Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) im Hausstaub

Autoren: Neuweger, Britta*[1]; Neukirch, Dennis*[1]; Siemers, Ulrike*[1]; Weis, Norbert*[1]; Rother, Alica*[2]; Siol, Antje*[2] und Köhler, Michael*[1]

*[1] Bremer Umweltinstitut GmbH

*[2] Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien, Universität Bremen

Zusammenfassung

Das Vorkommen und die Verbreitung von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) stellen aufgrund der Persistenz, Mobilität und potenziellen Toxizität der Verbindungen eine bedeutende Umwelt- und Gesundheitsproblematik dar. Während PFAS in Wasser, Boden und Biota intensiv untersucht wurden, rückt das Vorkommen in Innenräumen zunehmend in den Fokus, da dieser eine relevante Expositionsquelle für die Allgemeinbevölkerung darstellt. Hierbei trägt belasteter Hausstaub nicht nur zur Exposition bei, sondern er kann auch als Indikator für Innenraumbelastungen genutzt werden. Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung der Konzentrationen und Zusammensetzung von PFAS im Hausstaub verschiedener Wohnumgebungen. Hierfür wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „UpSI“ (Umweltpersistente Schadstoffe in Innenräumen, gefördert durch die Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft der Freien Hansestadt Bremen) in den Jahren 2023 und 2024 Staubproben aus 49 Haushalten gesammelt und mittels Hochleistungsflüssigchromatographie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS/MS) analysiert.

In 85,7 % der Proben konnten PFAS nachgewiesen werden, wobei die Konzentrationen der Einzelsubstanzen variierten. Besonders häufig wurden Perfluoroctansäure (PFOA, Detektionsfrequenz 63,3 %) und Perfluoroctansulfonsäure (PFOS, Detektionsfrequenz 26,5 %) detektiert, obwohl Herstellung, Verwendung und Inverkehrbringen dieser Substanzen seit 2010 bzw. 2020 weitgehend reguliert sind. Die gemessenen PFAS-Gesamtkonzentrationen reichten von unterhalb der Bestimmungsgrenze bis zu 3,1 mg/kg Staub. Eine Expositionsabschätzung zeigte, dass insbesondere Kleinkinder aufgrund erhöhter Staubaufnahme potenziell höheren Belastungen ausgesetzt sind. Unter Berücksichtigung des von der European Food Safety Authority (EFSA, 2020) abgeleiteten Tolerable Weekly Intake (TWI) von 4,4 ng/kg Körpergewicht für die Summe aus PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS (4-PFAS) ist für ein Kleinkind (10 kg Körpergewicht, 100 mg Staubaufnahme/Tag) eine Ausschöpfung von 28 % (beim Median der gemessenen 4-PFAS-Gehalte) bzw. von 324 % (beim 90-Perzentils der gemessenen 4-PFAS-Gehalte) des toxikologischen Referenzwertes zu erwarten.

Neuweger, Britta; Neukirch, Dennis; Siemers, Ulrike; Weis, Norbert, ; Rother, Alica; Siol, Antje; Köhler, Michael (2026): Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) im Hausstaub. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF.
https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/per-und-polyfluorierte-alkylsubstanzen-pfas-im-hausstaub
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 in Bremen
„Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere SVOC“

Auf Grundlage dieser Abschätzung leitete das Bremer Umweltinstitut vorläufige Vorsorgewerte für den Gehalt an 4-PFAS im Hausstaub ab, die zu einer 10%igen Ausschöpfung der tolerierbaren Aufnahmemenge über den oralen Staubexpositionspfad führen (getrennt für Erwachsene und Kleinkinder). Zusätzlich wurde ein vorläufiger Orientierungswert definiert, ab dem Maßnahmen zur Minderung empfohlen werden.

Neben den regulierten Endprodukten gewinnen PFAS-Vorläufersubstanzen (Precursors), darunter Fluortelomeralkohole, zunehmend an Beachtung, da sie in Umweltmedien oder im Organismus zu persistenten PFAS umgewandelt werden können (Buck et al., 2011, McIntyre et al., 2026). Sie stellen einen großen Anteil der Kontamination von Umweltmedien, beispielweise auch in Schlafzimmern von Kindern oder Kindergärten (Winkens et al., 2018, Zheng et al., 2020, Wu et al., 2020). Daher wurde ein Methodenvergleich der Analytik von PFAS im Hausstaub nach bisher im Rahmen der Studie verwendeten Verfahren (DIN CEN / TS 15968, DIN SPEC 1038:2010-11) mit der neu an der Bremer Umweltinstitut GmbH etablierten Analytik nach DIN EN 17681-1:2025-6 durchgeführt. Letztere ermöglicht nicht nur die Detektion „frei vorliegender“ PFAS, sondern mittels alkalischer Hydrolyse auch derjenigen PFAS, die zum Beispiel aus seitenkettenfluorierten Polymeren (SFP) freigesetzt werden können. Eine Unterscheidung „freier“ und freigesetzter PFAS ist hierbei nicht möglich. SFP können als verwandte Stoffe zu den in REACH oder POP-reglementierten Carbonsäuren aufgefasst werden.

Neuweger, Britta; Neukirch, Dennis; Siemers, Ulrike; Weis, Norbert, ; Rother, Alica; Siol, Antje; Köhler, Michael (2026): Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) im Hausstaub. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF.
https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/per-und-polyfluorierte-alkylsubstanzen-pfas-im-hausstaub
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 in Bremen
„Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere SVOC“

1. Einleitung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) stellen eine große Stoffgruppe synthetischer organischer Chemikalien dar, die aufgrund ihrer außergewöhnlichen chemischen und thermischen Stabilität seit den 1950er Jahren in zahlreichen industriellen Anwendungen und Verbraucherprodukten eingesetzt werden. PFAS verfügen gemäß OECD-Definition über mindestens eine vollständig fluorierte Methylgruppe (-CF3) oder Methylengruppe (-CF2), die nicht an Wasserstoff oder ein weiteres Halogen gebunden sind (OECD, 2021). Ihre wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften machen sie unter anderem für den Einsatz in Textilien, Lebensmittelverpackungen, Antihaftbeschichtungen, Feuerlöschschäumen und Kosmetikprodukten attraktiv (Kissa, 1994, Baran, 2001, Rao et Baker, 1994). Die hohe Stabilität der Kohlenstoff-Fluor-Bindung (Smart, 1994) führt jedoch dazu, dass PFAS in der Umwelt persistent sind und kaum abgebaut werden. Sie werden deshalb häufig als „Ewigkeits-Chemikalien“ bezeichnet. Darüber hinaus weisen zahlreiche PFAS eine hohe Mobilität auf und werden über weite Distanzen transportiert, sodass sie heute weltweit selbst in abgelegenen Regionen nachgewiesen werden, beispielsweise in polaren Regionen (Muir et al., 2019, Butt et al., 2010). Für verschiedene langkettige PFAS, darunter Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroctansäure (PFOA), wurden zudem Bioakkumulation sowie toxische Wirkungen beschrieben. Epidemiologische und experimentelle Studien bringen eine chronische PFAS-Exposition unter anderem mit Veränderungen des Lipidstoffwechsels, Lebertoxizität, immunologischen Effekten, einer verminderten Impfantwort, Entwicklungsstörungen sowie einem erhöhten Risiko bestimmter Krebserkrankungen in Verbindung (Sunderland et al., 2019, EFSA, 2020).

2. Beschränkungen von PFAS

Die Regulierung besonders langlebiger und bioakkumulierender PFAS erfolgt in der Europäischen Union über die POP-Verordnung (EU) 2019/1021, welche die Vorgaben der Stockholm-Konvention (Stockholm, 2025) über persistente organische Schadstoffe (Persistent Organic Pollutants, POPs) in europäisches Recht umsetzt. Die Stockholm-Konvention verfolgt das Ziel, Herstellung, Verwendung und Freisetzung besonders gefährlicher langlebiger Chemikalien weltweit zu beenden oder auf ein Minimum zu reduzieren. Zu den bislang gelisteten PFAS gehören Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) (Aufnahme 2009), Perfluoroctansäure (PFOA) (2019), Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) (2022) sowie Perfluornonansäure (PFNA) (2023). Für diese Stoffe gelten in der EU weitreichende Verbote hinsichtlich Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung sowie stoffspezifische Konzentrationsgrenzwerte in Erzeugnissen. Für Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) und ihre Salze gilt ein Konzentrationsgrenzwert von 0,025 mg/kg (0,0000025 Gew.-%), wenn diese in Stoffen, Gemischen oder Erzeugnissen vorhanden sind. Für die Summe der Konzentrationen aller PFOS-verwandten Verbindungen gilt ein Konzentrationsgrenzwert von höchstens 1

Neuweger, Britta; Neukirch, Dennis; Siemers, Ulrike; Weis, Norbert, ; Rother, Alica; Siol, Antje; Köhler, Michael (2026): Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) im Hausstaub. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF.
https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/per-und-polyfluorierte-alkylsubstanzen-pfas-im-hausstaub
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 in Bremen
„Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere SVOC“

mg/kg (0,0001 Gew.-%), wenn sie in Stoffen, Gemischen oder Erzeugnissen vorhanden sind. Für Perfluoroctansäure (PFOA) und ihre Salze gilt ebenfalls ein Grenzwert höchstens 0,025 mg/kg (0,0000025 Gew.-%), wenn sie in Stoffen, Gemischen oder Erzeugnissen vorhanden sind. Für die Summe der PFOA-verwandten Verbindungen gilt ein Konzentrationsgrenzwert von 1 mg/kg (0,0001 Gew.%), wenn sie in Stoffen, Gemischen oder Erzeugnissen vorhanden ist. Für einzelne Anwendungen bestehen befristete Ausnahmeregelungen (Verordnung (EU) 2019/1021). Entsprechende Grenzwerte gelten für die Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS), ihre Salze und PFHxS-verwandte Verbindungen.

Ergänzend zur POP-Verordnung werden weitere PFAS im Rahmen der REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 im Anhang XVII reguliert (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2006). Während sich die POP-Verordnung auf international als persistente organische Schadstoffe eingestufte Einzelstoffe konzentriert, ermöglicht die REACH-Verordnung die Beschränkung weiterer PFAS oder ganzer Stoffgruppen auf Grundlage ihres Risikos für Mensch und Umwelt. Zu den derzeit geregelten Stoffgruppen zählen die C9–C14-Perfluorcarbonsäuren (PFCAs) einschließlich ihrer Salze und verwandten Verbindungen. Für diese gelten Konzentrationsgrenzwerte von 25 ppb (0,025 mg/kg) für die Summe der C9–C14-PFCAs und ihrer Salze sowie 260 ppb (0,26 mg/kg) für die Summe der C9–C14-PFCA-verwandten Stoffe. Darüber hinaus wird Perfluorhexansäure (PFHxA) ab Oktober 2026 beschränkt. Hier werden Konzentrationsgrenzwerte von 25 ppb (0,025 mg/kg) für PFHxA und ihre Salze sowie 1000 ppb (1 mg/kg) für PFHxA-verwandte Stoffe in den von der Beschränkung erfassten Anwendungen gelten. Zusätzlich wurden in Rahmen der REACH-Verordnung Beschränkungen für PFAS in Feuerlöschschäumen eingeführt; ab dem 23. Oktober 2030 dürfen Feuerlöschschäumen in einer Konzentration von mindestens 1 mg/l für die Summe aller PFAS weder in Verkehr gebracht noch verwendet werden. Langkettige perfluorierte Carbonsäuren (C9-21 PFCAs), ihre Salze und verwandte Stoffe wurden im Mai 2025 in die Stockholm-Konvention aufgenommen. Die Europäische Kommission bereitet derzeit vor, diese PFAS-Untergruppe in die POP-Verordnung der EU aufzunehmen.

Über die bereits bestehenden stoffspezifischen Beschränkungen hinaus wird derzeit im Rahmen der REACH-Verordnung ein umfassender Beschränkungsvorschlag für die gesamte PFAS-Stoffgruppe geprüft. Der Vorschlag wurde 2023 von den zuständigen Behörden aus Deutschland, Dänemark, den Niederlanden, Norwegen und Schweden bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA) eingereicht (European Chemicals Agency, 2023). Er unterscheidet sich grundlegend von bisherigen Regelungen, da nicht mehr einzelne PFAS oder Stoffgruppen adressiert werden, sondern nahezu alle per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen, unabhängig von ihrer chemischen Struktur. Ziel ist es, Herstellung, Inverkehrbringen und Verwendung von PFAS in der Europäischen Union umfassend zu beschränken und nur dort zeitlich begrenzte Ausnahmen zuzulassen, wo die Verwendung als

gesellschaftlich essenziell angesehen wird und derzeit keine geeigneten Alternativen verfügbar sind.

3. Exposition mit PFAS im Hausstaub

Die Exposition des Menschen gegenüber PFAS erfolgt über verschiedene Umweltmedien und Expositionspfade. Während kontaminiertes Trinkwasser und Lebensmittel lange Zeit als die bedeutendsten Aufnahmequellen angesehen wurden, rücken zunehmend Innenräume als Expositionsquelle in den Fokus der Forschung. Insbesondere die kontinuierliche Freisetzung von PFAS aus Bodenbelägen, Textilien, Elektronik, Baustoffen und anderen Konsumgütern durch Emission oder Abrieb- und Alterungsprozesse kann zur Belastung der Innenraumluft und des Hausstaubs beitragen. Hausstaub fungiert damit nicht nur als Senke persistenter Perfluoralkylsäuren, sondern bildet ein komplexes Reservoir unterschiedlichster PFAS-Klassen einschließlich zahlreicher Vorläuferverbindungen (Della-Puppa et al., 2026, McIntyre et al., 2026).

Dadurch entstehen zusätzliche Aufnahmewege über Inhalation sowie die unbeabsichtigte Aufnahme von Staub (Dust Ingestion), die insbesondere für Kleinkinder aufgrund ihres Hand-Mund-Verhaltens von Bedeutung sind. Ein aktueller Reviewbericht (DeLuca et al., 2022) berichtet, dass 13%, 3%, 7% bzw. 25% der Konzentration von PFOA, PFOS, PFNA bzw. PFHxS im menschlichen Blutserum durch die Exposition mit belastetem Hausstaub erklärt werden können.

Hausstaub wird zudem zunehmend als wichtiger Indikator für die Belastung von Innenräumen mit PFAS betrachtet. Im Gegensatz zu Luftproben integriert Hausstaub Schadstoffeinträge über längere Zeiträume und ermöglicht dadurch eine realistische Abschätzung der langfristigen Exposition. Zahlreiche Untersuchungen konnten sowohl klassische („Legacy“-PFAS) als auch neuere Ersatzstoffe in Hausstaub nachweisen. Die Konzentrationen und Verteilungsmuster variieren dabei erheblich. Aktuelle Studien zeigen zudem, dass sich die Zusammensetzung der im Hausstaub vorkommenden PFAS im Laufe der Zeit verändert und zunehmend neue fluorierte Verbindungen nachgewiesen werden, die bislang nur unzureichend hinsichtlich ihrer Umwelt- und Gesundheitswirkungen untersucht sind.

Während PFOS (Perfluoroctansulfonsäure) und PFOA (Perfluoroctansäure) eher schwerflüchtig und somit in Innenräumen an Stäube und Schwebstäube gebunden sind, weisen Verbindungen wie die Fluortelomeralkohole höhere Flüchtigkeit auf und sind auch in der Gasphase nachweisbar. FTOH können im Körper nach Aufnahme zu PFOS verstoffwechselt werden.

4. Grenzen und Entwicklung der Analytik

Mit dem AGÖF-Geruchsrad wird in der überarbeiteten Fassung ein Instrument zur standardisierten Beschreibung von Geruchscharakteristiken integriert. Es soll die Prüfpersonen dabei unterstützen, Gerüche nachvollziehbar zu benennen und die Quellensuche zu strukturieren.

Die Beschreibung der Geruchsqualität ist insbesondere relevant, da eine reine Intensitäts-angabe keine ausreichende Differenzierung ermöglicht. Ein Geruch kann beispielsweise als erdig, muffig, chemisch, lösemittelartig, rauchig oder körperbezogen/ schweißig wahrgenommen werden. Die standardisierte Verwendung von Geruchsbegriffen kann dazu beitragen, die Kommunikation zwischen Prüfpersonen zu verbessern und die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen vergleichbarer zu machen.

Die Stärke das AGÖF-Geruchsrades liegt darin, dass es auf empirischen Erfahrungen der AGÖF-Institute mit in Innenräumen feststellbaren Geruchsereignissen basiert und nicht auf Literaturrecherchen. Dadurch ermöglicht es eine umfassende Beschreibung innenraumrelevanter Gerüche auch wenn keine für den Geruch verantwortlichen Substanzen chemisch-analytisch nachweisbar sind.

Die Fassung 2026 erweitert zudem die Betrachtung möglicher Geruchsquellen. Neben klassischen bau- und nutzungsbezogenen Quellen werden unter anderem Passivrauch beziehungsweise *third-hand smoke*, Körperemissionen, Reaktionen im Raum (z.B. aus Baustoffemissionen) sowie weitere technische und bauphysikalische Zusammenhänge berücksichtigt. Dadurch wird die Geruchsbewertung stärker in die Gesamtbetrachtung der Innenraumqualität eingebettet.

5. Geruchsschwellen und PD-Wert

Die überarbeitete Fassung enthält ergänzende Informationen zu Geruchsschwellenwerten. Diese erweitern den fachlichen Hintergrund für die Interpretation von Geruchswahrnehmungen. Sie ergänzen die Bewertung der chemischen Analytik, ersetzen jedoch nicht die sensorische Bewertung der konkreten Situation. Geruchsereignissen liegen meist komplexe Stoffgemische zu Grunde, die durch eine Einzelstoffanalytik häufig nicht ausreichend erklärt werden kann.

Geruchsschwellen können grundsätzlich Hinweise darauf geben, ab welcher Konzentration ein Stoff von Personen wahrgenommen werden kann. Zwischen der Wahrnehmbarkeit eines Geruchs und seiner Akzeptanz besteht jedoch kein linearer Zusammenhang. Auch eine geringe Konzentration kann bei einem als unangenehm bewerteten Geruch zu Beschwerden führen, während ein intensiverer Geruch unter bestimmten Bedingungen sogar akzeptiert werden kann.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der präziseren Einbindung des PD-Werts. Die Bewertung über Akzeptanz und Prozentanteil negativ bewertender Personen wird detaillierter beschrieben und durch eine aktualisierte Regressionsbeziehung auf Grundlage einer Vielzahl von Praxisdaten ergänzt. Außerdem wird der Bezug zu Raumluftqualitätsklassen stärker herausgearbeitet (AGÖF-Bewertungskategorien). Damit wird ein Werkzeug zur Bewertung von PD-Werten zur Verfügung gestellt. Die Interpretation von PD-Werten sollte stets unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden Stichprobe, der Prüfbedingungen, der statistischen Unsicherheit und des konkreten Nutzungskontexts erfolgen.

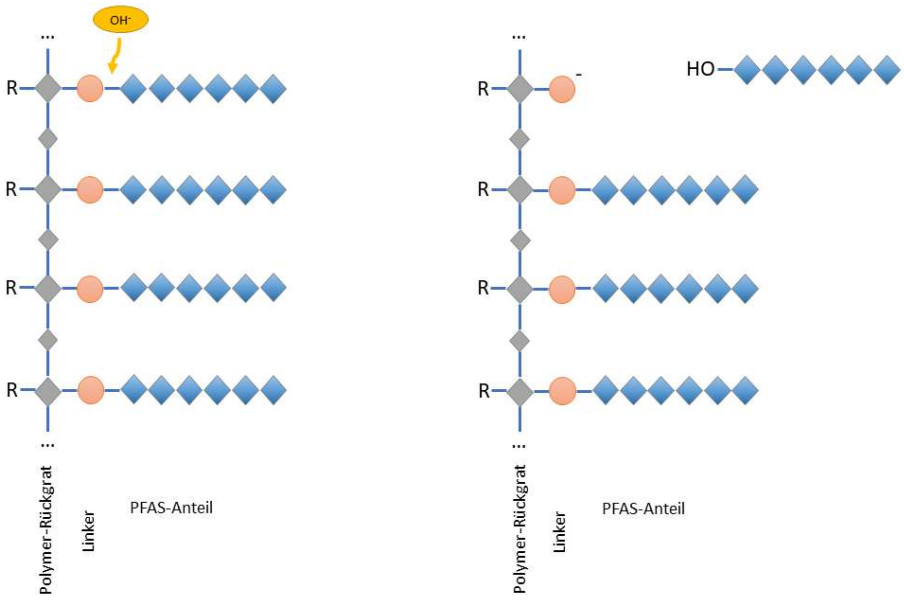


Abbildung 1: Alkalische Hydrolyse von polymergebundenen Seitenketten-PFAS

Für Hausstaubproben liegen bislang jedoch nur wenige Erkenntnisse darüber vor, welchen zusätzlichen Informationsgewinn ein Einsatz dieser Methodik gegenüber den etablierten Extraktionsverfahren bietet und in welchem Umfang sich dadurch die Bewertung der PFAS-Belastung in Innenräumen verändert (Xia et al., 2026).

6. Material und Methoden

Probenahme

Im Rahmen des Forschungsvorhabens UpSI (Umweltpersistente Schadstoffe in Innenräumen, gefördert durch die Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft der Freien Hansestadt Bremen, Laufzeit 2022 - 2024) wurden Hausstaubproben aus privaten Haushalten untersucht (Probenahmezeitraum 2023 – 2024). Die Hausstaubproben wurden von den Bewohnern der Haushalte mittels von ihnen verwendeter Staubsaugerbeutel oder den gesammelten Inhalten der Zyklonkammern bei Zyklonstaubsaugern zur Verfügung gestellt. Die teilnehmenden Haushalte erhielten einen standardisierten Fragebogen zur Erfassung von Angaben zum Wohnumfeld und zu relevanten Haushaltsmerkmalen. Die Teilnehmenden wurden angewiesen, ihre Wohnung während des Probenahmezeitraums einmal pro Woche zu staubsaugen. Insgesamt lagen 53 Proben zur Untersuchung bereit, von denen laut Fragebogen 38 auch tatsächlich auf sogenannte Wochenproben zurückzuführen waren. Bei 15 Hausstäuben schwankten die Angaben zur Häufigkeit des Staubsaugens zwischen 2 - 4 Mal pro Woche. Ferner gab es weitere 6 Stäube, die über einen längeren Zeitraum genommen wurden und von eher unregelmäßigen Staubsaugereinsätzen resultierten. Für die Auswertung in dieser Studie wurden nur die 38 auf Wochenproben zurückzuführenden Stäube verwendet. Die privaten Hausstäube wurden auf die Korngrößenfraktion < 0,63 µm gesiebt und tiefgefroren bis zur Analytik gelagert.

7. Analytik

Analytik in Anlehnung an DIN CEN / TS 15968 (DIN SPEC 1038:2010-11) und DIN EN 17681-1:2025

Im Zuge des UpSI-Projekts erfolgte die Analytik nach der DIN CEN / TS 15968 (DIN SPEC 1038:2010-11) mit reduzierter Einwaage auf ca. 60 mg der 63 µm-Fraktion und zweimaliger Extraktion mit 1,6 ml Methanol. Die Analytik nach DIN EN 17681-1:2025 erfolgte entsprechend den Vorgaben der Norm mit auf 100 mg Einwaage entsprechend reduzierten Extraktionsvolumina. Entscheidend für die Aufbereitung auch sehr geringer Staubmengen war die immer wieder von Mischvorgängen unterbrochene Ultraschall-Extraktion. Dadurch gelang es, die Staubpartikel umzuschichten und so dem Lösemittel immer wieder zugänglich zu machen.

Zur analytischen Bestimmung wurde eine HPLC-MS/MS-Einheit bestehend aus einer Dionex UltiMate 3000-HPLC (Thermo Fisher Scientific, Dreieich, Deutschland) und einem EVOQ Elite (Bruker Daltonics, Bremen, Deutschland) mit einer ESI-Quelle verwendet. Die

chromatografische Trennung der Analyten erfolgt über eine 150 x 2.1 mm Kinetex 2.6 µm C18-Säule (Phenomenex, Aschaffenburg, Deutschland) mittels Gradientenprogramm.

An jedem Messtag wurden fünf Kalibrierpunkte aus arbeitstäglich angesetzten Standardlösungen vermessen. Der auf Linearität geprüfte Bereich beruht auf der vorherigen Erfahrung der Bremer Umweltinstitut GmbH und befindet sich für PFAS bei 0.25 µg/l – 8 µg/l.

Über Schätzung einiger Realproben sowie des Standardfehlers der Kalibrierfunktionen wurde 0,02 mg/kg (0,005 mg/kg für die Substanz PFOA) als Bestimmungsgrenze der DIN CEN / TS 15968 festgelegt, die unter Anwendung der DIN EN 17681 auf 0,01 mg/kg (0,1 mg/kg für FTOH-Verbindungen) reduziert werden konnte.

Beim Umgang mit Realproben im Rahmen des UpSI-Projektes konnte festgestellt werden, dass die Empfindlichkeit des Detektors für die ohnehin komplexeren Analyten PFOSA, Me-FOSE und Et-FOSE zu stark abnimmt. Auf die Darstellung dieser PFAS wurde daher bei der Analytik nach der DIN CEN / TS 15968 (DIN SPEC 1038:2010-11) verzichtet. Bis zur Einführung der DIN EN 17681-1:2025 konnten diese Parameter optimiert werden, sodass sie bei der zweiten Untersuchung auch in Gegenwart der Probenmatrix messbar blieben. Zusätzlich wurden die Analyten 7HPFHpA, 4:2-FTS, 6:2-FTS, 10:2-FTS und 4:2 bis 10:2-FTOH etabliert.

8. Literaturvergleich

Im Rahmen des Forschungsvorhabens UpSI (Umweltpersistente Schadstoffe in Innenräumen) wurde eine umfangreiche Literaturrecherche in internationalen und nationalen wissenschaftlichen Publikationen zum Vorkommen der Targetanalyten im Hausstaub durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass für einige PFAS bereits Datensätze bestehen, wobei die Anzahl der Datensätze je nach Verbindung variiert.
Das Vorgehen der Hausstaubprobenahme und der Probenbearbeitung variierte je nach Quelle stark, so dass eine vergleichende Bewertung der Daten schwierig ist und lediglich Trends zu erkennen sind.
Besonders fiel die Tatsache auf, dass es keinerlei Konvention zu geben scheint, auf welche Partikelgröße der Staub vor der Analyse gesiebt wird. Gustavsson et al. konnten 2022 zeigen, dass die massenbezogene Belastung von Hausstaub mit PFAS abhängig ist von der betrachteten Partikelgröße (Gustavsson et al., 2022). Dieses erschwert eine Vergleichbarkeit der Daten untereinander zusätzlich.

In den Tabellen werden die folgenden Abkürzungen verwendet:

LOD Limit of Detection (Detektionslimit)
LOQ Limit of Quantification (Quantifizierungslimit)
nd nicht detektiert
ng nicht gemessen

Tabelle 1: Literaturdaten zu PFAS im Hausstaub

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
PFBA (CAS-Nr.: 375-22-4)								
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	ng			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	<LOQ	<LOD	23	
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	2	2	7,5	
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,4	0,1	38	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	22,8	3,39	150	100
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	13,5	nd	122	97
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	nd	nd	2,82	33
Tan et al., 2024		Australien	42	125	3,18	1,55	40,5	100
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	3,38	nd	18,3	71
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	nd	nd	2,47	42
PFPA (CAS-Nr.: 2706-90-3)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			226			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		ng			
Kato et al., 2009	2004		10		ng			

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	ng			
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		5			
Karaskova et al., 2016	2013		14		3			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	ng			
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184		ng			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	ng			
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,2	<LOD	1,6	
PFHxA (CAS-Nr.: 307-24-4)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			260			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		54			
Kato et al., 2009	2004		10		ng			
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	ng			
Knobeloch et al., 2012	2008	US	39		0			
Karaskova et al., 2016	2013		14		6,5			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	6,4	< LOD	99	
Hall et al., 2020	2014-2016	US	184		9			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	7	1	42,5	89

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,9	0,3	17	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	2,02	nd	25,6	76
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	3,51	nd	18,2	94
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	nd	nd	6,42	38
Tan et al., 2024		Australien	42	125	3,53	nd	53,3	95
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	5,25	1,07	46,7	100
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	nd	nd	10,2	25
PFHpA (CAS-Nr.: 375-85-9)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			249			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		50			
Kato et al., 2009	2004		10		ng			
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	69	<LOD	1561	
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		17			
Karaskova et al., 2016	2013		14		4			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	2,2	<LOD	95	
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184		9			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	7	1	66	75
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,7	0,1	8	

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	1,34	nd	10,9	72
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	1,69	nd	36,7	67
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	1,1	nd	17,9	67
Tan et al., 2024		Australien	42	125	1,25	nd	35,5	71
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	3,98	nd	36,7	94
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	0,6	nd	3,6	58
PFOA (CAS-Nr.: 335-67-1)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			561			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		142			
Kato et al., 2009	2004		10		95			
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	30	1,9	1390	100
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		44			
Karaskova et al., 2016	2013		14		9			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	9		650	
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184		9			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	7	1	155	
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	3,7	0,9	81	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	11,2	nd	55,7	92
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	32,5	5,14	410	100

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	2,64	nd	12,8	90
Tan et al., 2024		Australien	42	125	17,7	6,12	94	100
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	4,94	1,1	64,8	100
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	2,41	nd	9,21	83
PFNA (CAS-Nr.: 375-95-1)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			99			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		8			
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	Mean: 26	<LOD	680	70
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		12			
Karaskova et al., 2016	2013		14		4			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	3,3	<LOQ	26	100
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184		3			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	6	1	56	75
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,6	0,1	9,9	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	1,49	nd	7,31	88
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	2,52	0,06	28,1	100
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	0,63	nd	2,43	81
Tan et al., 2024		Australien	42	125	4,22	0,99	11,3	100
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	3,31	0,5	49,1	100

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	0,93	nd	5,67	67
PFDA (CAS-Nr.: 335-76-2)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			35			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		7			
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	Mittel-wert: 8,4	<LOD	251	
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		6			
Karaskova et al., 2016	2013		14		1,8			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	3,2	<LOD	100	
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184		6			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	10	5	54,5	
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	1,1	0,2	49	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	1,08	nd	5,48	80
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	3,13	0,62	38,5	100
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	1,91	nd	18,5	90
Tan et al., 2024		Australien	42	125	3,99	1,08	9,12	100
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	2,64	0,69	17,8	100
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	1,02	nd	9,61	58

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
PFUnDA (CAS-Nr.: 2058-94-8)								
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	1	<LOD	22	
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	5,5	5	58	
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,4	0,1	5,5	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	0,67	nd	3,32	72
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	1,34	0,21	17,9	100
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	0,97	nd	11	86
Tan et al., 2024		Australien	42	125	2,41	0,37	7,28	100
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	1,63	nd	12,7	82
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	0,65	nd	3,17	58
PFDoDA (CAS-Nr.: 307-55-1)								
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	<LOQ	<LOD	110	
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	9,5	5	40	29
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,7	0,2	13	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	nd	nd	1,01	40
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	0,98	nd	26,5	75
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	0,62	nd	6,06	76
Tan et al., 2024		Australien	42	125	1,26	nd	15,8	79

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	0,4	nd	7,04	59
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	0,34	nd	1,77	75
PFTrDA (CAS-Nr.: 72629-94-8)								
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	<LOQ	<LOD	9,1	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	nd	nd	0,36	20
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	0,56	nd	9,46	53
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	0,21	nd	2,54	57
Tan et al., 2024		Australien	42	125	nd	nd	3,34	43
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	nd	nd	3,69	29
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	nd	nd	1,24	33
PFTeDA (CAS-Nr.: 376-06-7)								
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	<LOQ	<LOD	56	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	nd	nd	0,31	4
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	0,56	nd	9,46	61
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	nd	nd	0,18	24
Tan et al., 2024		Australien	42	125	0,1	nd	16	67
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	0,85	nd	8,53	88
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	nd	nd	1,81	42

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
PFBS (CAS-Nr.: 375-73-5)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			19 - 130			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		9			
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		2			
Karaskova et al., 2016	2013		14		1			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	<LOQ	<LOD	8,7	
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	2	1	7	36
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,6	0,2	166	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	6,94	nd	72	92
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	2,96	nd	26,6	92
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	0,73	nd	26,1	67
Tan et al., 2024		Australien	42	125	1,1	nd	21,6	90
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	0,55	nd	3,41	65
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	1,52	nd	6,43	75
PFHxS (CAS-Nr.: 355-46-4)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			1440			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		46			

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Kato et al., 2009	2004		10		100			
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		16			
Karaskova et al., 2016	2013		14		9			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	0	<LOD	4	21
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184		2			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	31,9	1	405	79
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,1	<LOD	71	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	0,65	nd	2,33	92
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	1,1	0,2	26,2	100
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	0,81	nd	9,66	81
Tan et al., 2024		Australien	42	125	5,39	0,22	91,2	100
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	3,08	0,31	81,8	100
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	nd	nd	5,68	25
PFHpS (CAS-Nr.: 375-92-8)								
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	<LOQ	<LOD	0,4	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	nd	nd	2,48	20
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	0,6	nd	34,8	94
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	nd	nd	7,68	43
Tan et al., 2024		Australien	42	125	nd	nd	5,98	36

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	nd	nd	5,27	47
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	nd	nd	nd	0
PFOS (CAS-Nr.: 1763-23-1)								
NIST, 2018 and Reiner et al., 2015	1993-1994	U.S.			2310			
Strynar und Lindstrom, 2008	2001- 2002		102		201			
Kato et al., 2009	2004		10		95			
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	71	1,5	4661	100
Knobeloch et al., 2012	2008	U.S.	39		47			
Karaskova et al., 2016	2013		14		14			
Weiss et al., 2021	2013-2014		46	1000	13		220	
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184		4			
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	13	1,5	675	
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	1,3	0,3	32	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	14,1	nd	108	96
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	20,3	4,08	297	100
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	4,91	nd	23	81
Tan et al., 2024		Australien	42	125	19,9	4,43	168	100
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	6,28	0,77	72,7	100
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	4,75	1,14	25,6	100

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
PFNS (CAS-Nr.: 98789-57-2)								
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	2	2	2	4
PFDS (CAS-Nr.: 335-77-3)								
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	3	2	21,5	32
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	<LOQ	<LOD	0,8	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	nd	nd	0,42	12
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	nd	nd	3,03	47
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	nd	nd	0,29	10
Tan et al., 2024		Australien	42	125	1,37	nd	7,88	88
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	1,74	nd	16,3	76
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	nd	nd	nd	0
6:2 FTS (CAS-Nr.: 27619-97-2)								
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,8	0,1	7,2	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	0,68	nd	7,7	56
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	0,72	nd	15,8	56
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	0,32	nd	1,87	52
Tan et al., 2024		Australien	42	125	nd	nd	11,7	40

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	6,75	nd	53,3	82
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	0,92	nd	3,96	67
8:2 FTS (CAS-Nr.: 39108-34-4)								
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	0,8	0,2	51	
Tan et al., 2024		Hongkong	25	125	nd	nd	4,35	32
Tan et al., 2024		Nord China	36	125	nd	nd	3,09	39
Tan et al., 2024		Vietnam	21	125	nd	nd	0,22	48
Tan et al., 2024		Australien	42	125	nd	nd	2,63	36
Tan et al., 2024		U.S.	17	125	nd	nd	19,4	47
Tan et al., 2024		Brasilien	12	125	0,2	nd	1,67	50
Me-FOSA (CAS-Nr.: 31506-32-8)								
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	1,5	0,9	14	
Et-FOSA (CAS-Nr.: 4151-50-2)								
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	0,14	<LOD	73	
PFOSA (CAS-Nr.: 754-91-6)								
Friedle et al., 2023		Süddeutsch-land	36	63	<LOQ	<LOD	0,3	

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Me-FOSE (CAS-Nr.: 24448-09-7)								
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	38	12	1676	
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184	150 oder 500	<LOD	<LOD	7980	19
Winkens et al., 2018	2014-2015	Finnland	65	500	45,8	<LOD	158	43,1
Harrad 2019	2016-2017	Irland	32	500	<LOD	<LOD	42	31
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	25	<LOD	445	36
Et-FOSE (CAS-Nr.: 1691-99-2)								
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	7,1	<LOD	1590	
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184	150 oder 500	<LOD	<LOD	370	15
Winkens et al., 2018	2014-2015	Finnland	65	500	10,1	<LOD	514	56,9
Juhasz et al., 2023		Australien	28	80	78	<LOD	275	14
10:2 FTOH (CAS-Nr.: 865-86-1)								
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	40	5,7	2950	
Winkens et al., 2018	2014-2015	Finnland	65	500	15,8	<LOD	138	64,6
8:2 FTOH (CAS-Nr.: 678-39-7)								

Quelle	Zeitraum der Probe-nahme	Ort	n	Siebung [µm]	Median [ng/g]	Minimum [ng/g]	Maximum [ng/g]	DF
Shoeib et al., 2011	2007-2008	Kanada	140	150	49	<MDL	4830	
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184	150 oder 500	1435		44200	99,5
Winkens et al., 2018	2014-2015	Finnland	65	500	45,7	<LOD	298	80
6:2 FTOH (CAS-Nr.: 647-42-7)								
Hall et al., 2020	2014-2016	U.S.	184	150 oder 500	569		248929	97
Winkens et al., 2018	2014-2015	Finnland	65	500	27,6	<LOD	288	72,3

9.Toxikologische Referenzwerte

Literaturrecherche zur toxikologischen Bewertung der Targets im Innenraummilieu

Um die Relevanz von bestimmten Konzentrationen der UpSI-Substanzliste im Liegestaub in Innenräumen bewerten zu können, wurden toxikologische Kennwerte der Substanzen recherchiert.

Tabelle 2 zeigt die gefundenen toxikologischen Kennwerte für einige Substanzen des Analytenportfolio.

Für die Substanzklasse der PFAS gibt es zwei relevante Summenparameter:

- TWI (tolerable weekly intake): 4,4 ng/kg Körpergewicht pro Woche für die Summe der vier langkettigen Verbindungen PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS (EFSA CONTAM Panel et al., 2020)
- Trinkwasserrichtwert: „Summe PFAS-20“ als Summe von 20 perfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren mit einer Kettenlänge von 4 bis 13 Kohlenstoffatomen mit einem Parameterwert von 0,1 µg/l definiert (Richtlinie (EU) 2020/2184, 2020)

Zurückgerechnet würde dieser Trinkwasserleitwert einem TDI von gerundet 30 ng/(kg*d) für die Summe PFAS-20 bedeuten.

Die Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2023) schreibt vor, dass die gemessenen Konzentrationen der Stoffe einzeln ausgewiesen werden müssen. Aufgrund der Tatsache, dass die toxische Potenz der Einzelstoffe sehr unterschiedlich ist, ist im Einzelfall eine individuelle Bewertung der Einzelkonzentrationen, wenn es die Datenlage erlaubt, hilfreich.

Tabelle 2: Toxikologische Kennwerte für PFAS

Substanz	PFAS-4 (EFSA PFAS)	PFAS-20*	Toxikologische Kennwerte
PFBA (CAS-Nr.: 375-22-4)		*	Das UBA empfiehlt als Trinkwasserleitwert 10000 ng/l (Umweltbundesamt, 2023). Daraus kann ein TDI von 2857 ng/(kg*d) (gerundet 3 µg/(kg*d) zurückgerechnet werden.
PFPA (CAS-Nr.: 2706-90-3)		*	Abgedeckt über Summe PFAS-20* (TrinkwV, 2023)
PFHxA (CAS-Nr.: 307-24-4)		*	Das UBA empfiehlt als Trinkwasserleitwert 6000 ng/l (Umweltbundesamt, 2023). Daraus kann ein TDI von 1714 ng/(kg*d) zurückgerechnet werden.

Substanz	PFAS-4 (EFSA PFAS)	PFAS-20*	Toxikologische Kennwerte
PFHpA (CAS-Nr.: 375-85-9)		*	Das UBA empfiehlt als neuen Trinkwasserleitwert 280 ng/l (Umweltbundesamt, 2023). Daraus kann ein TDI von 80 ng/(kg*d) zurückgerechnet werden.
PFOA (CAS-Nr.: 335-67-1) über Summenparameter	*	*	**PFAS Summenparameter: TWI (tolerable weekly intake): 4,4 ng/kg KG Körpergewicht** pro Woche für die Summe der vier langkettigen Verbindungen PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS (EFSA CONTAM Panel et al., 2020)
PFNA (CAS-Nr.: 375-95-1) über Summenparameter	*	*	**PFAS Summenparameter: TWI (tolerable weekly intake): 4,4 ng/kg KG Körpergewicht** pro Woche für die Summe der vier langkettigen Verbindungen PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS (EFSA CONTAM Panel et al., 2020)
PFDA (CAS-Nr.: 335-76-2)		*	Das UBA leitet eine auf den Menschen bezogene tolerierbare Dosis von 10 ng/(kg*d) ab. (Umweltbundesamt, 2023).
PFUnDA (CAS-Nr.: 2058-94-8)		*	Das UBA leitet eine auf den Menschen bezogene tolerierbare Dosis von 8 ng/(kg*d) ab. (Umweltbundesamt, 2023).
PFDoDA (CAS-Nr.: 307-55-1)		*	Das UBA leitet eine auf den Menschen bezogene tolerierbare Dosis von 8 ng/(kg*d) ab. (Umweltbundesamt, 2023).
PFTrDA (CAS-Nr.: 72629-94-8)		*	Das UBA empfiehlt als Trinkwasserleitwert 1700 ng/l (Umweltbundesamt, 2023). Daraus kann ein TDI von 486 ng/(kg*d) zurückgerechnet werden.
PFTeDA (CAS-Nr.: 376-06-7)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
PF-3,7-DMOA (CAS-Nr.: 172155-07-6)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
HPFO-DA (CAS-Nr.: 13252-13-6)			vorläufiger TDI: 21 ng/(kg*d) (RIVM & RIKILT, 2019) . Subchronische RfD für nicht krebserzeugende Wirkungen 3 × 10−5 mg/(kg*d) (EPA, 2021c) Chronische RfD für nicht krebserzeugende Wirkungen: 3 × 10−6 mg/(kg*Tag) (EPA, 2021c)
4HPFUnA (CAS-Nr.: 34598-33-9)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
PFBS (CAS-Nr.: 375-73-5)		*	Vom UBA wurde eine humanäquivalente Dosis von 1,64 µg/(kg·d) abgeleitet. (Umweltbundesamt, 2023).
PFPS (CAS-NR.: 630402-22-1)			Es existiert ein GOW für Trinkwasser von 2009: GOW: 1,0 µg/L (2009) (Umweltbundesamt, 2016) Diese kann auf einen TDI von 286 ng/(kg*d) zurückgerechnet werden.
PFHxS (CAS-Nr.: 355-46-4)	*	*	**PFAS Summenparameter: TWI (tolerable weekly intake): 4,4 ng/kg KG Körpergewicht** pro Woche für die Summe der vier langkettigen Verbindungen PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS (EFSA CONTAM Panel et al., 2020)
PFHpS (CAS-Nr.: 375-92-8)		*	Es existiert ein GOW für Trinkwasser von 2009: GOW: 0,3 µg/L (2009) (Umweltbundesamt, 2016)

Substanz	PFAS-4 (EFSA PFAS)	PFAS-20*	Toxikologische Kennwerte
			Diese kann auf einen TDI von 86 ng/(kg*d) zurückgerechnet werden. **Abgedeckt über Summe PFAS-20*** (TrinkwV, 2023)
PFOS (CAS-Nr.: 1763-23-1)	*	*	**PFAS Summenparameter: TWI (tolerable weekly intake): 4,4 ng/kg KG Körpergewicht** pro Woche für die Summe der vier langkettigen Verbindungen PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS (EFSA CONTAM Panel et al., 2020)
PFNS (CAS-Nr.: 98789-57-2)	*	*	Die Stoffkonzentration für PFNS sollte aus toxikologischer Sicht als Einzelwert und in Summe mit den Stoffen PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS maximal 20 ng/l (entspricht 4,4 ng/(kg*d) betragen (Umweltbundesamt, 2024). Eine umfangreiche Literaturrecherche von 2023 (Umweltbundesamt, 2023). konnte keinen POD identifizieren, der sich als Ausgangspunkt zur Ableitung eines Trinkwasserleitwerts für PFNS eignen könnte. Andererseits gehören die „Nachbarsubstanzen" PFOS und PFNA zu den „EFSA PFAS", was eine Bewertung über *read-across* nahelegt. Für die Gruppe der EFSA PFAS liegen ausreichend toxikologische Daten vor. Es wird empfohlen, PFNS genauso zu bewerten, wie die Einzelsubstanzen aus der Gruppe der PFAS-4 (siehe 1.). Somit sollte die Stoffkonzentration aus PFNS alleine sowie als Summe der Stoffe PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS („Summe PFAS-4") den Grenzwert in Höhe von 0,000020 mg/l (entspricht 20 ng/l) nicht überschreiten. (Umweltbundesamt, 2024)
PFDoS (CAS-Nr.: 79780-39-5)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
PFDS (CAS-Nr.: 335-77-3)		*	Abgedeckt über Summe PFAS-20* (TrinkwV, 2023)
8:2-FTS (CAS-Nr.: 39108-34-4)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
PFOSA (CAS-Nr.: 754-91-6)			Es existiert ein GOW von 2016: GOW: 0,1 µg/L (Umweltbundesamt, 2016). Dieser würde zurückgerechnet eine TDI von 29 ng/(kg*d) bedeuten.
N-MeFOSA (CAS-Nr.: 31506-32-8)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
N-EtFOSA (CAS-Nr.: 4151-50-2)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
N-MeFOSE (CAS-Nr.: 24448-09-7)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt
N-EtFOSE (CAS-Nr.: 1691-99-2)			kein toxikologischer Referenzwert bekannt

10.Ergebnisse

Untersuchungen von Staubsaugerbeuteln hinsichtlich der Hintergrundbelastung mit den PFAS des UpSI-Analytenportfolio (Blindwert-Beutel)

Im Rahmen des Projekts wurden stichprobenartig vier Vlies-Staubsaugerbeutel und ein Papierstaubsaugerbeutel auf die PFAS des UpSI-Analytenportfolio hin untersucht. Der Staub wird nicht nur in den Staubsaugerbeuteln über meist mehrere Wochen gesammelt, sondern lagert auch bis zur Siebung in diesen. Es sollte ein Einblick gewonnen werden, ob Staubsaugerbeutel mit PFAS belastet sein können, so dass gegebenen falls ein Übergang der Substanzen aus den Beutel in den Staub möglich ist. Es wurden hierfür jeweils ca. 1 g der Vlies-Staubsaugerbeutel bzw. 1,6 g des Papierbeutels aufgeschlossen und mittel LC-MS/MS analysiert. Im Fall des Papierbeutels wurde nur die innere Papierlage, die direkten Kontakt zum Staub hat, eingesetzt. Tabelle 3 zeigt die gefundenen Belastungen der Staubsaugerbeutel mit den PFAS des UpSI-Analytenportfolios.

Tabelle 3: In Staubsaugerbeuteln gefundenen Belastungen mit den Substanzen des UpSI-Analytenportfolios (BG: 0,02 mg/kg, 0,005 mg/kg für PFOA)

	Summe PFAS [mg/kg]	**Summe 4-PFAS [mg/kg]**
Flink u Sauber R040	n.n.	n.n.
Dreame	n.n.	n.n.
Swirl M50	n.n.	n.n.
Rowenta	n.n.	n.n.
Papier-Beutel	**0,26**	**0,08**

Lediglich der Papier-Beutel zeigt eine deutliche Belastung mit verschiedenen PFAS. Dennoch wäre bei weiteren Studien dieser Art jeweils ein Blindwert-Beutel mit jeder eingereichten Probe im Staubsaugerbeutel einzufordern. Unklar ist weiterhin, welche Belastungen aus den Zyklonkammern von handelsüblichen Zyklonstaubsaugern in den Staub übergehen können.

Ergebnisse der Untersuchung der Staubproben aus privaten Haushalten

Im Verlauf des Projekts UpSI konnten 38 Staubproben aus privaten Haushalten, die auf sogenannte Wochenprobenahmen zurückzuführen waren, eingeworben werden. Nachfolgend

sind die statistischen Kenndaten zu den Ergebnissen der PFAS-Konzentrationen in der <63 µm Fraktion des Staubs dargestellt.

Tabelle 4: Dargestellt sind das 90-Perzentil, der Median, das Minimum und das Maximum der Gehalte der entsprechenden Substanzen in der 63 µm-Fraktion von 38 Staubproben aus privaten Haushalten, ebenso dargestellt ist die Detektionsfrequenz (DF) in Prozent, mit der eine bestimmte Substanz detektiert wurde. (BG: 0,02 mg/kg, 0,005 mg/kg für PFOA)

Substanz	90- Perzentil [mg/kg]	Median [mg/kg]	Min. [mg/kg]	Max. [mg/kg]	DF [%]
8:2 FTS (CAS-Nr.: 39108-34-4)	0,04	<B.G.	<B.G.	0,06	39,47
Et-FOSA (CAS-Nr.: 4151-50-2)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0
HPFO-DA (CAS-Nr.: 13252-13-6)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0
Me-FOSA (CAS-Nr.: 31506-32-8)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0,02	2,63
PF-3,7-DMOA (CAS-Nr.: 172155-07-6)	0,04	<B.G.	<B.G.	0,38	10,53
PFBA (CAS-Nr.: 375-22-4)	0,03	<B.G.	<B.G.	0,31	18,42
PFBS (CAS-Nr.: 375-73-5)	0,02	<B.G.	<B.G.	0,09	10,53
PFDA (CAS-Nr.: 335-76-2)	0,01	<B.G.	<B.G.	0,03	7,89
PFDS (CAS-Nr.: 335-77-3)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0
PFDoDA (CAS-Nr.: 307-55-1)	0,03	<B.G.	<B.G.	0,03	23,68
PFDoS (CAS-Nr.: 79780-39-5)	0,02	<B.G.	<B.G.	0,04	34,21
PFHpA (CAS-Nr.: 375-85-9)	0,04	<B.G.	<B.G.	0,10	21,05
PFHpS (CAS-Nr.: 375-92-8)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0,03	5,26
PFHxA (CAS-Nr.: 307-24-4)	0,04	<B.G.	<B.G.	0,09	28,95
PFHxS (CAS-Nr.: 355-46-4)	0,03	<B.G.	<B.G.	0,05	13,16
PFNA (CAS-Nr.: 375-95-1)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0,02	7,89
PFNS (CAS-Nr.: 98789-57-2)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0
PFOA (CAS-Nr.: **335-67-1)**	0,09	0,01	<B.G.	0,52	73,68
PFOS (CAS-Nr.: **1763-23-1)**	0,22	<B.G.	<B.G.	2,12	28,95
PFOSA (CAS-Nr.: 754-91-6)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0,04	2,63

Substanz	90- Perzentil [mg/kg]	Median [mg/kg]	Min. [mg/kg]	Max. [mg/kg]	DF [%]
PFPA (CAS-Nr.: 2706-90-3)	0,02	<B.G.	<B.G.	0,02	10,53
PFPS (CAS-NR.: 630402-22-1)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0,02	2,63
PFTeDA (CAS-Nr.: 376-06-7)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0
PFTrDA (CAS-Nr.: 72629-94-8)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0
PFUnDA (CAS-Nr.: 2058-94-8)	<B.G.	<B.G.	<B.G.	<B.G.	0
PFAS Summe	**0,90**	**0,19**	**0,01**	**4,45**	**100**
4-PFAS Summe	**0,31**	**0,02**	**<B.G.**	**2,71**	**78,95**

Bei Betrachtung der Detektionsfrequenzen DF fällt auf, dass PFAS in dem Großteil der Hausstaubproben nachgewiesen werden können (DF von 85,71 % für den Parameter PFAS-Summe), wenn auch in wechselnden Ausprägungen der Gehalte der Einzelsubstanzen. Eine große Rolle spielen immer noch die Substanzen PFOS (DF von 26,53 %) und PFOA (DF von 63,27 %).

Der Vergleich von verschiedenen Studien zum Thema Schadstoffgehalte im Hausstaub ist schwierig, da die Probenahmebedingungen wenig standardisiert sind. Dennoch wird im Folgenden eine Einordnung in die recherchierten Literaturdaten versucht.

Die im UpSI-Forschungsprojekt gefundenen PFAS-Gehalte finden sich im Großteil im unteren Bereich der ermittelten Literaturwerte wieder, was auch dem Trend von abnehmenden PFAS-Gehalten im Staub über die letzten ca. 30 Jahre mit veröffentlichten Daten entspricht. Diese wird in Abbildung 2 beispielhaft gezeigt für den Median des Gehalts von PFOA im Hausstaub in Abhängigkeit vom Probenahmejahr für die aus der Literatur ermittelten Daten und den in UpSI bestimmten Wert. Im Vergleich zu den Daten des Summenparameters der 4-PFAS, die kürzlich in einer Studie aus Süddeutschland veröffentlicht wurden (Friedle et al., 2023), sind die Daten aus UpSI etwas höher (Median 4-PFAS in UpSI: 0,02 mg/kg, Median 4-PFAS in [28]: 0,0075 mg/kg).

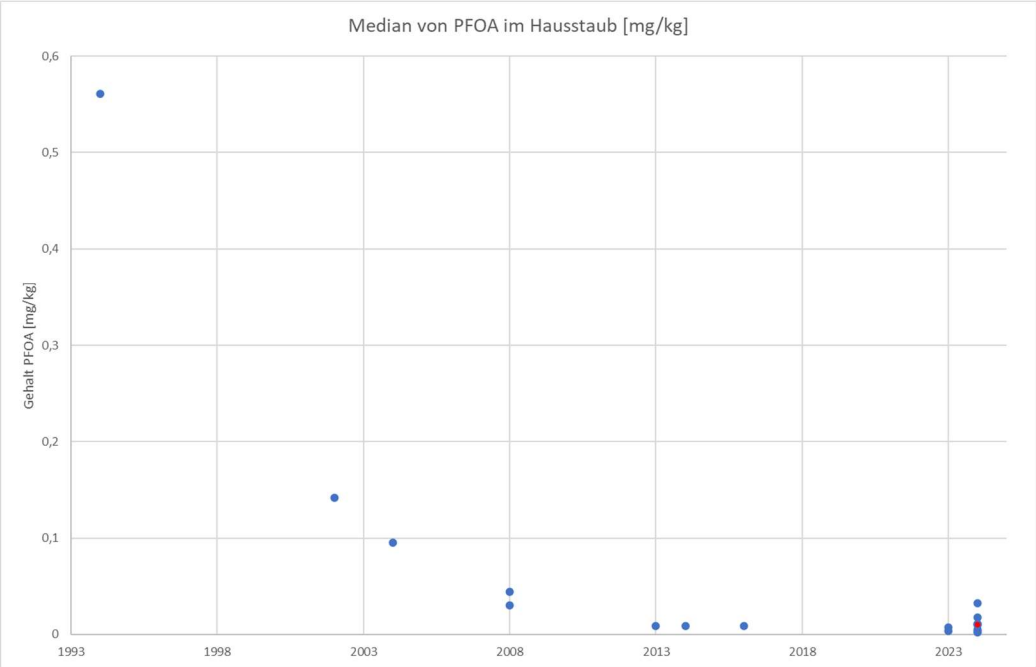


Abbildung 2: Gefundene Median-Gehalte von PFOA im Hausstaub in Veröffentlichungen der letzten 30 Jahre (jeweils angegeben das Probenahmejahr, bei Probenahmen über mehrere Jahre das letzte Probenahmejahr. Bei fehlender Angabe der Probenahmejahre wurde das Veröffentlichungsdatum angegeben). In Rot der in UpSI im Median gefundene Gehalt

Toxikologische Bewertung des Gehalts des UpSI-Analytenportfolio im Hausstaub

Um den Schadstoffgehalt der gefundenen Belastungen im Liegestaub der teilnehmenden Haushalte bewerten zu können, wurde die orale Aufnahme einer Targetsubstanz über den Hausstaub durch ein Kleinkind (in ng pro kg Körpergewicht und Tag) berechnet. Die Standardannahmen sind hierbei ein Körpergewicht von 10 kg und eine Staubaufnahme von 100 mg/Tag. Hiermit wird die Bevölkerungsgruppe mit der höchsten zu erwartenden oralen Aufnahme von Liegestäuben und gleichzeitig auch eine der empfindlicheren Bevölkerungsgruppen betrachtet.

Orale Aufnahme einer Targetsubstanz über den Hausstaub (durch Kleinkind):

- Orale Aufnahme von Hausstaub von Kleinkindern 50 mg/d bis 200 mg/d (BfR & UBA, 2008)
- hier Annahme: 100 mg/d
- Referenzgewicht Kleinkind : 10 kg

D = Konzentration Schadstoff im Liegestaub [mg/kg]

Aufnahme Schadstoff über Hausstaub = 100 mg* D/10 kg

Die tägliche Aufnahme der jeweiligen Substanz wurden jeweils für den Median und für das 90-Perzentil der gefundenen Schadstoffbelastungen in den Staubproben aus privaten Haushalten bestimmt. Diese Aufnahmemengen wurden dann mit den toxikologischen Referenzwerten der Substanzen - soweit vorhanden - verglichen. Tabelle 5 zeigt die prozentuale Aufnahme der Schadsubstanz im Vergleich zum toxikologischen Referenzwert der Substanz für den Median und für das 90-Perzentil der in den Hausstaubproben gefundenen Belastungen.

Tabelle 5: Prozentuale Aufnahme des Schadstoffs im Vergleich zum toxikologischen Referenzwert der Substanz für den Median und für das 90-Perzentil der in den Hausstaubproben (49) gefundenen Belastungen

Substanz	Toxikologischer Referenzwert [ng/kg*d]	tägliche Aufnahme Kleinkind (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des Median) [ng/kg*d]	Prozent vom tox. Referenzwert (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des Median) [%]	tägliche Aufnahme Kleinkind (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des 90-Perzentil) [ng/kg*d]	Prozent vom tox. Referenzwert (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des 90-Perzentil) [%]
PFBA (CAS-Nr.: 375-22-4)	3000,00	0,00	0,00	0,27	0,01
PFBS (CAS-Nr.: 375-73-5)	1640,00	0,00	0,00	0,24	0,01
PFDA (CAS-Nr.: 335-76-2)	10,00	0,00	0,00	0,06	0,63
PFDoDA (CAS-Nr.: 307-55-1)	8,00	0,00	0,00	0,30	3,37
PFHpA (CAS-Nr.: 375-85-9)	80,00	0,00	0,00	0,41	0,51
PFHxA (CAS-Nr.: 307-24-4)	1714,00	0,00	0,00	0,38	0,02

Substanz	Toxikologischer Referenzwert [ng/kg*d]	tägliche Aufnahme Kleinkind (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des Median) [ng/kg*d]	Prozent vom tox. Referenzwert (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des Median) [%]	tägliche Aufnahme Kleinkind (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des 90-Perzentil) [ng/kg*d]	Prozent vom tox. Referenzwert (bei Aufnahme von Hausstaub mit der Belastung des 90-Perzentil) [%]
PFOSA (CAS-Nr.: 754-91-6)	29,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PFPS (CAS-Nr.: 630402-22-1)	286,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PFTrDA (CAS-Nr.: 72629-94-8)	486,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PFUnDA (CAS-Nr.: 2058-94-8)	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00
□ 4-PFAS (□ aus PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS)	**0,63**	**0,17**	**27,59**	**2,04**	**323,68**

Die gefundenen Schadstoffgehalte (sowohl des Medians als auch des 90-Perzentils der Schadstoffgehalte) im Hausstaub können für viele Einzel-PFAS des UpSI-Analytenportfolios im Vergleich zu toxikologischen Kennwerten als unkritisch eingestuft werden (vgl. Tabelle 5). Der im Vergleich zum toxikologischen Referenzwert höchste Schadstoffgehalt findet sich bei der Substanz PFDoDa. Aber auch hier ist nur mit einer täglichen Aufnahme von 3,4 % (beim 90-Perzentils des PFDoDa-Gehalts) vom toxikologischen Referenzwert zu rechnen.

Anders und besorgniserregend stellt sich die Situation im Falle des Summenparameters 4-PFAS aus der Summe der Gehalte von PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS dar. Hier ist für ein Kleinkind mit 10 kg Körpergewicht und einer Staubaufnahme von 100 mg Staub pro Tag eine Aufnahme von 28 % (beim Median des 4-PFAS-Gehalts) bzw. von 324 % (beim 90-Perzentils des 4-PFAS-Gehalts) des toxikologischen Referenzwertes zu erwarten. Die zeigt, dass besonders die Haushalte, die das 90-Perzentil der gefundenen Schadstoffgehalte überschreiten (und in denen eine Quellenemission der Stoffe vermutet wird) eine signifikante Belastung der Bewohner oberhalb des toxikologischen Referenzwertes aufweisen. Doch auch bereits die Belastung des Medianwertes, wo von einer durchschnittlichen

Hintergrundbelastung ausgegangen wird, ist als kritisch zu bewerten. Im Median werden bereits 28 % der tolerierbaren täglichen Aufnahmemenge über den Pfad der Liegestaub-Aufnahme aufgenommen. Es gibt aber noch weitere Belastungspfade über die Nahrung und luftgetragenen Staub und somit ist ein Überschreiten des toxikologischen Referenzwertes insgesamt auch in diesen Fällen wahrscheinlich.

In einer aktuellen Veröffentlichung zu Literaturdaten von PFAS in Hausstäuben gehen Pfeil und Maraun 2025 von einer täglichen Staubaufnahme von 20 mg Hausstaub für einen Erwachsenen aus. Für Kinder gehen sie von einer täglichen Aufnahme von 100 mg Hausstaub aus. Sie definieren für die Zielgruppen Erwachsene und Kinder folgende Hausstaubzielwerte:

- **Hausstaubzielwert I** (Arguk-Vorsorgewert):
- Zielgruppe Kinder: 10 ng/g PFAS-Gehalt im Hausstaub
- Zielgruppe Erwachsene: 100 ng/g PFAS-Gehalt im Hausstaub

Der **Hausstaubzielwert I** wird konservativ abgeschätzt bei Annahme einer 100%igen Resorption des aufgenommenen Staubes und einer 5%igen Ausschöpfung des TWI. Diese niedrige Ausschöpfung des TWI wird besonders vor dem Hintergrund angesetzt, dass nur ein Teil der PFAS analytisch zugänglich ist. Hierbei übertragen die Autoren allerdings den TWI für die Summe aus PFOS, PFOA, PFNA und PFHxS auf den Parameter Gesamt-PFAS-Summe.

Bei Überschreiten des Zielwertes I schlagen Pfeil et Maraun (2025) vor, Raumluftuntersuchungen durchzuführen, um die zusätzliche inhalative Exposition im Objekt zu bestimmen.

- **Hausstaub-Zielwert II** (Arguk-Handlunswert)
- Zielgruppe Kinder: 100 ng/g PFAS-Gehalt im Hausstaub
- Zielgruppe Erwachsene: 1000 ng/g PFAS-Gehalt im Hausstaub

Beide Zielwerte beziehen sich ohne Berücksichtigung des Staubalters allgemein auf Staub. Bei Überschreiten des Zielwertes II in Altstaubproben sollte die Probenahme nach einer gründlichen Abreinigung der Liegestäube von allen Oberflächen als 7-Tage-Probe (von der frei begehbaren Bodenfläche) wiederholt werden. Auch hier wären bei weiterer Überschreitung der Zielwerte Luftuntersuchungen erforderlich. In jedem Fall seien die Reinigungszyklen zu intensivieren und als erste Maßnahme alle Oberflächen bei der Reinigung zu berücksichtigen.

Von den 49 Staubproben aus Privathaushalten (Wochenstäube und nicht-Wochenstäube) würden mit dem Summenwert aller in UpSI betrachteten PFAS 42 Proben den Hausstaubzielwert I für die Zielgruppe Kinder überschreiten. 17 Hausstaubproben würden den Hausstaubzielwert I für die Zielgruppe Erwachsene sowie den Hausstaubzielwert II für die Zielgruppe Kinder überschreiten. Von diesen würde 1 Probe auch den Hausstaubzielwert II für die Zielgruppe Erwachsene überschreiten. Dies ist besonders evident, wenn berücksichtigt wird, dass auch in UpSI nur ein kleiner Ausschnitt der PFAS betrachtet wird.

Ableitung von Orientierungswerten

Für diejenigen PFAS, für die toxikologische Kennwerte vorliegen, leitete das Bremer Umweltinstitut vorläufige Vorsorgewerte für die Konzentration im Hausstaub ab, bei denen einen 10%ige Ausschöpfung (in Anlehnung an Nietner et al. (o.D)) der tolerierbaren täglichen Aufnahmemenge über den Weg der oralen Aufnahme von Liegestaub erfolgt (jeweils für die Zielgruppe Kleinkinder, hier mit durchschnittlich 10 kg Gewicht und 100 mg orale Staubaufnahme pro Tag gerechnet, und die Zielgruppe Erwachsene, hier mit durchschnittlich 70 kg Gewicht und 20 mg orale Staubaufnahme pro Tag gerechnet). Diese sind in Tabelle 6 dargestellt.

Für den Großteil der untersuchten PFAS liegt der Wert des 90-Perzentils unter dem toxikologisch abgeleiteten vorläufigen Vorsorgewert. Das heißt, dass für diese Substanzen auch die Auffälligkeits-Werte toxikologisch nicht bedenklich sind. Dies ist **nicht** der Fall für den Summenparameter 4-PFAS-Summe (Summe aus PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS). Hier sind auch die Auffälligkeitswerte auch als toxikologisch relevant zu bewerten.

Tabelle 6: Toxikologisch abgeleitete vorläufige Vorsorgewerte für einzelne, in UpSI untersuchte Substanzen

Substanz	Vorläufiger Vorsorgewert Zielgruppe Kinder [mg/kg]	Vorläufiger Vorsorgewert Zielgruppe Erwachsene [mg/kg]
PFBA (CAS-Nr.: 375-22-4)	30	1050
PFBS (CAS-Nr.: 375-73-5)	16,4	574
PFDA (CAS-Nr.: 335-76-2)	0,1	3,5
PFDoDA (CAS-Nr.: 307-55-1)	0,08	2,8
PFHpA (CAS-Nr.: 375-85-9)	0,8	28
PFHxA (CAS-Nr.: 307-24-4)	17,14	599,9
PFPS (CAS-Nr.: 630402-22-1)	2,86	100,1
PFTrDA (CAS-Nr.: 72629-94-8)	4,86	170,1
PFUnDA (CAS-Nr.: 2058-94-8)	0,08	2,8
4-PFAS-Summe (Summe aus PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS)	**0,0063**	**0,2**

Aus Gründen der Gesundheitsvorsorge empfiehlt die Bremer Umweltinstitut GmbH bei einer Überschreitung des folgenden **vorläufigen Orientierungswertes**

0,1 mg/kg (100 ng/g) für 4-PFAS-Summe (Summe aus den Gehalten von PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS)

die Schadstoff-Quellen im beprobten Haushalt zu eruieren und zu entfernen (Universität Bremen, 2024).

Weiterhin empfiehlt das Bremer Umweltinstitut, die Reinigungszyklen zu intensivieren und als erste Maßnahme alle Oberflächen bei der Reinigung zu berücksichtigen und hier feucht Staub zu wischen.

Ergebnisse des Vergleichs der Staubanalytik nach DIN CEN / TS 15968 (DIN SPEC 1038:2010-11) mit der Analytik nach DIN EN 17681-1:2025-6 (mit alkalischer Hydrolyse)

Tabelle 7: PFAS-Gehalte von 8 Staubproben aus dem Forschungsprojekt UpSI, jeweils bestimmt mit Analytik in Anlehnung an DIN CEN/TS 15968 (DIN SPEC 1038:2010-11) mit methanolischem Extrakt (BG: 0,02 mg/kg, 0,005 mg/kg für PFOA) und bestimmt mit Analytik gemäß DIN EN 17681-1:2025-06 mit alkalischer Hydrolyse (BG: 0,01 mg/kg, 0,1 mg/kg für FTOH-Verbindungen)

Substanz und CAS-Nummer	F515-116 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-116 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-166 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-166 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-115 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-115 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-130 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-130 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-196 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-196 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-226 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-226 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-234 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-234 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-251 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-251 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse
PFBA 375-22-4	< BG	< BG	< BG	< BG	0,04	< BG	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPA 2706-90-3	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxA 307-24-4	0,02	< BG	0,03	< BG	0,03	< BG	0,02	< BG	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHpA 375-85-9	0,02	< BG	0,03	0,01	0,02	< BG	< BG	< BG	0,03	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOA 335-67-1	0,07	0,10	0,06	0,08	0,01	< BG	0,01	< BG	0,04	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFNA 375-95-1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFDA 335-76-2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFUnDA 2058-94-8	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFDoDA 307-55-1	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFTrDA 72629-94-8	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFTeDA 376-06-7	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
HFPO-DA 13252-13-6	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
7HPFHpA 1546-95-8	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	0,05	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG
PF-3,7-DMOA	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,01	< BG	0,01	0,06	0,01	0,38	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG

Substanz und CAS-Nummer	F515-116 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-116 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-166 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-166 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-115 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-115 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-130 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-130 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-196 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-196 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-226 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-226 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-234 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-234 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-251 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-251 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse
172155-07-6																
PFBS 375-73-5	< BG	< BG	< BG	< BG	0,02	0,02	< BG	< BG	< BG	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFPS 630402-22-1	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHxS 355-46-4	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,03	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFHpS 375-92-8	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFOS 1763-23-1	0,19	0,21	0,07	0,06	< BG	< BG	< BG	< BG	0,05	0,02	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFNS 98789-57-2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFDS 335-77-3	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
PFDoS 79780-39-5	0,02	< BG	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	0,01	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG
4:2 FTS 757124-72-4	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG
6:2 FTS 27619-97-2	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	0,01
8:2 FTS 39108-34-4	< BG	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,04	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
10:2 FTS 120226-60-0	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG
PFOSA 754-91-6	nicht bestimmt	0,01	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	0,01	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG
Me-FOSA 31506-32-8	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Et-FOSA 4151-50-2	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	0,01	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Me-FOSE 24448-09-7	nicht bestimm-bar	4,79	nicht bestimm-bar	3,09	nicht bestimm-bar	0,05	nicht bestimm-bar	0,02	nicht bestimm-bar	0,28	nicht bestimm-bar	0,02	nicht bestimm-bar	0,02	nicht bestimm-bar	0,01
Et-FOSE 1691-99-2	nicht bestimm-bar	0,09	nicht bestimm-bar	0,76	nicht bestimm-bar	0,02	nicht bestimm-bar	0,03	nicht bestimm-bar	0,03	nicht bestimm-bar	< BG	nicht bestimm-bar	0,01	nicht bestimm-bar	< BG

Substanz und CAS-Nummer	F515-116 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-116 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-166 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-166 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-115 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-115 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-130 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-130 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-196 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-196 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-226 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-226 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-234 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-234 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse	F515-251 Gehalt [mg/kg] MeOH	F515-251 Gehalt [mg/kg] Hydrolyse
4:2 FTOH* 2043-47-2	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG	nicht bestimmt	< BG
6:2 FTOH* 647-42-7	nicht bestimmt	0,58	nicht bestimmt	0,86	nicht bestimmt	3,08	nicht bestimmt	0,81	nicht bestimmt	1,85	nicht bestimmt	1,68	nicht bestimmt	1,58	nicht bestimmt	0,52
8:2 FTOH* 678-39-7	nicht bestimmt	2,34	nicht bestimmt	2,50	nicht bestimmt	10,03	nicht bestimmt	1,74	nicht bestimmt	3,83	nicht bestimmt	1,81	nicht bestimmt	5,40	nicht bestimmt	4,28
10:2 FTOH* 865-86-1	nicht bestimmt	0,88	nicht bestimmt	0,90	nicht bestimmt	3,25	nicht bestimmt	0,46	nicht bestimmt	1,28	nicht bestimmt	0,29	nicht bestimmt	1,35	nicht bestimmt	1,02
Summe 4PFAS	0,26	0,31	0,13	0,14	0,01	0,01	0,01	< BG	0,09	0,04	0,03	< BG	< BG	< BG	< BG	< BG
Summe PFAS	0,32	9,02	0,21	8,31	0,14	16,52	0,13	3,08	0,23	7,35	0,41	3,82	< BG	8,36	< BG	5,84

* jeweils frei vorliegende FTOHs und aus hydrolysierbaren Precursorn freigesetzte FTOHs

Der Vergleich der in den Staubproben mittels der beiden Analysenverfahren bestimmten PFAS-Gehalte zeigt, dass für die älteren („Legacy“-)PFAS beide Methoden durchweg vergleichbare Ergebnisse liefern. Demgegenüber werden mit der neuen Analytik zusätzliche Analyten, insbesondere Fluortelomeralkohole (FTOHs), die aus hydrolysierbaren Precursorn, wie Polymeren und Acrylaten freigesetzt werden können, erfasst. Deren Gehalte liegen häufig deutlich über denen der Legacy-PFAS. Demzufolge ist auch die Gesamtsumme der erfassten PFAS bei allen Proben deutlich erhöht (teilweise um mehr als eine bis zu zwei 10er-Potenzen). Die neu darstellbaren Verbindungen stellen bekannte Vorläufersubstanzen dar, die durch biotische und abiotische Transformationsprozesse zu persistenten Perfluoralkylsäuren abgebaut werden können. Ebenfalls waren MeFOSE und EtFOSE nun im Analytenportfolio enthalten, die in der ersten Untersuchung der Staubproben nicht bestimmt wurden. Auch diese beiden Analyten konnten in der zweiten Untersuchung der Staubproben in der Mehrzahl der Proben nachgewiesen werden. Während MeFOSE und EtFOSE überwiegend zu Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) transformiert werden (Mejia-Avendaño et Liu, 2015, McGarr et al., 2023), sind FTOHs Vorläufer verschiedener Perfluorcarbonsäuren (PFCAs), darunter Perfluoroctansäure (PFOA), Perfluornonansäure (PFNA) und Perfluorhexansäure (PFHxA) (Liu et al., 2013, McGarr et al., 2023). Die Ergebnisse sind bemerkenswert da Me-FOSE und Et-FOSE als PFOS-Vorläufer in der EU seit 2010 über die POP-Verordnung reguliert sind (Verordnung (EU) 2019/1021). Als PFOS-verwandte Stoffe unterliegen sie einem weitgehenden Verbot der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung. Es ist aber auch aus der Literatur bekannt, dass MeFOSE und EtFOSE in höheren Konzentrationen im Staub aus Innenräumen vorkommen (Della-Puppa et al., 2026). MeFOSE wurde hauptsächlich für Oberflächenbehandlungen verwendet (z.B. von Teppichen, Polstern, Textilien), während EtFOSE für Papier und Verpackungen eingesetzt wurde (Olsen et al., 2005). Im Gegensatz zu Me-FOSE und Et-FOSE unterliegen FTOHs derzeit keiner allgemeinen Regulierung im Rahmen der EU-POP-Verordnung. Sie werden voraussichtlich von der geplanten umfassenden PFAS-Beschränkung nach REACH erfasst werden. FTOHs werden in der Textilausrüstung genutzt, beispielsweise in Outdoortextilien und Heimtextilien (Liu et al., 2015, Eichler et al., 2024), aber auch in Papieren und Kartons mit Lebensmittelkontakt eingesetzt. Ebenso können sie auch als Verunreinigungen in Beschichtungen mit anderen Perfluorchemikalien enthalten sein (Bundesinstitut für Risikobewertung [BfR], 2005).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine herkömmliche Analytik, die sich nur auf wenige Legacy-PFAS bezieht, nicht ausreichend ist, um die tatsächliche Belastung von Staubproben mit PFAS adäquat zu erfassen. Diese können auch nicht als „Leitsubstanzen“ der gesamten Gruppe genutzt werden, von deren Gehalt auf die Gesamtbelastung an PFAS geschlossen werden darf, da das Einsatzmuster der Substanzen variiert. Gleichzeitig wird klar, dass eine Regulierung, die sich auf einzelne, bereits etablierte PFAS beschränkt, die tatsächliche

Belastung und das potenzielle Umwelt- und Gesundheitsrisiko nicht ausreichend einschränken kann. Vor diesem Hintergrund erscheint eine gruppenbezogene Regulierung der PFAS sinnvoll, um auch Vorläufersubstanzen und bislang nicht routinemäßig erfasste Verbindungen einzubeziehen, die durch Transformationsprozesse zur Belastung mit persistenten Perfluoralkylsäuren beitragen können. Beispielhaft wurde für die Probe F515-116 eine Aufnahme von 90 ng/d*kg der Gesamtsumme der durch die Analytik erfassten PFAS durch Staubaufnahme durch ein Kleinkind berechnet. Dieses unterstreicht die Relevanz der PFAS-Precursor und polymergebundenen PFAS im Hausstaub und macht deutlich, dass eine toxikologische Bewertung der PFAS-Precursor notwendig ist.

10. Fazit

Aufgrund der nahezu unveränderten Werte für die „Legacy“-PFAS weist der Methodenvergleich zunächst auf keine Belastung hin, die unmittelbar nur mittels Hydrolyse bestimmt werden kann. Zudem konnte bei einer Lagerungsdauer der Staubproben von ca. 3 Jahren keine signifikanten Verluste beobachtet werden. Durch die Erweiterung des Analysenportfolios ist die Quelle der zusätzlich detektierten PFAS unbekannt, die Bedeutung von SFP oder ähnlichen Quellen hydrolysierbarer PFAS kann nicht ausgeschlossen oder bestätigt werden. Die neue Analytik nach DIN EN 17681-1:2025-06 stellt insofern einen Fortschritt dar, dass insbesondere auch relevante Vorläuferverbindungen und bislang schwer zugängliche PFAS-Fraktionen berücksichtigt werden. Sie kann jedoch ebenso nicht als vollständige Erfassung sämtlicher im Hausstaub vorhandener PFAS-Verbindungen verstanden werden. Auch mit der neuen Analytik nach DIN EN 17681-1:2025-06 bleiben nicht identifizierte organische Fluorverbindungen sowie möglicherweise weitere gebundene PFAS unberücksichtigt. Eine Analytik mittels des TOP-Ansatzes oder eine Kombination mit Fluor-Summenparametern wie Extractable Organic Fluor (EOF) oder TOF (Total Organic Fluor) könnte deshalb dazu beitragen, die verbleibende analytische Lücke besser zu schließen (Göckener et al., 2021).

Für die Bewertung der Innenraumbelastung ergibt sich daraus die Notwendigkeit, die Analytik zukünftig stärker an der gesamten PFAS-Stoffgruppe bzw. an aktuell häufig eingesetzten Verbindungen auszurichten und nicht ausschließlich an einzelnen bekannten Legacy-Verbindungen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass verschiedene Vorläufersubstanzen in der Umwelt oder im Organismus zu persistenten Perfluoralkylsäuren transformiert werden können. Die Ergebnisse des Methodenvergleichs zeigen auch eine regulatorische Relevanz: Eine ausschließlich auf einzelne bereits regulierte PFAS ausgerichtete Betrachtung greift angesichts der Vielzahl potenziell relevanter Vorläufer- und Ersatzstoffe zu kurz.

Die im Rahmen der Untersuchung abgeleiteten vorläufigen Vorsorge- und Orientierungswerte für den Summenparameter 4-PFAS-Summe (Summe aus PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS) stellen einen ersten Ansatz für die vorsorgeorientierte Bewertung von PFAS im Hausstaub dar. Aufgrund der Vielzahl an PFAS-Verbindungen, der teilweise hohen Summenkonzentrationen bei zugleich variierenden Substanzmustern sowie der bislang unvollständigen toxikologischen Datenlage zu zahlreichen PFAS-Vorläuferverbindungen sind diese Werte jedoch nicht ausreichend, um die Belastung mit der gesamten PFAS-Substanzklasse umfassend und vorsorgeorientiert zu bewerten. Hier sieht die Bremer Umweltinstitut GmbH weiteren Forschungsbedarf

Neuweger, Britta; Neukirch, Dennis; Siemers, Ulrike; Weis, Norbert, ; Rother, Alica; Siol, Antje; Köhler, Michael (2026): Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) im Hausstaub. Beitrag zum 14. Fachkongress 2026, Bremen, 25.09.2026. Hrsg. AGÖF.
https://www.agoef.de/veranstaltungen/fachkongresse/14-fachkongress-2026/per-und-polyfluorierte-alkylsubstanzen-pfas-im-hausstaub
Beitrag zum 14. AGÖF-Fachkongress am 24. und 25. September 2026 in Bremen
„Umwelt, Gebäude & Gesundheit: Gerüche, Asbest, PCB und weitere SVOC“

Literatur

Baran, J. J. (2001). Fluorinated surfactants and repellents: Second edition, revised and expanded. Surfactant Science Series, volume 97. By Erik Kissa (Consultant, Wilmington, DE). Marcel Dekker: New York. 2001. 616 pp. ISBN 0-8247-0472-X. Journal of the American Chemical Society, 123, 8882–8882.

Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., de Voogt, P., Jensen, A. A., Kannan, K., Mabury, S. A., & van Leeuwen, S. P. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. Integrated Environmental Assessment and Management, 7(4), 513–541. https://doi.org/10.1002/ieam.258

Bundesinstitut für Risikobewertung, & Umweltbundesamt. (2008, 5. Februar). Aktualisierte gemeinsame Stellungnahme Nr. 032/2008 des UBA und des BfR: BfR und UBA empfehlen, den Einsatz von Organozinnverbindungen in Verbraucherprodukten weiter zu begrenzen.

Bundesinstitut für Risikobewertung. (2005, 27. Oktober). Perfluorchemikalien in Papieren und Kartons für Lebensmittelverpackungen: Gesundheitliche Bewertung Nr. 049/2005. https://www.bfr.bund.de/cm/343/perfluorchemikalien_in_papieren_und_kartons_fuer_lebensmittelverpackungen.pdf

Butt, C. M., Berger, U., Bossi, R., & Tomy, G. T. (2010). Levels and trends of poly- and perfluorinated compounds in the Arctic environment. Science of the Total Environment, 408(15), 2936–2965. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.015

DeLuca, N. M., Minucci, J. M., Mullikin, A., Slover, R., & Cohen Hubal, E. A. (2022). Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review. Environment International, 162, 107149. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107149

Della-Puppa, A., Douard, M., & Nicolas, M. (2026). Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) contamination of indoor air and dust: A review of the literature on concentrations and sources. Atmospheric Environment, 377, 122057. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2026.122057

Deutsches Institut für Normung e. V. (2010). DIN CEN/TS 15968:2010-11; DIN SPEC 1038:2010-11: Bestimmung von extrahierbarem Perfluoroctansulfonat (PFOS) in beschichteten und imprägnierten Feststoffartikeln, Flüssigkeiten und Feuerlöschschäumen – Verfahren zur Probenahme, Extraktion und Analyse mittels LC-qMS oder LC-tandem/MS. Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e. V. (2025). DIN EN 17681-1:2025-06: Textilien und textile Erzeugnisse – Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) – Teil 1: Untersuchung eines alkalischen Extraktes mittels Flüssigkeitschromatographie und Tandem-Massenspektrometrie. Beuth Verlag.

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (EFSA CONTAM Panel), Schrenk, D., Bignami, M., Bodin, L., Chipman, J. K., Del Mazo, J., Grasl-Kraupp, B., Hogstrand, C., Hoogenboom, L. R., Leblanc, J. C., Nebbia, C. S., Nielsen, E., Ntzani, E., Petersen, A., Sand, S., Vleminckx, C., Wallace, H., Barregård, L., Ceccatelli, S., … Schwerdtle, T. (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal, 18(9), e06223. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223

Eichler, C. M. A., Davern, M. J., Surratt, J. D., Morrison, G. C., & Turpin, B. J. (2024). Fluorotelomer alcohol (FTOH) emission rates from new and old rain jackets to air determined by iodide high-resolution chemical ionization mass spectrometry. Indoor Environments, 1(4), 100055. https://doi.org/10.1016/j.indenv.2024.100055

European Chemicals Agency. (2023). Annex XV restriction report: Proposal for a restriction on per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Submitted by Germany, Denmark, the Netherlands, Norway and Sweden under Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH). ECHA.

Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union. (2006). Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 91/155/EWG des Rates sowie der Richtlinien 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission (konsolidierte Fassung vom 11.05.2026). Europäische Union.

Friedle, A., Nitsopoulos, A., Thumulla, J., & Kroczek, C. (2023). PFAS – Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen in Innenräumen: Pre-Studie zur Untersuchung von Hausstaub und luftgetragenem Staub. Beitrag zur Fachtagung „30. WaBoLu-Innenraumtage“, Berlin.

Göckener, B., Fliedner, A., Rüdel, H., Fettig, I., & Koschorreck, J. (2021). Exploring unknown per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment – The total oxidizable precursor assay as helpful tool in research and regulation. Science of the Total Environment, 782, 146825. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146825

Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C. A., Trier, X., & Wang, Z. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). Environmental Science: Processes & Impacts, 22(12), 2345–2373. https://doi.org/10.1039/D0EM00291G

Gustafsson, Å., Bergman, Å., & Weiss, J. (2022). Estimated daily intake of per- and polyfluoroalkyl substances related to different particle size fractions of house dust. Chemosphere, 303, 135061. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135061

Hall, S. M., Patton, S., Petreas, M., Zhang, S., Phillips, A. L., Hoffman, K., & Stapleton, H. M. (2020). Per- and polyfluoroalkyl substances in dust collected from residential homes and fire stations in North America. Environmental Science & Technology, 54(22), 14558–14567. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04869

Juhasz, A. L., Keith, A., Jones, R., & Kastury, F. (2023). Impact of precursors and bioaccessibility on childhood PFAS exposure from house dust. Science of the Total Environment, 889, 164306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164306

Karásková, P., Venier, M., Melymuk, L., Bečanová, J., Vojta, Š., Prokeš, R., Diamond, M. L., & Klánová, J. (2016). Perfluorinated alkyl substances (PFASs) in household dust in Central Europe and North America. Environment International, 94, 315–324. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.031

Kato, K., Calafat, A. M., & Needham, L. L. (2009). Polyfluoroalkyl chemicals in house dust. Environmental Research, 109(5), 518–523. https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.01.005

Kissa, E. (1994). Fluorinated surfactants: Synthesis, properties, applications. Marcel Dekker, Inc., 469 p.

Knobeloch, L., Imm, P., & Anderson, H. (2012). Perfluoroalkyl chemicals in vacuum cleaner dust from 39 Wisconsin homes. Chemosphere, 88(7), 779–783. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.082

Liu, J., & Mejia Avendaño, S. (2013). Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: A review. Environment International, 61, 98–114. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.08.022

Liu, X., Guo, Z., Folk, E. E., IV, & Roache, N. F. (2015). Determination of fluorotelomer alcohols in selected consumer products and preliminary investigation of their fate in the indoor environment. Chemosphere, 129, 81–86. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.012

McGarr, J. T., Mbonimpa, E. G., McAvoy, D. C., & Soltanian, M. R. (2023). Fate and transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) at aqueous film forming foam (AFFF) discharge sites: A review. Soil Systems, 7(2), 53. https://doi.org/10.3390/soilsystems7020053

McIntyre, A. M., Udesky, J. O., Korfmacher, K. S., Xia, C., Capozzi, S. L., Venier, M., Ohayon, J. L., Schaider, L. A., & Dodson, R. E. (2026). Understudied PFAS precursors dominate household dust: Insights from a pilot study in Rochester, NY. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 36(3), 504–510. https://doi.org/10.1038/s41370-026-00841-2

Avendaño, S. M., & Liu, J. (2015). Production of PFOS from aerobic soil biotransformation of two perfluoroalkyl sulfonamide derivatives. Chemosphere, 119, 1084–1090. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.059

Muir, D., Bossi, R., Carlsson, P., Evans, M., De Silva, A., Halsall, C., Rauert, C., Herzke, D., Hung, H., Letcher, R., Rigét, F., & Roos, A. (2019). Levels and trends of poly- and perfluoroalkyl substances in the Arctic environment – An update. Emerging Contaminants, 5, 240–271. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.06.002

National Institute of Standards and Technology. (2018). Standard Reference Material® 2585 certificate of analysis: Organic contaminants in house dust.

Nietner, T., Fellbach, D., Breitling-Utzmann, C., Bauer, N., Heinz, M., Perz, R., & Kramer, S. (2024). Bisphenol A in Trinkwasser aus Hausinstallationen nach Sanierung mit Epoxidharzbeschichtung. Vom Wasser, 122(1), 9–11. https://doi.org/10.1002/vomw.202400002

Olsen, G. W., Huang, H.-Y., Helzlsouer, K. J., Hansen, K. J., Butenhoff, J. L., & Mandel, J. H. (2005). Historical comparison of perfluorooctanesulfonate, perfluorooctanoate, and other fluorochemicals in human blood. Environmental Health Perspectives, 113(5), 539–545. https://doi.org/10.1289/ehp.7544

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021). Reconciling terminology of the universe of per- and polyfluoroalkyl substances: Recommendations and practical guidance. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/e458e796-en

Pfeil, S., & Maraun, W. (2025). Literaturstudie zu PFAS im Innenraum: Expositionsabschätzung gegenüber Hausstaub und Raumluft sowie deren Bewertung. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 85(1–2), 13–27. https://doi.org/10.37544/0949-8036-2025-01-02-15

Rao, N. S., & Baker, B. E. (1994). Textile finishes and fluorosurfactants. In R. E. Banks, B. E. Smart, & J. C. Tatlow (Eds.), Organofluorine chemistry (pp. 379–394). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1202-2_15

Reiner, J. L., Blaine, A. C., Higgins, C. P., Huset, C., Jenkins, T. M., Kwadijk, C. J., Lange, C. C., Muir, D. C., Reagen, W. K., Rich, C., Small, J. M., Strynar, M. J., Washington, J. W., Yoo, H., & Keller, J. M. (2015). Polyfluorinated substances in abiotic standard reference materials. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 407(11), 2975–2983. https://doi.org/10.1007/s00216-013-7330-2

RIVM & RIKILT. (2019). Annex to BuRO advice on chemical substances PFOA and GenX in food—Risk assessment.

Russell, M., Berti, W., Szostek, B., & Buck, R. (2008). Investigation of the biodegradation potential of a fluoroacrylate polymer product in aerobic soils. Environmental Science & Technology, 42, 800–807. https://doi.org/10.1021/es0710499

Schultes, L., Vestergren, R., Volkova, K., Westberg, E., Jacobson, T., & Benskin, J. P. (2018). Per- and polyfluoroalkyl substances and fluorine mass balance in cosmetic products from the Swedish market: Implications for environmental emissions and human exposure. Environmental Science: Processes & Impacts, 20(12), 1680–1690. https://doi.org/10.1039/C8EM00368H

Secretariat of the Stockholm Convention. (2025). Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs): Text and annexes (revised in 2025). United Nations Environment Programme.

Shoeib, M., Harner, T., Webster, G. M., & Lee, S. C. (2011). Indoor sources of poly- and perfluorinated compounds (PFCs) in Vancouver, Kanada: Implications for human exposure. Environmental Science & Technology, 45(19), 7999–8005. https://doi.org/10.1021/es103562v

Smart, B. E. (1994). Characteristics of C–F systems. In R. E. Banks, B. E. Smart, & J. C. Tatlow (Eds.), Organofluorine chemistry (pp. 57–88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1202-2_3

Strynar, M. J., & Lindstrom, A. B. (2008). Perfluorinated compounds in house dust from Ohio and North Carolina, USA. Environmental Science & Technology, 42(10), 3751–3756. https://doi.org/10.1021/es7032058

Sunderland, E. M., Hu, X. C., Dassuncao, C., Tokranov, A. K., Wagner, C. C., & Allen, J. G. (2019). A review of the pathways of human exposure to poly- and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 29, 131–147. https://doi.org/10.1038/s41370-018-0094-1

Tan, H., Tang, S., Yang, L., Li, J., Deng, Y., Shen, H., Dai, Q., Gao, Y., Wu, P., Zhu, L., & Cai, Z. (2024). Global quantification of emerging and legacy per- and polyfluoroalkyl substances in indoor dust: Levels, profiles and human exposure. Science of the Total Environment, 927, 172132. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172132

Trinkwasserverordnung (TrinkwV) vom 20. Juni 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 159, S. 2). (2023).

Umweltbundesamt. (2016). Bewertung der Konzentrationen von PFC im Trinkwasser – Wertebegründungen. Umweltbundesamt – PDF

Umweltbundesamt. (2023). Literaturrecherche und Auswertung vorhandener toxikologischer Daten als Grundlage zur Ableitung von Trinkwasserleitwerten für PFAS – Abschlussbericht (UBA-Texte 2023/128).

Umweltbundesamt. (2024). Bewertung der PFAS-20 aus der Trinkwasserverordnung: Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission. Umweltbundesamt – PDF

Universität Bremen. (2024). UpSI: Umweltbelastungen mit persistenten Substanzen im Innenraum. Universität Bremen – UpSI

U.S. Environmental Protection Agency. (2021c). Human health toxicity values for hexafluoropropylene oxide (HFPO) dimer acid and its ammonium salt (CASRN 13252-13-6 and CASRN 62037-80-3).

Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (ABl. L 169 vom 25. Juni 2019, S. 45), zuletzt geändert durch Verordnung (EU) 2025/2457 vom 26. November 2025 (ABl. L, 2025/2457, 12.12.2025). (2019).

Wang, Z., Cousins, I. T., Scheringer, M., & Hungerbühler, K. (2013). Fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl carboxylic acids (PFCAs), perfluoroalkane sulfonic acids (PFSAs) and their potential environmental impacts. Environment International, 60, 242–248.

Weiss, J. M., Jones, B., Koekkoek, J., Bignert, A., & Lamoree, M. H. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in Swedish household dust and exposure of pet cats. Environmental Science and Pollution Research, 28(29), 39001–39013. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13343-5

Winkens, K., Giovanoulis, G., Koponen, J., Vestergren, R., Berger, U., Karvonen, A. M., Pekkanen, J., Kiviranta, H., & Cousins, I. T. (2018). Perfluoroalkyl acids and their precursors in floor dust of children's bedrooms – Implications for indoor exposure. Environment International, 119, 493–502. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.009

Wu, Y., Romanak, K., Bruton, T., Blum, A., & Venier, M. (2020). Per- and polyfluoroalkyl substances in paired dust and carpets from childcare centers. Chemosphere, 251, 126771. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126771

Xia, C., Stubbings, W. A., Nguyen, L. V., Romanak, K., Jantunen, L., Melymuk, L., Arrandale, V., Diamond, M. L., & Venier, M. (2026). Per- and polyfluoroalkyl substances in e-waste dust. Environmental Science: Processes & Impacts, 28(6), 1684–1691. https://doi.org/10.1039/D5EM01075F

Young, A. S., Pickard, H. M., Sunderland, E. M., & Allen, J. G. (2022). Organic fluorine as an indicator of per- and polyfluoroalkyl substances in dust from buildings with healthier versus conventional materials. Environmental Science & Technology, 56(23), 17090–17099. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05198

Zheng, G., Boor, B. E., Schreder, E., & Salamova, A. (2020). Indoor exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the childcare environment. Environmental Pollution, 258, 113714. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113714