).

In Langzeitstudien mit Ratten und Mäusen fördern perfluorierte Oktansulfonsäure (PFOS) und PFOA die Entstehung von Leber-, Bauchspeicheldrüsen- und Leydigzell-Tumoren. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den Menschen ist umstritten. Arbeiter aus der fluorchemischen Industrie erkrankten jedoch häufiger an Krebs. Unbestritten ist die reproduktionstoxische Wirkung von PFOA und PFOS. Versuche zeigten eine erhöhte Sterblichkeit neugeborener Mäuse bei PFOA-Exposition. Zusätzlich war ihr Körpergewicht gegenüber nichtexponierten Mäusen deutlich geringer. Auch wurde eine verzögerte Geschlechtsreife in verschiedenen Studien an Mäusen festgestellt (European Chemicals Agency, 2011). Erste Hinweise für fortpflanzungsschädigende Wirkungen von PFC am Menschen gibt es bereits: Eine Studie begründet den Verdacht, dass PFOS und PFOA die Fruchtbarkeit von Frauen negativ beeinflussen (Fei et al. 2009). Eine weitere Studie zeigte, dass die Spermienqualität und die Spermienanzahl bei Männern mit höherer PFOA- und PFOS-Exposition vermindert war (Joensen et al. 2009). Es liegen weitere Studien vor, die die Wirkungen von PFOA auf das Hormonsystem beschreiben (White et al. 2011).

2. Wie nehmen wir PFC in unseren Körper auf?

Menschen nehmen PFC hauptsächlich über die Nahrung oder über kontaminiertes Trinkwasser auf. PFC wurden zum Beispiel bereits in Kartoffeln, Popcorn, Fleisch, Milchprodukten, Eiern, Fisch und so weiter nachgewiesen. Quellen sind hier entweder PFC in Boden, Wasser und Luft oder Verpackungsmaterialien. Auch erhöhte Konzentrationen in Innenräumen – zum Beispiel durch mit PFC behandelte Teppiche oder Möbelstücke – tragen zur PFC-Belastung im Blut bei. Kleinkinder nehmen PFC zusätzlich durch erhöhte Hausstaubexpositionen beim Krabbeln auf (D‘Hollander et al. 2010; Fromme et al. 2009). Die Chemikalien können die Placenta überwinden und werden dadurch bereits im Mutterleib auf den Fötus übertragen. Die PFC-Konzentrationen im Nabelschnurblut liegen zwischen 30 und 79 % der mütterlichen Blutkonzentrationen (Gützkow et al. 2011). Stillende Mütter übertragen PFC durch die Muttermilch auf ihre Kinder. Einer norwegischen Studie zufolge nehmen die PFOA-Konzentrationen im mütterlichen Blut um 46 % nach 6-monatiger Stillzeit und um 93 % bei einjähriger Stillzeit ab (Thomsen et al. 2010). Die Serumkonzentrationen von 6 Monate alten Säuglingen war durchschnittlich 4,6-mal höher als im mütterlichen Blutserum während der Geburt (Fromme et al. 2010). Norwegische Wissenschaftler zeigten, dass gestillte Kinder durchschnittlich täglich 4,1 Nanogramm PFOA pro Kilogramm Körpergewicht aufnehmen. Diese Aufnahmerate ist 15-fach höher als die von Erwachsenen (Haug et al. 2011). Stillen ist demnach eine Hauptquelle für PFOA bei Säuglingen.

3. Welche Produkte enthalten PFC?

PFC sind langlebig, das heißt chemisch und thermisch stabil. Die fluorierten Kohlenstoffketten sind außerdem sowohl wasser- als auch fettabweisend. In Verbraucherprodukten sind meist PFC-Polymere enthalten. Die fluorierten Ketten sind bei fluorierten Polymeren wie die Borsten einer Bürste angeordnet. Dadurch wird erreicht, dass weder Wassermoleküle noch Fetttröpfchen in Textilien eindringen können, sondern vom Stoff abperlen. Auf diese Art und Weise lassen sich sogar ölabweisende Oberflächen generieren. Diese Eigenschaften verleihen Produkten Charme: Teppiche sind leicht zu reinigen, Arbeitshosen werden nicht schmutzig und weiße Hemden bleiben lange fleckenfrei. PFC in Imprägniermitteln helfen nach ihrer Anwendung, dass diese Eigenschaften auch nach mehrmaligem Waschen bestehen bleiben. Die wasserdichte Membran in Outdoorkleidung ist oft nicht sichtbar, denn sie befindet sich unterhalb der äußeren Textilschicht. Diese Membranen bestehen häufig aus einem Fluorpolymer, wie zum Beispiel Poly-

tetrafluorethylen (PTFE) – besser bekannt als Teflon. PFOA wird zum Teil noch als Hilfsstoff in der PTFE-Herstellung verwendet. Spuren von PFOA können noch im fertigen Produkt enthalten sein. Durch das Waschen und den Gebrauch der Textilien gelangen PFC in die Umwelt.

Die gleichzeitig fett- und wasserabweisenden Eigenschaften der Chemikalien werden aber auch in der Lebensmittelverpackungsindustrie geschätzt. Mit Fluorchemie ausgerüstete Papiere und Kartons verhindern das Austreten von Fett und Wasser – Eigenschaften, die vom Pappbecher bis zum Pizzakarton Anwendung finden. PTFE und andere Fluorpolymere sorgen auch dafür, dass in der Küche nichts anbrennt. In antihaftbeschichteten Töpfen, Pfannen, Backblechen und so weiter werden solche Polymere häufig verwendet.

Die fluorierten Kohlenstoffketten weisen noch weitere einzigartige Eigenschaften auf: Sie sorgen für reibungsfreie Grenzflächen, sodass quasi keine Reibung zwischen zwei verschiedenen Phasen entsteht. Dies macht man sich zum Beispiel in Feuerlöschschäumen zunutze. Brennt eine Flüssigkeit, wie etwa Diesel, so sorgen PFC im Löschschaum dafür, dass sich der Schaum sehr schnell auf der brennenden Flüssigkeit ausbreitet. Allerdings sorgt damit fast jeder Löscheinsatz für einen Eintrag von PFC in die Umwelt.

Der geringe Reibungswiderstand ist auch für Wintersportler vorteilhaft. Skiwachse enthalten PFC. Beim Wachsen der Ski können PFC über die Atemluft in den Körper aufgenommen werden (Freberg et al. 2010; Nilsson et al. 2010). Die geringe Reibung vermindert auch den Verschleiß von Geräten. Deshalb werden die Polymere auch in Druckerfarben, Wachsen und Schmierstoffen eingesetzt. PFC werden auch Pestiziden beigemischt, weil dadurch erreicht werden kann, dass sich kleinste Tropfen mit geringen Mengen der hochaktiven Wirkstoffe auf dem Feld verteilen lassen. Häuserfassaden lassen sich mit Fluorchemie vor unerwünschten Verschmutzungen, zum Beispiel Graffitis, schützen. Auch Wetterschutzfarben und -lacke können PFC enthalten (Prevedouros et al. 2006).

Die unerwünschten Eigenschaften – Persistenz, Anreicherung in Organismen und Toxizität – der langkettigen PFC sind den Behörden und auch den Unternehmen bekannt. Die Industrie setzt daher vermehrt auf kurzkettige Alternativen, mit Kettenlängen von bis zu sechs Kohlenstoffatomen. Der derzeitigen Datenlage zufolge reichern diese sich deutlich weniger in Organismen an und sind weitaus weniger toxisch. Daten aus Schweden zeigen allerdings bereits im Blutserum einen Anstieg der kurzkettigen perfluorierten Sulfonsäuren im Blut von Frauen (Glynn et al. 2012).

4. Wo finden sich PFC in der Umwelt?

PFC sind ubiquitär in der Umwelt nachweisbar. Perfluorierte Chemikalien werden in der Umwelt weder abiotisch noch biotisch abgebaut und sind daher noch viele Jahrzehnte nachdem sie in die Umwelt gelangt sind, dort zu finden. Vor allem in **Gewässern** werden die gut wasserlöslichen perfluorierten Chemikalien nachgewiesen. Über Wasserströmungen werden die Stoffe in weit entfernte Gebiete transportiert, zum Beispiel bis in die Arktis. Aufgrund der Persistenz der Substanzen können ihnen Kläranlagen nichts anhaben. Vielmehr entstehen in der Kläranlage durch Umwandlungsprozesse von abbaubaren Vorläuferverbindungen zusätzliche perfluorierte Stoffe. PFC gelangen dann über die Flüsse in die Meere. Sogar in entlegenen Gebieten, wie der Tiefsee oder der Arktis, sind PFC nachweisbar. Manche PFC binden auch an Partikel in Wasser und Luft (Prevedouros et al. 2006).

Andere PFC adsorbieren während der A**bwasserreinigung** an Klärschlamm. Wegen seines hohen Nährstoffgehaltes wird Klärschlamm in der Landwirtschaft oft als Dünger verwendet. Dadurch können PFC in den Boden und somit ins Grundwasser gelangen, aber auch in angrenzende Oberflächengewässer abgeschwemmt werden.

In der **Luft** werden hauptsächlich flüchtige PFC gefunden. Diese Verbindungen, wie beispielsweise die Fluortelomeralkohole, werden zu den langlebigen Perfluorcarbonsäuren abgebaut. Diese flüchtigen Vorläuferverbindungen werden in der Atmosphäre über Luftströmungen verteilt und durch Niederschlag ausgewaschen. **Innenraumkonzentrationen** übersteigen die Außenluftkonzentrationen um das 10- bis 20-Fache (Langer et al. 2010; Shoeib et al. 2005). Dies ist abhängig von der Ausstattung des Innenraums. In Outdoorläden wurden bisher die höchsten Luftkonzentrationen von PFC gemessen. Die Quellen sind hier etwa wasserabweisende Texti-

lien und Imprägniermittel aber auch schmutzabweisende Teppichböden.

Besorgniserregend sind zudem die Funde von perfluorierten Chemikalien in **Biota**. Langkettige PFCA und PFSA werden weltweit in Organismen nachgewiesen, zum Beispiel in Fischen, Eisbären und Robben. Aquatische Lebewesen nehmen PFC vorrangig aus dem Wasser und durch kontaminierte Beute auf. PFC reichern sich sogar entlang der Nahrungskette an. Die höchsten PFOS-Werte wurden bisher bei Eisbären gemessen. PFOA reichert sich zusätzlich auch in terrestrischen Nahrungsketten an. Terrestrische Lebewesen nehmen PFC aus Luft, Boden, Wasser und Nahrung auf. Die Aufnahme von kurzkettigen perfluorierten Chemikalien mit bis zu sechs Kohlenstoffatomen wiesen Wissenschaftler kürzlich in Salatblättern und anderen Pflanzen nach (Felizeter et al. 2012).

In die Umwelt können PFC bereits bei ihrer Herstellung und der Herstellung PFC-haltiger Produkte gelangen. Im weiteren Verlauf des Lebenszyklus können PFC beim Einsatz und dem Gebrauch dieser Produkte freigesetzt werden. Werden diese Erzeugnisse dann entsorgt, besteht weiterhin die Möglichkeit, dass PFC in die Umwelt gelangen.

5. Was macht das Umweltbundesamt, um Mensch und Umwelt vor PFC-Belastungen zu schützen?

Im Dezember 2012 identifizierte die EU auf Initiative des Umweltbundesamtes (UBA) die langkettigen Perfluorcarbonsäuren mit einer Kohlenstoffkette von elf bis vierzehn Kohlenstoffatomen als besonders besorgniserregende Stoffe. Als besonders besorgniserregend gelten Stoffe zum Beispiel wegen ihrer krebserzeugenden, erbgutverändernden oder fortpflanzungsgefährdenden Eigenschaften oder weil sie schwer abbaubar (persistent) sind, sich in Organismen anreichern (bioakkumulierend) und toxisch in der Umwelt wirken. Die oben genannten Perfluorcarbonsäuren sind aufgrund ihrer sehr persistenten und sehr bioakkumulativen Eigenschaften in die Kandidatenliste der Europäischen Chemikalienverordnung REACH (Verordnung (EG) Nr. 1907/2006) aufgenommen worden. Damit werden diese vier PFC Kandidaten für eine gesetzliche Regulierung. Außerdem ergeben sich für den Gebrauch dieser Chemikalien Auskunftspflichten für Hersteller und Auskunftsrechte für Verbraucher (http://www.reach-info.de/verbraucheranfrage.htm [Abrufdatum: 31.01.2013]).

Das UBA bewertet auch PFOA als persistenten, bioakkumulativen und toxischen Stoff (PBT-Stoff) im Sinne von REACH (Vierke et al. 2012). Deutschland hat deshalb gemeinsam mit Norwegen einen Vorschlag für die Identifizierung von PFOA als besonders besorgniserregenden Stoff bei der europäischen Chemikalienagentur ECHA eingereicht. Die öffentliche Kommentierungsfrist beginnt im Februar 2013. Anschließend berät das Mitgliedstaatenkomitee der ECHA über den Vorschlag. Bestätigt dieses Gremium die PBT-Eigenschaften von PFOA, wird es ebenfalls in die Kandidatenliste aufgenommen.

Als nächsten Schritt schlägt das UBA die Beschränkung der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung von PFOA und aller anderen langkettigen PFCAs vor. Der Beschränkungsvorschlag, an dem Deutschland und Norwegen gemeinsam arbeiten, wird dem Komitee zur Risikobewertung der ECHA im Jahr 2014 vorgelegt. Dieses Komitee erarbeitet daraus eine Stellungnahme. Diese ist dann die Entscheidungsgrundlage der Europäischen Kommission. Eine Beschränkung ist notwendig, um auch PFC-haltige Produkte, die in die EU importiert werden (z. B. Textilien) zu regulieren und wird auch die Vorläuferverbindungen berücksichtigen.

Kurzkettige PFC, die vermehrt als Alternative für die langkettigen Verbindungen eingesetzt werden, sind zwar genauso persistent, jedoch nicht so bioakkumulierend. Dafür sind sie umso mobiler: Zum einen können sie durch ihre gute Wasserlöslichkeit die Gewässer bis hin zum Trinkwasser verunreinigen. Zum anderen können sie über weite Strecken bis hin in entlegene Regionen transportiert werden. Das UBA prüft daher, ob auch diese Gruppe durch REACH zu regulieren ist.

Literatur

D‘Hollander W, de Voogt P, De Coen W, Bervoets L (2010): Perfluorinated substances in human food and other sources of human exposure. In: Rev Environ Contam Toxicol 208: 179–215.

European Chemicals Agency (2011): Opinion proposing harmonised classification and labelling at Community level of Perfluorooctanoic acid (PFOA). http://echa.europa.eu/documents/10162/e7f15a22-ba28-4ad6-918a-6280392fa5ae (Abrufdatum: 31.01.2013).

Fei C, McLaughlin JK, Lipworth L, Olsen J (2009 Jan.): Maternal levels of perfluorinated chemicals and subfecundity. In: Hum Reprod 24(5): 1200–1205.

Felizeter S, McLachlan MS, de VP (2012 Nov.): Uptake of perfluorinated alkyl acids by hydroponically grown lettuce (Lactuca sativa). In: Environ Sci Technol 46(21): 11735–11743.

Freberg BI, Haug LS, Olsen R, Daae HL, Hersson M, Thomsen C, Thorud S, Becher G, Molander P, Ellingsen DG (2010 Oct.): Occupational exposure to airborne perfluorinated compounds during professional ski waxing. In: Environ Sci Technol 44(19): 7723–7728.

Frisbee SJ, Brooks AP, Jr., Maher A, Flensborg P, Arnold S, Fletcher T, Steenland K, Shankar A, Knox SS, Pollard C, Halverson JA, Vieira VM, Jin C, Leyden KM, Ducatman AM (2009 Dec.): The C8 health project: design, methods, and participants. In: Environ Health Perspect 117(12): 1873–1882.

Frisbee SJ, Shankar A, Knox SS, Steenland K, Savitz DA, Fletcher T, Ducatman AM (2010 Sep.): Perfluorooctanoic acid, perfluorooctanesulfonate, and serum lipids in children and adolescents: results from the C8 Health Project. In: Arch Pediatr Adolesc Med 164(9): 860–869.

Fromme H, Mosch C, Morovitz M, Alba-Alejandre I, Boehmer S, Kiranoglu M, Faber F, Hannibal I, Genzel-Boroviczeny O, Koletzko B, Volkel W (2010 Sep.): Pre- and postnatal exposure to perfluorinated compounds (PFCs). In: Environ Sci Technol 44(18): 7123–7129.

Fromme H, Tittlemier SA, Volkel W, Wilhelm M, Twardella D (2009): Perfluorinated compounds – Exposure assessment for the general population in western countries. In: Int J Hyg Environ Health 212(3): 239–270.

Glynn A, Berger U, Bignert A, Ullah S, Aune M, Lignell S, Darnerud PO (2012 Aug.): Perfluorinated alkyl acids in blood serum from primiparous women in Sweden: serial sampling during pregnancy and nursing, and temporal trends 1996–2010. In: Environ Sci Technol 46(16): 9071–9079.

Grandjean P, Andersen EW, Budtz-Jorgensen E, Nielsen F, Molbak K, Weihe P, Heilmann C (2012 Jan.): Serum vaccine antibody concentrations in children exposed to perfluorinated compounds. In: JAMA 307(4): 391–397.

Greenpeace (2012). Chemistry for any weather.

Gützkow KB, Haug LS, Thomsen C, Sabaredzovic A, Becher G, Brunborg G (2011): Placental transfer of perfluorinated compounds is selective – A Norwegian Mother and Child sub-cohort study. In: International Journal of Hygiene and Environmental Health 215: 216–219.

Haug LS, Huber S, Becher G, Thomsen C (2011): Characterisation of human exposure pathways to perfluorinated compounds – Comparing exposure estimates with biomarkers of exposure. In: Environment International 37(4): 687–693.

Joensen UN, Bossi R, Leffers H, Jensen AA, Skakkebaek NE, Jorgensen N (2009): Do Perfluoroalkyl Compounds Impair Human Semen Quality? In: Environmental Health Perspectives 117(6): 923–927.

Knox SS, Jackson T, Javins B, Frisbee SJ, Shankar A, Ducatman AM (2011): Implications of early menopause in women exposed to perfluorocarbons. In: J Clin Endocrinol Metab 96(6): 1747–1753.

Langer V, Dreyer A, Ebinghaus R (2010): Polyfluorinated compounds in residential and nonresidential indoor air. In: Environ Sci Technol 44(21): 8075–8081.

Lopez-Espinosa MJ, Fletcher T, Armstrong B, Genser B, Dhatariya K, Mondal D, Ducatman A, Leonardi G (2011 Oct.): Association of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) and Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) with Age of Puberty among Children Living near a Chemical Plant. In: Environ Sci Technol 45(19): 8160–8166.

Lopez-Espinosa MJ, Mondal D, Armstrong B, Bloom MS, Fletcher T (2012 Jul.): Thyroid function and perfluoroalkyl acids in children living near a chemical plant. In: Environ Health Perspect 120(7): 1036–1041.

Nilsson H, Karrman A, Rotander A, Van BB, Lindstrom G, Westberg H (2010 Oct.): Inhalation exposure to fluorotelomer alcohols yield perfluorocarboxylates in human blood? In: Environ Sci Technol 44(19): 7717–7722.

Prevedouros K, Cousins IT, Buck RC, Korzeniowski SH (2006 Jan.): Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates. In: Environ Sci Technol 40(1): 32–44.

Savitz DA, Stein CR, Elston B, Wellenius GA, Bartell SM, Shin HM, Vieira VM, Fletcher T (2012 Aug.): Relationship of perfluorooctanoic Acid exposure to pregnancy outcome based on birth records in the mid-ohio valley. In: Environ Health Perspect 120(8): 1201–1207.

Schröter-Kermani C, Müller J, Jürling H, Conrad A, Schulte C (2012 Sep.): Retrospective monitoring of perfluorocarboxylates and perfluorosulfonates in human plasma archived by the German Environmental Specimen Bank. In: Int J Hyg Environ Health. In Press.

Shoeib M, Harner T, Wilford BH, Jones KC, Zhu J (2005 Sep.): Perfluorinated sulfonamides in indoor and outdoor air and indoor dust: occurrence, partitioning, and human exposure. In: Environ Sci Technol 39(17): 6599–6606.

Thomsen C, Haug LS, Stigum H, Frøshaug M, Broadwell SL, Becher G (2010): Changes in concentrations of perfluorinated compounds, polybrominated diphenyl ethers, and polychlorinated biphenyls in Norwegian breast-milk during twelve months of lactation. In: Environmental Science and Technology 44(24): 9550–9556.

Vierke L, Staude C, Biegel-Engler A, Drost W, Schulte C (2012). Perfluorooctanoic acid (PFOA)-main concerns and regulatory developments in Europe from an environmental point of view. In: Environmental Sciences Europe 24(5).

White SS, Fenton SE, Hines EP (2011): Endocrine disrupting properties of perfluorooctanoic acid. In: J Steroid Biochem Mol Biol 127(1–2): 16–26.

Kontakt

Dr. Christoph Schulte
Fachgebiet IV 2.3 „Chemikalien“
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: christoph.schulte[at]uba.de

[UBA]