

Berlin, 9. Januar 2025

Fakten und Argumente

PFAS-Verschmutzung der Umwelt – Dimension und mögliche Lösungen



Herausgegeben vom BDEW
Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.,
Reinhardtstraße 32, 10117 Berlin



Wissenschaftliche Ausarbeitung vom IHPH
Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit/Public Health
Universitätsklinikum Bonn, Venusberg-Campus 1, 53127 Bonn

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), Berlin, und seine Landesorganisationen vertreten mehr als 2.000 Unternehmen. Das Spektrum der Mitglieder reicht von lokalen und kommunalen über regionale bis hin zu überregionalen Unternehmen. Sie repräsentieren rund 90 Prozent des Strom- und gut 60 Prozent des Nah- und Fernwärmeabsatzes, über 90 Prozent des Erdgasabsatzes, über 95 Prozent der Energienetze sowie 80 Prozent der Trinkwasser-Förderung und rund ein Drittel der Abwasser-Entsorgung in Deutschland.

Der BDEW ist im Lobbyregister für die Interessenvertretung gegenüber dem Deutschen Bundestag und der Bundesregierung sowie im europäischen Transparenzregister für die Interessenvertretung gegenüber den EU-Institutionen eingetragen. Bei der Interessenvertretung legt er neben dem anerkannten Verhaltenskodex nach § 5 Absatz 3 Satz 1 LobbyRG, dem Verhaltenskodex nach dem Register der Interessenvertreter (europa.eu) auch zusätzlich die BDEW-interne Compliance Richtlinie im Sinne einer professionellen und transparenten Tätigkeit zugrunde. Registereintrag national: R000888. Registereintrag europäisch: 20457441380-38

Executive Summary: Fokus auf Relevanz für den Menschen

PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) sind aufgrund ihres vielfältigen, langjährigen und weltweiten Einsatzes sowie ihrer äußerst schlechten Abbaubarkeit in der Umwelt bereits weltweit in der Luft, im Wasser und in den Böden sowie in der Nahrungskette bis hin zum Blut und in den Organen von Lebewesen nachweisbar. Wissenschaftliche Studien zeigen, dass PFAS unterschiedliche gesundheitsschädliche Wirkungen an Organen, wie z. B. der Leber und den Nieren sowie auch an dem Immunsystem haben können. Angesichts dessen stellen PFAS eine signifikante human- und ökotoxikologische Gefährdung dar.

Menschen nehmen PFAS vor allem über die Nahrung, über Wasser und über die Luft auf. Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) hat im September 2020 eine Bewertung der gesundheitlichen Risiken von PFAS in Lebensmitteln veröffentlicht¹. Die Bewertung der EFSA fokussiert sich auf die vier wichtigsten sich im Körper anreichernden PFAS, nämlich PFOA (Perfluorooctansäure), PFNA (Perfluorononansäure), PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure) und PFOS (Perfluorooctansulfonsäure). Für diese sogenannten *EFSA-PFAS* konnte aufgrund der toxikologischen Datenlage eine tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge in der Höhe von insgesamt 4,4 Nanogramm (ng) pro Kilogramm (kg) Körpergewicht pro Woche abgeleitet werden. Laut dem Umweltbundesamt gibt dieser Wert an, welche Menge eines Stoffes über alle Aufnahmepfade pro Woche und kg Körpergewicht lebenslang aufgenommen werden kann, ohne dass eine gesundheitliche Besorgnis besteht². Für einen Menschen ergibt sich unter Berücksichtigung der Standardannahme für das Körpergewicht von 70 kg damit rechnerisch eine tolerierbare *EFSA-PFAS*-Gesamtmenge von 308 ng pro Woche (4,4 ng pro kg Körpergewicht pro Woche multipliziert mit 70 kg Körpergewicht) bzw. 44 ng pro Tag.

Im Hinblick auf die tatsächlich aufgenommene *EFSA-PFAS*-Gesamtmenge stellte das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) 2021³ unter Verwendung der Daten aus den Überwachungsprogrammen der Bundesländer in Deutschland jedoch fest, dass „die langfristige Exposition

¹ Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit. *Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food*. (2020) URL: <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6223>

² Webseite Umweltbundesamt zum Konzept zur Ableitung toxikologisch begründeter Trinkwasserleitwerte. (2023) URL:

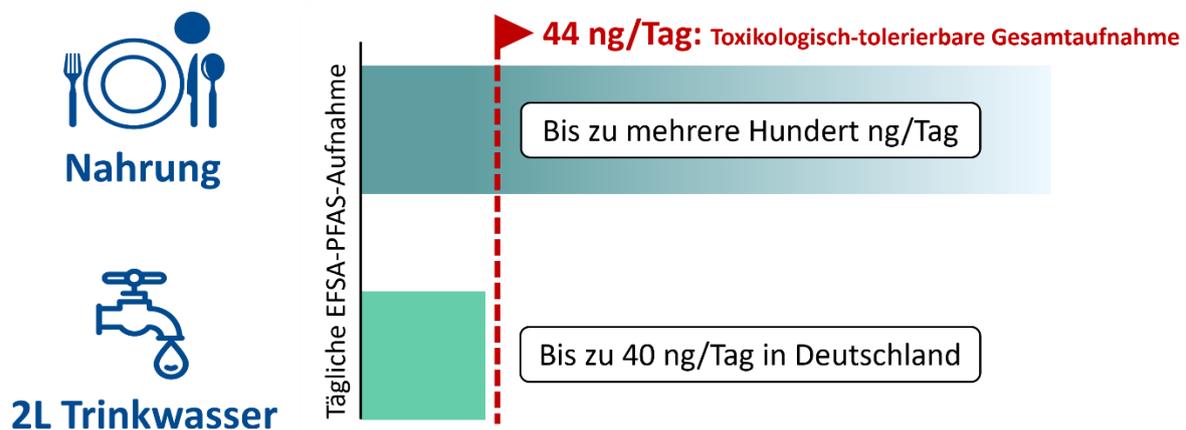
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet/toxikologie-destrinkwassers/trinkwasserleitwerte> (Abgerufen am 16.12.2024)

³ Bundesinstitut für Risikobewertung. Stellungnahme Nr. 020/2021. *PFAS in Lebensmitteln - BfR bestätigt kritische Exposition gegenüber Industriechemikalien*. (2021) S.6 und Tabelle 7. URL:

<https://www.bfr.bund.de/cm/343/pfas-in-lebensmitteln-bfr-bestaetigt-kritische-exposition-gegenueber-industriechemikalien.pdf>

Erwachsener in Deutschland gegenüber [den EFSA-PFAS] durch Verzehr von Lebensmitteln **außer Trinkwasser** bei mittleren Gehalten etwa dem Zweifachen (Mittelwert) bis Fünffachen (95. Perzentil⁴) der Höhe der von der EFSA abgeleiteten tolerierbaren wöchentlichen Aufnahmemenge“ entspricht⁵. Das heißt, dass Erwachsene in Deutschland bereits bis zu 1540 ng pro Woche bzw. 220 ng pro Tag allein durch Nahrung aufnehmen bzw. die tolerierbare EFSA-PFAS-Gesamtmenge längst um ein Vielfaches überschreiten können (Abbildung 1).

Zum Vergleich: Die mögliche EFSA-PFAS-Aufnahme durch Trinkwasser ist durch den gesetzlichen Trinkwassergrenzwert auf maximal 20 ng pro Liter beschränkt. Unter Berücksichtigung der Standardannahme eines täglichen Trinkwasserkonsums von zwei Litern ergibt sich folglich eine EFSA-PFAS-Gesamtaufnahme von maximal bis zu 280 ng pro Woche bzw. 40 ng pro Tag. Das Umweltbundesamt betonte zudem, dass „Trinkwasser [...] nur dann als eine besondere PFAS-Quelle [gilt], wenn das Rohwasser durch Schadensfälle mit PFAS verunreinigt wurde. In Deutschland sind bisher erst wenige Fälle bekannt.“⁶



⁴ Ein Perzentil gibt an, wie viel Prozent der Messwerte unter dem angegebenen Wert lagen.

⁵ Es ist zu beachten, dass die Schätzungen des BfR über die EFSA-PFAS-Aufnahme durch Nahrung stark zwischen Altersgruppen und Geschlecht variieren. Zudem sind die Schätzungen von erheblichen Unsicherheiten geprägt, da es sich um Abschätzungen aus verschiedenen Verzehrstudien handelt, welche ihrerseits wiederum von Unsicherheiten hinsichtlich der Verzehrsgewohnheiten der Studienteilnehmer und/ oder der tatsächlichen unterschiedlichen Belastung der Lebensmittel durch die EFSA-PFAS geprägt sind.

⁶ Umweltbundesamt. *PFAS – Gekommen, um zu bleiben*. (2020). Das Magazin des Umweltbundesamtes 1/2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkt-1-2020-pfas-gekommen-um-zu-bleiben>

Abbildung 1: *Qualitativer Vergleich der tatsächlichen täglichen EFSA-PFAS-Aufnahme von Erwachsenen in Deutschland durch Trinkwasser und durch Nahrung mit der toxikologisch-tolerierbaren Gesamtaufnahme. Die Abbildung nimmt für die EFSA-PFAS-Aufnahme einen Trinkwasserkonsum von 2 Litern pro Tag und den gesetzlichen Trinkwassergrenzwert von 20 Nanogramm (ng) pro Liter an. Die EFSA-PFAS-Aufnahme durch Nahrung basiert auf den Expositionsschätzungen für Erwachsene zwischen 18 – 64 Jahre in Deutschland und wurde der Tabelle 8 in Kapitel 3.1.3.2 der Stellungnahme 020/2021 des Bundesinstituts für Risikobewertung „PFAS in Lebensmitteln“ von 2021 entnommen. Die rote Linie kennzeichnet die, auf Basis toxikologischer Studien rechnerisch ermittelte, tolerierbare tägliche Gesamtmenge für den Menschen unter Berücksichtigung der Standardannahme für das Körpergewicht von 70 kg.*

Insgesamt wird deutlich, dass bereits bei jedem zweiten Erwachsenen der BfR-Stellungnahme die toxikologisch tolerierbare EFSA-PFAS-Gesamtmenge überschritten wird⁷ und Nahrung in der Regel der Hauptaufnahmepfad für den Menschen ist. Aufgrund der Größe der Stichprobe in der BfR-Stellungnahme (N = 10525 Personen) ist zu vermuten, dass diese Folgerungen auch für die Gesamtheit der erwachsenen Bevölkerung in Deutschland gelten.

Die PFAS-Problematik ist ein Dilemma. Die besonderen chemischen Eigenschaften machen sie zwar attraktiv für viele technische Anwendungen, bedingen jedoch aufgrund ihrer Persistenz und Akkumulationsfähigkeit eine besonders besorgniserregende human- und ökotoxikologische Gefährdung. Gleichzeitig ist eine technische Entfernung von PFAS aus der Nahrung, aus Trinkwasser oder auch aus der Umwelt gar nicht oder wenn überhaupt nur unter sehr hohen Kosten und Ressourcenverbrauch (Energie, Materialaufwand, Wasserbedarf etc.) möglich. Angesichts der weitreichenden Umweltbelastung mit PFAS und ihrer hohen chemischen Stabilität wären die PFAS-bedingten Aufbereitungskosten erheblich. Gemäß einer Analyse der Landesbank Baden-Württemberg von 2024⁸ könnte PFAS für die Versicherungsbranche zum bislang teuersten Versicherungsschaden werden. Insofern werden PFAS sich voraussichtlich noch so lange in der Umwelt und in unserer Nahrungskette anreichern, bis der Eintrag in die Umwelt weitgehend reduziert bzw. vermieden wird.

⁷ Die BfR-Stellungnahme (2021) ermittelte das 50. Perzentil mit 4,4 Nanogramm pro Kilogramm Körpergewicht pro Woche. Damit entspricht das 50. Perzentil genau der von der EFSA ermittelten toxikologisch tolerierbaren Aufnahmemenge.

⁸ Landesbank Baden-Württemberg. Pressemitteilung vom 26.03.2024. *Steht die Branche vor dem teuersten Versicherungsschaden ihrer Geschichte?* URL: https://www.lbbw.de/artikelseite/pressemitteilung/stehen-versicherer-vor-ihrem-groessten-schadensfall_ah3a5ggb4x_d.html (Abgerufen am 16.12.2024)

Vor diesem Hintergrund braucht es nicht nur eine Strategie, um den weiteren PFAS-Eintrag in die Umwelt zu vermeiden, sondern auch eine Strategie, um mit der bestehenden Umweltbelastung sowie den Kosten für die Aufbereitung umzugehen. Der auf EU-Ebene diskutierte Beschränkungs-vorschlag für PFAS ist daher grundsätzlich die richtige Strategie. Allerdings werden PFAS auch in vielen Schlüsseltechnologien u. a. für die Energiewende gebraucht und sind hier technisch anscheinend teils noch alternativlos. Eine Beschränkung der Stoffgruppe PFAS sollte daher, aus gesundheitlicher Perspektive, zwar möglichst umfassend erfolgen, aber technische Erwägungen (z. B. Erreichung von Energie- und Klimazielen) könnten beispielsweise angemessene Übergangsfristen, den Schutz von Bestandsanlagen oder Ausnahmeregelungen bedingen.

In der Fachwelt wurde zum Umgang mit der bereits bestehenden PFAS-Umweltbelastung und insbesondere der Finanzierung der dadurch bedingten gesamtgesellschaftlichen Kosten das Konzept der erweiterten Herstellerverantwortung als ein möglicherweise geeigneter umweltökonomischer Lösungsansatz bereits diskutiert. Dieses Konzept sieht vor, dass die Hersteller und Importeure von PFAS und PFAS-haltigen Produkten sich an den PFAS-bedingten Kosten wie z. B. etwaigen Aufbereitungskosten, Kosten der analytischen Kontrolle von Grenzwerten, möglichen gesundheitlichen Folgekosten, Schadensersatzforderungen u. a. beteiligen. Die erweiterte Herstellerverantwortung würde damit am Anfang des Lebenszyklus der PFAS ansetzen und bei den Herstellern und Importeuren entsprechend Anreize setzen, dass nicht nur der Eintrag von PFAS in die Umwelt vermieden wird, sondern gleichzeitig auch effektive Recyclinglösungen und umweltschonende technologische Alternativen entwickelt werden.

Zusammengefasst erstreckt sich die PFAS-Problematik im globalen Maßstab von der gesamten Umwelt über Pflanzen und Lebewesen bis hin zum Menschen. Die Auswirkungen der allgegenwärtigen Belastung sind für Mensch und Umwelt zugleich vielfältig, komplex und höchst besorgniserregend. Folglich ist auch die Dimension einer Lösung hierfür vielschichtig und kann insbesondere nur durch globale politische Zusammenarbeit gelingen, analog den ab 1989 in Kraft getretenen Maßnahmen zur globalen Beschränkung der Herstellung und des Einsatzes von Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW), bei welchen entschieden wurde, zum Schutz der Ozonschicht der Erdatmosphäre innerhalb eines mehrjährigen Zeitrahmens weitgehend aus der FCKW-Produktion auszusteigen⁹.

⁹ Montreal-Protokoll. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/chemikaliensicherheit-internationale-regelungen-montrealer-protokoll.html> (Abgerufen am 16.12.2024)

1 Einleitung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind eine Stoffgruppe von bereits mehr als 10.000 synthetischen (nicht natürlich vorkommenden) Industriechemikalien, welche aufgrund ihrer extrem schlechten Abbaubarkeit (hohe Persistenz) für lange Zeit in der Umwelt verbleiben und daher als „Ewigkeitschemikalien“ bekannt sind. PFAS sind gemäß OECD-Definition (OECD, 2021) organische Verbindungen, bei denen die molekularen Kohlenstoff-Wasserstoffbindungen entweder teilweise (polyfluoriert)¹⁰ oder vollständig (perfluoriert) durch Kohlenstoff-Fluorbindungen ersetzt sind. Die Einzelchemikalien der Stoffgruppe PFAS unterscheiden sich in ihrem jeweiligen molekularen Aufbau (z. B. Kohlenstoffkettenlänge, funktionelle Gruppen) und sind insbesondere wasser-, fett-, und schmutzabweisend sowie chemisch und thermisch sehr stabil.

Aufgrund dieser technologisch attraktiven Eigenschaften werden PFAS daher seit den 1950er Jahren weltweit in zahlreichen Produkten wie Textilien, Papieren, Verpackungsmaterialien, Antihafbeschichtungen, in der Galvanik oder in Feuerlöschschäumen eingesetzt. Infolge der Anwendungsbreite können PFAS durch zahlreiche Wege in die Umwelt gelangen und reichern sich dort aufgrund ihrer Persistenz und Akkumulationsfähigkeit überall an: in Wasserressourcen, in Böden, in Pflanzen sowie in Tieren und letztlich über die Nahrungsmittel auch in uns Menschen. Zu den vier wichtigsten, sich im menschlichen Körper anreichernden PFAS gehören PFOA (Perfluorooctansäure), PFNA (Perfluorononansäure), PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure) und PFOS (Perfluorooctansulfonsäure). Die Summe dieser vier PFAS macht ca. 50 % der PFAS in der menschlichen Nahrungsaufnahme bzw. ca. 90 % der internen Körperbelastung aus. Wissenschaftliche Studien zeigen, dass PFAS unterschiedliche gesundheitsschädliche Wirkungen an

¹⁰ Gemäß dem Leitfaden zur PFAS-Bewertung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz von 2022 sind der Großteil der PFAS polyfluorierte Verbindungen z. B. PFAS-Pestizide, Fluorpolymere oder fluorhaltige Kältemittel, welche analytisch i.d.R. schwer erfassbar sind. Die polyfluorierten Verbindungen können in der Umwelt zu den nicht mehr weiter abbaubaren perfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren abgebaut werden. In der Literatur werden polyfluorierte PFAS daher auch oft als „PFAS-Vorläuferverbindungen“ oder auch „PFAS-Precursoren“ bezeichnet. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/pfas_leitfaden_bf.pdf (Abgerufen am 04.09.2024)

Organen, wie z. B. der Leber und der Nieren, aber auch am Immunsystem haben können. Angesichts dessen stellen PFAS eine signifikante human- und ökotoxikologische Gefährdung dar.¹¹

In der vorliegenden Ausarbeitung wird ein Überblick der Eintrags- und Verbreitungswege sowie der bisher bekannten PFAS-Belastung der Umwelt bis hin zum Menschen gegeben. In diesem Zusammenhang wird für den Verbraucher beispielhaft die tägliche PFAS-Aufnahme durch Nahrung und durch Trinkwasser verglichen. Mögliche Lösungsansätze zur PFAS-Problematik, insbesondere derzeitige politische Maßnahmen und Entwicklungen werden genannt und mit Blick auf eine ganzheitliche Lösung der PFAS-Problematik eingeordnet. Ziel ist es, die Dimension der PFAS-Problematik als auch die daraus notwendigen Anforderungen an eine mögliche Lösung aufzuzeigen und abzuleiten.

Die vorliegende Betrachtung beschränkt sich mit einigen Ausnahmen auf Europa, insbesondere Deutschland, und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2 PFAS-Belastung: Von der Umwelt bis zum Menschen

2.1 Eintragspfade und Verbreitungswege in der Umwelt (Luft, Boden, Wasser)

PFAS können über alle Pfade, sprich über die Luft (z. B. Abluft von Verbrennungsanlagen, Herstelleremissionen, atmosphärischer Abbau von fluorierten Kältemitteln), über das Wasser (z. B. Industrieabwassereinleitungen, Klarwasser von Kläranlagen (u. a. durch Haushalte, Gewerbe und Industrie und die in diesem Zusammenhang genutzten Produkte), Deponiesickerwasser) und über den Boden (z. B. Löschschaumeinsätze, Klärschlammausbringung und Pestizideinsatz in der Landwirtschaft sowie Unfälle) sowohl diffus als auch punktuell in die Umwelt gelangen (Abbildung 2).

Die vielfältigen Verbreitungswege von PFAS in der Umwelt führen weltweit zur Anreicherung der PFAS in der Umwelt, in der Nahrungskette als auch in Lebewesen. Vor allem der Luft-, aber auch der Wasserpfad sind verantwortlich für die weltweite Verteilung der PFAS. Böden stellen vor allem eine Senke dar und können zur Belastung des Grundwassers sowie der Pflanzen und der Organismen beitragen. Grundsätzlich variieren die Muster und Konzentrationen von PFAS in Böden und Gewässern je nach Boden- bzw. Wassertyp, den lokalen Gegebenheiten sowie den unterschiedlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften der PFAS-Moleküle.

¹¹ Webseite des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. FAQ zu PFAS. URL: <https://www.bmu.de/faqs/per-und-polyfluorierte-chemikalien-pfas> (Abgerufen am 19.12.2024)

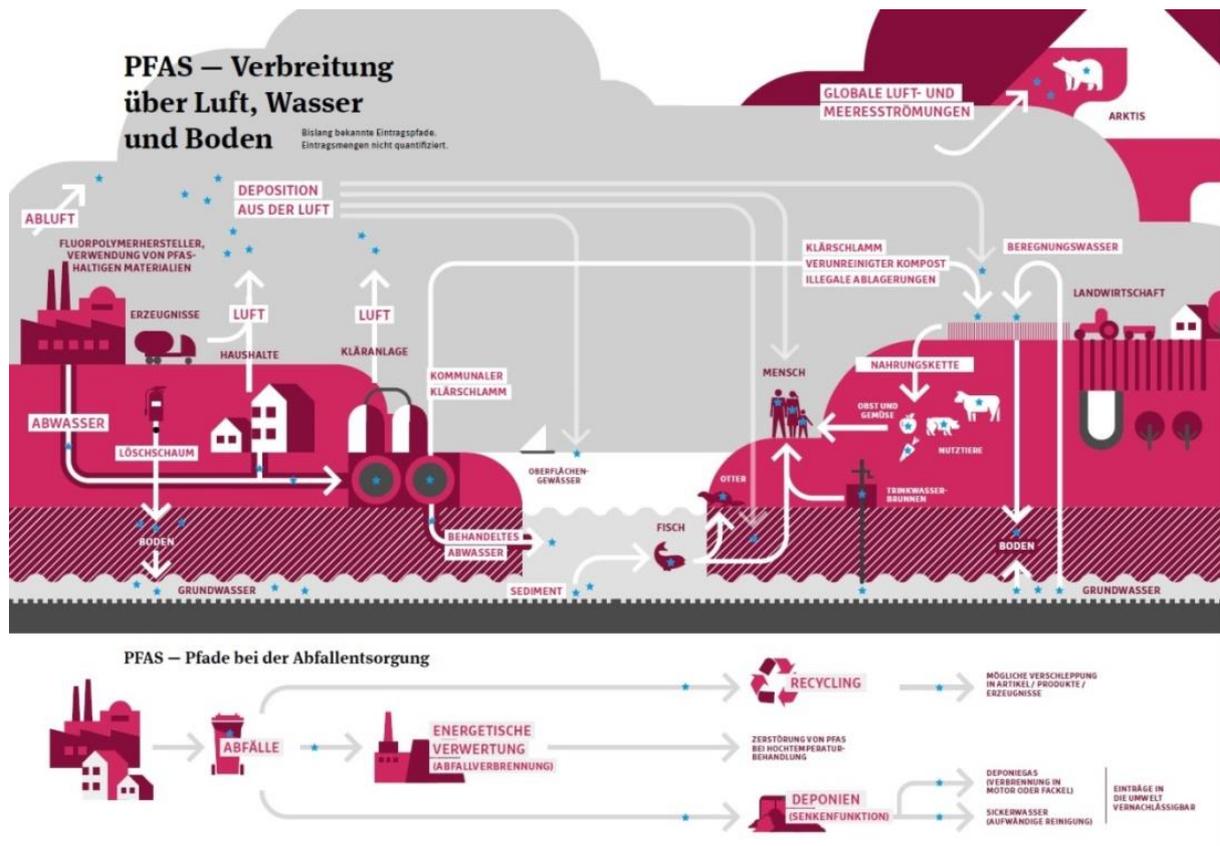


Abbildung 2: Schematische Darstellung der bislang bekannten Eintragspfade und Verbreitungswege von PFAS in der Umwelt. Die Abbildung wurde unverändert aus dem Beitrag „PFAS – Gekommen, um zu bleiben“ in dem Magazin des Umweltbundesamtes von 01/2020 übernommen (Umweltbundesamt, 2020 A).

PFAS können atmosphärisch als flüchtige Stoffe oder partikelgebunden durch Luftströmungen weltweit verteilt werden. Abhängig von der Luftbelastung können daher Niederschläge, wie Regen oder Schnee, PFAS enthalten (D’Ambro et al, 2023; Kim et al, 2023; Liu et al, 2017; Umweltbundesamt, 2023 C). Auch bei niedrigen PFAS-Konzentrationen in der Luft oder in Niederschlägen können PFAS durch ihre Akkumulationsfähigkeit langfristig in abgelegenen Gebieten sowie bei dort lebenden Organismen nachgewiesen werden. In Innenräumen können PFAS ebenfalls partikelgebunden in der Luft vorkommen, z. B. durch Imprägniersprays oder durch Abrieb von behandelten Textilien, insbesondere Teppichen (Shoeib et al. 2011; Scher et al., 2019).

Landwirtschaftlich genutzte Böden und andere Landflächen werden lokal bis global vor allem durch Luftdeposition und PFAS-haltige Niederschläge belastet. Der bodenbezogene landwirtschaftliche Einsatz von Klärschlämmen als Dünger, welcher nach den Vorgaben der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, i.d.F.v. 19.06.2020) sowie der Düngemittelverordnung (DüMV, i.d.F.v. 02.10.2019) möglich ist, kann bei entsprechender Belastung des Klärschlammes mit

Schadstoffen ebenso zu einer flächigen Kontamination von Agrarflächen beitragen. Deshalb werden Klärschlämme vor der landwirtschaftlichen Verwertung untersucht und entsprechend zertifiziert. Um Schadstoffkreisläufe zu unterbrechen, wurde im Rahmen der Klärschlammverordnung entschieden eine thermische Verwertung von Klärschlämmen umzusetzen. Damit können Schadstoffsinken (z. B. Schwermetalle, Dioxine, PCB, PFAS u. a.) zukünftig vermieden werden. Auch durch den Einsatz sogenannter PFAS-Pestizide und –Biozide kann eine Bodenbelastung – vor allem mit Trifluoracetat bzw. Trifluoressigsäure (TFA) - erfolgen.

TFA ist ein Sonderfall unter den PFAS. Insbesondere wird wissenschaftlich kontrovers diskutiert, ob TFA auch durch natürliche (geogene) Prozesse z. B. bei Vulkanausbrüchen emittiert werden kann. Zum anderen ist TFA ein bekanntes Abbauprodukt aus manchen Pestiziden, Bioziden, fluorhaltigen Kältemitteln sowie anderen PFAS-haltigen Komponenten und kommt aufgrund der volkswirtschaftlichen Relevanz, insbesondere von Pestiziden und Kältemitteln, bereits in großen Mengen überall in der Umwelt vor. Gleichzeitig ist TFA jedoch aufgrund seiner hohen Mobilität und guten Wasserlöslichkeit aufbereitungstechnisch sehr schwer zu entfernen und könnte daher zukünftig für die Wasserwirtschaft ein großes Problem darstellen. Die toxikologische Relevanz von TFA ist bisher nicht eindeutig geklärt und wird wissenschaftlich noch untersucht. (Umweltbundesamt, 2023 B)

PFAS können zudem punktuell und lokal durch den Einsatz von PFAS-haltigen Feuerlöschschäumen bei der Brandbekämpfung auf Flughäfen oder Raffinerien oder durch unsachgemäße Entsorgung in die Böden gelangen. Belastete Böden stellen wiederum eine interne, durch Aufnahme über die Pflanzenwurzeln, oder externe, durch oberflächliche Kontamination, Belastung für Pflanzen dar. Durch in diesem Zusammenhang versickerndes Wasser (z. B. in Folge von Niederschlägen) kann es darüber hinaus zu einer relativ schnellen vertikalen Verlagerung, insbesondere von kurzkettigen PFAS (mit einer Kettenlänge von weniger als sieben perfluorierten Kohlenstoffatomen), bis ins Grundwasser kommen. Langkettige PFAS (mit sieben bzw. mehr als sieben perfluorierten Kohlenstoffatomen) verweilen durch ihre Sorptionseigenschaften i.d.R. länger in den oberen Bodenschichten und können dort lebende Organismen belasten. (Li et al, 2020; Tang et al, 2022; Li et al, 2022; Reinikainen et al, 2022)

Analog zu den Böden, unterliegen auch Oberflächengewässer, wie Flüsse und Seen, einem direkten Einfluss durch atmosphärische PFAS-Depositionen. Zudem können PFAS auch durch Abschwemmungen und Drainageprozesse von kontaminierten Böden, etwa bei Regen, direkt in angrenzende Gewässer gelangen (Gallen et al, 2018; Dauchy et al, 2019). Einen weiteren mittelbaren Eintragspfad können die geklärten Abwassereinleitungen (Klarwasser) aus Kläranlagen darstellen. Hier spielen vor allem kurzkettige, wasserlösliche PFAS aus diffusen Abwasserbelastungen durch Haushalte, Gewerbe und Industrie und die in diesem Zusammenhang genutzten Produkte eine Rolle. PFAS können sich auch in Sedimenten von Flüssen und Seen anreichern (Campo et al, 2016; Lv et al, 2019). Bei Hochwasserereignissen kann das PFAS-haltige Sediment

mobilisiert werden und die Böden und Oberflächengewässer der Überschwemmungsgebiete kontaminieren.

2.2 PFAS in der Umwelt

Die Recherchen der Reporter des "Forever Pollution Project" von 2023 zeigen gemeinsam mit 15 europäischen Partnermedien, dass in ganz Europa bereits mehr als 17.000 Orte mit relevanter PFAS-Verschmutzung, darunter gut 2.000 Hotspots, belastet sind¹². Für Deutschland zeigen die Recherchen mehr als 1.500 mit PFAS belastete Flächen, darunter mehr als 300 Hotspots. In Deutschland sind die bisher vermutlich bedeutsamsten Eintragsursachen von PFAS in die Umwelt der Einsatz von PFAS-haltigen Feuerlöschschäumen zu Feuerlöschübungen und zur Brandbekämpfung in Raffinerien sowie auf zivilen und militärischen Flughäfen oder bei anderen Großbränden, die Verwendung von PFAS-haltigen Materialien in der Landwirtschaft und im Forstbereich (z. B. Kompost, Bodenverbesserer, Pestizide, Füllmaterial) sowie in der industriellen Produktion, aber auch über Altlasten und unbekannte Quellen.

Bekannte Bodenkontaminationen mit PFAS in Deutschland sind u. a. der „Düsseldorfer Flughafen“¹³ und „Köln-Süd“¹⁴. Allein im Kölner Süden sind dadurch ca. 60 Brunnen und ca. 25.000 Personen durch eine PFAS-Belastung des Grundwassers – bedingt durch den Einsatz von Feuerlöschschäumen in den dort ansässigen Industriegebieten, z. B. Raffinerien - betroffen. In den entsprechenden Gebieten Köln-Rodenkirchen und Köln-Porz darf das dortige Brunnenwasser nun nicht mehr zur Gartenbewässerung genutzt werden¹⁵. In Nordrhein-Westfalen wurden Feuerlöschmittel als Hauptursache für mehr als zwei Drittel aller bekannten PFAS-Belastungen von Böden und Gewässern identifiziert, gefolgt von Belastungen aus der Galvanik und der Klärschlammausbringung¹⁶.

¹² Daten und Quellen unter <https://foreverpollution.eu/maps-and-data/data/>

¹³ Webseite Düsseldorf Airport. URL: <https://www.dus.com/de-de/konzern/nachhaltigkeit/gew%C3%A4sserschutz> (Abgerufen am 16.12.2024)

¹⁴ Webseite Bezirksregierung Köln. URL: <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/bezirksregierung-koeln-nimmt-stellung-zu-pfas> (Abgerufen am 12.12.2024)

¹⁵ Webseite Stadt Köln. Pressemitteilung vom 11.05.2020. URL: <https://www.stadt-koeln.de/politik-und-verwaltung/presse/mitteilungen/21846/index.html> (Abgerufen am 12.12.2024)

¹⁶ Webseite LANUV NRW. URL: <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/gefahrstoffe/pfas> (Abgerufen am 16.12.2024)

Die Vermeidung von PFAS-Einträgen in die Umwelt ist national bzw. international gesetzlich nur vereinzelt geregelt. Gleichzeitig fehlen umfangreiche rechtliche Regelungen zur Überwachung und Beherrschung eines PFAS-Vorkommens in der Umwelt. In Oberflächengewässern wird bislang nur PFOS über die Umweltqualitätsnormen-Richtlinie 2008/105/EG¹⁷ als prioritär gefährlich eingestuft. Die Einführung von Qualitätsnormen für weitere PFAS im Grundwasser und in Oberflächengewässern wird zurzeit auf europäischer Ebene diskutiert. Entsprechende PFAS-Qualitätsnormen bzw. –vorgaben für Böden (Bundes-Bodenschutzgesetz, BBodSchG, i.d.F.v. 25.02.2021) und Luft (Bundes-Immissionsschutzgesetz, BImSchG, i.d.F.v. 03.07.2024) existieren bislang nicht. In der 2021 novellierten Bundes-Bodenschutz-und-Altlastenverordnung (BBodSchV, i.d.F.v. 09.07.2021) sind bisher nur Prüfwerte für einige PFAS aufgenommen worden. Diese Prüfwerte haben vor allem einen vorbeugenden Charakter und werden schwerpunktmäßig im Rahmen von Verdachtsfällen und bei Sanierungsfällen ermittelt, um Hinweise auf negative Bodenveränderungen, Altlasten oder Sickerwasser und damit Risiken für Verschmutzungen des Grundwassers zu geben. Daneben gibt es einige weitere Regelungen, welche ebenfalls weder umfassend noch einheitlich sind.

2.3 PFAS im Trinkwasser

Bundesweite Informationen über die PFAS-Konzentrationen im Trinkwasser werden spätestens ab dem 12.01.2026 gemäß den neuen Vorgaben der EU-Trinkwasserrichtlinie (EU-Richtlinie 2020/2184) öffentlich verfügbar sein. In Deutschland trat am 20.06.2023 die novellierte Trinkwasserverordnung in Kraft, welche in ihrer Anlage 2, Teil 1 zur Umsetzung der EU-Trinkwasserrichtlinie erstmals Grenzwerte für PFAS gesetzlich festlegt. Für PFAS werden zwei Summengrenzwerte definiert: Ab dem 12.01.2026 gilt gemäß der EU-Trinkwasserrichtlinie ein Summengrenzwert für eine Gruppe von 20 trinkwasserrelevanten PFAS-Substanzen (Summe PFAS-20) in Höhe von 100 ng/L. Ab dem 12.01.2028 gilt in Deutschland zusätzlich ein Summengrenzwert für die vier wichtigsten sich im Körper anreichernden PFAS (Summe PFAS-4) von 20 ng/L. Die gesetzlichen Trinkwassergrenzwerte sind so gewählt, dass bei Einhaltung dieser Grenzwerte das

¹⁷ Die Umweltqualitätsnormen-Richtlinie stuft bestimmte Stoffe bzw. Stoffgruppen in Oberflächengewässern, die aufgrund des erheblichen Risikos, das von ihnen für die bzw. durch die aquatische Umwelt ausgeht, als prioritäre Schadstoffe ein und legt für diese Stoffe Höchstkonzentrationen fest, die nicht überschritten werden dürfen.

Trinkwasser lebenslang ohne Gefährdung für die menschliche Gesundheit getrunken werden kann¹⁸.

Bisher existieren für Deutschland nur vereinzelte PFAS-Messungen im Trinkwasser, jedoch keine systematische bundesweite Erhebung. In einer Erhebung von Borchers et al (2022) über PFAS-Konzentrationen im Trinkwasser mit insgesamt 1119 Proben überschritten etwa 3,8 % der untersuchten Proben den gesetzlichen Summengrenzwert PFAS-20 von 100 ng/L und ca. 5,4 % den Summengrenzwert PFAS-4 von 20 ng/L. Häufig ließen sich die erhöhten Werte auf spezifische Punktquellen wie Flughäfen (Einsatz von Feuerlöschschäumen) oder industrielle Kontaminationen zurückführen. Eine weitere Studie von Ingold et al (2023) untersuchte 89 Trinkwasserproben auf verschiedene PFAS. Die Proben wurden in allen deutschen Bundesländern gezogen, wobei auch große Versorgungsgebiete (> 400.000 Personen) und auch verschiedene Rohwasserarten (Grundwasser, Oberflächenwasser, Uferfiltrat) inkludiert wurden. Hierbei wurden Trinkwassersummenkonzentrationen für PFAS-20 von bis zu 80,2 ng/L und damit unterhalb des gesetzlichen Trinkwassergrenzwertes von 100 ng/L gefunden. Eine Bewertung beider Studienergebnisse hinsichtlich einer repräsentativen bundesweiten PFAS-Belastung von Trinkwässern ist nicht möglich, weil jeweils nicht hervorgeht, wie viele Wasserwerke beprobt bzw. wie viele versorgte Personen betroffen sind¹⁹. Wesentlich ist, dass für die Versorgung der Bevölkerung die gesundheitsrelevanten Parameter im Trinkwasser immer eingehalten werden.

Das Umweltbundesamt (Umweltbundesamt, 2020 A) betont, dass Trinkwasser in der Regel nur dann höhere PFAS-Konzentrationen aufweise, wenn die genutzten Trinkwasserressourcen durch Schadensfälle mit PFAS verunreinigt wurden. In Deutschland seien erst wenige Fälle mit erhöhten Trinkwasserbelastungen durch PFAS bekannt. Beispielsweise kam es 2006 im Hochsauerlandkreis durch das Ausbringen von belasteten Bodenverbesserern und Klärschlämmen zu einer erhöhten Belastung der Flüsse Ruhr und Möhne und in der Folge auch zu einer Belastung des aus der Ruhr und Möhne gewonnenen Trinkwassers (Exner, M. et al., 2006). Ein weiterer Schadensfall wurde 2013 in Mittelbaden, im Landkreis Rastatt, bekannt. Hier erfolgte eine erhebliche PFAS-Kontamination des Grundwassers und des daraus gewonnenen Trinkwassers, welche auf den Einsatz von PFAS-belastetem Kompost auf hauptsächlich landwirtschaftlich

¹⁸ Webseite Umweltbundesamt zu *Trinkwasserleitwerte*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet/toxikologie-des-trinkwassers/trinkwasserleitwerte> (Abgerufen am 04.07.2024)

¹⁹ So können z. B. mehrere Probenwerte von einem einzigen Wasserwerk stammen. Das heißt, dass die Anzahl der Probenwerte weder mit der Anzahl der betroffenen Wasserwerke noch mit der Anzahl der betroffenen Personen korreliert.

genutzten Flächen von mindestens 1105 ha zurückgeführt werden konnte²⁰. Diese Fläche entspricht in etwa der Fläche von mehr als 1500 Fußballfeldern. In allen Fällen wurde die Trinkwasseraufbereitung umgehend erweitert, so dass stets alle gesundheitswissenschaftlichen und gesetzlichen Vorgaben gemäß der Trinkwasserverordnung (TrinkwV, i.d.F.v. 20.06.2023) eingehalten werden.

2.4 PFAS in Lebensmitteln, in Lebensmittelkontaktmaterialien und in Futtermitteln

PFAS-Belastungen in Lebensmitteln und in Lebensmittelkontaktmaterialien, z. B. in Verpackungen, wurden in zahlreichen Studien weltweit untersucht. Hinsichtlich der PFAS-Belastung von Lebensmittelhauptgruppen (ohne Trinkwasser) gibt nachfolgende Tabelle aus einer umfangreichen Stellungnahme des deutschen Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR, 2021) einen Überblick über die mittlere und die 95-Perzentil²¹-Belastung unter Verwendung des Lower-Bound-Ansatzes²² wieder. Zur Einordnung der gemessenen Konzentrationswerte der BfR-Stellungnahme wurde die Tabelle mit den zurzeit geltenden PFAS-Höchstwerten für Lebensmittel aus der europäischen Kontaminanten-Verordnung (EU-Verordnung 2022/2388) verglichen. In der EU-Kontaminanten-Verordnung werden bislang nur Höchstwerte für die vier wichtigsten sich im Körper anreichernden PFAS (Summe PFAS-4: PFHxS, PFNA, PFOA und PFOS) für eine Auswahl von Lebensmitteln tierischer Herkunft (ohne Milch) gesetzlich geregelt. Bei Überschreitung dieser Höchstwerte dürfen diese Lebensmittel nicht mehr als Rohstoffe oder Zutaten verwendet werden. Produkte pflanzlicher Herkunft wie z. B. Gemüse, Obst, Getreide oder stärkehaltige Knollen sind bisher nicht aufgeführt. Seit 2022 empfiehlt die EU-Kommission den Mitgliedstaaten das Vorkommen von PFAS auch in anderen relevanten Lebensmitteln zu überwachen (EU-Empfehlung 2022/1431).

²⁰ Webseite Stadt Rastatt. URL: <https://www.rastatt.de/mein-rastatt/natur-und-umwelt/pfas-belastung> (Abgerufen am 16.12.2024)

²¹ 95-Perzentil bedeutet, dass 95 % der Werte unter dem angegebenen Wert liegen.

²² Beim Lower-Bound-Ansatz wird für alle analytisch nicht bestimmbaren Werte der Wert auf Null gesetzt. Zum Vergleich: Beim Upper-Bound-Ansatz werden die nicht bestimmbaren Werte auf die jeweilige Bestimmungsgrenze des analytischen Verfahrens für eine bestimmte Substanz festgesetzt. Laut dem BfR führt der Upper-Bound-Ansatz dadurch zu einer Überschätzung der tatsächlichen Exposition, weshalb der Lower-Bound-Ansatz als die realistischere Expositionshöhe angesehen wird (BfR, 2021).

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen PFAS-Konzentrationen zu den entsprechend gesetzlich geltenden Höchstkonzentrationen in Lebensmitteln: Die in Lebensmitteln gemessenen PFAS-Konzentrationen in µg/kg für die Summe der vier wichtigsten sich im Körper anreichernden PFAS (Summe PFAS-4: PFHxS, PFNA, PFOA und PFOS) stammen aus der BfR-Stellungnahme (2021) Kapitel 3.1.3.1.1, welche auf den Ergebnissen der Überwachungsprogramme der Bundesländer unter Verwendung des Lower-Bound-Ansatzes basieren. Sofern vorhanden wurden die entsprechenden geltenden gesetzlichen PFAS-Höchstwerte gemäß der EU-Kontaminanten-Verordnung 2022/2388 zum Vergleich ergänzt. Mit einem Asterisk (*) gekennzeichnete Einträge weist darauf hin, dass der Anteil bestimmbarer Werte < 5 % lag und deshalb der Wert für das 95-Perzentil auf Null gesetzt wurde.

Lebensmittelhauptgruppen nach BfR-Stellungnahme (2021)	Summe PFAS-4: PFHxS, PFNA, PFOA, PFOS		
	Mittelwert nach BfR-Stellungnahme (2021) in µg/kg	95-Perzentil nach BfR-Stellungnahme (2021) in µg/kg	Höchstwerte nach EU-Verordnung 2022/2388 in µg/kg
Fleisch und Fleischerzeugnisse	52,9	339,87	1,3 (Fleisch von Rindern, Schweinen, Geflügel) 1,6 (Fleisch von Schafen) 9,0 (Wildfleisch ohne Bären) 8,0 (Schlachtnebenerzeugnisse von Rindern, Schafen, Schweinen und Geflügel)
Fleisch Schwein	0,05	0,01	
Fleisch Rind/Kalb	1,34	2,95	
Fleisch Huhn	0,19	1,49	
Fleisch Ente, Gans, Wachtel	2,37	10,65	
Fisch und Fischerzeugnisse	5,38	30,0	2,5 – 45 (je nach Fischart)
Karpfen	18,93	47,78	
Forelle	1,21	4,98	
Lachs	1,89	11,31	
Eier und Eiprodukte	0,36	1,60	1,7
Gemüse und Gemüseprodukte	0,18	1,29	-
Getreide und Produkte auf Getreidebasis	0,07	0*	-
Milch und Milchprodukte	0,01	0,04	-
Stärkehaltige Wurzeln oder Knollen, Obst und Obstprodukte	0,01	0*	-

Die Ergebnisse nach Tabelle 1 zeigen, dass vor allem Fleisch und Fisch sowie deren Erzeugnisse die zurzeit am stärksten mit PFAS-belasteten Lebensmittel sind. In geringerem Maße sind auch Eier und Eiprodukte sowie Milch und Milchprodukte mit PFAS belastet. Diese Beobachtung lässt sich chemisch plausibel erklären: PFAS werden gut an Proteine/Eiweiße gebunden. Zudem reichern sich PFAS infolge ihrer schlechten Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen in der Umwelt und letztendlich auch in der Nahrungskette an. Daher sind tierische Lebensmittel in der Regel stärker belastet als pflanzliche Lebensmittel.

Zur PFAS-Belastung von Futtermitteln existieren aufgrund der hierfür bislang noch begrenzten Laborkapazitäten nur wenige und hinsichtlich der Datenlage nicht belastbare Messwerte. Ein Einfluss von Futtermitteln, z. B. auf die Kontamination von tierischen Lebensmitteln, ist grundsätzlich möglich und soll zukünftig – auch über entsprechend sensitive Analyseverfahren - weiter erforscht werden (BfR, 2023). Seit 2022 empfiehlt die EU-Kommission den Mitgliedstaaten, welche über die entsprechenden Analysefähigkeiten verfügen, auch die Futtermittel auf PFAS zu überwachen bzw. die Analysekapazitäten hierfür entsprechend aufzubauen (EU-Empfehlung 2022/1431).

Lebensmittelverpackungen können nennenswerte PFAS-Konzentrationen enthalten. Laut einer Zusammenstellung des BUND von 2021 („Der PFAS-Verpackungscheck“, 5/2021) wiesen insbesondere Einweggeschirr (Teller, Schüsseln aus Zuckerrohr) und Verpackungen aus dem Fast-Food-Bereich sehr hohe Gesamt-PFAS-Gehalte auf (BUND, 2021). Einige Studien lassen vermuten, dass PFAS aus Lebensmittelverpackungen in die Lebensmittel übergehen (migrieren) können (Fraunhofer IVV, 2012; Phelps, 2024). Aufgrund der Komplexität der Analytik und der bisher nicht standardisierten Methoden existieren allerdings kaum belastbare Zahlen hierzu. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit sind im Rahmen einer Novellierung der europäischen Verpackungs-Verordnung bereits Beschränkungen und Verwendungsverbote von PFAS in Verpackungen, die mit Lebensmittel in Berührung kommen, vorgesehen²³.

2.5 PFAS im Menschen

Menschen können PFAS über die Nahrung, über das Wasser und auch über die Luft aufnehmen. Der Verzehr von Lebensmitteln tierischer Herkunft wie Fleisch und Fisch sowie deren Erzeugnisse als auch von Früchten und Eiern wird von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) zurzeit als Hauptquelle für die Belastung des Menschen durch PFAS eingestuft (EFSA, 2020). Lebensmittel mit vergleichsweise sehr hohen PFAS-Gehalten, die einen

²³ Webseite Rat der Europäischen Union. Pressemitteilung vom 04.03.2024. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2024/03/04/packaging-council-and-parliament-strike-a-deal-to-make-packaging-more-sustainable-and-reduce-packaging-waste-in-the-eu/> (Abgerufen am 04.12.2024)

signifikanten Beitrag zur Gesamt-Exposition für den Menschen leisten können, sind jedoch solche, die in der Regel selten konsumiert werden, wie beispielsweise Wildschweinfleisch, Karpfen, Aal und andere Süßwasserfische sowie tierische Innereien. Regelmäßiger konsumierte, jedoch deutlich geringer belastete, Lebensmittel mit signifikanten Beiträgen sind Rind- und Kalbfleisch, Lachs, Seelachs sowie sonstiges Geflügel (ohne Fleisch von Wild). Insgesamt belegen Untersuchungen nicht nur einen Zusammenhang zwischen dem Konsum bestimmter PFAS-belasteter Lebensmittel und erhöhten PFAS-Konzentrationen im Blutserum von Menschen (Yang et al, 2019; BfR, 2021), sondern auch, dass bereits alle Menschen PFAS im Blut haben.

In Deutschland prüft das Umweltbundesamt regelmäßig in der größten Studie zur Schadstoffbelastung der deutschen Bevölkerung - GerES²⁴ (bisher Umwelt-Survey genannt) - mit welchen potenziell schädlichen Substanzen und Umwelteinflüssen die Menschen in Deutschland in Berührung kommen. In einer aktuellen Untersuchung wurde unter anderem die PFAS-Belastung im Blutplasma von Kindern und Jugendlichen untersucht (Umweltbundesamt, 2023 A). Zur gesundheitsbezogenen Beurteilung der gemessenen PFAS-Gehalte im Blutserum hat die Kommission *Human-Biomonitoring* des Umweltbundesamts zudem toxikologisch und epidemiologisch begründete Beurteilungswerte, die sogenannten HBM-I und HBM-II Werte²⁵, für bestimmte PFAS abgeleitet. Die aktuellen Studien zeigen, dass die HBM-Werte für manche PFAS bei einigen untersuchten Personengruppen bereits überschritten wurden (Umweltbundesamt, 2020 B).

Die Toxizität von PFAS für Mensch und Umwelt wurde in vielen Studien belegt (Brunn et al, 2023). Bisher gilt die akute Toxizität der PFAS als gering, jedoch wird eine chronische Toxizität aufgrund ihrer Akkumulationsfähigkeit und langen Verweildauer im Körper, vor allem von langkettigen PFAS-Verbindungen, angenommen (BfR, 2021). Neuere Studien über die Toxizität von PFAS fokussieren sich zunehmend auf kurzkettige und neuartige PFAS-Alternativen, wie

²⁴ Webseite Umweltbundesamt zu *Deutsche Umweltstudie zur Gesundheit*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/belastung-des-menschen-ermitteln/deutsche-umweltstudie-zur-gesundheit-geres> (Abgerufen am 16.12.2024)

²⁵ Laut dem UBA (2024) ist „*der HBM-I-Wert [...] quasi als Prüf- oder Kontrollwert anzusehen. Der HBM-II-Wert entspricht der Konzentration eines Stoffes in einem Körpermedium, bei dessen Überschreitung nach dem Stand der derzeitigen Bewertung durch die Kommission eine als relevant anzusehende gesundheitliche Beeinträchtigung möglich ist, so dass akuter Handlungsbedarf zur Reduktion der Belastung besteht und eine umweltmedizinische Betreuung (Beratung) zu veranlassen ist. Der HBM-II-Wert ist somit als Interventions- und Maßnahmenwert anzusehen.*“ URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/kommission-human-biomonitoring/beurteilungswerte-der-hbm-kommission> (Abgerufen am 04.12.2024)

beispielsweise *GenX*²⁶. Grundsätzlich können PFAS im Körper verschiedene Organe negativ beeinflussen, darunter das Immunsystem, die Schilddrüse, die Leber, die Nieren und das Gehirn. Bereiche besonderer Besorgnis umfassen Reproduktionstoxizität, wobei PFOA in Tierversuchen eine reproduktionstoxische Wirkung zeigte, Immunotoxizität, mit nachteiligen Effekten auf das Immunsystem, insbesondere bei Kindern, und die karzinogene Wirkung, wobei ein Zusammenhang zwischen PFOS/PFOA und Leberadenomen (leberspezifische Tumore) sowie Nieren- und Hodenkrebs bei Menschen festgestellt wurde. Endokrine und neurotoxische Effekte wurden ebenfalls beobachtet, insbesondere in Bezug auf Schilddrüsenhormone und die neuronale Entwicklung. Weitere Zusammenhänge konnten zwischen erhöhten PFAS-Konzentrationen in der Muttermilch und niedrigerem Geburtsgewicht sowie Beeinträchtigungen der männlichen und weiblichen Fertilität festgestellt werden.

2.5.1 Beispielrechnung: Wie viel PFAS nehmen Menschen durch Nahrung und Trinkwasser auf?

Die EFSA hat im September 2020 eine Bewertung der gesundheitlichen Risiken von PFAS in Lebensmitteln veröffentlicht (EFSA, 2020). Die Bewertung der EFSA fokussiert sich auf die vier wichtigsten, sich im Körper anreichernden PFAS (PFAS-4: PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS). Für diese vier PFAS konnte aufgrund der toxikologischen Datenlage eine tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge für den Menschen (tolerable weekly intake, TWI) in der Höhe von 4,4 Nanogramm (ng) pro Kilogramm (kg) Körpergewicht pro Woche abgeleitet werden. Laut dem Umweltbundesamt gibt der TWI an, welche Menge eines Stoffes über alle Aufnahmepfade pro Woche und kg Körpergewicht lebenslang aufgenommen werden kann, ohne dass eine gesundheitliche Besorgnis besteht²⁷. Für den Menschen ergibt sich unter Berücksichtigung der Standardannahme für das Körpergewicht von 70 kg damit rechnerisch eine tolerierbare wöchentliche Dosis von 308 ng PFAS-4 pro Woche (*4,4 ng PFAS-4 pro kg Körpergewicht pro Woche multipliziert mit 70 kg Körpergewicht*) bzw. 44 ng PFAS-4 pro Tag (Abbildung 3).

Im Hinblick auf die tatsächlich aufgenommene PFAS-4-Gesamtmenge pro Woche stellte das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR, 2021) unter Verwendung der Daten aus den Überwachungsprogrammen der Bundesländer jedoch fest, dass *„die langfristige Exposition Erwachsener in Deutschland gegenüber [diesen vier PFAS] durch Verzehr von Lebensmitteln außer Trinkwasser [unter Verwendung des Lower Bound Ansatzes bereits] bei mittleren Gehalten etwa dem*

²⁶ *GenX* ist das Ammoniumsalz von Hexafluorpropylenoxid-Dimersäurefluorid.

²⁷ Webseite Umweltbundesamt zum Konzept zur Ableitung toxikologisch begründeter Trinkwasserleitwerte. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet/toxikologie-destrinkwassers/trinkwasserleitwerte> (Abgerufen am 04.12.2024)

Zweifachen (Mittelwert) bis Fünffachen (95-Perzentil) der Höhe der von der EFSA abgeleiteten tolerierbaren wöchentlichen Aufnahmemenge [entspricht]“.

Das heißt, dass Erwachsene in Deutschland bereits bis zu 22 ng pro kg Körpergewicht pro Woche bzw., unter Berücksichtigung der Standardannahmen, bis zu 1540 ng pro Woche bzw. 220 ng pro Tag, alleine durch Nahrung aufnehmen können. Es ist zu beachten, dass die Schätzungen des BfR über die PFAS-4-Aufnahme durch Nahrung stark zwischen Altersgruppen und Geschlecht variieren. Zudem sind die Schätzungen von erheblichen Unsicherheiten geprägt, da es sich um Abschätzungen aus verschiedenen Verzehrstudien handelt, welche ihrerseits wiederum von Unsicherheiten hinsichtlich der Verzehrgewohnheiten der Studienteilnehmer und/ oder der tatsächlichen unterschiedlichen Belastung der Lebensmittel durch PFAS-4 geprägt sind (BfR, 2021).

Zum Vergleich: Die mögliche PFAS-4-Aufnahme durch Trinkwasser ist durch den gesetzlichen Trinkwassergrenzwert auf maximal 20 ng pro Liter beschränkt. Unter Berücksichtigung der Standardannahme eines täglichen Trinkwasserkonsums von zwei Litern ergibt sich folglich eine PFAS-4-Gesamtaufnahme von maximal bis zu 40 ng pro Tag bzw. 280 ng pro Woche. Damit trägt Trinkwasser maximal nur bis zu 90 % der toxikologisch tolerierbaren wöchentlichen PFAS-4-Gesamtaufnahme gemäß EFSA (2020) bei. Die tatsächliche PFAS-4-Aufnahme ist in Anbetracht der bisherigen Trinkwasser-Erhebungen vermutlich deutlich geringer, so wiesen ca. 94 % der untersuchten Proben in der Studie von Borchers et al. (2022) PFAS-4-Gehalte von weniger als 20 ng/L auf.

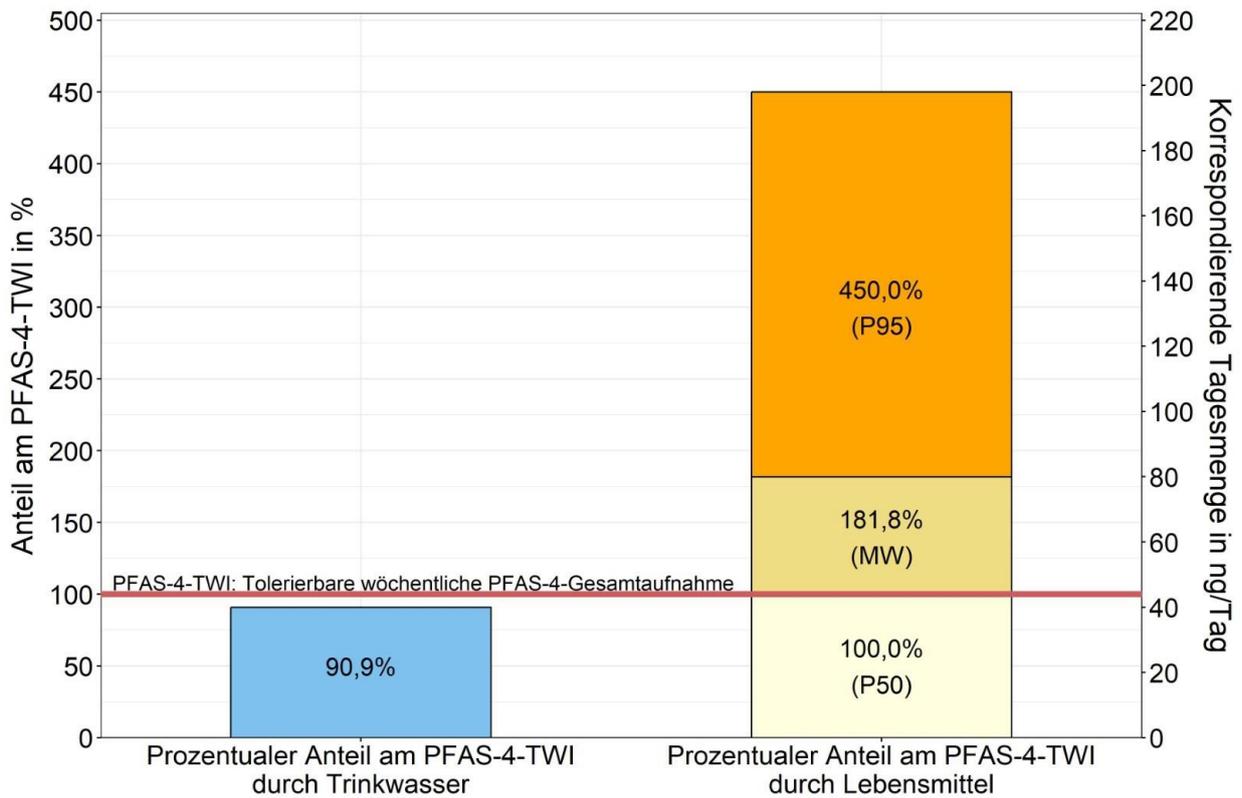


Abbildung 3: Vergleich der tatsächlichen PFAS-4-Aufnahme von Erwachsenen durch Trinkwasser und durch Nahrung mit der toxikologisch-tolerierbaren wöchentlichen Gesamtaufnahme in prozentualen Anteilen (linke y-Achse), bzw. in den korrespondierenden Tagesaufnahmen (rechte y-Achse). Die rote Linie kennzeichnet, die auf Basis toxikologischer Studien rechnerisch ermittelte, tolerierbare wöchentliche Gesamtmenge (TWI) für die vier wichtigsten sich im menschlichen Körper anreichernden PFAS: 4,4 Nanogramm (ng) PFAS-4 pro Kilogramm (kg) Körpergewicht pro Woche. Der TWI gibt an, welche Menge eines Stoffes über alle Aufnahmepfade pro Woche und kg Körpergewicht lebenslang aufgenommen werden kann, ohne dass eine gesundheitliche Besorgnis besteht. Unter der Standardannahme für das Körpergewicht von 70 kg ergibt sich eine wöchentliche Maximaldosis von 308 ng PFAS-4 pro Woche bzw. 44 ng PFAS-4 pro Tag, welche hier mit 100 % am TWI (PFAS-4-TWI) definiert wird. Der prozentuale Beitrag von Trinkwasser am TWI für PFAS-4 nimmt einen Trinkwasserkonsum von 2 Litern pro Tag und den gesetzlichen Trinkwassergrenzwert in Deutschland von 20 ng pro Liter an. Die prozentualen Anteile von Nahrung am TWI für PFAS-4 basieren auf den Expositions-Daten der Überwachungsprogramme der Bundesländer für Erwachsene zwischen 18 – 64 Jahre unter Verwendung des Lower Bound-Ansatzes: 4,4 (50. Perzentil, P50), 8,0 (Mittelwert, MW) und 19,8 (95. Perzentil, P95) ng PFAS-4 pro kg Körpergewicht pro Woche (Vgl. Tabelle 8 in Kapitel 3.1.3.2. der Stellungnahme des Bundesinstituts für Risikobewertung von 2021). Ein Perzentil gibt an, wie viel Prozent der Messwerte unter dem angegebenen Wert lagen.

Insgesamt wird deutlich, dass bereits bei jedem zweiten Erwachsenen der BfR-Stellungnahme die toxikologisch tolerierbare *PFAS-4*-Gesamtmenge überschritten wird²⁸ und Nahrung in der Regel der Hauptaufnahmepfad für den Menschen ist. Aufgrund der Größe der Stichprobe in der BfR-Stellungnahme (N = 10.525 Personen) ist zu vermuten, dass diese Folgerungen auch für die Gesamtheit der erwachsenen Bevölkerung in Deutschland gelten.

3 Wege zur Beherrschung und Minderung der PFAS-Belastung von Menschen und Umwelt

Die PFAS-Problematik ist ein Dilemma. Die besonderen chemischen Eigenschaften macht diese Stoffgruppe zwar attraktiv für viele technische Anwendungen, bedingen jedoch aufgrund ihrer Persistenz und Akkumulationsfähigkeit eine besonders besorgniserregende human- und ökotoxikologische Gefährdung. Gleichzeitig ist eine technische Entfernung von PFAS aus der Nahrung, aus Trinkwasser oder auch aus der Umwelt gar nicht oder wenn überhaupt nur unter sehr hohen Kosten und Ressourcenverbrauch (Energie, Materialaufwand, Wasserbedarf etc.) möglich. Flüssigkeiten können bisher nur über Membranfiltration, Aktivkohleverfahren sowie ggf. zukünftig auch über Ionenaustauschverfahren wirksam behandelt werden. Aus Feststoffen wie Nahrungsmittel, Böden usw. sind PFAS kaum bis gar nicht zu entfernen. Wichtig ist hierbei zu berücksichtigen, dass bei all diesen Verfahren mit PFAS angereicherter Abfall oder Abwasser anfällt, welcher wiederum mit speziellen Verfahren, z. B. der Hochtemperaturverbrennung, behandelt oder z. B. in Sonderdeponien entsorgt werden muss. Die Verbrennungsabluft muss dann ebenfalls speziell behandelt werden. Angesichts der ubiquitären Umweltbelastung mit PFAS und ihrer hohen chemischen und thermischen Stabilität wären die PFAS-bedingten Aufbereitungskosten demnach erheblich. Gemäß einer Analyse der Landesbank Baden-Württemberg von 2024 könnte PFAS für die Versicherungsbranche zum bislang teuersten Versicherungsschaden werden²⁹. Vor diesem Hintergrund werden PFAS sich voraussichtlich noch so lange in der Umwelt und in unserer Nahrungskette anreichern, bis der Eintrag in die Umwelt weitgehend reduziert bzw. vermieden wird.

²⁸ Die BfR-Stellungnahme (2021) ermittelte das 50. Perzentil mit 4,4 Nanogramm pro Kilogramm Körpergewicht pro Woche. Damit entspricht das 50. Perzentil genau der von der EFSA ermittelten toxikologisch tolerierbaren Aufnahmemenge.

²⁹ Webseite Landesbank Baden-Württemberg. Pressemitteilung vom 26.03.2024. URL: https://www.lbbw.de/artikelseite/pressemitteilung/stehen-versicherer-vor-ihrem-groessten-schadensfall_ah3a5ggb4x_d.html (Abgerufen am 21.10.2024)

Seit einigen Jahren wird daher versucht, der öko- und humantoxikologischen PFAS-Problematik mit verschiedenen gesetzgeberischen und politischen Mitteln entgegenzusteuern. So wurden für einzelne PFAS mittlerweile internationale Produktions- und Anwendungsbeschränkungen erlassen (z. B. PFOS-Verbot gemäß EU-Richtlinie 2006/122/EG) bzw. sind weitere in Bearbeitung³⁰. In Europa wurden neben Anwendungsbeschränkungen wie z. B. für PFHxA (EU-Verordnung 2024/2462) auch PFAS-Höchstgehalte für bestimmte Lebensmittel (EU-Kontaminanten-Verordnung 2022/2388) sowie PFAS-Grenzwerte für Trinkwasser (EU-Trinkwasserrichtlinie 2020/2184) festgelegt bzw. sind weitere Vorgaben in Vorbereitung. Weitere Maßnahmen umfassen die Aufnahme von bestimmten PFAS in die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EU-Richtlinie 2000/60/EG)³¹. So wurden Umweltqualitätsnormen z. B. die Einstufung von PFOS als prioritär gefährlicher Stoff (Umweltqualitätsnormen-Richtlinie 2008/105/EG) festgelegt. Für Böden wird eine gleichartige Rahmenrichtlinie zurzeit in der EU diskutiert. Eine analoge Rahmenrichtlinie für Luft fehlt bisher gänzlich. Politische Vorgaben, welche auf eine Sanierung bzw. Beseitigung der bereits bestehenden ubiquitären Umweltbelastungen durch PFAS abzielen, fehlen ebenfalls.

Alle laufenden Maßnahmen greifen erst seit wenigen Jahren bzw. treten erst zukünftig in Kraft und umfassen bisher weder alle relevanten Eintragspfade der PFAS-Stoffe in die Umwelt noch die gesamte Stoffgruppe PFAS (über 10.000 Komponenten). Letztendlich hat sich zudem gezeigt, dass Einzelstoffverbote bei PFAS nicht zielführend sind. EU-Verbotsverfahren zur Beschränkung von Stoffen sind sehr komplex, mehrstufig und dauern i.d.R. mehrere Jahre. Bis eine Einzelsubstanz daher verboten ist, kann bereits eine neue PFAS-Substanz entwickelt und auf den Markt gebracht werden, welche gleiche/ähnliche Eigenschaften wie die zu beschränkende PFAS-Substanz hat, jedoch dann nicht unter das Verbot fällt. Ein bekannter Fall für dieses Substitutions-Problem war beispielsweise der Ersatz von PFOA mit GenX, welches auch als besonders besorgniserregend gilt³².

³⁰ Details unter „*Welche PFAS wurden bislang reguliert*“. PFAS-FAQ des BMUV. URL: <https://www.bmu.de/faqs/per-und-polyfluorierte-chemikalien-pfas> (Abgerufen am 04.12.2024)

³¹ Zum Schutz und zur Verbesserung der Wasserqualität sowie der Wasserquantität aller Wasserkörper (Oberflächengewässer, Grundwasser, Binnengewässer und Übergangsgewässer) wurde in der EU ein gemeinsamer Ordnungsrahmen, die sogenannte Wasserrahmenrichtlinie, geschaffen. Ziel ist es einen „guten chemischen und ökologischen Zustand“ von Europas Flüssen, Seen und Grundwasser zu erreichen.

³² Webseite VDI zum EuGH-Urteil zur GenX-Chemikalie. URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/gesundheit/eugh-urteil-genx-chemikalien-sind-besonders-besorgniserregend/> (Abgerufen a, 16.12.2024)

Vor diesem Hintergrund ist der auf EU-Ebene diskutierte Vorschlag von Deutschland, Dänemark, Norwegen, Schweden und den Niederlanden zur Beschränkung der gesamten Stoffgruppe PFAS grundsätzlich die richtige Strategie³³. Allerdings werden PFAS auch in vielen Schlüsseltechnologien für die Energiewende gebraucht und sind hier technisch anscheinend teils noch alternativlos. Eine Beschränkung der Stoffgruppe PFAS sollte daher, aus gesundheitlicher Perspektive, zwar möglichst umfassend erfolgen, aber technische Erwägungen (z. B. Erreichung von Energie- und Klimazielen) könnten beispielsweise angemessene Übergangsfristen, den Schutz von Bestandsanlagen oder Ausnahmeregelungen bedingen. Laut Damgaard-Moller, einem Spezialisten für PFAS-Alternativen des Dänischen Technologischen Instituts, seien bereits 80 % aller PFAS durch bestehende Technologien und Materialien ersetzbar³⁴. Laut dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) enthalten beispielsweise ungefähr 20 % der Photovoltaik-Module PFAS, können jedoch durch Glas- oder anders modifizierte Oberflächenbeschichtungen auch PFAS-frei produziert werden (BDEW-Stellungnahme, 2023). Für alle anderen Anwendungen, für welche es bislang noch keine PFAS-freien gleichwertigen Alternativen gibt, ist maßgeblich, dass PFAS möglichst in geschlossenen Recyclingprozessen geführt, wiederverwertet und nicht in die Umwelt emittieren können. Diese Prozesse sollten Hersteller entsprechend früh einplanen, was auch durch politische Vorgaben und gegebenenfalls durch Förderungen gezielt unterstützt werden kann. Im Einklang mit dem Vorsorgeprinzip sowie dem sogenannten Multibarrierenprinzip muss die präventive Vermeidung von PFAS-Emissionen in die Umwelt immer Vorrang vor Aufbereitungsmaßnahmen im Sinne von End-of-Pipe-Ansätzen haben.

Neben der Frage zum zukünftigen Umgang mit PFAS und wie der Eintrag in die Umwelt vermieden werden kann, gehört auch die Frage zum Umgang mit der bereits bestehenden Umweltbelastung und insbesondere der Finanzierung der PFAS-bedingten gesamtgesellschaftlichen Kosten. Gemäß dem Verursacherprinzip, einem der wichtigsten Grundsätze der EU-Umweltpolitik (TFEU³⁵, Artikel 191 Abs 2) sollten „die Verursacher von Umweltverschmutzungen für

³³ Webseite der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin zu allgemeinen Informationen zum europäischen Beschränkungs-vorschlag von PFAS. URL: https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/DE/REACH/Verfahren/Beschaenkungsverfahren/Deutsche_Vorschlaege/PFAS/PFAS_node.html (Abgerufen am 16.12.2024)

³⁴ ChemSec Webinar. (2024). Folien 41 - 42 unter URL: <https://chemsec.org/app/uploads/2024/03/240318-Webinar-Fluoropolymers-JK.pdf> (Abgerufen am 04.12.2024)

³⁵ TFEU - Consolidated version of the Treaty on the Functioning of the European Union - PART THREE. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:12012E/TXT:en:PDF> (Abgerufen am 12.11.2024)

*Maßnahmen zu deren Vermeidung, Verminderung und Beseitigung sowie für die Kosten aufkommen, die der Gesellschaft durch die Umweltbelastung entstehen*³⁶. Angesichts der diversen Eintragspfade von PFAS in die Umwelt, den lokalen bis globalen Verbreitungswegen sowie den nicht nachvollziehbaren zeitlichen Zusammenhängen zwischen dem einzelnen Stoffeintrag in die Umwelt und der Überschreitung von Grenzwerten, können die Verursacher dieser Stoffeinträge schlichtweg kaum identifiziert werden.

In der Fachwelt wurde zum Umgang mit der bereits bestehenden PFAS-Umweltbelastung und insbesondere der Finanzierung der dadurch bedingten gesamtgesellschaftlichen Kosten das Konzept der erweiterten Herstellerverantwortung als ein möglicherweise geeigneter umweltökonomischer Lösungsansatz bereits diskutiert. Das Konzept sieht vor, dass die Hersteller und Importeure von PFAS und PFAS-haltigen Produkten sich an den PFAS-bedingten Kosten wie z. B. etwaigen Aufbereitungskosten, Kosten der analytischen Kontrolle von Grenzwerten, möglichen gesundheitlichen Folgekosten, Schadensersatzforderungen u. a. beteiligen. Die erweiterte Herstellerverantwortung würde damit am Anfang des Lebenszyklus der PFAS ansetzen und bei den Herstellern und Importeuren entsprechend Anreize setzen, dass nicht nur der Eintrag von PFAS in die Umwelt vermieden wird, sondern gleichzeitig auch effektive Recyclinglösungen und umweltschonende Alternativen entwickelt werden. Die erweiterte Herstellerverantwortung wird damit der Konsequenz der PFAS-Problematik gerecht, dass nur durch die Vermeidung von weiteren PFAS-Einträgen in die Umwelt, die öko- und humantoxikologische Gefährdung durch PFAS wieder vermindert und vor allem beherrschbar wird.

Zum Umgang mit der bestehenden Umweltbelastung sind zusätzlich umfassende und transparente Verbraucherinformationen für informierte Konsum- und Kaufentscheidungen erforderlich. Insbesondere sollte die Bewertung von PFAS in der Umwelt, in Produkten sowie in Lebensmitteln, auch mit Blick auf etwaige Grenzwerte, verbrauchergerecht und transparent erläutert und eingeordnet werden³⁷.

Zusammengefasst erstreckt sich die PFAS-Problematik im globalen Maßstab von der gesamten Umwelt über Pflanzen und Tiere bis hin zum Menschen. Die Auswirkungen der allgegenwärtigen

³⁶ Webseite EU-Kommission. Beitrag zum Verursacherprinzip. URL: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13546-Verursacherprinzip-Eignungsprüfung-seiner-Anwendung-auf-die-Umwelt_de (Abgerufen am 02.09.2024)

³⁷ Bisher existieren erst wenige verbrauchergerechte Informationen zum Vorkommen und zur Bedeutung von PFAS in Lebensmitteln und der Umwelt. Verbraucher können sich grundsätzlich an das UBA sowie an Verbraucherzentralen etc. wenden.

Belastung sind für Mensch und Umwelt zugleich vielfältig, komplex und höchst besorgniserregend. Folglich ist auch die Dimension einer Lösung hierfür vielschichtig und kann insbesondere nur durch globale politische Zusammenarbeit gelingen, analog den ab 1989 in Kraft getretenen Maßnahmen zur globalen Beschränkung der Herstellung und des Einsatzes von Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW), bei welchen entschieden wurde, zum Schutz der Ozonschicht der Erdatmosphäre innerhalb eines mehrjährigen Zeitrahmens weitgehend aus der FCKW-Produktion auszusteigen³⁸.

4 Quellen

BDEW-Stellungnahme (2023). Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. *Stellungnahme zum PFAS-Beschränkungs-vorschlag*. URL: <https://www.bdew.de/service/stellungnahmen/bdew-stellungnahme-zum-pfas-beschaenkungsvorschlag/>

BfR-Stellungnahme 020/2021 (2021). Bundesinstitut für Risikobewertung. Stellungnahme Nr. 020/2021 vom 28. Juni 2021. *PFAS in Lebensmitteln: BfR bestätigt kritische Exposition gegenüber Industriechemikalien*. URL: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/pfas-in-lebensmitteln-bfr-bestaetigt-kritische-exposition-gegenueber-industriechemikalien.pdf>

BfR-Stellungnahme 033/2023 (2023). Bundesinstitut für Risikobewertung. Stellungnahme Nr. 033/2023 vom 10. Juli 2024. *Futtermittel sind ein Schlüssel zur Einhaltung von PFAS-Höchstgehalten in tierischen Lebensmitteln*. URL: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/futtermittel-sind-ein-schluessel-zur-einhaltung-von-pfas-hoechstgehalten-in-tierischen-lebensmitteln.pdf>

Borchers, U. et al. (2022). U. Borchers, C. Beulker, A. Kämpfe, H. Knapp, F. Sacher, R. Suchenwirth. *PFAS im Trinkwasser: ein erster Überblick über Befunde und Herausforderungen für die Wasserversorgung*. URL: https://energie-wasser-praxis.de//wp-content/uploads/2023/05/ewp_0922_64-71_Borchers.pdf

Brunn, H. et al. (2023). H. Brunn, G. Arnold, W. Körner, G. Rippen, K. G. Steinhäuser, I. Valentin. *PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites*. Environmental Sciences Europe. Volume 35, No. 1. DOI: 10.1186/s12302-023-00721-8

³⁸ Montreal-Protokoll. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/chemikaliensicherheit-internationale-regelungen-montrealer-protokoll.html> (Abgerufen am 16.12.2024)

BUND (2021). Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. Webseite-Artikel. *Der PFAS-Verpackungscheck* vom 27.05.2021. URL: <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/pfas-verpackungscheck/> (Abgerufen am 19.12.2024)

Campo, J. et al. (2016). J. Campo, M. Lorenzo, F. Pérez, Y. Picó, M. Farrè, D. Barceló. *Analysis of the presence of perfluoroalkyl substances in water, sediment and biota of the Jucar River (E Spain). Sources, partitioning and relationships with water physical characteristics.* Environmental Research. Volume 147: 503- 5012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.03.010>

Dauchy, X. et al. (2019). X. Dauchy, V. Boiteux, A. Colin, J. Hémar, C. Bach, C. Rosin, J.-F. Munoz. *Deep seepage of per- and polyfluoroalkyl substances through the soil of a firefighter training site and subsequent groundwater contamination.* Chemosphere. Volume 214: 729-737. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.003>

EFSA (2020). EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. *Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food.* Efsa journal. Volume 18, issue 9. URL: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>

D'Ambro, E. L. et al. (2023). E. L. D'Ambro, B. N. Murphy, J. O. Bash, R. C. Gilliam, H. O. T. Pye. *Predictions of PFAS regional-scale atmospheric deposition and ambient air exposure.* Science of the Total Environment. Volume 902(19):166256. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166256>

Fraunhofer IVV (2012). K. Müller, R. Fengler, M. Still, M. Schlummer. *Studies on the migration of per- and polyfluorinated compounds from paper based packaging into real food and food simulants.* URL: https://www.researchgate.net/publication/234057051_Studies_on_the_migration_of_per-_and_polyfluorinated_compounds_from_paper_based_packaging_into_real_food_and_food_simulants

Gallen, C. et al. (2018). C. Gallen, G. Eaglesham, D. Drage, T. H. Nguyen, J. F. Müller. *A mass estimate of perfluoroalkyl substance (PFAS) release from Australian wastewater treatment plants.* Chemosphere. Volume 208: 975-983. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.024>

Ingold, V. et al. (2023). V. Ingold, A. Kämpfe, A. S. Ruhl. *Screening for 26 per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in German drinking waters with support of residents.* Eco-Environment & Health. Volume 2, issue 4: 235-242. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772985023000431>

Kim, Y. et al. (2023). Y. Kim, K. A. Pike, R. Gray, J. A. Sprankle, J. A. Faust, P. L. Edmiston. *Non-targeted identification and semi-quantitation of emerging per- and polyfluoroalkyl substances*

(PFAS) in US rainwater. *Environmental Science: Processes & Impacts*. Volume 25, issue 11: 1771-1787. URL: <https://doi.org/10.1039/D2EM00349J>

Li, B. et al. (2020). B.-B. Li, L.-X. Hu, Y.-Y. Yang, T.-T. Wang, C. Liu, G.-G. Ying. *Contamination profiles and health risks of PFASs in groundwater of the Maozhou River basin*. *Environmental Pollution*. Volume 260:113996. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113996>

Li, X. et al. (2022). X. Li, M. Fatowe, L. Lemos, N. Quinete. *Spatial distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in waters from Central and South Florida*. *Environmental Science and Pollution Research*. Volume 29, issue 56: 84383-84395. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21589-w>

Liu, Z. et al. (2017). Z. Liu, Y. Lu, Y. Shi, P. Wang, K. Jones, A. J. Sweetman, A. C. Johnson, M. Zhang, Y. Zhou, X. Lu, C. Su, S. Sarvajayakesavaluc, K. Khan. *Crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids through multi-media transport from a mega fluorochemical industrial park, China*. *Environmental International*. Volume 106: 37-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.014>

Lv, J. P. et al. (2019). J. Lv, C. Guo, S. Liang, Y. Zhang, J. Xu. *Partitioning behavior, source identification, and risk assessment of perfluorinated compounds in an industry-influenced river*. *Environmental Science Europe*. Volume 31: 55. URL: <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0251-8>

OECD (2021). OECD Series on Risk Management of Chemicals. *Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance*. Report. Page 23. URL: <https://doi.org/10.1787/e458e796-en>

Phelps, D. W. et al. (2024). D. W. Phelps, L. V. Parkinson, J. M. Boucher, J. Muncke, B. Beueke. *Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Food Packaging: Migration, Toxicity, and Management Strategies*. *Environmental Science and Technology*. Volume 58, issue 13: 5670-5684. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03702>

Reinikainen, J. et al. (2022). J. Reinikainen, N. Perkola, L. Äystö, J. Sorvari. *The occurrence, distribution, and risks of PFAS at AFFF-impacted sites in Finland*. *Science of The Total Environment*. Volume 829: 154237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154237>

Scher, D. P. et al. (2019). D. P. Scher, J. E. Kelly, C. A. Huset, K. M. Barry, V. L. Yingling. *Does soil track-in contribute to house dust concentrations of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in areas affected by soil or water contamination?* *Journal of exposure science and environmental epidemiology*. Volume 29: 218–226. URL: <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0101-6>

Shoeib, M. et al. (2011). M. Shoeib, T. Harner, G. M. Webster, S. C. Lee. *Indoor sources of poly- and perfluorinated compounds (PFCS) in Vancouver, Canada: implications for human exposure*.

Environmental Science and Technology. Volume 45, issue 19: 7999-8005. URL: <https://doi.org/10.1021/es103562v>

Exner, M. et al. (2006). M. Exner, H. Färber. *Perfluorinated surfactants in surface and drinking waters*. Environmental Science and Pollution Research. Volume 13: 299-307. URL: <https://doi.org/10.1065/espr2006.07.326>

Tang, J. et al. (2022). J. Tang, Y. Zhu, Y. Li, B. Xiang, T. Tan, L. Lv, Q. Luo. *Occurrence characteristics and health risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances from water in residential areas around fluorine chemical industrial areas, China*. Environmental Science and Pollution Research. Volume 29, issue 40: 60733-60743. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20155-8>

Umweltbundesamt (2020 A). Umweltbundesamt. *PFAS – Gekommen, um zu bleiben*. Schwerpunkt 1-2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkt-1-2020-pfas-gekommen-um-zu-bleiben>

Umweltbundesamt (2020 B). Umweltbundesamt. *HBM-II-Werte für Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) in Blutplasma – Stellungnahme der Kommission Human-Biomonitoring des Umweltbundesamtes*. Bundesgesundheitsblatt 2020. Ausgabe 63.356-360. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00103-020-03101-2>

Umweltbundesamt (2023 A). Umweltbundesamt. *Deutsche Umweltstudie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen, 2014-2017 (GerES V) Teil 1: Human Biomonitoring*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/belastung-des-menschen-ermitteln/umwelt-survey/5-umwelt-survey-von-2013-bis-2016>

Umweltbundesamt (2023 B). Umweltbundesamt. *Trifluoressigsäure (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung schaffen - Räumliche Analyse der Eintragspfade in den Wasserkreislauf*. Abschlussbericht. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/102_2023_texte_tfa_v2.pdf

Umweltbundesamt (2023 C). Umweltbundesamt. *Vorkommen und Quellen von PFAS in der Umwelt und aktuelle Regelungsansätze*. Wissenschaftlicher Artikel. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/umid_2301_230404_clean_33_t_03a.pdf

Yang, J. et al. (2019). J. Yang, H. Wang, H. Du, L. Xu, S. Liu, J. Yi, X. Qian, Y. Chen, Q. Jiang, G. He. *Factors associated with exposure of pregnant women to perfluoroalkyl acids in North China and health risk assessment*. Science of The Total Environment. Volume 655: 356-362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.042>