

PFAS – ein Problem auch in Innenräumen

Jörg Thumulla, Dr. Carmen Kroczek, Athanasios Nitsopoulos Albrecht Friedle,

Jörg Thumulla, AnBUS e.V., Mathildenstraße 48, 90762 Fürth, 0911/815166-10,

Dr. Carmen Kroczek, anbus analytik GmbH, 90762 Fürth, 0911/815166-13,

Athanasios Nitsopoulos, Labor Friedle GmbH, 93105 Tegernheim, 09403/967 98-0,

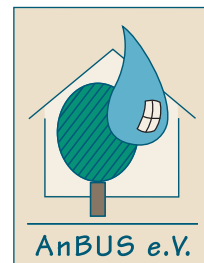
Albrecht Friedle, Labor Friedle GmbH, 93105 Tegernheim, 09403/967 98-0,

Fürth 2025

AnBUS e.V

Mathildenstraße 48

90762 Fürth



**Analyse und
Bewertung von
UmweltSchadstoffen e.V.**

Mathildenstraße 48
90762 Fürth
Tel. 0911 / 77 07 62
Fax 0911 / 77 07 64
www.anbus.de
email@anbus.de

Amtsgericht Fürth
VR-Nr. 1056
USt-IdNr. DE178475810

Mediatorin, Moderatorin,
Konfliktvermittlung
mit Schwerpunkt
Gebäude und Umwelt:
Sabine Weber-Thumulla, M.A.

Von der IHK Nürnberg für
Mittelfranken öffentlich
bestellte und vereidigte
Sachverständige für:

Schadstoffe und Gerüche
in Innenräumen:
Jörg Thumulla,
Diplom-Chemiker

Schimmelpilze und andere
Innenraumschadstoffe:
Dr. rer. nat. Carmen Kroczek,
Diplom-Biologin

AnBUS ist Mitglied in der
Arbeitsgemeinschaft
ökologischer
Forschungsinstitute (AGÖF).
Vom Finanzamt Fürth ist
AnBUS als gemeinnützig
anerkannt. Spenden sind
steuerabzugsfähig.

Inhalt

PFAS – ein Problem auch in Innenräumen	1
1. PFAS.....	4
1.1 Was sind PFAS?.....	4
1.2 Einsatz von PFAS.....	4
1.3 Verwendung in Gebäuden	5
1.3.1 Beschichtungen.....	5
1.3.2 Holz.....	5
1.3.3 Teppiche, elastische und harte Böden	5
1.3.4 Oberflächenversiegelungen	5
1.3.5 Klebstoffe	6
2. Toxikologie von PFAS.....	6
2.1 Wirkungen	6
2.2 Akzeptierbare / tolerierbare Aufnahmemenge	6
2.3 Regulierung.....	7
3. Literaturübersicht.....	8
3.1 PFAS in Innenräumen	8
3.2 Haus- und Liegestaub als Indikator für die inkorporale Belastung für mittel- bis schwerflüchtige Stoffe.....	8
4. Pre-Studie zur Untersuchung von Hausstaub und luftgetragenem Staub.....	9
4.1 Motivation.....	9
4.2 Studiendesign.....	10
4.2.1 Auswahl der Untersuchungsobjekte.....	10
4.2.2 Räumliche Verteilung der Untersuchungsobjekte	10
4.2.3 Dokumentation von Gebäude- und Nutzungsparametern.....	11
4.3 Untersuchungsmedien	12
4.3.1 Liegestäube.....	12
4.3.2 Raumluftuntersuchungen; Luftgetragener Feinstaubes	13
4.4 Analytische Methoden.....	13
4.5 Untersuchungsumfang.....	13
4.6 Qualitätssicherung und Absicherung der Blindwerte	14
5. Ergebnisse	15
5.1 Liegestäube/ Hausstaub	15
5.1.1 Identifikation von innenraumrelevanten PFAS und Perzentile.....	15
5.1.2 Konzentrationsverteilung von PFAS im Hausstaub.....	16
5.2 Korrelation der Summenkonzentration Indikator-PFAS mit den Gesamtgehalten	16
5.3 Raumluft: luftgetragener Feinstaub.....	17
5.3.1 Identifikation von innenraumrelevanten PFAS und Perzentile.....	17
5.3.2 Konzentrationsverteilung von PFAS im luftgetragenen Liegestaub	18
5.4 Korrelation zwischen den Gehalten der Liegestäube (Hausstaub) und dem einatembaren Feinstaub	19
6. Bewertung der PFAS-Gehalte in Liege- und einatembaren Feinstäuben.....	21

6.1 Vergleich mit den Beurteilungsmaßstäben anderer Umweltmedien	21
6.1.1 Grenzwerte: tierische Lebensmittel.....	21
6.1.2 Richtwerte für pflanzliche Lebensmittel	21
6.2 Bodenkontamination.....	22
6.3 Toxikologische Bewertung	23
6.3.1 Über den einatembaren Staub aufgenommene Körperdosis	23
6.3.2 Über Liegestäube aufgenommene Körperdosis	24
7. Fazit und Ausblick	26
8. Literatur.....	26

1. PFAS

1.1 Was sind PFAS?

Der Begriff PFAS ist die Abkürzung für Per- und Polyfluorierte Alkylsubstanzen und definiert fluorierte Stoffe, die mindestens ein vollständig fluoriertes Methyl- oder Methylen-Kohlenstoffatom (ohne daran gebundene H/Cl/Br/I-Atome) enthalten (OECD 2021). Es sind über 10.000 Vertreter bekannt. Für PFAS gibt es keine natürlichen Quellen. Als POP-Stoffe (Persistent Organic Pollutants) haben sie eine hohe thermische und chemische Stabilität. Sie sind umweltsensibel und reichern sich dadurch in der Nahrungskette an (Bioakkumulation).

Die EPA hat 2021 für die Gruppe der PFAS folgende systematische Einteilung festgelegt:

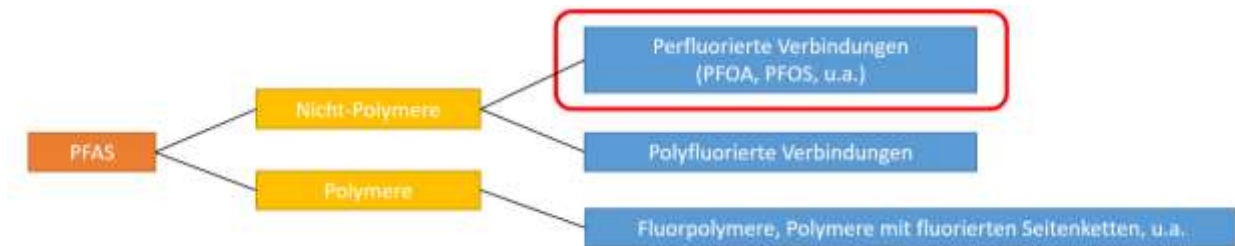


Abbildung 1: Systematische Einteilung PFAS, (EPA, 2021)

Für die nicht polymeren PFAS sind zwei Leitsubstanzen definiert:

die Perfluorooctansäure (PFOA) und die PFOS (Perfluorooctansulfonsäure),

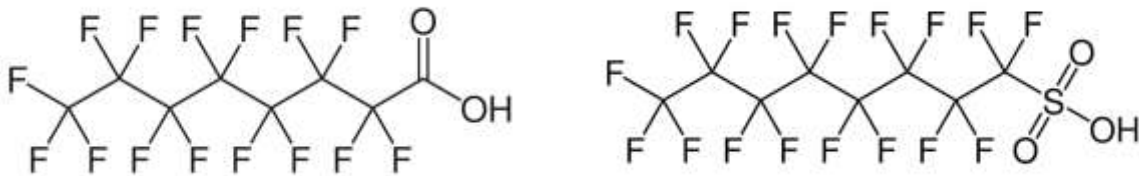


Abbildung 2: PFOA und PFOS (Strukturformeln Wikipedia,2025)

1.2 Einsatz von PFAS

Seit den 1930er Jahren werden PFAS hergestellt. Die großtechnische Produktion begann in den 1950er Jahren.

PFAS sind Tenside mit oberflächenaktiven Eigenschaften:

- hydrophil,
 - hydrophob,
 - lipophil,
 - lipophob
- ➔ PFAS weisen neben Wasser auch Öl, Fette und Schmutzpartikel ab

Aufgrund dieser technisch sehr positiven Eigenschaften fanden und finden sie Einsatz in der Baustoff-, Textil-, Papier-, Teppich-, Lederindustrie, in Feuerlöschern, Reinigern und Polituren. Bekannteste Vertreter sind Teflon® und GoreTex®.

1.3 Verwendung in Gebäuden

Nach einer Veröffentlichung des amerikanischen Green Science Policy Institute im April 2021¹ [1] erfolgte der Einsatz von PFAS, einschließlich großer Fluorpolymere, in einer Vielzahl von Baumaterialien, insbesondere Beschichtungen:

1.3.1 Beschichtungen

PFAS werden für folgende Funktionen in Beschichtungen eingesetzt:

- **Farben:** Fluorierte Additive (sowohl polymere als auch nicht-polymere) können in Epoxid-, Öl-, Alkyd- und Acrylfarben verwendet werden, um bestimmte Oberflächen und Haltbarkeitsanforderungen zu erreichen. PFAS senken die Oberflächenspannung der Farbe, was ein gleichmäßiges Fließen, Verteilen, eine glänzende Oberfläche, Antihafwirkung, Graffiti-Schutz, Schmutz- und Fleckenbeständigkeit, Öl- und Wasserabweisung sowie Korrosionsschutz bewirken.
- PFAS werden auch in Farben als **Bindemittel** verwendet, die Bestandteile der Farbe miteinander verbinden oder dabei helfen, den Untergrund zu imprägnieren, um Blasenbildung und Ablättern zu verringern.
- **Beschichtung von Metalldächern:** Fluorpolymerbeschichtungen schützen Metall vor Kratzern, Farbverlust und Korrosion.
- **Bitumenbeschichtungen.**

1.3.2 Holz

PFAS werden **Holzlacken und Versiegelungen** als Benetzungsmittel und zur Verbesserung der Öl- und Wasserabweisung sowie Fleckenbeständigkeit zugesetzt. Sie können auch in Versiegelungen verwendet werden, um die Dimensionsstabilität von Holz zu erhöhen und als **Mattierungsmittel** in werkseitig aufgetragenen Oberflächen für Holzprodukte, insbesondere Möbel.

1.3.3 Teppiche, elastische und harte Böden

Bei **Bodenbelägen** finden PFAS weite Anwendung:

- PFAS werden in großem Umfang als Flecken-, Schmutz-, und Wasserabweiser in Teppichen und Läufern verwendet.
- PFAS werden während des Faserherstellungsprozesses, während der Herstellung der Teppiche selbst oder als Nachbehandlung auf Teppiche und Läufer aufgebracht.
- Im Zusammenhang mit elastischen und harten Bodenbelägen finden sich PFAS in nachträglich auf den Markt gebrachten Bodenschutzmitteln, Oberflächenbehandlungen, Wachsen und Polituren.

1.3.4 Oberflächenversiegelungen

Fluorierte Dichtungsmittel werden verwendet, um bei **Fugen-, Fliesen- und Betonversiegelungen** eine fett- und wasserabweisende Barriere zu schaffen, die Baumaterialien vor Flecken, Schimmel und physischen Schäden schützt:

- Mit Dichtungsmassen werden Lücken und Spalten gefüllt, um eine wasserdichte Abdichtung zu erzielen.
- Poröse Materialien, wie Stein, Fugenmörtel, unglasierte Fliesen und Beton werden häufig mit einem Versiegelungsmittel oder Lack behandelt, um eine glatte, wasserfeste Schutzbarriere zu schaffen. Versiegelungsmittel werden routinemäßig in Innenräumen verwendet, darunter Stein-, Fliesen- oder Betonböden.
- Versiegelungsmittel werden auch in Außenbereichen verwendet, darunter Terrassen, Treppen, Fundamente und Parkhäuser.

1.3.5 Klebstoffe

PFAS werden **Klebstoffen** zugesetzt, um die Stärke der Verbindung zu erhöhen, mit der Materialien zusammengeklebt werden. Es gibt zwei Mechanismen für diese erhöhte Haftung. Einer davon ist, dass PFAS das Eindringen von Klebstoffen in ihre Substrate verbessern. Ein weiterer Grund ist, dass sie die Benetzbarkeit des Klebstoffs erhöhen, was eine größere Ausbreitung und eine größere Kontaktfläche zwischen dem Klebstoff und den zu verklebenden Materialien ermöglicht.

2. Toxikologie von PFAS

2.1 Wirkungen

PFAS weisen überwiegend chronische Wirkungen auf. Die Tatsache, dass PFAS chemisch nicht sehr reaktiv sind, bedeutet nicht, dass PFAS nicht toxisch sind. PFAS haben keinen einzelnen Wirkmechanismus, der herausstechen würde, sondern interferieren an vielen verschiedenen Stellen mit körpereigenen Prozessen. Sie bewirken u.a. Leber- und Nierenschädigungen, auch Nieren- und Hodenkrebs, Störungen des Fettstoffwechsels, vermindertes Geburtsgewicht, verminderte Spermienzahlen, verminderte Immunantworten nach Impfungen, und weitere Schädigungen. PFOA und PFOS wurden von der International Agency for Research on Cancer (IARC) als krebserregend beim Menschen (PFOA) und möglicherweise krebserregend beim Menschen (PFOS) eingestuft. Da die Exposition gegenüber PFAS langfristig ist, bilden sich viele dieser Krankheitsbilder dann auch tatsächlich aus. Einige PFAS (so z.B. PFOA und PFOS) haben Aufenthaltszeiten im menschlichen Körper von Jahren; aber auch bei PFAS, die schneller wieder ausgeschieden werden, führt die dauerhafte „Nachlieferung“ von PFAS zu chronischer Exposition.^{vii}

2.2 Akzeptierbare / tolerierbare Aufnahmemenge

Im Jahr 2008 wurden erste erlaubte Tagesdosen (ADI)-Werte für PFO und PFOS festgesetzt. Diese wurden 2018 auf tolerierbare wöchentliche Tagesdosen umgestellt und deutlich abgesenkt. Dabei waren erhöhte Cholesterinspiegel als schwerwiegendste Wirkung zugrunde gelegt worden.ⁱⁱ

Im September 2020 hat die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) eine Neubewertung der gesundheitlichen Risiken durch PFAS veröffentlicht. Dabei wurden neben PFOA und PFOS weitere PFAS, die Perfluorononansäure (PFNA) und die Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) in die Expositionsschätzung und die gesundheitliche Bewertung einbezogen.ⁱⁱⁱ Maßgeblich waren die Ergebnisse von Studien, die auf die verminderte Immunantwort auf Impfungen bei Exponierten und damit auf eine Wirkung bestimmter PFAS auf das Immunsystem hinweisen. Dabei sind Kleinkinder und andere Kinder

der höchsten Exposition ausgesetzt, was hauptsächlich auf die Exposition während der Schwangerschaft und Stillzeit zurückgeführt wird.

Als Ergebnis wurde eine tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (TWI) in Höhe von 4,4 Nanogramm (ng) pro Kilogramm (kg) Körpergewicht pro Woche für die Summe dieser vier PFAS (PFOA, PFNA, PFHxS, PFOS), abgeleitet.

Damit haben sich die akzeptierbaren / tolerierbaren Aufnahmemengen mit dem wissenschaftlichen Fortschritt innerhalb von 12 Jahren um drei Größenordnungen reduziert.

Tabelle 1: Absenkung der akzeptierbare / tolerierbare Aufnahmemengen mit dem wissenschaftlichen Fortschritt

Jahr	Tox. Kenngröße *	PFOA [ng/kg Körpergewicht]	PFOS [ng/kg Körpergewicht]	Σ (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS) [ng/kg Körpergewicht]
2008	ADI	1.500	150	
2018	TWI	6	13	
2020	TWI			4,4

Faktor 2386

Dioxine und dl-PCB: TWI (EFSA = Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit) = 0,002 ng/kg KG
 ADI = Acceptable Daily Intake
 TWI = Tolerable Weekly Intake

2.3 Regulierung

Die Regulierung von PFAS auf EU- sowie internationaler Ebene reicht lange zurück bis zur Mitte der 2000er-Jahre und wurde seitdem kontinuierlich ausgedehnt und weiterentwickelt. Dies geschah in der EU durch ein Zusammenspiel der EU REACH-Verordnung (Verordnung (EG) Nummer 1907/2006) und der EU-POP-Verordnung (Persistent Organic Pollutants, Verordnung (EU) 2019/1021) in der Umsetzung der Stockholmer Übereinkommen für die globale Ebene.^{iv}

Die Verwendung von PFOS ist bereits seit 2006 und die Verwendung von PFOA seit Juli 2020 weitgehend verboten.

Bislang wurden nur diejenigen PFAS reguliert, die in den höchsten Konzentrationen in der Umwelt nachgewiesen wurden und deren Auswirkungen auf die Umwelt oder die menschliche Gesundheit nach dem damaligen Kenntnisstand begründet werden konnten. Diese Vorgehensweise hat jedoch in der Vergangenheit dazu geführt, dass die regulierten PFAS teilweise durch andere, noch nicht regulierte PFAS ersetzt wurden. Über deren gefährliche Eigenschaften lagen weniger umfangreiche oder keine Informationen vor und ihre Regelungsbedürftigkeit war daher zunächst unklar. Ein Beispiel hierfür ist der Ersatz von PFOA durch das zuvor unbekannte "GenX" (Ammoniumsalz von Hexafluorpropylenoxid-Dimersäurefluorid).^{iv}

Am 7. Februar 2023 hat die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) den Vorschlag für eine umfassende Regulierung/ Beschränkung der Herstellung, der Verwendung und des Inverkehrbringens (einschließlich der Einfuhr) der gesamten Gruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) veröffentlicht.^{v, vi}

Für viele Anwendungen von PFAS gibt es (z.T. schon seit langer Zeit) fluorfreie Alternativen, beispielsweise für Imprägnierungen von Nahrungsmittelverpackungen, Textilien, Teppichen, Leder, Metallen, Kochgeschirr, für Schmiermittel, Körperpflegeprodukte und Kosmetik, Reinigungsmittel, Kühlmittel und Wärmeüberträger, Skiwachs, Feuerlöschschäume. Bei den wichtigen Komponenten

elektrischer Geräte für die Energiewende, wie Brennstoffzellen und Batterien, sind Alternativen zu PFAS in der Entwicklung und z.T. auch bereits verfügbar.^{vii}

Die aktuelle deutsche Bundesregierung lehnt ein Totalverbot ganzer chemischer Stoffgruppen, wie Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS), ab. Forschung und Entwicklung von Alternativstoffen sollen forciert werden. Nur wo bereits der Einsatz von gleichwertigen Alternativen möglich ist, sollen PFAS zeitnah ersetzt werden.^{viii}

3. Literaturübersicht

3.1 PFAS in Innenräumen

Die Exposition des Menschen gegenüber PFAS wurde bisher in erster Linie auf kontaminierte Lebensmittel und Trinkwasser zurückgeführt. PFAS wurden bisher im Boden, im Grundwasser, im Leitungswasser und im Human-Biomonitoring (HBM) untersucht.

Expositionen gegenüber typischen Innenraummedien wie der Raumluft und dem Hausstaub wurden bisher nur wenig betrachtet. Übersichten über die wenigen Studien über das Vorkommen von PFAS im Hausstaub und in der Raumluft zeigen Deluca et al. (2022)^{ix}, T. Savvaides et al. (2021)^x und S. Pfeil und W. Maraun (2024)^{xi}. Laut Pfeil und Maraun (2024) lagen bisher keine Daten zur partikulären Luftbelastung der Raumluft vor.

3.2 Haus- und Liegestaub als Indikator für die inkorporale Belastung für mittel- bis schwerflüchtige Stoffe

Hausstaub ist ein Sammelbecken für mittel- bis schwerflüchtige Stoffe und hat damit für diese Substanzen in Innenräumen eine wichtige Indikatorfunktion. Unter ungünstigen Bedingungen kann Hausstaub auch eine Quelle für die korporale Belastung mit diesen Stoffen z.B. über den inhalativen oder den oralen (bei kleineren Kindern) Aufnahmepfad darstellen. Auch wenn der Aufnahmemechanismus noch nicht genau quantifizierbar ist, konnten solche Effekte in Forschungsvorhaben nachgewiesen werden.^{xii}

So konnte im Rahmen der Pilotstudie GerES IV festgestellt werden, dass die Exposition von Kindern gegenüber Pyrethroiden u.a. durch die Verwendung von Bioziden in Innenräumen zu Hause beeinflusst wird. Dabei konnte eine signifikante Korrelation zwischen Permethrin im Hausstaub und den Metabolitenkonzentrationen im Urin beobachtet werden. Daher scheint es wahrscheinlich, dass die Aufnahme von Hausstaub zur Exposition von Kindern beiträgt.^{xiii}

In Thumulla et al. (2025)^{xiv} werden weitere Studien dargestellt, die eine Korrelation zwischen den Gehalten an mittel- bis schwerflüchtige Stoffe in Haus- oder Liegestäube und inkorporaler Belastung oder gesundheitlicher Effekte zeigen:

- Die Metastudie von Lanphear et al. (1998)^{xv} umfasst 18 epidemiologische Studien zur Korrelation von Blei im Hausstaub und im Blutserum von Kindern, davon wurden 12 Studien als auswertbar erachtet. Dabei wurde ein starker Zusammenhang zwischen erhöhten Leveln von Blei im Staub und Blut gefunden. Der Aufnahmeweg wird dabei durch Hand zu Mund Aktivität bei Kindern postuliert. Es wurde keine einheitliche Methodik der Staubprobenahme angewandt.
- Stapleton et al. (2012) untersuchen PBDE (PolyBromierteDiphenylEther) in Wischproben von Oberflächen, Hausstaubproben von Innenräumen und korrelieren den Gehalt mit den Blutgehalten

der Bewohner*innen. Es wurde eine Korrelation zwischen dem Penta-BDE im Staub / auf den Wischtüchern und im Blut gefunden. Eine Aufnahme von PBDE`s durch Hand zu Mund Aktivität wird aufgrund der Korrelation als wahrscheinlich eingestuft. Die Studie umfasste n = 83 Kinder aus variablen Haushalten in North Carolina USA.

- Karlsson et al. (2007) haben sich in einer Studie mit der Frage nach einer Korrelation zwischen den Gehalten an BDE (BromierteDiphenylEther) in Staub, Luft und Blutplasma in Schweden anhand von 5 Haushalten befasst. Dabei wurde ein Zusammenhang zwischen der BDE-Summe im Hausstaub und im Blutplasma wurde gefunden. Es wurde kein Zusammenhang bezüglich der Hauseigenschaften wie Bodenmaterial und Nutzung von elektrischen Geräten gefunden.

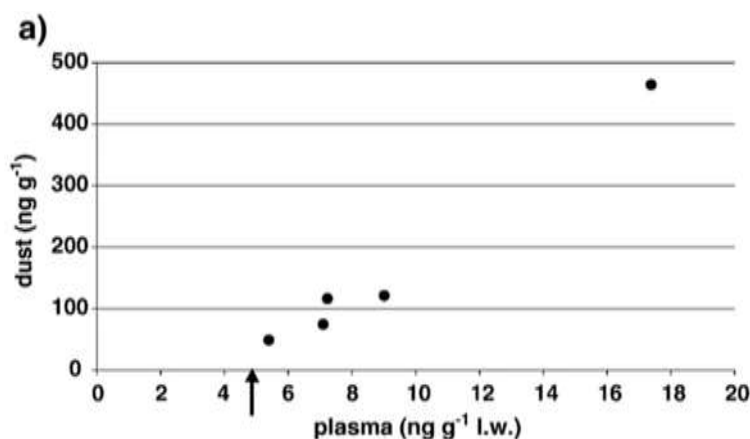


Abbildung 3: Korrelation zwischen Hausstaubgehalt und Blutplasmagehalt (zit. nach Karlsson et al. (2007))

- Johnson et al. (2013) haben einen möglichen Zusammenhang zwischen der Exposition durch bromierte Flammschutzmittel (PolyBromierteDiphenylEther, PDBE) im Hausstaub und dem Hormonhaushalt von Männern untersucht. Dabei wurden Hinweise auf eine Korrelation zwischen der Staubkonzentration von PBDE`s in Innenräumen und einem veränderten Hormonvorkommen bei Männern gefunden. Die Studiengröße betrug n = 38 (n = 62 bei PentaBDE). Die Probanden wurden aus Paaren, welche wegen Unfruchtbarkeit in Behandlung waren, ausgewählt.
- Das BfR und UBA empfehlen 2008, den Einsatz von Organozinnverbindungen in Verbraucherprodukten weiter zu begrenzen^{xvi}. Über eine Expositionsabschätzung wurde festgestellt, dass die Ausschöpfung des TDI durch die Aufnahme eines Kleinkindes im typischen (=mittleren) Fall mit 2 % als gering anzusetzen ist.. Bei worst case-Annahmen wird der TDI jedoch zu 78 % ausgeschöpft. Die Aufnahme von Hausstaub kann bei Kleinkindern daher zu einer hohen Auslastung des TDI führen.

4. Pre-Studie zur Untersuchung von Hausstaub und luftgetragendem Staub

4.1 Motivation

Um weitere Informationen über die Exposition gegenüber PFAS in Innenräumen und ihre Relevanz zu erhalten haben wir 2023 eine Pre-Studie zur Untersuchung von Hausstaub und luftgetragendem Staub gestartet. Die Probenahmen fanden im Mai 2023 statt.

Die Ziele der Pre-Studie waren:

- die Etablierung der PFAS-Analytik mittels HPLC-MS/MS im Hausstaub im ppt-Ultraspurenbereich zur Erfassung der Hintergrundkonzentration.
- Identifikation von innenraumrelevanten PFAS
- Informationen zur Konzentrationsverteilung von PFAS im Hausstaub und luftgetragenen Staub
- Vergleich der in Haushalten vorgefundenen Konzentrationen mit anderen Umweltmedien
- Abschätzung der Exposition und Vergleich mit aktuellen toxikologischen Kenngrößen.

4.2 Studiendesign

Die Finanzierung erfolgte aus Eigenmitteln der Projektpartner ohne Fremdmittel. Beprobte wurden 40 Proben in 36 Haushalten.

4.2.1 Auswahl der Untersuchungsobjekte

Teilweise wurden in Einfamilienhäusern Erdgeschosse und Obergeschosse getrennt beprobt. Bei der Auswahl der untersuchten Haushalte wurde versucht, einen breiten Querschnitt zu erfassen:

- Stadt $\leftarrow \rightarrow$ Land
- Einfamilienhäuser $\leftarrow \rightarrow$ Mehrfamilienhäuser
- Altbauten $\leftarrow \rightarrow$ Neubauten
- Breiter Altersquerschnitt
- Kinderzahl und Alter

Tabelle 2: Zusammensetzung der untersuchten Objekte

Bauweise		Gebäudeart	
Massiv	81%	EFH	31%
Holzständer	9%	MFH	44%
Holz massiv	3%	DHH	3%
Beton	3%	RH	22%
unbekannt	3%		
Alter der Bewohner		Baujahr	
<25	18%	bis 1950	10%
25-45	31%	1950 - 1970	23%
45-65	38%	1970 - 1990	23%
65-85	11%	1990 - 2000	3%
>85	2%	2000 bis jetzt	42%
Umgebung			
Ländlich	63%		
Städtisch	38%		

4.2.2 Räumliche Verteilung der Untersuchungsobjekte

Die folgende Kartenübersicht gibt einen Überblick über die räumliche Verteilung:



Abbildung 4: Räumliche Verteilung der Probenahmen (Grundlage Google Maps, 2023, maps.google.com)

4.2.3 Dokumentation von Gebäude- und Nutzungsparametern

Über einen Fragebogen wurden die Wohnungs- und Nutzungsdaten aufgenommen:

Checkliste Gebäude

Gebäude	
Baujahr des Gebäudes	
Letzte Sanierung / Renovierung	<input type="checkbox"/> großflächige Erneuerungen / Sanierungen Oberflächen (Boden, Wand, Putz etc.); Jahr _____ <input type="checkbox"/> kleinflächige Schönheitsrenovierungen (streichen etc.); Jahr _____ <input type="checkbox"/> unbekannt
Bauweise	<input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> massiv <input type="checkbox"/> Holzverbund <input type="checkbox"/> Fachwerk <input type="checkbox"/> Sonstiges:
Gebäudeart, Wohnung	<input type="checkbox"/> EFH <input type="checkbox"/> MFH <input type="checkbox"/> Reihenhaus <input type="checkbox"/> Hochhaus <input type="checkbox"/> Wohnung, Stockwerk _____
Keller	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> teilunterkellert
Umgebung	<input type="checkbox"/> ländlich <input type="checkbox"/> städtisch
Dach	
Dachform	<input type="checkbox"/> Satteldach <input type="checkbox"/> Flachdach <input type="checkbox"/> Walmdach <input type="checkbox"/> Pultdach <input type="checkbox"/> Sonstiges:
Dachdämmung	<input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> KMF <input type="checkbox"/> Isofloc <input type="checkbox"/> Sonstiges:
Außenwände	
Außenfassade	<input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Putz <input type="checkbox"/> Ziegel <input type="checkbox"/> Klinker <input type="checkbox"/> KS (Kalksandstein) <input type="checkbox"/> Sandstein <input type="checkbox"/> WDVS <input type="checkbox"/> Holz <input type="checkbox"/> Sonstiges:
Außendämmung Material	<input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Hartschaumplatten z.B. EPS, PUR <input type="checkbox"/> Glaswolle <input type="checkbox"/> Steinwolle <input type="checkbox"/> Mineralschaum <input type="checkbox"/> Hanf <input type="checkbox"/> Holzfasern <input type="checkbox"/> Sonstiges:

Checkliste Probenahmeräume

Allgemeine Angaben (Mehrfachnennungen möglich)	
Etage (z.B. EG, Souterrain oder 1.OG etc.)	
Etagen- / Wohnungsgröße (abgesaugte Gesamtfläche ca.)	_____ m ²
Raumhöhe	_____ m
Raumnutzung bzw. Etagennutzung (Mehrfachnennungen möglich)	<input type="checkbox"/> Wohnen <input type="checkbox"/> Kochen <input type="checkbox"/> Essen <input type="checkbox"/> Schlafen <input type="checkbox"/> Arbeiten <input type="checkbox"/> Eingang Flur <input type="checkbox"/> Sonstiges:

Abbildung 5: Probennahmeprotokoll 1, © anbus analytik GmbH

Probenahmeprotokoll		PFAS – Forschungsprojekt 2023	
Altersgruppe Bewohner	<input type="radio"/> < 25 J. <input type="radio"/> 25 - 45 J. <input type="radio"/> 45 - 65 J. <input type="radio"/> 65 - 85 J. <input type="radio"/> > 85 J.		
Anzahl Bewohner	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> > 6		
Kinder Anzahl	<input type="radio"/> keine <input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> > 4		
Kinder Alter	<input type="radio"/> 0 - 3 J <input type="radio"/> 4 - 7 J <input type="radio"/> 8 - 14 J <input type="radio"/> > 14 J		
Haustiere	<input type="radio"/> keine <input type="radio"/> Hund <input type="radio"/> Katze <input type="radio"/> Fische <input type="radio"/> Vögel <input type="radio"/> Sonstiges:		
Haustiere Anzahl	Tierart 1: <input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> > 4 Tierart 2: <input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> > 4		
Zimmerpflanzen Anzahl	<input type="radio"/> keine <input type="radio"/> 1 - 5 <input type="radio"/> > 5		
Wand (überwiegende Ausstattung)			
Innenwandaufbau	<input type="radio"/> Gipskarton <input type="radio"/> Mauerwerk <input type="radio"/> Wandverkleidung <input type="radio"/> Sonstiges:		
Wandbeschichtung (Mehrfachnennung möglich)	<input type="radio"/> Tapete <input type="radio"/> Farbe (Dispersion, Latex, Mineral) <input type="radio"/> Putz (Gips, Kalk, Kalkgips) <input type="radio"/> Sonstiges:		
Fußboden (überwiegende Ausstattung)			
Belag (Mehrfachnennung möglich)	<input type="radio"/> Fliesen <input type="radio"/> Parkett <input type="radio"/> Holzdielen <input type="radio"/> Laminat <input type="radio"/> PVC <input type="radio"/> Sonstiges:		
Aufbau	<input type="radio"/> unbekannt <input type="radio"/> Schwimmender Estrich <input type="radio"/> Verbundestrich <input type="radio"/> Gussasphalt <input type="radio"/> Fehlboden Schüttung <input type="radio"/> Sonstiges:		
Dämmung	<input type="radio"/> unbekannt <input type="radio"/> EPS / XPS <input type="radio"/> Hanf <input type="radio"/> Kokosfaser <input type="radio"/> PUR <input type="radio"/> Sonstiges:		
Decke (überwiegende Ausstattung)			
Belag	<input type="radio"/> Tapete <input type="radio"/> Farbe (Dispersion, Latex, Mineral) <input type="radio"/> Putz (Gips, Kalk, Kalkgips etc.)		

Abbildung 6: Probenahmeprotokoll 2, © anbus analytik GmbH

4.3 Untersuchungsmedien

4.3.1 Liegestäube

Um eine möglichst reproduzierbare Staubprobenahme zu erhalten, wurde die Probenahme von 7-Tage-Staub gemäß dem AGÖF-Leitfaden "Hausstaubuntersuchungen auf chemische Parameter"^{xvii} durchgeführt. Die Probenahme erfolgte gemäß dem nach AGÖF-Leitfaden akkreditierten Verfahren mit Reinigung von zwei neuen Probenahmesauger gemäß Arbeitsanweisung und der anschließenden Probenahme mit doppelagigen Papierbeuteln. Untersucht wurde der Feinstaubanteil nach dem Sieben < 63µm untersucht. In allen Probenahmen stand ausreichend Feinstaub zur Verfügung, um die geplante Bestimmungsgrenze zu erreichen.

4.3.2 Raumlufthuntersuchungen; Luftgetragener Feinstaubes

Anders als beim Hausstaub ist bei der Erfassung von luftgetragenen Feinstaub eine direkte toxikologische Bewertung der aufgenommenen Körperdosis möglich. Die Probenahme erfolgte als einatembarer Staub (E-Staub) über den High-Volume-Sampler VC 25 II mit einem Durchfluss von 25 m³/h und einem hohen Probenahmevolumen größer 50.000 Liter. Hierdurch konnten sehr niedrige Bestimmungsgrenzen erreicht werden.

Nachteil des eingesetzten Verfahrens ist, dass PFAS-Vertreter aus den Gruppen der Fluortelomeralkohole (FTOH), Fluortelomeracrylate (FTACs), Perfluoroktansulfonamide (FOSAs) und der Perfluoroktansulfonamidoethanole (FOSEs), die aufgrund ihrer Flüchtigkeit zu einer zusätzlichen gasförmigen Exposition über den Luftpfad führen^{xviii}, nicht oder nur mit Minderbefunden erfasst werden.



Abbildung 7: Probenahme des luftgetragenen Feinstaubes mit dem VC 25 II

4.4 Analytische Methoden

Messbedingungen

- ✓ Chromatographiesäule: Agilent Technologies; Poroshell 120 SB-C18: 2,1mm x 100mm x 2,7µm
- ✓ Eluenten: A: Wasser (0,1% Ameisensäure); B: Acetonitril (0,1% Ameisensäure)
- ✓ HPLC: Agilent Technologies 1290 Infinity II
- ✓ MS/MS: Agilent Technologies Triple Quad 6495C

Tabelle 3: Messbedingungen - Analyse Hausstaub und luftgetragener Feinstaub

Matrix	Methode	Extraktion (Probenvorbereitung)	Detektionsmodul	Bestimmungsgrenzen
Hausstaub	„Hausmethode“, LC-MS/MS	Acetonitril mit Cleanup und Aufkonzentrierung	LC-MS/MS (ESI+/-)	0,1 µg/kg
Luftgetragener Feinstaub	„Hausmethode“, LC-MS/MS	Acetonitril ohne Cleanup und Aufkonzentrierung	LC-MS/MS (ESI+/-)	0,05 ng/Probe, bzw. 0,0005-0,001 ng/m ³

4.5 Untersuchungsumfang

Um einen möglichst weiten Überblick über die Exposition mit unterschiedlichen PFAS zu erhalten, wurden PFAS aus den folgenden acht Gruppen in den Untersuchungsumfang einbezogen:

1. Perfluorcarbonsäuren (PFCA)
2. Perfluorsulfonsäuren
3. Sulfonamide
4. Vorläufersubstanzen (Precursor)

5. FTUCA
6. Fluortelomere
7. Ersatzverbindungen
8. Zwitterionen PFAS

Tabelle 4: Übersicht über die untersuchten PFAS

Nr.		Kurzbezeichnung	Bezeichnung
1	Carboxylic acids	PFBA	Perfluorobutanoic acid
2		PFPA	Perfluoropentanoic acid
3		PFHxA	Perfluorohexanoic acid
4		PFHpA	Perfluoroheptanoic acid
5		PFOA	Perfluorooctanoic acid
6		PFNA	Perfluorononanoic acid
7		PFDA	Perfluorodecanoic acid
8		PFUnDA	Perfluoroundecanoic acid
9		PFDoDA	Perfluorododecanoic acid
10		PFTriDA	Perfluorotridecanoic acid
11		PFTeDA	Perfluorotetradecanoic acid
12	Sulfonic acids	PFBS	Perfluorobutane sulfonic acid
13		PFPS	Perfluoropentane sulfonic acid
14		PFHxS	Perfluorohexane sulfonic acid
15		PFHpS	Perfluoroheptane sulfonic acid
16		PFOS	Perfluorooctane sulfonic acid
17		PFNS	Perfluorononane sulfonic acid
18		PFDS	Perfluorodecane sulfonic acid
19		PFUnDS	Perfluoroundecane sulfonic acid
20		PFDoDS	Perfluorododecane sulfonic acid
21		PFTriDS	Perfluorotridecane sulfonic acid
22	Sulfonamide	PFOSA (aka FOSA)	Perfluorooctane sulphonamide
23	Precursor	N-Me-FOSA	N-Methyl-perfluorooctanesulfonamide
24		N-EI-FOSA	N-Ethyl-perfluorooctanesulfonamide
25		N-Me-FOSAA	N-methylperfluoro-1-octanesulfonamidoacetic acid
26		N-EI-FOSAA	N-ethylperfluoro-1-octanesulfonamidoacetic acid

4.6 Qualitätssicherung und Absicherung der Blindwerte

Zur Überprüfung von Blindwerten erfolgte die Untersuchung von Staubbeuteln, die in den Probenahmesauger eingelegt wurden und die für 15 Minuten an der Außenluft betrieben wurden.

Für die Probenahme des luftgetragenen Feinstaubes erfolgte eine Blindwertprüfung der Glasfaserfilter für die Probenahme des luftgetragenen Feinstaubes.

Um mögliche Verschleppungen nachvollziehen zu können, erfolgte eine Dokumentation der Reihenfolge, in der die Probenahmesauger eingesetzt wurden. Bei der Prüfung der Ergebnisse konnte kein Zusammenhang zwischen aufeinanderfolgenden Hausstaubprobenahmen festgestellt werden.

5. Ergebnisse

5.1 Liegestäube/ Hausstaub

5.1.1 Identifikation von innenraumrelevanten PFAS und Perzentile

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse der wesentlichen Perzentile sowie Maximum, Mittelwert und Median dargestellt, um die Verteilung zu beschreiben. Die Hintergrundbelastung (50. Perzentil) erstreckt sich von 10 µg/kg Staub für die 4 Indikator-PFAS bis 25 µg/kg Staub für die Gesamtsumme der untersuchten 35 PFAS.

Tabelle 5 Verteilung der PFAS-Konzentrationen im Hausstaub

Perzentil	5	10	25	50	75	90	95	99	Maximum	Mittelwert	Median
	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg	µg/kg
4 Ind. PFAS											
PFOA	0,87	1,32	1,51	3,70	6,28	13,05	17,75	60,07	81,31	7,72	3,70
PFNA	0,11	0,25	0,43	0,64	1,20	4,22	8,06	9,56	9,91	1,36	0,64
PFHxS	<	<	0,04	0,13	0,39	1,45	2,51	47,31	71,27	2,94	0,13
PFOS	0,28	0,30	0,50	1,34	2,44	4,20	7,85	26,24	31,90	3,34	1,34
Σ 4 Ind. PFAS	1,64	2,20	2,89	7,54	12,91	26,08	49,03	85,59	89,60	15,36	7,54
PFBA	0,09	0,11	0,20	0,37	0,85	3,86	7,90	29,03	38,37	2,65	0,37
PFPA	<	0,03	0,07	0,16	0,29	0,49	1,11	1,58	1,60	0,24	0,16
PFHexA	0,29	0,42	0,69	0,93	2,05	4,27	11,94	16,37	17,38	2,03	0,93
PFHepA	0,10	0,26	0,38	0,66	1,18	2,53	2,83	6,26	8,03	1,08	0,66
PFDA	0,22	0,36	0,69	1,15	2,04	6,61	12,44	36,43	48,98	3,70	1,15
PFunDA	0,09	0,14	0,25	0,43	0,75	1,80	2,92	4,73	5,48	0,70	0,43
PFdoDA	0,18	0,21	0,33	0,68	1,09	2,89	5,61	11,24	13,05	1,42	0,68
PFtriDA	<	<	<	<	0,07	0,12	0,17	0,70	0,95	0,03	<
PFtetraDA	0,12	0,13	0,21	0,36	0,66	2,16	2,99	3,38	3,51	0,70	0,36
PFHxDA (Screening)	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
PFODA(Screening)	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
PFBS	0,16	0,18	0,25	0,64	1,46	15,45	43,75	132,07	165,83	11,46	0,64
PFPeS	<	<	<	<	<	<	0,01	0,11	0,13	0,00	<
PFHpS	<	<	<	<	<	0,06	0,11	0,35	0,42	0,03	<
PFNS	<	<	<	<	<	<	0,06	0,08	0,09	0,01	<
PFDS	<	<	<	<	<	0,03	0,13	0,59	0,81	0,04	<
PFUnDS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
PFDoDS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
PFTriDS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
PFOSA	<	<	<	<	<	<	0,02	0,22	0,29	0,01	<
N_MeFOSA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
N-ET_FOSA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
N_MeFOSAA	<	<	<	<	<	0,37	0,55	1,57	2,01	0,16	<
N_EtFOSAA	0,48	0,81	1,66	2,58	5,12	22,68	44,78	115,79	136,85	13,36	2,58
FOUEA	<	<	<	<	<	0,15	0,31	0,50	0,52	0,06	<
6:2-FTS	0,17	0,20	0,34	0,85	1,38	2,96	3,83	6,11	7,10	1,28	0,85
8:2-FTS	0,20	0,26	0,36	0,80	1,55	2,98	5,40	35,76	50,57	3,16	0,80
8:2diPAP (Screening)	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
HFPO-DA	<	<	<	<	<	<	<	0,04	0,06	0,00	<
NaDONA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
9Cl-PF3ONS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
11Cl-PF3OUdS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
CapstoneA	<	<	<	<	<	<	0,08	0,21	0,23	0,01	<
CapstoneB	<	<	<	0,06	0,14	1,12	1,63	2,35	2,57	0,20	0,06
Σ PFAS ges.	5,79	6,75	12,44	24,52	56,27	124,12	176,41	241,31	262,85	57,71	24,52

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erfassung der Hintergrundbelastung von PFAS in Hausstaub und luftgetragenen Feinstaub mittels HPLC-MS/MS im Ultraspurenbereich möglich ist. In allen 40 Haushaltsproben (z.T. mehrere Proben je Haushalt) konnten mehr als 10 PFAS nachgewiesen werden. Etwa die Hälfte des untersuchten Stoffspektrums (35 PFAS) ist innenraumrelevant.

5.1.2 Konzentrationsverteilung von PFAS im Hausstaub

PFAS wurden in den einzelnen Hausstaubproben in einer großen Konzentrationsspanne nachgewiesen. Um die Verteilungen optisch nachvollziehbar darzustellen und zwischen der ubiquitären Hintergrundbelastung und konkreten Belastungssituationen unterscheiden zu können, wurden für die Darstellung der Verteilung unterschiedliche Klassengrößen verwendet, um einen breiten Verteilungsraum darzustellen. Die PFAS-Gehalte wurden für die jeweilige Substanz auf den maximal nachgewiesenen Gehalt auf 100% normiert.

Folgende Klassen wurden verwendet:

1-10%: 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 10%

10-100%: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 80%, 100%

Im Folgenden werden exemplarisch die Verteilungen für einige PFAS graphisch dargestellt:

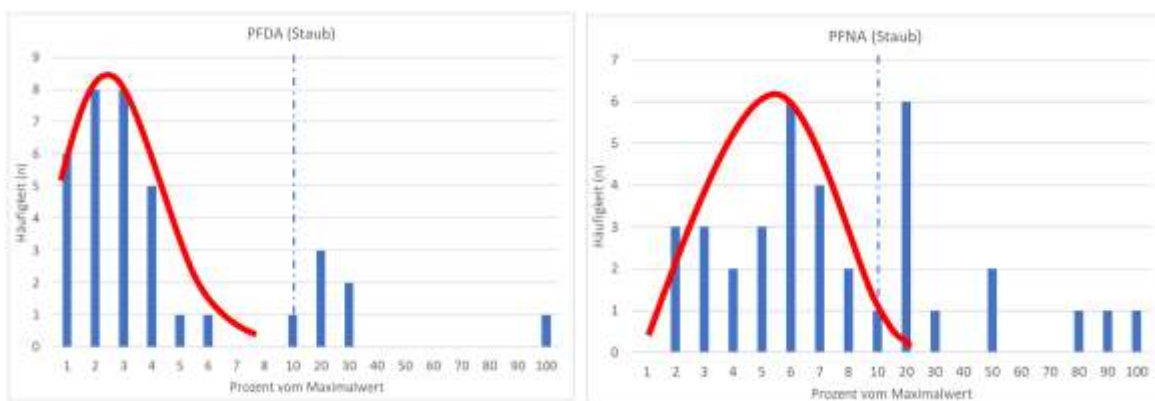


Abbildung 8: Verteilungen der Konzentrationsklassen für PFDA und PFNA

Optisch klar zu erkennen ist eine Binomialverteilung, die die Hintergrundbelastung mit den untersuchten PFAS beschreibt. Von dieser lassen sich weit darüberliegende Ausreißer als konkrete Quellensituation abgrenzen.

5.2 Korrelation der Summenkonzentration Indikator-PFAS mit den Gesamtgehalten

Um eine Korrelation zwischen der Summe der 4 Indikator-PFAS und der Gesamtsumme der PFAS zu prüfen, wurde zunächst die Gesamtsumme gegen die 4 Indikator-PFAS aufgetragen.

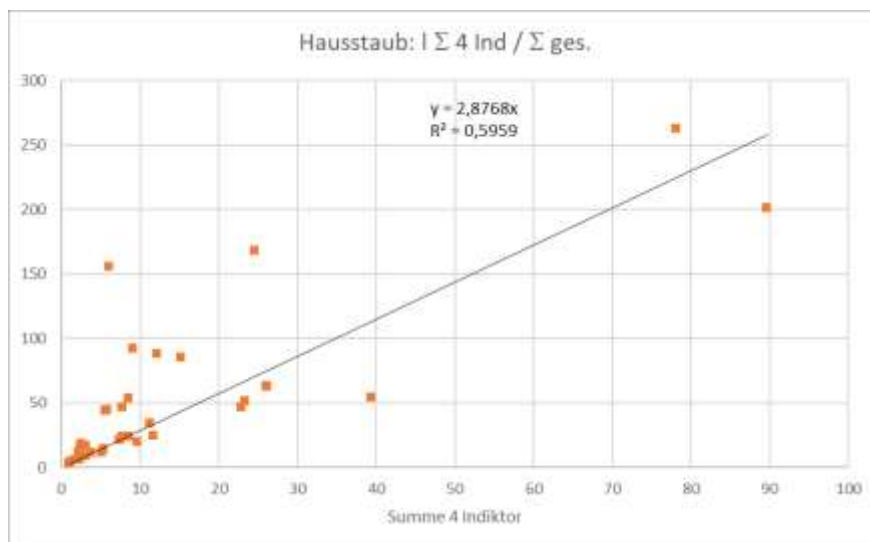


Abbildung 9: Y-Achse: Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS x-Achse: Summe der 4 indikator-PFAS

Der Korrelationskoeffizient von 0,5959 zeigt, dass es eine geringe Korrelation zwischen beiden Summen gibt. Trägt man auf, wie viel Prozent der Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS durch die Summe der 4 Indikator-PFAS erklärt werden kann, ist festzustellen, dass nur etwa 30 % der Gesamtsumme der untersuchten PFAS durch die Hauptindikatoren erklärt werden können:

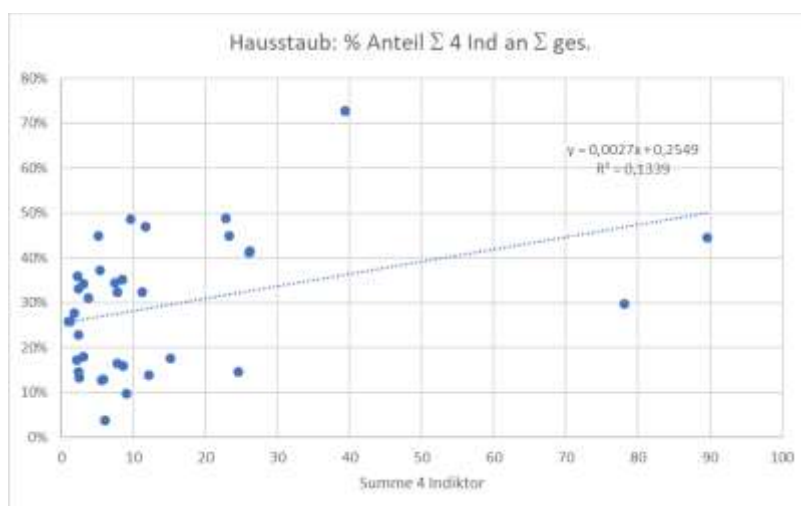


Abbildung 10: Y-Achse: Anteil der Summe der 4 Indikator-PFAS an der Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS x-Achse: Summe der 4 indikator-PFAS

Damit ist die Bestimmung der 4 Indikator-PFAS nicht ausreichend, um die Gesamtsumme der PFAS beschreiben zu können.

5.3 Raumluf: luftgetragener Feinstaub

5.3.1 Identifikation von innenraumrelevanten PFAS und Perzentile

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse der wesentlichen Perzentile sowie Maximum, Mittelwert und Median dargestellt, um die Verteilung zu beschreiben.

Tabelle 6 Verteilung der PFAS-Konzentrationen im luftgetragenen Feinstaub

Perzentil	5	10	25	50	75	90	95	99	Maximum	Mittelwert	Median
	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³
4 Ind. PFAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L PFOA	0,0024	0,0026	0,0035	0,0057	0,0067	0,0090	0,0118	0,0146	0,0153	0,0060	0,0057
L PFNA	<	<	<	<	<	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0001	<
L PFHxS	<	<	<	0,0004	0,0006	0,0008	0,0011	0,0014	0,0014	0,0005	0,0004
L PFOS	0,0039	0,0049	0,0075	0,0137	0,0157	0,0181	0,0186	0,0187	0,0187	0,0117	0,0137
S4 Indikator	0,0063	0,0076	0,0110	0,0208	0,0233	0,0282	0,0314	0,0342	0,0349	0,0183	0,0208
L PFBA	0,0002	0,0003	0,0004	0,0009	0,0010	0,0026	0,0049	0,0074	0,0080	0,0014	0,0009
L PFPA	<	<	<	<	<	0,0002	0,0005	0,0009	0,0010	0,0001	<
L PFHexA	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0013	0,0016	0,0016	0,0017	0,0017	0,0008	0,0006
L PFHepA	0,0003	0,0003	0,0004	0,0008	0,0010	0,0011	0,0015	0,0021	0,0022	0,0008	0,0008
L PFDA	<	<	<	<	<	0,0004	0,0005	0,0006	0,0006	0,0001	<
L PFunDA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFdoDA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFtriDA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFtetrDA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFHxDA (Screening)	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFODA(Screening)	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFBS	<	<	<	<	0,0004	0,0015	0,0025	0,0036	0,0038	0,0005	<
L PFPeS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFHPS	<	<	<	<	<	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0001	<
L PFNS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFDS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFUnDS	<	<	<	<	<	<	0,0001	0,0003	0,0003	0,0000	<
L PFDoDS	<	<	<	<	<	0,0003	0,0005	0,0008	0,0009	0,0001	<
L PFTrDS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L PFOSA	0,0003	0,0003	0,0004	0,0006	0,0009	0,0024	0,0131	0,0255	0,0287	0,0029	0,0006
L N_MeFOSA	<	<	<	0,0004	0,0017	0,0024	0,0030	0,0036	0,0038	0,0010	0,0004
L NOET_FOSA	0,0003	0,0004	0,0005	0,0012	0,0017	0,0104	0,0379	0,0684	0,0760	0,0077	0,0012
L N_MeFOSAA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L N_EtFOSAA	<	<	<	<	0,0021	0,0059	0,0107	0,0157	0,0169	0,0023	<
L FOUEA	<	<	0,0002	0,0006	0,0007	0,0007	0,0013	0,0021	0,0023	0,0006	0,0006
L 6:20FTS	<	<	<	<	0,0002	0,0007	0,0014	0,0021	0,0023	0,0003	<
L 8:20FTS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L 8:2diPAP (Screening)	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L HFPOODA (Screening)	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L NaDONA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L 9ClOPF3ONS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L 11ClOPF3OUdS	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L CapstoneA	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
L CapstoneB	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
S gesamt	0,0126	0,0138	0,0173	0,0285	0,0359	0,0402	0,0908	0,1511	0,1662	0,0371	0,0285
Anteil Indikator	21%	28%	54%	63%	75%	82%	84%	85%	85%	61%	63%
0	21%	28%	54%	63%	75%	82%	84%	85%	0%	0%	0%

5.3.2 Konzentrationsverteilung von PFAS im luftgetragenen Liegestaub

In den einzelnen Luftproben wurden PFAS in einer großen Konzentrationsspanne nachgewiesen. Um die Verteilungen ebenso wie in den Hausstaubproben optisch nachvollziehbar darzustellen und zwischen der ubiquitären Hintergrundbelastung und konkreten Belastungssituationen unterscheiden zu können, wurden für die Darstellung der Verteilung unterschiedlicher Klassengrößen verwendet, um einen breiten

Verteilungsraum darzustellen. Die PFAS-Gehalte wurden wieder für die jeweilige Substanz auf den maximal nachgewiesenen Gehalt auf 100% normiert.

Folgende Klassen wurden verwendet:

1-10%: 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 10%

10-100%: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 80%, 100%

Im Folgenden werden exemplarisch die Verteilungen für einige PFAS graphisch dargestellt:

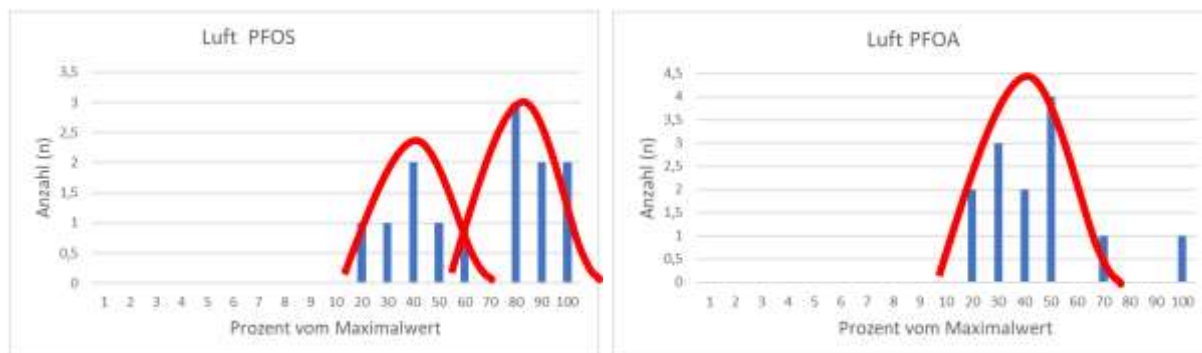


Abbildung 11: Verteilungen der Konzentrationsklassen für PFOS und PFOA

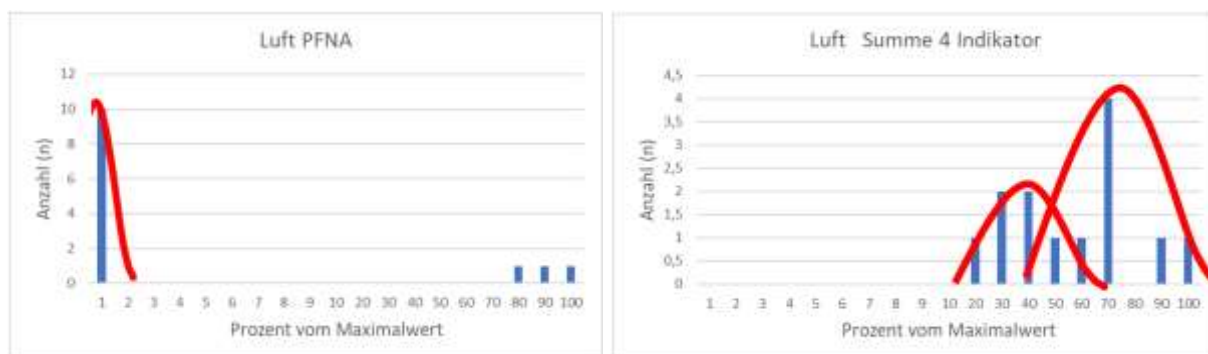


Abbildung 12: Verteilungen der Konzentrationsklassen für PFNA und die Summe der 4 Indikator-PFAS

Wie bereits bei den Hausstaubproben ist optisch klar zu erkennen, dass eine Binomialverteilung vorliegt, die die Hintergrundbelastung mit den untersuchten PFAS beschreibt. Von dieser lassen sich weit darüber liegende Ausreißer bzw. eine zweite Binomialverteilung für konkrete Quellsituation abgrenzen.

5.4 Korrelation zwischen den Gehalten der Liegestäube (Hausstaub) und dem einatembaren Feinstaub

Im Folgenden werden die Korrelationen zwischen den Gehalten der Liegestäube (Hausstaub) und dem luftgetragenen, einatembaren Feinstaub für vier exemplarische PFAS aus der aufsteigenden Reihe der Perfluorcarbonsäuren geprüft. Hierzu erfolgte die Auftragung der Liegestaubgehalte auf der Y-Achse gegenüber der Konzentration an einatembarem Feinstaub auf der X-Achse. Die Überprüfung der Daten zeigt, dass eine einzige Probe als Ausreißer die Korrelation von Liege- und einatembarem Feinstaub deutlich vermindert. Die folgenden Graphen werden deshalb für die Gesamtzahl der Proben links und um die Ausreißerprobe reduziert rechts dargestellt.

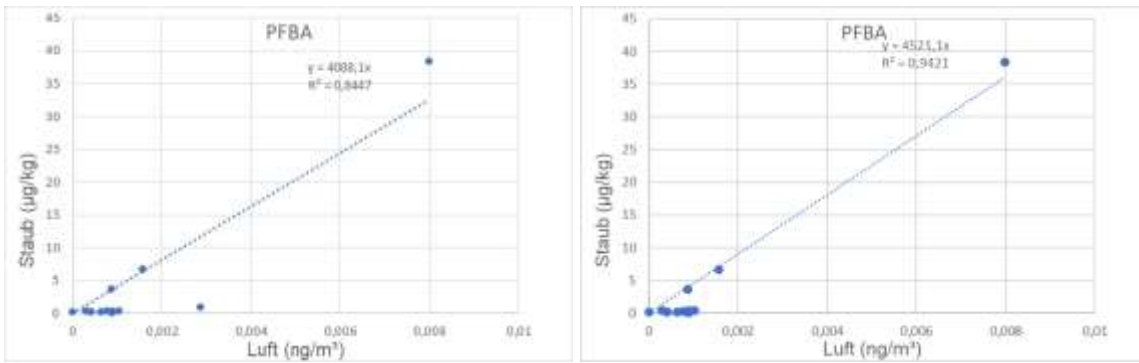


Abbildung 13: Korrelation der Liegestaubgehalte mit der Konzentration an einatembarem Feinstaub für PFBA

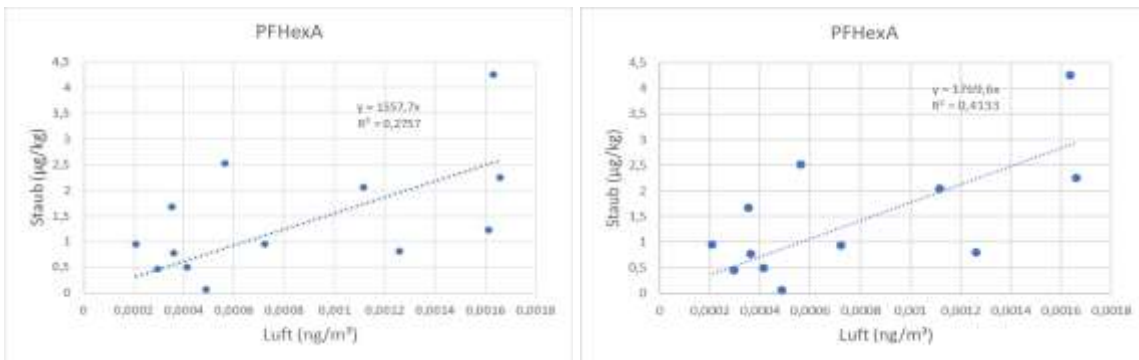


Abbildung 14: Korrelation der Liegestaubgehalte mit der Konzentration an einatembarem Feinstaub für PFHexA

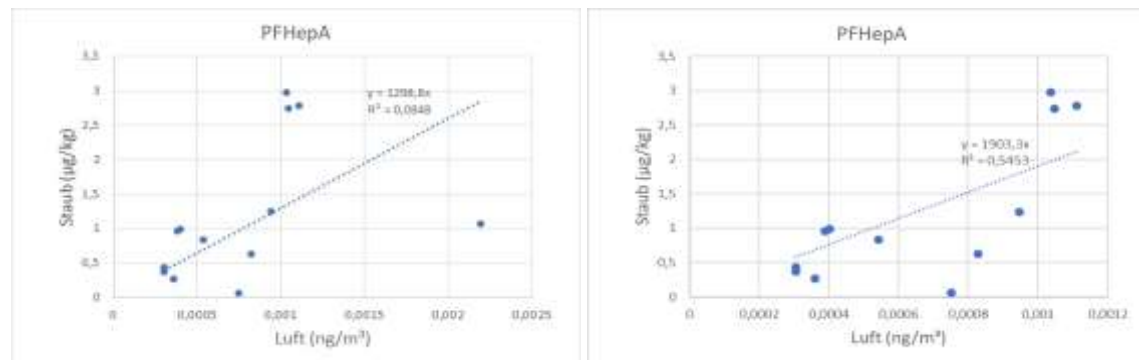


Abbildung 15: Korrelation der Liegestaubgehalte mit der Konzentration an einatembarem Feinstaub für PFHepA

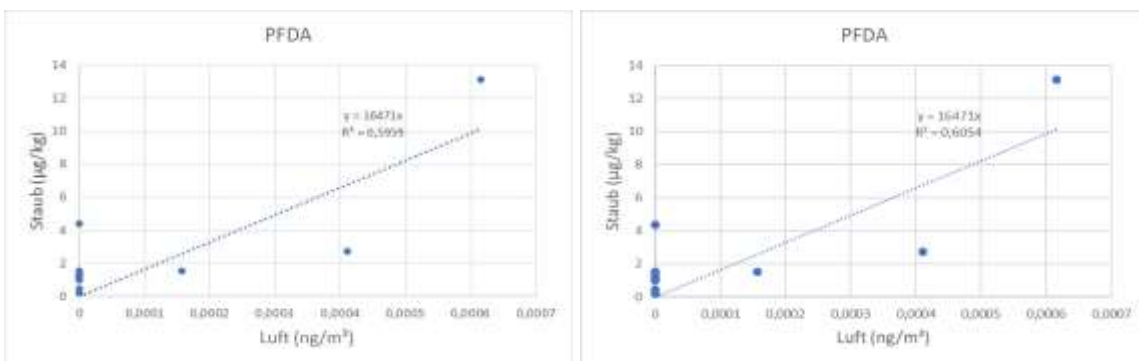


Abbildung 16: Korrelation der Liegestaubgehalte mit der Konzentration an einatembarem Feinstaub für PFHepA

Das Ergebnis zeigt, dass es nach Bereinigung der Ausreißerprobe auch ohne Aufwirbelung der Liegestäube eine mittelstarke bis starke lineare Korrelation zwischen den Feinstaubgehalten der Liegestäube und den einatembaren Feinstäuben gibt. Ein Vergleich der Flüchtigkeiten der Perfluorcarbonsäuren zeigt, dass es dabei keinen klaren Zusammenhang zur Flüchtigkeit ergibt.

- Perfluorbutansäure (PFBA) ist eine Flüssigkeit mit einem Siedepunkt von 120 °C,
- Perfluorhexansäure (PFHexA) mit einem Schmelzpunkt von 14°C und einem Siedepunkt von 157 °C,
- Perfluorheptansäure (PFHepA) ist ein Feststoff mit einem Schmelzpunkt von 30°C und einem Siedepunkt von 157 °C.
- Perfluordecansäure (PFDA) ist ein Feststoff mit einem Schmelzpunkt bei 77-81°C und hat einen Siedepunkt von 218 °C.

6. Bewertung der PFAS-Gehalte in Liege- und einatembaren Feinstäuben

6.1 Vergleich mit den Beurteilungsmaßstäben anderer Umweltmedien

Für Innenräume stehen bisher keine Beurteilungsmaßstäbe zur Verfügung. Insofern werden im Folgenden zunächst Bewertungsmaßstäbe für andere Umweltmedien herangezogen.

6.1.1 Grenzwerte: tierische Lebensmittel

Der Vergleich der PFAS-Gehalte in den Liegestaubgehalten mit den Grenzwerten der Verordnung (EU) 2022/2388 (Geltungsbeginn: 01.01.2023, aktuell nur für tierische Lebensmittel) zeigt, dass bereits der 10. Perzentil der 4 Indikator-PFAS die wesentlichen Grenzwerte für tierische Lebensmittel überschreitet.

Verordnung (EU) 2022/2388 (Geltungsbeginn: 01.01.2023, aktuell nur für tierische Lebensmittel)

Lebensmittel (Auswahl)	PFOS [µg/kg]	PFOA [µg/kg]	PFNA [µg/kg]	PFHxS [µg/kg]	Summe [µg/kg]
Eier	1,0	0,30	0,70	0,30	1,7
Fisch - Muskelfleisch zur Herstellung von Beikost	2,0	0,20	0,50	0,20	2,0
Fleisch - Rinder, Schweine, Geflügel - Schafe	0,30 1,0	0,80 0,20	0,20 0,20	0,20 0,20	1,3 1,6
Schlachtnebenerzeugnisse - Rinder, Schweine, Geflügel, Schafe	6,0	0,70	0,40	0,50	8,0

	Staub 5 4 Ind. PFAS µg/kg	Staub PFAS ges. µg/kg
Perzentil	5	1,64
	10	2,20
	20	2,40
	25	2,89
	30	3,41
	40	5,62
	50	7,54
	60	8,54
	70	11,47
	75	12,91
	80	22,87
	90	26,06
	95	49,03
	99	85,59
	100	89,60
Maximum		89,60
Mittelwert		15,36
Median		7,54

* [µg/kg Lebensmittel]

Abbildung 17: Vergleich der PFAS-Gehalte in den Liegestaubgehalten mit den Grenzwerten für tierische Lebensmittel

6.1.2 Richtwerte für pflanzliche Lebensmittel

Die Richtwerte („indicative levels“) für pflanzliche Lebensmittel liegen nach Empfehlung (EU) 2022/1431 um den Faktor 100 unter den Grenzwerten für tierische Lebensmittel. Es soll keine Beeinträchtigung der Verkehrsfähigkeit aufgrund einer Überschreitung dieser Richtwerte erfolgen. Die Überschreitung im genießbaren Teil der Lebensmittel soll jedoch zum Anlass für Ursachenforschung genommen werden, mit dem Ziel, das Auftreten von PFAS in Lebensmitteln zu verhindern.

Tabelle 7: Richtwerte („indicative levels“) für pflanzliche Lebensmittel

Lebensmittel	PFOS [µg/kg]	PFOA [µg/kg]	PFNA [µg/kg]	PFHxS [µg/kg]	Summe [µg/kg]
Obst, Gemüse (ausgenommen Wildpilze), stärkehaltige Wurzeln und Knollen	0,010		0,010	0,005	0,015
Wildpilze	1,5		0,010	0,005	0,015
Milch	0,020		0,010	0,050	0,060
Beikost	0,050		0,050	0,050	0,050

Die in der Pre-Studie nachgewiesenen Liegestaubgehalte in Innenräumen liegen um den Faktor 1.000 oberhalb dieser Richtwerte. Analog der Definition „indicative levels“ sehen wir erheblichen Anlass für Ursachenforschung, mit dem Ziel, das Auftreten von PFAS in Innenräumen zu vermindern.

6.2 Bodenkontamination

Im Februar 2023 brachte das *Forever Pollution Project* erstmals im Rahmen einer europaweiten, interdisziplinären Zusammenarbeit, Journalisten und Experten zusammen, um das Ausmaß der PFAS-Kontamination in ganz Europa aufzudecken und zu kartieren.^{xix}



Abbildung 18: Hot-Spot-Karte und Teilnehmer des Forever Pollution Project

Zur Darstellung wurden vier Klassen gebildet, wobei Konzentrationen ab 100 ng/kg (0,1µg/kg) als Hotspots bewertet wurden. Ein Vergleich der in den Liegestäuben nachgewiesenen PFAS-Konzentrationen mit den vier Kategorien der Bewertung von PFAS-Gehalten in Böden zeigt, dass ausnahmslos alle untersuchten Hausstäube in die höchste und zweithöchste Hotspotkategorie einzustufen sind. Ab dem 70. Perzentil wird die höchste Kategorie erreicht. Das bedeutet, dass für jedes im Rahmen der Pre-Studie untersuchte Gebäude ein weiterer Punkt in der Hotspot-Karte eingezeichnet werden müsste.

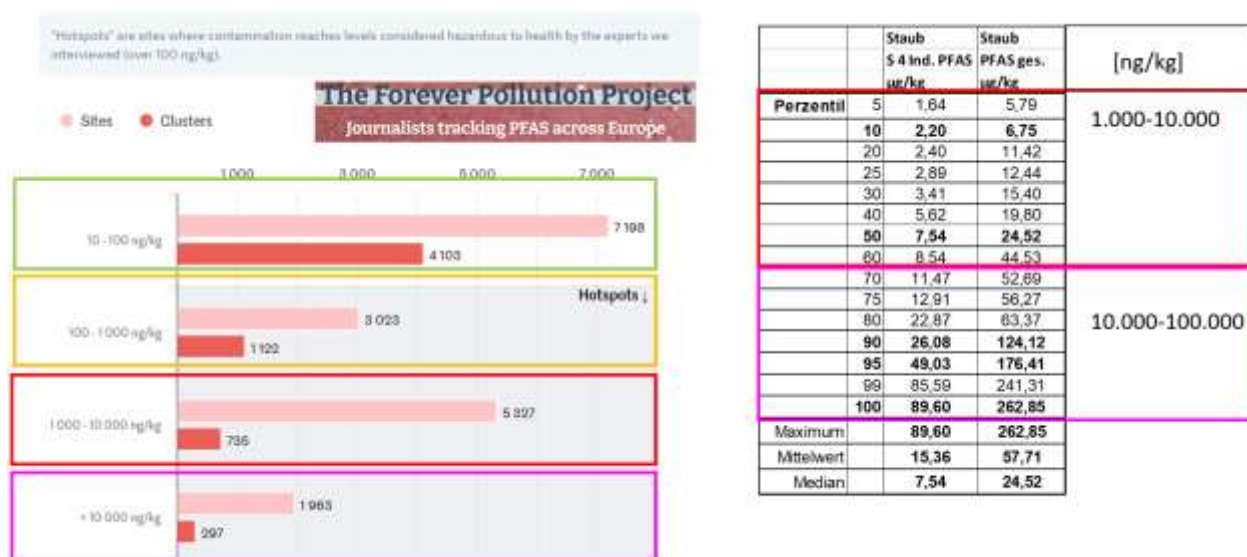


Abbildung 19: Vergleich der Belastung von PFAS-Hotspots mit den Belastungen im Hausstaub

6.3 Toxikologische Bewertung

6.3.1 Über den einatembaren Staub aufgenommene Körperdosis

Grundlage der folgenden Ableitung ist der orale TWI 4,4 ng/kg KG und Woche der EFSA^{xx}. Da bisher kein inhalativer TWI verfügbar ist, wird hilfsweise eine Pfad-zu-Pfad-Übertragung durchgeführt. Die Ableitung folgt wie von Kalberlah et. al beschrieben.^{xxi}

Tabelle 8: Berechnung der über den einatembaren Staub aufgenommenen Körperdosis (für die 4 Indikator PFAS)

Körperdosis	MAX	95. Perzentil	90. Perzentil	50. Perzentil
Luftkonzentration	0,035 ng/m ³	0,031 ng/m ³	0,028 ng/m ³	0,021 ng/m ³
Körpergewicht (KG)	70 kg	70 kg	70 kg	70 kg
Atemvolumen	20 m ³ /d	20 m ³ /d	20 m ³ /d	20 m ³ /d
Resorptionsquote	1	1	1	1
Körperdosis/d	0,01 ng/kg KG * d	0,0089 ng/kg KG * d	0,008 ng/kg KG * d	0,006 ng/kg KG * d
Körperdosis je Woche	0,07 ng/kg KG * Woche	0,062 ng/kg KG * Woche	0,056 ng/kg KG * Woche	0,042 ng/kg KG * Woche
Anteil TWI	1,6 %	1,4 %	1,3 %	1,0 %

Die Ableitung zeigt, dass bis zu 2% der zulässigen wöchentlichen Aufnahme für die 4 Indikator-PFAS alleine über den Luftpfad erfolgen.

In der Ableitung sind jedoch nur die 4 Indikator-PFAS enthalten. Für die übrigen nachgewiesenen PFAS stehen bisher keine Beurteilungsmaßstäbe zur Verfügung. Die EFSA hat einen harmonisierten methodischen Rahmen entwickelt, der in all ihren wissenschaftlichen Gremien zur Bewertung der potenziellen „kombinierten Wirkungen“ von chemischen Gemischen in Lebens- und Futtermitteln verwendet werden kann.^{xxii} Das Konzept sieht vor, die Dosen von Substanzen mit gemeinsamer Wirkung zu addieren, um das Gesamtrisiko abzuschätzen, solange keine anderen Informationen bekannt sind.^{xxiii} Geht man davon aus, dass die PFAS vergleichbare Wirkungen haben, ist der orale TWI von 4,4 ng/kg KG und Woche auf die Summe der nachgewiesenen PFAS heranzuziehen.

Tabelle 9: Berechnung der über den einatembaren Staub aufgenommenen Körperdosis (für die Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS)

Körperdosis	MAX	95. Perzentil	90. Perzentil	50. Perzentil
Luftkonzentration	0,17 ng/m ³	0,091 ng/m ³	0,040 ng/m ³	0,029 ng/m ³
Körpergewicht (KG)	70 kg	70 kg	70 kg	70 kg
Atemvolumen	20 m ³ /d	20 m ³ /d	20 m ³ /d	20 m ³ /d
Resorptionsquote	1	1	1	1
Körperdosis/d	0,048 ng/kg KG * d	0,026 ng/kg KG * d	0,011 ng/kg KG * d	0,0081 ng/kg KG * d
Körperdosis je Woche	0,33 ng/kg KG * Woche	0,18 ng/kg KG * Woche	0,080 ng/kg KG * Woche	0,057 ng/kg KG * Woche
Anteil TWI	7,6 %	4,1 %	1,8 %	1,3 %

Betrachtet man den Gesamtgehalt der nachgewiesenen PFAS, erfolgen bis zu 8% der zulässigen wöchentlichen Aufnahme allein über den Luftpfad.

6.3.2 Über Liegestäube aufgenommene Körperdosis

Eine einfache Umrechnung aus Liegestaubgehalten in Körperdosen ist nicht möglich, weil die Aufnahmeraten nicht so genau quantifiziert werden können. Zahlreiche Studien (siehe 3.2) zeigen jedoch, dass die aufgenommene Körperdosis bzw. gesundheitliche Effekte mit den Liegestaubgehalten korreliert.

Für die dermalen Aufnahmen liegen noch keine einfachen Modelle vor. Im Folgenden wird die orale Aufnahme über den Hausstaub quantifiziert.

Personen mit Pica-Syndrom essen regelmäßig Dinge, die keine Nahrungsmittel sind. Bei Kindern im Alter von weniger als 2 Jahren wird dieses Verhalten entwicklungsbedingt als normal angesehen. Kleine Kinder nehmen alle möglichen Dinge in den Mund und essen sie manchmal.^{xxiv}

In der Literatur werden unterschiedliche Spannen der oralen Aufnahme von Liegestäuben durch Kleinkinder angegeben:

- Das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit beschreibt in einer Human-Studie, dass besonders kleine Kinder eine relativ hohe unbeabsichtigte Aufnahme von Hausstaub haben, beispielsweise durch Krabbeln am Boden oder Stecken von Gegenständen in den Mund. Daher kann eine im Vergleich zu Erwachsenen höhere Exposition über den Hausstaub angenommen werden. Man schätzt, abhängig von der herangezogenen Studie, eine Aufnahme von bis zu 50 mg/Tag.^{xxv}
- Das Umweltbundesamt (UBA) und das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) gehen in einer gemeinsamen Stellungnahme zu Organozinnverbindungen davon aus, dass die Staubaufnahme bei Kleinkindern bei einem Körpergewicht zwischen 7,6 kg und 12 kg zwischen 100 mg und 500 mg täglich schwanken.^{xxvi}
- Laut einer Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes umspannen die Daten zu Aufnahme von Liegestäuben in der zentralen Tendenz Werte von 2 mg/d bis 131 mg/d. Die ungünstigen Schätzungen werden mit Werten von 7 mg/d bis 140 mg/d angegeben. Der zurzeit gebräuchliche Aufnahmewert liegt bei 100 mg pro Tag.^{xxvii}

In der folgenden Tabelle werden die Körperdosen für Kleinkinder bei der maximal gefundenen Staubbelastung sowie dem 50., 90. und 95. Perzentil berechnet. Dabei wird einmal von einer täglichen

Staubaufnahme von 2 mg/d als Minimum und 100 mg/d als den zurzeit gebräuchlichsten Aufnahmewert ausgegangen:

Tabelle 10: Körperdosen für Kleinkinder für die 4 Indikator-PFAS

Körperdosis	MAX	95. Perz.	90. Perz.	50. Perz.
Staubkonzentration	89,6 µg/kg	49,03 µg/kg	26,08 µg/kg	7,54 µg/kg
Staubkonzentration	89600 ng/kg	49030 ng/kg	26080 ng/kg	7540 ng/kg
Körpergewicht (KG)	10 kg	10 kg	10 kg	10 kg
Staubaufnahme	100 mg/d	100 mg/d	100 mg/d	100 mg/d
Staubaufnahme	0,0001 kg/d	0,0001 kg/d	0,0001 kg/d	0,0001 kg/d
Resorptionsquote	1	1	1	1
Körperdosis abs.	8,96 ng/d	4,903 ng/d	2,608 ng/d	0,754 ng/d
Körperdosis /d	0,896 ng/kg KG * d	0,4903 ng/kg KG * d	0,2608 ng/kg KG * d	0,0754 ng/kg KG * d
Körperdosis je Woche	6,272 ng/kg KG * Woche	3,4321 ng/kg KG * Woche	1,8256 ng/kg KG * Woche	0,5278 ng/kg KG * Woche
Anteil TWI	142,5%	78,0%	41,5%	12,0%

Körperdosis	MAX	95. Perz.	90. Perz.	50. Perz.
Staubkonzentration	89,6 µg/kg	49,03 µg/kg	26,08 µg/kg	7,54 µg/kg
Staubkonzentration	89600 ng/kg	49030 ng/kg	26080 ng/kg	7540 ng/kg
Körpergewicht (KG)	10 kg	10 kg	10 kg	10 kg
Staubaufnahme	2 mg/d	2 mg/d	2 mg/d	2 mg/d
Staubaufnahme	0,000002 kg/d	0,000002 kg/d	0,000002 kg/d	2E-06 kg/d
Resorptionsquote	1	1	1	1
Körperdosis abs.	0,1792 ng/d	0,09806 ng/d	0,05216 ng/d	0,01508 ng/d
Körperdosis /d	0,01792 ng/kg KG * d	0,009806 ng/kg KG * d	0,005216 ng/kg KG * d	0,00151 ng/kg KG * d
Körperdosis je Woche	0,12544 ng/kg KG * Woche	0,068642 ng/kg KG * Woche	0,036512 ng/kg KG * Woche	0,01056 ng/kg KG * Woche
Anteil TWI	2,9%	1,6%	0,8%	0,2%

Die abgeschätzte Aufnahme über den Hausstaub liegt für Kleinkinder bei bis zu 150% des TWI für die 4 Indikator-PFAS.

Setzt man analog der Raumluftbetrachtung (s.o.) wieder die Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS ein, kommt man zu einer Überschreitung der zulässigen Aufnahme um bis zu 420%:

Tabelle 11: Körperdosen für Kleinkinder für die Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS

Körperdosis	MAX	95. Perz.	90. Perz.	50. Perz.
Staubkonzentration	262,85 µg/kg	176,41 µg/kg	124,12 µg/kg	24,52 µg/kg
Staubkonzentration	262850 ng/kg	176410 ng/kg	124120 ng/kg	24520 ng/kg
Körpergewicht (KG)	10 kg	10 kg	10 kg	10 kg
Staubaufnahme	100 mg/d	100 mg/d	100 mg/d	100 mg/d
Staubaufnahme	0,0001 kg/d	0,0001 kg/d	0,0001 kg/d	0,0001 kg/d
Resorptionsquote	1	1	1	1
Körperdosis abs.	26,285 ng/d	17,641 ng/d	12,412 ng/d	2,452 ng/d
Körperdosis /d	2,6285 ng/kg KG * d	1,7641 ng/kg KG * d	1,2412 ng/kg KG * d	0,2452 ng/kg KG * d
Körperdosis je Woche	18,3995 ng/kg KG * Woche	12,3487 ng/kg KG * Woche	8,6884 ng/kg KG * Woche	1,7164 ng/kg KG * Woche
Anteil TWI	418,2%	280,7%	197,5%	39,0%

Körperdosis	MAX	95. Perz.	90. Perz.	50. Perz.
Staubkonzentration	262,85 µg/kg	176,41 µg/kg	124,12 µg/kg	24,52 µg/kg
Staubkonzentration	262850 ng/kg	176410 ng/kg	124120 ng/kg	24520 ng/kg
Körpergewicht (KG)	10 kg	10 kg	10 kg	10 kg
Staubaufnahme	2 mg/d	2 mg/d	2 mg/d	2 mg/d
Staubaufnahme	0,000002 kg/d	0,000002 kg/d	0,000002 kg/d	2E-06 kg/d
Resorptionsquote	1	1	1	1
Körperdosis abs.	0,5257 ng/d	0,35282 ng/d	0,24824 ng/d	0,04904 ng/d
Körperdosis /d	0,05257 ng/kg KG * d	0,035282 ng/kg KG * d	0,024824 ng/kg KG * d	0,0049 ng/kg KG * d
Körperdosis je Woche	0,36799 ng/kg KG * Woche	0,246974 ng/kg KG * Woche	0,173768 ng/kg KG * Woche	0,03433 ng/kg KG * Woche
Anteil TWI	8,4%	5,6%	3,9%	0,8%

7. Fazit und Ausblick

Die Hintergrundbelastung (50. Perzentil) erstreckt sich von 10 µg/kg Staub für die 4 Indikator-PFAS bis 25 µg/kg Staub für die Gesamtsumme der untersuchten 35 PFAS. Die Hintergrundbelastung im Hausstaub ist damit so hoch, dass sie in Böden als deutliche Kontamination (Hot-Spots) angesehen wird (> 1 µg/kg für Indikator-PFAS).

Die Abschätzung der Körperdosis zeigt, dass die Aufnahme über die Raumluft bei bis zu 2% des TWI für die 4 Indikator-PFAS liegt. Setzt man die Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS im Sinne einer additiven Bewertung gemäß EFSA an, liegt bei der inhalativen Aufnahme die Ausschöpfung des TWI bei 8%.

Die abgeschätzte Aufnahme über den Hausstaub liegt für Kleinkinder bei bis zu 150% des TWI für die 4 Indikator-PFAS. Setzt man wiederum die Gesamtsumme der nachgewiesenen PFAS im Sinne einer additiven Bewertung an, liegt die orale Aufnahme alleine über den Hausstaub bei bis zu 420% des TWI.

Bei der Bewertung der PFAS-Problematik ist die Kontamination der häuslichen Umgebung ein relevanter Faktor. Das UBA hat 2022 im Human-Bio-Monitoring eine erhöhte PFAS-Belastung bei Kindern und Jugendlichen festgestellt.^{xxviii} PFAS aus dem Innenraum tragen damit erheblich zu dieser Belastung bei.

Dies ist ein weiteres Argument für ein Verbot bzw. eine Regulierung aller PFAS.

Die von uns durchgeführte Pre-Studie zeigt, dass PFAS im Innenraum relevant zur aufgenommenen Körperdosis beitragen können und weist auf weiteren dringenden Forschungsbedarf zu folgenden Themenkomplexen hin:

- Identifizierung von Quellen aus der häuslichen Umgebung für die Belastung von Hausstaub und luftgetragenen Feinstaub beispielsweise anhand von ausgewählten Haushalten mit identifizierten Belastungssituationen.
- Vergrößerung des Stichprobenumfangs, Berücksichtigung repräsentativer Probenahmen aus dem Bundesgebiet: Berücksichtigung von PFAS im Hausstaub und der Raumluft bei der nächsten GerES-Studie.
- Toxikologische Bewertung weiterer in Innenräumen relevanter PFAS über die 4 Indikator-PFAS hinaus.
- Toxikologische Bewertung der inhalativen und dermalen Aufnahme.

8. Literatur

1 Fernández, S.R. et al. (21.04.2021) BUILDING A BETTER WORLD, Eliminating Unnecessary PFAS in Building Materials, Green Science Policy Institute, <https://greensciencepolicy.org/docs/pfas-building-materials-2021.pdf>

Literaturzitat 2

Literaturzitat 3

ⁱ Fernández, S.R. et al. (21.04.2021) BUILDING A BETTER WORLD, Eliminating Unnecessary PFAS in Building Materials, Green Science Policy Institute, <https://greensciencepolicy.org/docs/pfas-building-materials-2021.pdf>

ⁱⁱ EFS, Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit: Risk to human health related to the presence of

perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food, 13.12.2018, efsa JOURNAL <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2903/j.efsa.2018.5194>

iii EFS, Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit: PFAS in Lebensmitteln: Risikobewertung und Festlegung einer tolerierbaren Aufnahmemenge durch die EFSA, 17.09.2023, <http://www.efsa.europa.eu/de/news/pfas-food-efsa-assesses-risks-and-sets-tolerable-intake>

iv Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN): Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS), Abfrage vom 24.05.2024, <https://www.bmu.de/faqs/per-und-polyfluorierte-chemikalien-pfas>

v Bundesinstitut für Risikobewertung | FAQ PFAS - Fragen und Antworten - 16.06.2023: Gekommen, um zu bleiben: Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Lebensmitteln und der Umwelt <https://www.bfr.bund.de/fragen-und-antworten/thema/gekommen-um-zu-bleiben-per-und-polyfluorierte-alkylsubstanzen-pfas-in-lebensmitteln-und-der-umwelt/>

vi Bundesinstitut für Risikobewertung Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS): Veröffentlichung des Vorschlags zur Beschränkung nach der REACH-Verordnung bei der Europäischen Chemikalienbehörde, Aktualisierte Mitteilung Nr. 008/2023 des BfR vom 7. Februar 2023 <https://www.bfr.bund.de/cm/343/per-und-polyfluorierte-alkylsubstanzen-pfas-veroeffentlichung-des-vorschlags-zur-beschaenkung-nach-der-reach-verordnung-bei-der-europaeischen-chemikalienbehoerde.pdf>

vii Ausschuss für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 20. Wahlperiode, Ausschussdrucksache 20(16)266-D(NEU), (22. April 2024), Stellungnahme Prof. Dr. Martin Scheringer (ETH-Zürich) Öffentliche Anhörung zum Antrag der Fraktion der CDU/CSU Vorteile von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen weiter nutzen - Wertschöpfung erhalten – Gesundheit und Umwelt schützen BT-Drucksache 20/9736 am 24. April 2024 <https://www.bundestag.de/resource/blob/999574/b0b64bf13fccd48cc79ef459f4340d82/20-16-266-D-NEU-Prof-Dr-Scheringer-ETH-Zuerich.pdf>

viii CDU, CSU, SPD: Verantwortung für Deutschland Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD21. Legislaturperiode, <https://www.cdu.de/app/uploads/2025/04/KoaV-2025-Gesamt-final-0424.pdf>

ix Nicole M. DeLuca et. al.: Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review, Environment International 162 (2022) 107149, DOI: [10.1016/j.envint.2022.107149](https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107149), https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412022000757?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=944ff7b41b209286

x T. Savvaides, J. Koelmel und Y. Zhou: Prevalence and Implications of Per- and Polyfuoroalkyl Substances (PFAS) in Settled Dust, December 2021 Current Environmental Health Reports 8(3), DOI:10.1007/s40572-021-00326-4 Zhou <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412022000757>

xi Pfeil, S. & Maraun, W. (2024). PFAS: Aktuelle Ergebnisse zur Expositionsabschätzung gegenüber Hausstaub und luftgetragenen Staub. Teil Zwei: Raumluft- und Hausstaubuntersuchungen sowie deren Bewertung. Beitrag A06 zur Fachtagung „Innenraumluft 2024 - Messen, Bewerten und Gesundes Wohnen“, 6.-8. Mai 2024, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/irl2024-a06>

xii UBA GerES VI 2023-2024

xiii Becker, K., Seiwert, M., Angerer, J., Kolossa-Gehring, M., Hoppe, H.-W., Ball, M., Schulz, C., Thumulla, J., Seifert, B., 2006. GerES IV Pilot Study: Assessment of the exposure of German children to organophosphorus and pyrethroid pesticides. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 209, 221–233.)

xiv J. Thumulla, C. Kroczeck, F. Schrettl, A Nitsopoulos, A. Friedle: Vorhaben des GerES (2023-2024) - Untersuchung von Hausstaub auf Phthalate, Ersatzstoffe für Phthalate und Flammschutzmittel sowie die Identifizierung neuerer Stoffe, REFOPLAN Forschungskennzahl 3718 61 201 0, Veröffentlichung in Vorbereitung

xv Lanphear BP, Matte TD, Rogers J, Clickner RP, Dietz B, Bornschein RL, Succop P, Mahaffey KR, Dixon S, Galke W, et al.: The Contribution of Lead-Contaminated House Dust and Residential Soil to Children's Blood Lead Levels: A Pooled Analysis of 12 Epidemiologic Studies. *Environ Res* 1998, 79:51–68

xvi Bundesamt für Risikobewertung (BfR) und Umweltbundesamt: BfR und UBA empfehlen, den Einsatz von Organozinnverbindungen in Verbraucherprodukten weiter zu begrenzen - Aktualisierte gemeinsame Stellungnahme* Nr. 032/2008 des UBA und des BfR vom 05. Februar 2008, https://www.bfr.bund.de/cm/343/bfr_und_uba_empfehlen_den_einsatz_von_organozinnverbindungen_in_verbraucherprodukten_weiter_zu_begrenzen.pdf

xvii Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V. AGÖF-Leitfaden "Hausstaubuntersuchungen auf chemische Parameter" - Mittel- und schwerflüchtige organische Verbindungen (SVOC) und Schwermetalle. [February 13, 2024]; https://www.agoef.de/fileadmin/user_upload/dokumente/orientierungswerte/AGOEF-Leitfaden-Hausstaubuntersuchungen-final-2020.pdf.

xviii Fromme H, Dreyer A, Dietrich S, Fembacher L, Lahrz T, Völkel W. Neutral polyfluorinated compounds in indoor air in Germany--the LUPE 4 study. *Chemosphere* 2015;139:572–8.

xix <https://foreverpollution.eu/>, Abfrage vom 25.05.2025

xx efsa - Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit: PFAS in Lebensmitteln: Risikobewertung und Festlegung einer tolerierbaren Aufnahmemenge durch die EFSA, veröffentlicht 19.09.2020, <https://www.efsa.europa.eu/de/news/pfas-food-efsa-assesses-risks-and-sets-tolerable-intake>

xxi F. Kalberlah, M. Hasauer und K.Schneider: Methodische Beschreibung des F+E-Vorhabens Basisdaten Toxikologie für umweltrelevante Stoffe zur Gefahrenbeurteilung bei Altlasten, in Gefährdungabschätzung von Umweltschadstoffen, Hrsg. T. Eikmann, U. Heinrich, B. Heinzow, R. Konietzka. Ge 2/99

xxii efsa - Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit: Gemisch-Methodik rüstet EFSA für Bewertung mehrerer chemischer Stoffe, veröffentlicht am 25.03.2019, <https://www.efsa.europa.eu/de/press/news/190325>, Abfrage vom 25.05.2025

xxiii efsa - Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit: Guidance on harmonised methodologies for human health, animal health and ecological risk assessment of combined exposure to multiple chemicals

xxiv MSD Manual, Ausgabe für Patienten: Pica, Stand Sept. 2022, <https://www.msmanuals.com/de-de/heim/psychische-gesundheitsst%C3%B6rungen/essst%C3%B6rungen/pica>, Abfrage vom 25.05.2025

^{xxv} Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit: Human-Studie zur Aufnahme von Weichmachern nach oraler Gabe von Hausstaub, https://www.lgl.bayern.de/gesundheit/umweltbezogener_gesundheitsschutz/projekte_a_z/tox_weichmacher_hausstaub.htm , Abfrage vom 25.05.2025

^{xxvi} Bundesamt für Risikobewertung (BfR) und Umweltbundesamt: BfR und UBA empfehlen, den Einsatz von Organozinnverbindungen in Verbraucherprodukten weiter zu begrenzen - Aktualisierte gemeinsame Stellungnahme* Nr. 032/2008 des UBA und des BfR vom 05. Februar 2008,

^{xxvii} S. Klenow, A. Heiland u. G. Heinemeyer: Schadstoffe im Hausstaub: Verbesserung der gesundheitlichen Bewertung durch Ermittlung der tatsächlichen Staubaufnahme von Kindern und Erwachsenen, S. 58, Im Auftrag des Umweltbundesamtes 02/2016, <https://media.frag-den-staat.de/files/foi/484189/bfr-hausstaub-forschungsprojekt.pdf> .

^{xxviii} A. Murawski et al.: Körperliche Belastung mit PFAS bei Kindern und Jugendlichen – Ergebnisse aus GerES V, Forum für den Öffentlichen Gesundheitsdienst 2022, <https://www.bfr-akademie.de/media/wysiwyg/2022/oegd2022/koerperliche-belastung-mit-pfas--bei-kindern-und-jugendlichen-ergebnisse-aus-gerer-v.pdf>, Abfrage vom 25.05.2025