

TEXTE

62/2026

Zwischenbericht

Gehalte von Chlor, PCDD/PCDF und dl-PCB in Aschen aus privater Holzfeuerung (Kleinfeuerungsanlagen) und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen

von:

Alexander Potrykus, Klaudija Cipris, Elisabeth Zettl, Margit Kühnl, Letizia Fratini
Ramboll Deutschland GmbH, München

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 62/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl (FKZ) 3724 33 705 0

Zwischenbericht

Gehalte von Chlor, PCDD/PCDF und dl-PCB in Aschen aus privater Holzfeuerung (Kleinfeuerungsanlagen) und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen

von

Alexander Potrykus, Klaudija Cipris, Elisabeth Zettl,
Margit Kühnl, Letizia Fratini
Ramboll Deutschland GmbH, München

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Ramboll Deutschland GmbH
Werinherstraße 79
81541 München

Abschlussdatum:

Februar 2026

Redaktion:

Fachgebiet III 1.5 "Abfallwirtschaft, grenzüberschreitende Abfallverbringung"
Mareike Röhreich

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8344>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Gehalte von Chlor, PCDD/PCDF und dl-PCB in Aschen aus privater Holzfeuerung (Kleinf Feuerungsanlagen) und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen

PCDD/F und dl-PCB sind sogenannte „Persistente organische Schadstoffe“ (engl. Persistent organic pollutants; im Folgenden „POP“) und als solche, Gegenstand völkerrechtlicher Übereinkommen mit dem übergreifenden Ziel, Produktion, Verwendung und Freisetzung von POP so weit möglich zu reduzieren bzw. zu beenden. Die Umsetzung in der Europäischen Union erfolgt durch die Verordnung (EU) 2019/1021 vom 20. Juni 2019 (EU POP-Verordnung).

Da die dl-PCB toxikologische Eigenschaften haben, die denen von PCDD/F sehr ähnlich sind, wurden in der EU POP-Verordnung diese dioxinähnlichen Verbindungen in den bestehenden Gruppeneintrag für PCDD/F aufgenommen. Mit dieser Änderung wird für die PCDD/F und dl-PCB ein gemeinsamer Schwellenwert festgelegt, ab dem Abfälle nach Artikel 7 der EU POP-VO zu bewirtschaften und der POP-Gehalt zu zerstören ist (unterer POP-Grenzwert 5 µg/kg statt bisher 15 µg/kg). Die Mitgliedsstaaten sind aufgefordert, Daten über den Gehalt an PCDD/F sowie dl-PCB in Asche und Ruß aus privaten Haushalten sowie Flugasche aus Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromerzeugung bis 1. Juli 2026 zu erheben.

Der vorliegende Bericht soll hierzu einen Beitrag aus deutscher Sicht liefern, sowie Grundlagen zur Beantwortung der Frage, ob eine weitere Absenkung des Grenzwertes unter Berücksichtigung des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts machbar ist. Des Weiteren sollen die für Deutschland ermittelten Gehalte von PCDD/F und dl-PCB vor dem Hintergrund der abgesenkten Grenzwerte in der EU POP Verordnung für diese Verbindungen diskutiert werden.

Hierzu wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und zur Erhebung von Daten zu Gehalten von PCDD/F und dl-PCB in Aschen von deutschen Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen wurden Beprobungen an 20 Kleinf Feuerungsanlagen sowie an 10 mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen vorgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Grobaschen i.d.R. sehr niedrig belastet sind und Flugaschen grundsätzlich höhere Konzentrationen aufweisen, die jedoch in der Regel deutlich unterhalb bestehender regulatorischer Grenzwerte liegen. Hohe Konzentrationen, die in Einzelfällen im Bereich oder über den Grenzwerten liegen können, treten bei den beprobten Anlagen ausschließlich im Zusammenhang mit der Verbrennung von Altholz oder anderen be- oder verarbeiteten Hölzern auf. Der größte Anteil der Toxizität wird sowohl in der Grob- als auch in der Flugasche durch PCDD/F verursacht. Der Anteil der dl-PCB liegt in der Regel bei wenigen Prozentpunkten. Obwohl die Grobaschen in erheblich größeren Mengen anfallen, befindet sich bei Kleinf Feuerungsanlagen etwa $\frac{1}{4}$ der gesamten TEQ-Fracht in den Grobaschen und $\frac{3}{4}$ in den Flugaschen.

Eine weitere Absenkung des Grenzwertes wäre möglich, sofern in den betreffenden Anlagen ausschließlich unbehandeltes oder nur mechanisch behandeltes Holz verbrannt wird.

Bei Anlagen, in denen Altholz der Kategorie A II oder andere, nicht nur mechanisch be- oder verarbeitete Hölzer verbrannt werden, können erhöhte PCDD/F und dl-PCB-Gehalte auftreten.

Es wäre zu prüfen, ob ein weiter gesenkter Grenzwert in solchen Fällen durch eine bessere Kontrolle des Brennstoffes einzuhalten ist. Eine Absenkung des Grenzwertes müsste dann mit entsprechenden Aufklärungsmaßnahmen einhergehen. Zusätzlich müssten in die Prüfung auch weitere PCDD/F und dl-PCB-Quellen mit einbezogen werden.

Abstract: Chlorine, PCDD/PCDF and dl-PCB content in ash from private wood-fired boilers (small combustion plants) and medium-sized biomass combustion plants

PCDD/Fs and dl-PCBs are persistent organic pollutants (POPs) and, as such, are subject to international agreements with the overarching goal of reducing or eliminating the production, use and release of POPs as far as possible. Implementation in the European Union is carried out by Regulation (EU) 2019/1021 of 20 June 2019 (EU POP Regulation).

Since dl-PCBs have toxicological properties very similar to those of PCDD/Fs, these dioxin-like compounds have been included in the existing group entry for PCDD/Fs in the EU POP Regulation. This adjustment establishes a common threshold for PCDD/Fs and dl-PCBs, above which waste must be managed in accordance with Article 7 of the EU POP Regulation and the POP content must be destroyed (lower POP limit 5 µg/kg instead of the previous 15 µg/kg). Member States should collect data on the content of PCDD/F and dl-PCB in ash and soot from private households and fly ash from biomass units for heat and power production by 1 July 2026.

This report aims to contribute to this data collection from a German perspective and to provide a basis for answering the question of whether a further reduction of the limit value is feasible, taking into account scientific and technical progress. Furthermore, the levels of PCDD/Fs and dl-PCBs identified for Germany are to be discussed against the background of the reduced limit values in the EU POP Regulation for these compounds.

To this end, a literature review was conducted, and samples were taken from 20 small combustion plants and 10 medium-sized biomass combustion plants to collect data on PCDD/F and dl-PCB levels in ash from German small combustion plants and medium-sized biomass combustion plants.

The results show that coarse ash is generally very low in contamination and fly ash generally contains higher concentrations, but these are usually well below existing regulatory limits. High concentrations, which in individual cases may be at or above the limit values, occur at the sampled plants exclusively in connection with the combustion of waste wood or other processed wood. The largest proportion of toxicity in both, coarse ash and fly ash, is caused by PCDD/Fs. The proportion of dl-PCBs is usually a few percentage points. Although coarse ash is produced in considerably larger quantities, in small combustion plants approximately $\frac{1}{4}$ of the total TEQ load is found in coarse ash and $\frac{3}{4}$ in fly ash.

A further reduction in the limit value would be possible if only untreated or exclusively mechanically treated wood would be burned in the plants concerned.

At plants that burn waste wood of category A II or other wood that has not exclusively been treated or processed mechanically elevated PCDD/F and dl-PCB levels can occur.

It would have to be examined whether a further reduction in the limit value can be achieved in such cases through better control of the fuel. A reduction of the limit value would then have to be accompanied by appropriate awareness raising measures. In addition, other sources of PCDD/Fs and dl-PCBs would also have to be included in the assessment.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	14
Zusammenfassung.....	17
Summary	24
1 Hintergrund und Zielsetzung.....	30
1.1 Hintergrund.....	30
1.2 Zielsetzung	34
2 Betrachtung der Ausgangssituation (Literaturrecherche)	35
2.1 Betrachtete Stoffe.....	35
2.2 Anlagen und Brennstoffe im Fokus.....	38
2.2.1 Kleinfeuerungsanlagen	38
2.2.2 Mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen.....	40
2.3 Ergebnisse	41
2.3.1 Kleinfeuerungsanlagen	46
2.3.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen	46
2.3.1.2 Festbrennstoffkessel.....	49
2.3.1.3 Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe.....	51
2.3.2 Mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen.....	52
3 Auswahl relevanter Anlagen in Deutschland, Probenahme und Analytik	53
3.1 Kleinfeuerungsanlagen	53
3.1.1 Auswahl.....	53
3.1.2 Durchführung der Probenahme.....	55
3.2 Mittelgroße Feuerungsanlagen.....	57
3.2.1 Auswahl.....	57
3.2.2 Durchführung der Probenahme.....	57
3.3 Verwendete Probeanalytik	60
3.3.1 Probenvorbereitung und Homogenisierung.....	60
3.3.2 Trockenmasse	60
3.3.3 PCDD/F und dl-PCB	60
3.3.4 Chlor-Gehalt.....	62
4 Auswertung der Ergebnisse.....	63
4.1 Ergebnisse der Laboranalyse	63

4.1.1	Kleinfeuerungsanlagen	63
4.1.1.1	Einzelraumfeuerungsanlagen	63
4.1.1.2	Festbrennstoffkessel.....	68
4.1.2	Mittelgroße Feuerungsanlagen	74
4.2	Durchschnittliche PCDD/F und dl-PCB Gehalte.....	78
4.2.1	Kleinfeuerungsanlagen	78
4.2.1.1	Einzelraumfeuerungsanlagen	78
4.2.1.2	Festbrennstoffkessel.....	79
4.2.1.3	Kessel der holzbe- und verarbeitenden Betriebe	80
4.2.2	Mittelgroße Feuerungsanlagen	80
4.3	Schadstofffrachten.....	81
4.3.1	Aschemengen.....	82
4.3.1.1	Kleinfeuerungsanlagen	83
4.3.2	Resultierende Schadstofffrachten	87
4.3.2.1	Kleinfeuerungsanlagen	87
4.3.2.2	Fazit.....	89
5	Diskussion.....	90
5.1	Vergleich mit Werten aus Deutschland	90
5.1.1	Kleinfeuerungsanlagen	90
5.1.1.1	Einzelraumfeuerungsanlagen	90
5.1.1.2	Festbrennstoffkessel.....	90
5.1.2	Mittelgroße Feuerungsanlagen	91
5.2	Vergleich mit Werten aus anderen Ländern.....	91
5.2.1	Kleinfeuerungsanlagen	92
5.2.2	Mittelgroße Feuerungsanlagen	93
5.3	Vergleich mit Grenzwerten	95
5.3.1	Kleinfeuerungsanlagen	95
5.3.1.1	Einzelraumfeuerungsanlagen	95
5.3.1.2	Festbrennstoffkessel.....	96
5.3.2	Mittelgroße Feuerungsanlagen	97
5.4	Auswirkungen des geänderten Grenzwertes für PCDD/PCDF	98
6	Quellenverzeichnis	105
A	Anhang	109
A.1	Übersicht über den PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.....	109

A.2	Übersicht über den PCDD/F und dl-PCB Gehalt in Asche und Ruß aus Festbrennstoffkessel in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.	111
A.3	Übersicht über den PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.	121
A.4	Übersicht über den PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus dem holzverarbeitenden Betrieb in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.	124
B	Anhang	125
B.1	Vorgehensweise für eine repräsentative Probenahme von Grobasche und Flugasche aus Kleinfeuerungsanlagen Vorgehensweise für eine repräsentative Probenahme von Grobasche und Flugasche aus Kleinfeuerungsanlagen.....	125
B.2	Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“	128
C	Anhang	132
C.1	Anlagensteckbrief für mittelgroße Feuerungsanlagen	132
C.2	Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kategorien von POP.....	31
Abbildung 2.	Allgemeine Strukturformel von Dibenzodioxinen (links) und Dibenzofuranen (rechts).....	36
Abbildung 3:	Allgemeine Strukturformel von Polychlorierten Biphenylen ...	37
Abbildung 4:	Übersicht der Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe nach Baujahr bzw. Datum auf dem Typschild der Anlage (in Prozent).	39
Abbildung 5.	Kategorien von Aschefraktionen in Kleinfeuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen, wie im Rahmen des Projekts definiert	45
Abbildung 6:	Verbrennungstechnische Merkmale der untersuchte Kachelöfen Einsätze.....	47
Abbildung 7:	Skizze einer Kleinfeuerungsanlage: a) mit und b) ohne elektrostatischem Staubabscheider. Die Ascheentnahmestellen sind jeweils mit einem roten Kreis markiert.	56
Abbildung 8:	Skizze einer mittelgroßen Feuerungsanlage. Die Ascheentnahmestelle ist mit einem roten Kreis markiert.	58
Abbildung 9:	Konzentrationen in ng/kg TS (WHO ₂₀₀₅ TEQ) von PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB TEQ) inklusive BG in Grobasche und Flugasche aus Einzelraumfeuerungsanlagen. .	66
Abbildung 10:	Beitrag von PCDD/F und dl-PCB zum gesamt-TEQ in Asche aus Einzelraumfeuerungsanlagen.....	67
Abbildung 11:	Gesamt-TEQ in ng/kg TS (WHO ₂₀₀₅ TEQ) und Chlorgehalt in mg/kg TS.	67
Abbildung 12:	Konzentrationen, ng/kg TS (WHO ₂₀₀₅ TEQ) von PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB TEQ) inklusive BG in Grobasche und Flugasche aus Festbrennstoffkessel.....	72
Abbildung 13:	Beitrag von PCDD/F und dl-PCB zum gesamt-TEQ in Asche aus Festbrennstoffkesseln.	73
Abbildung 14:	Gesamt-TEQ in ng/kg TS (WHO ₂₀₀₅ TEQ) und Chlorgehalt in mg/kg TS	74
Abbildung 15:	Beitrag von PCDD/F und dl-PCB zum gesamt-TEQ in Asche von mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen.	77
Abbildung 16:	Korrelation zwischen dem gesamt-TEQ in ng/kg TS (WHO ₂₀₀₅ TEQ) und dem Chlorgehalt in mg/kg TS.	78
Abbildung 17:	Aschemengen aus Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland im Jahr 2020	84
Abbildung 18:	Aschemengen aus Festbrennstoffkesseln in Deutschland im Jahr 2020	86
Abbildung 19:	Aschemengen aus Kesseln der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe in Deutschland im Jahr 2020.....	86

Abbildung 20:	Gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) im Vergleich mit dem Grenzwert (5 µg/kg).	96
Abbildung 21:	Gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) von Festbrennstoffkesseln im Vergleich mit dem Grenzwert (5 µg/kg)	97
Abbildung 22:	Gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) von mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen im Vergleich zum Grenzwert (5 µg/kg).	98
Abbildung 23:	Typische Gehalte von Dioxinen und Furanen sowie die dl-PCB in landwirtschaftlich genutzten Böden.....	100
Abbildung 24:	Typische Gehalte von PCDD/F sowie die dl-PCB in der Auflage von Waldböden.	101
Abbildung 25:	Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“	128
Abbildung 26:	Anlagensteckbrief für mittelgroße Feuerungsanlagen.....	132
Abbildung 27:	Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Grenzwerte für PCDD/F und dl-PCB in Asche und Ruß aus privaten Haushalten	32
Tabelle 2:	Grenzwerte für PCDD/F und dl-PCB in Flugasche aus Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromerzeugung	32
Tabelle 3:	TEF für PCDD, PCDF und dl-PCB gemäß verschiedenen TEF-Konzepten.....	42
Tabelle 4:	Begriffe aus der Literatur, die den im Rahmen des Projekts definierten Begriffen zugeordnet sind.	45
Tabelle 5:	Einzelraumfeuerungsanlagen mit einer Nennleistung von 4,5 bis 10 kW (6 Anlagen).....	54
Tabelle 6:	Festbrennstoffkessel mit einer Nennwertleistung von 10 bis 38 kW (7 Anlagen)	54
Tabelle 7:	Festbrennstoffkessel mit einer Nennleistung von 30 bis 100 kW (7 Anlagen)	54
Tabelle 8:	Mittelgroße Biomassefeuerungsanlage	59
Tabelle 9:	Kenndaten des Verfahrens	61
Tabelle 10:	Details über die untersuchten Einzelraumfeuerungsanlagen mit einer Nennwertleistung von 4,5 bis 10,5 kW.	63
Tabelle 11:	Konzentrationen von Chlor (mg/kg TS) sowie PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB) Konzentrationen (ng/kg TS, WHO ₂₀₀₅ TEQ), jeweils exklusive und inklusive BG, in Grob- und Flugasche aus Einzelraumfeuerungsanlagen.....	64
Tabelle 12:	Details über die untersuchte Festbrennstoffkesseln mit einer Nennwärmeleistung von 10 bis 150 kW.....	68

Tabelle 13:	Konzentrationen von Chlor (mg/kg TS) sowie PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB) (ng/kg TS, WHO ₂₀₀₅ TEQ), jeweils exklusive und inklusive BG, in Grob- und Flugasche aus Festbrennstoffkessel mit einer Nennwertleistung von 10 bis 150 kW.....	69
Tabelle 14:	Details über die untersuchten mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen.....	74
Tabelle 15:	Konzentrationen von Chlor (mg/kg TS) sowie PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB) (ng/kg TS, WHO ₂₀₀₅ TEQ) in Flugasche aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen.	76
Tabelle 16:	PCDD/F und dl-PCB Gehalte in den analysierten Aschenproben aus Einzelraumfeuerungsanlagen. Alle Werte sind in ng TEQ/kg WHO ₂₀₀₅ TS angegeben.....	79
Tabelle 17:	PCDD/F und dl-PCB Gehalte in den analysierten Aschenproben aus Festbrennstoffkessel. Alle Werte sind in ng TEQ/kg WHO ₂₀₀₅ TS angegeben.....	79
Tabelle 18:	PCDD/F und dl-PCB Gehalte in den analysierten Aschenproben aus Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe. Alle Werte sind in ng TEQ/kg WHO ₂₀₀₅ TS angegeben.....	80
Tabelle 19:	Dioxin-Konzentrationen in den analysierten Flugaschenproben aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen. Alle Werte sind in ng TEQ/kg TS angegeben.....	81
Tabelle 20:	Typische Aschegehalte verschiedener Holzsortimente.....	82
Tabelle 21:	Verhältnis Grobasche zu Flugasche in Kleinfeuerungsanlagen	83
Tabelle 22:	Holzverbrauch in Einzelraumfeuerungsanlagen im Jahr 2020.	83
Tabelle 23:	Holzverbrauch in Festbrennstoffkessel im Jahr 2020.....	85
Tabelle 24:	PCDD/F und dl-PCB Fracht in Asche aus Einzelraumfeuerungsanlagen im Jahr 2020. Alle Werte in g TEQ WHO ₂₀₀₅	87
Tabelle 25:	PCDD/F und dl-PCB Fracht in Asche aus Festbrennstoffkessel im Jahr 2020. Alle Werte in g TEQ WHO ₂₀₀₅	88
Tabelle 26:	PCDD/F und dl-PCB Fracht in Asche aus Holzbe- und verarbeitenden Betriebe im Jahr 2020. Alle Werte in g TEQ WHO ₂₀₀₅	88
Tabelle 27:	Übersicht der gesamt-TEQ Gehalte (Σ PCDD/F & dl-PCB) in ng TEQ/kg (WHO ₂₀₀₅) in Grob und Flugascheproben aus Kleinfeuerungsanlagen in verschiedenen europäischen Ländern.....	92
Tabelle 28:	Übersicht der gesamt-TEQ (Σ PCDD/F & dl-PCB) in ng TEQ/kg (WHO ₂₀₀₅) in Ascheproben aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen in verschiedenen europäischen Ländern.....	94
Tabelle 29:	Aktuelle anwendbare Grenzwerte für PCDD/F und dl-PCB in Deutschland.....	103

Tabelle 30:	In der Literatur gefundene PNEC-Werte.	104
Tabelle 31:	PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland	109
Tabelle 32:	PCDD/F und dl-PCB Gehalt in Asche und Ruß aus Festbrennstoffkessel in Deutschland	111
Tabelle 33:	PCDD/F und dl-PCB Gehalt in Asche und Ruß aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in Deutschland	121
Tabelle 34:	PCDD/F Gehalt in Asche aus dem holzverarbeitenden Betrieb in Deutschland.....	124

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
BA	Brennraumasche
BG	Bestimmungsgrenze
BGA	Bundesgesundheitsamt
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BW	Baden-Württemberg
Cl	Chlor
CLRTAP	Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution
dl-PCB	dioxinähnlichen polychlorierten Biphenyle
EA	Elektrostatischer Abscheider
ERF	Einzelraumfeuerungsanlage
EU	Europäische Union
FA	Flugasche
FWL	Feuerungswärmeleistung
GA	Grobasche
GF	Gewebefilter
HHS	Holzhackschnitzel
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	1,2,3,4,6,7,8-Heptachlordibenzo-p-dioxin
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	1,2,3,4,6,7,8-Heptachlordibenzofuran
1,2,3,4,7,8-HxCDD	1,2,3,4,7,8-Hexachlordibenzo-p-dioxin
1,2,3,4,7,8-HxCDF	1,2,3,4,7,8-Hexachlordibenzofuran
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1,2,3,4,7,8,9-Heptachlordibenzofuran
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1,2,3,6,7,8-Hexachlordibenzo-p-dioxin
1,2,3,6,7,8-HxCDF	1,2,3,6,7,8-Hexachlordibenzofuran
1,2,3,7,8,9-HxCDD	1,2,3,7,8,9-Hexachlordibenzo-p-dioxin
1,2,3,7,8,9-HxCDF	1,2,3,7,8,9-Hexachlordibenzofuran
2,3,4,6,7,8-HxCDF	2,3,4,6,7,8-Hexachlordibenzofuran
HZH	Holzzentralheizung
I-TEQ	International Toxic Equivalents
k.A.	Keine Angabe
KF	Keramikfilter
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt

Abkürzung	Erläuterung
LAGA PN 98	LAGA Probenahmeprotokoll 98 (Sampling protocol by the German Working Group on Waste - <i>Länderarbeitsgemeinschaft Abfall</i>)
mg	Milligramm
MW	Megawatt
NA	Nicht analysiert
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NATO-CCMS	NATO-Committee on the challenges of the Modern Society
ND	Nicht detektiert
ng	Nanogramm
NWL	Nennwärmeleistung
OCDD	Octachlorodibenzo-p-dioxin
OCDF	Octachlorodibenzofuran
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
1,2,3,7,8-PeCDD	1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzo-p-dioxin
1,2,3,7,8-PeCDF	1,2,3,7,8-Pentachlorodibenzofuran
2,3,4,7,8-PeCDF	2,3,4,7,8-Pentachlorodibenzofuran
PCB 77	3,3',4,4'-Tetrachlorobiphenyl
PCB 81	3,4,4',5-Tetrachlorobiphenyl
PCB 105	2,3,3',4,4'-Pentachlorobiphenyl
PCB 114	2,3,4,4',5-Pentachlorobiphenyl
PCB 118	2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl
PCB 123	2',3,4,4',5-Pentachlorobiphenyl
PCB 126	3,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl
PCB 169	2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl
PCB 156	2,3,3',4,4',5'-Hexachlorobiphenyl
PCB 157	2,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl
PCB 167	3,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl
PCB 189	2,3,3',4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl
POP	Persistente organische Schadstoffe (eng. Persistent organic pollutants)
POP VO	Regulation (EU) 2019/1021 on persistent organic pollutants
PVC	Polyvinyl Chloride

Abkürzung	Erläuterung
PM0.1	Particulate Matter $\leq 0,1 \mu\text{m}$
PM1	Particulate Matter $\leq 1 \mu\text{m}$
PM2.5	Particulate Matter $\leq 2,5 \mu\text{m}$
PM10	Particulate Matter $\leq 10 \mu\text{m}$
RA	Rostasche
RBA	Rostasche + Brennraumasche
SA	Asche aus Schornstein
SVA	Asche aus Schornstein und Verbindungsstück
SÜ	Stockholmer Übereinkommens
TA	Technische Anleitung
TCDD	2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin
2,3,7,8-TeCDD	2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin
2,3,7,8-TeCDF	2,3,7,8-Tetrachlorodibenzofuran
TEF	Toxic Equivalency Factor
TEQ	Toxic Equivalent
TLLLR	Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum
TS	Trockene Substanz
TÜV SUD	Technischer Überwachungsverein Süddeutschland
UBA	Umweltbundesamt
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNEP	United Nations Environment Programme
VA	Asche aus Verbindungsstück
VO	Verordnung
WHO	World Health Organisation
ZIV	Zentralinnungsverband der Schornsteinfeger

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Der vorliegende Bericht befasst sich umfassend mit der Erhebung und Analyse von Daten zur Konzentration von polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/F) und dioxinähnlichen polychlorierten Biphenylen (dl-PCB) in Grob- und Flugaschen aus privater Holzfeuerung (Kleinfeuerungsanlagen) und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen in Deutschland.

PCDD/F und dl-PCB sind sogenannte „Persistente organische Schadstoffe“ (engl. Persistent organic pollutants; im Folgenden „POP“), das sind bestimmte Stoffe, die giftig sind, langfristig in der Umwelt verbleiben und tausende von Kilometern von ihrem ursprünglichen Herstellungs- oder Verwendungsort entfernt auffindbar sind. Sie stellen eine langfristige Bedrohung für die menschliche Gesundheit und Ökosysteme dar.

POP sind Gegenstand völkerrechtlicher Übereinkommen mit dem übergreifenden Ziel, Produktion, Verwendung und Freisetzung von POP so weit möglich zu reduzieren bzw. zu beenden. Die Umsetzung in der Europäischen Union erfolgt durch die Verordnung (EU) 2019/1021 vom 20. Juni 2019 (EU POP-Verordnung). Diese regelt in Artikel 7 die Bewirtschaftung von Abfällen, die POP enthalten. Abfälle, die die in Anhang IV aufgeführten POP oberhalb festgelegter Grenzwerte enthalten, werden nach Art. 7 (2) so beseitigt oder verwertet, „[...] dass die darin enthaltenen POP zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden, damit die verbleibenden Abfälle und Freisetzungen nicht die Eigenschaften von POP aufweisen“.

Da die dl-PCB toxikologische Eigenschaften haben, die denen von PCDD/F sehr ähnlich sind, und um die aggregierte Wirkung aller dl-PCB zu berücksichtigen, wurden in der EU POP-Verordnung diese dioxinähnlichen Verbindungen in den bestehenden Gruppeneintrag für PCDD/F aufgenommen. Mit der Änderung wird somit für die PCDD/F und dl-PCB ein gemeinsamer Schwellenwert festgelegt, ab dem Abfälle nach Artikel 7 der EU POP-VO zu bewirtschaften und der POP-Gehalt zu zerstören ist (unterer POP-Grenzwert 5 µg/kg¹ statt bisher 15 µg/kg).

Weiterhin sind die Mitgliedsstaaten aufgefordert, Daten über den Gehalt an PCDD/F sowie dl-PCB in Asche und Ruß aus privaten Haushalten sowie Flugasche aus Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromerzeugung bis 1. Juli 2026 zu erheben.

Der vorliegende Bericht soll hierzu einen Beitrag aus deutscher Sicht liefern, sowie Grundlagen zur Beantwortung der Frage, ob eine weitere Absenkung des Grenzwertes unter Berücksichtigung des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts machbar ist. Des Weiteren sollen die für Deutschland ermittelten Gehalte von PCDD/F und dl-PCB vor dem Hintergrund der abgesenkten Grenzwerte in der EU POP-Verordnung für diese Verbindungen diskutiert werden.

Ausgangssituation

Zur Betrachtung der Ausgangssituation wurde eine Recherche deutschsprachiger Literatur durchgeführt, um den Stand des Wissens zur Belastung von Grob- und Flugaschen aus deutschen Anlagen mit PCDD/F und dl-PCB und Zusammenhänge zwischen Schadstoffgehalt, Brennstoff und Art der Verbrennung darzustellen.

Im Fokus der Recherchen standen Kleinfeuerungsanlagen und mittelgroße Biofeuerungsanlagen in Deutschland.

Kleinfeuerungsanlagen sind Anlagen, die in der 1. BImSchV reguliert sind mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 1 Megawatt (MW). Dabei werden

¹ 5 µg/kg = 5.000 ng/kg

Einzelraumfeuerungsanlagen und Festbrennstoffkessel unterschieden.

Einzelraumfeuerungsanlagen sind Heizgeräte, die zur Beheizung einzelner Räume verwendet werden. Dazu gehören beispielsweise Kaminöfen, Kachelöfen, offene Kamine und Pelletöfen. In Deutschland gab es im Jahr 2023 rund 11,7 Millionen Einzelraumfeuerungsanlagen.

Festbrennstoffkessel sind Heizkessel, die ebenfalls mit festen Brennstoffen (z. B. Holz, Pellets, Kohle) betrieben werden, aber speziell zur Beheizung eines gesamten Gebäudes ausgelegt sind. In Deutschland gab es im Jahr 2023 rund 1,13 Millionen Festbrennstoffkessel. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden auch Betriebe der Holzbearbeitung oder Holzverarbeitung betrachtet, die bestimmte Brennstoffe einsetzen (bestimmtes gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste bzw. Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste), bei denen der Verdacht besteht, dass die Aschen möglicherweise relativ hoch mit PCDD/F und dl-PCB belastet sind.

Mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen im Rahmen dieses Projekts sind Anlagen, die im Geltungsbereich der 44. BImSchV liegen. Dies sind Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung zwischen 1 und 50 Megawatt (MW) sowie genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung unter 1 MW. Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen unter 1 MW fallen unter die 1. BImSchV, während Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von 50 MW oder mehr in der Regel in der 13. BImSchV geregelt sind. In Deutschland gibt es etwa 40.000 mittelgroße Feuerungsanlagen, davon ca. 800 Anlagen für feste Biomasse.

Bezüglich Einzelraumfeuerungsanlagen zeigt die Literaturrecherche, dass die PCDD/F-Gehalte je nach Art der Verbrennungsanlage, dem verwendeten Brennstoff und der Aschefraktion variieren. In Grobaschen aus Einzelraumfeuerungsanlagen sind die PCDD/F-Gehalte in der Regel relativ niedrig (<100 ng I-TEQ/kg). In der Flugasche sind die PCDD/F-Gehalte deutlich höher und können bis zu mehrere 1.000 ng I-TEQ/kg betragen. In einigen Studien wurden hohe Werte von über 10.000 ng I-TEQ/kg gemessen.

Bei Festbrennstoffkesseln hängen die PCDD/F-Gehalte in Aschen und Ruß von der Art des Brennstoffs und der Verbrennungstechnologie ab. In der Grobasche sind die PCDD/F-Gehalte in der Regel relativ niedrig (<100 ng I-TEQ/kg), insbesondere bei der Verbrennung von unbehandeltem Holz. Mit zunehmender Heizlast sinken die PCDD/F-Gehalte in der Asche. In der Flugasche sind die PCDD/F-Gehalte in der Regel moderat (<1.000 ng I-TEQ/kg). In Einzelfällen können die Gehalte auch über 1.000 ng I-TEQ/kg liegen. Bei der Verbrennung von anderen Biomassen als Holz, wie z. B. Stroh, sind teilweise höhere Werte zu finden, die sogar mehrere 1.000 ng I-TEQ/kg erreichen können.

Den Ergebnissen der Literaturrecherche zufolge, waren in Aschen, die bei Holzverarbeitendem Gewerbe gewonnen wurden, die PCDD/F Gehalte der Grobasche sehr niedrig (< 1 ng/kg TEQ BGA), die der Flugasche niedrig (< 1.000 ng/kg TEQ BGA).

Die Aschen aus mittelgroßen Feuerungsanlagen sind der Literatur zufolge generell niedriger belastet als bei Kleinf Feuerungsanlagen. Während Aschen aus der Verbrennung von unbehandelten Holzbrennstoffen niedrige Toxizitätswerte (<1 ng TEQ/kg) aufweisen, führt die Verbrennung von behandelten Hölzern zu höheren Werten.

Auswahl relevanter Anlagen, Probenahme und Analytik

Zur Erhebung von Daten zu Gehalten von PCDD/F und dl-PCB in Aschen von deutschen Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen wurden Beprobungen an 20 Kleinf Feuerungsanlagen sowie an 10 mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen durchgeführt.

Bei der Auswahl der 20 Kleinf Feuerungsanlagen wurde darauf geachtet, dass diese eine möglichst breite und typische Auswahl des Anlagenbestands in Deutschland widerspiegeln. Insgesamt

wurden 6 Einzelraumfeuerungsanlagen sowie 14 Festbrennstoffkessel aus verschiedenen Regionen Deutschlands beprobt.

Bei der Auswahl der mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen wurden anfangs Kriterien zur Auswahl der Anlagen für den gesamten Anlagenpark in Deutschland aufgestellt. Es wurden gezielt Anlagen einbezogen, bei denen mit höheren PCDD/F-Gehalten in den Aschen zu rechnen war, wie z. B. mit Altholz A II, Spanplatten oder Getreide als Brennstoff. Es wurden ausschließlich Flugaschen beprobt. Es handelt sich bei den ausgewählten Anlagen nicht um eine repräsentative Stichprobe.

Die Probenahmen erfolgten in Anlehnung an die LAGA PN 98 in der ersten Hälfte des Jahres 2025. Die Ascheproben wurden auf PCDD/F, dl-PCB und Gesamt-Chlor analysiert. Die Quantifizierung der PCDD/F und dl-PCB-Kongenere erfolgte mittels Gaschromatografie in Kopplung mit einem Tandem-Massenspektrometer (GC-MS/MS). Das durchführende Labor ist für die Bestimmung von POP wie PCDD/F und PCB gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert.

Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Laboranalysen werden im Bericht getrennt nach den Anlagenkategorien Kleinfeuerungsanlagen (Einzelraumfeuerungsanlagen, Festbrennstoffkessel, Kessel der holzbearbeitenden und Holzverarbeitenden Betriebe) und mittelgroßen Feuerungsanlagen dokumentiert und graphisch dargestellt sowie im Zusammenhang mit den Details zu den beprobten Anlagen diskutiert.

Einzelraumfeuerungsanlagen

Es zeigt sich ein klarer Trend: Die Flugasche enthält deutlich höhere Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB als die Grobasche. Die gefundenen Konzentrationen variieren stark zwischen den Anlagen und lassen sich nicht eindeutig auf einzelne Einflussfaktoren wie Brennstoffart, Anlagenalter oder Bauweise zurückführen.

In der Grobasche waren die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB überwiegend nicht nachweisbar. Unter Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen bewegt sich der berechnete gesamt-TEQ-Wert zwischen 1,05 und 1,12 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅). In der Flugasche wurden deutlich höhere Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB gemessen (max. 217 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅)), die dennoch weiter unterhalb des Grenzwerts liegen.

Der weitaus größte Anteil der Toxizität (ausgedrückt als gesamt-TEQ) wird durch PCDD/F verursacht. Im Durchschnitt trugen die PCDD/F in den Flugaschenproben rund 97% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei etwa 3% lag. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Grobasche. Im Durchschnitt trugen die PCDD/F in den Grobascheproben rund 84% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei 16% lag.

Festbrennstoffkessel

Wie bei den Einzelraumfeuerungsanlagen liegen die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in der Grobasche niedriger als in der Flugasche.

Die meisten Werte für Grobaschen liegen unterhalb ~2,5 ng TEQ/kg TS. Nur wenige Proben enthalten leicht erhöhte Konzentration von PCDD/F und dl-PCB (max. 100 ng TEQ/kg TS).

In der Flugasche wurden deutlich höhere gesamt-TEQ Konzentrationen gefunden. Bei den kleineren Kesseln bis 38 kW bis zu 372 ng TEQ/kg TS (PCDD/F & dl-PCB). Bei den größeren Kesseln ab 38 kW, besonders mit Bezug zum Holzverarbeitenden Gewerbe, waren die TEQ-Werte auffällig hoch. Die höchsten gesamt-TEQ Konzentrationen (maximal 13.643 ng/kg TS (PCDD/F & dl-PCB)) wurden in den Flugaschen von Anlagen festgestellt, in denen Brennstoffe

wie Spanplattenreste oder Holz aus dem Holzverarbeitenden Gewerbe verfeuert wurden. Im Gegensatz dazu führten naturbelassene Hölzer als Brennstoff zu deutlich niedrigeren TEQ-Werten im Bereich von 1,75 bis 2,47 ng/kg TS.

Der weitaus größte Anteil der Toxizität wird durch PCDD/F verursacht. Im Durchschnitt trugen die PCDD/F in den Flugaschenproben rund 99% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei etwa 1% lag. Bei der Grobasche trugen die PCDD/F in den Grobascheproben rund 97% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei 3% lag.

Mittelgroße Feuerungsanlagen

Bei der Auswahl der Anlagen wurden gezielt Anlagen einbezogen, bei denen mit höheren PCDD/F- und dl-PCB-Gehalten in den Aschen zu rechnen ist. Erwartungsgemäß zeigen die ermittelten Konzentrationswerte der Flugaschen aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen daher insgesamt deutlich höhere Median- und Mittelwerte (119 bzw. 846 ng TEQ/kg TS; Maximalwert 5.230 ng TEQ/kg TS) als jene aus Kleinf Feuerungsanlagen, mit Ausnahme der Flugaschen aus den Kesseln des Holzbe- und verarbeitenden Gewerbes.

Fazit

Grundsätzlich weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Grobaschen i.d.R. sehr niedrig belastet sind (max. 100 ng TEQ/kg TS) und Flugaschen grundsätzlich höhere Konzentrationen aufweisen, die in der Regel deutlich unterhalb bestehender regulatorischer Grenzwerte liegen. Hohe Konzentrationen, im Bereich von mehreren tausend ng TEQ/kg TS, treten bei den beprobten Anlagen ausschließlich im Zusammenhang mit der Verbrennung von Altholz oder anderen be- oder verarbeiteten Hölzern auf. Dort können in einzelnen Fällen auch PCDD/F und dl-PCB TEQ-Werte oberhalb des bestehenden Grenzwertes von 5.000 ng/kg TEQ vorkommen.

Der größte Anteil der Toxizität wird sowohl in der Grob- als auch in der Flugasche durch PCDD/F verursacht. Der Anteil der dl-PCB liegt in der Regel bei wenigen Prozentpunkten.

Schadstofffrachten

Zum Zweck der Auswertung und der Diskussion der Auswirkung einer möglichen Änderung des Anhang IV Grenzwertes für PCDD/F und dl-PCB der EU POP-Verordnung, wurden die in den Aschen aus den Kleinf Feuerungsanlagen enthaltenen Schadstofffrachten ermittelt. Diese können durch Multiplikation der in den Aschen vorliegenden durchschnittlichen oder mittleren Konzentration mit den Aschemengen errechnet werden.

Die Berechnungen wurden für die Kleinf Feuerungsanlagen, getrennt nach Anlagentyp, für Einzelraumfeuerungsanlagen, Festbrennstoffkessel sowie für die Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe sowie getrennt für Grob- und Flugasche durchgeführt.

Bezüglich der mittelgroßen Feuerungsanlagen ist eine Abschätzung der Frachten an PCDD/F und dl-PCB auf Grundlage der vorliegenden Daten aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll möglich.

In Summe liegen die jährlichen gesamt-TEQ-Frachten für PCDD/F und dl-PCB in Aschen aus den betrachteten Kleinf Feuerungsanlagen im niedrigen einstelligen Grammbereich. Der weitaus überwiegende Anteil der TEQ-Fracht stammt sowohl in der Grobasche als auch in der Flugasche aus der PCDD/F Belastung. Den im Bericht angestellten Schätzungen zufolge betragen die Frachten in den Grobaschen (Aschemenge ~129 kt) insgesamt ca. 0,6 g und in den Feinaschen (Aschemenge ~8,7 kt) ca. 1,8 g (jeweils basierend auf Mittelwerten). Daraus lässt sich auch schließen, dass etwa $\frac{1}{4}$ der gesamt-TEQ Fracht in den Grobaschen und $\frac{3}{4}$ in den Flugaschen enthalten ist.

Vergleich der Ergebnisse mit Literaturangaben

Ein Vergleich der in diesem Vorhaben gemessenen PCDD/F und dl-PCB-Konzentrationen in Grob- und Flugasche mit Werten aus der Fachliteratur für Deutschland zeigt, dass die Ergebnisse der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Untersuchungen grundsätzlich mit den Informationen aus der Literaturstudien übereinstimmen, auch wenn sie im Einzelnen abweichen können.

In einem weiteren Vergleich wurden die gemessenen mit entsprechenden Werten aus anderen europäischen Ländern verglichen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Gehalte in Deutschland im Rahmen der aus anderen Ländern berichteten Werte liegen. Rußproben aus Kaminen kleiner Holzfeuerungsanlagen zeigen deutlich, dass die Belastung mit PCDD/F stark vom eingesetzten Brennstoff abhängt. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz und etwa Papier zum Anzünden sind die PCDD/F Konzentrationen relativ gering. Sobald jedoch behandelte oder verunreinigte Hölzer, Kunststoffe, Alufolie, Karton oder Haushaltabfälle mitverbrannt werden, steigen die gemessenen Werte stark an. Dies erklärt teilweise die hohen PCDD/F Werte, die in der Literatur aus anderen Ländern berichtet werden.

In diesem Vorhaben wurden bei mittelgroßen Feuerungsanlagen Werte gemessen, die teilweise um mehrere Größenordnungen über denen liegen, die für Holzverbrennung in der untersuchten Literatur berichtet wurden. Daraus lässt sich allerdings nicht schließen, dass die Belastung dieser Aschen in Deutschland höher wäre als in den anderen betrachteten Ländern. Der Grund für die in Deutschland vergleichsweise hohen Konzentration in der Flugasche liegt darin, dass für die Erhebung gezielt Anlagen beprobt wurden, bei denen aufgrund der eingesetzten Brennstoffe höhere PCDD/F und dl-PCB Konzentrationswerte in den Flugaschen zu erwarten waren. Alle in Deutschland gefundenen erhöhten Konzentrationswerte (478 bis 5.230 ng TEQ/kg) stehen im Zusammenhang mit der Verbrennung von Altholz der Kategorie II. Alle anderen Konzentrationswerte von Flugaschen aus den in Deutschland untersuchten Anlagen, in denen Holzhackschnitzel, Holzproduktionsreste, Rinde und Holzstaub oder Getreide verbrannt werden, liegen in ähnlichen Bereichen wie in den anderen betrachteten Ländern.

Diese Ergebnisse bezüglich der mittelgroßen Feuerungsanlagen weisen darauf hin, dass insbesondere bei der Verbrennung von Altholz Grenzwertüberschreitungen in den Flugaschen in einzelnen Fällen wahrscheinlich sind. Als Ursache kommen Verunreinigungen im Altholz in Frage, obwohl keine halogenorganischen Verbindungen enthalten sein sollten. Dennoch kann z. B. PVC häufig als typische Verunreinigung in Altholz vorkommen. Es trägt zur Gegenwart von Chlor bei der Verbrennung bei. Dadurch wird die Entstehung von PCDD/F und dl-PCB begünstigt und eine vergleichsweise hohe TEQ-Belastung der Aschen kann resultieren. Es ist daher wichtig, darauf zu achten, dass zur Verbrennung eingesetztes Altholz möglichst frei von Verunreinigungen wie z. B. PVC ist, denn dann würden die TEQ-Werte vermutlich niedriger liegen. Es wäre daher sinnvoll, wenn Betreiber und Behörden bei Anlagen die Althölzer verbrennen, sowohl die Belastung der Flugaschen kontrollieren als auch die Reinheit (im Sinne von Verunreinigungen z. B. mit PVC) der Brennstoffe besser überwachen würden.

Vergleich mit Grenzwerten und Auswirkungen geänderter Grenzwerte

Ein Vergleich der im Rahmen dieses Vorhabens gemessenen Summenkonzentrationen von PCDD/F und dl-PCB mit dem TEQ-Grenzwert von 5 µg/kg (5.000 ng/kg) zeigt, dass bei allen Anlagentypen die gemessenen gesamt-TEQ-Werte in der Regel deutlich unter dem Grenzwert von 5 µg/kg, und in den meisten Fällen auch unter einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg liegen.

In den Proben aus Einzelraumfeuerungsanlagen liegen alle Werte deutlich unter 1 µg/kg.

Bei den Festbrennstoffkesseln liegt ein gesamt-TEQ-Wert eine Flugasche mit 13.600 ng/kg TS über dem Grenzwert von 5 µg/kg. Hier wurden Reste beschichteter, lackierter oder verleimter Hölzer (Spanplatten) verbrannt. Zwei weitere gesamt-TEQ-Werte überschreiten einen Wert von 1 µg/kg, bleiben aber deutlich unter dem Grenzwert. Auch alle übrigen Ascheproben liegen deutlich darunter.

Bei den Flugaschen der mittelgroßen Feuerungsanlagen liegt ein Wert über dem Grenzwert von 5 µg/kg und ein Wert überschreitet 1 µg/kg, bleibt aber deutlich unter dem Grenzwert. Beide Werte stehen im Zusammenhang mit der Verbrennung von Altholz der Kategorie II. Die restlichen Proben liegen deutlich unter 1 µg/kg.

Auswirkungen des geänderten Grenzwertes

Die EU POP-Verordnung regelt in Artikel 7 die Bewirtschaftung von Abfällen, die POP enthalten. Abfälle, die die in Anhang IV aufgeführten POP oberhalb festgelegter Grenzwerte enthalten, werden nach Art. 7 (2) so beseitigt oder verwertet, „[...] dass die darin enthaltenen POP zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden, damit die verbleibenden Abfälle und Freisetzungen nicht die Eigenschaften von POP aufweisen“. Die Grenzwerte des Anhang IV werden regelmäßig überprüft und an den technischen Fortschritt angepasst.

Aufgrund der recherchierten Daten und der in den beprobten Anlagen gemessenen PCDD/F und dl-PCB Gehalte lässt sich das Ausmaß der Belastung in Aschen aus Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen in Deutschland abschätzen. Auf dieser Grundlage kann diskutiert werden, ob die Absenkung des Grenzwertes für Aschen aus Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen sinnvoll ist.

Die Diskussion erfolgt unter Berücksichtigung einer etablierten Methode zur Ableitung von Grenzwerten nach Artikel 7(4)a der EU POP-Verordnung. Um die Bandbreite möglicher Grenzwerte einzuschränken, werden vier untere (die die Grenzwertfestsetzung nach unten begrenzen) sowie zwei obere (die die Grenzwertfestsetzung nach oben begrenzen) Begrenzungskriterien für die Grenzwertableitung herangezogen.

Die Kriterien werden im Bericht im Einzelnen diskutiert und es zeigt sich, dass alle Kriterien für beide Werte (den Grenzwert von 5 µg/kg sowie auch für einen hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg) erfüllt sind. Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- ▶ Geeignete Analyseverfahren zur Kontrolle beider Werte sind wirtschaftlich verfügbar, sofern es sich um vereinzelte Stichproben handelt.
- ▶ Beide Werte liegen deutlich über der Hintergrundbelastung von Böden in Deutschland. Bodenaushub mit üblicher Hintergrundbelastung wäre nicht vom POP-Abfallregime betroffen.
- ▶ Von den Ascheproben, die im Rahmen dieser Studie untersucht wurden, überschreiten nur wenige einzelne Proben einen gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB), der über dem Grenzwert von 5 µg/kg oder einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg liegt. Die erhöhten Werte stehen im Zusammenhang mit der Verbrennung von Holz aus dem Holzbe- oder verarbeitenden Gewerbe oder von Altholz der Kategorie A II. Die anfallenden Flugaschemengen und Volumina, die gegebenenfalls als POP-Abfall zu behandeln wären, sind, solange eine Vermischung von Grob- und Feinasche vermieden wird, gering. Beseitigungs- und Verwertungskapazitäten sind realistisch verfügbar. Gegebenenfalls erforderliche Entsorgungskosten sind wirtschaftlich vertretbar. Zudem hätten Betreiber bei Überschreitungen des Grenzwerts auch die Möglichkeit, durch eine verbesserte Brennstoffkontrolle den Anfall von POP-Abfällen zu vermeiden.

- ▶ Beide Werte stehen nicht im Widerspruch zu bestehenden Grenzwerten.
- ▶ Eine Absenkung des Grenzwertes trägt dazu bei, dass mögliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit vermieden werden können.

Eine weitere Absenkung des Grenzwertes (z. B. auf 1 µg/kg TEQ) wäre möglich, sofern in den betreffenden Anlagen ausschließlich unbehandeltes oder nur mechanisch behandeltes Holz verbrannt wird.

Bei Anlagen, in denen Altholz der Kategorie A II oder andere, nicht nur mechanisch be- oder verarbeitete Hölzer verbrannt werden (wie Spanplatten, beschichtete oder verleimte Hölzer, die z. B. aus Produktionsrückständen aus der Holzbe- und -verarbeitung stammen können), können erhöhte PCDD/F und dl-PCB-Gehalte auftreten. Es wäre zu prüfen, ob ein weiter gesenkter Grenzwert in solchen Fällen durch eine bessere Kontrolle des Brennstoffes einzuhalten ist. Eine Absenkung des Grenzwertes müsste dann mit entsprechenden Aufklärungsmaßnahmen einhergehen.

Zusätzlich müssten in die Prüfung auch weitere PCDD/F und dl-PCB-Quellen mit einbezogen werden.

Summary

Background and objective

This report deals comprehensively with the collection and analysis of data on the concentration of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) and dioxin-like polychlorinated biphenyls (dl-PCBs) in coarse and fly ash from private wood-fired boilers (small combustion plants) and medium-sized biomass combustion plants in Germany.

PCDD/Fs and dl-PCB are so-called "persistent organic pollutants" (hereinafter referred to as "POPs"), which are certain substances that are toxic, remain in the environment for a long time and can be found thousands of kilometres away from their original place of manufacture or use. They pose a long-term threat to human health and ecosystems.

POPs are subject to international agreements with the overarching goal of reducing or eliminating the production, use and release of POPs as far as possible. Implementation in the European Union is governed by Regulation (EU) 2019/1021 of 20 June 2019 (EU POP Regulation). Article 7 of this regulation governs the management of waste containing POPs. Waste containing POPs listed in Annex IV above specified limits shall be disposed of or recovered in accordance with Article 7(2) in such a way as "[...] to ensure that the POP content is destroyed or irreversibly transformed so that the remaining waste and releases do not exhibit the characteristics of POPs".

Since dl-PCBs have toxicological properties very similar to those of PCDD/F, and in order to take into account the aggregate effect of all dl-PCBs, these dioxin-like compounds have been included in the existing group entry for PCDD/Fs in the EU POP Regulation. The amendment thus establishes a common threshold for PCDD/Fs and dl-PCBs, above which waste must be managed in accordance with Article 7 of the EU POP Regulation and the POP content must be destroyed (lower POP limit value 5 µg/kg² instead of the previous limit value 15 µg/kg).

Furthermore, Member States should collect data on the content of PCDD/F and dl-PCB in ash and soot from private households and fly ash from biomass plants for heat and power generation by 1 July 2026.

This report aims to contribute to this data collection from a German perspective and to provide a basis for answering the question of whether a further reduction in the limit value is feasible, taking into account scientific and technical progress. Furthermore, the levels of PCDD/F and dl-PCB determined for Germany will be discussed against the background of the reduced limit values in the EU POP Regulation for these compounds.

Initial situation

In order to assess the initial situation, a review of German-language literature was conducted to determine the current state of knowledge on the contamination of coarse and fly ash from German plants with PCDD/Fs and dl-PCBs and the relationships between pollutant content, fuel and type of combustion.

The research focused on small combustion plants and medium-sized biofuel combustion plants in Germany.

Small combustion plants are plants regulated by the 1st Federal Immission Control Ordinance (BImSchV) with a thermal output of less than 1 megawatt (MW). A distinction is made between single-room combustion plants ("Einzelraumfeuerungsanlagen") and solid fuel boilers

² 5 µg/kg = 5,000 ng/kg

(“Festbrennstoffkessel”). Single-room combustion plants are heating devices used to heat individual rooms. These include, for example, wood-burning stoves, tiled stoves, open fireplaces and pellet stoves. In 2023, there were around 11.7 million single-room combustion plants in Germany. Solid fuel boilers are heating boilers that are also operated with solid fuels (e.g. wood, pellets, coal) but are specifically designed to heat an entire building. In 2023, there were around 1.13 million solid fuel boilers in Germany. This research project also looked at woodworking and wood processing companies that use certain fuels (specific painted, varnished or coated wood and any resulting waste, plywood, chipboard, fibreboard or other glued wood and residues from these) where there is a suspicion that the ash may be relatively highly contaminated with PCDD/Fs and dl-PCBs.

Medium-sized biomass combustion plants within the scope of this project are plants that fall within the scope of the 44th BImSchV. These are plants with a rated thermal input between 1 and 50 megawatts (MW) and combustion plants requiring a permit with a rated thermal input of less than 1 MW. Plants below 1 MW that do not require a permit fall under the 1st BImSchV, while plants with a thermal input of 50 MW or more are generally regulated by the 13th BImSchV. There are around 40,000 medium-sized combustion plants in Germany, of which approximately 800 are solid biomass plants.

With regard to single-room combustion plants, the literature review shows that PCDD/F levels vary depending on the type of combustion plant, the fuel used and the ash fraction. In coarse ash from single-room combustion plants, PCDD/F levels are generally relatively low (<100 ng I - TEQ/kg). In fly ash, PCDD/F levels are significantly higher and can reach several thousand ng I - TEQ/kg. In some studies, high values of over 10,000 ng I-TEQ/kg have been measured.

In solid fuel boilers, the PCDD/F levels in ash and soot depend on the type of fuel and the combustion technology. In coarse ash, PCDD/F levels are generally relatively low (<100 ng I - TEQ/kg), especially when burning untreated wood. As the heating load increases, the PCDD/F levels in the ash decrease. In fly ash, the PCDD/F levels are usually moderate (<1,000 ng I-TEQ/kg). In individual cases, the levels can also exceed 1,000 ng I-TEQ/kg. When burning biomass other than wood, such as straw, higher values are sometimes found, which can even reach several thousand ng I-TEQ/kg.

According to the results of the literature review, the PCDD/F levels in coarse ash obtained from the wood processing industry were very low (< 1 ng/kg TEQ BGA), while those in fly ash were low (< 1,000 ng/kg TEQ BGA).

According to the literature, ash from medium-sized combustion plants is generally less contaminated than ash from small combustion plants. While ash from the combustion of untreated wood fuels has low toxicity values (<1 ng TEQ/kg), the combustion of treated wood results in higher values.

Selection of relevant plants, sampling and analysis

In order to collect data on PCDD/F and dl-PCB levels in ash from German small combustion plants and medium-sized biomass combustion plants, samples were taken from 20 small combustion plants and 10 medium-sized biomass combustion plants.

When selecting the 20 small combustion plants, care was taken to ensure that they reflected a broad and typical selection of the plant stock in Germany. A total of 6 single-room combustion plants and 14 solid fuel boilers from different regions of Germany were sampled.

When selecting the medium-sized biomass combustion plants, criteria were initially established for selecting plants for the entire plant fleet in Germany. Plants where higher PCDD/F levels in the ash were to be expected were specifically included, such as those using waste wood A II,

chipboard or grain as fuel. Only fly ash was sampled. The selected plants do not constitute a representative sample.

Sampling was carried out in accordance with LAGA PN 98 in the first half of 2025. The ash samples were analysed for PCDD/Fs, dl-PCBs and total chlorine. PCDD/F and dl-PCB congeners were quantified using gas chromatography coupled with a tandem mass spectrometer (GC-MS/MS). The laboratory performing the analysis is accredited for the determination of POPs such as PCDD/Fs and PCBs in accordance with DIN EN ISO/IEC 17025:2018.

Evaluation of the results

The results of the laboratory analyses are documented in the report separately for the plant categories small combustion plants (single-room combustion plants, solid fuel boilers, boilers in woodworking and wood processing plants) and medium-sized combustion plants. They are presented graphically and discussed in connection with the details of the sampled plants.

Single-room combustion plants

There is a clear trend: fly ash contains significantly higher concentrations of PCDD/Fs and dl-PCBs than coarse ash. The concentrations found vary greatly between plants and cannot be clearly attributed to individual influencing factors such as fuel type, plant age or construction method.

In coarse ash, the concentrations of PCDD/Fs and dl-PCBs were predominantly undetectable. Taking into account the limits of quantification, the calculated total TEQ value ranges between 1.05 and 1.12 ng TEQ/kg DM (WHO₂₀₀₅). Significantly higher concentrations of PCDD/Fs and dl-PCBs were measured in the fly ash (max. 217 ng TEQ/kg DM (WHO₂₀₀₅)), which are nevertheless still below the limit value.

PCDD/Fs account by far for the largest proportion of toxicity (expressed as total TEQ). On average, PCDD/Fs in the fly ash samples contributed around 97% to the total TEQ, while the proportion of dl-PCBs was around 3%. A similar picture emerges for coarse ash. On average, PCDD/Fs in the coarse ash samples contributed around 84% to the total TEQ, while the proportion of dl-PCBs was 16%.

Solid fuel boilers

As with single-room combustion plants, the concentrations of PCDD/Fs and dl-PCBs in coarse ash are lower than in fly ash.

Most values for coarse ash are below ~2.5 ng TEQ/kg DM. Only a few samples contain slightly elevated concentrations of PCDD/Fs and dl-PCBs (max. 100 ng TEQ/kg DM).

Significantly higher total TEQ concentrations were found in the fly ash; In the smaller boilers up to 38 kW, up to 372 ng TEQ/kg DM (PCDD/F & dl-PCB). In the larger boilers from 38 kW, especially those used in the wood processing industry, the TEQ values were conspicuously high. The highest total TEQ concentrations (maximum 13,643 ng/kg DM (PCDD/F & dl-PCB)) were found in the fly ash from plants in which fuels such as chipboard residues or wood from the wood processing industry were burned. In contrast, natural wood used as fuel resulted in significantly lower TEQ values in the range of 1.75 to 2.47 ng/kg DM.

PCDD/Fs account by far for the largest proportion of toxicity. On average, PCDD/Fs in the fly ash samples contributed around 99% to the total TEQ, while the proportion of dl-PCBs was around 1%. In the coarse ash, PCDD/Fs in the coarse ash samples contributed around 97% to the total TEQ, while the proportion of dl-PCBs was 3%.

Medium-sized combustion plants

When selecting the plants, those where higher PCDD/F and dl-PCB contents in the ash were expected were specifically included. As expected, the concentration values determined for fly ash from medium-sized biomass combustion plants therefore show significantly higher median and mean values overall (119 and 846 ng TEQ/kg DM; maximum value 5,230 ng TEQ/kg DM) than those from small combustion plants, except for fly ash from boilers in the woodworking and processing industry.

Conclusion

In principle, the results indicate that coarse ash is generally very low in contamination (max. 100 ng TEQ/kg DM) and fly ash generally has higher concentrations, which are usually well below existing regulatory limits. High concentrations, in the range of several thousand ng TEQ/kg DM, occur at the sampled plants exclusively in connection with the incineration of waste wood or other processed wood. In individual cases, PCDD/F and dl-PCB TEQ values above the existing limit of 5,000 ng/kg TEQ may also occur.

The largest proportion of toxicity in both coarse and fly ash is caused by PCDD/Fs. The proportion of dl-PCBs is usually a few percentage points.

Pollutant loads

For the purpose of evaluating and discussing the impact of a possible change to the Annex IV limit value for PCDD/Fs and dl-PCBs in the EU POP Regulation, the pollutant loads contained in the ash from small combustion plants were determined. These can be calculated by multiplying the average or mean concentration present in the ash by the ash quantities.

The calculations were carried out for small combustion plants, separated by plant type, for single-room combustion plants, solid fuel boilers and boilers in wood processing and manufacturing plants, and separately for coarse ash and fly ash.

With regard to medium-sized combustion plants, it is not possible to estimate the loads of PCDD/Fs and dl-PCBs on the basis of the available data for various reasons.

In total, the annual total TEQ loads for PCDD/F and dl-PCB in ash from the small combustion plants considered are in the low single-digit gram range. The vast majority of the TEQ load in both, coarse ash and fly ash, comes from PCDD/F contamination. According to the estimates made in the report, the loads in coarse ash (ash quantity ~129 kt) total approx. 0.6 g and in fine ash (ash quantity ~8.7 kt) approx. 1.8 g (based on mean values). This also suggests that about $\frac{1}{4}$ of the total TEQ load is contained in the coarse ash and $\frac{3}{4}$ in the fly ash.

Comparison of the results with literature references

A comparison of the PCDD/F and dl-PCB concentrations in coarse and fly ash measured in this project with values from the specialist literature for Germany shows that the results of the investigations carried out as part of this project are generally consistent with the information from the literature studies, even if they may differ in detail.

In a further comparison, the measured values were compared with corresponding values from other European countries. Overall, the results show that the levels in Germany are within the range of values reported from other countries. Soot samples from chimneys of small wood-burning plants clearly show that PCDD/F pollution depends heavily on the fuel used. When burning natural wood and paper for kindling, the PCDD/F concentrations are relatively low. However, as soon as treated or contaminated wood, plastics, aluminum foil, cardboard or household waste are co-incinerated, the measured values rise sharply. This partly explains the high PCDD/F values reported in the literature from other countries.

In this project, values were measured in medium-sized combustion plants that were in some cases several orders of magnitude higher than those reported for wood combustion in the literature examined. However, this does not mean that the contamination of these ashes in Germany is higher than in the other countries considered. The reason for the comparatively high concentrations in fly ash in Germany is that the survey specifically sampled plants where higher PCDD/F and dl-PCB concentrations in fly ash were to be expected due to the fuels used. All elevated concentrations found in Germany (478 to 5,230 ng TEQ/kg) are related to the incineration of category II waste wood. All other concentrations of fly ash from the plants investigated in Germany, where wood chips, wood production residues, bark and wood dust or grain are incinerated, are in a similar range to those in the other countries considered.

These results for medium-sized combustion plants indicate that, particularly in the case of waste wood combustion, limit values are likely to be exceeded in fly ash in individual cases.

Contamination in waste wood may be the cause, although no halogenated organic compounds should be present. Nevertheless, PVC, for example, can often be found as a typical contaminant in waste wood. It contributes to the presence of chlorine during combustion. This promotes the formation of PCDD/Fs and dl-PCBs and can result in a comparatively high TEQ contamination of the ash. It is therefore important to ensure that waste wood used for combustion is as free as possible from contaminants such as PVC, as this would probably result in lower TEQ values. It would therefore be advisable for operators and authorities at plants that incinerate waste wood, to better monitor both, the contamination of fly ash and the purity (in terms of contaminants such as PVC) of the fuels.

Comparison with limit values and effects of changed limit values

A comparison of the total concentrations of PCDD/Fs and dl-PCBs measured in this project with the TEQ limit value of 5 µg/kg (5,000 ng/kg) shows that for all types of plants, the measured total TEQ values are generally well below the limit value of 5 µg/kg and in most cases also below a hypothetical limit value of 1 µg/kg.

In the samples from single-room combustion plants, all values are well below 1 µg/kg.

In the case of solid fuel boilers, one total TEQ value for fly ash at 13,600 ng/kg TS exceeds the limit value of 5 µg/kg. In this case, residues of coated, painted or glued wood (chipboard) were burned. Two other total TEQ values exceed 1 µg/kg, however, they remain well below the limit value. All other ash samples are also well below this value.

In the fly ash from medium-sized combustion plants, one value exceeds the limit value of 5 µg/kg and one value exceeds 1 µg/kg, but remains well below the limit value. Both values are related to the incineration of category II waste wood. The remaining samples are well below 1 µg/kg.

Effects of the amended limit value

Article 7 of the EU POP Regulation regulates the management of waste containing POPs. Waste containing POPs listed in Annex IV above specified limit values shall be disposed of or recovered in accordance with Article 7(2) in such a way as "[...] to ensure that the POPs contained therein are destroyed or irreversibly transformed so that the remaining waste and releases do not exhibit the characteristics of POPs". The limit values in Annex IV are regularly reviewed and adapted to technical progress.

Based on the data researched and the PCDD/F and dl-PCB levels measured in the sampled plants, it is possible to estimate the extent of contamination in ash from small combustion plants and medium-sized biomass combustion plants in Germany. On this basis, it can be discussed whether it makes sense to lower the limit value for ash from small combustion plants and medium-sized biomass combustion plants.

The discussion takes into account an established method for deriving limit values in accordance with Article 7(4)(a) of the EU POP Regulation. In order to narrow down the range of possible limit values, four lower (which limit the limit value setting downwards) and two upper (which limit the limit value setting upwards) limiting criteria are used for the limit value derivation.

The criteria are discussed in detail in the report, and it is shown that all criteria are met for both values (the limit value of 5 µg/kg and a hypothetical limit value of 1 µg/kg). In summary, it can be stated that:

- ▶ Suitable analytical methods for monitoring both values are economically available, provided that only isolated samples are taken.
- ▶ Both values are significantly above the background contamination of soils in Germany. Excavated soil with normal background contamination would not be affected by the POP waste regime.
- ▶ Of the ash samples examined in this study, only a few individual samples exceed a total TEQ (PCDD/Fs & dl-PCBs) that is above the limit value of 5 µg/kg or a hypothetical limit value of 1 µg/kg. The elevated values are related to the incineration of wood from the woodworking or wood processing industry or from category A II waste wood. The quantities and volumes of fly ash produced, which may have to be treated as POP waste, are low as long as mixing of coarse and fine ash is avoided. Disposal and recovery capacities are realistically available. Any disposal costs that may be necessary are economically reasonable. In addition, if the limit value is exceeded, operators would also have the option of avoiding the accumulation of POP waste through improved fuel control.
- ▶ Neither value conflicts with existing limit values.
- ▶ Lowering the limit value helps to avoid potential impacts on the environment and health.

A further reduction in the limit value (e.g. to 1 µg/kg TEQ) would be possible if only untreated or mechanically treated wood were incinerated in the plants concerned.

Plants that burn waste wood of category A II or other wood that has not exclusively been treated or processed mechanically (such as chipboard, coated or glued wood, which may originate from production residues from wood processing) may have elevated PCDD/F and dl-PCB levels. It would have to be examined whether a further reduction in the limit value can be achieved in such cases through better control of the fuel. A reduction of the limit value would then have to be accompanied by appropriate awareness raising measures.

In addition, other sources of PCDD/Fs and dl-PCBs would also have to be included in the assessment.

1 Hintergrund und Zielsetzung

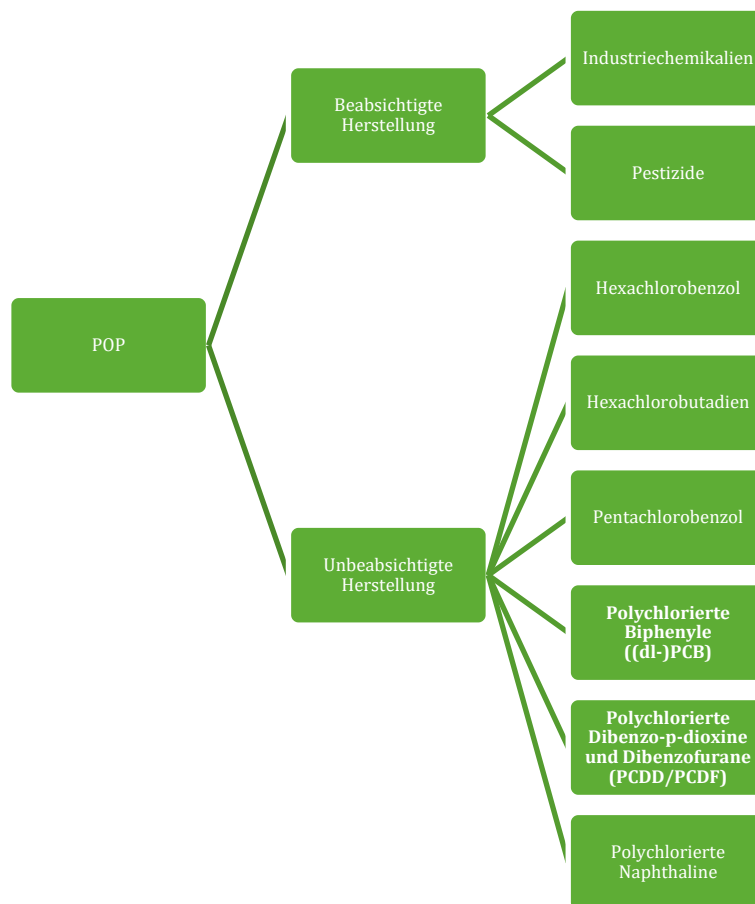
1.1 Hintergrund

Persistente organische Schadstoffe (engl. Persistent organic pollutant; im Folgenden „POP“) ist die Sammelbezeichnung für bestimmte Stoffe, die giftig sind, langfristig in der Umwelt verbleiben und tausende von Kilometern von ihrem ursprünglichen Herstellungs- oder Verwendungsort entfernt auffindbar sind. Deshalb stellen POP eine langfristige Bedrohung für die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme dar.

POP sind überwiegend absichtlich hergestellte Stoffe, mit breiten Anwendungsbereichen. Einige POP, darunter Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) sowie die dioxinähnlichen polychlorierten Biphenyle (dl-PCB) können unbeabsichtigt bei Verbrennungs- oder industriellen Herstellungsprozessen erzeugt werden.

POP lassen sich in unbeabsichtigt und beabsichtigt hergestellte POP unterscheiden. Erstere werden oder wurden industriell hergestellt und umfassen verschiedene Industriechemikalien und Pestizide (derzeit insgesamt 33 Stoffe bzw. Stoffgruppen; Stand November 2025). Letztere entstehen unbeabsichtigt. Aktuell sind unter dem Stockholmer Übereinkommen 6 unbeabsichtigt hergestellte POP gelistet. Die Vertragsstaaten des Stockholmer Übereinkommens sollen bestimmte Maßnahmen treffen, um deren Freisetzung aus anthropogenen Quellen zu reduzieren. Den unbeabsichtigt entstehenden POP sind unter anderem die PCDD/F und dl-PCB zuzuordnen (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Kategorien von POP



Quelle: Eigene Darstellung, Ramboll. Basierend auf Stockholm Übereinkommen³

POP sind Gegenstand des Stockholmer Übereinkommens zu POP und des POP-Protokolls unter der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP). Beide völkerrechtlichen Übereinkommen haben das übergreifende Ziel, Produktion, Verwendung und Freisetzung der Stoffe soweit wie möglich zu reduzieren bzw. zu beenden. Umgesetzt wird das Stockholmer Übereinkommen in Europa durch die Verordnung (EU) 2019/1021 vom 20. Juni 2019 (EU POP-Verordnung).

Die EU POP-Verordnung regelt in Artikel 7 die Bewirtschaftung von Abfällen, die POP enthalten. Abfälle, die die in Anhang IV aufgeführten POP oberhalb festgelegter Grenzwerte enthalten, werden nach Art. 7 (2) so beseitigt oder verwertet, „[...] dass die darin enthaltenen POP zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden, damit die verbleibenden Abfälle und Freisetzungen nicht die Eigenschaften von POP aufweisen“.

Die Grenzwerte des Anhangs IV werden regelmäßig überprüft und an den technischen Fortschritt angepasst. Im Rahmen dieser Überprüfung haben das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union am 23.11.2022 die Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 2019/1021 über POPs erlassen.

Die in Anhang IV festgelegten Grenzwerte gelten unter anderem für Abfälle, die im Vorhabenzusammenhang relevant sind, namentlich für Aschen und Ruß aus privaten Haushalten sowie für Flugasche aus Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromerzeugung. Ein Überblick über die früheren, aktuellen und hypothetische Grenzwerte ist in Tabelle 1 und

³ Auflistung der POP im Stockholmer Übereinkommen (abgerufen am 18.11. 2025).

Tabelle 2 dargestellt. Ein hypothetischer Grenzwert wird hier angegeben, weil die Kommission den Konzentrationsgrenzwert von 5 µg TEQ/kg im Hinblick auf eine Absenkung des Wertes überprüfen soll, sofern dies unter Berücksichtigung des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts machbar ist. Möglich wäre jeder Wert unter 5 µg TEQ/kg. Der hypothetische Wert von 1 wurde hier ausschließlich gewählt, um einen konkreten Wert zur Bewertung einer möglichen Absenkung zur Verfügung zu haben. Eine Bewertung könnte auch für andere Werte unter 5 durchgeführt werden.

Tabelle 1: Grenzwerte für PCDD/F und dl-PCB in Asche und Ruß aus privaten Haushalten

Grenzwert	Gültigkeit	Wert	POP	Quelle
Früherer Grenzwert	Bis 31.12.2024	15 µg TEQ/kg	PCDD/F	Anhang IV der EU POP-Verordnung
Grenzwert	Seit 01.01.2025	5 µg TEQ/kg	PCDD/F und dl-PCB	Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Anhang IV und V der EU POP-Verordnung
Hypothetischer Grenzwert	Überprüfung des Grenzwertes bis 2027	1 µg TEQ/kg	PCDD/F und dl-PCB	Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Anhang IV und V der EU POP-Verordnung (Überprüfung nach Artikel 2 bis zum 30.12.2027)

Tabelle 2: Grenzwerte für PCDD/F und dl-PCB in Flugasche aus Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromerzeugung

Grenzwert	Gültigkeit	Wert	Schadstoff	Quelle
Früherer Grenzwert	Bis 30.12.2023	10 µg TEQ/kg	PCDD/F	Anhang IV der EU POP-Verordnung
Grenzwert	Seit 31.12.2023	5 µg TEQ/kg	PCDD/F und dl-PCB	Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Anhang IV und V der EU POP-Verordnung
Hypothetischer Grenzwert	Überprüfung des Grenzwertes bis 2027	1 µg TEQ/kg	PCDD/F und dl-PCB	Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Anhang IV und V der EU POP-Verordnung (Überprüfung nach Artikel 2 bis zum 30.12.2027)

PCDD/PCDF und dl-PCB in Aschen und Ruß von deutschen Kleinfeuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen

Da die Stoffe einer Untergruppe von 12 PCB-Kongeneren, die als dl-PCB bezeichnet werden, toxikologische Eigenschaften haben, die denen von PCDD/PCDF sehr ähnlich sind, und um die aggregierte Wirkung aller dl-PCB zu berücksichtigen, wurden diese dioxinähnlichen Verbindungen in den bestehenden Gruppeneintrag für PCDD/PCDF in den Anhängen IV und V der Verordnung (EU) 2019/1021 aufgenommen. Mit der Änderung wird somit für die PCDD, PCDF und die dl-PCB ein gemeinsamer Schwellenwert festgelegt, ab dem Abfälle nach Artikel 7 der EU POP-VO zu bewirtschaften und der POP-Gehalt zu zerstören ist (unterer POP-Grenzwert 5 µg/kg statt bisher 15 µg/kg). Im Verordnungstext heißt es „Die Kommission überprüft diesen Konzentrationsgrenzwert und legt erforderlichenfalls spätestens bis zum 30. Dezember 2027 einen Gesetzgebungsvorschlag vor, um diesen Grenzwert abzusenken, sofern eine solche Absenkung unter Berücksichtigung des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts machbar ist.“

Die Konzentrationswerte werden berechnet als die Summe der PCDD-, PCDF- und dl-PCB-Konzentrationen und auf Grundlage der Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) für PCDD, PCDF und dl-PCB in der Tabelle in Anhang V Teil 2 Absatz 3 der Verordnung (EU) 2022/2400. Diese TEF entsprechen denen des TEF-Konzeptes der WHO von 2005 (siehe Kapitel 2.3)

Weiterhin werden die Mitgliedsstaaten aufgefordert, Daten über den Gehalt an PCDD/PCDF sowie dl-PCB in Asche und Ruß aus privaten Haushalten sowie Flugasche aus Biomasseanlagen zur Wärme- und Stromerzeugung bis 1. Juli 2026 erheben⁴.

Neue POP und POP Kandidaten

Die Liste der POP im Stockholmer Übereinkommen wird stetig erweitert, da weiterhin neue Chemikalien mit POP-Eigenschaften von Vertragsstaaten identifiziert und zur Listung vorgeschlagen werden. Die Bewertung dieser sogenannten POP-Kandidaten anhand festgelegter Kriterien erfolgt durch ein wissenschaftliches Begleitgremium, das POP Review Committee (POP RC), das der Vertragsstaatenkonferenz einen Vorschlag zur Aufnahme in die Anlagen A (Eliminierung), B (Beschränkung) oder C (Unerwünschte Nebenprodukte) vorlegt. Die alle zwei Jahre stattfindende Vertragsstaatenkonferenz entscheidet über die Aufnahme weiterer Stoffe.

Im Rahmen der 11. Vertragsstaatenkonferenz (COP 11) im Mai 2023 wurden drei neue POP in das Stockholmer Übereinkommen (SC) aufgenommen. Hierzu zählen folgende Verbindungen:

- ▶ UV 328
- ▶ Dechloran Plus
- ▶ Methoxychlor (möglicherweise in Deutschland nicht mehr relevant, da bereits seit 2002 nicht mehr als Pestizid zugelassen)

Im Mai 2025 wurde bei der 12. Vertragsstaatenkonferenz (COP 12) entschieden, drei weitere neue POP in das SC aufzunehmen. Es handelt sich um folgende Verbindungen:

- ▶ Mittelkettige Chlorparaffine (MCCP)
- ▶ Langkettige Perfluorcarbonsäuren (Long-chained PFCA)
- ▶ Chlorpyrifos

⁴ Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Anhänge IV und V der EU-POP-VO (Erwägungsgrund 5 der Verordnung)

Im POP RC und auf Europäischer Ebene (insbesondere im Rahmen der Erarbeitung von Beschränkungs dossiers unter der REACH Verordnung) wurden bereits umfangreiche wissenschaftliche Daten zu diesen Stoffen zusammengetragen. Darüber hinaus werden diese Stoffe in zahlreichen wissenschaftlichen Artikeln untersucht. Die Datenlage für das Vorkommen dieser Verbindungen in Abfällen und Rezyklaten in Deutschland ist derzeit noch ungenügend.

Auch fehlen Empfehlungen zur umweltgerechten Behandlung betroffener Abfallströme sowie eine Abschätzung möglicher Risiken bei der Abfallbehandlung. An dieser Stelle soll das Projekt ansetzen und eine erste Datengrundlage für Deutschland liefern.

1.2 Zielsetzung

Mit der Durchführung des Forschungsvorhabens sollen gemäß Leistungsbeschreibung folgende Ziele erreicht werden:

1. Erhebung von Daten zu Gehalten von PCDD/PCDF und dl-PCB in Aschen von deutschen Klein- und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen bis zum 1. Juli 2026

Mit diesem Ziel soll das Projekt dazu beitragen, die Verpflichtungen des Erwägungsgrundes 5 der Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Anhänge IV und V der EU-POP-VO zu erfüllen. Des Weiteren sollen die zu ermittelnden Gehalte von PCDD/PCDF und dl-PCB vor dem Hintergrund der abgesenkten Grenzwerte in der EU POP Verordnung für diese Verbindungen diskutiert werden.

2. Bereitstellung einer soliden Datengrundlage zum Vorkommen und den Gehalten neuer POP und POP-Kandidaten in Abfällen bzw. Rezyklaten in Deutschland

Ein weiteres Ziel ist es, Informationen zu betroffenen Abfallströmen sowie Gehalte neuer POP und POP-Kandidaten in den ermittelten Abfällen und Rezyklaten bereitzustellen. Die Risiken für Mensch und Umwelt bei der Bewirtschaftung von betroffenen Abfallströmen und Rezyklaten sollen abgeschätzt und entsprechende Vorschläge für umweltgerechte Behandlungsmöglichkeiten abgeleitet werden. Darüber hinaus sollen vor dem Hintergrund der regelmäßigen Evaluierung der EU POP-Verordnung sowohl bestehende Grenzwerte im Anhang IV der EU POP Verordnung diskutiert als auch neue Grenzwertbereiche vorgeschlagen werden.

Der vorliegende Bericht widmet sich ausschließlich der Darstellung der Ergebnisse zum ersten Teil des Vorhabens, nämlich der Erhebung von Daten zu Gehalten von PCDD/PCDF und dl-PCB in Aschen von deutschen Klein- und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen. Die Darstellung der Ergebnisse zum zweiten Teil des Vorhabens erfolgt in einem gesonderten Bericht.

2 Betrachtung der Ausgangssituation (Literaturrecherche)

Der Fokus der Recherche lag auf deutschen Literaturquellen, um einen Überblick zu deutschen Feuerungsanlagen zu erhalten. Es wurden jedoch auch Literaturquellen aus anderen Ländern berücksichtigt, soweit diese relevante Informationen zu PCDD/F und dl-PCB Gehalten in Grob- und Flugasche aus anderen Ländern enthalten. Alle identifizierten Literaturquellen werden im weiteren Verlauf auf ihre Relevanz hin überprüft.

Für die Recherche wurden das Internet im Allgemeinen, Google Scholar, Europe PMC, and PubMed genutzt, um zusätzliche Publikationen zu finden, die die Konzentrationen von Chlor-, PCDD/F- und dl-PCB in Aschen aus Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Feuerungsanlagen zu dokumentieren. Die in bestimmten Kombinationen verwendeten Suchbegriffe waren „PCDD/F“, „dl-PCB“, „Dioxine“, „Cl“, „Chlor“, „Kleinf Feuerungsanlage“, „mittelgroße Feuerungsanlage“, „Asche“, „Ruß“, „Feuerungsanlage“, „Deutschland“, „Holz“, „Holzasche“, „Rußasche“, „Biomasseasche“, „Stroh“, „Getreide“, „Spanplatte“, „holzverarbeitenden Industrie“.

Die zusammengetragenen Daten sind in einer Excel-Datei zur Literaturanalyse zu Arbeitspaket 1 (im Folgenden „Excel-Datei“)⁵ zusammengefasst. Zusätzlich zum PCDD/F und dl-PCB Gehalt in Grob- und Flugaschen sind dort alle extrahierten Informationen auch mit Angabe von Literaturquelle, Autor, Link, und Jahr aufgelistet. Das Projektteam hat darüber relevante Verbände, wie den Fachverband Holzenergie nach projektrelevanten Studien gefragt, hierüber konnten keine zusätzlichen Daten erworben werden.

Es wurden insgesamt acht Literaturquellen, die relevante Informationen zu den Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in Grob- und Flugaschen enthalten, identifiziert. Im Falle von Review-Studien wurden die Original-Literaturquellen geprüft und die Informationen daraus entnommen. Falls die Originalstudie nicht öffentlich zugänglich war, wurde die Information aus der Übersichtsarbeit übernommen. Sofern erforderlich, wurden die extrahierten Konzentrationen von Chlor, PCDD/F und dl-PCB in die entsprechenden Einheiten umgerechnet, um die Ergebnisse besser vergleichen zu können.

Im Fokus der Literaturrecherche standen unter anderem Quellen, die Informationen zu PCDD/F und dl-PCB in Grob- und Flugaschen aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen mit Elektroabscheidern oder Gewebefiltern enthalten. Seit 2019 ist in Deutschland die 44. BImSchV in Kraft, deren Emissionsgrenzwerte für Staub von mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen nur mit Elektroabscheidern oder Gewebefiltern eingehalten werden können. Die Übergangsfrist für bestehende Anlagen ab 5 MW Feuerungswärmeleistung endete am 31. Dezember 2024. Ein Zyklonabscheider allein reicht ab 2025 nicht mehr aus. Informationen aus Studien zu älteren Anlagen entsprechen nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik.

Relevante Informationen werden in den folgenden Kapiteln weiter vorgestellt und besprochen.

2.1 Betrachtete Stoffe

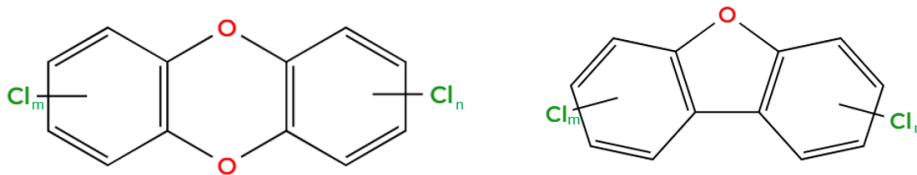
Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F)

Polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD) und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) sind eng verwandte Gruppen persistenter organischer Schadstoffe, die für ihre hohe Toxizität und Umweltpersistenz bekannt sind. Oft als "Dioxine und Furane" bezeichnet, bestehen PCDD/F aus chlorierten Verbindungen, die ähnliche chemische Strukturen und toxikologische Eigenschaften aufweisen.

⁵ Die Excel Datei wird separat mit dem Zwischenbericht zur Verfügung gestellt.

PCDD und PCDF bestehen aus zwei Benzolringen, die entweder durch zwei Sauerstoffatome (bei PCDD) oder eine Sauerstoffbrücke (bei PCDF) verbunden sind. Chloratome können an den verschiedenen Positionen an den Kohlenstoffatomen dieser Ringe binden, was zur Entstehung von 210 unterschiedlichen Kongeneren (Varianten) führt, von denen 17 besonders toxisch sind. Unter diesen gilt 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin (TCDD) als das giftigste und dient als Referenzverbindung zur Bewertung der Toxizität anderer Dioxine und Furane. Die Strukturformel dieser Stoffgruppe ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2. Allgemeine Strukturformel von Dibenzodioxinen (links) und Dibenzofuranen (rechts)



Quelle: Eigene Darstellung mit MolView (2025), Ramboll

Weder PCDD noch PCDF wurden absichtlich hergestellt, außer in sehr kleinen Mengen zu Analyse- und Forschungszwecken. Sie entstehen unbeabsichtigt als Nebenprodukte bei verschiedenen industriellen Prozessen, insbesondere bei thermischen und Verbrennungsprozessen (z. B. Abfallverbrennung, Verbrennung von festen und flüssigen Brennstoffen oder Metallherstellung in thermischen Verfahren) sowie bei chemischen Produktionsprozessen (UNEP, 2013; UNEP, 2019).

Wie oben beschrieben, werden PCDD/F unbeabsichtigt unter anderem bei Verbrennungsprozessen gebildet, insbesondere, wenn organisches Material in Anwesenheit von Chlor verbrannt wird (UNEP, 2019). Auch die Eigenschaften des Brennmaterials spielen eine wesentliche Rolle bei der Bildung von PCDD/F während der Biomasseverbrennung. Bei der Holzverbrennung entstehen PCDD/F üblicherweise über Vorläuferstoffe wie Phenole und Lignin oder durch *de-novo* Reaktionen in Anwesenheit von partikulärem Kohlenstoff und Chlor (UNEP, 2013). Hohe Emissionen sind besonders bei der Verbrennung von behandeltem Holz (Pieper, 2001) und behandelten Holzabfällen (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003), aber auch bei der Verbrennung von Stroh und Getreide, zu erwarten (TLLR, 2020; Launhardt et al., 2000). Dioxin-Emissionen aus Holzverbrennungsanlagen stehen im Fokus, insbesondere wenn behandeltes, lackiertes oder PVC-beschichtetes Holz verbrannt wird, da hierbei hohe PCDD/F-Emissionen freigesetzt werden können (Lavric et al 2004).

Bestimmte Faktoren begünstigen die Bildung von PCDD/F bei der Verbrennung (UNEP, 2013):

- ▶ Technologie: unvollständige Verbrennung, schlechte Durchmischung und unzureichende Abgasbehandlung fördern die Bildung von PCDD/F
- ▶ Temperatur: PCDD/F bilden sich bei 200–650°C, am stärksten zwischen 200–450°C mit einem Maximum bei 300°C
- ▶ Chlor: Chlor ist notwendig für die Bildung, unabhängig von der Form. Besonders Chlor im Flugaschestaub oder in elementarer Form im Gas kann die Bildung beeinflussen
- ▶ Metalle: Metalle wie Kupfer, Eisen, Zink, Aluminium, Chrom und Mangan wirken als Katalysatoren für die Bildung von PCDD/F
- ▶ Schwefel und Stickstoff: Schwefel- und Stickstoffverbindungen können die Bildung hemmen, aber auch andere Nebenprodukte verursachen.

Das Verhalten der Betreiber hat einen wesentlichen Einfluss auf die genannten Faktoren und daher auf die Bildung von PCDD/F (sowie dl-PCB). Deshalb enthält die 1. BImSchV Vorgaben für die Betreiber von handbeschickten Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Die Betreiber sind verpflichtet, sich hinsichtlich der sachgerechten Bedienung der Feuerungsanlage, der ordnungsgemäßen Lagerung des Brennstoffs sowie der Besonderheiten beim Umgang mit festen Brennstoffen durch eine Schornsteinfegerin oder einen Schornsteinfeger beraten zu lassen. Darüber hinaus muss die Feuerungsanlage in einem ordnungsgemäßen Zustand sein und der Betrieb muss herstellerkonform erfolgen.

PCDD/F können unter geeigneten Bedingungen während der Verbrennung zerstört werden. Temperaturen im Bereich von 1.100 bis 1.200°C werden als geeignet für die Zerstörung halogenierter Schadstoffe, einschließlich PCDD/F, erachtet (Huygens et al., 2019).

Laut Vehlow et al. besteht ein enger Zusammenhang zwischen dem PCDD/F-Gehalt in der Asche und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff. Liegt der Kohlenstoffgehalt in der Asche unter 1%, betragen die PCDD/F-Werte in der Regel weniger als 20 ng WHO-Toxizitätsäquivalenten pro Kilogramm (Vehlow et al., 2006 zitiert in Huygens et al., 2019). Allerdings kann die Adsorption von PCDD/F in Flugaschen vergleichsweise hoch ausfallen, was von der Menge an elementarem Kohlenstoff oder Rußpartikeln abhängt, da anorganische Oberflächen ein geringes Adsorptionspotenzial für PCDD/F besitzen (Vehlow et al., 2006 zitiert in Huygens et al., 2019).

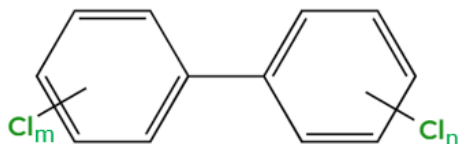
Aschen aus Kleinfeuerungsanlagen, in denen Altholz oder andere Abfälle, z. B. Kunststoffe wie PVC, verbrannt wurden, können hohe Dioxingehalte aufweisen. Laut einer Studie können schon geringe Mengen von behandeltem Holz oder Beimischungen von Verpackungsmaterialien wie Kunststoffen die Schadstoffwerte in der Luft erheblich erhöhen (Gras et al., 2009). Aschen aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz enthalten in der Regel niedrige Dioxingehalte (Behnke et al., 2018).

Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB)

Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB) sind eine Untergruppe der PCB, die ähnliche toxische Wirkungen wie Dioxine und Furane aufweisen, einschließlich der Beeinträchtigung des endokrinen und des Immunsystems. Wie Dioxine und Furane zählen dl-PCB zu den persistenten organischen Schadstoffen, die für ihre Umweltpersistenz, Bioakkumulation und langfristigen Gesundheitsrisiken für Menschen und Tiere bekannt sind (Behnke et al., 2018).

PCB sind chlorierte aromatische Verbindungen, die aus zwei Benzolringen bestehen, an denen Chloratome an verschiedenen Positionen gebunden sein können. Von den insgesamt 209 möglichen PCB-Kongeneren weisen 12 eine dioxinähnliche Toxizität auf (Behnke et al., 2018).

Abbildung 3: Allgemeine Strukturformel von Polychlorierten Biphenylen



Quelle: Eigene Darstellung mit MolView (2025), Ramboll

Laut Lemieux et al. entstehen die dl-PCB über einen ähnlichen mechanistischen Weg wie PCDD/F (Lemieux et al., 2001). Die maximale PCB-Bildung tritt bei Temperaturen von etwa 350 °C auf (Lemieux et al., 2001). Bei höheren Verbrennungstemperaturen (z. B. über 1.200 °C) werden dl-PCB wirksam zerstört. Allerdings werden dl-PCB auch bei niedrigeren Temperaturen

(z. B. 950 °C) und bei geeigneten Verbrennungsbedingungen wie ausreichender Turbulenz und Verweilzeit wirksam zerstört (Lemieux et al., 2001).

2.2 Anlagen und Brennstoffe im Fokus

2.2.1 Kleinf Feuerungsanlagen

Kleinf Feuerungsanlagen, die im Rahmen dieses Projekt betrachtet werden, sind Anlagen, die in der 1. BImSchV reguliert sind und Holz als Brennstoff einsetzen.

Die 1. BImSchV regelt die Installation, Wartung und den Betrieb kleiner Feuerungsanlagen in Deutschland und zielt darauf ab, die Luftverschmutzung durch kleinere Heiz- und Verbrennungssysteme zu reduzieren. Diese Verordnung betrifft vor allem Heizungsanlagen und Heizkessel in Wohn- und Gewerbegebäuden mit einer **Feuerungswärmeleistung von weniger als 1 Megawatt (MW)**, einschließlich Einzelraumfeuerungsanlagen wie Kamin-, Kachel- und Pelletöfen.

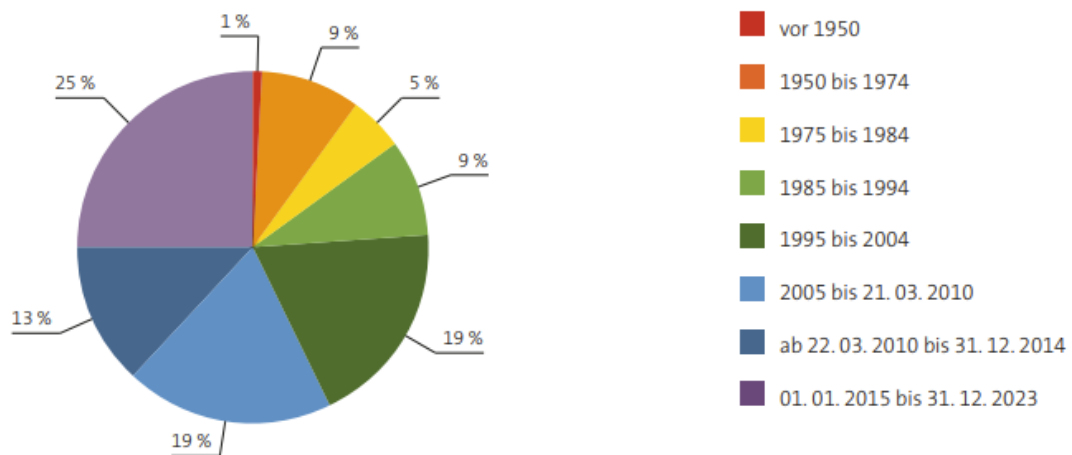
Die 1. BImSchV unterscheidet zwischen **Einzelraumfeuerungsanlagen und Festbrennstoffkesseln**.

Einzelraumfeuerungsanlagen sind Heizgeräte, die zur Beheizung einzelner Räume konzipiert sind. Dazu gehören beispielsweise Kaminöfen, Kachelöfen, offene Kamine und Pelletöfen. Sie dienen meist als Zusatz- oder Sekundärheizung und nicht als Hauptheizquelle eines Gebäudes. Ihre Wärmeabgabe erfolgt direkt an den Raum, in dem sie aufgestellt sind. Sie werden in der Regel mit festen Brennstoffen wie Holzscheiten, Pellets oder Briketts betrieben. Die erzeugte Wärme wird direkt in den Raum abgegeben, in dem die Anlage steht. Sie verfügen selten über eine Vorrichtung, um die Wärme in andere Räume oder in das zentrale Heizungssystem zu leiten (1.BImSchV, UBA, 2023).

Einzelraumfeuerungsanlagen wie Kaminöfen und Kachelöfen gibt es in vielen verschiedenen Ausstattungsformen. Sie werden oft als zusätzliche Heizung verwendet, um den Komfort in einem einzelnen Raum zu verbessern. Ihre Wärmeleistung liegt meist bei unter 15 kW (Launhardt et al., 1998).

Nach Angaben des Bundesverbands des Schornsteinfegerhandwerks gab es im Jahr 2023 rund 11,7 Millionen Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland (ZIV, 2023). Eine Übersicht der Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe nach Baujahr bzw. Datum auf dem Typschild der Anlage (in Prozent) ist in Abbildung 4 dargestellt. Es wird deutlich, dass etwa ein Viertel der Anlagen ab dem Jahr 2015 errichtet oder typgeprüft wurde. Etwa ein weiteres Viertel wurde vor 1995 errichtet. Etwa die Hälfte der Anlagen stammt aus der Zeit von 1995 bis 2014.

Abbildung 4: Übersicht der Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe nach Baujahr bzw. Datum auf dem Typschild der Anlage (in Prozent).



Quelle: ZIV (2023)

Festbrennstoffkessel sind Heizkessel, die ebenfalls mit festen Brennstoffen (z. B. Holz, Pellets, Kohle) betrieben werden, aber speziell zur Beheizung eines gesamten Gebäudes ausgelegt sind. Nach Angaben des Bundesverbands des Schornsteinfegerhandwerks gab es im Jahr 2023 rund 1,13 Millionen Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe (sog. Festbrennstoffkessel) (ausgenommen Einzelraumfeuerungsanlagen) (ZIV, 2023). Laut Verordnung (EU) 2015/1189⁶, bezeichnet der Begriff „Festbrennstoffkessel“ *„eine Vorrichtung mit einem oder mehreren Wärmeerzeugern auf Festbrennstoffbasis, die ein wasserbetriebenes Zentralheizungssystem mit Wärme versorgt, um die Innentemperatur eines oder mehrerer geschlossener Räume auf die gewünschte Temperatur zu bringen und dort zu halten (und die nicht mehr als 6 % ihrer Nennwärmeleistung an ihre Umgebung verliert)“*.

Obwohl die Verordnung Brennstoffe wie Holz, Pellets und bestimmte Kohlearten zulässt, werden im Rahmen dieses Projekts nur Holzbrennstoffe wie Hackschnitzel, Pellets und Scheitholz betrachtet. Diese umfassen gemäß der Verordnung (1. BImSchV, § 3 Absatz 1):

„3. naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, insbesondere in Form von Scheitholz und Hackschnitzeln, sowie Reisig und Zapfen,

4. naturbelassenes nicht stückiges Holz, insbesondere in Form von Sägemehl, Spänen und Schleifstaub, sowie Rinde,

5a. Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts nach DIN 51731, Ausgabe Oktober 1996, oder in Form von Holzpellets nach den brennstofftechnischen Anforderungen des DINplus-Zertifizierungsprogramms "Holzpellets zur Verwendung in Kleinfeuerstätten nach DIN 51731-HP 5", Ausgabe August 2007, sowie andere Holzbriketts oder Holzpellets aus naturbelassenem Holz mit gleichwertiger Qualität,

6. gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder infolge einer Behandlung enthalten sind und Beschichtungen keine halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten,

⁶ VERORDNUNG (EU) 2015/ 1189 DER KOMMISSION - vom 28. April 2015 - zur Durchführung der Richtlinie 2009/ 125/ EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Festbrennstoffkesseln

7. Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder infolge einer Behandlung enthalten sind und Beschichtungen keine halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten, ...“

Es ist wichtig zu beachten, dass die in § 3 Absatz 1 Nummer 6 oder Nummer 7 genannten Brennstoffe nur in Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von 30 Kilowatt oder mehr und nur in Betrieben der Holzbearbeitung oder Holzverarbeitung eingesetzt werden dürfen.

Die neue EU POP VO legt Grenzwerte für PCDD/F- und dl-PCB-Konzentrationen für Aschen aus privaten Haushalten fest, oberhalb derer die Aschen so zu behandeln sind, dass die darin enthaltenen PCDD/F- und dl-PCB zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden. Dennoch sollen im Rahmen dieses Forschungsvorhaben auch Betriebe der Holzbearbeitung oder Holzverarbeitung betrachtet werden, die die Brennstoffe Nummer 6 oder Nummer 7 einsetzen und eine Nennwärmeleistung von mehr als 30 kW haben. Durch die Analyse der Aschen aus diesen Anlagen kann untersucht werden, ob gewerbliches Holzmaterial, das als Brennstoff verwendet wird, zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen an PCDD/F, beiträgt.

Falls erhöhte Werte ermittelt werden, könnte dies auf einen Bedarf an weitergehenden Maßnahmen und gegebenenfalls zusätzlicher Überwachung solcher Betriebe hinweisen.

2.2.2 Mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen

Mittelgroße Feuerungsanlagen im Rahmen dieses Projekts sind **jene Anlagen, die im Geltungsbereich der 44. BImSchV liegen**. Diese Verordnung ist seit dem 13. Juni 2019 in Kraft.

Mittelgroße Feuerungsanlagen im Sinne dieser Verordnung sind **Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung zwischen 1 und 50 Megawatt (MW) sowie genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung unter 1 MW**. Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen unter 1MW fallen unter die 1. BImSchV (siehe Kapitel 2.2.1), während Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von 50 MW oder mehr in der Regel in der 13. BImSchV geregelt sind.

In Deutschland gibt es etwa 40.000 mittelgroße Feuerungsanlagen (TÜV SUD, 2020) und davon sind ca. 800 Feuerungsanlagen für feste Biomasse⁷.

Am 25. November 2015 haben das Europäische Parlament und der Rat die Richtlinie (EU) 2015/2193 zur Begrenzung der Emissionen bestimmter Schadstoffe aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in die Luft verabschiedet. Diese Richtlinie ist Teil des EU-Maßnahmenpakets für saubere Luft. Bislang wurden die Anforderungen für Anlagen, die in den Geltungsbereich der Richtlinie (EU) 2015/2193 fallen, sowohl in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft) als auch in der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) geregelt. Nun werden sie in der 44. BImSchV zusammengefasst und an den fortgeschrittenen Stand der Technik angepasst.

Im Rahmen dieses Projekts liegt der Fokus auf Biomassebrennstoffen, die in der 44. BImSchV wie folgt definiert sind:

„Biobrennstoffe im Sinne dieser Verordnung sind:

- 1. die Produkte land- oder forstwirtschaftlichen Ursprungs aus pflanzlichem Material oder aus Teilen davon, sofern sie zur Nutzung ihres Energieinhalts verwendet werden, und*
- 2. folgende Abfälle, falls die erzeugte Wärme genutzt wird:*

⁷ Auskunft Umweltbundesamt im Dezember 2024

- a) pflanzliche Abfälle aus der Land- und Forstwirtschaft;
- b) pflanzliche Abfälle aus der Nahrungsmittelindustrie;
- c) natürliche, nicht gefährliche Hölzer aus der Landschaftspflege, sofern sie auf Grund ihrer stofflichen Beschaffenheit mit den Hölzern aus der Forstwirtschaft vergleichbar sind;
- d) faserige pflanzliche Abfälle und Ablaugen aus der Herstellung von natürlichem Zellstoff und aus der Herstellung von Papier aus Zellstoff, sofern sie am Herstellungsort mitverbrannt werden;
- e) Korkabfälle;
- f) Holzabfälle mit Ausnahme von Holzabfällen, die infolge einer Behandlung mit Holzschutzmitteln oder infolge einer Beschichtung halogenorganische Verbindungen oder Schwermetalle enthalten können; hierzu gehören insbesondere Holzabfälle aus Bau- und Abbruchabfällen.“

Da viele mittelgroße Feuerungsanlagen Altholz der Kategorien I und II als Brennstoff nutzen, werden Anlagen, in denen Altholz dieser Kategorien verbrannt wird, im Rahmen dieses Vorhabens beprobt. Bei der Verbrennung von Altholz der Kategorie II sowie bei der Verbrennung von Straßenbegleitgrün, welches ebenfalls als Brennstoff von der 44. BImSchV abgedeckt wird, sind höhere PCDD/F- und PCB-Werte zu erwarten. So wurden zum Beispiel in einer Studie des Ministeriums für Umwelt und Verkehr, Baden-Württemberg, aus dem Jahr 2003 für die Verbrennung von Straßenbegleitgrün vergleichsweise hohe PCDD/F-Gehalte in Grob- und Flugasche aus Festbrennstoffkesseln identifiziert (54-1.114 ng I-TEQ/kg) (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003).

2.3 Ergebnisse

Hintergrund zu TEF-Konzepten

Beim Vergleich der TEQ Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in Grob- und Flugaschen aus kleinen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen ist zu beachten, dass im Laufe der Jahre verschiedene TEF-Konzepte entwickelt wurden. Diese Konzepte dienen dazu, die Toxizität von Dioxinen und ähnlichen Verbindungen auf der Grundlage von Toxizitätsäquivalentfaktoren (TEF) zu bewerten und in Toxizitätsäquivalenten (TEQ) anzugeben. Diese Konzepte wurden im Laufe der Zeit weiterentwickelt, was zu Unterschieden in den Berechnungsmethoden und den resultierenden TEQ-Gehalten führt.

Die Entwicklung der TEQ begann in den 1980er Jahren mit den Einführungen des I-TEQ-Systems für PCDD/F, das von der NATO (*Committee on the challenges of the Modern Society*; NATO-CCMS) formalisiert wurde (Kutz et al., 1990). Bereits zuvor wurden TEQ vom Bundesgesundheitsamt (BGA) entwickelt, die eine Grundlage für die Bewertung von PCDD/F darstellen (Pieper, 2001). In den 1990er Jahren wurde das System erweitert, um auch dl-PCB zu berücksichtigen, und 1998 wurden die WHO-TEQ entwickelt (Van der Berg, 1998). Im Jahr 2005 wurden die WHO-TEF basierend auf neuen toxikologischen Daten weiter verfeinert und aktualisiert (Van der Berg, 2006). Im Jahr 2022 wurden die TEF von der WHO erneut überarbeitet (DeVito et al., 2024), um neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in die Bewertung von dioxinähnlichen Verbindungen einfließen zu lassen. Obwohl dieses Update den Fortschritt in der Toxikologie widerspiegelt, wurde es bisher noch nicht flächendeckend in regulatorische Vorgaben übernommen.

So sind beispielsweise in der EU-POP-Verordnung weiterhin die TEF-Werte von 2005 zugrunde gelegt. Diese TEF sowie die TEF anderer TEF-Konzepte sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Der TEF ist ein Faktor, der die Giftigkeit einer einzelnen Substanz im Vergleich zum giftigsten Dioxin beschreibt, während der TEQ das Gesamtergebnis ist, das die Giftigkeit eines Stoffgemischs mithilfe dieser Faktoren ausdrückt.

Tabelle 3: TEF für PCDD, PCDF und dl-PCB gemäß verschiedenen TEF-Konzepten.

PCDD/F und dl-PCB	CAS-Nummer	TEF (BGA)	NATO (I-TEF) 1988	WHO 1998 TEF	WHO 2005 TEF	WHO 2022 TEF*
PCDD						
2,3,7,8-TeCDD	1746-01-6	1	1	1	1	1
1,2,3,7,8-PeCDD	40321-76-4	0,1	0,5	1	1	0,4
1,2,3,4,7,8-HxCDD	39227-28-6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09
1,2,3,6,7,8-HxCDD	57653-85-7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,07
1,2,3,7,8,9-HxCDD	19408-74-3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	35822-46-9	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05
OCDD	3268-87-9	0,001	0,001	0,0001	0,0003	0,001
PCDF						
2,3,7,8-TeCDF	51207-31-9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,07
1,2,3,7,8-PeCDF	57117-41-6	0,1	0,05	0,05	0,03	0,01
2,3,4,7,8-PeCDF	57117-31-4	0,1	0,5	0,5	0,3	0,1
1,2,3,4,7,8-HxCDF	70648-26-9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
1,2,3,6,7,8-HxCDF	57117-44-9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09
1,2,3,7,8,9-HxCDF	72918-21-9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
2,3,4,6,7,8-HxCDF	60851-34-5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	67562-39-4	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	55673-89-7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1
OCDF	39001-02-0	0,001	0,001	0,0001	0,0003	0,002
dl-PCB						
PCB 77	32598-13-3	k.A	k.A	0,0001	0,0001	0,0003
PCB 81	70362-50-4	k.A	k.A	0,0001	0,0003	0,006
PCB 105	32598-14-4	k.A	k.A	0,0001	0,00003	0,00003

PCDD/F und dl-PCB	CAS-Nummer	TEF (BGA)	NATO (I-TEF) 1988	WHO 1998 TEF	WHO 2005 TEF	WHO 2022 TEF*
PCB 114	74472-37-0	k.A	k.A	0,0005	0,00003	0,00003
PCB 118	31508-00-6	k.A	k.A	0,0001	0,00003	0,00003
PCB 123	65510-44-3	k.A	k.A	0,0001	0,00003	0,00003
PCB 126	57465-28-8	k.A	k.A	0,1	0,1	0,05
PCB 169	32774-16-6	k.A	k.A	0,01	0,03	0,005
PCB 156	38380-08-4	k.A	k.A	0,0005	0,00003	0,00003
PCB 157	69782-90-7	k.A	k.A	0,0005	0,00003	0,00003
PCB 167	52663-72-6	k.A	k.A	0,00001	0,00003	0,00003
PCB 189	39635-31-9	k.A	k.A	0,0001	0,00003	0,00003

*wurde bisher nicht flächendeckend in regulatorische Vorgaben übernommen

Wie bereits erwähnt, ist das WHO-TEQ Konzept von 2005 derzeit Standard, aber ältere Studien beziehen sich auf das sogenannte I-TEQ Konzept (Tysklind et al., 2024). Die TEF für bestimmte PCDD/F und dl-PCB unterscheiden sich zwischen den verschiedenen TEF-Konzepten. Dadurch wird der direkte Vergleich von Konzentrationswerten aus Studien, die unterschiedliche TEF-Konzepte verwenden, erschwert, was zu Inkonsistenz bei der Interpretation der Ergebnisse führen könnte. Tysklind et al. haben allerdings einen Vergleich des WHO 2005-TEQ und des I-TEQ Konzeptes für PCDD/F durchgeführt und gezeigt, dass es zwar geringfügige Unterschiede in den Ergebnissen gibt, die berechneten TEQ-Werte und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen dennoch grundsätzlich übereinstimmen. Daher können Studien, die diese TEQ-Konzepte anwenden, direkt miteinander verglichen werden (Tysklind et al., 2024).

Verwendung relevanter Begriffe

Die Literaturrecherche im Rahmen dieser Studie zeigt, dass Begriffe für Grob- und Flugaschen unterschiedlich verwendet werden. Begriffe wie „Flugasche“, „Feinasche“, „Rostasche“, oder „Ruß“ werden oft synonym oder mit nur kleinen Unterschieden verwendet, je nach Kontext oder Fachrichtung. Diese Unterschiede erschweren den Vergleich und die Auswertung von Studien. Daher wurde für dieses Projekt eine standardisierte Terminologie verwendet. Sie soll eine klare Kategorisierung und den Vergleich der Ergebnisse ermöglichen.

In Anlehnung an die Studie des Bayerischen Landesamtes für Umwelt aus dem Jahr 2009 basiert die Klassifizierung von Aschen in diesem Projekt auf ihrer Herkunft und ihrer Partikelgröße und umfasst die folgenden Kategorien (siehe auch Abbildung 5):

- ▶ **Grobasche** – Grobasche bezeichnet die Asche, die aus dem Rost oder der Brennkammer bzw. dem Feuerraum stammt. Diese besteht hauptsächlich aus den anorganischen nicht brennbaren Bestandteilen der Biomasse (Barbarits et al., 2008). Sie setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen:
 - **Rostasche** – Grobkörniger Rückstand, der nach der Verbrennung durch den Rost fällt.
 - **Brennraumasche** – Grobkörniger, teilweise stückiger Rückstand, der nach der Verbrennung im Brennraum oder in der Brennkammer verbleibt.

Rostasche, Brennraumasche oder eine Mischung aus Rostasche und Brennraumasche wird allgemein als Grobasche bezeichnet, da sie sich durch eine höhere Partikelgröße und eine

grobe Struktur auszeichnet. Grobasche enthält größere anorganische Anteile, die aufgrund ihrer höheren Siedetemperatur und ihrer Partikelgröße im Rückstand verbleiben und nicht mit dem Abgasstrom mitgerissen werden (Barbarits et al., 2008). Da Rostasche und Brennraumasche eine vergleichbare chemische Zusammensetzung aufweisen, wurde auf eine getrennte Erfassung und Analyse verzichtet. In der Studie des Bayerischen Landesamt für Umwelt (2009) ist diese Asche als Feuerraumasche definiert.

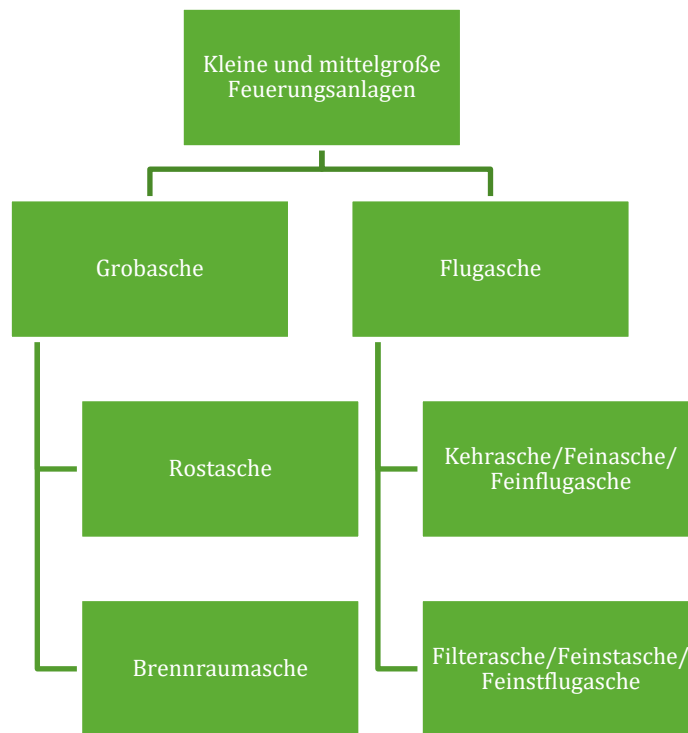
- **Flugasche** – Flugaschen werden umgangssprachlich oft auch als Ruß bezeichnet. Man unterscheidet:
- **Kehrasche**⁸ – Kehrasche ist ein feinkörniger Rückstand, der durch einen hohen Kohlenstoffgehalt und eine geringe Dichte gekennzeichnet ist (auch als **Flug- oder Feinasche** bezeichnet). Sie ist in der Regel schwarz gefärbt und wird im Rahmen der Kehrung von der Schornsteininnenwand abgekehrt und anschließend aus der Revisionsklappe entnommen. Aufgrund ihrer geringen Dichte verlässt Kehrasche den Feuerraum. Der Teil der Flugasche, der die Abgasanlage verlässt, wird nach dem Austritt als Feinstaub bezeichnet. Beim Vorhandensein eines nachgeschalteten Abscheiders kann diese Aschefraktion durch eine Minderungseinrichtung zurückgehalten werden. Wird diese Aschefraktion durch einen Zyklonabscheider zurückgehalten, wird sie als Zyklonasche beschrieben. In der Studie des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2009) ist diese Asche als Zyklonasche definiert.
 - **Filterasche**⁹ – Filterasche ist ein feinkörniger Rückstand, der einen hohen Kohlenstoffgehalt und eine geringe Dichte aufweist (auch als **Feinstflugasche oder Feinstasche** bezeichnet). Sie wird in Filtern, die sich hinter dem Wärmetauscher befinden, zurückgehalten. Bei Kleinfeuerungsanlagen der 1.BImSchV handelt es sich vorwiegend um elektrostatische Staubabscheider. Bei Mittelgroßen Feuerungsanlagen der 44. BImSchV handelt es sich auch um Gewebefilter oder Keramikfilter. Wenn diese Asche aus dem Schornstein austritt, trägt sie zur Luftverschmutzung bei und wird in der Luftreinhaltung abhängig von ihrer Größe als Feinstaub (PM10, PM2.5, PM1 oder PM0.1) bezeichnet.

Diese Kategorisierung dient der klaren Unterscheidung von Aschearten nach ihrer Entstehung, ihrer Partikelgröße sowie ihren physikalischen Eigenschaften. Die Flugasche hat im Gegensatz zur Grobasche den Feuerraum bereits verlassen.

⁸ umgangssprachlich als Ruß bezeichnet

⁹ umgangssprachlich als Ruß bezeichnet

Abbildung 5. Kategorien von Aschefraktionen in Kleinfeuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen, wie im Rahmen des Projekts definiert



Quelle: Eigene Abbildung, Ramboll 2024

Laut einer Studie des Ministeriums für Umwelt und Verkehr, Baden-Württemberg aus dem Jahr 2003, entfallen bei den Aschen aus der Verbrennung von Laubholz, Nadelholz, Rinden, Pappelholz und Straßenbegleitgrün zwischen 85 und 95% der Gesamtmenge auf die Grobasche (Rostasche) und 5 - 15% auf die Feinasche (Zyklon-/Filterasche) (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003).

Um den Vergleich zwischen verschiedenen Studien zu ermöglichen, werden die in der Literatur verwendeten Begriffe den im Projekt definierten Kategorien zugeordnet. Tabelle 4 zeigt, wie häufig verwendete Begriffe aus der Literatur in die Projektkategorien eingeordnet werden.

Tabelle 4: Begriffe aus der Literatur, die den im Rahmen des Projekts definierten Begriffen zugeordnet sind.

Zuordnung im Projekt	Begriff aus der Literatur	Erläuterung	Quelle
Grobasche	Brennraumasche	Asche aus dem Brennraum	TLLLR (2020), Pieper (2001)
Grobasche	Feuerraumasche	Asche aus dem Feuerraum	Pieper (2001)
Grobasche	Feuerraumasche (Feinfraktion)	Durchgang aus Siebung mit Siebmaschenweite von $d = 3,15 \text{ mm}$	Launhardt et al. (1998)
Grobasche	Feuerraumasche (Grobfraktion)	Rückstand aus Siebung mit Siebmaschenweite von $d = 3,15 \text{ mm}$	Launhardt et al. (1998)
Grobasche	Rostasche	k.A.	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)

Zuordnung im Projekt	Begriff aus der Literatur	Erläuterung	Quelle
Flugasche (Kehrasche)	Feinasche	Zyklon- und Feinstflugasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Flugasche (Kehrasche)	Flugasche	k.A	Pieper (2001)
Flugasche(Kehrasche)	Rauchgasrohr	k.A	Pieper (2001)
Flugasche (Kehrasche)	Wärmetauscherasche (Flugasche)	Flugasche aus dem Wärmetauscher	Launhardt et al. (1998)
Flugasche (Kehrasche)	Wärmetauscher	k.A	Pieper (2001)
Flugasche (Kehrasche)	Zyklonasche	Asche aus dem Zyklon	TLLLR (2020), Pieper (2001)
Flugasche(Kehrasche)	Kaminruß	k.A	Dumler-Gradl et al. (1995)
Flugasche(Kehrasche)	Kaminruß (Feinflugasche)	Kaminruß/Feinflugasche aus dem gereinigten Kaminteilstück	Launhardt et al. (1998)
Flugasche(Filterasche)	Filterasche	Asche aus dem Filter wie Gewebefilter	TLLLR (2020)

Bei der Besprechung von Ergebnissen wird der ursprüngliche Begriff aus der Literatur genannt und mit der entsprechenden Zuordnung im Projekt ergänzt. Diese Vorgehensweise soll Nachvollziehbarkeit und Transparenz sicherstellen.

Ergebnisse der Literaturrecherche

2.3.1 Kleinf Feuerungsanlagen

Die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in Grob- und Flugaschen wurden in verschiedenen Studien untersucht. Diese Studien liefern wichtige Informationen über die Verteilung und die Auswirkungen von PCDD/F und dl-PCB in Verbrennungsrückständen wie Asche und Ruß. In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Studien und deren Ergebnisse zu den PCDD/F- und dl-PCB-Werten in verschiedenen Grob- und Flugaschen vorgestellt.

2.3.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen

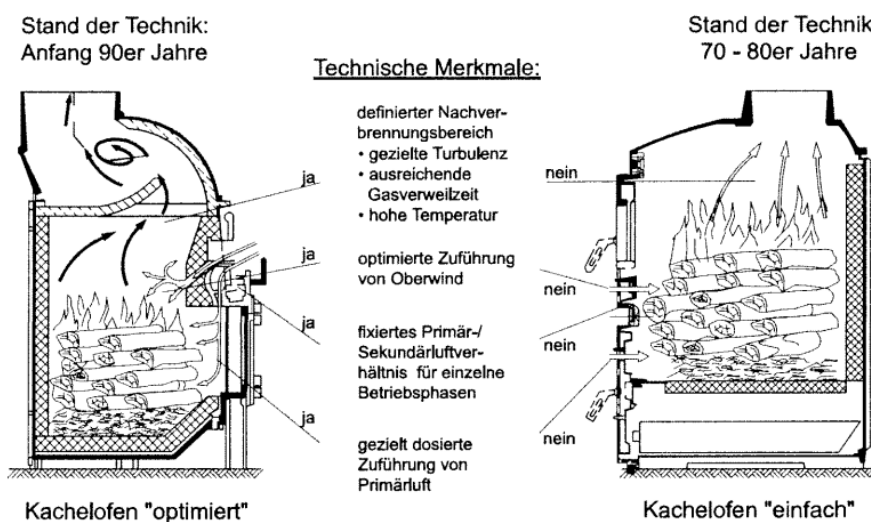
Die verfügbare Literatur zu den Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in Grob- und Flugaschen aus Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland ist begrenzt. Während der Literaturrecherche für dieses Projekt wurden drei Studien (Launhardt et al., 1998, Dumler-Gradl et al., 1995, Thoma, 1998) gefunden, die relevante Informationen zu Einzelraumfeuerungsanlagen im Rahmen dieser Untersuchung liefern. Allerdings befassten sich diese Studien ausschließlich mit PCDD/F und enthalten keine Angaben zu den Gehalten an dl-PCB. Die relevanten Informationen aus dieser Studie sind in Anhang A.1 (siehe Tabelle 31) aufgeführt.

Grobasche

Eine Studie von Launhardt et al. untersuchte verschiedene Ascheproben, die während der Verbrennungsversuche gesammelt wurden. Analysiert wurden Proben aus dem Feuerraum, dem

Wärmetauscher sowie Kaminruß aus dem gereinigten Bereich¹⁰. Wie in der Studie erläutert, verbleibt der Großteil des Verbrennungsrückstandes als Grobasche, die bei den Verbrennungsversuchen 83-93 % des Gesamtvolumens ausmachte. Zusätzlich wird in der Studie zwischen der Grob- und Feinfraktion der Feuerraumasche unterschieden. Die Grobfraktion, die durch Siebung getrennt wurde, machte 50-70% der Feuerraumasche aus und bestand hauptsächlich aus unverbrannten Brennstoffresten. Die Feinfraktion hingegen bestand größtenteils aus mineralischen Rückständen des verbrannten Brennstoffs. Die gefundenen Konzentrationen von PCDD/F in der Feinfraktion der Grobasche lagen zwischen 0,8 ng/kg I-TEQ und 75 ng/kg I-TEQ, wobei die Aschenproben von Nadelholz, insbesondere in Scheitform, im Allgemeinen den höchsten PCDD/F Gehalt aufwiesen (Launhardt et al., 1998). In der Studie wurden zwei verschiedene Systeme untersucht: „einfach“ und „optimiert“. Wie in der Studie definiert, bezieht sich ein „optimierter“ Ofen auf einen Kachelofen, der mit den folgenden technischen Merkmalen ausgestattet ist: definierter Nachverbrennungsbereich (gezielte Turbulenz, ausreichende Gasverweilzeit, hohe Temperatur), optimierte Zuführung von „Oberwind“¹¹, fixiertes Primär-/Sekundärluftverhältnis für einzelne Betriebsphasen, und gezielt dosierte Zuführung von Primärluft (Launhardt et al., 1998). Ein „einfacher“ Kachelofen hat diese technischen Merkmale nicht (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Verbrennungstechnische Merkmale der untersuchte Kachelöfen Einsätze



Quelle: Launhardt et al., 1998

Beim Vergleich dieser zwei verschiedenen Kachelöfen zeigte sich, dass die Asche des „optimierten“ Systems weniger PCDD/F enthielt als die des „einfachen“ Systems. Im Gegensatz zur Feinfraktion wurden in der Grobfraktion der Feuerraumasche von beiden Kachelöfen fast keine PCDD/F gefunden. Die Konzentrationen in diesen Proben lagen zwischen 0,6 ng/kg I-TEQ und 1,2 ng/kg I-TEQ, was nahe der Nachweisgrenze der Analyseverfahren lag. Der höchste PCDD/F Gehalt von 75 ng/kg I-TEQ wurde in der Feinfraktion der Feuerraumasche eines einfachen Kachelofens gemessen (Launhardt et al., 1998).

¹⁰ Ein „Schornstein“ ist eine überwiegend senkrechte Rauchgasleitung, die speziell dazu dient, Abgase und Rauchgase aus einer Feuerstätte sicher über das Dach ins Freie zu leiten. Der Begriff „Kamin“ bezeichnet die Feuerstelle selbst. Der Begriff „Kamin“ wird allerdings oft synonym mit dem Begriff „Schornstein“ verwendet. In diesem Bericht werden diese Begriffe in ihrer eigentlichen Bedeutung verwendet, es sei denn, sie stammen aus, oder stehen im Bezug zur zugrundeliegenden Literatur, wie hier, bei Launhardt et al., 1998. Dort wird der Begriff Kamin für den eigentlichen Schornstein verwendet. Was gemeint ist, ergibt sich jeweils aus dem Zusammenhang.

¹¹ Der Begriff „Oberwind“ bezeichnet Sekundärluft, die oberhalb des Brennstoffs zugeführt wird, im Gegensatz zu Primärluft, die von unten zugeführt wird. Sekundärluft soll die Nachverbrennung im oberen Bereich der Flamme verbessern.

Kehrasche

Laut der Studie von Launhardt et al. entweicht nur ein kleiner Teil der Verbrennungsrückstände mit den Abgasen aus dem Feuerraum. Ein Teil dieser Rückstände lagert sich als Flug- und Feinflugasche an den Innenwänden des Wärmetauschers und des Kamins ab. Die feinsten Partikel werden jedoch mit den Abgasen in die Umgebung transportiert. In den von Launhardt et al. untersuchten Anlagen machten die Aschepartikel im Abgas 7 bis 17% des gesamten Rückstands aus. Der Wärmetauscher trägt durch seine Fähigkeit, Aschepartikel zurückzuhalten, dazu bei, den Staubgehalt in den Abgasen zu verringern. Der Kaminruß machte 2 bis 4% des Rückstands aus, während die Wärmetaucherasche (Flugasche die im Wärmetauscher anfällt) zwischen 0,8 bis 8% lag (Launhardt et al., 1998).

Die PCDD/F Gehalte in der untersuchten Flugasche aus dem Wärmetauscher und Kaminruß werden in Tabelle 31 als Kehrasche zusammengefasst. Laut Launhardt et al. wurden niedrige Konzentrationen von PCDD/F (Durchschnitt von 6,5 ng I-TEQ/kg TM) in der Flugasche aus dem Wärmetauscher gefunden. Die nachgewiesenen Durchschnittswerte von PCDD/F in Kaminruß lagen (mit 7,9 ng I-TEQ/kg TM) nur leicht darüber (Launhardt et al., 1998). Die von Launhardt et al. ermittelten PCDD/F Konzentrationen sind deutlich niedriger als die von Dumler-Gradl et al. beobachtet wurden.

Dumler-Gradl et al. fanden im Jahr 1986 in einer bayernweiten Untersuchung Durchschnittswerte von 3.454 ng I-TEQ/kg TM PCDD/F im Kaminruß von Kachelöfen und 2.105 ng I-TEQ/kg TM PCDD/F im Kaminruß von Einzelöfen (Dumler-Gradl et al., 1998). In einer anderen Studie wurden deutlich höhere Konzentrationen von PCDD/F I-TEQ (bis zu 48.240 ng/kg I-TEQ) im Kaminruß gefunden (Thoma, 1988). Es gibt dort jedoch keine Angaben zu der verwendeten Holzart in den Proben, die aus Heizsystemen für Häuser entnommen wurden.

Nach Launhardt et al. hängt die PCDD/F Belastung der Aschen aus dem Feuerraum stark von den Brennstofftypen ab. Während die PCDD/F-Konzentrationen in den Feinfraktionen der Feuerraumaschen von Buchenholzverbrennung ≤ 20 ng/kg I-TEQ blieben, wurden bei der Verbrennung von Nadelholz PCDD/F durchschnittliche Konzentrationen bis zu 75 ng/kg I-TEQ gemessen. Die Temperaturverläufe im Feuerraum zeigten, dass PCDD/F während der de-novo-Synthese in der letzten Abkühlphase entstehen, die nach mehreren Verbrennungszyklen beginnt. In dieser Phase kühlt die Glut ab und begünstigt die PCDD/F-Bildung. Unverbrannte Holzkohle, die als Grobfraktion aus der Feuerraumasche ausgesiebt wurde, hatte hingegen sehr niedrige PCDD/F-Konzentrationen (Launhardt et al., 1998).

Fazit

Die Ergebnisse der Literaturrecherche lassen folgende Schlüsse zu:

Die PCDD/F-Gehalte variieren je nach Art der Verbrennungsanlage, dem verwendeten Brennstoff und der Aschefraktion. In Grobaschen aus Einzelraumfeuerungsanlagen sind die PCDD/F-Gehalte in der Regel relativ niedrig (< 100 ng I-TEQ/kg).

In der Flugasche jedoch sind die PCDD/F-Gehalte deutlich höher und können bis zu mehreren 1.000 ng I-TEQ/kg betragen. In einigen Studien wurden hohe Werte von über 10.000 ng I-TEQ/kg gemessen. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass die sehr kleinen Rußpartikel eine sehr große Oberfläche bieten, auf der PCDD/F die durch die Verbrennung gebildet wurden adsorbieren können.

Die Holzart hat ebenfalls einen Einfluss auf die PCDD/F-Gehalte in der Asche. Bei Nadelholz sind die in der identifizierten Literatur berichteten Gehalte in der Asche in der Regel höher als bei Laubholz.

2.3.1.2 Festbrennstoffkessel

Im Gegensatz zur verfügbaren Literatur über Einzelraumfeuerungsanlagen wurden im Bereich der Festbrennstoffkessel mehr Studien gefunden, die Information über die PCDD/F- und dl-PCB-Konzentrationen in Asche und Ruß enthalten.

Grobasche

Der Literatur zufolge sind die PCDD/F-Konzentrationen in Feuerraumasche beim Verbrennen von unbehandeltem Nadelholz und Laubholz in den meisten Festbrennstoffkesseln niedrig, insbesondere in solchen mit Multizyklonen oder Gewebefiltern. Zum Beispiel führte die Verbrennung von Laubholz in verschiedenen Festbrennstoffkesseln zu PCDD/F Konzentrationen im Bereich von <2 ng I-TEQ/kg in Grobasche aus Hackschnitzelkesseln (Ministerium für Umwelt und Verkehr BW, 2003) bis 4,3 ng I-TEQ/kg in Grobasche aus Scheitholzkeßeln (Launhardt et al., 1998). Im Gegensatz dazu waren die PCDD/F Konzentrationen bei der Verbrennung von unbehandeltem Nadelholz in Feuerraumasche deutlich höher und reichten von <2 ng I-TEQ/kg in Grobasche aus Hackschnitzelkesseln bis 310 ng I-TEQ/kg in Grobasche aus Scheitholzkeßeln (Ministerium für Umwelt und Verkehr BW, 2003; Launhardt et al., 1998). Bemerkenswert ist, dass kleinere Systeme mit Abgasgebläse und Mikroprozessor-Luftregelung zu sehr niedrigen PCDD/F-Konzentrationen in der Grobfraktion der Grobasche aus Scheitholzkeßeln führen (0,9–1,6 ng I-TEQ/kg), jedoch deutlich höhere Konzentrationen in der Feinfraktion der Grobasche aus Scheitholzkeßeln, die bis zu 310 ng I-TEQ/kg erreicht können (Launhardt et al., 1998). Dies zeigt, dass feinere Partikel tendenziell mehr Schadstoffe binden.

Studien zeigen, dass zyklonbasierte Systeme im Allgemeinen niedrigere PCDD/F- und PCB-Konzentrationen in der Grobasche aufweisen, die teilweise unterhalb der Nachweisgrenze liegen (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003; TLLR 2020). Die Studie des Ministeriums für Umwelt und Verkehr zeigt zum Beispiel, dass PCDD/F-Gehalte in Rostasche bei der Verbrennung von unbehandeltem Holz unter 2 ng I-TEQ/kg liegen (Ministeriums für Umwelt und Verkehr, BW, 2003).

Für die Verbrennung von behandeltem Holz (z. B. Spanplatten mit Sulfat-/Chloridhärtung) werden höhere PCDD/F-Konzentrationen in der Brennraumasche berichtet, mit Werten zwischen 175 und 187 ng I-TEQ/kg (Pieper, A., 2001). PCDD/F-Konzentrationen in der Feuerraumasche wurden auch bei der Verbrennung anderer Biomassen wie Getreide, Stroh und Straßenbegleitgrün gemessen. Zum Beispiel lagen die PCDD/F und dl-PCB Konzentrationen bei der Getreideverbrennung zwischen 3 und 46 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg in Grobasche aus Pelletkesseln (TLLLR, 2020), bei Strohverbrennung zwischen <1 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg in Grobasche aus einer Anlage, in der Rundballen und Quaderballen verbrannt werden (TLLLR, 2020) und 33 ng I-TEQ/kg TM in Grobasche aus einer Anlage, in der pelletiertes Weizenstroh verbrannt wird (Launhardt et al., 2000). Bei Straßenbegleitgrün waren die Werte niedrig (<2 ng I-TEQ PCDD/F/kg und <0,02 mg PCB/kg Asche) (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Verbrennung von solchen Biomassen nicht zu erhöhten PCDD/F und PCB-Gehalten in der Grobasche führt.

Bei der Verbrennung von gemischtem Nadelholz wurden bei 30% Heizlast PCDD/F-Konzentrationen in Brennraumasche von bis zu 68,1 ng I-TEQ/kg gemessen (Pieper, 2001). Bei 100% Heizlast sanken die Werte jedoch unter optimierten Bedingungen deutlich auf einen Bereich von 0,006–0,038 ng I-TEQ/kg (Pieper, 2001).

Kehrasche

In Bezug auf Kehrasche zeigt unbehandeltes Holz eine breite Spanne an PCDD/F-Konzentrationen, die stark vom Festbrennstoffkessel abhängen.

Bei der Verbrennung von unbehandeltem Laubholz reichten die PCDD/F Konzentrationen von 25 ng I-TEQ/kg in Kehrasche aus Scheitholzkesseln (Launhardt et al., 1998) bis 896 ng I-TEQ/kg in Kehrasche aus Hackschnitzelkesseln (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003). Höhere Konzentrationen wurden in der Feinasche aus Hackschnitzelkesseln in Experimenten mit Zyklonfiltern festgestellt, insbesondere 506 ng I-TEQ/kg bei der Verwendung von Pappelholz und 896 ng I-TEQ/kg bei anderen Laubholzarten, die nicht weiter definiert sind (Ministerium für Umwelt und Verkehr BW, 2003).

Unbehandeltes Nadelholz zeigt etwas niedrigere Konzentrationen, die zwischen 23 ng I-TEQ/kg in Wärmetauscherasche (Launhardt et al., 2000) und 1.577 ng I-TEQ/kg in der Feinasche aus Hackschnitzelkesseln (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003) lagen. Zum Beispiel lagen die PCDD/F-Konzentrationen in der Flugasche aus Wärmetauschern bei 23–53 ng I-TEQ/kg, wenn gehackte Fichte verbrannt wurde (Launhardt et al., 2000). Bei der Verbrennung von gemischtem Nadelholz erreichten die PCDD/F-Konzentrationen bis zu 117 ng I-TEQ/kg in Flugasche (Pieper, 2001) und 1.577 ng I-TEQ/kg in Feinasche aus Hackschnitzelkesseln bei anderen nicht definierten Laubholzarten (Ministerium für Umwelt und Verkehr BW, 2003).

Bei behandeltem Holz, wie z. B. mit Sulfat/Chlorid gehärteten Spanplatten, wurden sehr unterschiedliche PCDD/F-Konzentrationen in der Flugasche gemessen, die je nach Heizlast von 28,5 bis 515 ng I-TEQ/kg reichten (Pieper, 2001). Die Verbrennung von gemischtem Holz, wie unbehandeltem gehackten Fichtenholz zusammen mit chemisch behandeltem Holz im Verhältnis 3:1 führt zu moderaten bis hohen PCDD/F-Konzentrationen (300–743 ng I-TEQ/kg) in der Flugasche (Pieper, 2001).

Flugasche aus der Verbrennung von Getreide (z. B. Triticale) in wassergekühlten Verbrennungsschalen zeigte moderate PCDD/F-Konzentrationen von 401 ng I-TEQ/kg bei 100 % Heizlast (Launhardt et al., 2000). Die Verbrennung von Stroh führt zu stark schwankenden PCDD/F-Konzentrationen, abhängig von der Last und den Bedingungen. Zum Beispiel ergab die Verbrennung von gehacktem Stroh PCDD/F-Konzentrationen in der Wärmetauscherasche von 1.129 ng I-TEQ/kg bei voller Last (Launhardt et al., 2000). Im Kaminruß waren die Konzentrationen noch höher (1.691 ng I-TEQ/kg) (Launhardt et al., 2000). Bei der Verbrennung von pelletiertem Stroh wurde eine PCDD/F-Konzentration von 860 ng I-TEQ/kg bei voller Last gemessen, die jedoch unter Teillast auf 5.382 ng I-TEQ/kg anstieg (Launhardt et al., 2000). Rapspresskuchen und zerkleinertes Heu führten zu PCDD/F-Konzentrationen von 715 ng I-TEQ/kg bzw. 3.796 ng I-TEQ/kg in der Flugasche (Launhardt et al., 2000).

Filterasche

Filterasche aus der Verbrennung von unbehandeltem Holz zeigt in der Regel relativ niedrige PCDD/F-Konzentrationen. Zum Beispiel führte die Verbrennung von unbehandeltem Häcksel zu PCDD/F-Konzentrationen von 91 ng TEQ/kg TM (WHO₂₀₀₅) (TLLLR, 2020). Die Verbrennung von Getreide zeigte eine breite Spanne an PCDD/F-Konzentrationen in der Filterasche. In etwas größeren Systemen (0,95 MW), die Getreide als Brennstoff nutzen und mit einer Kombination aus Multizyklon und Gewebefilter ausgestattet sind, lagen die PCDD/F- und dl-PCB-Konzentrationen zwischen 67 und 271 ng TEQ/kg TM (WHO₂₀₀₅) (TLLLR, 2020). Andere Biomassen, wie Heu und gemischte Biomasse (z. B. Heu, Schilf und Holz), zeigten ebenfalls vergleichsweise hohe PCDD/F-Konzentrationen. Ein gemischter Biomassebrennstoff aus 75 % Heu, 10 % Schilf und 15 % Holz ergab PCDD/F und dl-PCB-Konzentrationen von 168 bis 2.100 ng TEQ/kg TM (WHO₂₀₀₅) in Filterasche aus Systemen mit Multizyklon und Gewebefiltern (TLLLR, 2020).

Fazit

Insgesamt zeigt die Literaturrecherche zu den Festbrennstoffkesseln, dass die PCDD/F-Gehalte in Aschen und Ruß von der Art des Brennstoffs und der Verbrennungstechnologie abhängen.

In der Grobasche sind die PCDD/F-Gehalte in der Regel relativ niedrig (<100 ng I-TEQ/kg), insbesondere bei der Verbrennung von unbehandeltem Holz. Dies bedeutet, dass größere Aschepartikel tendenziell geringe Mengen dieser Schadstoffe enthalten.

In der Feinfraktion der Grobasche jedoch können die Gehalte deutlich höher sein, mit Werten, die bis zu mehrere hundert ng I-TEQ/kg erreichen können. Dies liegt daran, dass die feineren Aschepartikel eine größere Oberfläche bieten, auf der PCDD/F adsorbieren können.

Mit zunehmender Heizlast (d. h., je höher die Verbrennungsintensität) sinken die PCDD/F-Gehalte in der Asche. Dies lässt sich damit erklären, dass bei höherer Verbrennungstemperatur und -energie die Bildung oder die Abscheidung von PCDD/F in der Asche reduziert wird bzw. chlororganische Verbindungen auch zerstört werden. Daher sind Aschen aus Verbrennungsprozessen mit höherer Heizlast weniger belastet als solche mit niedriger Heizlast.

In der Kehrasche sind die PCDD/F-Gehalte in der Regel moderat (<1.000 ng I-TEQ/kg). In Einzelfällen können die Gehalte auch über 1.000 ng I-TEQ/kg liegen. Interessanterweise sind bei der Verbrennung von anderen Biomassen als Holz, wie z. B. Stroh, teilweise höhere Werte zu finden, die sogar mehrere 1.000 ng I-TEQ/kg erreichen können. Dies zeigt, dass der verwendete Brennstoff einen Einfluss auf die PCDD/F-Gehalte in der Asche hat.

Es lässt sich grundsätzlich feststellen, dass die PCDD/F-Gehalte mit zunehmender Feinheit der Asche steigen. Das heißt, dass in Filterasche, der feinsten Aschefraktion, die höchsten Gehalte an PCDD/F zu erwarten sind, bei der Brennumasche die niedrigsten Gehalte.

Ausgewählte Informationen aus der Literaturrecherche sind in Anhang A.2 (siehe Tabelle 32) zusammengefasst.

2.3.1.3 Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe

Gemäß der 1.BImSchV dürfen bestimmte Brennstoffe, die in § 3 Absatz 1 Nummer 6 oder Nummer 7 genannt sind, nur in Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von 30 Kilowatt oder mehr und nur ausschließlich in Betrieben der Holzbearbeitung oder Holzverarbeitung eingesetzt werden. Die relevanten Informationen aus dieser Studie sind in Anhang A.4 (siehe Tabelle 34) zusammengefasst.

Insbesondere handelt es sich dabei um folgende Brennstoffe:

„6. gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder infolge einer Behandlung enthalten sind und Beschichtungen keine halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten,

7. Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder infolge einer Behandlung enthalten sind und Beschichtungen keine halogenorganischen Verbindungen oder Schwermetalle enthalten“

Da bei der Verbrennung dieser Brennstoffe höhere PCDD/F und dl-PCB Konzentrationen zu erwarten sind, umfasst dieses Projekt auch das holzverarbeitende Gewerbe, das sowohl gewerbliche als auch private Verbrennungssysteme umfasst (z. B. Wohnungen, die über ein gemeinsames Wärmesystem aus dem Gewerbe versorgt werden).

Jedoch sind die Informationen über die PCDD/F- und dl-PCB-Konzentrationen in Grob- und Flugaschen aus dem holzverarbeitenden Gewerbe in Deutschland sehr begrenzt. Im Rahmen der Literaturrecherche wurde nur eine Studie von Pohland et al. aus dem Jahr 1994 identifiziert.

Relevante Informationen aus dieser Studie sind in Tabelle 34 in Anhang A.4 aufgeführt. In der Studie wurden die Proben in fünf verschiedenen Werken der Holzverarbeitenden Industrie entnommen. Laut den Ergebnissen sind die Konzentrationen von PCDD/F in der Rostasche deutlich niedriger als in der Flugasche. Die PCDD/F Gehalte der Grobasche sind sehr niedrig (< 1 ng/kg TEQ BGA), die der Kehrasche sind ebenfalls niedrig (< 1.000 ng/kg TEQ BGA) (Pohland et al., 1994).

2.3.2 Mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen

Die hier dargestellten Informationen zu PCDD/F and dl-PCB aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen in Deutschland basieren hauptsächlich auf zwei umfassenden Studien. Die relevanten Informationen aus diesen Studien sind in Anhang A.3 (siehe Tabelle 33) zusammengefasst.

Eine der Studien untersuchte verschiedene Anlagen (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003). Diese Anlagen wurden zufällig aus dem bestehenden Anlagenpark in Baden-Württemberg ausgewählt, basierend auf spezifischen Kriterien. Die untersuchten Anlagen, die unter die Kategorie der mittelgroßen Feuerungsanlagen fallen, variierten in Größe und Leistung. Sie reichten von Rostfeuerungen mit einer thermischen Leistung von 1 MW bis hin zu Rostfeuerungen größer 20 MW, die zur Produktion von Strom und Wärme aus Altholz der Kategorie A II gemäß Altholzverordnung dienen. Die Studie analysierte Brennstoffe wie unbehandelte Resthölzer A I, kommunales Häckselgut, Straßenbegleitgrün, Laubholz, Nadelholz, Fichtenrinde, Kiefernrinde und Althölzer A II. In dieser Studie wurde die gesamte Gruppe der PCB analysiert, nicht nur die dl-PCB (Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW, 2003).

Die andere Studie, die vom Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum im Jahr 2020 veröffentlicht wurde, untersuchte Biomasseaschen, die in Heiz-(kraft)werken bei der Monoverbrennung von naturbelassenen pflanzlichen Brennstoffen entstehen. Neben Stroh und Landschaftspflegeheu als krautige Brennstoffe wurden in diesen Anlagen auch Holzhackschnitzel aus Wald- und Landschaftspflegeholz verwendet. Zu diesem Zweck wurde ein deutschlandweites Monitoring von elf bestehenden Biomasse-Konversionsanlagen und ihren Verbrennungsrückständen durchgeführt. Von den elf analysierten Biomassefeuerungsanlagen entsprechen zwei der Definition von mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen, die auch im Rahmen dieses Projekts untersucht werden (TLLLR, 2020).

Die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB aus den durchgeführten Studien sind in Tabelle 33 aufgeführt. Wie dort dargestellt liegen die Dioxinkonzentrationen in Grobasche vergleichsweise niedrig, insbesondere bei unbehandelten Holzbrennstoffen (z. B. Laubholz, Nadelholz und Resthölzer der Kategorie A I). Es wurden jedoch deutliche Schwankungen der PCDD/F-Konzentrationen in Kehrasche beobachtet, die vom Brennstofftyp und dem Verbrennungssystem abhängen. Während Aschen aus der Verbrennung von unbehandelten Holzbrennstoffen niedrige Toxizitätswerte (< 1 ng TEQ/kg) aufweisen, führt die Verbrennung von behandelten Hölzern zu höheren Werten, was den Einfluss der Brennstoffzusammensetzung auf die Bildung von PCDD/F und dl-PCB unterstreicht.

Fazit

Insgesamt scheinen die Dioxinkonzentrationen in mittelgroßen Feuerungsanlagen generell niedriger zu sein als in Kleinfeuerungsanlagen. Mittelgroße Anlagen verfügen in der Regel über eine besser gesteuerte Verbrennung und Abgasreinigung, wie zum Beispiel elektrostatische Abscheider oder Stofffilter, wodurch die Bildung von PCDD/F und dl-PCB verringert bzw. der Rückhalt von Partikeln verbessert wird. Im Gegensatz dazu fehlt es kleinen Anlagen häufig an solchen fortschrittlichen Merkmalen, was zu unvollständiger Verbrennung und einer höheren Entstehung von PCDD/F und dl-PCB führt.

3 Auswahl relevanter Anlagen in Deutschland, Probenahme und Analytik

Im Rahmen der Erhebung von Daten zu Gehalten von PCDD/PCDF und dl-PCB in Aschen von deutschen Kleinfeuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen wurden neben einer Literaturrecherche Beprobungen an 20 Kleinfeuerungsanlagen sowie an 10 mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen durchgeführt. Die Ascheproben wurden im Labor auf PCDD/PCDF, dl-PCB und Chlor analysiert. Die Ergebnisse flossen anschließend in die Auswertung der Literaturrecherche mit ein.

3.1 Kleinfeuerungsanlagen

Im Zentrum der Betrachtung liegen Kleinfeuerungsanlagen, welche durch die Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) reguliert sind. Dabei werden hauptsächlich private Haushalte adressiert, wobei der Schwerpunkt auf Scheitholz, Hackschnitzeln und Holzpellets in Öfen sowie in Kesseln liegt. Des Weiteren sind Kleinfeuerungsanlagen im Holzbe- und verarbeitenden Gewerbe (z. B. Tischlereien) von Interesse, da in diesen ein erhöhtes Aufkommen von PCDD/F-Emissionen vermutet wird. Eine Bestätigung dieser Vermutung würde möglicherweise die Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen in diesem Sektor unterstreichen. Die Probenahmen erfolgten sowohl bei Einzelraumfeuerungsanlagen als auch bei Festbrennstoffkesseln, wobei der Schwerpunkt auf den Festbrennstoffkesseln lag, da bei diesen höhere PCDD/F-Emissionen erwartet wurden. Insgesamt wurden je 20 Proben aus der Feuerstätte (Rost und Brennraum; Grobasche, Rostasche) sowie aus der Sohle des Schornsteins und dem Verbindungsstück zum Schornstein (Flugasche) aus 20 Kleinfeuerungsanlagen genommen. Die Auswahl sowie die Beprobung der Kleinfeuerungsanlagen wurde durch den Zentralinnungsverband der Schornsteinfeger (ZIV) unterstützt.

3.1.1 Auswahl

Bei der Auswahl der 20 Kleinfeuerungsanlagen wurde darauf geachtet, dass diese eine möglichst breite und typische Auswahl des Anlagenbestands in Deutschland widerspiegeln.

Folgende Kriterien wurden dabei berücksichtigt:

- ▶ Art der Feuerungsanlage (Kaminofen, Pelletofen, Kachelofen, Herd, Scheitholzkessel, Pelletkessel, Hackschnitzelkessel),
- ▶ Nennwärmeleistung,
- ▶ Datum der Errichtung/ Datum der Typprüfung/ BImSchV-Stufe (vor 22.03.2010, ab 22.03.2010 bis 31.12.2014 (Stufe 1), nach 31.12.2014 (Stufe 2)),
- ▶ Brennstoff (Brennstoffe gemäß §3 der 1. BImSchV; Scheitholz, Holzpellets, Hackschnitzel, etc.),
- ▶ Rückstand (Grobasche, Flugasche),
- ▶ Regionale Verteilung (Nord, Ost, Süd, West).

Insgesamt wurden 6 Einzelraumfeuerungsanlagen sowie 14 Festbrennstoffkessel aus verschiedenen Regionen Deutschlands (jeweils 5 Anlagen im Westen, im Süden, im Osten sowie im Norden) beprobt. Die Auswahl ist in Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 5: Einzelraumfeuerungsanlagen mit einer Nennleistung von 4,5 bis 10 kW (6 Anlagen)

Inbetriebnahme	Kaminofen*	Kaminofen mit Staubabscheider*	Pelletofen**	Kachelofen*	Herd/Heizungs-herd*
vor 22.03.2010					
ab 22.03.2010 bis 31.12.2014 (Stufe1)	X			X	
nach 31.12.2014 (Stufe 2)	X	X	X		X

* Brennstoff Nr. 4, ** Brennstoff Nr. 5a (jeweils gemäß 1. BImSchV, §3)

Tabelle 6: Festbrennstoffkessel mit einer Nennwertleistung von 10 bis 38 kW (7 Anlagen)

Inbetriebnahme	Scheitholz-Kessel*	Scheitholz-Kessel mit Staubabscheider*	Pellet-Kessel**	Pellet-Kessel mit Staubabscheider**	Pellet-Kessel mit Brennwert-technik**
vor 22.03.2010	X				
ab 22.03.2010 bis 31.12.2014 (Stufe1)	X		X		
nach 31.12.2014 (Stufe 2)		X	X	X	X

* Brennstoff Nr. 4, ** Brennstoff Nr. 5a (jeweils gemäß 1. BImSchV, §3)

Tabelle 7: Festbrennstoffkessel mit einer Nennleistung von 30 bis 100 kW (7 Anlagen)

Inbetriebnahme	Hackschnitzel-Kessel*	Hackschnitzel-Kessel mit Staubabscheider*	Kessel (Holzbe- und -verarbeitende Gewerbe)**	Kessel (Holzbe- und -verarbeitende Gewerbe) mit Staubabscheider**
vor 22.03.2010 (Stufe 0)	X		X	
ab 22.03.2010 bis 31.12.2014 (Stufe1)	X		X	
nach 31.12.2014 (Stufe 2)	X	X		X

* Brennstoff Nr. 4; ** Brennstoffe 6/7 (jeweils gemäß 1. BImSchV, §3)

Ursprünglich wurde zwecks der Repräsentativität bei den Einzelraumfeuerungsanlagen ein Kaminofen mit nachgeschaltetem Staubabscheider ausgewählt, der vor dem 22.03.2010 in Betrieb genommen wurde. Da eine solche Anlage nicht identifiziert werden konnte, wurde stattdessen ein Kaminofen mit nachgeschaltetem Staubabscheider, der nach dem 31.12.2014 in Betrieb genommen wurde, mit in die Auswahl aufgenommen. Für die Probenahme war es wichtig eine ausreichend große Menge an Asche zu entnehmen. Dies hat sich bei einigen Feuerungsanlagen im Nachhinein als Herausforderung herausgestellt. Hier geht es um die Pelletgeräte die aufgrund ihrer Betriebsweise und Verbrennungstechnik sehr geringe Aschemengen haben¹².

¹² Information aus Gesprächen mit ZIV

3.1.2 Durchführung der Probenahme

Die Identifizierung der einzelnen zu beprobenden Anlagen sowie die Probenahme der Rost- und Flugascheproben erfolgte durch den ZIV, wofür vier Schornsteinfegende aus verschiedenen Kehrbezirken eine kurze Einweisung durch Ramboll erhielten. Hierfür hat Ramboll ein Dokument zur Vorgehensweise bei der Probenahme (siehe Anhang B.1), ein Probenahmeprotokoll (siehe Anhang B.2) sowie einen Laborauftrag erstellt und mit dem Umweltbundesamt abgestimmt. Die Probenahme erfolgte in Anlehnung an die LAGA PN 98¹³ zwischen Februar und April 2025. Die Proben für die Grobasche wurden aus dem Rost und im Feuerraum entnommen. Die Proben für die Flugasche wurden im Verbindungsstück vom Feuerraum zum Schornstein sowie der Revisionsklappe im Schornstein genommen. Die Probenahme erfolgte mittels geeignetem Probenahmegerät (meist einer Edelstahlkelle) in Anlehnung an die LAGA PN 98 gemäß dem Dokument zur Vorgehensweise der Probenahme. Dabei wurde der Zustand der Feuerungsanlage überprüft und relevante Metadaten im Probenahmeprotokoll festgehalten.

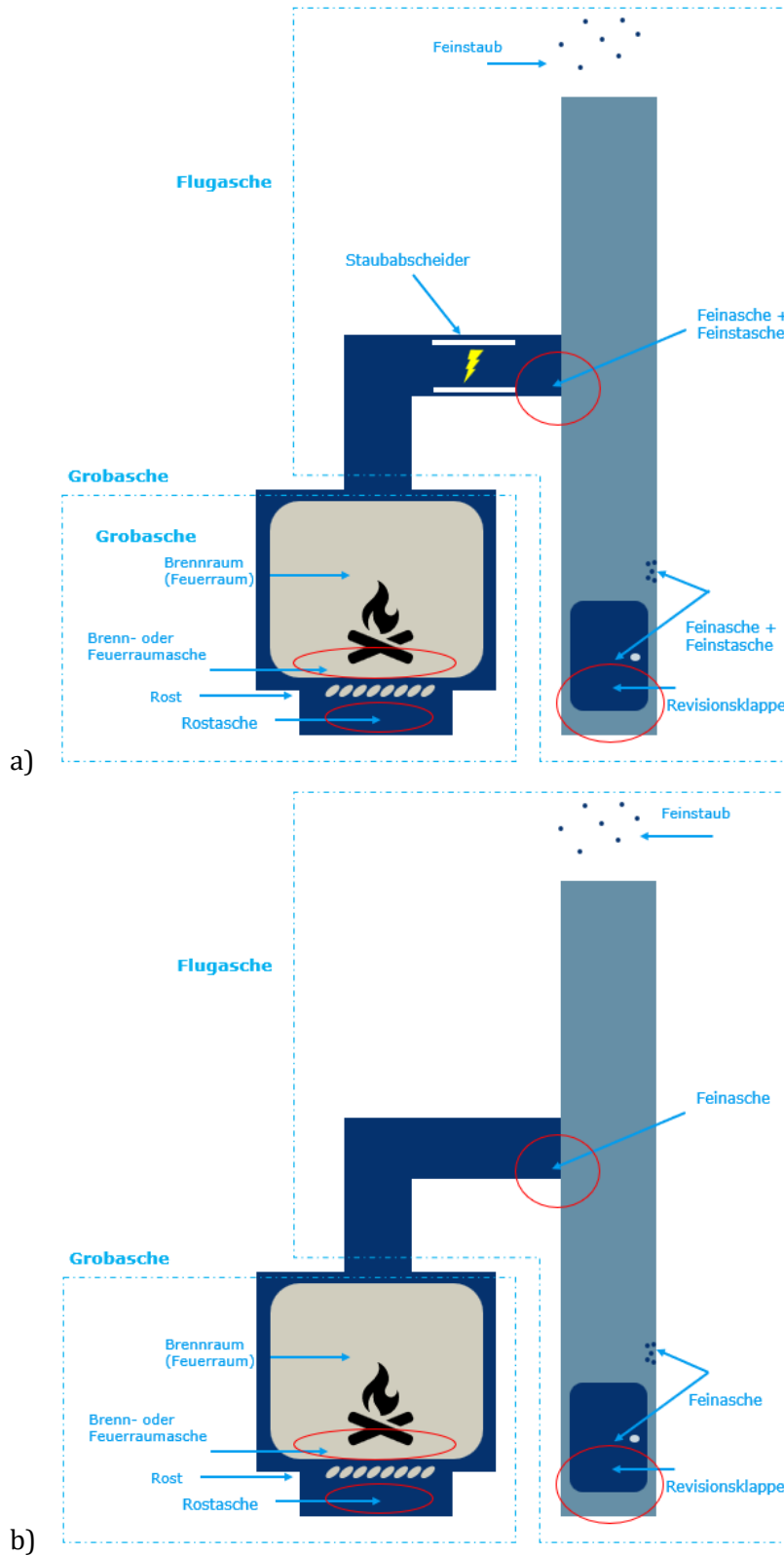
Bei den meisten Anlagen war Asche in ausreichender Menge vorhanden, wobei in der Regel die gesamte Asche entnommen und anschließend im Labor entsprechend aufbereitet wurde. Bei zwei Anlagen (ein Kaminofen und ein Pelletofen) war die Menge der vorhandenen Flugasche sehr gering, so dass nicht sicher war, ob diese für eine Analyse ausreicht.

Die Proben wurden anschließend an das Labor der Eurofins GfA Lab Service GmbH geschickt.

In Abbildung 7 sind zwei vereinfachte Skizzen von Kleinfeuerungsanlagen jeweils mit und ohne nachgelagertem elektrostatischen Staubabscheider dargestellt. Die Ascheentnahmestellen (Feuerraum, Verbindungsstück vom Feuerraum zum Schornstein sowie Revisionsklappe) sind entsprechend gekennzeichnet.

¹³ Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen

Abbildung 7: Skizze einer Kleinfeuerungsanlage: a) mit und b) ohne elektrostatischem Staubabscheider. Die Ascheentnahmestellen sind jeweils mit einem roten Kreis markiert.



Quelle: Eigene Abbildung, Ramboll 2025

3.2 Mittelgroße Feuerungsanlagen

Im Zentrum der Betrachtung liegen mittelgroße Feuerungsanlagen, die unter der 44. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (44. BImSchV) geregelt sind und Biomasse als Brennmaterial einsetzen. Es wurden insgesamt zehn Flugascheproben von zehn Biomassefeuerungsanlage genommen und analysiert.

3.2.1 Auswahl

Bei der Auswahl der zu beprobenden Biomassefeuerungsanlagen wurden anfangs Kriterien zur Auswahl der Anlagen für den gesamten Anlagenpark in Deutschland aufgestellt:

- ▶ Feuerungswärmeleistung der Anlage in MW (1 – 5 MW, 5 – 20 MW, 20 – 50 MW)
- ▶ Datum der Inbetriebnahme (bestehende oder neue Anlage gemäß 44. BImSchV)
- ▶ Bei bestehenden Anlagen auch noch Datum des Einbaus von Filter oder elektrostatischem Abscheider vor oder nach 20. Juni 2019
- ▶ Einsatzstoffe (Holzpellets, Holzhackschnitzel, Landschaftspflegeholz, Produktionsreste (Vollholz, Spanplatten...), Altholz A I, Altholz A II, Stroh, Getreide, etc.)
- ▶ Anlagenart (Heizkessel, Dampfkessel, Kraft-Wärmekopplung, etc.)
- ▶ Art des Staubabscheiders (Gewebefilter, elektrostatischer Abscheider, etc.)
- ▶ Regionale Verteilung
- ▶ Branche (nachgelagert)

Dabei sollten gezielt Anlagen einbezogen werden, bei denen mit höheren PCDD/PCDF-Gehalten in den Aschen zu rechnen war – wie z. B. mit Altholz A II, Spanplatten oder Getreide als Brennstoff. Vor diesem Hintergrund handelt es sich bei den ausgewählten Anlagen nicht um eine repräsentative Stichprobe.

Anschließend kontaktierte das Umweltbundesamt die zuständigen Behörden der Bundesländer, informierte sie über das Projekt und bat um Mithilfe bei der Auswahl und Kontaktierung von geeigneten Anlagen. Hierfür wurde ein Anlagensteckbrief erstellt (siehe Anhang C.1) und den zuständigen Behörden übermittelt mit der Bitte, diesen von den interessierten Anlagenbetreibern ausfüllen zu lassen.

Auf die Anfrage hin schlugen Behördenvertreter aus fünf Bundesländern insgesamt 14 Anlagen vor, wobei zwei zum Zeitpunkt der Beprobung noch nicht gebaut worden waren. Nach einer Abstimmung mit dem Umweltbundesamt und den zuständigen Länderbehörden verblieben neun der vorgeschlagenen Anlagen für die Beprobung relevant und die Anlagenbetreiber waren bereit, das Projekt zu unterstützen. Bei einer Anlage waren zwei unterschiedliche Kessel in Betrieb. Es konnten dort zwei unterschiedliche Proben genommen werden (siehe Tabelle 8). Somit wurden zehn Proben bei den neun zur Verfügung stehenden Anlagen genommen, auch wenn nicht alle oben genannten Repräsentativitätskriterien erfüllt waren.

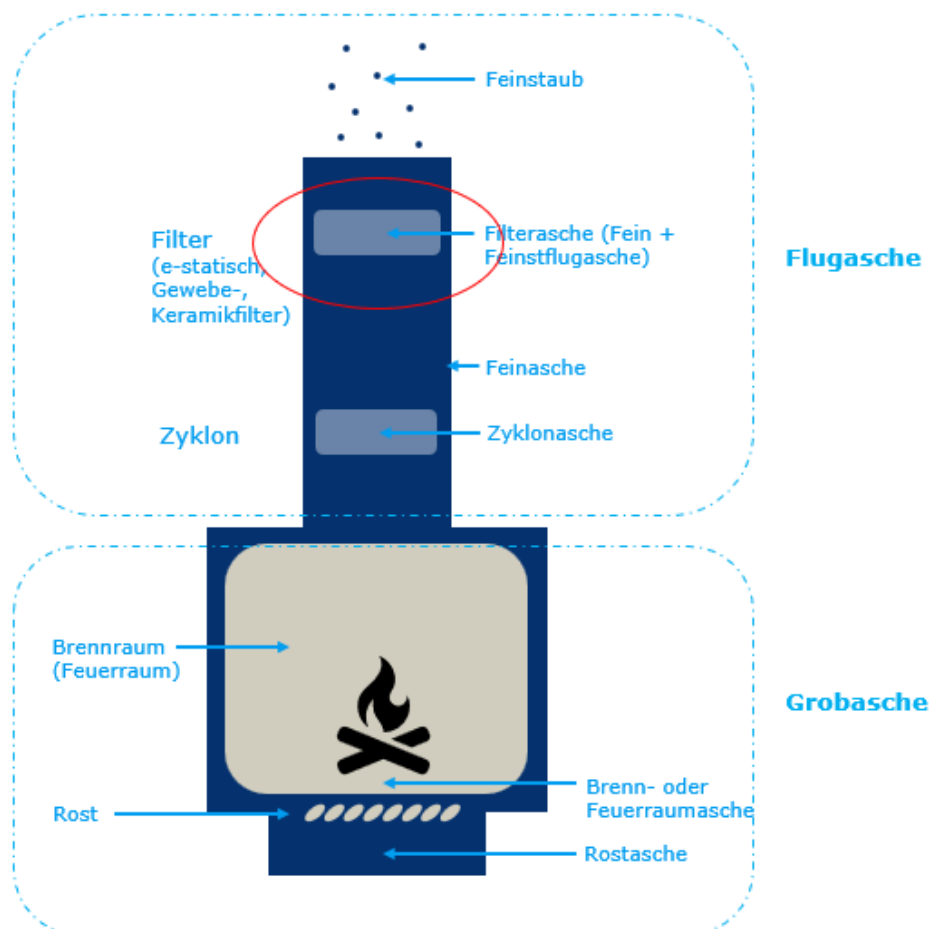
3.2.2 Durchführung der Probenahme

Nach dem Austausch zwischen dem Projektteam, dem Umweltbundesamt und den betroffenen Länderbehörden kontaktierte das Projektteam die Betreiber der zur Verfügung stehenden Anlagen, besprach die Begebenheiten vor Ort und vereinbarte Termine zur Probenahme. Die

Beprobung der Anlagen fand im März statt. Die nach LAGA PN 98 zertifizierten Probennehmenden der Firma Ramboll wurden jeweils von einer Ansprechperson vor Ort begleitet, die ihnen die Anlage einschließlich der eingesetzten Biomasse und des entstehenden Ascheoutputs vorstellte und erklärte. Die Filterascheproben wurden mittels Edelstahlhandschaufel aus den Aschesammel- oder Lagerbehältern hinter den verschiedenen Filtern in Anlehnung an die LAGA PN 98 gemäß Dokument zur Vorgehensweise der Probenahme entnommen (siehe Anhang B.1). Dabei wurde der Zustand der Feuerungsanlage überprüft und relevante Metadaten im Probenahmeprotokoll festgehalten. Teils wurden die Metadaten anhand des Probenahmeprotokolls schon früher abgefragt und bei vielen Anlagen noch nach der Probenahme im April nachgeliefert. Bei der Probenahme wurden keine Inhomogenitäten der zu beprobenden Filterasche festgestellt. Je nach örtlichen Gegebenheiten an den Probenentnahmestätten wurde eine Mischprobe mittels fraktionierenden Schaufelns gewonnen oder aus mehreren Einzelproben eine Mischprobe erstellt, und diese anschließend im Labor weiter aufbereitet. Das Probenahmeprotokoll für mittelgroße Biomassefeuerungsanlagen befindet sich in Anhang C.2. Die Proben wurden anschließend an das Labor der Eurofins GfA Lab Service GmbH geschickt.

In Abbildung 8 ist eine vereinfachte Skizze einer mittelgroßen Feuerungsanlage dargestellt. Die Ascheentnahmestelle ist entsprechend gekennzeichnet.

Abbildung 8: Skizze einer mittelgroßen Feuerungsanlage. Die Ascheentnahmestelle ist mit einem roten Kreis markiert.



Quelle: Eigene Abbildung, Ramboll 2025

Tabelle 8: Mittelgroße Biomassefeuerungsanlage

	P1**	P10**	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
	A	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Inbetriebnahme nach 2018	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein
Leistung (MW)	5	4,5	6,7 (2,4 + 4,3)	2,5	8,7	1,225	0,275	4,6	13,38 (4,88 + 8,5)	2
Filter*	EA	EA	EA	EA	GF	KF	GF	GF	EA	EA
Einsatzstoffe****	Land-schafts-pflegeholz	Land-schafts-pflegeholz	A II	A II	A II	A II, A I, naturbelassenes Holz	Getreide	A I, A II	Prod.-Reste (Buchenstaub, Rinde)	A I, A II, naturbelassenes Holz
Anlagenart	Thermoölkessel***	Warmwasser-kessel	Warmwasser-kessel + Thermoölkessel	Warmwasser-kessel	Heißwasser-kessel	Warmwasser-kessel	Warmwasser-kessel	Warmwasser-kessel	Warmwasser-kessel	Warmwasser-kessel
Branche	Energieerzeugung	Energieerzeugung	Möbel	Möbel	Möbel	Abfallwirtschaft	Landwirtschaft	Wärmeversorgung	Holzverarbeitung	Wärmeerzeugung

*EA=Elektrostatischer Abscheider, GF=Gewebefilter, KF=Keramikfilter

**bei P1 und P10 handelt es sich um zwei verschiedene Kessel der gleichen Feuerungsanlage

***war aufgrund von defektem Wärmetauscher abgeschaltet. Wurde extra für die Probenahme eingeschaltet. Die Probe beinhaltet auch Flugasche aus dem Warmwasserkessel (P10)

****A I – Altholz Kategorie A I, A II – Altholz Kategorie A II

3.3 Verwendete Probeanalytik

Zur Bestimmung der Chlor-, PCDD/F- und dl-PCB-Gehalte wurden die Proben durch die Probenehmer (Schornsteinfegende oder Projektteam) an das Labor geschickt.

Im ersten Schritt wurden alle Proben vorbereitet und homogenisiert. Danach wurde die Trockenmasse bestimmt und schließlich die Konzentration von PCDD/F, dl-PCB sowie der Chlor-Gehalt quantifiziert. Die Beprobung der Aschen auf Chlor dient als Hinweis auf möglicherweise hohe Konzentration von PCDD/F und dl-PCB.

3.3.1 Probenvorbereitung und Homogenisierung

Je nach Beschaffenheit des Probenmaterials kann zunächst eine Vorzerkleinerung erforderlich sein, um die Probe für die weitere Verarbeitung vorzubereiten. Anschließend erfolgt die Homogenisierung mittels einer geeigneten Mahlmethode, beispielweise durch den Einsatz einer Schneidmühle, Messermühle, Kugelmühle oder Kryovermahlung. Die Auswahl der Mahltechnik richtet sich dabei nach der spezifischen Matrix der Probe, um eine homogenisierte Matrix zu erreichen.

3.3.2 Trockenmasse

Zur Bestimmung der Trockenmasse wird das Probenmaterial einer gravimetrischen Analyse unterzogen. Dabei wird die Masse der Probe vor und nach dem Trocknungsvorgang erfasst. Die Differenz zwischen den beiden Werten gibt Aufschluss über den Feuchtigkeitsgehalt und ermöglicht die Ermittlung der Trockenmasse. Als Referenz dient eine intern validierte Methode beim Labor, die speziell für aschehaltige Materialien entwickelt wurde.

3.3.3 PCDD/F und dl-PCB

Das durchführende Labor ist für die Bestimmung von persistenten organischen Verbindungen (POPs) wie polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) und polychlorierten Biphenylen (PCB) gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert.

Zur Analyse von PCDD/F und dl-PCB wird die Probe zunächst mit einer Mischung aus Polyacrylsäure und Natriumsulfat verrieben, um eine homogene Matrix für die weitere Verarbeitung zu schaffen. Im Anschluss werden sämtliche zu bestimmenden PCDD/F und dl-PCB-Kongenere in Form von intern standardisierten, mit $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten Referenzsubstanzen zugesetzt. Die Extraktion der Analyten erfolgt anschließend über ein Soxhlet-Verfahren.

Nach der Extraktion wird der Rohextrakt mittels Säulenchromatographie gereinigt (Clean-up), um störende Matrixbestandteile zu entfernen. Vor der eigentlichen Analyse werden weitere ^{13}C -markierte interne Standards zugegeben, um die Wiederfindungsraten während des Verfahrens kontrollieren und bewerten zu können.

Die Bestimmung der PCDD/F und dl-PCB-Kongenere erfolgt schließlich mittels Gaschromatografie in Kopplung mit einem Tandem-Massenspektrometer (GC-MS/MS). Die Quantifizierung basiert auf der Isotopenverdünnungsmethode, bei der die Konzentrationen der nativen Kongenere durch Vergleich mit den zugesetzten ^{13}C -markierte Standards ermittelt werden. Die Ergebnisse werden in Form von Summen-TEQ ausgewiesen, wobei die TEQ-Faktoren der WHO aus dem Jahr 2005 berücksichtigt werden. Als Referenzverfahren dient eine intern validierte Methode.

Kenndaten des Verfahrens, einschließlich die Bestimmungsgrenze sind in der folgenden Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Kenndaten des Verfahrens

Parametergruppe	Parameter	Bestimmungsgrenze, ng/kg TS	Erweiterte Messungsunsicherheit (k=2), %
PCDD/F	2,3,7,8-TetraCDD	0,18	30
	1,2,3,7,8-PentaCDD	0,24	30
	1,2,3,4,7,8-HexaCDD	0,48	30
	1,2,3,6,7,8-HexaCDD	0,48	30
	1,2,3,7,8,9-HexaCDD	0,48	30
	1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	0,54	30
	OctaCDD	2,20	30
	2,3,7,8-TetraCDF	0,32	30
	1,2,3,7,8-PentaCDF	0,44	30
	2,3,4,7,8-PentaCDF	0,44	30
	1,2,3,4,7,8-HexaCDF	0,40	30
	1,2,3,6,7,8-HexaCDF	0,40	30
	1,2,3,7,8,9-HexaCDF	0,40	30
	2,3,4,6,7,8-HexaCDF	0,40	30
	1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	0,52	30
	1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	0,38	30
	OctaCDF	2,20	30
	WHO(2005)-PCDD/F-TEQ exkl. BG	ND	–
WHO(2005)-PCDD/F-TEQ inkl. BG	1,01	30	
dl-PCB	PCB 77	3,60	30
	PCB 81	0,78	30
	PCB 105	7,80	30
	PCB 114	0,94	30
	PCB 118	28,00	30
	PCB 123	0,80	30
	PCB 126	1,02	30
	PCB 156	4,40	30
	PCB 157	0,90	30
	PCB 167	2,20	30
	PCB 169	2,40	30

Parametergruppe	Parameter	Bestimmungsgrenze, ng/kg TS	Erweiterte Messungsunsicherheit (k=2), %
Summe PCDD/F und dl-PCB (WHO-TEQ)	PCB 189	0,80	30
	WHO(2005)-PCB-TEQ exkl. BG	ND	–
	WHO(2005)-PCB-TEQ inkl. BG	0,13	30
	WHO(2005)-TEQ exkl. BG	ND	–
	WHO(2005)-TEQ inkl. BG	1,15	30

ND-nicht bestimmt, da keines der entsprechenden Kongenere oberhalb der BG liegt

3.3.4 Chlor-Gehalt

Die Bestimmung des Gesamtchlorgehalts erfolgt gemäß dem Referenzverfahren nach DIN 51727:2011-11, Verfahren B. Dabei kommt eine Kombination aus Ionenchromatografie mit elektrochemischer Detektion (IC-EC) zur Anwendung.

Die Bestimmungsgrenze liegt bei 50 mg/kg.

4 Auswertung der Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Laboranalyse

Die Proben wurden auf PCDD/F, dl-PCB und Gesamt-Chlor im Labor der Eurofins GfA Lab Service GmbH analysiert.

Bei insgesamt zwei Proben war nicht genügend Asche vorhanden, um die Analyse von PCDD/F und dl-PCB durchzuführen. Dabei handelt es sich um die Flugaschen aus der Einzelraumfeuerungsanlage P03 und dem Festbrennstoffkessel P13.

Bei acht von zehn Proben aus den mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen konnte die Analyse des gesamt-Chlor Gehalts aus logistischen Gründen nicht durchgeführt werden.

Alle Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

4.1.1 Kleinfeuerungsanlagen

4.1.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen

Insgesamt wurden sechs Einzelraumfeuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung zwischen 4,5 und 10,5 kW aus verschiedenen Regionen Deutschlands beprobt. Tabelle 10 enthält einen detaillierten Überblick über die beprobten Einzelraumfeuerungsanlagen, einschließlich Angaben zur Art der Anlagen, verwendetem Holz, Standort, Filtertechnik sowie den jeweils geltenden Emissionsgrenzwerten gemäß der 1.BImSchV.

Tabelle 10: Details über die untersuchten Einzelraumfeuerungsanlagen mit einer Nennwertleistung von 4,5 bis 10,5 kW.

Anlage -ID	Art der Anlage	Holzart	Standort der Anlage	NWL (kW)	Art der Filter	Datum der Errichtung/ Typprüfung	Grenzwerte nach 1. BImSchV
P01	Kaminofen	Nadelholz (Fichte)	Sachsen	10,5	-	2010	Stufe 1
P02	Kaminofen	100% Laubholz (80% Buche; 20% Eiche)	Nordrhein-Westfalen	4,8	-	2018	Stufe 2
P03	Kaminofen	Laubholz (überwiegend); Nadelholz (selten)	Baden-Württemberg	4,5	EA	2015	Stufe 2
P04	Pelletofen	Nadelholz (Fichte)	Sachsen	7	-	2023	Stufe 2
P05	Kachelofen	Nadelholz	Sachsen-Anhalt	6	-	k.A.	Stufe 1
P06	Küchenherd	80% Laubholz (Buche); 20% Nadelholz (Fichte)	Bayern	7	-	2024	Stufe 2

EA – elektrostatischer Abscheider; Stufe 1: ab 22.03.2010 bis 31.12.2014; Stufe 2: nach 31.12.2014

Die untersuchten Einzelraumfeuerungsanlagen repräsentieren sowohl ältere Anlagen (z. B. Anlagen P01 und P05), die noch unter der Anforderung der Stufe 1 fallen, als auch neuere Modelle, die die strengeren Vorgaben der Stufe 2 erfüllen müssen. Besonders hervorzuheben ist die Anlage P03, die als einzige mit einem Elektroabscheider ausgestattet ist und damit potenziell eine verringerte Feinstaubemission aufweist.

Tabelle 11 enthält die gemessenen Konzentrationen von Chlor, PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F + dl-PCB TEQ) für Grob- und Flugasche aus der Einzelraumfeuerungsanlagen, jeweils exklusive und inklusive Bestimmungsgrenze (BG).

Tabelle 11: Konzentrationen von Chlor (mg/kg TS) sowie PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB) Konzentrationen (ng/kg TS, WHO₂₀₀₅ TEQ), jeweils exklusive und inklusive BG, in Grob- und Flugasche aus Einzelraumfeuerungsanlagen.

Anlage-ID	Matrix	Chlor, gesamt	PCDD/F TEQ		dl-PCB TEQ		gesamt-TEQ		
			exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG	
Grobasche									
P01	RBA	250	ND	0,88	ND	0,17	ND	1,05	
P02	BA	470	ND	0,94	0,00*	0,18	0,00*	1,12	
P03	RBA	<50	0,02	0,91	ND	0,17	0,02	1,09	
P04	RBA	NA	0,08	0,94	ND	0,17	0,08	1,11	
P05	RBA	140	ND	0,90	ND	0,17	ND	1,07	
P06	BA	1.100	ND	0,93	ND	0,18	ND	1,11	
Flugasche									
P01	SA	780	50,70	50,80	2,47	2,54	53,10	53,30	
P02	SA	1.600	80,20	80,40	2,29	2,36	82,50	82,80	
P03	VA	NA							
P04	SA	940	211,00	212,00	4,90	4,90	215,00	217,00	
P05	SVA	3.300	32,90	33,10	0,67	0,76	33,60	33,80	
P06	VA	1.600	190,00	191,00	8,57	8,57	199,00	199,00	

BA – Brennräumeasche; BG – Bestimmungsgrenze; NA – nicht analysiert; ND – nicht detektiert; RA – Rostasche; RBA – Rostasche + Brennräumeasche; SA – Asche aus Schornstein; SVA – Asche aus Schornstein und Verbindungsstück; VA – Asche aus Verbindungsstück

*0,00042 ng/kg TS

Da die Anzahl der untersuchten Anlagen relativ niedrig ist, lassen sich nur begrenzt allgemeine Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen ableiten. Dennoch werden die Ergebnisse und mögliche Schlüsse im Folgenden diskutiert.

In der Grobasche waren die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB überwiegend nicht nachweisbar. Unter Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen, liegen die PCDD/F-Werte zwischen 0,88 und 0,94 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅) und dl-PCB-Werte zwischen 0,17 und 0,18 ng

TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅). Der daraus berechnete gesamt-TEQ-Wert der Grobasche bewegt sich somit zwischen 1,05 und 1,12 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅).

Im Gegensatz dazu wurden in der Flugasche deutlich höhere Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB gemessen. Insbesondere bei der Anlage P04 sind die Werte etwas höher. Diese relativ neue Anlage (Baujahr 2023, 7 kW Nennleistung), in der ausschließlich Holzpellets aus Nadelholz verbrannt werden, weist hohe gesamt-TEQ-Werte von 217 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅) in der Flugasche auf. Die höchsten Werte wurden bei einem Pelletofen und einem Küchenherd gemessen (P04 bzw. P06). Generell zeigen die Ergebnisse eine höhere Belastung von Flugaschen im Vergleich zu Grobaschen.

Ob die Art des verwendeten Holzes (Laubholz vs. Nadelholz) einen Einfluss auf die Bildung der PCDD/F und dl-PCB hat, lässt sich aus den vorliegenden Daten nicht ableiten. Die Flugasche aus Anlagen, die Nadelholz verbrennen, wie Anlage P01 und P05, weisen mit 53,30 bzw. 33,80 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅) vergleichsweise niedrige Werte auf. Allerdings zeigt der Pelletofen (Anlage P04), der ebenfalls mit Nadelholz betrieben wurde, mit 217 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅) die höchste Dioxin-Belastung. Auch bei der Verbrennung von Laubholz ergibt sich kein konsistentes Bild. Während die Anlage P02 (80% Buche, 20% Fichte) mit 82,80 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅) relativ moderate Werte erreichte, lag der gesamt-TEQ-Wert bei Anlage P06 (80% Buche, 20% Fichte) mit 199 ng TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅) fast genauso hoch wie bei dem Pelletofen (Anlage P04).

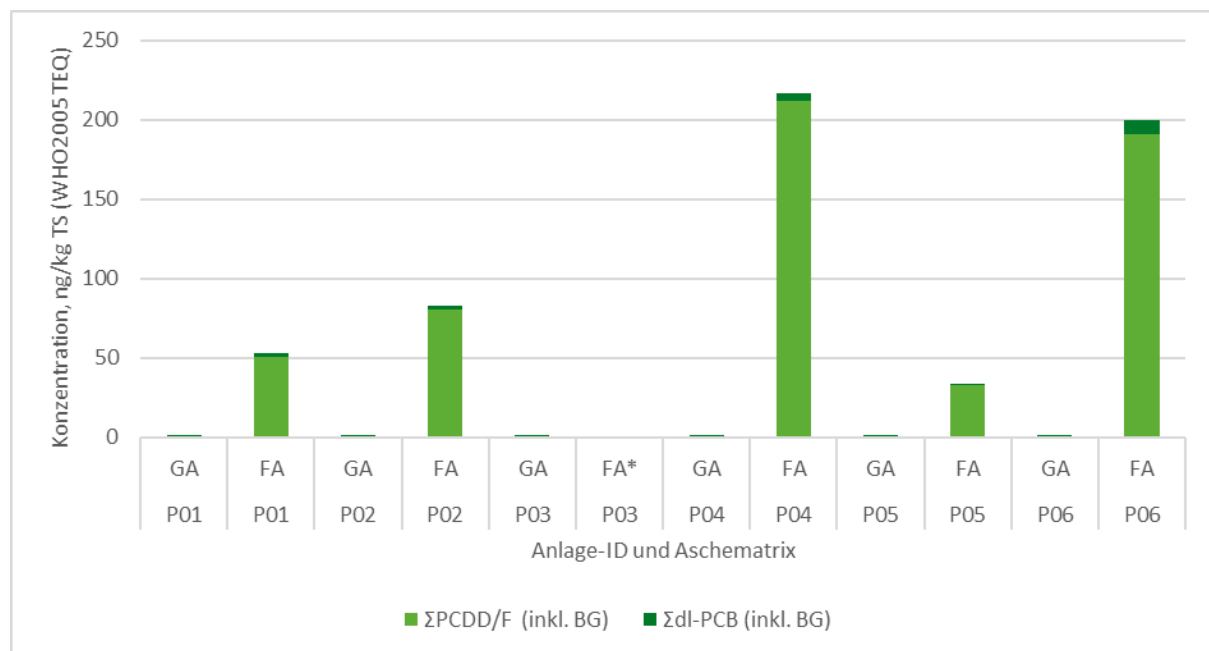
Ein weiterer möglicher Einflussfaktor ist das Alter der Anlage und die vorhandene Abgasreinigung. Ältere Einzelraumfeuerungsanlagen wie P01 (Baujahr 2010) zeigten mit 53,30 ng TEQ/kg TS (PCDD/F & dl-PCB, WHO₂₀₀₅) deutlich niedrige gesamt-TEQ-Werte als neuere Anlagen wie P04 oder P06. Es ist also nicht so, dass moderne Geräte unbedingt zu geringeren Belastungen der Aschen führen.

Auch die eingesetzte Filtertechnik und die Qualität der Verbrennung spielen vermutlich eine entscheidende Rolle. Elektrostatische Abscheider reduzieren gezielt die Staubemissionen. Sie laden die Staubpartikel elektrisch auf und lenken sie zu speziellen Abscheideflächen, wie etwa Einbauten oder der Schornsteininnenwand (Lenz & Ulbricht, 2015). Dadurch könnte die Filtertechnik zu höheren Belastungen der Aschen mit PCDD/F und dl-PCB führen, weil mehr und feinere Partikel abgeschieden werden und in der Flugasche enden. Nur bei Anlage P03 wurde explizit ein Elektroabscheider erwähnt. Aufgrund unzureichender Flugaschemenge konnte jedoch keine Analyse durchgeführt werden.

Insgesamt zeigt sich ein klarer Trend: Die Flugasche enthält deutlich höhere Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB als die Grobasche. Die gefundenen Konzentrationen variieren stark zwischen den Anlagen und lassen sich nicht eindeutig auf einzelne Einflussfaktoren wie Brennstoffart, Anlagentalter oder Bauweise zurückführen.

Die nachstehende Abbildung 8 stellt die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) aus Grob- und Flugasche graphisch dar.

Abbildung 9: Konzentrationen in ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) von PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB TEQ) inklusive BG in Grobasche und Flugasche aus Einzelraumfeuerungsanlagen.



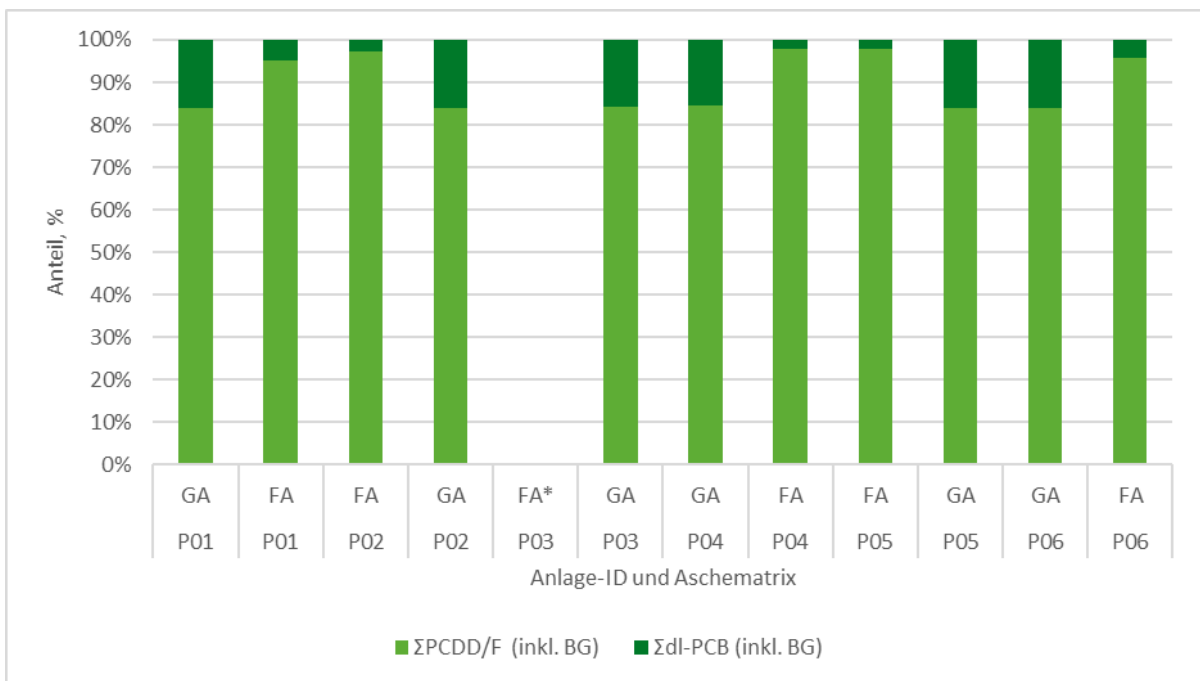
GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P03 nicht analysiert.

Quelle: Eigene Darstellung

Die nachstehende Abbildung 10 zeigt, dass der weitaus größte Anteil der Toxizität (ausgedrückt als gesamt-TEQ) durch PCDD/F verursacht wird. In fast allen Flugaschenproben lag der Beitrag der PCDD/F bei über 95% des gesamt-TEQ, während dl-PCB nur einen geringen Anteil ausmachte, meist nur wenige Prozent. Im Durchschnitt trugen die PCDD/F in den Flugaschenproben rund 97% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei etwa 3% lag.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Grobasche, wo der Anteil der PCDD/F am gesamt-TEQ deutlich höher ist, als der der dl-PCB. Zwar sind die absoluten Konzentrationen in der Grobasche insgesamt sehr niedrig, doch wenn man die Werte inklusive Bestimmungsgrenze berücksichtigt, stammen mindestens ~83% des gesamten TEQ aus PCDD/F, während dl-PCB maximal zu ~17% beitragen. Im Durchschnitt trugen die PCDD/F in den Grobascheproben rund 84% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei 16% lag.

Abbildung 10: Beitrag von PCDD/F und dl-PCB zum gesamt-TEQ in Asche aus Einzelraumfeuerungsanlagen.

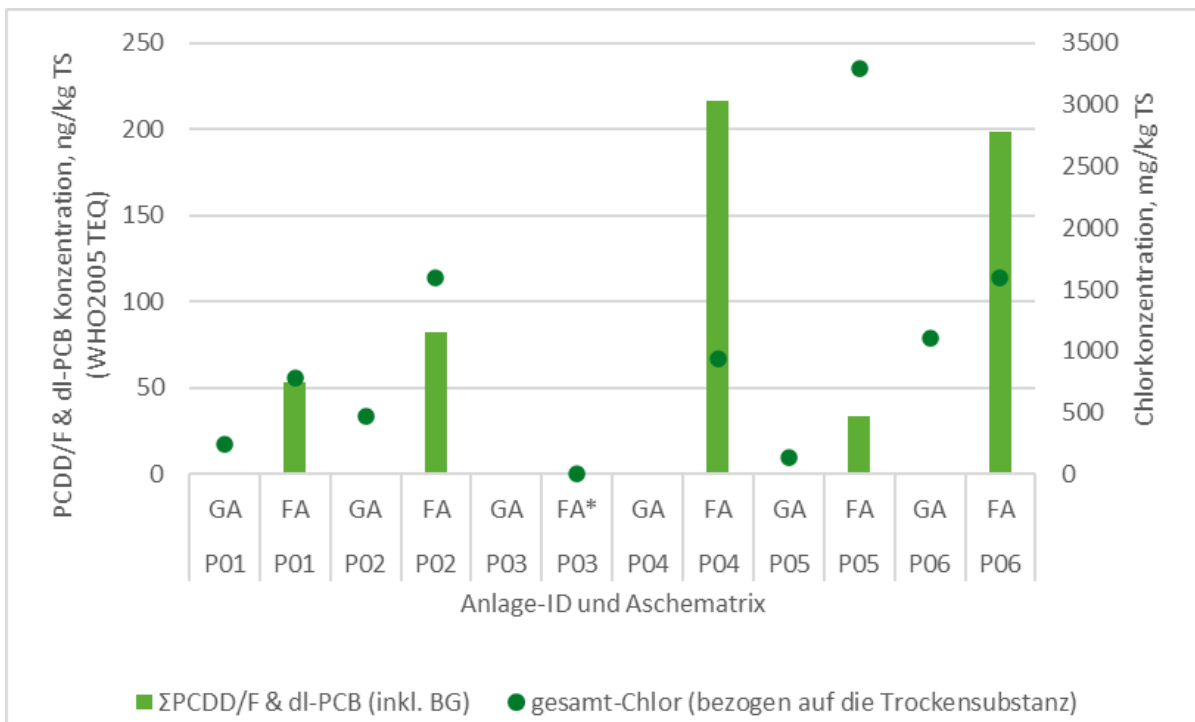


GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P03 nicht analysiert.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 11 und Abbildung 11 zeigen deutliche Unterschiede in dem Chlorgehalten sowie den zugehörigen gesamt-TEQ Konzentrationen (PCDD/F & dl-PCB) in Grob- und Flugasche aus den untersuchten Einzelraumfeuerungsanlagen.

Abbildung 11: Gesamt-TEQ in ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) und Chlorgehalt in mg/kg TS.



GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P03 nicht analysiert.

Quelle: Eigene Darstellung

In der Grobasche bewegen sich die gesamt-TEQ-Werte in einem engen Bereich zwischen 1,05 und 1,12 ng/kg TS, obwohl die Chlorgehalte zwischen 140 und 1.100 mg/kg TS schwanken (z. B. Anlage P05: 140 mg/kg TS; Anlage P06: 1.100 mg/kg TS). Diese geringen und relativ konstanten gesamt-TEQ-Werte lassen darauf schließen, dass kein signifikanter Einfluss des Chlorgehalts auf die Dioxinkonzentration in der Grobasche besteht.

In der Flugasche zeigt sich dagegen ein tendenzieller Zusammenhang zwischen höheren Chlorgehalten und steigenden gesamt-TEQ-Werten. Anlagen mit erhöhtem Chlorgehalt, z. B. Anlage P02 und Anlage P06 mit jeweils 1.600 mg/kg TS, wiesen auch deutlich höhere gesamt-TEQ-Werte von bis zu 199 ng/kg TS auf. Diese Beobachtung lässt sich damit erklären, dass die Gegenwart von Chlor bei der Bildung von PCDD/F und dl-PCB bei Verbrennungsprozessen deren Bildung begünstigt.

Allerdings ist der Zusammenhang nicht linear, was angesichts der geringen Probenanzahl auch nicht erwartet werden kann. So weist die Anlage P04 bei einem mittlerem Chlorgehalt von 940 mg/kg TS die höchsten gemessenen gesamt-TEQ-Werte von 217 ng/kg TS aus, während Anlage P05 trotz eines hohen Chlor Gehalt von 3.300 mg/kg TS lediglich 33,80 ng/kg TS erreicht. Diese Abweichungen lassen darauf schließen, dass auch andere Faktoren einen erheblichen Einfluss auf die Bildung von PCDD/F und dl-PCB und -verteilung haben.

4.1.1.2 Festbrennstoffkessel

Insgesamt wurden 14 Festbrennstoffkessel mit einer Nennleistung von 10 bis 150 kW aus verschiedenen Regionen Deutschlands beprobt. Die nachstehende Tabelle 12 enthält einen detaillierten Überblick.

Tabelle 12: Details über die untersuchte Festbrennstoffkessel mit einer Nennwärmeleistung von 10 bis 150 kW.

Proben-ID	Art der Anlage (Kessel)	Holzart	Ort der Anlage	NWL (kW)	Art der Filter	Datum der Errichtung/Typprüfung	Grenzwerte nach 1. BImSchV
P07	Scheitholz	Nadelholz (überwiegend)	Nordrhein-Westfalen	30	-	01.2006	seit dem 01.01.2025 Stufe 1 (§25 1. BImSchV)
P08	Scheitholz	Nadelholz (überwiegend); Laubholz (selten)	Sachsen	38	k.A.	10.12.2014	Stufe 1
P09	Scheitholz	Nadelholz (überwiegend); Laubholz (selten)	Bayern	15	EA	2023	Stufe 2
P10	Pellet	Nadelholz (überwiegend)	Nordrhein-Westfalen	25	-	10.2013	Stufe 1
P11	Pellet	k.A.	Sachsen-Anhalt	14		01.10.2019	Stufe 2
P12	Pellet-	50% Nadelholz; 50% Laubholz	Sachsen-Anhalt	15	EA	01.12.2025	Stufe 2

Proben-ID	Art der Anlage (Kessel)	Holzart	Ort der Anlage	NWL (kW)	Art der Filter	Datum der Errichtung/ Typprüfung	Grenzwerte nach 1. BImSchV
P13	Pellet	k.A.	Bayern	10	EA	2024	Stufe 2
P14	HHS	Nadelholz (überwiegend); Laubholz (selten)	Sachsen	38	-	10.12.2009	seit dem 01.01.2025 Stufe 1 (§25 1. BImSchV)
P15	HHS	Nadelholz (überwiegend)	Sachsen-Anhalt	49,5	-	01.06.2012	Stufe 1
P16	HHS	100% Nadelholz	k.A.	k.A.	-	k.A.	Stufe 2
P17	HHS	k.A.	Sachsen-Anhalt	50	EA	01.06.2018	Stufe 2
P18	Holzverarbeitung dem Gewerbe	k.A.	Bayern	k.A.	-	k.A.	seit dem 01.01.2025 Stufe 1 (§25 1. BImSchV)
P19	Holzverarbeitung dem Gewerbe	beschichtete Spanplatten (Reste)	Nordrhein-Westfalen	100	-	08.2014	Stufe 1
P20	Holzverarbeitung dem Gewerbe	k.A.	Bayern	45–150	EA	2022	Stufe 2

EA – elektrostatischer Abscheider; HHS – Holzhackschneidwerkzeug; NWL – Nennwärmeleistung; Stufe 0: vor 2010; Stufe 1: ab 22.03.2010 bis 31.12.2014; Stufe 2: nach 31.12.2014

Tabelle 13 enthält die gemessenen Konzentrationen von Chlor, PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F + dl-PCB) exklusive und inklusive BG, in Grob- und Flugasche aus Festbrennstoffkesseln.

Tabelle 13: Konzentrationen von Chlor (mg/kg TS) sowie PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB) (ng/kg TS, WHO₂₀₀₅ TEQ), jeweils exklusive und inklusive BG, in Grob- und Flugasche aus Festbrennstoffkessel mit einer Nennwertleistung von 10 bis 150 kW.

Proben-ID	Matrix	Chlor, gesamt	PCDD/F TEQ		dl-PCB TEQ		gesamt-TEQ	
			exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG
Grob- und Flugasche								
P07	BA	18.000	97,80	98,00	2,18	2,18	100,00	100,00
P08	RBA	1.200	ND	0,88	ND	0,17	ND	1,05
P09	RBA	120	ND	0,87	ND	0,17	ND	1,04
P10	RA	2.400	ND	0,89	0,00	0,17	0,00	1,06
P11	RBA	550	0,16	1,08	ND	0,18	0,16	1,26

Proben-ID	Matrix	Chlor, gesamt	PCDD/F TEQ		dl-PCB TEQ		gesamt-TEQ	
			exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG
P12	RBA	3.000	1,05	1,33	ND	0,17	1,05	1,50
P13	RA	120	2,14	2,33	0,00	0,17	2,14	2,51
P14	RBA	620	0,17	1,00	ND	0,17	0,17	1,17
P15	RBA	290	0,01	0,92	ND	0,17	0,01	1,09
P16	RBA	280	ND	0,80	ND	0,15	ND	0,95
P17	RBA	470	0,35	1,05	ND	0,16	0,35	1,21
P18	BA	980	0,30	1,02	ND	0,16	0,30	1,19
P19	RA	1.700	76,50	76,70	1,090	1,16	77,50	77,80
P20	RA	310	ND	0,91	ND	0,17	ND	1,08
Flugasche								
P07	SA	6.000	364,00	365,00	7,13	7,13	371,00	372,00
P08	SA	9.000	69,80	70,30	1,50	1,58	71,30	71,80
P09	SVA	1.600	2,12	2,30	0,00	0,17	2,12	2,47
P10	SA	6.000	208,00	208,00	21,70	21,70	229,00	230,00
P11	VA	4.100	116,00	116,00	3,41	3,48	119,00	120,00
P12	SVA	16.000	187,00	191,00	1,96	1,96	189,00	193,00
P13	VA	<i>nicht analysiert, zu wenig Probenmaterial</i>						
P14	SA	6.700	15,40	15,50	0,33	0,40	15,80	15,80
P15	SVA	17.000	956,00	960,00	51,60	51,60	1.010,00	1.010,00
P16	SVA	1.700	1,75	1,91	ND	0,14	1,75	1,75
P17	SVA	71.000	326,00	327,00	10,10	10,10	336,00	336,00
P18	SA	5.700	566,00	571,00	16,20	16,20	582,00	587,00
P19	SA	86.000	1.870,00	1.870,00	38,20	38,20	1.910,00	1.910,00
P20	SVA	160.000	13.400,0 0	13.500,0 0	143,0 0	143,0 0	13.543,0 0	13.643,0 0

BG – Bestimmungsgrenze; BA – Brennraumasche; RA – Rostasche; RBA – Rostasche + Brennraumasche; SA – Asche aus Schornstein; SVA – Asche aus Schornstein und Verbindungsstück; VA – Asche aus Verbindungsstück.

Wie bei den Einzelraumfeuerungsanlagen liegen die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in der Grobasche insgesamt niedriger als in der Flugasche. Die meisten Werte liegen unterhalb ~2,5 ng TEQ/kg TS. Nur wenige Grobascheproben enthalten leicht erhöhte Konzentration von PCDD/F und dl-PCB. So findet sich beispielweise bei Anlage P07, einem Scheitholzessel aus dem Jahr 2006, ein vergleichsweise hoher gesamt-TEQ-Wert von 100 ng TEQ/kg TS in der Grobasche. Ein weiteres Beispiel ist die Anlage P19, ein Kessel in einem Holzverarbeitenden Betrieb, in dem beschichtete Spanplattenreste verbrannt wurden. Hier wurde ein Gesamt-TEQ

Konzentration von 77,80 ng TEQ/kg TS gemessen. Die restlichen Anlagen weisen deutlich niedrigere gesamt-TEQ-Werte auf, zwischen 0,95 und 1,50 ng TEQ/kg TS.

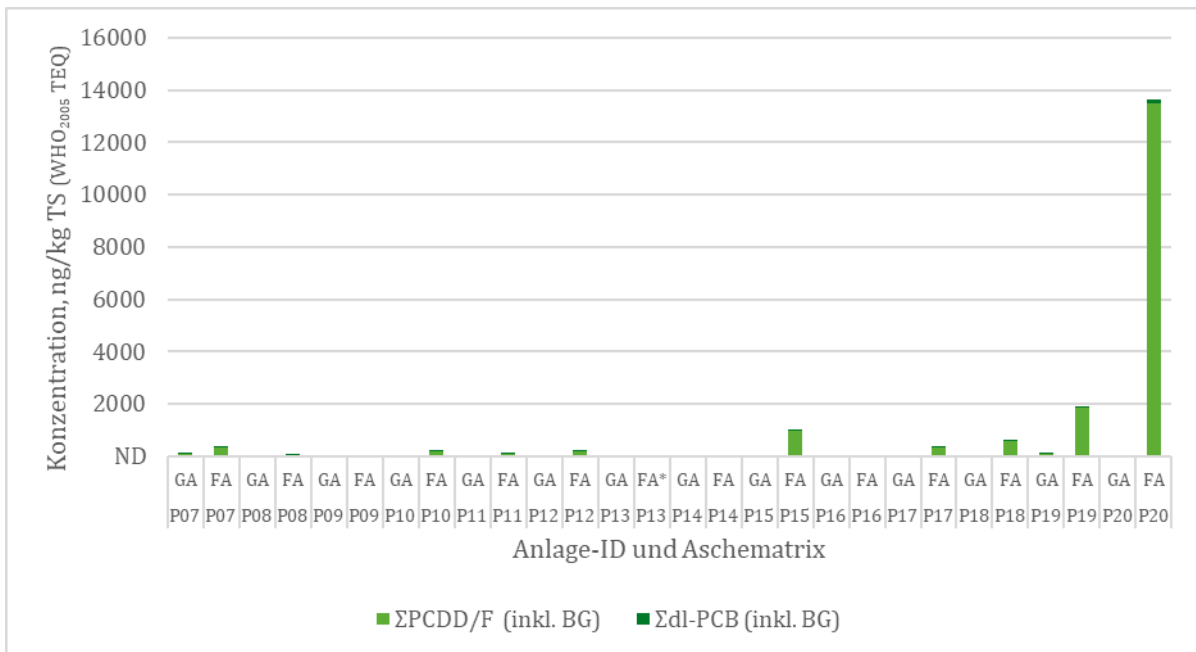
In der Flugasche wurden deutlich höhere gesamt-TEQ Konzentrationen gefunden. Bei den kleineren Kesseln bis 38 kW zeigen vor allem die Anlagen P07, P10 und P12 erhöhte gesamt-TEQ-Werte in der Flugasche (zwischen 193 und 372 ng TEQ/kg TS (PCDD/F & dl-PCB)). Diese Kessel wurden entweder mit Scheitholz (P07, P10) oder mit einer Mischung aus Nadel- und Laubholzpellets betrieben. Im Gegensatz dazu zeigte z. B. die moderne Anlage P09 mit Nadelholz und niedrigem Chlorgehalt deutlich geringere gesamt-TEQ-Werte (2,47 ng TEQ/kg TS (PCDD/F & dl-PCB)).

Bei den größeren Kesseln ab 38 kW, besonders mit Bezug zum Holzverarbeitenden Gewerbe, waren die Dioxin-Konzentrationen auffällig hoch. Besonders auffällig ist Anlage P20, in der beschichtete Holzreste verbrannt wurden. Die Flugasche aus dieser Anlage weist mit 13.643 ng/kg TS (PCDD/F & dl-PCB) den höchsten gesamt-TEQ-Wert aller Festbrennstoffkesselproben auf. Gleichzeitig war der gemessene Chlorgehalt mit 160.000 mg/kg TS sehr hoch. Auch der Wert zur Anlage P19, mit beschichteten Spanplatten als Brennstoff, liegt mit 1.910 ng TEQ/kg vergleichsweise hoch. Im Gegensatz dazu zeigte z. B. die Anlage P16, in der Nadelholz verbrannt wurde, mit nur 1,75 ng/kg TS (PCDD/F & dl-PCB, WHO₂₀₀₅) einen eher niedrigen Wert.

Anders als bei den Einzelraumfeuerungsanlagen, bei denen ein Zusammenhang zwischen Brennstoff und gemessener Dioxin-Konzentration nicht erkennbar ist, zeigt sich bei den Festbrennstoffkesseln ein Zusammenhang. Die höchsten gesamt-TEQ Konzentrationen wurden in den Flugaschen von Anlagen festgestellt, in denen Brennstoffe wie Spanplattenreste oder Holz aus dem Holzverarbeitenden Gewerbe verfeuert wurden (z. B. Anlage P19 und insbesondere P20). Im Gegensatz dazu führten naturbelassene Nadelhölzer als Brennstoff, insbesondere wenn sie in Anlagen wie P14 oder modernen Anlagen mit elektrostatischen Abscheidern wie P09 oder P16 eingesetzt wurden, zu deutlich niedrigeren TEQ-Werten im Bereich von 1,75 bis 2,47 ng/kg TS.

Die nachstehende Abbildung 12 stellt die Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) aus Grob- und Flugasche graphisch dar.

Abbildung 12: Konzentrationen, ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) von PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB TEQ) inklusive BG in Grobasche und Flugasche aus Festbrennstoffkessel



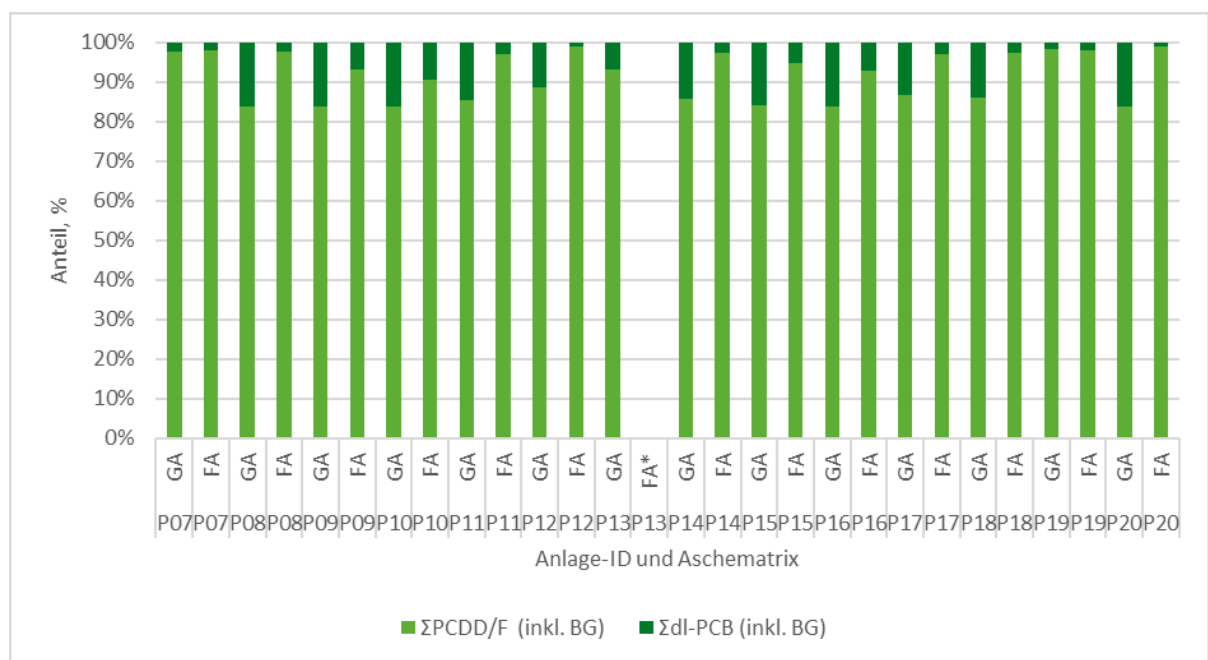
GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P03 nicht analysiert.

Quelle: Eigene Darstellung

Die nachstehende Abbildung 13 zeigt, dass der weitaus größte Anteil der Toxizität (ausgedrückt als gesamt-TEQ für PCDD/F & dl-PCB) durch PCDD/F verursacht wird. In fast allen Flugaschenproben liegt der Beitrag der PCDD/F bei über 90% des gesamt-TEQ, während dl-PCB nur einen geringen Anteil ausmachte, meist nur wenige Prozent. Im Durchschnitt trugen die PCDD/F in den Flugaschenproben rund 99% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei etwa 1% lag.

Bei der Grobasche liegt der Beitrag der PCDD/F stets über 80% des gesamt-TEQ, während dl-PCB durchgängig weniger als 20% ausmacht. Im Durchschnitt trugen die PCDD/F in den Grobascheproben rund 97% zum gesamt-TEQ bei, während der Anteil der dl-PCB bei 3% lag.

Abbildung 13: Beitrag von PCDD/F und dl-PCB zum gesamt-TEQ in Asche aus Festbrennstoffkesseln.



GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P13 nicht analysiert.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 13 und Abbildung 14 zeigen deutliche Unterschiede in dem Chlorgehalten sowie den zugehörigen gesamt-TEQ Konzentrationen (PCDD/F & dl-PCB) in Grob- und Flugasche aus den untersuchten Festbrennstoffkessel.

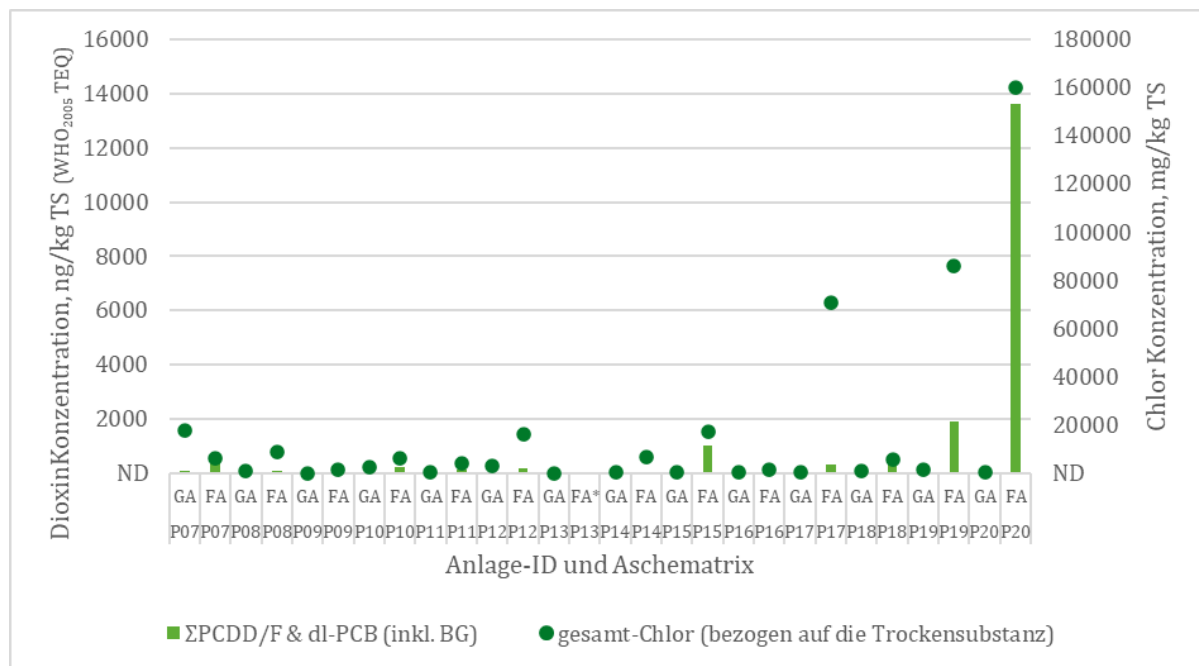
In der Grobasche liegen die gesamt-TEQ-Werte in einem breiten Bereich zwischen 0,95 ng/kg TS (Anlage P16) und 100 ng/kg TS (Anlage P07). Der Chlorgehalt liegt in einem Bereich von 120 mg Cl/kg TS (Anlage P09 und Anlage P13) bis zu 18.000 mg Cl/kg TS (Anlage P07). Relativ niedrige gesamt-TEQ-Werte bei Proben aus Anlagen mit geringem Chlorgehalt, wie bei Anlage P09 mit einem gesamt-TEQ-Wert von 1,04 ng/kg TS, sowie die vergleichsweise hohen gesamt-TEQ - Werte bei Proben aus Anlagen mit höherem Chlorgehalt, wie P07 mit gesamt-TEQ-Wert von 100 ng/kg TS, deuten darauf hin, dass ein gewisser Einfluss des Chlorgehalts auf die gesamt-TEQ in der Grobasche vorhanden ist. Dieser Zusammenhang ist aber nicht durchgängig festzustellen (wie z. B. bei Anlage P12 mit einem Chlorgehalt von 3.000 mg Cl/kg TS und einem relativ niedrigen gesamt-TEQ-Wert von 1,50 ng/kg TS).

In der Flugasche zeigt sich der Zusammenhang zwischen steigenden Chlorgehalten und höheren gesamt-TEQ-Werten deutlicher. Proben aus Anlagen mit sehr hohem Chlorgehalt, wie bei Anlage P20 mit 160.000 mg Cl/kg TS, weisen auch hohe gesamt-TEQ-Werte auf, wie hier von 13.643 ng/kg TS. Auch Proben aus Anlagen mit mittleren Chlorgehaltswerten, wie P19 mit 86.000 mg Cl/kg TS und gesamt-TEQ von 1.910 ng/kg TS, weisen deutlich höhere gesamt-TEQ - Werte auf als Proben aus Anlagen mit niedrigem Chlorgehalt, beispielweise P09 mit 1.600 mg Cl/kg TS und 2,47 ng/kg gesamt-TEQ-Wert.

Allerdings ist der Zusammenhang nicht durchgängig feststellbar und linear. So weist beispielweise Anlage P12 mit einem Chlorgehalt von 16.000 mg Cl/kg TS einen gesamt-TEQ - Wert von 193 ng/kg TS auf, während Anlage P18 mit nur geringfügig niedrigem Chlorgehalt von 5.700 mg/kg TS einen deutlich höheren gesamt-TEQ-Wert von 587 ng/kg TS zeigt. Diese Abweichungen zeigen, dass der Chlorgehalt nicht eindeutig als Indikator für den PCDD/F-Gehalt in der Asche dienen kann.

Abbildung 14 zeigt die graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen gesamt-TEQ und Chlorgehalt.

Abbildung 14: Gesamt-TEQ in ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) und Chlorgehalt in mg/kg TS



GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P13 nicht analysiert.

Quelle: Eigene Darstellung

4.1.2 Mittelgroße Feuerungsanlagen

Es wurden insgesamt zehn Flugaschenproben aus neun verschiedenen Biomassefeuerungsanlagen genommen und analysiert. Tabelle 14 enthält detaillierte Informationen zu den beprobten Anlagen, einschließlich der Art der Anlage, der verwendeten Brennstoffe, der Nennleistung, der Art der Filter sowie der Betriebs- und Einbaudaten der Filter.

Tabelle 14: Details über die untersuchten mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen

Anlage-ID	Art der Anlage	Holzart	Nennleistung (MW)	Art der Filter	Datum der Inbetriebnahme/Datum Einbau des betrachteten Filters
P1	Thermoölkessel	100% HHS aus Landschaftspflege	5	EA	2012/2012
P10	Warmwasserkessel	100% HHS aus Landschaftspflege	4,5	EA	2011/2011
P2	Warmwasserkessel + Thermoölkessel	100% HHS	2,4 + 4,3	EA	2011/2011
P3	Warmwasserkessel	100% Spanplattenspäne und -Staub	2,5	EA	2004/2023

Anlage-ID	Art der Anlage	Holzart	Nennleistung (MW)	Art der Filter	Datum der Inbetriebnahme/Datum Einbau des betrachteten Filters
P4	Heißwasserkessel	98% Produktionsreste Spanplatte/Zerfaserung; 2% Produktionsreste Vollholz/Frischholz/Altholz	8,7	GF	2010/2015
P5	Warmwasserkessel	30% Altholz I; 70% Altholz II; naturbelassenes Holz	2,45	KF	2024/2025
P6*	Warmwasserkessel	Gerste 80% Weizen 20%	0,275	GF	2013/2021
P7	Warmwasserkessel	Gemischte HHS aus Altholz I & II	13,8	GF	2014/2014
P8	Warmwasserkessel	Gemisch aus Rinde und Buchenstaub	13,38	EA	2001/2001
P9	Warmwasserkessel	51% Altholz I und II, 49% Naturholz	4	EA	2008/2008

EA – Elektrostatischer Abscheider; GF – Gewebefilter; HHS – Holzhackschnitzel; KF – Keramikfilter.

*Getreide

Informationen zu den gemessenen Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in Flugasche aus den mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen sind in Tabelle 15 dargestellt.

Insgesamt weisen die gemessenen Konzentrationen von PCDD/F und dl-PCB in der Flugasche große Unterschiede auf, die von der Art des Brennstoffs und der Feuerungsanlage abhängen.

Die höchsten gesamt-TEQ-Werte finden sich bei den Anlagen P5, P7 und P9. P5 weist mit 5.230 ng/kg TS die höchsten Werte auf. Diese Anlage verwendet Altholz (30% Altholz I und 70% Altholz II) und ist mit einem Keramikfilter ausgestattet. Auch P9, die zur Hälfte mit Altholz betrieben wird, erreicht über 2.100 ng/kg TS. P7, wo ebenfalls gemischtes Altholz verwendet wird, liegt bei 478 ng/kg TS.

Im Gegensatz dazu zeigen Anlagen, die ausschließlich naturbelassenes Holz oder reine Holzhackschnitzel verwenden (z. B. P1, P2, P10), deutlich niedrigere gesamt-TEQ-Werte. P1 erreicht etwa 281 ng/kg TS, P2 liegt bei rund 50 ng/kg TS und P10 bei nur etwa 67 ng/kg TS.

Sehr niedrige Werte wurden bei P8 festgestellt, wo ein Gemisch aus Rinde und Buchenstaub verbrannt wird und lediglich eine Konzentration von 1,15 ng/kg TS aufweist. Hier zeigt sich eine äußerst geringe Dioxinbelastung trotz Einsatz eines EA und sehr hohen Anlagenalters. Auch P6, die einzige Anlage, in der Getreide verbrannt wird, zeigt mit rund 24 ng/kg TS geringe Belastungen.

Die Filterart und das Alter der Filter spielen ebenfalls eine Rolle. Zum Beispiel hat P5 einen Keramikfilter, der aber mit vergleichsweise hohen gesamt-TEQ-Werten in der Flugasche in Verbindung steht. Andere Anlagen mit elektrostatischem Abscheider oder Gewebefilter weisen variierende gesamt-TEQ Konzentrationen in der Flugasche auf, je nach Brennstoff.

Besonders niedrig sind die gesamt-TEQ-Werte bei der Anlage P8, welche mit einer Mischung aus Rinde und Buchenstaub betrieben wird. Hier liegen die gesamt-TEQ-Werte unter 2 ng/kg TS.

Dies zeigt an, dass die Art des eingesetzten Brennstoffs einen Einfluss auf die gesamt-TEQ-Werte in der Asche aus mittelgroßen Feuerungsanlagen hat. Zum Beispiel weisen Aschen aus Anlagen, in denen Altholz verbrannt wird, höhere gesamt-TEQ-Werte auf.

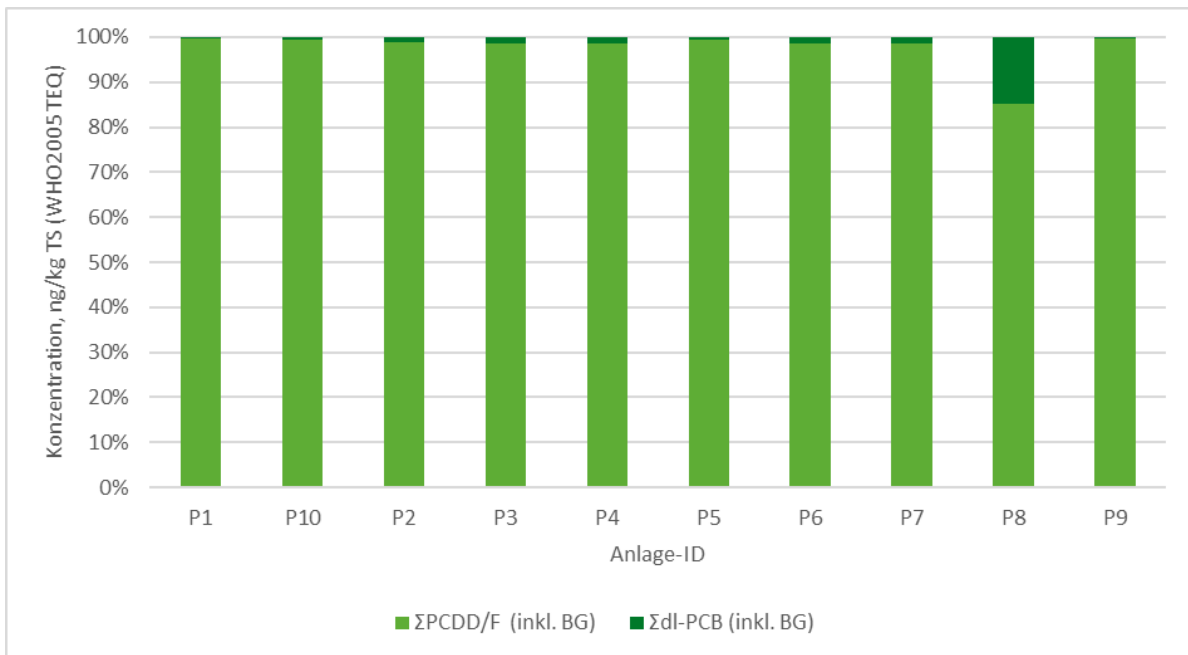
Tabelle 15: Konzentrationen von Chlor (mg/kg TS) sowie PCDD/F, dl-PCB, und gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB) (ng/kg TS, WHO₂₀₀₅ TEQ) in Flugasche aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen.

Anlage-ID	Chlor, gesamt	PCDD/F TEQ		dl-PCB TEQ		gesamt-TEQ	
		exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG	exkl. BG	inkl. BG
P1	NA	279,00	280,00	1,07	1,07	280,00	281,00
P2	NA	49,30	49,50	0,45	0,52	49,80	50,00
P3	NA	167,00	168,00	2,00	2,00	169,00	170,00
P4	NA	51,80	52,30	0,61	0,68	52,40	53,00
P5	89.000	5.170,00	5.210,00	24,50	24,50	5.200,00	5.230,00
P6	NA	23,90	24,00	0,31	0,37	24,20	24,40
P7	NA	469,00	471,00	6,72	6,72	476,00	478,00
P8	3.000	0,33	0,98	ND	0,17	0,33	1,15
P9	NA	2.090,00	2.100,00	8,92	8,92	2.100,00	2.110,00
P10	NA	66,80	66,90	0,32	0,39	67,20	67,30

BG – Bestimmungsgrenze; NA – nicht analysiert

In Abbildung 15 ist der Beitrag von PCDD/F und dl-PCB zum gesamt-TEQ in Flugasche von mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen dargestellt. In allen untersuchten Proben, mit Ausnahme von P8 machen PCDD/F zwischen 98% und 99,6% des gesamt-TEQ aus. Die dl-PCB tragen nur 0,4% bis 1,5% zur Gesamttoxizität bei. Eine Ausnahme stellt P8 dar. Hier liegt der dl-PCB Anteil mit 14,8% deutlich höher als bei den anderen Anlagen.

Abbildung 15: Beitrag von PCDD/F und dl-PCB zum gesamt-TEQ in Asche von mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen.



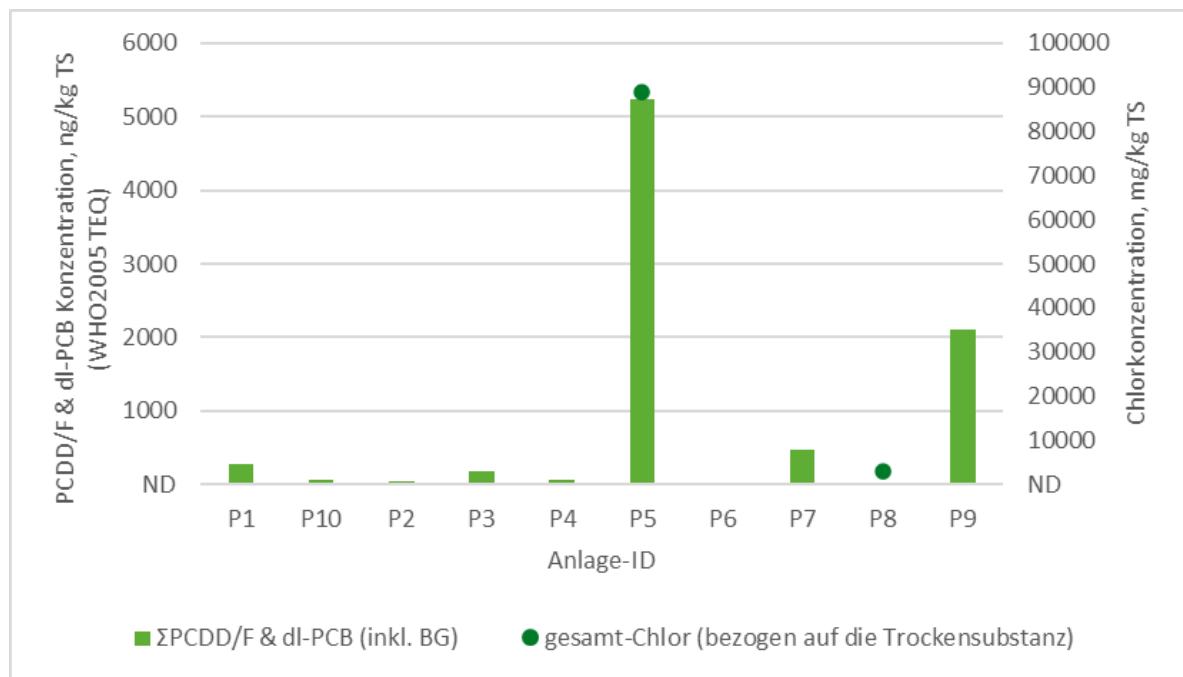
Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 15 und Abbildung 16 zeigen deutliche Unterschiede in den Chlorgehalten sowie den zugehörigen gesamt-TEQ Konzentrationen (PCDD/F & dl-PCB) in Grob- und Flugasche aus den untersuchten mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen.

Die gemessenen Chlorgehalte in der Flugasche liegen nur für wenige Anlagen vor, was eine Bewertung erschwert. Nur für die Anlagen P5 und P8 konnten Chlorgehalte ermittelt werden, mit 89.000 mg Cl/kg TS bei P5 und 3.000 mg Cl/kg TS bei P8. Während P5 sowohl einen hohen Chlorgehalt als auch erhöhte gesamt-TEQ-Werte aufweist, zeigen sich bei P8 trotz vergleichsweise moderatem Chlorgehalt geringe gesamt-TEQ Konzentrationen.

Da aber für viele Anlagen keine Chlorwerte vorliegen (in der Tabelle 15 als „NA“ gekennzeichnet), kann kein vollständiges Bild gezeichnet werden.

Abbildung 16: Korrelation zwischen dem gesamt-TEQ in ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) und dem Chlorgehalt in mg/kg TS.



GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P03 nicht analysiert.

Quelle: Eigene Darstellung

4.2 Durchschnittliche PCDD/F und dl-PCB Gehalte

Aus den analysierten Aschenproben wurden Mittelwerte, Medianwerte sowie Minimal- und Maximalwerte der gemessenen Dioxin-Konzentrationen ermittelt.

Die Ergebnisse umfassen Messungen aus Kleinfeuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen, wobei die Kleinfeuerungsanlagen in Einzelraumfeuerungsanlagen, Festbrennstoffkessel und Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe unterteilt sind. Die Zusammenfassung der Anlagentypen gibt einen Überblick über die Spannweite und Verteilung der gemessenen Werte. Alle Konzentrationen sind in ng TEQ/kg WHO₂₀₀₅ TS angegeben.

4.2.1 Kleinfeuerungsanlagen

4.2.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen

Tabelle 16 enthält die ermittelten PCDD/F- und dl-PCB-Konzentrationen in Aschenproben aus Einzelraumfeuerungsanlagen. Wie in der Tabelle dargestellt, zeigen die Einzelraumfeuerungsanlagen deutlich niedrigere TEQ-Werte in Grobasche im Vergleich zur Flugasche. Der durchschnittliche gesamt-TEQ-Wert in Grobasche liegt bei 1,09 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB. Der Median entspricht nahezu dem Mittelwert, was auf eine gleichmäßige Verteilung der TEQ-Werte hinweist. Im Gegensatz dazu hat die Flugasche aus Einzelraumfeuerungsanlagen einen durchschnittlichen gesamt-TEQ-Wert von 117,18 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB mit einer großen Spannweite von 33,80 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB bis 217 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB. Der Median von 82,80 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB liegt deutlich unter dem durchschnittlichen gesamt-TEQ-Wert, was zeigt, dass wenige Proben hohe gesamt-TEQ-Werte haben.

Tabelle 16: PCDD/F und dl-PCB Gehalte in den analysierten Aschenproben aus Einzelraumfeuerungsanlagen. Alle Werte sind in ng TEQ/kg WHO₂₀₀₅ TS angegeben.

	Σ PCDD/F	Σ dl-PCB	Σ PCDD/F & dl-PCB
<i>Grobasche</i>			
Mittelwert	0,92	0,17	1,09
Median	0,92	0,17	1,10
Min	0,88	0,17	1,05
Max	0,94	0,18	1,12
<i>Flugasche</i>			
Mittelwert	113,46	3,82	117,18
Median	80,40	2,54	82,80
Min	33,10	0,74	33,80
Max	212,00	8,57	217,00

Quelle: Eigene Berechnung

4.2.1.2 Festbrennstoffkessel

Tabelle 17 zeigt die ermittelten Dioxin-Konzentrationen in Aschenproben aus Festbrennstoffkesseln.

Im Vergleich zu Einzelraumfeuerungsanlagen haben Festbrennstoffkessel höhere durchschnittliche TEQ-Werte sowohl in Grobasche als auch in Flugasche. Grobasche aus Festbrennstoffkesseln enthält im Durchschnitt eine Konzentration von 10,26 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB (fast zehnmal höher als bei Einzelraumfeuerungsanlagen). Die TEQ-Werte sind ungleich verteilt, wobei einige Proben eine TEQ-Konzentration von 100 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB erreichen. Auch die Konzentrationen in Flugasche aus Festbrennstoffkesseln sind höher, mit einem Durchschnittswert von 235,42 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB. Auch hier ist der Median niedriger als der durchschnittliche TEQ-Wert, was zeigt, dass nur wenige Proben hohe TEQ-Werte aufweisen.

Tabelle 17: PCDD/F und dl-PCB Gehalte in den analysierten Aschenproben aus Festbrennstoffkessel. Alle Werte sind in ng TEQ/kg WHO₂₀₀₅ TS angegeben.

	Σ PCDD/F	Σ dl-PCB	Σ PCDD/F & dl-PCB
<i>Grobasche</i>			
Mittelwert	9,92	0,35	10,26
Median	1,00	0,17	1,17
Min	0,80	0,15	0,95
Max	98,00	2,18	100,00
<i>Flugasche</i>			
Mittelwert	225,70	9,83	235,42
Median	135,50	2,72	156,50

	Σ PCDD/F	Σ dl-PCB	Σ PCDD/F & dl-PCB
Min	1,91	0,14	2,05
Max	960,00	51,60	1.010,00

Quelle: Eigene Berechnung

4.2.1.3 Kessel der holzbe- und verarbeitenden Betriebe

Tabelle 18 zeigt die ermittelten Dioxin-Konzentrationen in Ascheproben aus Kesseln der holzbe- und verarbeitenden Betriebe.

Im Vergleich zu Einzelraumfeuerungsanlagen und Festbrennstoffkesseln weisen die Aschen aus den Kesseln der holzbe- und verarbeitenden Betriebe deutlich höhere TEQ-Werte auf. Grobasche aus diesen Anlagen enthält im Durchschnitt eine Konzentration von 26,69 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB, während die Flugasche im Durchschnitt 5.380 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB enthält. Der Maximalwert bei einer Flugasche liegt bei 13.643 ng TEQ/kg TS Σ PCDD/F & dl-PCB, fast 14-mal höher als der Maximalwert bei den Festbrennstoffkesseln.

Tabelle 18: PCDD/F und dl-PCB Gehalte in den analysierten Aschenproben aus Kessel der holzbe- und verarbeitenden Betriebe. Alle Werte sind in ng TEQ/kg WHO₂₀₀₅ TS angegeben.

	Σ PCDD/F	Σ dl-PCB	Σ PCDD/F & dl-PCB
<i>Grobasche</i>			
Mittelwert	26,21	0,50	26,69
Median	1,02	0,17	1,19
Min	0,91	0,16	1,08
Max	76,70	1,16	77,80
<i>Flugasche</i>			
Mittelwert	5.313,67	65,80	5,380,00
Median	1.870,00	38,20	1.910,00
Min	571,00	16,20	587,00
Max	13,500,00	143,00	13.643,00

Quelle: Eigene Berechnung

4.2.2 Mittelgroße Feuerungsanlagen

Die nachstehende Tabelle 19 zeigt die ermittelten Dioxin-Konzentrationen in Ascheproben aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen. Für jede Substanzgruppe wurden Mittelwert, Median sowie Minimal- und Maximalwerte berechnet. Alle Konzentrationen sind in ng TEQ/kg TS angegeben.

Bei der Auswahl der Anlagen wurden gezielt Anlagen einbezogen, bei denen mit höheren PCDD/PCDF- und dl-PCB-Gehalten in den Aschen zu rechnen ist (s. o.). Erwartungsgemäß zeigen die ermittelten Konzentrationswerte aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen daher insgesamt deutlich höhere Median- und Mittelwerte als jene aus Kleinfeuerungsanlagen, mit Ausnahme der Flugaschen aus den Kesseln des holzbe- und verarbeitenden Gewerbes. So liegt

der Medianwert für Σ PCDD/F & dl-PCB bei 118,65 ng TEQ/kg TS und der Mittelwert bei 846,49 ng TEQ/kg TS, was auf eine insgesamt höhere Belastung hindeutet. Im Vergleich zu den niedrigen Minimalwerten (z. B. 0,98 ng TEQ/ kg für Σ PCDD/F & dl-PCB) sind die Maximalwerte mit über 5.000 ng TEQ/kg TS sehr hoch. Dennoch fällt auf, dass im Gegensatz zu Kleinf Feuerungsanlagen der Medianwert hier deutlich höher ist. Dies lässt darauf schließen, dass nicht nur Ausreißer, sondern auch ein großer Teil der Proben insgesamt höher belastet ist.

Tabelle 19: Dioxin-Konzentrationen in den analysierten Flugaschenproben aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen. Alle Werte sind in ng TEQ/kg TS angegeben.

Substanz	Mittelwert	Medianwert	Minimalwert	Maximalwert
Σ PCDD/F	842,27	117,45	0,98	5.210,00
Σ dl-PCB	4,56	0,87	0,17	24,50
Σ PCDD/F & dl-PCB	846,49	118,65	1,15	5.230,00

Quelle: Eigene Berechnung

4.3 Schadstofffrachten

Zum Zweck der Auswertung und der Diskussion der Auswirkung einer möglichen Änderung des Anhang IV Grenzwertes für PCDD/F und dl-PCB der EU POP-Verordnung sollen die in den Aschen aus den Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen enthaltenen Schadstofffrachten gegebenenfalls ermittelt werden. Diese können durch Multiplikation der in den Aschen vorliegenden Konzentration mit den Aschemengen errechnet werden.

Da Daten zu den Aschemengen nicht unmittelbar vorliegen, werden diese über verfügbare Daten zu Energieeinsätzen berechnet.

Um die Schadstofffrachten von PCDD/F, dl-PCB sowie der Summe von PCDD/F und dl-PCB in den Aschen zu berechnen, wurden Daten zur Ermittlung der Aschemengen aus kleinen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen erhoben. Ziel war es, die Gesamtmengen der anfallenden Aschen zu ermitteln.

Da es in Deutschland keine offiziellen statistischen Erhebungen zu den anfallenden Aschemengen von Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen gibt, wurden Expertinnen und Experten kontaktiert sowie Literaturdaten ausgewertet, um verlässliche Daten zu erhalten.

Anschließend wurden die ermittelten Aschemengen mit den durchschnittlichen und mittleren Konzentrationen von Σ PCDD/F, Σ dl-PCB sowie die Σ PCDD/F & dl-PCB (in ng TEQ/kg TS) aus den analysierten Proben multipliziert. So konnte abgeschätzt werden, wie viel dieser Stoffe insgesamt in der Asche enthalten sind.

Die Berechnungen wurden für die Kleinf Feuerungsanlagen, getrennt nach Anlagentyp, für Einzelraumfeuerungsanlagen, Festbrennstoffkessel sowie für die Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe sowie getrennt für Grob- und Flugasche durchgeführt.

Bezüglich der mittelgroßen Feuerungsanlagen ist eine Abschätzung der Frachten an PCDD/F und dl-PCB auf Grundlage der vorliegenden Daten aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll möglich. Insbesondere erfolgte die Beprobung nicht repräsentativ, sondern mit dem Ziel, Anlagen zu beproben, bei denen eine vergleichsweise hohe Schadstoffbelastung zu erwarten ist, wie z. B. bei Anlagen mit Altholz der Kategorie A II, Spanplatten oder Getreide als Brennstoff. Vor

diesem Hintergrund handelt es sich bei den ausgewählten Anlagen nicht um eine repräsentative Stichprobe und es sind bei den beprobten Anlagen höhere PCDD/F- und PCB-Konzentrationen in den Aschen zu erwarten. Außerdem wurden bei den fraglichen Anlagen ausschließlich Flugaschen, aber keine Grobaschen beprobt. Verlässliche Informationen über die Anteile der Aschegehalte bei mittelgroßen Feuerungsanlagen bei der Verbrennung verschiedener Brennstoffe (u.a. Altholz) liegen nicht vor. Vor diesem Hintergrund wurde auf eine Abschätzung der Schadstofffrachten aus diesen Anlagen verzichtet.

4.3.1 Aschemengen

Zur Berechnung der Schadstofffrachten wurde zunächst ermittelt, wie viel Asche in Deutschland aus Kleinfeuerungsanlagen anfällt.

Da hierzu keine statistischen Erhebungen oder offiziellen Daten vorliegen, wurden die Aschemengen über die durch die Brennstoffe eingesetzte Energie abgeschätzt. Hierzu wurde die in den Anlagen eingesetzte Brennstoffmenge herangezogen. Auf Basis typischer Aschegehalte der verwendeten Brennstoffe konnte berechnet werden, wie viel Asche bei der Verbrennung entsteht.

Um relevante Daten und Literaturquellen zu erhalten, wurden mehrere Institutionen und Personen kontaktiert, darunter ZIV, Bundesgütegemeinschaft Holzrasche e.V., Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) sowie Expertinnen und Experten des UBA.

Die gesammelten Daten und die Literatur wurden auf ihre Relevanz geprüft und geeignete Daten für die weiteren Berechnungen verwendet.

In Abstimmung mit dem UBA wurde entschieden, den typischen Ascheanfalls gemäß den relevanten DIN-Normen für verschiedene Holzbrennstoffarten zu verwenden. Konkret wurden die in der Normenreihe DIN EN ISO 17225 angegebenen Werte zur Berechnung herangezogen. Die typischen Aschegehalte die aus dieser Norm stammen, sind in Tabelle 20 dargestellt. Relevant für die Kleinfeuerungsanlagen sind die Brennstoffe die die Qualität A1 einhalten. Auf Grundlage der Brennstoffmengen und dem typischen Ascheanfalls, wurden die Aschemengen berechnet.

Tabelle 20: Typische Aschegehalte verschiedener Holzsortimente

Holzart	Aschegehalt, %	Aschebezeichnung	Quelle
Briketts	≤1,0	A1.0	DIN EN ISO 17225-1
Pellets	≤1,0	A1.0	DIN EN ISO 17225-1
Holzhackschnitzel und Schredderholz	≤1,0	A1.0	DIN EN ISO 17225-1
Scheitholz und Stückholz	NA	NA	DIN EN ISO 17225-1
Sägespänen	≤1,0	A1.0	DIN EN ISO 17225-1
Hobelspänen	≤1,0	A1.0	DIN EN ISO 17225-1
Rinde	≤1,0	A1.0	DIN EN ISO 17225-1
Rundholz, Chemisch unbehandelte Holzrückstände	≤0,7	A0.7	DIN EN ISO 17225-2
Holzbriketts	≤1,0	A1.0	DIN EN ISO 17225-3

NA – nicht angegeben

Quelle: DIN EN ISO 17225-1, DIN EN ISO 17225-2, DIN EN ISO 17225-3

Um die Schadstofffrachten separat für die verschiedenen Aschefraktionen (Grobasche und Flugasche) abschätzen zu können, wird auf die Untersuchungen von Launhardt et al. (1998) zurückgegriffen. Unter Berücksichtigung moderner Verbrennungstechniken wurden die in Launhardt et al. angegebenen Prozentsätze in Abstimmung mit dem UBA angepasst, um den aktuellen Betriebsbedingungen von Kleinfeuerungsanlagen besser zu entsprechen.

Eine Übersicht über die prozentualen Anteile, die für die Berechnung der Aschemengen weiterverwendet werden, unterteilt in Grobasche und Flugasche, ist in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Verhältnis Grobasche zu Flugasche in Kleinfeuerungsanlagen

Asche	Prozent, %	
	Einzelraumfeuerungsanlagen	Festbrennstoffkessel
Grobasche	93	95
Flugasche	7	5

Quelle: Eigene Berechnung in Abstimmung mit UBA

4.3.1.1 Kleinfeuerungsanlagen

Zunächst werden die Aschemengen aus Kleinfeuerungsanlagen in Deutschland betrachtet. Dabei werden Einzelraumfeuerungsanlagen (ERF), Festbrennstoffkessel in privaten Haushalten (Holzzentralheizungen, HZH) sowie Kessel der holzbe- und verarbeitenden Betriebe berücksichtigt. Die berechneten Aschemengen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

4.3.1.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen

Laut einer Studie von Jochem et al. (2023) betrug der gesamte Einsatz an Holzbrennstoffen in Haushalten im Jahr 2020 26,95 Mio. m³. Davon entfielen 18,10 Mio. m³ auf Einzelraumfeuerungsanlagen (Jochem et al., 2023).

Um den Betrag im Tonnen darzustellen, wurden die in der Studie angegebenen Umrechnungsfaktoren (m³/Tonne) je nach Brennholzart verwendet (siehe Tabelle 22). Für alle Brennholzarten lag der passenden Umrechnungsfaktor vor, außer für die „sonstigen Brennholzsortimente“. Hier wurde der Durchschnitt der vorhandenen Werte verwendet.

Tabelle 22: Holzverbrauch in Einzelraumfeuerungsanlagen im Jahr 2020

Holzbrennstoffart	Holzverwendung, in Mio. m ³	UF, in m ³ /Tonne	Holzverwendung, in Mio. Tonnen
Scheitholz/Waldscheitholz mit Rinde	9,99	1,869	5,35
Scheitholz/Waldscheitholz ohne Rinde	2,05	1,869	1,10
Scheitholz/Waldscheitholz aus Garten	1,48	1,869	0,79
Scheitholz/Landschaftspflegeholz	0,47	1,070	0,44
Altholz	1,37	1,730	0,79
Schnittholzreste	0,65	1,310	0,50
Holzhackschnitzel	0,15	1,923	0,08

Holzbrennstoffart	Holzverwendung, in Mio. m ³	UF, in m ³ /Tonne	Holzverwendung, in Mio. Tonnen
Holzpellets	0,80	1,875	0,43
Holzbriketts	0,63	2,107	0,30
Anzündholz	0,30	2,107	0,14
sonst. Brennholzsortimente	0,21	1,773*	0,12
Insgesamt	18,10	-	10,03

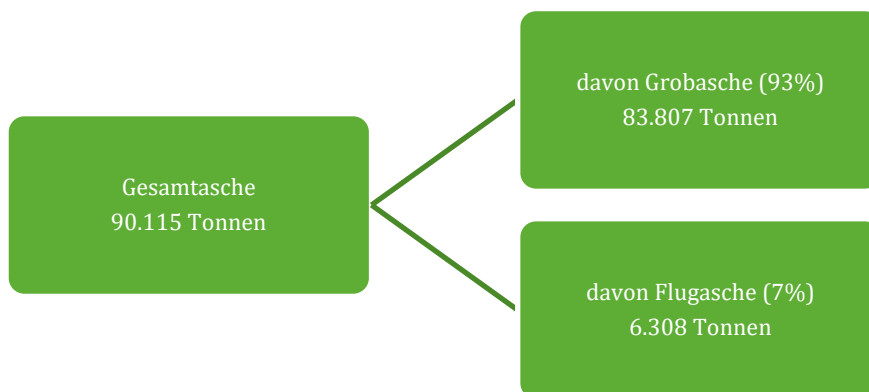
ERF – Einzelraumfeuerungsanlage, UF – Umrechnungsfaktor

*Da für sonstige Brennholzsortimente keine Umrechnungsfaktoren vorlagen, wurde der Durchschnitt der vorhandenen Werte verwendet.

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Jochem et al. (2023).

Basierend auf dem in Tonnen umgerechneten Holzverbrauch wurde die Aschemenge für das Jahr 2020 abgeschätzt. Für die Berechnung der Aschemengen wurde der jeweils in den DIN-Normen (siehe Tabelle 20) angegebene Aschegehalt für die entsprechenden Brennstoffarten verwendet. Dabei wurde für jedes Brennholzsortiment der passende Aschegehalt gemäß Brennstofftyp (z. B. Rinde, unbehandeltes Holz, Pellets, Briketts, Hackschnitzel usw.) herangezogen. So konnte der Ascheanteil realistischer und auf Grundlage der DIN-Normen bestimmt werden, was zu einer geschätzten Aschemenge von 90.115 Tonnen aus Einzelraumfeuerungsanlagen führt. Dies entspricht einem Ascheanfall von 0,9%. Zur weiteren Differenzierung in Grobasche und Flugasche wurde die Aufteilung in Tabelle 21 verwendet. Die daraus resultierende Aschemengen aus Einzelraumfeuerungsanlagen für das Jahr 2020 sind in Abbildung 17 dargestellt.

Abbildung 17: Aschemengen aus Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland im Jahr 2020



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Launhardt et al. (1998) und Jochem et al. (2023) sowie Abstimmung mit dem Umweltbundesamt

4.3.1.1.2 Festbrennstoffkessel

Auch für die Festbrennstoffkessel wurden die Daten aus der Studie von Jochem et al. (2023) zur Berechnung der Aschemengen herangezogen. Laut dieser Studie wurden im Jahr 2020 8,85 Mio. m³ Holzbrennstoffsportimente in Holzzentralheizungen verbraucht (Jochem et al., 2023).

Um die Mengen in Tonnen darzustellen, wurden die in der Studie angegebenen Umrechnungsfaktoren (m³/Tonne) je nach Brennholzart verwendet (siehe Tabelle 23). Für alle Brennholzarten lag der passenden Umrechnungsfaktor vor, außer für die „sonstigen Brennholzsortimente“. Hier wurde der Durchschnitt der vorhandenen Werte verwendet.

Tabelle 23: Holzverbrauch in Festbrennstoffkessel im Jahr 2020

Holzbrennstoffart	Holzverwendung, in Mio. m ³	UF, in m ³ /Tonne	Holzverwendung, in Mio. Tonnen
Scheitholz/Waldscheitholz mit Rinde	3,73	1,869	2,00
Scheitholz/Waldscheitholz ohne Rinde	0,50	1,869	0,27
Scheitholz/Waldscheitholz aus Garten	0,69	1,869	0,37
Scheitholz/Landschaftspflegeholz	0,16	1,070	0,15
Altholz	0,26	1,730	0,15
Schnittholzreste	0,17	1,310	0,13
Holzhackschnitzel	0,13	1,923	0,07
Holzpellets	2,99	1,875	1,59
Holzbriketts	0,06	2,107	0,03
Anzündholz	0,04	2,107	0,02
sonst. Brennholzsortimente	0,12	1,773*	0,07
Insgesamt	8,85	-	4,84

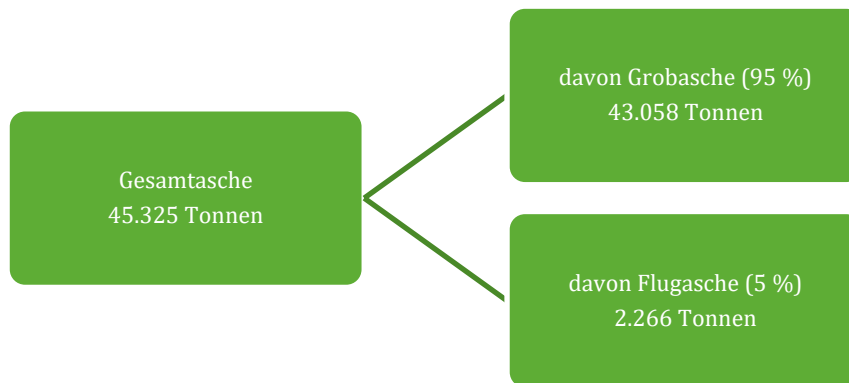
ERF – Einzelraumfeuerungsanlage, UF – Umrechnungsfaktor

*Da für sonstige Brennholzsortimente keine Umrechnungsfaktoren vorlagen, wurde der Durchschnitt der vorhandenen Werte verwendet.

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Jochem et al. (2023).

Basierend auf dem in Tonnen umgerechneten Holzverbrauch wurde die Aschemenge für das Jahr 2020 abgeschätzt. Für die Berechnung der Aschemengen wurde der jeweils in den DIN-Normen (siehe Tabelle 20) angegebene Aschegehalt für die entsprechenden Brennstoffarten verwendet. Dabei wurde für jedes Brennholzsortiment der passende Aschegehalt gemäß Brennstofftyp (z. B. Rinde, unbehandeltes Holz, Pellets, Briketts, Hackschnitzel usw.) herangezogen. So konnte der Ascheanteil realistischer und auf Grundlage der Normen bestimmt werden, was zu einer geschätzten Aschemenge von 45.325 Tonnen aus Festbrennstoffkesseln führt. Dies entspricht einem Ascheanfall von 0,9%. Zur weiteren Differenzierung in Grobasche und Flugasche wurde die Aufteilung in Tabelle 21 verwendet. Die daraus resultierende Aschemengen aus Festbrennstoffkessel für das Jahr 2020 sind in Abbildung 18 dargestellt.

Abbildung 18: Aschemengen aus Festbrennstoffkesseln in Deutschland im Jahr 2020



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Launhardt et al. (1998) und Jochem et al. (2023) sowie Abstimmung mit dem Umweltbundesamt

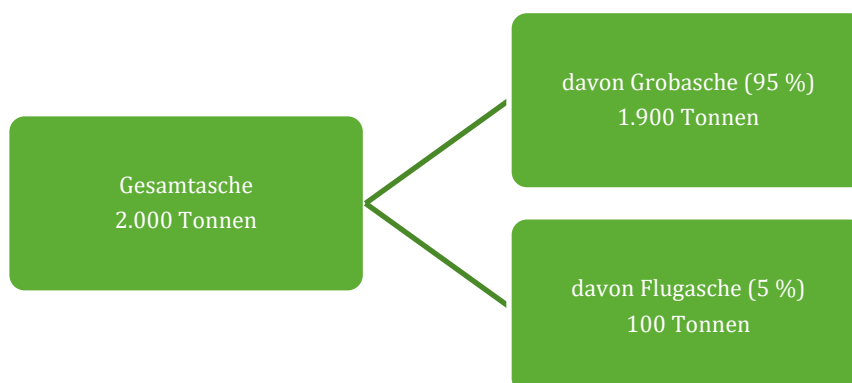
4.3.1.1.3 Kessel der holzbe- und verarbeitende Betriebe

Um die Menge der Brennstoffe 6 und 7 zu bestimmen, die in holzbe- und verarbeitenden Betrieben verwendet wird, wurde in Abstimmung mit dem UBA ein Restrechnungsansatz angewendet, demzufolge im Jahr 2020 etwa 100.000 Tonnen der Brennstoffe 6 und 7 verbraucht wurden. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass diese Zahlen mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind.

Laut 1. BImSchV umfassen die Brennstoffe 6 und 7 gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie verleimte Holzwerkstoffe wie Sperrholz, Spanplatten und Faserplatten. Aufgrund der enthaltenen Bindemittel, Beschichtungen und sonstigen Zusatzstoffe ist bei der Verbrennung dieser Brennstoffe mit einem etwas höheren Ascheanfall zu rechnen als bei naturbelassenem Holz. Für die Berechnung wird daher ein Aschegehalt von 2 % zugrunde gelegt¹⁴, anstelle des oben genannten Ansatzes, der für Einzelraumfeuerungsanlagen und andere Festbrennstoffkessel mit unbehandeltem Holz verwendet wird.

Auf dieser Basis wurden die entsprechende Aschemengen für das Jahr 2020 abgeschätzt. Die resultierenden Aschemengen aus Kesseln der holzbe- und verarbeitenden Betriebe für das Jahr 2020 sind in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 19: Aschemengen aus Kesseln der holzbe- und verarbeitenden Betriebe in Deutschland im Jahr 2020



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Launhardt et al. (1998) und Jochem et al. (2023) sowie Abstimmung mit dem Umweltbundesamt

¹⁴ In Abstimmung mit UBA

4.3.2 Resultierende Schadstofffrachten

4.3.2.1 Kleinfeuerungsanlagen

Die resultierenden Schadstofffrachten in der Asche aus Kleinfeuerungsanlagen wurden basierend auf den zuvor berechneten Aschemengen (siehe Kapitel 4.3.1) und den Mittel- sowie Medianwerten der gemessenen TEQ Gehalte an PCDD/F und dl-PCB in Grobasche und Flugasche berechnet.

4.3.2.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen

Tabelle 24 zeigt die PCDD/F und dl-PCB Frachten sowie deren Summe in den Aschen aus Einzelraumfeuerungsanlagen für das Jahr 2020. Alle Werte sind in g TEQ (WHO₂₀₀₅) angegeben.

Betrachtet man die Median- und Mittelwerte, so zeigt sich, dass in der Grobasche (ca. 84 kt) eine jährliche Fracht von weniger als 0,1 g, in der Flugasche (ca. 6 kt) von weniger als 1 g gesamt-TEQ (WHO₂₀₀₅) für PCDD/F und dl-PCB enthalten ist. Der überwiegende Anteil der TEQ-Fracht stammt sowohl in der Grobasche (über 83 %) als auch in der Flugasche (über 96 %) aus der PCDD/F Belastung.

Tabelle 24: PCDD/F und dl-PCB Fracht in Asche aus Einzelraumfeuerungsanlagen im Jahr 2020. Alle Werte in g TEQ WHO₂₀₀₅

	ΣPCDD/F	Σdl-PCB	ΣPCDD/F & dl-PCB
<i>Grobasche</i>			
Mittelwert	0,077	0,015	0,091
Median	0,077	0,014	0,092
Min	0,074	0,014	0,088
Max	0,079	0,015	0,094
<i>Flugasche</i>			
Mittelwert	0,716	0,024	0,739
Median	0,507	0,016	0,522
Min	0,209	0,005	0,213
Max	1,337	0,054	1,369

Quelle: Eigene Berechnung

4.3.2.1.2 Festbrennstoffkessel

Tabelle 25 zeigt die PCDD/F und dl-PCB Frachten sowie deren Summe in den Aschen aus Festbrennstoffkesseln für das Jahr 2020. Alle Werte sind im g TEQ (WHO₂₀₀₅) gegeben.

Betrachtet man die Median- und Mittelwerte, so zeigt sich, dass in der Grobasche (ca. 43 kt) bzw. der Flugasche (ca. 2 kt) eine jährliche Fracht von weniger als 0,5 g bzw. weniger als 1 g gesamt-TEQ (WHO₂₀₀₅) für PCDD/F und dl-PCB enthalten ist. Der überwiegende Anteil der TEQ-Fracht stammt sowohl in der Grobasche (über 86 %) als auch in der Flugasche (über 95 %) aus der PCDD/F Belastung.

Tabelle 25: PCDD/F und dl-PCB Fracht in Asche aus Festbrennstoffkessel im Jahr 2020. Alle Werte in g TEQ WHO₂₀₀₅

	ΣPCDD/F	Σdl-PCB	ΣPCDD/F & dl-PCB
<i>Grobasche</i>			
Mittelwert	0,427	0,015	0,442
Median	0,043	0,007	0,050
Min	0,034	0,007	0,041
Max	4,220	0,094	4,306
<i>Flugasche</i>			
Mittelwert	0,511	0,022	0,534
Median	0,348	0,006	0,355
Min	0,004	0,0003	0,005
Max	2,176	0,117	3,289

Quelle: Eigene Berechnung

4.3.2.1.3 Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe

Laut 1. BImSchV dürfen Brennstoffe, die in § 3 Absatz 1 Nummer 6 oder Nummer 7 genannt sind, ausschließlich in Betrieben der Holzbearbeitung oder Holzverarbeitung eingesetzt werden (siehe Kapitel 2.3.1.3).

Tabelle 26 zeigt die PCDD/F und dl-PCB Frachten sowie deren Summe in den Aschen aus Kessel der Holzbe- und verarbeitenden Betriebe für das Jahr 2020. Alle Werte sind in g TEQ (WHO₂₀₀₅) gegeben.

Betrachtet man die Median- und Mittelwerte, so zeigt sich, dass in der Grobasche (ca. 1,9 kt) bzw. der Flugasche (ca. 0,1 kt) eine jährliche Fracht von weniger als 0,1 g bzw. weniger als 1 g gesamt-TEQ (WHO₂₀₀₅) für PCDD/F und dl-PCB enthalten ist. Der überwiegende Anteil der TEQ-Fracht stammt sowohl in der Grobasche als auch in der Flugasche aus der PCDD/F Belastung (jeweils über 98 %).

Tabelle 26: PCDD/F und dl-PCB Fracht in Asche aus Holzbe- und verarbeitenden Betriebe im Jahr 2020. Alle Werte in g TEQ WHO₂₀₀₅

	ΣPCDD/F	Σdl-PCB	ΣPCDD/F & dl-PCB
<i>Grobasche</i>			
Mittelwert	0,050	0,001	0,051
Median	0,002	0,0003	0,002
Min	0,002	0,0003	0,002
Max	0,146	0,002	0,148
<i>Flugasche</i>			
Mittelwert	0,531	0,007	0,538
Median	0,187	0,004	0,191

	Σ PCDD/F	Σ dl-PCB	Σ PCDD/F & dl-PCB
Min	0,057	0,002	0,059
Max	1,350	0,014	1,364

Quelle: Eigene Berechnung

4.3.2.2 Fazit

In Summe liegen die jährlichen gesamt-TEQ-Frachten für PCDD/F und dl-PCB in Aschen aus den betrachteten Kleinfeuerungsanlagen im niedrigen einstelligen Grammbereich. Den oben angestellten Schätzungen zufolge betragen die Frachten in den Grobaschen (Aschemenge ~129 kt) insgesamt ca. 0,6 g und in den Feinaschen (Aschemenge ~8,7 kt) ca. 1,8 g (jeweils basierend auf Mittelwerten). Daraus lässt sich auch schließen, dass etwa $\frac{1}{4}$ der gesamt-TEQ Fracht in den Grobaschen und $\frac{3}{4}$ in den Flugaschen enthalten ist.

5 Diskussion

5.1 Vergleich mit Werten aus Deutschland

In diesem Kapitel werden die gemessenen PCDD/F und dl-PCB-Konzentrationen in Grobasche und Flugasche aus Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen mit Werten aus der Fachliteratur in Deutschland verglichen. Ziel ist es, herauszufinden, ob die Ergebnisse der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Untersuchungen mit anderen Studien übereinstimmen oder von ihnen abweichen. Es ist zu beachten, dass die älteren Studien meist die Einheit ng I-TEQ/kg TS verwendeten, während in der aktuellen Studie ng WHO - TEQ/kg TS (WHO₂₀₀₅) genutzt wurde. Die Werte sind daher nicht direkt vergleichbar, geben aber eine gute Orientierung (Siehe Kapitel 2.3).

Die Ergebnisse des Vergleichs werden in den folgenden Unterkapiteln diskutiert.

5.1.1 Kleinf Feuerungsanlagen

5.1.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen

In der Grobasche liegen die im Rahmen dieses Vorhabens gemessenen Werte der PCDD/F-Konzentrationen zwischen 0,88 und 0,94 ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) (siehe Tabelle 11). Diese Werte liegen nahe an den Literaturwerten aus den 1990er Jahren. Laut Launhard et al. liegen die PCDD/F Werte für ähnliche Anlagen zwischen 0,6 bis 1,2 ng I-TEQ/kg (Launhard et al., 1998). Im Gegensatz zu den zuvor durchgeführten Studien wurden im Rahmen dieses Projekts zusätzlich die dl-PCB Konzentrationen gemessen. Diese können jedoch nicht mit früheren Werten verglichen werden, da keine entsprechenden Werte vorliegen. Es ist jedoch zu vermuten, dass die dl-PCB damals wie heute nur einen vergleichsweise geringen Anteil zum gesamt-TEQ-Wert beitragen.

In der Flugasche sind die in diesem Vorhaben gemessenen PCDD/F Werte in der Regel niedriger als die Werte aus der Literatur. Sie können bis zu mehreren 1.000 ng I-TEQ/kg betragen. In einigen Studien wurden hohe Werte von über 10.000 ng I-TEQ/kg gemessen (siehe Kapitel 2.3.1.1). Zum Beispiel hat Thoma PCDD/F Werte von bis zu 48.240 ng I-TEQ/kg TS in Ascheproben aus dem Schornstein (in der Studie als Kaminruß bezeichnet) berichtet (Thoma, 1998), während im Rahmen dieses Projekts der maximale PCDD/F Wert 212 ng/kg TS (WHO₂₀₀₅ TEQ) betrug. Die früher berichteten Werte sind oft um ein Vielfaches höher als die aktuellen Gehalte.

5.1.1.2 Festbrennstoffkessel

In der Grobasche sind die PCDD/F-Gehalte aus der Literatur in der Regel relativ niedrig (<100 ng I-TEQ/kg). So liegen die PCDD/F TEQ-Werte in Grobasche bei unbehandeltem Holz meist niedrig bis etwa 68 ng I-TEQ/kg TS (Pieper, (2001)), mit Ausreißern bis 310 ng I- TEQ/kg TS (Launhardt et al., 1998). Die meisten PCDD/F-Werte bewegen sich aber unter 10 ng I-TEQ/kg TS. Bei behandeltem Holz oder Holzmischungen wurden deutlich höhere Werte gemessen, z. B. von 175 bis 187 ng I-TEQ/kg TS (Pieper, 2001) (siehe 2.3.1.2).

Auch im Rahmen dieses Vorhabens lagen die gemessenen PCDD/F-Werte in der Grobasche in einem ähnlich niedrigen Bereich, meist zwischen 0,80 und 2,33 ng/kg TS, nur eine Probe wies mit 76,7 ng/kg einen deutlich erhöhten Wert auf. Die entsprechenden gesamt-TEQ-Werte einschließlich dl-PCB bewegten sich zwischen 0,95 und 2,51 ng/kg, mit der erwähnten Ausnahme von 77,8 ng/kg TS (siehe Tabelle 13).

PCDD/F-Gehalte aus der Literatur für die Flugasche sind deutlich höher als in der Grobasche, in der Regel aber moderat (<1.000 ng I-TEQ/kg). Bei unbehandeltem Holz lagen die Werte zwischen <1 und 1.577 ng I-TEQ/kg TS, bei behandeltem Holz oder Sonderbiomasse wie Stroh oder Heu wurden bis zu 5.382 ng/kg (Launhardt et al, 2000) gemessen (siehe 2.3.1.2).

Die im Projekt gemessenen Flugasche-Werte (inkl. BG) lagen zwischen 1,75 und 13.643 ng/kg (PCDD/F & dl-PCB (WHO₂₀₀₅ TEQ) (siehe Tabelle 13). Auffällig sind einzelne Proben mit extrem hohen Werten (>1.000 ng/kg) – vergleichbar mit den Höchstwerten aus der Literatur.

Die in diesem Vorhaben gemessenen Grobasche-Werte liegen im unteren Bereich oder sogar unterhalb der Literaturangaben für ordnungsgemäße Verbrennung unbehandelter Hölzer. Bei Flugasche finden sich sowohl Werte im Bereich der ordnungsgemäßen Verbrennung als auch einzelne starke Belastungen, vergleichbar mit den höchsten Literaturwerten.

5.1.2 Mittelgroße Feuerungsanlagen

Bei mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen wurden im Rahmen dieses Vorhabens ausschließlich Proben von Flugasche genommen und analysiert.

Die gemessenen gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB WHO₂₀₀₅) in Flugascheproben aus mittelgroßen Anlagen liegen in einer großen Spannbreite, sie reichen von 1,15 bis 5.230 ng/kg TS (PCDD/F & dl-PCB WHO₂₀₀₅, inkl. BG) (siehe Tabelle 15). Höhere Werte finden sich bei einzelnen Proben wie aus der Anlage P5 mit über 5.000 ng/kg TS (PCDD/F & dl - PCB WHO₂₀₀₅, inkl. BG) oder bei der Probe aus der Anlage P9 mit ca. 2.110 ng/kg TS (PCDD/F & dl-PCB WHO₂₀₀₅, inkl. BG) oder der Probe aus der Anlage P7 mit rund 478 ng/kg TS (PCDD/F & dl-PCB WHO₂₀₀₅, inkl. BG).

Bei der Auswahl der Anlagen wurden gezielt Anlagen einbezogen, bei denen mit höheren PCDD/PCDF- und dl-PCB-Gehalten in den Aschen zu rechnen ist (s.o.). Die höheren Werte stehen ohne Ausnahme in Verbindung mit der Verbrennung von Altholz der Kategorie II. Das erklärt, warum die in diesem Vorhaben gemessenen Werte teilweise um mehrere Größenordnungen über denen liegen, die für Holzverbrennung in der untersuchten Literatur berichtet wurden. In der Literatur erreichen die Gehalte an PCDD/F in Flugasche maximal 28,4 ng I-TEQ/kg (siehe Tabelle 33).

5.2 Vergleich mit Werten aus anderen Ländern

Im Rahmen dieses Vorhabens werden auch die gemessenen TEQ-Werte für PCDD/F, dl-PCB sowie die Summe in Grob- und Flugasche aus kleinen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen mit entsprechenden Werten aus anderen europäischen Ländern verglichen.

Einige dieser Vergleichsstudien wurden zu Beginn des Projekts von UBA bereitgestellt, weitere wurden im Laufe der Literaturrecherche identifiziert. Insgesamt konnten acht relevante Studien identifiziert und systematisch ausgewertet werden. Dabei wurden Informationen zu den gemessenen Konzentrationen, zur Art der Asche, zum Anlagentyp, zu den Verbrennungsbedingungen und weiteren relevanten Parametern in einer entsprechenden Exceltabelle dokumentiert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus ausgewählten Ländern zusammengefasst und in den Kontext der aktuellen Messergebnisse aus diesem Vorhaben gestellt.

5.2.1 Kleinf Feuerungsanlagen

Tabelle 27 zeigt eine Übersicht der gesamt-TEQ-Werte (Σ PCDD/F & dl-PCB, WHO₂₀₀₅) in Grob- und Flugascheproben aus Kleinf Feuerungsanlagen verschiedener europäischer Länder.

Bei der Grobasche liegen in Deutschland die in diesem Vorhaben gemessenen gesamt-TEQ-Werte zwischen 0,95 und 100 ng TEQ/kg, wobei die Messergebnisse überwiegend im Bereich zwischen 1 und 2 ng TEQ/kg liegen (siehe Tabelle 11 und Tabelle 13). Keine der Proben überschreitet den Grenzwert von 5 µg/kg (5.000 ng/kg). Im Vergleich zu anderen europäischen Ländern bewegen sich die deutschen Werte im mittleren bis oberen Bereich. Ähnliche oder niedrigere Werte wurden in Dänemark (1,30 – 184 ng TEQ/kg) und Schweden (bis zu 4,69 ng TEQ/kg) gemessen. In Estland lagen alle gemessene Dioxin-Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze, während anderen Länder wie Finnland, Polen und Österreich ebenfalls vergleichsweise niedrigere Dioxin-Konzentrationen berichten. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Gehalte in Deutschland im Rahmen der aus anderen Ländern berichteten Werte liegen.

Bei der Flugasche wurden in Deutschland gesamt-TEQ-Werte zwischen 2,05 bis 13.643 ng TEQ/kg gemessen. Eine Probe lag über dem Grenzwert von 5 µg/kg, zwei weitere Proben überschritten den Wert von 1 µg/kg. Die meisten höheren Werte in Flugasche aus Deutschland stehen in direktem Zusammenhang mit dem Holzverarbeitenden Gewerbe. Noch höhere Maximalwerte wurden in Finnland gemessen, bis 140.000 ng TEQ/kg (in einer Probe) (Syke, 2025). Dieser Wert überschreitet auch den Grenzwert von 5 µg/kg. In der Studie aus Finnland wird die außergewöhnliche Überschreitung bei dieser Probe mit der Verbrennung von Bauabfällen erklärt (Syke, 2025).

Laut Zennegg (2003) (zitiert in Nussbaumer, 2003) zeigen Rußproben aus Kaminen kleiner Holzfeuerungsanlagen unter 70 kW deutlich, dass die Belastung mit PCDD/F stark vom eingesetzten Brennstoff abhängt. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz und etwa Papier zum Anzünden sind die PCDD/F Konzentrationen relativ gering. Sobald jedoch behandelte Hölzer, Kunststoffe, Alufolie, Karton oder Haushaltsabfälle mitverbrannt werden, steigen die gemessenen Werte stark an. Besonders hohe PCDD/F Konzentrationen traten bei Proben auf, in denen größere Mengen verleimtes oder beschichtetes Holz sowie Abfälle enthalten waren (Zennegg (2003) zitiert in Nussbaumer, 2003).

Auch Länder wie Dänemark und Schweden berichten, im Einklang mit anderen Studien, zum Teil hohe PCDD/F Werte in der Flugasche.

Tabelle 27: Übersicht der gesamt-TEQ Gehalte (Σ PCDD/F & dl-PCB) in ng TEQ/kg (WHO₂₀₀₅) in Grob und Flugascheproben aus Kleinf Feuerungsanlagen in verschiedenen europäischen Ländern.

Land	Anzahl der Proben	Σ PCDD/F & dl-PCB	Anzahl der Proben oberhalb folgender Konzentrationswerte		Quelle
			≥ 5 µg/kg	≥ 1 µg/kg	
Grobasche					
Dänemark	10	1,30 – 184,00 ²	0	0	Frey et al (2023)
Deutschland	20	0,95 – 100,00	0	0	Dieser Studie
Estland	4	< BG	–	–	Konist et al. (2022)
Finnland	2	1,50 – 2,10	0	0	Syke (2025)

Land	Anzahl der Proben	ΣPCDD/F & dl-PCB	Anzahl der Proben oberhalb folgender Konzentrationswerte		Quelle
			≥ 5 µg/kg	≥ 1 µg/kg	
Polen ¹	1	2,00	0	0	Wyrzykowska et al. (2009)
Schweden	3	0,07 – 4,69	0	0	Tysklind et al. (2024)
Schweiz ¹	<i>Dioxin-Konzentrationen in Grobasche nicht analysiert.</i>				
Österreich ¹	6	0,33 – 1,71	0	0	Thanner und Moche (2002)
Österreich ¹	4	0,30 – 33,50 ^{2,3}	0	0	Obernberger, I. (1997)
Flugasche					
Dänemark	10	124,00 – 1.290,00 ²	0	2	Frey et al (2023)
Deutschland	20	2,05 – 13.600,00	1	3	Dieser Studie
Estland	2	194,28 – 843,45	0	0	Konist et al. (2022)
Finnland	32	10,00 – 140.000,00	1	6	Syke (2025)
Polen ¹	<i>Dioxin-Konzentrationen in Flugasche nicht analysiert.</i>				
Schweden	13	0,60 – 2.242,00	0	3	Tysklind et al. (2024)
Schweiz ¹	10	360,00 – 22.000,00 ³	3	8	Zenneg (2003), zitiert in Nussbaumer (2003)
Österreich ¹	4	263,42 – 711,61	0	0	Thanner und Moche (2002)
Österreich ¹	8	2,20 – 353,00 ^{2,3}	0	0	Obernberger (1997)

¹nicht repräsentativ für das ganze Land; ²nur PCDD/F TEQ gemessen; ³nicht angegeben, welche TEF verwendet werden

5.2.2 Mittelgroße Feuerungsanlagen

Tabelle 28 gibt eine Übersicht über die gesamt-TEQ-Werte (ΣPCDD/F & dl-PCB, WHO₂₀₀₅) in Grob- und Flugascheproben aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen, die in verschiedenen europäischen Ländern ermittelt wurden.

Für die Grobasche liegen nur begrenzt Daten vor. In Deutschland wurden keine Proben von Grobaschen aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen untersucht. Die in Dänemark gemessenen Werten bewegen sich im Bereich von 0,76 bis 4,01 ng TEQ/kg, während in Estland teils deutlich höhere Werte zwischen 4,54 bis 126,45 ng TEQ/kg festgestellt wurden. In Finnland wurden zwei Proben analysiert, die beide sehr niedrige Werte aufweisen.

Bei der Flugasche zeigen sich größere Unterschiede zwischen den Ländern. In Deutschland lagen die gemessenen Werte zwischen 1,15 und 5.230 ng TEQ/kg, wobei eine Probe den Grenzwert von 5 µg/kg überschritt und eine weitere über 1 µg/kg lag (siehe Tabelle 15). In den anderen Ländern wurden keine Grenzwertüberschreitungen festgestellt. Dänemark wies Konzentrationen zwischen 2,24 und 437 ng TEQ/kg auf, Finnland zwischen 0 und 220 ng TEQ/kg und Estland zwischen 5,23 und 278 ng TEQ/kg (siehe Tabelle 28 und Tabelle 33).

Es lässt sich feststellen, dass Deutschland bei Flugaschen aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen im Vergleich mit anderen europäischen Ländern die höchsten Konzentrationen aufweist und in einem Fall der Grenzwert von 5 µg/g überschritten ist. Daraus

lässt sich allerdings nicht schließen, dass die Belastung dieser Aschen in Deutschland höher wäre als in den anderen betrachteten Ländern. Der Grund für die in Deutschland vergleichsweise hohen Konzentration in der Flugasche liegt darin, dass für die Erhebung gezielt Anlagen beprobt wurden, bei denen aufgrund der eingesetzten Brennstoffe höhere PCDD/F und dl-PCB Konzentrationswerte in den Flugaschen zu erwarten waren. Alle in Deutschland gefundenen erhöhten Konzentrationswerte (478 bis 5230 ng TEQ/kg) stehen im Zusammenhang mit der Verbrennung von Altholz der Kategorie II. Die Grenzwertüberschreitung mit 5230 ng TEQ/kg betrifft Anlage (P5), in der überwiegend Altholz verbrannt wird (30 % der Kategorie I und 70 % der Kategorie II) (siehe Tabelle 14 und Tabelle 15).

Alle anderen Konzentrationswerte von Flugaschen aus den in Deutschland untersuchten Anlagen in denen Holzhackschnitzel, Holzproduktionsreste, Rinde und Holzstaub oder Getreide verbrannt werden, liegen im Bereich von 1,15 bis 281 ng TEQ/kg und damit in ähnlichen Bereichen wie in den anderen betrachteten Ländern.

Diese Ergebnisse bezüglich der mittelgroßen Feuerungsanlagen weisen darauf hin, dass insbesondere bei der Verbrennung von Altholz in den Flugaschen in einzelnen Fällen Grenzwertüberschreitungen wahrscheinlich sind. Als Ursache kommen Verunreinigungen im Altholz in Frage, obwohl Altholz A II keine halogenorganischen Verbindungen aus einer Beschichtung enthalten sollte. Dennoch kann z. B. PVC häufig als typische Verunreinigung in Altholz A II vorkommen. Es trägt zur Gegenwart von Chlor bei der Verbrennung des Altholzes bei. Dadurch wird die Entstehung von PCDD/F und dl-PCB begünstigt und eine vergleichsweise hohe TEQ-Belastung der Aschen kann resultieren. Es ist daher wichtig, darauf zu achten, dass zur Verbrennung eingesetztes Altholz möglichst frei von Verunreinigungen wie PVC ist, denn dann würden die TEQ-Werte vermutlich niedriger liegen. Es wäre daher sinnvoll, wenn Betreiber und Behörden, bei Anlagen die Althölzer verbrennen, sowohl die Belastung der Flugaschen kontrollieren als auch die Reinheit (im Sinne von Verunreinigungen z. B. mit PVC) der Brennstoffe besser überwachen würden.

Tabelle 28: Übersicht der gesamt-TEQ (Σ PCDD/F & dl-PCB) in ng TEQ/kg (WHO₂₀₀₅) in Ascheproben aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen in verschiedenen europäischen Ländern.

Land	Anzahl der Proben	Σ PCDD/F & dl-PCB	Anzahl der Proben oberhalb folgender Konzentrationswerte		Quelle
			$\geq 5 \mu\text{g/kg}$	$\geq 1 \mu\text{g/kg}$	
Grobasche					
Dänemark	20	0,76 – 4,01 ¹	0	0	Frey et al. (2023)
Deutschland	<i>Grobasche nicht analysiert.</i>				
Estland	9	4,54 – 126,45	0	0	Ummik et al. (2024)
Finnland	2	0,00	–	–	Syke (2025)
Flugasche					
Dänemark	20	2,24 – 437,00 ¹	0	0	Frey et al (2023)
Deutschland	10	1,15 – 5.230,00	1	2	diese Studie

Land	Anzahl der Proben	ΣPCDD/F & dl-PCB	Anzahl der Proben oberhalb folgender Konzentrationswerte		Quelle
			≥ 5 µg/kg	≥ 1 µg/kg	
Estland	12	5,23 – 278,89	0	0	Ummik et al. (2024)
Finnland	4	0,00 – 220,00	0	0	Syke (2025)

¹nur PCDD/F TEQ gemessen

5.3 Vergleich mit Grenzwerten

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieses Vorhabens gemessenen Summenkonzentrationen von PCDD/F und dl-PCB mit dem Grenzwert von 5 µg/kg (5.000 ng/kg) verglichen.

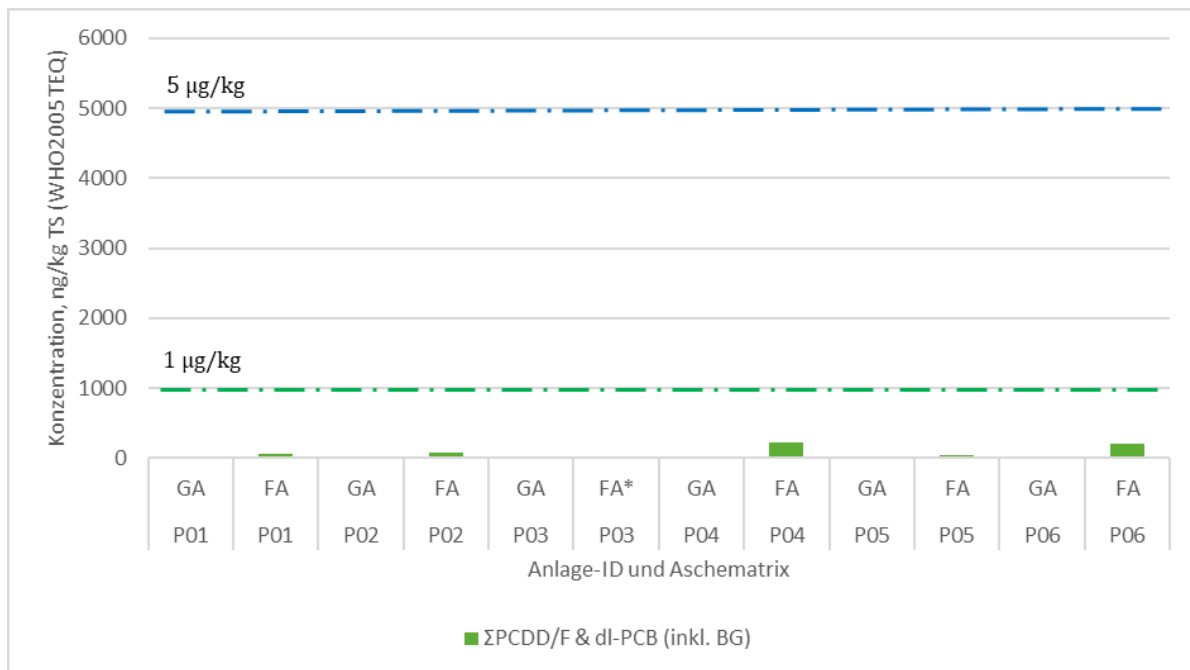
5.3.1 Kleinf Feuerungsanlagen

5.3.1.1 Einzelraumfeuerungsanlagen

Abbildung 20 zeigt die gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) von Grob- und Flugaschen aus Einzelraumfeuerungsanlagen im Vergleich mit dem Grenzwert von 5 µg/kg und einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg.

Alle gemessenen gesamt-TEQ-Werte liegen deutlich unter dem Grenzwert von 5 µg/kg. Der höchste gemessene gesamt-TEQ-Wert (PCDD/F & dl-PCB) beträgt 217 ng/kg TS und erreicht nur etwa 4 % des Grenzwertes. Besonders die Grobasche zeigt niedrige Konzentrationen. In der Flugasche sind die Werte höher, bleiben aber ebenfalls weit unter dem Grenzwert und auch unter dem hypothetischen Wert von 1 µg/kg.

Abbildung 20: Gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) im Vergleich mit dem Grenzwert (5 µg/kg).



GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P03 nicht analysiert.

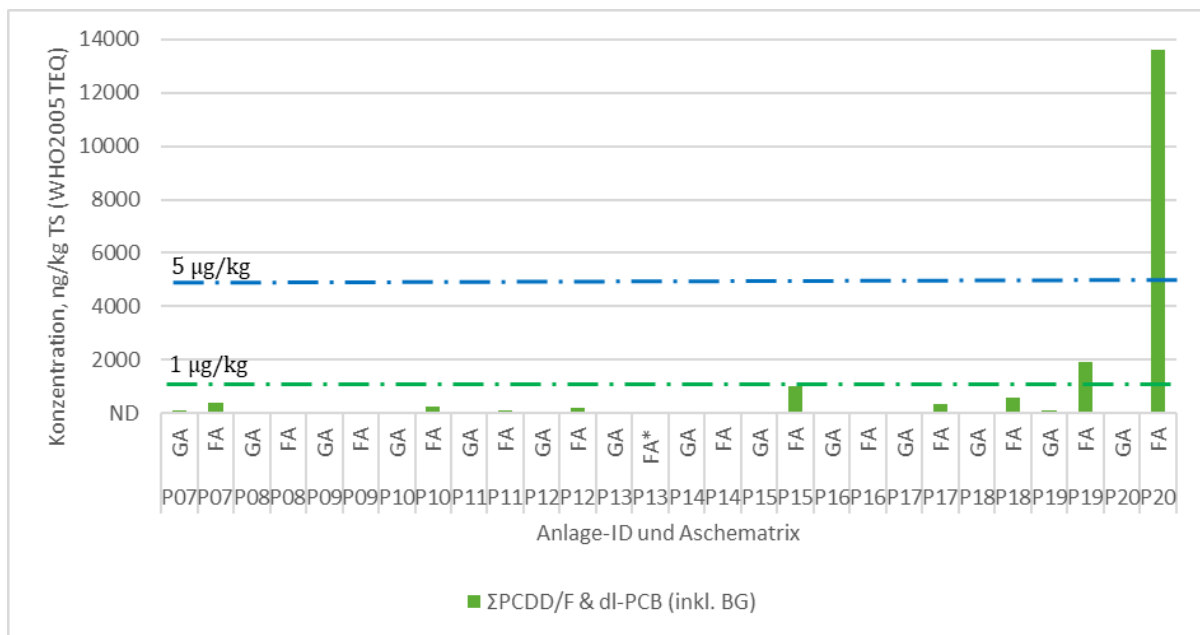
Quelle: Eigene Darstellung

5.3.1.2 Festbrennstoffkessel

Abbildung 21 zeigt die gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) von Grob- und Flugaschen aus Festbrennstoffkesseln im Vergleich mit dem Grenzwert von 5 µg/kg und einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg.

In den Proben aus Festbrennstoffkesseln liegt ein gesamt-TEQ-Wert (Flugasche aus der Anlage P20) mit 13.600 ng/kg TS über dem Grenzwert von 5 µg/kg. Zwei weitere gesamt-TEQ-Werte (Flugasche aus der Anlagen P19 mit 1.910 ng/kg TS und Flugasche aus der Anlage P15 mit 1.010 ng/kg TS) überschreiten einen Wert von 1 µg/kg, bleiben aber deutlich unter dem Grenzwert. Auch alle übrigen Ascheproben liegen deutlich darunter.

Abbildung 21: Gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) von Festbrennstoffkesseln im Vergleich mit dem Grenzwert (5 µg/kg)



GA – Grobasche, FA – Flugasche. *FA aus Anlage P13 nicht analysiert.

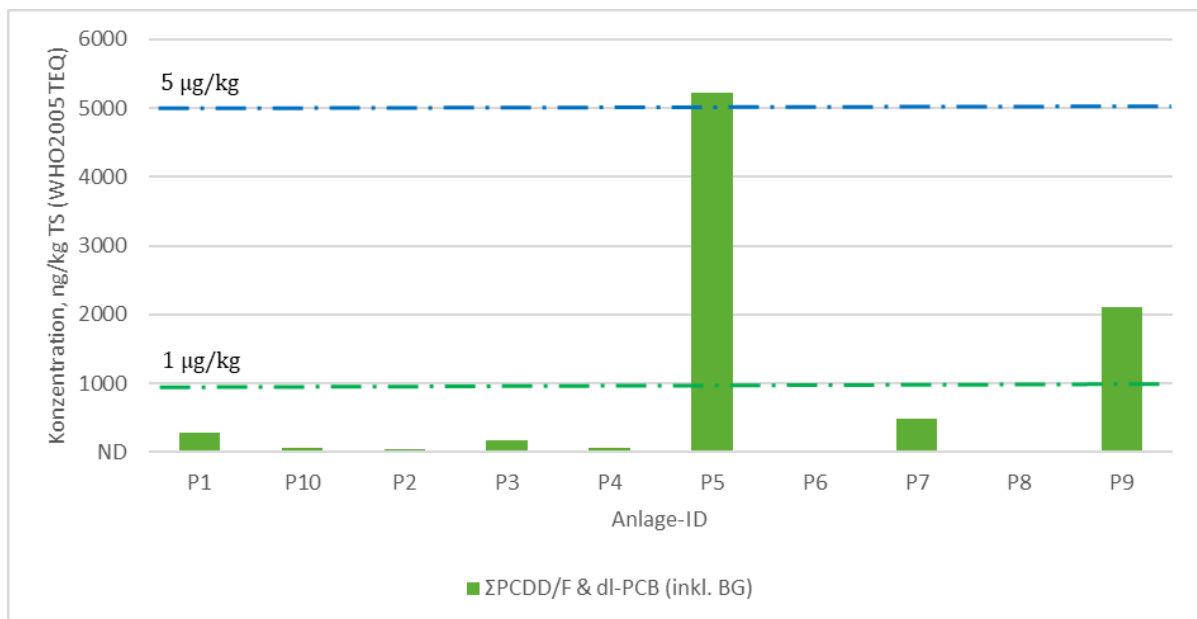
Quelle: Eigene Darstellung

5.3.2 Mittelgroße Feuerungsanlagen

Abbildung 22 zeigt die gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) von Flugaschen aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen im Vergleich mit dem Grenzwert von 5 µg/kg und einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg.

Ein Wert liegt über dem Grenzwert von 5 µg/kg und ein Wert überschreitet 1 µg/kg, bleibt aber deutlich unter dem Grenzwert. Beide Werte stehen im Zusammenhang mit der Verbrennung von Altholz der Kategorie II. Die restlichen Proben liegen deutlich unter 1 µg/kg.

Abbildung 22: Gesamt-TEQ-Werte (PCDD/F & dl-PCB) von mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen im Vergleich zum Grenzwert (5 µg/kg).



Quelle: Eigene Darstellung

5.4 Auswirkungen des geänderten Grenzwertes für PCDD/PCDF

Die EU POP-Verordnung regelt in Artikel 7 die Bewirtschaftung von Abfällen, die POP enthalten. Abfälle, die die in Anhang IV aufgeführten POP oberhalb festgelegter Grenzwerte enthalten, werden nach Art. 7 (2) so beseitigt oder verwertet, „[...] dass die darin enthaltenen POP zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden, damit die verbleibenden Abfälle und Freisetzungen nicht die Eigenschaften von POP aufweisen“.

Die Grenzwerte des Anhangs IV werden regelmäßig überprüft und an den technischen Fortschritt angepasst. Im Rahmen dieser Überprüfung haben das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union am 23.11.2022 die Verordnung (EU) 2022/2400 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 2019/1021 über POPs erlassen.

Um die aggregierte Wirkung aller dl-PCB zu berücksichtigen, wurden die dioxinähnlichen Verbindungen in den bestehenden Gruppeneintrag für PCDD/F in den Anhängen IV und V der Verordnung (EU) 2019/1021 aufgenommen. Als dl-PCB werden Stoffe einer Untergruppe von 12 PCB-Kongeneren bezeichnet, die toxikologische Eigenschaften haben, die denen von PCDD/PCDF sehr ähnlich sind.

Mit der Änderung wird somit für die PCDD/F und die dl-PCB ein gemeinsamer Schwellenwert festgelegt, ab dem Abfälle nach Artikel 7 der EU POP-VO zu bewirtschaften und der POP-Gehalt zu zerstören ist. Der neue Anhang IV Grenzwert, oder „untere“ POP-Grenzwert liegt daher bei 5 µg/kg (als Summenkonzentration für PCDD/F und dl-PCB in µg/kg TEQ (WHO₂₀₀₅) statt vorher bei 15 µg/kg (als Summenkonzentration für PCDD/F in µg/kg TEQ (WHO₂₀₀₅)).

Im Verordnungstext heißt es „Die Kommission überprüft diesen Konzentrationsgrenzwert und legt erforderlichenfalls spätestens bis zum 30. Dezember 2027 einen Gesetzgebungsvorschlag vor, um diesen Grenzwert abzusenken, sofern eine solche Absenkung unter Berücksichtigung des wissenschaftlichen und technischen Fortschritts machbar ist.“

Vor diesem Hintergrund folgt hier eine Diskussion zu den Auswirkungen des geänderten Grenzwertes und ob gegebenenfalls eine weitere Absenkung machbar sein könnte.

Diskussion

Aufgrund der recherchierten Daten und den in den beprobten Anlagen gemessenen PCDD/F und dl-PCB Gehalten lässt sich das Ausmaß der Belastung in Aschen aus kleinen und mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen in Deutschland einschätzen. Auf dieser Grundlage kann diskutiert werden, ob die Absenkung des Grenzwertes sinnvoll ist.

Die Diskussion erfolgt unter Berücksichtigung der Methode zur Ableitung von Grenzwerten nach Artikel 7(4)a der EU POP-Verordnung. Um die Bandbreite möglicher Grenzwerte einzuschränken, werden vier untere (die die Grenzwertfestsetzung nach unten begrenzen) sowie zwei obere (die die Grenzwertfestsetzung nach oben begrenzen) Begrenzungskriterien für die Grenzwertableitung herangezogen (weitere Details, siehe Potrykus et al., 2015):

Untere Begrenzungskriterien:

- a) Analyseverfahren: Grenzwerte sollen analytisch kontrollierbar sein, d.h. sie sollen oberhalb der Bestimmungsgrenze von wirtschaftlich verfügbaren Analysemethoden liegen
- b) Hintergrundkontamination: Grenzwerte sollen oberhalb von bestehenden Hintergrundkontaminationen in der Umwelt liegen, um auszuschließen, dass ausgehobener Boden mit einer üblichen Hintergrundbelastung unter das POP-Abfallregime fällt
- c) Beseitigungs- und Verwertungskapazitäten: Grenzwerte sollen so liegen, dass für die erforderliche Verwertung und Beseitigung benötigte Entsorgungswege und -kapazitäten realistisch verfügbar sind
- d) Wirtschaftliche Auswirkungen: Grenzwerte sollen so liegen, dass erforderliche zusätzliche Entsorgungskosten wirtschaftlich vertretbar sind

Obere Begrenzungskriterien:

- e) Grenzwerte: Grenzwerte sollen nicht im Widerspruch zu bestehenden Grenzwerten stehen
- f) Mögliche Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen: Grenzwerte sollen so liegen, dass mögliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit vermieden werden

Zu a), Analyseverfahren:

Unter Berücksichtigung der Bestimmungsgrenze des Labors, in dem die Analysen durchgeführt wurden (siehe Tabelle 9), zeigt sich, dass die Bestimmungsgrenzen im unteren Nanogrammbereich liegen: Für PCDD/F-Kongenere liegen die Bestimmungsgrenzen zwischen 0,18 ng/kg TS (z. B. 2,3,7,8-TetraCDD) und 2,20 ng/kg TS (z. B. OctaCDD und OctaCDF). Für die dl-PCB-Kongenere liegen die Bestimmungsgrenzen zwischen 0,78 ng/kg TS (z. B. PCB 81) und 28,00 ng/kg TS (z. B. PCB 118). Für die summierte toxische Bewertung nach WHO₂₀₀₅ TEQ betragen die Bestimmungsgrenzen: 1,01 ng TEQ/kg TS (PCDD/F), 0,13 ng TEQ/kg TS (dl-PCB) und 1,15 ng TEQ/kg TS (PCDD/F & dl-PCB).

Diese Werte liegen weit unter dem Grenzwert von 5 µg/kg TS sowie auch unter einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg TS.

Die typischen Kosten für eine solche Analyse liegen bei etwa 500 € (einschließlich Analyse von PCDD/F und dl-PCB in einer Ascheprobe). Diese Kosten können als wirtschaftlich vertretbar angesehen werden.

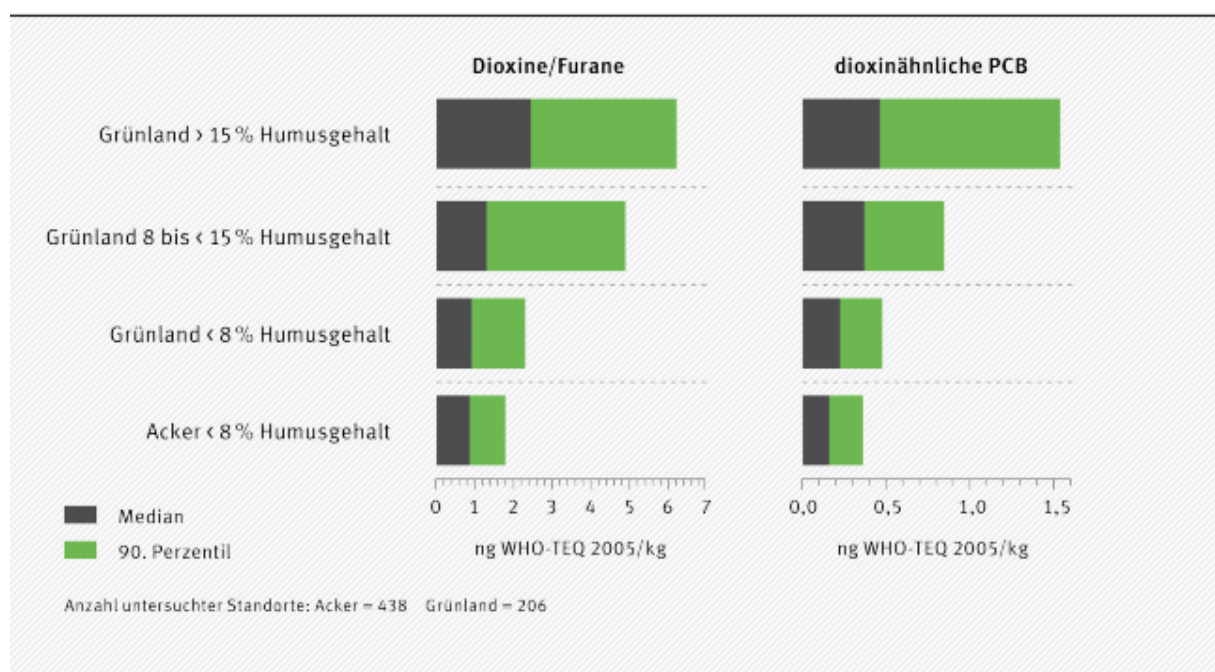
Es lässt sich schließen, dass geeignete Analysemethoden wirtschaftlich verfügbar sind.

Zu b), Hintergrundkontamination:

Über 90 % der in die Umwelt gelangten PCDD/F und dl-PCB finden sich in Böden und Sedimenten wieder (Behnke et al. 2018).

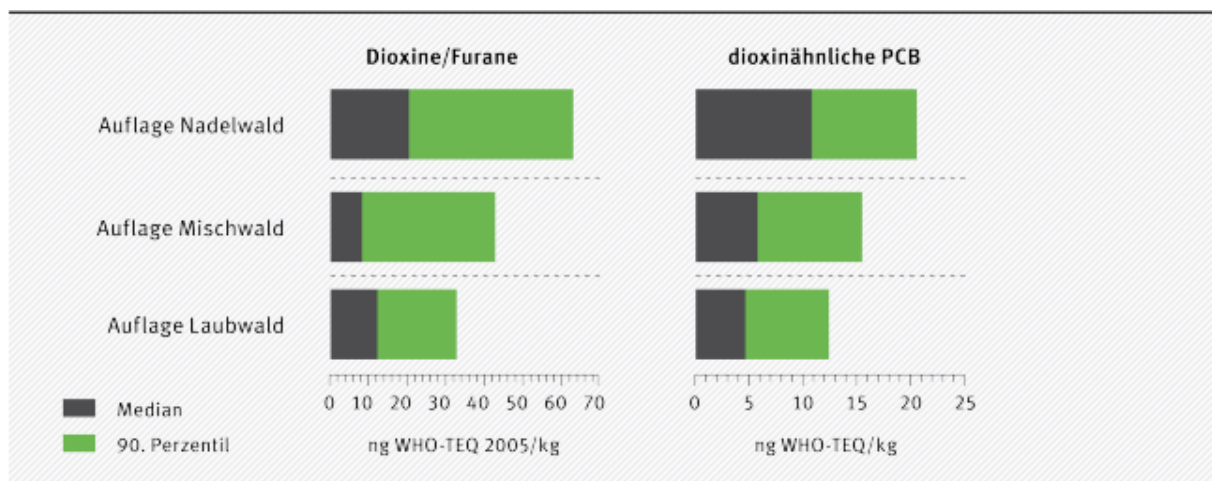
Behnke et al. fassen die Medianwerte und das obere Niveau der bundesweiten Hintergrundbelastung (90. Perzentil) von PCDD/F und dl-PCB in den Oberböden landwirtschaftlichen genutzter Böden zusammen (siehe Abbildung 23). Die Ergebnisse in der Abbildung zeigen, dass in Acker- und Grünlandböden mit weniger als 8 % Humus etwa 2 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg von PCDD/F gefunden wurden. Mit steigendem Humusgehalt, besonders in Grünland, nehmen die PCDD/F Werte zu und erreichen in humusreichen Böden bis zu ~6 ng WHO₂₀₀₅ TEQ /kg. Auch bei den dl-PCB wurden in humusarmen Ackerböden Werte von etwa 0,4 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg gemessen. In humusreichen Grünlandböden können die Werte auf bis zu ~1,5 ng WHO₂₀₀₅ TEQ /kg ansteigen (Behnke et al., 2018).

Abbildung 23: Typische Gehalte von Dioxinen und Furanen sowie die dl-PCB in landwirtschaftlich genutzten Böden.



Quelle: Behnke et al. (2018)

Abbildung 24: Typische Gehalte von PCDD/F sowie die dl-PCB in der Auflage von Waldböden.



Quelle: Behnke et al. (2018)

Behnke et al. berichten auch die typischen Werte von PCDD/F und dl-PCB in nicht-landwirtschaftlichen Böden (siehe Abbildung 24). Die Ergebnisse in der Abbildung zeigen, dass Waldböden deutlich höhere PCDD/F und dl-PCB Werte aufweisen als landwirtschaftlich genutzte Böden (Behnke et al., 2018). Für PCDD/F liegen die Medianwerte zwischen ~10 und ~20 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg und das 90. Perzentil liegt zwischen ~33 und ~65 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg. Auch die Werte für dl-PCB in Waldböden liegen höher als in landwirtschaftlich genutzten Böden. Die Medianwerte liegen zwischen ~5 und ~12 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg, das 90. Perzentil liegt zwischen ~13 und ~22 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg (Behnke et al., 2018).

Sowohl der Grenzwert von 5 µg/kg (5.000 ng/kg) als auch ein hypothetischer Grenzwert von 1 µg/kg (1.000 ng/kg) liegen deutlich über der relevanten Hintergrundbelastung in der Umwelt in Deutschland. Bodenaushub mit üblicher Hintergrundbelastung wäre in beiden Fällen (Grenzwert bei 5 bzw. 1 µg/kg) nicht vom POP-Abfallregime betroffen.

Zu c) Beseitigungs- und Verwertungskapazitäten:

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der untersuchten Ascheproben, die im Rahmen dieser Studie untersucht wurden, überschreiten nur wenige einzelne Proben einen gesamt-TEQ (PCDD/F & dl-PCB) der über dem Grenzwert von 5 µg/kg oder einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg liegt.

In Einzelraumfeuerungsanlagen (siehe Kapitel 5.3.1.1) liegen alle gemessenen gesamt-TEQ-Werte deutlich unter beiden Werten. Der höchste gemessene gesamt-TEQ-Wert (PCDD/F & dl-PCB) beträgt 217 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg TS, findet sich in der Flugasche und erreicht nur etwa 4 % des Grenzwertes. Besonders in der Grobasche finden sich niedrige Konzentrationen.

In den Proben aus Festbrennstoffkesseln (siehe Kapitel 0) liegt nur ein gesamt-TEQ-Wert (Flugasche aus der Anlage P20) mit 13.600 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg TS über dem Grenzwert von 5 µg/kg. Ein weiterer gesamt-TEQ-Wert (Flugasche aus der Anlage P19 mit 1.910 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg TS) überschreitet einen Wert von 1 µg/kg deutlich. Diese erhöhten Werte treten im Zusammenhang mit der Verbrennung von Holz aus dem Holzverarbeitenden Gewerbe auf. Ein Wert (Flugasche aus der Anlage P15 mit 1.010 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg TS) überschreitet den Wert von 1 µg/kg minimal. Alle anderen gesamt-TEQ-Werte liegen deutlich unter 1 µg/kg.

Die einzige Grenzwertüberschreitung tritt in der Flugasche bei einem Festbrennstoffkessel auf, in dem Holz aus dem Holzverarbeitenden Gewerbe verbrannt wird. Die Nennleistung beträgt 100 kW. Diese Konstellation tritt vergleichsweise selten auf und könnte mit der Verbrennung von außergewöhnlichen Brennstoffen oder mit ungewöhnlichen Verbrennungsbedingungen zusammenhängen. In der Praxis müsste geprüft werden, ob die Grenzwertüberschreitung bei ähnlichen Konstellationen häufiger auftritt oder ein Einzelfall ist. Andernfalls müssten die Aschen als gefährlicher POP-Abfall behandelt werden. Die anfallenden Flugaschemengen und Volumina sind überschaubar. Pro Tonne Brennstoff fällt ca. ½ kg Flugasche an. Bei einer entsprechenden Anlage (Festbrennstoffkessel, 100 kW) fällt eine Flugaschemenge von ca. 12 kg pro 1000 Betriebsstunden an.¹⁵

In den Proben aus mittelgroßen Biomassefeuerungsanlagen (siehe Kapitel 5.3.2) liegt auch nur ein Wert über dem Grenzwert von 5 µg/kg (Flugasche aus der Anlage P5 mit 5.230 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg TS) und ein Wert überschreitet 1 µg/kg (Flugasche aus der Anlage P9 mit 2.100 ng WHO₂₀₀₅ TEQ/kg TS), bleibt aber deutlich unter dem Grenzwert von 5 µg/kg. In beiden Anlagen wird Altholz der Kategorien I und II verbrannt.

Die einzige Grenzwertüberschreitung tritt in der Flugasche bei einer mittelgroßen Biomassefeuerungsanlage auf, in der 30 % Altholz der Kategorie I, 70 % Altholz der Kategorie II sowie naturbelassenes Holz verbrannt wird. Die Nennleistung beträgt 2,5 MW. Auch der zweite vergleichsweise hohe Wert (mit 2.100 ng/kg TEQ) steht in Bezug zur Verbrennung von Altholz. In der Praxis müsste geprüft werden, ob die Grenzwertüberschreitung in den Flugaschen bei ähnlichen Konstellationen (Verbrennung von Altholz in mittelgroßen Biomasseverbrennungsanlagen) häufiger auftritt. Gegebenenfalls müssten Flugaschen aus solchen Anlagen, bei Grenzwertüberschreitung, als POP-Abfall behandelt werden. Die anfallenden Flugaschemengen und Volumina sind überschaubar. Pro Tonne Brennstoff fällt ca. 1 kg Flugasche an.¹⁶

Von allen Proben überschreiten nur zwei Flugaschen den Grenzwert von 5 µg/kg. Generell ist zu bedenken, dass Flugaschen nur einen Anteil von 5 bis 15 % der insgesamt anfallenden Aschen aus der Verbrennung ausmachen (siehe Kapitel 2.3) und damit die Menge der möglicherweise als POP-Abfall zu entsorgenden Aschen begrenzt ist. Der Betreiber hat bei geringfügigen Überschreitungen des Grenzwerts auch die Möglichkeit, durch eine verbesserte Brennstoffkontrolle Überschreitungen des Grenzwertes zu vermeiden.

Das Projektteam schließt vor diesem Hintergrund, dass als POP-Abfall zu entsorgende Aschemengen begrenzt sind und erforderliche Beseitigungs- und Verwertungskapazitäten (z. B. Untertagedeponie) realistisch verfügbar sind.

Zu d) Wirtschaftliche Auswirkungen:

Laut Bachmaier et al. (2019) variieren die reinen Entsorgungskosten für Asche je nach gewählter Behandlungsmethode zwischen 20 und 200 €/t. Werden zusätzlich Transport, Analysen sowie die Miete von Aschecontainern berücksichtigt, liegen die gesamten Behandlungskosten zwischen rund 100 und 300 €/t (Bachmaier et al., 2019).

Für POP-haltige Aschen liegen die reinen Entsorgungskosten bei rund 260 €/t (Link, 2014; Röhrlich, 2010).

¹⁵ Eigene Berechnung auf Grundlage der im Bericht dargestellten Daten und der Annahme, dass in der Anlage 25 kg Holz je Betriebsstunde verbrannt werden. Flugasche hat eine Schüttdichte von ca. 1 kg/dm³. 12 kg entsprechen einem Volumen von ca. 12 Litern.

¹⁶ Unter der Annahme eines durchschnittlichen Gesamtaschenanfalls von 2 % und einem Flugascheanteil von 5 % an der Gesamtasche

Je nach spezifischen Rahmenbedingungen können Mehrkosten für die reine Entsorgung in einer Größenordnung von ca. 60 bis 240 €/t anfallen. Das Projektteam geht vor diesem Hintergrund davon aus, dass als POP-Abfall zu entsorgende Aschemengen sehr begrenzt sind (siehe Diskussion unter Punkt c) und gegebenenfalls erforderliche notwendige Entsorgungskosten (z. B. Untertagedeponie) wirtschaftlich vertretbar sind.

Zu e) Grenzwerte:

Es gibt bereits einige Konzentrationsgrenzwerte für den Gehalt an PCDD/F und dl-PCB. Diese sind in der Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Aktuelle anwendbare Grenzwerte für PCDD/F und dl-PCB in Deutschland.

Substanz	Gesetz	Regelungsobjekt	Grenzwert
PCDD/F	EU-Verordnung (EU) Nr. 2019/1009 ¹⁷	Düngeprodukten	20 ng WHO TEQ/kg TS (0,02 µg WHO TEQ/kg TS)
PCDD/F & dl-PCB	Düngemittelverordnung (DüMV) ¹⁸	Düngeprodukten	30 ng WHO TEQ/kg TS (0,03 µg WHO TEQ/kg TS)
PCDD/F & dl-PCB	Richtlinie 2008/105/EC ¹⁹	Wasser	6,5 ng WHO TEQ/kg TS ^a 0,0065 µg WHO TEQ/kg ^a

^a Für Biota.

Sofern Aschen für die Herstellung von Düngemitteln verwendet werden, so müssen unter anderem (z. B. neben Grenzwerten für Schwermetalle) die entsprechenden in Tabelle 29 gezeigten Grenzwerte für PCDD/F und PCDD/F & dl-PCB eingehalten werden. Der Grenzwert von 5 µg/kg TEQ in der EU POP-Verordnung stellt hierzu keinen Widerspruch dar.

Unter diesen Voraussetzungen stehen die bestehenden Grenzwerte in keinem Konflikt zu dem bestehenden Grenzwert von 5 µg/kg TEQ aus der EU-POP-Verordnung oder zu einem hypothetischen Grenzwert von 1 µg/kg TEQ.

Zu f) Mögliche Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen:

Zur Risikoabwehr sollen Grenzwerte so liegen, dass mögliche Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit vermieden werden und Mensch und Umwelt möglichst weitgehend vor persistenten organischen Schadstoffen geschützt werden.

Zur Beurteilung wurden PNEC-Werte aus der Literatur recherchiert. Die Werte sind in Tabelle 30 dargestellt.

¹⁷ Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/eng>

¹⁸ Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV). https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/BjNR248200012.html

¹⁹ Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on environmental quality standards in the field of water policy. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj/eng>

Tabelle 30: In der Literatur gefundene PNEC-Werte.

Substanz	Boden (ng TEQ ₂₀₀₅ /kg)	Süßwasser (ng TEQ ₂₀₀₅ /L)
PCDD/F	Nicht identifiziert	Nicht identifiziert
dl-PCB	0.39 ^a (Verbruggen und Brand, 2014) 3.9 ^b (Verbruggen und Brand, 2014)	0,385 ^c (Wang et al. 2023)

^a Frischgewicht von terrestrischen Vertebraten; ^b Lipidgewicht von terrestrischen Vertebraten; ^c berechnet auf Basis der bereitgestellten PNEC-Werte

Wie in der Tabelle dargestellt, gibt es nur wenige Informationen zu den PNEC-Werten für PCDD/F und dl-PCB in verschiedenen Umweltbereichen. Insgesamt konnten nur zwei Studien identifiziert werden, die Angaben zu den PNEC-Werten für dl-PCB liefern. Für PCDD/F konnten keine Studien mit entsprechenden Werten gefunden werden.

Für die durchgeführte Folgenabschätzung bezüglich PCDD/F-haltigen Abfällen diskutiert die Europäische Kommission die gesundheitsbezogenen Risiken. Als Schlussfolgerung verwendete die Kommission als allgemeinen gesundheitsbezogenen Referenzwert für Abfälle einen Wert von 0,015 mg/kg²⁰ TEQ (Europäische Kommission, 2021).

Sowohl der bestehende Grenzwert von 5 µg/kg TEQ in Anhang IV der EU-POP-Verordnung als auch ein möglicher niedrigerer Grenzwert von 1 µg/kg TEQ liegen niedriger als der gesundheitsbezogene Referenzwert für Abfälle von 15 µg/kg TEQ. Daraus lässt sich schließen, dass bei diesen Grenzwerten keine relevanten Umwelt- oder Gesundheitsauswirkungen zu erwarten sind.

Fazit

Abschließend lässt sich feststellen, dass bezüglich der Aschen aus Kleinf Feuerungsanlagen und mittelgroßen Feuerungsanlagen eine weitere Absenkung des Grenzwertes (z. B. auf 1 µg/kg TEQ) möglich wäre, sofern in den betreffenden Anlagen ausschließlich unbehandeltes oder nur mechanisch behandeltes Holz verbrannt wird.

Bei Anlagen, in denen Altholz der Kategorie A II oder andere, nicht nur mechanisch be- oder verarbeitete Hölzer verbrannt werden (wie Spanplatten, beschichtete, lackierte oder verleimte Hölzer, die z. B. aus Produktionsrückständen aus der Holzbe- und -verarbeitung stammen können), können erhöhte PCDD/F und dl-PCB-Gehalte auftreten und z. B. über 1µg/kg TEQ liegen.

Möglicherweise können erhöhte Werte in solchen Fällen durch eine verbesserte Brennstoffkontrolle vermieden werden. Es wäre daher zu prüfen, ob ein weiter gesenkter Grenzwert durch eine bessere Kontrolle des Brennstoffes einzuhalten ist.

Eine Absenkung des Grenzwertes müsste dann einhergehen mit Aufklärungsmaßnahmen sowie einer besseren Kontrolle möglicher Brennstoffverunreinigung, um Grenzwertüberschreitungen bei der Verbrennung von Altholz sowie nicht nur mechanisch be- oder verarbeiteten Hölzern zu vermeiden.

Zusätzlich müssten in die Prüfung, ob eine weitere Absenkung vertretbar wäre, dann auch weitere PCDD/F und dl-PCB-Quellen mit einbezogen werden.

²⁰ 0,015 mg/kg = 15 µg/kg

6 Quellenverzeichnis

Barbarits, M., Baumgarten, M., Egger, S., Ehrlinger, D., Färber, B., Greisberger, M., Grossman, E., Holzmann, G., Lehner, L., Neumayr, M., Pezzutto, S., Sitter, M., Schweiger, F., Zessner-Spitzenberg, B. (2008). Holzasche aus Biomassefeuerungen. Entsorgungs- und Verwertungsmaßnahmen – Beurteilung des Risikos hinsichtlich radioaktivem Cäsium und Schwermetallen. Universität für Bodenkultur.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009). Verwertung und Beseitigung von Holzaschen.
https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/merkblatt_aschen.pdf

Behnke, A., Böhnhardt, A., Bussian, B. M., Blondzik, K., Dauert, U., Fettig, I.; Gärtner, P., Giese, E., Juhrich, K., Konietzka, R., Knetsch, G., Koschorrek, J., Markard, C., Minkos, A., Moriske, H. J., Plickert, S., Pirntke, U., Rappolder, M., Schmidt, S., Schröter-Kermani, C., Utermann, J. (2018). Dioxine und dioxinähnliche PCB in Umwelt und Nahrungsketten. Umweltbundesamt.

Nussbaumer, T. (2003). Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung (Umwelt-Materialien Nr. 172 Luft). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

DeVito, M., Bokkers, B., van Duursen, M. B. M., van Ede, K., Feeley, M., Gáspár, E. A. F., Haws, L., Kennedy, S., Peterson, R. E., Hoogenboom, R., Nohara, K., Petersen, K., Rider, C., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Wheeler, M. W., Wikoff, D. S., Zhao, B., van den Berg, M. (2024). The 2022 world health organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for polychlorinated dioxins, dibenzofurans and biphenyls. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 146, 105525. doi:10.1016/j.yrtph.2023.105525.

Dumler-Gradi, R., Thoma, H., & Vierle, O. (1995). Bayernweites Untersuchungsprogramm über die Dioxin/Furan-Gehalte in Ruß von Hausbrandfeuerungen.

Gras, B., Carstensen, H. W. & Cornelissen, J. (2009). Brennstoffmissbrauch in Holzfeuerungsanlagen erkennen - Ein Erfahrungsbericht. Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein – LLUR.
<https://www.hamburg.de/resource/blob/182014/90965f8bbc12dc36afa17209cf69ecfc/brennstoffmissbrauch-2010-pdf-data.pdf>

Europäische Kommission. (2021). Impact Assessment report Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council amending Annexes IV and V to Regulation (EU) 2019/1021 of the European Parliament and of the Council on persistent organic pollutants. Commission staff working document.

Frey, A. M., Strauss, H., Jensen, T. N., Pødenphant, A. (2023). Analyse af dioxin og furan i aske og sod fra private brændeovne og i flyveaske og bundaske fra biomasseanlæg (in English: Analysis of dioxin and furan in ash and soot from private wood-burning stoves and in fly ash and bottom ash from biomass plants). Miljøprojekt. Nr. 2227. ISBN: 978-87-7038-479-7

Huygens, D., Saveyn, H. G. M., Tonini, D., Eder, P., Delgado Sancho, L. (2019). Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009). Process and quality criteria, and assessment of environmental and market impacts for precipitated phosphate salts & derivatives, thermal oxidation materials & derivatives and pyrolysis & gasification materials. EUR 29841 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-09888-1, doi:10.2760/186684, JRC117856.

Jochem, D., Morland, C., Glasenapp, S., Weimar, H. (2023). Energetischer Holzverbrauch der privaten Haushalte. Umweltbundesamt (Texte 15/2023).
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_15-2023_energetischer_holzverbrauch_der_privaten_haushalte.pdf

- Konist, A., Järvik, O., Ummik, M. (2022). BIOMASSI TUHKADES SISALDUVATE DIOKSIINIDE JA FURAANIDE UURING (in English: Study of dioxins and furans contained in biomass ashes). Commissioned by the Ministry of Environment in Estland.
- Kutz, F. W., Barnes, D. G., Bottimore, D. P., Greim, H., Bretthauer, E. W. (1990). The international toxicity equivalency factor (I-TEF) method of risk assessment for complex mixtures of dioxins and related compounds. *Chemosphere*, 20(7-9), 751-757.
- Launhardt, T., Hartmann, H., Link, H., Schmid, V. (2000). Verbrennungsversuche mit naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen in einer Kleinfeuerungsanlage: Emissionen und Aschequalität. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (BayLfU) und Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BayStMLU)
https://www.lfu.bayern.de/energie/biogene_festbrennstoffe/doc/festbrennstoffe_verbrennungsversuche.pdf
- Launhardt, T.; Hurm, R.; Schmid, V.; Link, H. (1998). Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerung. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU).
- Lavric, E. D., Konnov, A. A. & De Ruyck, J. (2004). Dioxin levels in wood combustion—a review. *Biomass and Bioenergy*, 26, 115-145. 10.1016/S0961-9534(03)00104-1.
- Lemieux, P. M., Lee, C. W., Ryan, J. V., Lutes, C. C. (2001). Bench-scale studies on the simultaneous formation of PCBs and PCDD/Fs from combustion systems. *Waste Management* Vol. 21, Issue 5, Seiten 419 – 425.
[https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00133-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00133-1)
- Lenz, V. & Ulbricht, T. (2015). Staubabscheider in häuslichen Feuerungen. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.
https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Broschueren/Broschuere_Abscheider.pdf
- Link, C. (2014). Einige Vorteile gegenüber dem Atomlager Asse. *Stuttgarter Zeitung*. <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.endlager-in-heringen-das-giftgrab-als-kleinod-page2.55fb8ee6-abd1-467e-bf8a-b4c207e57d7f.html>
- Mantau, U. (2023). Holzrohstoffbilanzierung, Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung – 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz, Gülzow, FNR, FKZ: 22015918. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/FNR_Brosch_Rohstoffmonitoring_Holz_2024.pdf
- Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003). Schadstoffströme bei der Entsorgung von Holzasche – Schadstoffströme bei der Verbrennung naturbelassener Hölzer und holzartiger Biomassen im Hinblick auf die Ascheentsorgung. In: Reihe Abfall, Heft 76, Baden-Württemberg
- MolView (2025). Bring organic chemistry to life. <https://molview.com/> (20.2.2026)
- Obernberger, I. (1997). Aschen aus Biomassefeuerungen – Zusammensetzung und Verwertung. VDI Bericht 1319, pp. 199-222, 1997, „Thermische Biomassennutzung – Technik und Realisierung“, ISBN 3-18-0913 19-3, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, Deutschland.
- Pieper, A. (2001). Untersuchungen zur Schadstoffbildung und Emissionsminderung der energetischen Verwertung von Resthölzern in Kleinfeuerungsanlagen (Doctoral dissertation, Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2001).
- Pohlandt, K., & Marutzky, R. (1994). Concentration and distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and polychlorinated dibenzofurans (PCDF) in wood ash. *Chemosphere*, 28(7), 1311-1314.
- Potrykus, A., Milunov, M., & Weißenbacher. (2015). Ermittlung von potentiell POP-haltigen Abfällen und Recyclingstoffen - Ableitung von Grenzwerten. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-von-potentiell-pop-haltigen-abfaellen>

Röhrlich, D. (2010). Im Fegefeuer der Konsumgesellschaft. Deutschlandfunk.

<https://www.deutschlandfunk.de/im-fegefeuer-der-konsumgesellschaft-100.html> (10.11.2025)

Syke (2025). POPs in household fireplaces. Finnish Environment Institute. <https://www.ymparisto.fi/fi/pop-yhdisteet-kotitalouksien-tulisijoissa> (20.2.2026)

Thanner, G., & Moche, W. (2002). Emission von Dioxinen, PCBs und PAHs aus Kleinf Feuerungen.

Umweltbundesamt GmbH (Federal Environment Agency Austria).

Thoma, H. (1988). PCDD/F-concentrations in chimney soot from house heating systems. *Chemosphere*, 17(7), 1369-1379.

Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR) (2020). Biomasse-Asche-Monitoring (BAM) – Teilvorhaben 1: Koordination und Monitoring.

<https://www.fnr.de/projektfoerderung/projekt Datenbank-der-fnr/projektverzeichnis-details?fkz=22034211&cHash=b7efa112437a9e9caa51910185fa71cc>

Tysklind, M., Gallampois, C., & Liljelind, P. (2024). Dioxins and PCBs in soot and ash from biomass burning in Sweden, Report Umeå University.

TÜV SUD. (2020). Die 44. BImSchV – Was Sie als Kessel- oder Gas turbinenanlagenbetreiber wissen und beachten müssen. <https://www.tuvsud.com/de-de/-/media/de/industry-service/pdf/broschueren-und-flyer/is/industrie-und-produktionsanlagen/anlagenbau-und-betrieb/die-44-bimschv-gasturbinenanlagenbetreiber.pdf> (21.11.2024).

Umweltbundesamt. (2023): Kleinf Feuerungsanlagen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriemaschinen/feuerungsanlagen/kleinf Feuerungsanlagen#anlagenbestand-in-deutschland> (21.11.2024)

Ummik, M., Järvik, O., & Konist, A. (2024). Dioxin concentrations and congener distribution in biomass ash from small to large scale biomass combustion plants. *Environmental Science and Pollution Research* (2024) 31:58946–58956. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35141-5>

UNEP. (2013). Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional POPs under Article 5 of the Stockholm Convention.

<https://toolkit.pops.int/Publish/Downloads/UNEP-POPS-TOOLKIT-2012-En.pdf>

UNEP. (2019). Technical guidelines on the environmentally sound management of wastes containing or contaminated with unintentionally produced polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans, hexachlorobenzene, polychlorinated biphenyls, pentachlorobenzene or polychlorinated naphthalenes. Conference of the Parties to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal Thirteenth meeting Geneva, 24 April–5 May 2017 Agenda item 4 (b) (i)

Van den Berg, M., Birnbaum, L. S., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Toumisto, J., Tysklind, M., Walker, N., Peterson, R. E. (2006). The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds. *Toxicological sciences*, 93(2), 223-241.

Van den Berg, M., Birnbaum, L., Bosveld, A. T., Brunström, B., Cook, P., Feeley, M., Giesy, J.P., Hasegawa, R., Kennedy, S.W., Kubiak, T., Larsen, J. C., van Leeuwen, F. X., Liem, A. K., Nolt, C., Peterson, R. E., Poellinger, L., Safe, S., Schrenk, D., Tillitt, D., . . . Zacharewski, T. (1998). Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife. *Environmental health perspectives*, 106(12), 775-792.

Vehlow J., Bergfeldt B., & Hunsinger H. (2006). PCDD/F and related compounds in solid residues from municipal solid waste incineration - a literature review. *Waste Management & Research* 24: 404-420.

Verbruggen, E., & Brand, E. (2014). Risk-based standards for PCBs in soil. Proposal for environmental risk limits and maximum values. RIVM. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2014-0119.pdf>

Wang, Q., Yan, S., Chang, C., Qu, C., Tian, Y., Song, J., Guo, J. (2023). Occurrence, Potential Risk Assessment, and Source Apportionment of Polychlorinated Biphenyls in Water from Beiluo River. *Water*, 15, 459. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2014-0119.pdf>

Wyrzykowska, B., Hanari, N., Orlikowska, A., Yamashita, N., Falandysz, J. (2009). Dioxin-like compound compositional profiles of furnace bottom ashes from household combustion in Poland and their possible associations with contamination status of agricultural soil and pine needles. *Chemosphere* 76 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.03.019>

ZIV. (2023). Erhebung des Schornsteinfegerhandwerks. [Publikationen | Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks](#) (10.10.2024)

A Anhang

A.1 Übersicht über den PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.

Tabelle 31: PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus Einzelraumfeuerungsanlagen in Deutschland

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungsleistung, kW _{th}	Baujahr der Anlage	PCDD/F TEQ (ng I-TEQ/kg TM)	Sonstige	Quelle
Grobasche						
Holz, unbehandelten (Laubholz)	Einfacher Kachelofen, oberer Abbrand	7	70er-80er Jahre	1,2	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Grobfraktion)	Launhardt et al. (1998)
				20	Mittelwert, Proben (3), Feuerraum (Feinfraktion)	Launhardt et al. (1998)
	Optimierter Kachelofen, oberer Abbrand	8,5	Anfang 90er Jahre	0,6	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Grobfraktion)	Launhardt et al. (1998)
				0,8	Mittelwert, Proben (1) Feuerraum (Feinfraktion)	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelten (Nadelholz)	Einfacher Kachelofen, oberer Abbrand	7	70er-80er Jahre	0,7	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Grobfraktion)	Launhardt et al. (1998)
				75	Mittelwert, Proben (1) Feuerraum (Feinfraktion)	Launhardt et al. (1998)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungsleistung, kW _{th}	Baujahr der Anlage	PCDD/F TEQ (ng I-TEQ/kg TM)	Sonstige	Quelle
	Optimierter Kachelofen, oberer Abbrand	8,5	Anfang 90er Jahre	0,9	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Grobfraktion)	Launhardt et al. (1998)
				39	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Feinfraktion)	Launhardt et al. (1998)
Flugasche (Kehrasche)						
Holz, unbehandelt (Laubholz)	Einfacher Kachelofen, oberer Abbrand	7	70er-80er Jahre	6,5	Mittelwert, Proben (1), Wärmetauscher (Flugasche)	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelt (nicht definiert)	Einzelofen	k.A	k.A	2.015	Mittelwert, Proben (33), Kaminruß	Dumler-Gradl et al. (1995)
Holz, unbehandelt (nicht definiert)	Kachelofen	k.A	k.A	3.453	Mittelwert, Proben (39), Kaminruß	Dumler-Gradl et al. (1995)
Holz, nicht definiert	Holzofen	k.A	k.A	45-48.240	Min-Max, Proben (9), Kaminruß	Thoma (1998)
Holz, unbehandelt (Laubholz)	Einfacher Kachelofen, oberer Abbrand	7	70er-80er Jahre	7,9	Mittelwert, Proben (1), Kaminruß (Feinflugasche)	Launhardt et al. (1998)

A.2 Übersicht über den PCDD/F und dl-PCB Gehalt in Asche und Ruß aus Festbrennstoffkessel in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.

Tabelle 32: PCDD/F und dl-PCB Gehalt in Asche und Ruß aus Festbrennstoffkessel in Deutschland

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Grobasche									
Holz, unbehandelt	Brennmulde, wassergekühlt	500 kW	Multizyklon, Gewebefilter	2012	k.A	k.A	4-45	Proben (2), Brennraum	TLLLR (2020)]
Holz, unbehandelt (Laubholz)	Versuchsanlage, Hackschnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	<2	<0,02	k.A	Proben (2), Rostasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt (Laubholz)	Abgasgebläse und Mikroprozessor-Luftregelung	30 kW _{th}	k.A	Anfang 90er	0,9	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Grobfraktion)	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelt (Laubholz)	Abgasgebläse und Mikroprozessor-Luftregelung	30 kW _{th}	k.A	Anfang 90er	4,3	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Feinfraktion)	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelt (Nadelholz)	Versuchsanlage, Hackschnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	<2	<0,02	k.A	Proben (k.A), Rostasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt (Nadelholz)	Abgasgebläse und Mikroprozessor-Luftregelung	30 kW _{th}	k.A	Anfang 90er	1,6	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (1), Feuerraum (Grobfraktion)	Launhardt et al. (1998)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Holz, unbehandelt (Nadelholz)	Abgasgebläse und Mikroprozessor-Luftregelung	30 kW _{th}	k.A	Anfang 90er	310	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (2), Feuerraum (Feinfraktion)	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelt (Nadelholz)	Brennmulde mit Schubboden, wassergekühlte	50 kW	k.A	≤2000	2,6-5,5	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (6), Feuerraum	Launhardt et al. (2000)
Holz, unbehandelt (Nadelholzmis- chung – Fichte und Kiefernholz, (3:1))	Versuchsanlage , Vorofen System, 30 % Heizlast	65 kW	k.A	≤2001	68,1	k.A	k.A	Proben (1), Brennraum	Pieper (2001)
Holz, unbehandelt (Nadelholzmis- chung – Fichte und Kiefernholz, (3:1))	Versuchsanlage , Vorofen System, 50 % Heizlast	65 kW	k.A	≤2001	0,012-28,4	k.A	k.A	Proben (2), Brennraum und Feuerraum	Pieper (2001)
Holz, unbehandelt (Nadelholzmis- chung – Fichte und	Versuchsanlage , Vorofen System, 100 % Heizlast	65 kW	k.A	≤2001	0,006-0,038	k.A	k.A	Proben (2), Brennraum und Feuerraum	Pieper (2001)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Kiefernholz, (3:1)									
Holz, unbehandelt (Resthölzer A1)	Unterschubfeuerung	200 kW _{th}	Zyklon	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (k.A), Rostasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt (Rinde)	Versuchsanlage, Hackschnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	<2	<0,02	k.A	Proben (k.A), Rostasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt (Häcksel)	Brennmulde, wassergekühlt	600 kW	Multizyklon, Gewebefilter	2010	k.A	k.A	3-3	Proben (3), Brennraum	TLLLR (2020)
Holz, gemischt (Fichte, unbehandelt/CKB-behandelt (3:1))	Versuchsanlage, Vorofen System, 30 %-100 % Last	65 kW	k.A	≤2001	51,1-162	k.A	k.A	Proben (2), Brennraum	Pieper 2001
Holz, behandelt (Spanplatte, sulfat-/chloridgehärtet (3:1))	Versuchsanlage, Vorofen System, Teillast-Vollast	65 kW	k.A	≤2001	175-187	k.A	k.A	Proben (2), Brennraum	Pieper (2001)
Holz, gemischt	Vorschubtreppe nrost	550 kW	Zyklon	2012	k.A	k.A	3-18	Proben (3)	TLLLR(2020)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Getreide	Vorschubtreppe nrost, luft- und wassergekühlt	160 kW, 2 Kessel	Multizyklon, Gewebefilter	2014	k.A	k.A	3-46	Proben (2)	TLLLR(2020)
Getreide	Brennmulde mit Schubboden, wassergekühlte	50 kW	k.A	≤2000	5-10	k.A	k.A	Proben (2), Feuerraum	Launhardt et al. (2000)
Stroh	Vorschubtreppe nrost, wassergekühlte r	630 kW	Multizyklon, Gewebefilter	2014	k.A	k.A	<1-3	Proben (3)	TLLLR (2020)
Stroh (Weizenstroh – gehäckselt und palettiert)	Brennmulde mit Schubboden, wassergekühlte	50 kW	k.A	≤2000	15-33	k.A	k.A	Proben (3), Feuerraum	Launhardt et al. (2000)
Andere Biomasse (Heu – gehäckselt und palettiert, Rapspresskuchen)	Brennmulde mit Schubboden, wassergekühlte	50 kW	k.A	≤2000	10-15	k.A	k.A	Proben (3), Feuerraum	Launhardt et al. (2000)
Straßenbegleit grün	Versuchsanlage (0,24 MW), Rostfeuerung (0,5 MW), Hackschnitzkessel	240-500 kW _{th}	Zyklon	≤2003	<2	<0,02	k.A	Proben (k.A), Rostasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
---------------	--------------	------------------------	-----------	--------------------	-------------------------	----------------	------------------------------------	----------	--------

Flugasche (Kehrasche)

Holz, unbehandelt (Laubholz – Scheitholz)	Abgasebläse und mikroprozessor-gesteuerte Verbrennungsluftregelung	30 kW	k.A	Anfang 90er	88	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (1), Flugasche aus Wärmetauscher	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelt (Laubholz – Scheitholz)	Abgasebläse und mikroprozessor-gesteuerte Verbrennungsluftregelung	30 kW	k.A	Anfang 90er	25	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (1), Kaminruß	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelt (Laubholz – Pappelholz)	Versuchsanlage, Hackschnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	506	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche (Zyklon und Feinstflugasche)	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt (Laubholz)	Versuchsanlage, Hackschnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	896	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche (Zyklon und Feinstflugasche)	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt (Nadelholz – Scheitholz)	Abgasgebläse und mikroprozessor-gesteuerte	30 kW	k.A	Anfang 90er	35	k.A	k.A	Mittelwert, 2 Proben, Wärmetauscher	Launhardt et al. (1998)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
	Verbrennungsluftregelung								
Holz, unbehandelt (Nadelholz – gehackte Fichte)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 30-100 % Heizlast	50 kW	k.A	≤2000	23-53	k.A	k.A	Proben (2), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)
Holz, unbehandelt (Nadelholz – gehackte Fichte)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 kW	k.A	≤20030	61	k.A	k.A	Probe (1), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)
Holz, unbehandelt (Nadelholz – Scheitholz)	Abgasebläse und mikroprozessor-gesteuerte Verbrennungsluftregelung	30 kW	k.A	Anfang 90er	84	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (2), Kaminruß	Launhardt et al. (1998)
Holz, unbehandelt (Nadelholz – Fichte und Kiefernholz, (3:1))	Versuchsanlage, Vorofen System, Teillast - Volllast	65 kW	k.A	≤2001	97,8-117	k.A	k.A	Proben (3), Flugasche	Pieper (2001)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Holz, unbehandelt (Nadelholz)	Versuchsanlage, Hack-schnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	1.577	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche (Zyklon und Feinstflugasche)	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt (Rinde)	Versuchsanlage, Hack-schnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	411	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche (Zyklon und Feinstflugasche)	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelte n (Häcksel)	Brennmulde, wassergekühlt	600 kW	Multizyklon, Gewebefilter	2010	k.A	k.A	126	1 Probe, Zyklonasche	TLLLR (2020)
Holz, unbehandelt (kommunales Häckselgut)	Rostfeuerung	450 kW _{th}	Zyklon	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (2), Feinasche (Zyklon und Feinstflugasche)	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelt	Holzheizkessel	k.A	k.A	≤1995	1.438	k.A	k.A	Mittelwert, Proben (9), Kaminruß	Dumler-Gradl et al. (1995)
Holz, gemischt (Fichte, unbehandelt/CKB-behandelt (3:1))	Versuchsanlage, Vorofen System, Teillast-Volllast	65 kW	k.A	≤2001	300-743	k.A	k.A	Proben (k.A), Flugasche	Pieper (2001)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Holz, gemischt (HHS und Holz von Wald-Feldrandpflege: holziger Grünschnitt, 75:25 %)	Vorschubtreppe nrost	550 kW	Zyklon	2012	k.A	k.A	5-15	Proben (2), Zyklonasche	TLLLR (2020)
Holz, behandelt (Spanplatte, sulfat-/chloridgehärtet (3:1))	Versuchsanlage, Vorofen System, Teillast-Volllast	65 kW	k.A	≤2001	28,5-515	k.A	k.A	Proben (2), Flugasche	Pieper (2001)
Holz, nicht definiert	Holz-Zentralheizung	k.A	k.A	≤1998	6.812-41.173*	k.A	k.A	Min-Max, Proben (4), Ruß, Shornstein	Thoma (1998)
Andere Biomasse (LP-Heu, gehäckselt)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 kW	k.A	≤2000	3.796	k.A	k.A	Proben (1), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)
Andere Biomasse (Rapspresskuchen, palettiert)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 kW	k.A	≤2000	715	k.A	k.A	Mittelwert, Probe (1), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Getreide (Triticale-GP, gehäckselt)	wassergekühlte Brenmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 kW	k.A	≤2000	401	k.A	k.A	Probe (1), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)
Getreide (Triticale-GP, gehäckselt)	wassergekühlte Brenmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 kW	k.A	≤2000	247	k.A	k.A	Probe (1), Kaminruß	Launhardt et al. (2000)
Straßenbegleitgrün	Versuchsanlage, Hackschnitzkessel	240 kW _{th}	Zyklon	≤2003	1.114	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche (Zyklon und Feinstflugasche)	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Straßenbegleitgrün	Rostfeuerung	500 MW _{th}	Zyklon	≤2003	54	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche (Zyklon und Feinstflugasche)	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Stroh (Weizenstroh, gehäckselt)	wassergekühlte Brenmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 MW	k.A	≤2000	1.129	k.A	k.A	Probe (1), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Stroh (Weizenstroh, gehäckselt)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 MW	k.A	≤2000	1.691	k.A	k.A	Probe (1), Kaminruß	Launhardt et al. (2000)
Stroh (Weizenstroh, pelletiert, 11 % Wassergehalt)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 MW	k.A	≤2000	860	k.A	k.A	Probe (1), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)
Stroh (Weizenstroh, pelletiert, 11 % Wassergehalt)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 30 % Heizlast	50 MW	k.A	≤2000	5.382	k.A	k.A	Probe (1), Wärmetauscher	Launhardt et al. (2000)
Andere Biomasse (LP-Heu, gehäckselt)	wassergekühlte Brennmulde mit Schubboden, 100 % Heizlast	50 kW	k.A	≤2000	1.711	k.A	k.A	Probe (1), Kaminruß	Launhardt et al. (2000)

Flugasche (Filterasche)

Holz, unbehandelt (Häcksel)	Brennmulde, wassergekühlt	600 kW	Multizyklon, Gewebefilter	2010	k.A	k.A	91	Proben (2), Filterasche	TLLR (2020)
-----------------------------	---------------------------	--------	---------------------------	------	-----	-----	----	-------------------------	-------------

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg TM)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Getreide	Vorschubtreppe nrost (5 Stufen), wassergekühlt	950 kW	Multizyklon, Helbig-Gewebefilter	2013	k.A	k.A	67-271	Proben (2), Filterasche	TLLLR (2020)
Andere Biomasse (75 % Heu, 10 % Schilf, 15 % Holz)	Vorschub-Treppenrost (5 Stufen) und Brennmulde	800 kW	Multizyklon, Helbig-Gewebefilter	2014	k.A	k.A	168-2.100	Proben (3), Filterasche	TLLLR (2020)

*Wert berechnet auf Basis der Konzentrationen der einzelnen PCDD/F-Stoffe, die im Bericht angegeben sind

A.3 Übersicht über den PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.

Tabelle 33: PCDD/F und dl-PCB Gehalt in Asche und Ruß aus mittelgroßen Feuerungsanlagen in Deutschland

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und dl-PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Grobasche									
Holz, unbehandelte (Laubholz)	Rostfeuerung	1,0 MW _{th}	Zyklon	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (k.A), Grobasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und dl-PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Holz, unbehandelte (Nadelholz)	Rostfeuerung	2 x 1,0 MW _{th}	Zyklon	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (k.A), Grobasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelte (Resthölzer A1)	Rost-, Einblasfeuerung	11,0 MW _{th}	Zyklon + E-Filter	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (k.A), Grobasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, behandelt (Althölzer A2)	Rost-, Einblasfeuerung	20,0 MW _{th}	E-Filter	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (k.A), Grobasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr BW (2003)
Holz, gemischt (HHS)	Vorschubtrep penrost	19,5 MW _{th} + 5,36 MW _{el}	Zyklon, Gewebefilter	2006	k.A	k.A	3-4	Proben (10), Brennraumasc he	TLLLR (2020)
Stroh (Ballen, Häcksel)	5 Zonen-Vibrationsrost, wassergekühlt	49,8 MW _{th} + 11,8 MW _{el}	Zyklon, Flachschauch-Sorptionsgewebefilter	2013	k.A	k.A	3-7	Proben (10), Brennraumasc he	TLLLR (2020)
Flugasche (Kehrasche)									
Holz, unbehandelte (Laubholz)	Rostfeuerung	1,0 MW _{th}	Zyklon	≤2003	4,5	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungswärmeleistung	Filterart	Baujahr der Anlage	PCDD/F (ng I-TEQ/kg)	PCB (mg/kg TM)	PCDD/F und dl-PCB (ng/kg TM WHO 2005)	Sonstige	Quelle
Holz, unbehandelte (Nadelholz)	Rostfeuerung	2 x 1,0 MW _{th}	Zyklon	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, unbehandelte (Resthölzer A1)	Rost-, Einblasfeuerung	11,0 MW _{th}	Zyklon + E-Filter	≤2003	<1	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)
Holz, behandelt (Althölzer A2)	Rost-, Einblasfeuerung	20,0 MW _{th}	E-Filter	≤2003	28,4	<0,02	k.A	Proben (k.A), Feinasche	Ministerium für Umwelt und Verkehr, BW (2003)

Flugasche (Filterasche)

Stroh (Ballen, Häcksel)	5 Zonen-Vibrationsrost, wassergekühlt	49,8 MW _{th} + 11,8 MW _{el}	Zyklon, Flachslauch-Sorptionsgewebefilter	2013	k.A	k.A	5-8	Proben (3), Gewebefiltersche	TLLLR (2020)
-------------------------	---------------------------------------	---	---	------	-----	-----	-----	------------------------------	--------------

HHS – Holzhackschnittel

A.4 Übersicht über den PCDD/F Gehalt in Asche und Ruß aus dem Holzverarbeitenden Betrieb in Deutschland, wie in der Literatur angegeben.

Tabelle 34: PCDD/F Gehalt in Asche aus dem Holzverarbeitenden Betrieb in Deutschland

Brennstofftyp	Feuerungsart	Feuerungsleistung, MW _{th}	Jahr der Anlage	PCDD/F TEQ (ng/kg TEQ BGA)	Sonstige	Quelle
Grobasche						
Holz	Holzverarbeitender Betrieb	k.A	≤1994	0,31-0,66	Proben (10), Bodenasche	Pohlandt et al. (1994)
Flugasche (Kehrasche)						
Holz	Holzverarbeitender Betrieb	k.A	≤1994	121-215	Proben (10), Flugasche	Pohlandt et al. (1994)

B Anhang

B.1 Vorgehensweise für eine repräsentative Probenahme von Grobasche und Flugasche aus Kleinfeuerungsanlagen

1. Ziel

Das Ziel dieser Probenahme ist die Gewinnung einer repräsentativen Probe von Grobasche¹ sowie von Flugasche² aus einer Kleinfeuerungsanlage. Die Probe soll für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung (hier Dioxine/Furane, PCB und Chlor) verwendet werden.

2. Arbeits- und Gesundheitsschutz

Bei der Planung der Probenahme sind angemessene Arbeitsschutzmaßnahmen vorzusehen. Hierzu gehören:

- ▶ Einweghandschuhe (DIN EN 388),
- ▶ Staubmaske (FFP II)
- ▶ Schutzbrille (DIN EN 166).
- ▶ Küchenwaage

3. Probenahmestelle

Die Probenahme soll an der Ablagerungsstelle der Grobasche (in der Feuerungsanlage/ Brennraum) bzw. der Flugasche (an der Sohle des Schornsteins sowie dem Verbindungsstück zum Schornstein) erfolgen. Die Ablagerungsstelle sollte so gewählt werden, dass sie repräsentativ für die gesamte Probenmenge ist.

4. Probenahmegerät

Für die Probenahme soll ein geeignetes Probenahmegerät (kein PVC, kein Holz) verwendet werden. Das Probenahmegerät sollte eine ausreichende Größe haben, um eine ausreichend große Probe zu entnehmen. Das Probenahmegerät darf nicht kontaminiert sein. Das bedeutet, es muss frei von anhaftenden Rückständen sein. Die für die Probenahme verwendeten Geräte müssen aus Materialien bestehen, welche die Probe hinsichtlich der zu untersuchenden Eigenschaften und Inhaltsstoffe nicht beeinflussen (kein PVC, kein Holz).

→ Vorzugsweise sind Geräte (z. B. eine saubere Schaufel) aus Edelstahl oder hochwertigem Kunststoff (PP, PE) einzusetzen.

ACHTUNG: Da es sich bei der Probenahme um Asche handelt, ist sicherzustellen, dass diese vollständig **abgekühlt** ist. Dies ist vor allem bei der Grobasche kritisch zu prüfen und sicherzustellen. Bei einer Grobascheprobe sollte sichergestellt werden, dass der Betreiber den Ofen mehr als 48 h vor der Probenahme nicht betrieben hat. Die Ascheprobe darf keine spürbare Temperaturentwicklung aufweisen. Bei der Messung mit einem Thermometer darf die Kerntemperatur in der Probe nicht über der Umgebungstemperatur liegen. Diese liegt in unbewohnten Gebäudebereichen (Keller/ Dachboden) bei 10 bis 18 Grad und in bewohnten Gebäudebereichen bei 18 bis 25°C.

5. Verpackung und Transport

Die Probe ist in saubere, trockene, feuchtigkeitsundurchlässige, weitgehend luftdichte und ausreichend große verschließbare Behältnisse einzufüllen und zu verschließen. Die Behältnisse

sollen derart beschaffen sein, dass beim Transport und bei der Aufbewahrung keine Schadstoffverluste möglich sind. Es ist empfehlenswert, eine Reserve an Behältnissen für Probenentnahmen und zusätzliche Proben einzuplanen. An die Behältnisse werden ferner folgende Anforderungen gestellt:

- ▶ die Wandstärke der Behältnisse soll ausreichend hoch sein, so dass diese den Beanspruchungen während Probenahme und Transport widerstehen
- ▶ die Behältnisse sollen so gewählt werden, dass keine Sorption von Schadstoffen in und an den Verpackungswänden und keine Kontamination der Proben durch Inhaltsstoffe des Verpackungsmaterials eintritt,
- ▶ die Behältnisse sollen aus einem Material hergestellt sein, das mit dem Abfall und dem erwarteten Schadstoffspektrum kompatibel ist. Damit soll sichergestellt werden, dass die Behältnisse aufgrund von chemischen Reaktionen weder deformieren noch reißen,
- ▶ Die Probenbehälter sind trocken und dunkel zu lagern.

→ Für die Verpackung der Proben sind die zur Verfügung gestellten Plastikbeutel zu nutzen. Achtung! Sicherstellen, dass die Probe abgekühlt ist (siehe Punkt 4).

6. Probenahmeverfahren

Die Probenahme erfolgt nach folgendem Verfahren:

1. Mit dem Probenahmegerät werden soweit möglich Einzelproben aus dem gesamten Querschnitt des vorliegenden Materials (je Grobasche, Flugasche) entnommen und zu einer gesammelten Mischprobe vereint. Die Probenahme sollte so durchgeführt werden, dass die Probe jeweils die gesamte Grobasche- bzw. Flugaschemenge repräsentiert. Bei der Probenahme der Grobasche kann Asche vom Rost sowie aus dem Brennraum entnommen werden (bitte notieren Sie das Mengenverhältnis bzw. die ungefähr entnommenen Mengen der einzelnen Fraktionen zusätzlich zu der Anzahl der Einzelproben im Probenahmeprotokoll). Bei der Beprobung der Flugasche kann die Asche aus dem Schornstein sowie dem Verbindungsstück zum Schornstein entnommen werden.
2. Die einzeln mittels Probenahmegerät entnommenen Proben (Einzelproben) werden in den vorgesehen Probenahmebehälter gegeben und ergeben die Mischprobe (je Grobasche, Flugasche).
3. Das Probenahmebehältnis (Plastikbeutel) wird mit einem zur Verfügung gestellten Kabelbinder möglichst luftdicht verschlossen, mit einem zur Verfügung gestellten Etikett versehen, nach Vorgabe beschriftet sowie von Vorder- und Rückseite per Foto dokumentiert.
4. Die Etiketten der Proben werden folgendermaßen beschriftet:

„P#Nummer#_Feuerstätte“ bzw. „P#Nummer#_Schornstein und Verbindungsstück“ – wobei für #Nummer# bitte die entsprechende Nummer auf dem Blatt mit der Auswahl und Zuordnung der Kleinfeuerungsanlagen eingetragen wird.

Für die Beschriftung der Proben werden die bereitgestellten, bereits beschrifteten Etiketten verwendet.

7. Probenahmemenge

- ▶ Die Probenahmemenge sollte nach Möglichkeit mind. 180 g betragen. Falls dies nicht machbar ist, ist auch eine geringere Menge möglich, wobei 60g nicht unterschritten werden sollten.

- ▶ Um dies sicherzustellen sollte die Probe nach Herstellung der Mischprobe gewogen werden. Hierfür ist eine geeignete Küchenwaage ausreichend. Eine Personenwaage hat keine ausreichende Genauigkeit.
- ▶ Hinweis: die Dichte von Flugasche liegt bei weniger als 1/10 der Dichte von Wasser. Das bedeutet, dass eine 200 g Flugascheprobe ein Probenahmevolumen von ca. 2 L entspricht.

8. Probenahmedokumentation

Die Probenahme wird gemäß des anliegenden Probenahmeprotokolls dokumentiert.

9. Laborauftrag

Die entnommenen Proben werden mit einem Laborauftrag dem Labor übergeben.

10. Probentransport

Die Probe wird in einem geeigneten stabilen Karton zum Labor geschickt. Mit dieser Verpackung wird sichergestellt, dass die Probenbehältnisse, hier: Plastikbeutel, während des Transports nicht beschädigt werden. Der Karton wird mit der Adresse des Labors sowie dem Absender beschriftet bzw. entsprechend etikettiert.

11. Anmerkungen

- ▶ Die Probenahme wird von geschulten Fachpersonal durchgeführt.
- ▶ Die Probenahme wird sorgfältig dokumentiert.
- ▶ Die Probe wird sachgerecht aufbewahrt und transportiert.
- ▶ Die Probenahme sollte an einer Stelle erfolgen, an der die Grobasche/ Flugasche nicht mit anderen Materialien verunreinigt ist.
- ▶ Die Probenahme sollte so durchgeführt werden, dass die Probe nicht durch Regen, Schnee oder andere Stoffe verunreinigt wird. Falls eine Verunreinigung vor Ort erkannt wird, ist diese entsprechend im Probenahmeprotokoll zu benennen und fotografisch zu dokumentieren.

Anlage 1: Probenahmeprotokoll

Anlage 2: Vorlage Laborauftrag

B.2 Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“

Abbildung 25: Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“

Referenz Kleinfeuerungsanlage und Proben:

1	Anlage	P___
2	Proben	P___ Feuerstätte/Schornstein und Verbindungsstück
		P___ Feuerstätte/Schornstein und Verbindungsstück

In grau hinterlegte Felder bitte die Probennummer aus dem Blatt mit der Auswahl und Zuordnung der Kleinfeuerungsanlagen eintragen, nicht Zutreffendes bitte durchstreichen

A. Allgemeine Angaben:

3	Veranlasser / Auftraggeber	Ramboll Deutschland GmbH i.A. des Umweltbundesamtes
4	Betreiber / Betrieb	privat
5	PLZ und Ort der Anlage	
6	Grund der Probenahme	Orientierende abfallcharakterisierende Untersuchung
7	Probenahmetag (TT.MM.JJJJ)	
8	Probenehmer*in / Dienststelle	

B. Angaben zur Feuerungsstätte:

9	Art der Feuerungsanlage	<input type="checkbox"/> Kaminofen <input type="checkbox"/> Pelletofen <input type="checkbox"/> Kachelofen <input type="checkbox"/> Scheitholz- Kessel <input type="checkbox"/> Pellet-Kessel <input type="checkbox"/> Hackschnitzel-Kessel <input type="checkbox"/> Kessel bei Holzverarbeitendem Gewerbe <input type="checkbox"/> Sonstige:
10	Art der Emissionsminderungstechnik	<input type="checkbox"/> Keine <input type="checkbox"/> Elektrostatischer Abscheider <input type="checkbox"/> Katalysator <input type="checkbox"/> Sonstige:
11a.	Datum der Errichtung/Datum der Typprüfung (JJJJ)	
11b.	Grenzwerte nach 1. BImSchV	<input type="checkbox"/> Stufe 0 (vor 2010) <input type="checkbox"/> Stufe 1 (ab 22.03.2010 bis 31.12.2014) <input type="checkbox"/> Stufe 2 (nach 31.12.2014)

12	Nennleistung der Feuerungsanlage (in kW)	
13	Zustand der Feuerstätte	<input type="checkbox"/> Ordnungsgemäßer Zustand <input type="checkbox"/> Mängel Kurze Beschreibung der Mängel:

C. Allgemeine Angaben zum Brennstoff:

14a.	Ausschluss von Kohle als Brennstoff	<input type="checkbox"/> Bestätigung, dass in den letzten 6 Monaten keine Kohle verbrannt, sondern nur naturbelassenes Holz (außer bei Holzverarbeitenden Betrieben → Frage 15e)
14b.	Holzart:	Nadelholz: <input type="checkbox"/> ausschließlich <input type="checkbox"/> überwiegend <input type="checkbox"/> selten <input type="checkbox"/> gar nicht Laubholz: <input type="checkbox"/> ausschließlich <input type="checkbox"/> überwiegend <input type="checkbox"/> selten <input type="checkbox"/> gar nicht Weitere Bitte weitere Spezifikation der Hauptholzart falls bekannt angeben (Birke, Buche, Kiefer, Tanne, Pappel, Erle, Ahorn):
15a.	Brennstofffeuchte	Brennstofffeuchte liegt bei unter 25% <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
15b.	Qualität des Brennstoffes - Vermutete Schadstoffe/ Gefährdungen (falls vorhanden, z.B. aus vorherigen Beprobungen)	
15c.	Bei Einzelraumfeuerungsanlagen:	Wurden in den letzten 6 Monaten Holzbriketts eingesetzt? <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein Wenn in den letzten 6 Monaten Holzbriketts eingesetzt wurden: Menge eingesetzter Holzbriketts: <input type="checkbox"/> ausschließlich <input type="checkbox"/> hauptsächlich <input type="checkbox"/> vorwiegend <input type="checkbox"/> selten
15d.	Bei Hackschnitzelfeuerung:	<input type="checkbox"/> Eingesetzte Hackschnitzel haben keine Verunreinigung (Nadeln/ Blätter) <input type="checkbox"/> Eingesetzte Hackschnitzel haben wenig Verunreinigung (Nadeln/ Blätter) <input type="checkbox"/> Eingesetzte Hackschnitzel haben viel Verunreinigung (Nadeln/ Blätter) <input type="checkbox"/> Eingesetzte Hackschnitzel haben eine Brennstofffeuchte von über 25 % <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
15e.	Betriebe der Holzbe- und verarbeitung	Einsatz von behandeltem Holz (Brennstoffnummer 6 und 7) <input type="checkbox"/> ausschließlich <input type="checkbox"/> hauptsächlich <input type="checkbox"/> vorwiegend <input type="checkbox"/> selten
16	Untersuchungsstelle	Eurofins GfA Lab Service GmbH, Am Neuländer Gewerbepark 4, 21079 Hamburg

D. Angabe zur Probenahme:

Ascheprobe aus dem Rost und dem Brennraum (Grobasche; Feuerstätte)		
Probenkennzeichnung (siehe 2):		
17	Allgemeine Beschreibung der Probe (visuelle Auffälligkeiten/ Verunreinigungen, z.B. unverbrannte Plastikteile, Nägel, etc.; falls vorhanden Anteile, circa gerundet in Prozent/olfaktorische Auffälligkeiten)	
18	Beprobte Menge	Menge in g (ungefähre Angabe) für Rostasche: Menge in q (ungefähre Angaben) für Brennraumasche: Summe in g:
19	Lagerungsdauer des Probenahmematerials in der Probenahmestelle (Zeit in Tagen/Wochen seit der letzten Leerung/Reinigung)	
20	Einflüsse auf das Material zum Zeitpunkt der Probenahme (falls vorhanden (nass/trocken, ...))	
21	Probenahmegerät und -material	
22	Beschreibung der Probenahme (falls möglich; Entnahme von Einzelprobe/n durch Gerät, Beschreibung Auswahl/Entnahme aus vorhandener Gesamtmenge)	
23	Anzahl der Einzelproben (EP) (falls machbar)	
24	Probenvorbereitungsschritte (falls durchgeführt)	
25	Beobachtungen bei der Probenahme / Bemerkungen (falls vorhanden)	
26	Fotodokumentation: <i>Hier bitte Fotos der Proben einfügen (ein bis zwei Fotos pro Probe)</i>	

Ascheprobe aus dem Schornstein und dem Verbindungsstück (Flugasche)	
Probenkennzeichnung (siehe 2):	
17	Allgemeine Beschreibung der Probe (visuelle Auffälligkeiten/ Verunreinigungen, z.B. unverbrannte Plastikteile, Nägel, etc.; falls vorhanden Anteile, circa gerundet in Prozent/ olfaktorische Auffälligkeiten)
18	Beprobte Menge (in g) Menge in g (ungefähr) für Asche aus Schornstein: Menge in g (ungefähr) für Asche aus Verbindungsstück: Menge insgesamt in g:
19	Lagerungsdauer des Probenahmematerials in der Probenahmestelle (Zeit in Tagen/Wochen seit der letzten Leerung/Reinigung)
20	Einflüsse auf das Material zum Zeitpunkt der Probenahme (falls vorhanden (nass/trocken, ...))
21	Probenahmegerät und -material
22	Beschreibung der Probenahme (falls möglich; Entnahme von Einzelprobe/n durch Gerät, Beschreibung Auswahl/Entnahme aus vorhandener Gesamtmenge)
23	Anzahl der Einzelproben (EP) (falls machbar)
24	Probenvorbereitungsschritte (falls durchgeführt)
25	Beobachtungen bei der Probenahme / Bemerkungen (falls vorhanden)
26	Fotodokumentation: <i>Hier bitte Fotos der Proben einfügen</i>

27 Prüfberichte der Untersuchungsstelle (vom Auftraggeber nachträglich hinzuzufügen):

Grobasche:

Flugasche:

Quelle: Eigene Darstellung, Ramboll

C Anhang

C.1 Anlagensteckbrief für mittelgroße Feuerungsanlagen

Abbildung 26: Anlagensteckbrief für mittelgroße Feuerungsanlagen

Allgemeine Daten

Betreiber der Anlage:	
Kontakt:	
Adresse der Anlage:	

Anlagen-bezogene Angaben

Datum der Inbetriebnahme (bestehende oder neue Anlage):	
Leistung der Anlage in MW:	
Art des Abscheiders (Gewebefilter, elektrostatischer Abscheider, etc.):	
Filternder oder elektrostatischer Abscheider vor 20. Juni 2029 eingebaut?	
Einsatzstoffe (Vollholz, Spanplatten, Altholz 1, Altholz 2, Getreide, etc.):	
Anlagenart (Heizkessel, Dampfkessel, Kraft-Wärmekopplung, etc.):	
Branche:	

Quelle: Eigene Darstellung, Ramboll

C.2 Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“

Abbildung 27: Probenahmeprotokoll im Rahmen des Projekts „UBA POP in Abfällen“

Referenz Kleinfeuerungsanlage und Proben:

1	Anlage	P -
2	Probe	P -

In blau hinterlegte Felder bitte die Nummer der Anlage sowie den Ort eintragen

A. Allgemeine Angaben:

3	Veranlasser / Auftraggeber	Ramboll Deutschland GmbH i.A. des Umweltbundesamtes
4	Betreiber / Betrieb	
5	PLZ und Ort der Anlage	
6	Grund der Probenahme	Orientierende abfallcharakterisierende Untersuchung
7	Probenahmetag (TT.MM.JJJJ)	
8	Probenehmer*in / Dienststelle	

B. Angaben zum betrachteten Kessel und der dazugehörigen Feuerungsanlage:

	Art des betrachteten Kessels (für die Beprobung relevant)	<input type="checkbox"/> Warmwasserkessel <input type="checkbox"/> Dampfkessel <input type="checkbox"/> Thermoölkessel <input type="checkbox"/> Sonstiger: _____
	Datum der Inbetriebnahme	Betrachteter Kessel: Feuerungsanlage:
	Art der Emissionsminderungstechnik des betrachteten Kessels	<input type="checkbox"/> Gewebefilter <input type="checkbox"/> Keramikfilter <input type="checkbox"/> Elektrostatischer Abscheider – Nassabscheider <input type="checkbox"/> Elektrostatischer Abscheider – Trockenabscheider <input type="checkbox"/> SNCR <input type="checkbox"/> Sonstige:
	Datum Einbau des betrachteten Filters:	
	Feuerungswärmeleistung des betrachteten Kessels sowie der gesamten Feuerungsanlage (allerdings nur Biomassekessel; in MW)	Betrachteter Kessel: Gesamt:
	Emissionsgrenzwert für Staub (für den betrachteten Kessel)	
	Sauerstoffbezugswert (11% nach TA Luft oder 6% nach 44. BImSchV)	

	(für den betrachteten Kessel)	
	Zustand der Feuerungsanlage, des Kessels und der betrachteten Abgasreinigung	<input type="checkbox"/> Ordnungsgemäßer Zustand <input type="checkbox"/> Mängel Kurze Beschreibung der Mängel:

C. Allgemeine Angaben zum Brennstoff für den betrachteten Kessel:

Einsatzstoff: Auswahl: Holzpellets Holzhackschnitzel Landschaftspflegeholz Produktionsreste (Vollholz, Spanplatten, ...) Altholz AI Altholz AII Stroh Getreide Sonstige	Vorrangig eingesetzter Brennstoff:	Prozent:
	Zweitrangig eingesetzter Brennstoff:	Prozent:
	Sonstige Brennstoffe:	
Brennstofffeuchte	Brennstofffeuchte in %:	
Qualität des Brennstoffes - Vermutete Schadstoffe/ Gefährdungen (falls vorhanden)		
Branche Nace-Code (Holzverarbeitung, Wärmeerzeugung, etc.)		
Untersuchungsstelle	Eurofins GfA Lab Service GmbH, Am Neuländer Gewerbepark 4, 21079 Hamburg	

D. Angabe zur Probenahme:

Filterasche (Filterrückstand)	
Probenkennzeichnung:	
Allgemeine Beschreibung der Probe (visuelle Auffälligkeiten/ Verunreinigungen, z.B. unverbrannte Plastikteile, Nägel, etc.; falls vorhanden Anteile, circa gerundet in Prozent)	
Beprobte Menge (in g)	
Lagerungsdauer des Probenahmematerials in der Probenahmestelle (Zeit in Tagen/Wochen seit der letzten Leerung/Reinigung)	
Einflüsse auf das Material zum Zeitpunkt der Probenahme (falls vorhanden (nass/trocken, ...))	
Probenahmegerät und -material	
Beschreibung der Probenahme (falls möglich; Entnahme von Einzelprobe/n durch Gerät, Beschreibung Auswahl/Entnahme aus vorhandener Gesamtmenge)	
Anzahl der Einzelproben (EP) (falls machbar)	
Probenvorbereitungsschritte (falls durchgeführt)	
Beobachtungen bei der Probenahme / Bemerkungen (falls vorhanden)	
Fotodokumentation: Hier bitte Fotos der Proben einfügen	

27 Prüfberichte der Untersuchungsstelle (vom Auftraggeber nachträglich hinzuzufügen):

Grobasche:

Kehrasche:

Filterasche:

Quelle: Eigene Darstellung, Ramboll