

# PFAS – ‚Ewige‘ Chemikalien und kein Ende

## Teil 1: Verwendungen, Eigenschaften, Umweltaspekte

von Klaus Günter Steinhäuser und Ingo Valentin

### Zusammenfassung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind langlebig und gefährlich für Mensch und Umwelt. Die zahlreichen Vertreter dieser Stoffgruppe finden sich in vielen Verbraucherprodukten und technischen Anwendungen. Aufgrund ihrer Stoffeigenschaften werden sie in allen Umweltmedien auch in emissionsfernen Gebieten, in Biota und im Menschen nachgewiesen.

**Schlüsselwörter:** PFAS, Persistenz, technische Anwendungen, Umweltschadstoffe,

### Abstract

*PFAS – Forever chemicals and no end*

*Klaus Günter Steinhäuser and Ingo Valentin*

*Per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) are persistent and hazardous to humans and the environment. The numerous representatives of this substance group are found in many consumer products and technical applications. Due to their substance properties, they are detected in all environmental media, even in remote areas, in biota and in humans.*

**Keywords:** PFAS, persistence, technical applications, environmental contaminants

UMWELT & GESUNDHEIT 4 (2022) 114-7

### Hintergrund

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind nicht-aromatische organische Chemikalien, bei denen die Wasserstoffatome vollständig (perfluoriert) oder großenteils (polyfluoriert) durch Fluoratome ersetzt sind. Seit Ende der 1940er Jahren werden sie synthetisch hergestellt. PFAS kommen nicht natürlich vor, sondern sind ausschließlich anthropogenen Ursprungs. Am bekanntesten sind perfluorierte Alkylcarbon- und Alkylsulfonsäuren wie Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS). Generell sind alle Chemikalien mit einer CF<sub>2</sub>- oder CF<sub>3</sub>-Gruppe den PFAS zuzurechnen.

Damit zählen auch die kurzkettigen Fluor- und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FKW und FCKW), die ein hohes Treibhauspotential haben und im Fall der FCKW auch die Ozonschicht in der Stratosphäre schädigen, zu den PFAS – ebenso wie fluorierte Polymere wie Polytetrafluorethen (PTFE) oder Polyacrylate, deren Seitenketten per- oder polyfluoriert sind. Insgesamt werden mehr als 4.700 Chemikalien zu den PFAS gezählt. [OECD 2018] Die Gesamtmenge allein der produzierten Fluorpolymere wird weltweit auf 238.000 t jährlich geschätzt.

### Fluorierte Alternativen von PFOA und PFOS

Die bekanntesten und bestuntersuchten Fluorchemikalien PFOA und PFOS sind inzwischen über das Stockholm-Übereinkommen sowie auf europäischer Ebene in vielen Anwendungen beschränkt. Die Hersteller ersetzen deshalb diese Stoffe häufig durch andere PFAS. Dabei sind drei Tendenzen erkennbar:

- (i) Ersatz durch kurzkettige PFAS, insbesondere C<sub>4</sub>-Verbindungen wie Perfluorbutansäure und Perfluorbutansulfonsäure;
- (ii) Ersatz durch polyfluorierte Telomer-carbon- und -sulfonsäure und
- (iii) Ersatz durch perfluorierte Oxocarbonsäuren.

Die öffentlich zugänglichen Kenntnisse über die Eigenschaften dieser Verbindungen sind äußerst spärlich. In steigendem Maße werden diese Chemikalien inzwischen in Umwelt- und Lebensmittelproben nachgewiesen. Untersuchungen haben ergeben, dass sie oft ähnliche Eigenschaften haben wie PFOS und PFOA. Insbesondere sind auch Produktions- und Verwendungsmengen häufig nicht öffentlich verfügbar, da sie zu Geschäftsgeheimnissen erklärt werden.

Für ein effektives Management dieser Stoffe wird mehr Transparenz unabdingbar sein. Wissenschaftler und Umweltverbände fordern deshalb eine Regulierung der gesamten Stoffgruppe.

Da PFAS natürlicherweise nicht vorkommen, gibt es weder biologische noch abiotische Abbaumechanismen, die zu einer Mineralisierung der Stoffe führen. Teilweise werden bei so genannten Vorläufersubstanzen nicht fluorierte Molekülteile transformiert; es verbleibt aber ein perfluoriertes Molekül.

Einen sehr guten Überblick über die Gesamtproblematik bieten das Schwerpunkttheft 1-2020 des Umweltbundesamtes „PFAS. Gekommen, um zu bleiben“ mit vielen hilfreichen Abbildungen [UBA 2020] und das Hintergrundpapier des BUND „Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar“. [BUND 2021]

### Verwendungen

PFAS zeichnen sich gegenüber anderen Chemikalien durch ihre hohe thermische und chemische Stabilität aus. Sie zersetzen sich nicht bei hohen Temperaturen oder bei Einwirkung aggressiver Chemikalien, was sie für zahlreiche technische Anwendungen interessant macht. Die stark elektronegativen Eigenschaften des Fluoratoms bewirken, dass viele PFAS zugleich wasserabweisend und auch öl- und schmutzabweisend sind. Es gibt kaum einen Lebensbereich, kaum einen industriellen Sektor, der „fluorfrei“ ist. [Glüge et al. 2021] Damit sind sehr vielfältige Quellen einer Umwelt- und Humanexposition zu bedenken. Wichtige Anwendungsbereiche sind:

- Einige Fluorkohlenwasserstoffe finden als Treibgase, Kühl- und Löschmittel sowie in Kunststoffschäumen (Polystyrol und Polyurethan) noch breite Verwendung.
- Mit PFAS werden Textilien und Leder imprägniert, damit diese wasser- und schmutzabweisend werden. Dies gilt insbesondere für Outdoor- und Arbeitskleidung sowie für Heimtextilien wie Teppiche. Die wasser- und fettabweisenden Eigenschaften der PFAS sind für die Oberflächenbehandlung von Papier- und Druckerzeugnissen willkommen. Untersuchungen mehrerer Umweltschutzorganisationen zeigten, dass auch Lebensmittelverpackungen wie Kaffeebecher, Einweggeschirr

# Schwerpunkt

und Pizzakartons erheblich mit PFAS belastet sein können. [Straková et al. 2021] Beim Papierrecycling können PFAS ins Altpapier gelangen. (Abbildung 1)



Abbildung 1: PFAS machen Lebensmittelverpackungen fettabweisend (©iStockphoto)



Abbildung 2: PFAS in Schaumlöschmitteln ermöglichen eine effektive Brandbekämpfung (©iStockphoto)

- Kosmetika wie Sonnenschutz-, Haut- und Haarpflegemittel können PFAS enthalten, damit sie wasserabweisend werden.
  - Wachsende Bedeutung haben Fluorchemikalien als **Pflanzenschutzmittel**. [Ogawa et al. 2020] Zirka 45 in der EU zugelassene Pestizid-Wirkstoffe enthalten Trifluormethyl-(CF<sub>3</sub>-) Gruppen (zum Beispiel Flufenacet oder Diflufenican), was nach Transformation in der Umwelt zur Verbreitung von Trifluoressigsäure (TFA) beiträgt. Dies trifft auch auf einige **Biozide und Pharmaka** zu, beispielsweise λ-Cyhalothrin, Fipronil und Flocoumafen beziehungsweise Desfluran, Flecainid und Sitagliptin. [Inoue et al. identifizierten 342 fluorierte Pharma-Wirkstoffe. [Inoue et al. 2020]
- Für viele verbreitete Anwendungen gibt es heute bereits fluorfreie Alternativen, zum Beispiel fluorfreie Feuerlöschschäume [Wood Environment 2020], Imprägniermittel für wasserabweisende Textilien [Whiting et al. 2019]. Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) publizierte Berichte über PFAS-Alternativen in Lacken, Farben und Beschichtungen [OECD 2022] sowie über Alternativen zu PFAS-haltigen Lebensmittelkontaktmaterialien. [OECD 2020]
- Auch die Verwendung von PFAS bei der Verchromung und der Kunststoffbeize ist nicht ohne Alternative (Verwendung von Chrom(III) anstelle von Chrom(VI) [Willand et al. 2020]. Davor sollte aber auch immer die Frage stehen, ob zum Beispiel nicht gänzlich auf eine Verchromung verzichtet werden kann oder eine Verwendung essenziell ist. In vielen Bereichen herrscht allerdings noch Unsicherheit, welche Alternativen geeignet sind.

## PFAS in der Umwelt

Die herausragende Eigenschaft der PFAS ist ihre außerordentliche Persistenz: Sie sind unter natürlichen Bedingungen kaum abbaubar. Bei teilfluorierten Chemikalien sind zwar langsame mikrobielle Umwandlungsprozesse mit Abbau des nichtfluorierten Molekülteils bekannt, die gebildete perfluorierte Substanz verbleibt aber extrem lange in der Umwelt. PFAS werden deshalb als **„Forever chemicals“** bezeichnet. Extrem persistente Stoffe stellen allein deshalb

eine Gefahr für die Umwelt dar – unabhängig von ihren sonstigen ökologischen oder toxikologischen Eigenschaften –, weil sie nicht mehr rückholbar sind und über Jahrzehnte bis Jahrhunderte zu Umweltbelastungen führen. [BUND 2019, Cousins et al. 2020]

Mehrere PFAS wie die längerkettigen Carbon- und Sulfonsäuren PFOA und PFOS sind darüber hinaus stark bioakkumulierend. Weiterhin sind viele PFAS in Wasser gelöst sehr mobil. Sie durchdringen die ungesättigte Bodenzone und können dann im Grundwasser über weite Strecken verfrachtet werden. Damit stellen die PFAS auch eine Gefährdung zahlreicher Trinkwasserversorgungen dar. Je kürzer die Kohlenstoffkette, desto höher ist die Mobilität. Die Eigenschaftskombination Persistenz, Bioakkumulation und Mobilität macht die PFAS zu einer besonders problematischen Stoffgruppe.

Die verschiedenartigen Verwendungen der PFAS führen zu zahlreichen, unterschiedlichen Einträgen in die Umwelt. Teilweise werden PFAS direkt in die Umwelt emittiert, zum Beispiel als Feuerlöschschäume oder als Skiwax, teilweise gelangen sie über das Abwasser in die Umwelt, zum Beispiel aus galvanischen Betrieben, Wäschereien und Reinigungen von Textilien sowie Kosmetika aus Privathaushalten. In Kläranlagen werden PFAS nicht abgebaut, sie gelangen über die Einleitungen der Kläranlagen in die Gewässer und werden teilweise an Klärschlamm gebunden. Falls dieser nicht verbrannt, sondern landwirtschaftlich verwertet wird, führt dies zu Boden- und Grundwasserbelastungen. Auch der Abrieb polymerer PFAS findet sich in Klärschlamm, vereint mit Mikroplastik aus anderen Kunststoffen.

Viele PFAS gelangen über Abfälle in die Umwelt. Problematisch sind generell Produktströme, bei denen eine getrennte Sammlung der Abfälle mit anschließendem Recycling stattfindet, zum Beispiel von Papier oder Textilien, denn beim Recycling werden die PFAS in die Sekundärprodukte verschleppt und verunreinigen diese.

PFAS-haltige Verbraucherprodukte werden überwiegend als Siedlungsabfälle entsorgt und meist verbrannt. Bislang gibt es wenige und widersprüchliche Daten zu den Bedingungen, unter denen PFAS bei der Verbrennung vollständig

# Schwerpunkt

mineralisiert werden. Wahrscheinlich sind Temperaturen von 1.100°C über zwei Sekunden notwendig. Es gibt allerdings Veröffentlichungen, nach denen noch höhere Temperaturen erforderlich sind, ebenso wie es Hinweise gibt, dass die Hausmüllverbrennung bei 850°C Mindesttemperatur ausreichend ist.

Auch der Luftpfad ist für die Verbreitung der PFAS in der Umwelt und die Exposition des Menschen von Bedeutung. Fluortelomeralkohole wie 6:2-FTOH sind so flüchtig, dass sie in relevanten Konzentrationen in der Innenraumluft nachgewiesen werden. [Morales McDevitt 2021] In der Innenraumluft deutscher Geschäfte, die Outdoor- und Sporttextilien sowie Teppiche verkaufen, waren die Konzentrationen der Fluortelomeralkohole um drei Größenordnungen höher als in der Außenluft urbaner Räume. [Schlummer et al. 2013] Die Einträge über die Atmosphäre erklären den weiträumigen Transport der PFAS in emissionsferne Gebiete, wo Luft- und Meerwassermessungen die globale Problematik dieser Stoffgruppe aufzeigen. [Rauert 2018] In Übereinstimmung damit zeigten Cousins et al., dass die Konzentrationen in Regenwasser von PFOA, PFOS, PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure) und PFNA (Perfluorononansäure) weltweit oft toxikologische abgeleitete Trinkwasser-Richtwerte überschreiten. [Cousins et al. 2022]

Die vielfältigen Emissionen und die großräumige Verteilung der Einträge führen zu einer ubiquitären Belastung der Umwelt. PFAS werden verbreitet in Flüssen, Seen und auch in Meerwasser nachgewiesen. Die derzeitigen Kenntnisse über die Hintergrundbelastung von Böden sind noch lückenhaft, was auch an unterschiedlichen analytischen Methoden liegt. Untersuchungskampagnen in Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg sowie eine aktuelle Studie aus Vorarlberg in Österreich belegen eine diffuse Belastung, vermutlich über Niederschläge: In Bodeneluatn konnten Humer und Scheffknecht auch bei „verdachtslosen“ Proben immer noch 0,05 bis 0,1 µg/l PFAS (Summe der perfluorierten Carbonsäuren) messen. [Humer et al. 2021]

Bodenverunreinigungen führen häufig zu Grundwasserkontaminationen. In Böden sind länger-kettige PFAS fester gebunden als kurz-kettige. Letztere gelangen deshalb auch rascher ins Grundwasser.

## Analytik von PFAS

Für das Monitoring von PFAS ist eine empfindliche, spezifische und validierte Analytik notwendig. Die Vielfalt der PFAS und die Notwendigkeit, sie in sehr geringen Konzentrationen in der Umwelt, in Lebensmitteln und in Körperflüssigkeiten nachzuweisen, sind eine große Herausforderung an die (Weiter)Entwicklung einer sehr leistungsfähigen chemischen Analytik.

Die Einzelstoffanalytik wird immer empfindlicher, so dass inzwischen auch Hintergrundkonzentrationen in Wasser und Boden gemessen werden können. Verschiedene Normungsvorhaben auf nationaler und internationaler Ebene sind angestoßen. Die Einzelstoffanalysen erfassen allerdings immer nur einen Ausschnitt der Vielfalt von PFAS. Non-Target-Analytik und Summenparameter wie der AOF (adsorbierbares organisches Fluor) und der TOP-Assay (*total oxidizable precursor*) gewinnen deshalb immer mehr an Bedeutung, obwohl sie nicht so niedrige Bestimmungsgrenzen erreichen. Beim TOP-Assay werden durch ein Oxidationsmittel Vorläuferverbindungen zu den analysierbaren perfluorierten Carbonsäuren oxidiert. Gerade diese Methode zeigt, dass die Summe der Organofluorverbindungen in Umweltmedien oft ein Vielfaches höher ist als sich durch Einzelstoffanalytik erfassen lässt.

In Bezug auf den menschlichen Verzehr ist die Belastung von Fischen besonders

relevant. In Filets von Fischen aus dem Bodensee (Barsch, Felchen, Schleie) wurden für die Summe von PFOS, PFOA, PFHxS und PFNA Werte zwischen 1,8 und 30 ng/g Frischmasse gefunden. [CVUA Freiburg 2021] Wichtige historische Daten werden in der Umweltprobenbank gesammelt (Abbildung 3).

## Umweltprobenbank des Bundes

Die Umweltprobenbank ermöglicht eine Reise in die Vergangenheit. Seit Anfang der 1980'er Jahre werden Blut-, Biota- und Sedimentproben aus verschiedenen Regionen Deutschlands systematisch gesammelt, vorbereitet und tiefgefroren.

Mit moderner Analysetechnik und dem Wissen über Schadstoffe in der Umwelt lassen sich diese Proben heute zum Beispiel auf PFAS untersuchen. Dies ermöglicht es, die Schadstoffentwicklung rückwirkend über Jahrzehnte zu erkennen.

(<https://www.umweltprobenbank.de>)

In anderen Untersuchungen lässt sich die Bioakkumulation und Biomagnifikation, zum Beispiel von PFOS, deutlich erkennen: Haben Brassen in der Muskulatur eine Belastung von 1 ng/g Frischmasse, finden sich in ihren Lebern durchschnittliche Konzentrationen von 100 ng/g. Die Leber ist offenbar beim Fisch – ebenso wie bei Warmblütern – ein Zielorgan für die Anreicherung von PFAS. Seeadler, Seehund und Otter, die sich von Fischen ernähren, weisen in der Leber noch weit-

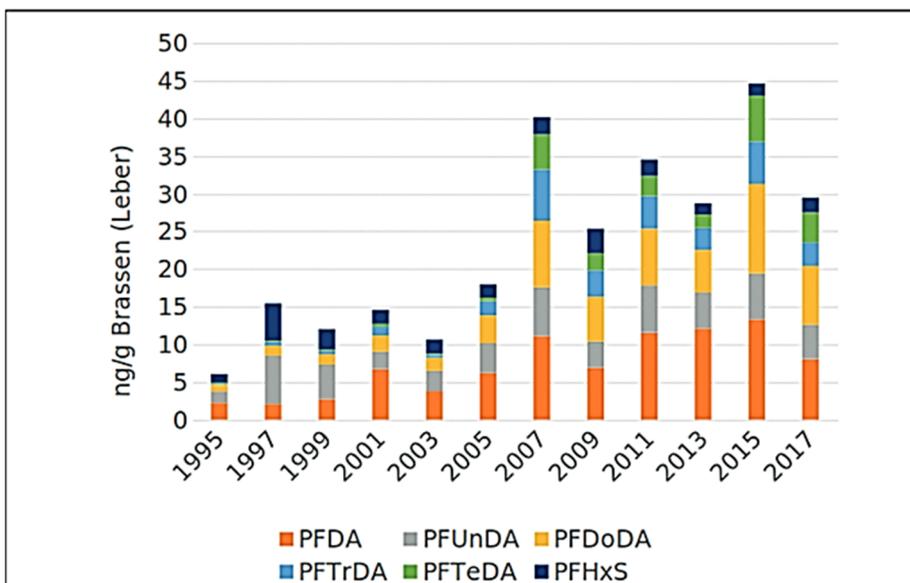


Abbildung 3: Zunahme der Konzentrationen länger-kettiger Perfluoralkylcarbonsäuren in der Leber von Brassen in Bimmen (Niederrhein). PFDA: Perfluordecansäure, PFUnDA: Perfluorundecansäure, PFDoDA: Perfluordodecansäure, PFTrDA: Perfluortridecansäure, PFTeDA: Perfluortetradecansäure (Umweltprobenbank 2020)

aus höhere Belastungen auf. [UBA 2020] Auch in anderen Wildtieren, zum Beispiel in Wildschweinen, reichern sich insbesondere länger-kettige PFAS an. [Landesbetrieb Hessisches Landeslabor 2022]

Im Unterschied zu Tieren in der aquatischen Nahrungskette reichern Pflanzen kurz-kettige PFAS stärker an als lang-kettige. Die Aufnahme erfolgt offenbar über belastete Böden oder Beregnungswasser in die vegetativen Teile der Pflanzen. [Blaine et al. 2013, Stahl et al. 2013] Sofern Nutzpflanzen betroffen sind, kann diese Anreicherung wesentlich zur Belastung der menschlichen Ernährung beitragen.

Untersuchungen zur Ökotoxikologie von PFAS beschränken sich weitgehend auf perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren. Zahlreiche Publikationen zeigen verschiedene aquatoxische Wirkungen der PFAS im unteren µg/L-Bereich, teilweise auch darunter. Algen, Pflanzen und terrestrische Lebewesen sind meistens weniger empfindlich. [Li et al. 2020].

## Teil 2

In Teil 2 dieser Veröffentlichung werden die Toxikologie und die Humanexposition der PFAS erläutert. Die Regulation der PFAS und Forderungen der Umweltverbände werden dargestellt.

## Korrespondenzadresse

Dr. Klaus Günter Steinhäuser

Derfflingerstr.14

12249 Berlin

Tel.: +491727607739

Email: klaus.guenter.steinhaeuser@bund.net

## Literatur:

Blaine AC, Rich CD, Hundal LS, Lau C, Mills MA, Harris KM, Higgins CP: Uptake of perfluoroalkyl acids into edible crops via land applied biosolids: Field and greenhouse Studies. *Environ Sci Technol* **47** 14 (2013) 14062-9

BUND (2019): Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik. [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/bund/position/position\\_stoffpolitik.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/position_stoffpolitik.pdf) (abgerufen 18. November 2022)

BUND (2021): Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar. [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/chemie/chemie\\_fluorchemikalien\\_hintergrund.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_fluorchemikalien_hintergrund.pdf) (abgerufen 18. November 2022)

Cousins JT, DeWitt JC, Glüge J, Goldenman G, Herzke D, Lohmann R, Ng CA, Scheringer M, Wang, Z: The high persistence of PFAS is sufficient for their management as a chemical class.

*Environ Sci Process Impacts* **22** (2020) 2307-12. DOI:10.1039/d0em00355g

Cousins JT, Johansson JH, Salter ME, Sha B, Scheringer M: Outside the safe operating space of a new planetary boundary for per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ Sci Technol* **56** 16 (2022)11172-9. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>

CVUA (Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt): Nachweis von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Fischen aus dem Bodensee – Ergebnisse eines Untersuchungsprogramms aus dem Jahr 2020. (Freiburg 2021) [https://www.ua-bw.de/pub/beitrag.asp?subid=3&Thema\\_ID=7&ID=3344&Pdf=No&lang=DE](https://www.ua-bw.de/pub/beitrag.asp?subid=3&Thema_ID=7&ID=3344&Pdf=No&lang=DE). (abgerufen 18. November 2022)

Glüge J, Scheringer M, Cousins JT, DeWitt JC, Goldenman G, Herzke D, Lohmann R, Ng CA, Trier X, Wang Z: An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ Sci Process Impacts* **22** 12 (2021) 2345 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7784712/>. DOI: 10.1039/d0em00291g

Humer M, Scheffknecht C: Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Vorarlberg. Bericht UI-05/2021. Amt der Vorarlberger Landesregierung (ed), Bregenz (2021) 49 p. <https://vorarlberg.at/-/per-und-polyfluorierte-alkylsubstanzen-pfas-in-vorarlbergs-umwelt> (abgerufen 18. November 2022)

Inoue M, Sumii Y, Shibata N: Contribution of organofluorine compounds to pharmaceuticals. *ACS Omega* **5** (2020) 1063340. doi: 10.1021/acsomega.0c00830; pmid: 32455181

Landesbetrieb Hessisches Landeslabor: Nachweis von Per- und Polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Wildtieren aus Hessen – Ergebnisse eines Monitorings im Jahr 2021. (Giessen 2022) <https://lhl.hessen.de/landwirtschaft-umwelt/wissenswertes-aus-der-landwirtschaft-umwelt/nachweis-von-per-und-polyfluorierten-alkylsubstanzen-pfas-in-wildtieren-aus-hessen> (abgerufen 18. November 2022)

Li J, Sun J, Li P: Exposure routes, bioaccumulation and toxic effects of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) on plants: A critical review. *Environ Int* **158** (2022) 106891. doi.org/10.1016/j.envint.2021.106891

Morales McDevitt ME, Becanova J, Blum A, Bruton T, Vojta S, Woodward M, Lohmann R: The air that we breathe: Neutral and volatile PFAS in indoor air. *Environ Sci Technol Lett* **8** 10 (2021) 897–902. doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00481

OECD (2018): Toward a new comprehensive global database of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Summary report on updating the OECD 2007 list of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). Series on Risk Management No. 39. ENV/JM/MONO (2018) 7. 24 p. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO\(2018\)7&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV-JM-MONO(2018)7&doclanguage=en) (abgerufen 18. November 2022)

OECD (2020): PFASs and alternatives in food packaging (paper and paperboard) - Report on the commercial availability and current uses, OECD Series on Risk Management, No. 58. Environment Health and Safety, Environment Directorate, OECD. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/PFASs-and-alternatives-in-food-packaging-paper-and-paperboard.pdf> (abgerufen 18. November 2022)

OECD (2022): Per- and polyfluoroalkyl substances and alternatives in coatings, paints and varnishes (CPVs). Series on Risk Management No. 70. 91 p. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/per-and-polyfluoroalkyl-substances-alternatives-in-coatings-paints-varnishes.pdf> (abgerufen 18. November 2022)

Ogawa Y, Tokunaga E, Kobayashi O, Hirai K, Shibata N: Current contributions of organofluorine compounds to the agrochemical industry. *iScience* **23** 9 (2020) 101467. doi: 10.1016/j.isci.2020.101467; pmid: 32891056 12

Rauert C, Shoeib M, Schuster JK, Eng A, Harner T: Atmospheric concentrations and trends of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) and volatile methyl siloxanes (VMS) over 7 years of sampling in the Global Atmospheric Passive Sampling (GAPS) network. *Environ Pollut* **238** (2018) 94–102. doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.017

Schlummer M, Gruber L, Fiedler D, Kizlauskas M, Müller J: Detection of fluorotelomer alcohols in indoor environments and their relevance for human exposure. *Environ Int* **57–58** (2013) 42–9 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.03.010>

Stahl T, Riebe RA, Falk S, Failing, K, Brunn H: A longterm lysimeter experiment to investigate the leaching of perfluoroalkyl substances (PFAAs) and the carryover from soil to plants – Results of a pilot study. *J Agric Food Chem* **61** (2013) 1784-93 DOI:10.1021/jf305003h

Straková J, Schneider J, Cingotti N: Throwaway Packaging, Forever Chemicals: European wide survey of PFAS in disposable food packaging and tableware. (2021) [https://chemtrust.org/wp-content/uploads/CHE\\_PFAS\\_FCM\\_15July2021\\_Final.pdf](https://chemtrust.org/wp-content/uploads/CHE_PFAS_FCM_15July2021_Final.pdf) (abgerufen 18. November 2022)

UBA (2020): Schwerpunkt PFAS – Gekommen um zu bleiben; [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/uba\\_sp\\_pfas\\_web\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/uba_sp_pfas_web_0.pdf) (abgerufen 18. November 2022)

Whiting R, Nicol L, Keyte I, Kreißig J, Crookes M, Gebbink W, Potrykus A, Schöpel M: The use of PFAS and fluorine-free alternatives in textiles, upholstery, carpets, leather and apparel, Report of Ramboll & Wood Environment for European Commission, Directorate General – Environment, Directorate B – Circular Economy and Green Growth, Unit B.2 – Sustainable Chemicals, BU 9. Final report under framework contract ENV.A.3/FRA/2015/0010. Service Request No 1-2019. 531 p.

Willand W, Baron Y, Blepp M, Weber R, Herold Ch: Best available techniques for PFOS substitution in the surface treatment of metals and plastics and analysis of alternative substances to PFOS when used in equipment for chromium plating and plastic etching, Umweltbundesamt (Ed.) Texte 211/2020. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/best-available-techniques-for-pfos-substitution-in> (abgerufen 18. November 2022)

Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited: The use of PFAS and fluorine-free alternatives in fire-fighting foams. Report for European Commission DG Environment and ECHA. (2020) 534 p. [https://echa.europa.eu/documents/10162/28801697/pfas\\_fluorine-free\\_alternatives\\_fire\\_fighting\\_en.pdf/d5b24e2a-d027-0168-cdd8-f723c675fa98](https://echa.europa.eu/documents/10162/28801697/pfas_fluorine-free_alternatives_fire_fighting_en.pdf/d5b24e2a-d027-0168-cdd8-f723c675fa98) (abgerufen 18. November 2022)