

Manuel Schwabl

Markus Schwarz

Untersuchung von Scheitholzfeuerungen zur Unterstützung der Österreichischen Luftschadstoff-Inventur (OLI)

Neuberechnung der Emissionsfaktoren für
Scheitholzfeuerungen unter
Berücksichtigung des realen Betriebs

Datum 22. Jänner 2024

Projektleitung Manuel Schwabl
manuel.schwabl@best-research.eu

Mitarbeit Markus Schwarz
markus.schwarz@best-research.eu

Rita Sturmlechner
rita.sturmlechner@best-research.eu

Firmenpartner Umweltbundesamt GmbH.

Projektnummer N-11-393-0-UBA-OLI_SUPPORT

Projektlaufzeit 01. Oktober 2023 – 31. Dezember 2023

BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

Standort Wieselburg

Gewerbepark Haag 3
A 3250 Wieselburg-Land
T +43 5 02378-9448
F +43 5 02378-9499
office@best-research.eu
www.best-research.eu
FN 232244k
Landesgericht für ZRS Graz
UID-Nr. ATU 56877044

Bericht

Executive Summary

Das EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 [EEA 1.A.4.bi Annex, 2023] empfiehlt bei Biomassefeuerungen eine geänderte Vorgehensweise für die Ermittlung von praxisbezogenen, realitätsnahen Emissionsfaktoren, unter stärkerer Berücksichtigung der Abbrandphasen sowie durch Fehlbedienung verursachter Emissionen.

Für die Berechnung wird im Annex des Guidebooks vorgeschlagen, für typische Fehler spezifische Faktoren für die Emissionssteigerung zu ermitteln, und diese unter Berücksichtigung der Häufigkeit des Auftretens, zum Emissionsfaktor für normalen Betrieb zu addieren, wie in der folgenden, vorgeschlagen Formel ersichtlich:

$$E_{Real} = AD \cdot \left(1 - \sum S_{Bad}\right) \cdot EF_{Good} + AD \cdot S_{Bad1} \cdot EF_{Good} \cdot f_{Bad1} + AD \cdot S_{Bad2} \cdot EF_{Good} \cdot f_{Bad2} + \dots$$

Es gibt eine Reihe typischer Fehlbedienungen, einige sind im EMEP/EEA Guidebook angeführt, welche zu höheren Emissionen führen, jedoch ist es unmöglich alle Faktoren statistisch zu erfassen. Es wurden nur die relevanten Fehlbedienungen ausgewählt, jene welche in wissenschaftlichen Arbeiten die signifikantesten Emissionssteigerungen verursachten.

- Bei Scheitholz Einzelöfen
 - Fehlerhafter Ofenbetrieb durch nicht beachten der Bedienungsanleitung
 - Mangelhafte Regulierung der Luftmenge
 - Zu feuchtes Holz

- Bei Scheitholzkesseln
 - Mangelhafter Lastausgleich
 - Zu feuchtes Holz

Für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für gute Verbrennung (Good combustion) sowie der Faktoren für den erhöhten Schadstoffausstoß wurden bei BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies bestehende Messdaten ausgewertet. Die Datenlage wurde durch in der wissenschaftlichen Fachliteratur zu findenden Ergebnissen ergänzt. Es wurde darauf geachtet, dass eine realitätsnahe Einheiz-Methode betrachtet wurde.

Basierend auf den Rohdaten wurden die Messwerte und -ergebnisse in Hinsicht auf die relevanten Einflussfaktoren klassifiziert und mit statistischen Methoden Emissionsfaktoren und Faktoren für den erhöhten Schadstoffausstoß aufgrund von Fehlbedienung berechnet. Die dabei ermittelten Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zu sehen.

Art der Scheitholzfeuerung	Gesamtstaub TSP bei gutem Anlagenbetrieb *	Spezifische Faktoren für Emissionssteigerung			
		f _{Bedienung}	f _{Luftklappe}	f _{Lastausgleich}	f _{Wassergehalt}
Scheitholz-Einzelfeuerstätten Holz EO	50 [mg/MJ]	1,53	6,5		4,3
Wechselbrandkessel Holz-AB	88 [mg/MJ]			2,43	6,37
Scheitholzkessel ohne Verbrennungsregelung Holz-oV	58 [mg/MJ]			3,09	1,18
Scheitholzkessel mit Lambda-Regelung Holz-mL	25 [mg/MJ]			2,63	1,47

Tabelle: Übersicht Emissionsfaktoren bei gutem Anlagenbetrieb und Faktoren für die Emissionssteigerung

* ... Gesamtstaub Emissionsfaktoren ohne kondensierbare Anteile

In diesem Bericht wurden Daten zu den Emissionen von Gesamtstaub, Total Suspended Particulate (TSP) behandelt. Die angeführten Emissionsfaktoren beziehen sich auf feste anorganische und organische Partikel, kondensierbare organische Verbindungen wurden nicht berücksichtigt.

Zur Festlegung des Anteils an Feuerungen, bei welchem hinsichtlich der definierten Ursachen für schlechten Feuerungsanlagenbetrieb mit erhöhtem Emissionsaufkommen gerechnet werden muss, wurden Fragebögen für Einzelöfen und für Scheitholzkessel ausgearbeitet. Diese stellen die Basis für eine Umfrage dar, anhand deren Ergebnis das reale Betriebsverhalten von Scheitholzfeuerstätten in Österreich abgeschätzt werden kann.

Für die Projektion der Emissionsmengen auf vergangene Jahre können für die Quote an schlecht betriebenen Anlagen bestehende Umfragen zu Biomassefeuerungen herangezogen werden. Passende Umfragen bzw. in diesen enthaltene äquivalente Fragestellungen sind angeführt.



Inhalt

1	Einleitung	7
2	Methode	8
2.1	Berechnung	8
2.2	Ursachen für erhöhten Schadstoffausstoß	8
2.3	Methode und Datenquellen	9
3	Einzelofen	11
3.1	Einzel- und Speicherofen-Technologien	11
3.2	Guter Anlagenbetrieb (Good Combustion)	11
3.3	Schlechter Anlagenbetrieb (Bad Combustion)	13
3.3.1	Anlagenbedienung	13
3.3.2	Luftklappe	14
3.3.3	Feuchter Brennstoff	15
3.4	Fragebogen	15
3.4.1	Methode	15
3.4.2	Anlagenbedienung	16
3.4.3	Luftklappe	17
3.4.4	Feuchter Brennstoff	18
4	Scheitholzessel	20
4.1	Kesseltypen	20
4.1.1	Wechselbrandkessel (Allesbrennerkessel)	20
4.1.2	Naturzug- und Saugzugkessel ohne Verbrennungsregelung	21
4.1.3	Stückholzkessel mit Lambda-Regelung	22
4.2	Guter Anlagenbetrieb (Good Combustion)	23
4.3	Schlechter Anlagenbetrieb (Bad Combustion)	24
4.3.1	Mangelhafter Lastausgleich, Betrieb bei Teillast oder Gluterhaltung	24
4.3.2	Feuchter Brennstoff	26
4.4	Fragebogen	27
4.4.1	Methode	27
4.4.2	Kesseltyp	28
4.4.3	Mangelhafter Lastausgleich	29
4.4.4	Feuchter Brennstoff	30
5	Rückwärtsprojektion	32
5.1	Einzelofen	32
5.2	Scheitholzessel	34
6	Datenübersicht	35
6.1	Einzelofen	35

6.2	Scheitholzessel	37
7	Verzeichnisse	40
7.1	Tabellenverzeichnis	40
7.2	Abbildungsverzeichnis	40
8	Literaturverzeichnis	41

1 Einleitung

Das EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 [EEA 1.A.4.bi Annex, 2023] empfiehlt eine geänderte Vorgehensweise für die Ermittlung von praxisbezogenen, realitätsnahen Emissionsfaktoren, unter stärkerer Berücksichtigung der Abbrandphasen sowie durch Fehlbedienung verursachten Emissionen.

Dies ist insbesondere bei Stückholzfeuerungen relevant, da Holzverbrennungsprozesse in kleinem Maßstab nicht gleichmäßig sind und die Verbrennungsbedingungen je nach Gerätetyp, technischem Stand und Wartung, Phase des Verbrennungsprozesses und Luftzufuhr, Qualität und Quantität des Brennstoffs im Betriebspraxis variieren können.

Obwohl die unterschiedlichen Betriebsphasen durch Überarbeitung der Vorschrift der Typenprüfung von Öfen und Kessel in der Zwischenzeit berücksichtigt werden, erhöhen Fehlbedienungen, insbesondere bei Heizgeräten welche keine automatische Verbrennungsregelung besitzen, den Schadstoffausstoß von Staub und unverbrannten Verbindungen signifikant.

2 Methode

2.1 Berechnung

Nach dem Anhang des EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 [EEA 1.A.4.bi Annex, 2023] sollen bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren für Biomassefeuerungen im realen Betrieb nicht nur alle Betriebsphasen der Verbrennung inklusive der emissionsreichen Startphase sondern auch typische Fehlbedienungen, welche die Emissionen beeinflussen, berücksichtigt werden. Für die Berechnung wird im Annex des Guidebooks die folgende Formel vorgeschlagen:

$$E_{Real} = AD \cdot \left(1 - \sum S_{Bad}\right) \cdot EF_{Good} + AD \cdot S_{Bad1} \cdot EF_{Good} \cdot f_{Bad1} + AD \cdot S_{Bad2} \cdot EF_{Good} \cdot f_{Bad2} + \dots$$

$$= AD \cdot EF_{Good} \cdot \left(\left(1 - \sum S_{Bad}\right) + S_{Bad1} \cdot f_{Bad1} + S_{Bad2} \cdot f_{Bad2} + \dots \right)$$

E_{Real}	Reale Emissionen des Anlagentyps unter Berücksichtigung von normalem und schlechtem Anlagenbetrieb	[kg]
EF_{Good}	Emissionen des Anlagentyps bei gutem Anlagenbetrieb	[kg/TJ]
AD	Aktivitätsdaten, Energiemenge (Heizwert) an Holz welche in Anlagen des Typs im Kalenderjahr verfeuert wird	[TJ]
S_{Bad}	Energetischer Anteil welcher in diesem Anlagentyp unter schlechten Bedingungen verfeuert wird	[-]
f_{Bad}	Faktor für den erhöhten Schadstoffausstoß bei schlechtem Betrieb aufgrund von Bedienfehlern	[-]

2.2 Ursachen für erhöhten Schadstoffausstoß

Es gibt eine Reihe typischer Fehlbedienungen, einige sind im EMEP/EEA Guidebook angeführt, welche zu höheren Emissionen führen. Jedoch ist es unmöglich alle Faktoren statistisch zu erfassen. Beispielsweise ist die Emissionssteigerung durch technische Fehler oder Mangel an Service und Reinigung nicht quantifizierbar und sollte bei modernen Kesseln auch nicht auftreten da diese solche Fehler selbst erkennen.

Folgende Faktoren wurden als verantwortlich für die signifikantesten Abweichungen ermittelt, daher wurden in der Folge nur diese betrachtet:

- Bei Scheitholz Einzelöfen
 - Fehlerhafter Ofenbetrieb durch nicht beachten der Bedienungsanleitung
In der Bedienungsanleitung sind wichtige Informationen über die Holzmenge, den Anzündvorgang, die Lufteinstellungen sowie über Reinigungsintervalle enthalten, welche beachtet werden sollten.

- **Mangelhafte Regulierung der Luftmenge**
Die Brennluftmenge und -verteilung ist bei den meisten Geräten manuell einzustellen. Sie sollte bei Ofenbetrieb an die Abbrandphase angepasst werden. Beim Entzünden wird typischerweise die Primärluftmenge erhöht, um ein rasches Entfachen des Feuers zu erreichen, während diese in der Hauptbrennphase stark reduziert wird und der Brennprozess über Sekundärluft geregelt wird. Nach dem Erlöschen der Flamme sollten beide Lufteinlässe verschlossen werden, um Wärmeverlust aus dem Gebäude zu vermeiden.
- **Zu Feuchtes Holz**
Zu feuchtes Holz entflammt wesentlich schwerer als trockenes Holz, wodurch sich die Zündphase wesentlich verlängert. Während der Brennphase ist bei zu feuchtem Holz aufgrund der zusätzlichen Wasserdampfmenge die Brennraumtemperatur geringer, welches ebenfalls die Emissionen erhöht.
- **Bei Scheitholzkesseln**
 - **Mangelhafter Lastausgleich**
Scheitholzkessel können, solange Brennstoff im Füllraum vorhanden ist, die Verbrennung nicht stoppen, sondern nur durch Reduktion der Brennluftmenge drosseln. Dies führt zu hohen Emissionen an Staub und unverbrannten Verbindungen. Um dies zu vermeiden sind bei der Neuinstallation von Heizungsanlagen mit Scheitholzkesseln ausreichend dimensionierte Pufferspeicher zum Lastausgleich vorgeschrieben, damit nicht vom Heizkreis abgenommene Wärme in diesen zwischengespeichert werden kann. Dadurch kann der Kessel den gesamten im Füllraum vorhandenen Brennstoff abbrennen und muss nicht in Teillast oder Gluterhalt wechseln.
 - **Feuchtes Holz**
Zu feuchtes Holz verlängert die Zündphase, während welcher besonders hohe Emissionen an Staub und unverbrannten Verbindungen emittiert werden. Zudem ist für den optimalen Abbrand eine geänderte Luftverteilung (höhere Primärluftmenge) notwendig. Falls der Kessel keine automatische Verbrennungsregelung besitzt führt dies zu einer geringeren Kesselleistung bei erhöhtem Luftüberschuss, wodurch auch die Emissionen ansteigen.

2.3 Methode und Datenquellen

Für die Ermittlung der Emissionsfaktoren für gute Verbrennung (Good combustion) sowie der Faktoren für den erhöhten Schadstoffausstoß wurden bei BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies bestehende Messdaten ausgewertet. Die Datenlage wurde durch in der wissenschaftlichen Fachliteratur zu findenden Ergebnissen ergänzt.

Die verwendeten Einheiz-Methoden und Messdauern, die zu den Messwerten geführt haben können sich zwischen den einzelnen Datenquellen variieren. Es wurde darauf geachtet, dass in allen Fällen eine realitätsnahe Einheiz-Methode verwendet wurde.

In diesem Bericht wurden Daten zu den Emissionen von Gesamtstaub, Total Suspended Particulate (TSP) erörtert und aufgelistet. Die Ermittlung der TSP Emission erfolgte mittels gravimetrischer Methoden. In den meisten Fällen erfolgte dies durch isokinetische Teilstromentnahme des unverdünnten heißen Abgasstromes und anschließende Abscheidung der Staubpartikel auf beheizten Filtersystem (z.B. Staubmesshülse, Quarzfilter) [VDI 2066-1, 2021, ÖNORM EN 13284-1, 2017] bei einer Temperatur von 140 °C oder 180 °C. Einige Messwerte wurden mittels Kaskadenimpaktor ermittelt, wofür der Abgasstrom vor dem Abscheider mit Heiß- oder Umgebungsluft verdünnt werden muss, wo auch in diesen Fällen die Abscheidetemperatur weit über Raumtemperatur lag. Die angeführten Emissionsfaktoren beziehen sich daher auf die festen anorganischen und organischen Partikel, kondensierbare organische Verbindungen wurden bei der angewandten Staubmessmethode nicht berücksichtigt. Andere, in den Publikationen für Staubemission angeführten Emissionswerte wurden auf Gesamtstaub (TSP) in der Einheit [mg/MJ] umgerechnet. Für die Umrechnung der unterschiedlichen Partikelfractionen wurden die Kapitel 1.A.4 Small combustion des EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 [EEA, 2023] für Holzbrennstoffe angeführten Faktoren ($PM_{10} = 95\% \text{ TSP}$, $PM_{2.5} = 93\% \text{ TSP}$) verwendet.

Basierend auf den Rohdaten wurden die Messwerte und -ergebnisse in Hinsicht auf die relevanten Einflussfaktoren klassifiziert und mit statistischen Methoden Emissionsfaktoren und Faktoren für den erhöhten Schadstoffausstoß aufgrund von Fehlbedienung berechnet.

Alle Daten sind gemeinsam mit Quelle und einer Beschreibung der Versuchsart, bzw. des Feuerungstyps in Kapitel 6 dargestellt.

Zur Festlegung des Anteils an Feuerungen, bei welchem hinsichtlich der 3 Ursachen für schlechten Einzelofenbetrieb bzw. 2 Ursachen für schlechten Anlagenbetrieb bei Scheitholzkessel mit erhöhtem Emissionsaufkommen gerechnet werden muss, wurden Fragebögen für die betreffenden Biomassefeuerungstypen ausgearbeitet. Diese stellen die Basis für eine Umfrage dar, anhand deren Ergebnis das reale Betriebsverhalten von Einzelöfen und Scheitholzkessel in Österreich abgeschätzt wird. Für die Projektion der Daten auf vergangene Jahre kann für die Quote an schlecht betriebenen Anlagen auf Resultate bestehende Umfragen Bezug genommen werden. Passende Umfragen bzw. zur neuen Umfrage äquivalente Fragestellungen alter Umfragen sind in Kapitel 5 angeführt.

3 Einzelofen

Bei BEST liegen aus mehreren Projekten Daten zu den Emissionen von Scheitholzkaminöfen vor. Die Messungen erfolgten teilweise am Prüfstand, wo die Emissionen mit höchster Genauigkeit bestimmt werden können, aber es wurden auch Daten von Feldmessungen herangezogen, um den Zustand der Kaminöfen in der Realität zu berücksichtigen.

3.1 Einzel- und Speicherofen-Technologien

Folgende Einzelofen und Scheitholzeinzelfeuerstätten gemäß Österreichischer Luftschadstoff-Inventur – OLI [UBA, 2023] , Table 129 werden betrachtet:

- #12 Wood stoves and cooking stoves - Holz-EO Stückholz-Einzelöfen inkl. Küchenherde
- #13 Tiled wood stoves and masonry heaters - Holz-SO Kachelöfen und Putzgrundöfen (Speicheröfen)

Innerhalb der betrachteten Daten, ist die Mehrzahl der Einheiten der Kategorie #12 Holz-EO zu zurechnen. Die Datengrundlage für Kategorie #13-Holz-SO Technologien ist jedoch zu gering, um die gewählte Methodik zur Ermittlung eines gesonderten Emissionsfaktors und Good/Bad Combustion Faktoren zu ermitteln. Es wird deshalb angenommen, dass die Effekte sehr ähnlich sind und es wird empfohlen für beide Technologien eine gemeinsame Berechnungsweise zu verfolgen.

3.2 Guter Anlagenbetrieb (Good Combustion)

Der Emissionsfaktor für guten Anlagenbetrieb basiert auf Messungen bei BEST sowie auf Messdaten welche im Rahmen von internationalen Projekten von europäischen Projektpartnern (tfz – Technologie und förderzentrum Straubing, SP - Technical Research Institute of Sweden, DTI – Danish Technological Institute, ...) durchgeführt wurden.

Alle Messungen, auch jene der Projektpartner wurden nach der BeReal Methode [Reichert, 2018] durchgeführt, um möglichst realitätsnahe Emissionen zu ermitteln. Bei dieser Methode wird der Emissionsfaktor über 8 aufeinanderfolgende Abbrände bestimmt, er besteht aus dem Entzünden des Feuers, danach erfolgen 4 Messungen bei Vollast und dann 3 Abbrände bei Teillast.

Die Bedienung insbesondere der Lufteinstellung erfolgte immer durch eine Fachkraft, welche den Ofen entsprechend der Vorgaben der Bedienungsanleitung und basierend auf langjähriger Erfahrung betrieb. Der eingesetzte Brennstoff entsprach den Vorgaben für Scheitholz für die Typenprüfung von Kaminöfen ([ÖNORM EN 13240, 2007], [ÖNORM EN 16510-1, 2023]). Er war trocken, sein Wassergehalt lag bei $15 \pm 4\%$.

Bei den getesteten Einzelöfen handelte es sich in der Regel um neue Kaminöfen von namhaften Europäischen Herstellern.

In der nachfolgenden Abbildung 3-1 und Tabelle 3-1 sind die Ergebnisse von insgesamt 44 Messungen zusammengefasst und statistisch ausgewertet. Die Feinstaubemissionen (TSP) der getesteten Öfen waren sehr unterschiedlich, diese lagen zwischen 25 und 92 mg/MJ.

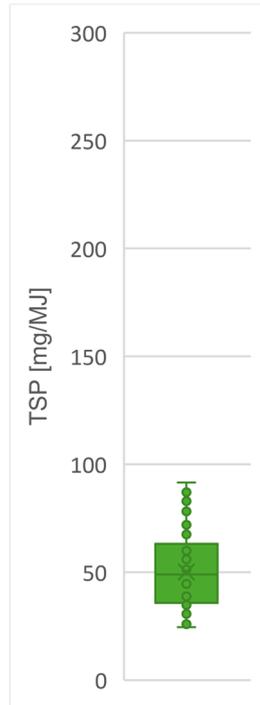


Abbildung 3-1: Boxplot der Messergebnisse zu Scheitholzheizkaminöfen bei guter Verbrennung

Gesamtstaub TSP [mg/MJ]	Experte_in Prüfstandsmessungen
Anzahl	44
Mittelwert	50
Maximalwert	92
75% Quantil	63
Median	49
25% Quantil	36
Minimum	25

Tabelle 3-1: Statistische Auswertung der Messergebnisse zu Scheitholzheizkaminöfen bei guter Verbrennung

Der Mittelwert aller Messungen und somit der Emissionsfaktor für gute Verbrennung liegt bei 50 mg/MJ. Dieser wird als Emissionsfaktor für die gute Verbrennung EF_{Good} empfohlen, da er einen Mittelwert von unterschiedlichen Technologien unter optimalen Betriebsbedingungen darstellt.

3.3 Schlechter Anlagenbetrieb (Bad Combustion)

Die Faktoren für schlechten Betrieb der Feuerstätte für die zuvor als signifikant festgestellten Faktoren wurden anhand von Messdaten sowie wissenschaftlichen Forschungsarbeiten anderer Institute ermittelt.

3.3.1 Anlagenbedienung

Aus mehreren Projekten liegen Daten zu Gesamtstaubemissionen von Feldmessungen vor, bei welchem die Feuerstätte sowohl von Fachkräften als auch von der/dem Eigentümer_in mit und ohne Schulung betrieben wurde. Aus dem Vergleich der Werte lässt sich herleiten, wie gut die Anlagenbetreiber_innen den Betrieb des Ofens beherrschen, und welche Emissionssteigerung bei Nichtbeachtung der Bedienungsanleitung möglich ist.

Bei den Feuerstätten handelt es sich um alte und neue Kaminöfen unterschiedlicher Hersteller, welche typisch für den Österreichischen Anlagenbestand sind.

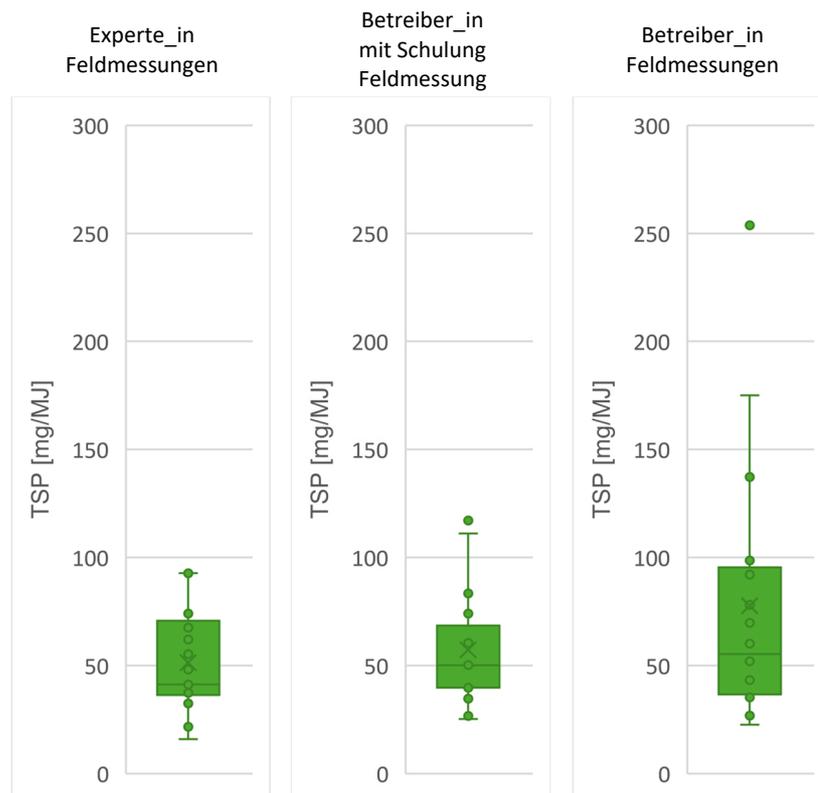


Abbildung 3-2: Boxplot der im Feld gemessenen Gesamtstaubemissionen

Gesamtstaub TSP [mg/MJ]	Experte_in Feldmessungen	Betreiber_in mit Schulung Feldmessung	Betreiber_in Feldmessungen
Anzahl	17	17	17
Mittelwert	51	57	78
Maximalwert	93	117	254
75% Quantil	71	68	95
Median	41	50	55
25% Quantil	36	40	37
Minimum	16	25	23

Tabelle 3-2: Statistische Auswertung der im Feld gemessenen Gesamtstaubemissionen klassifiziert hinsichtlich Ofenbetreiber_in

Die Messergebnisse, es wurde auch im Feld stets versucht möglichst exakt nach der BeReal-Methode zu messen, zeigten, dass die von Fachkräften ermittelten Feinstaubemissionen im Mittel nahezu identisch mit den am Prüfstand ermittelten Wert sind. Dieser wird auch von der/dem Betreiber_in nach kurzer Einschulung in den richtigen Ofenbetrieb nahezu erreicht. Dies zeigt, dass durch geeignete Einschulung und / oder optimaler Anwendung der Bedienungsanleitung minimale Emissionswerte erreicht werden können, welche in der gleichen Größenordnung wie jene für Good Combustion (Kapitel3.2) liegen. Ungeschulte Betreiber_innen, verursachen im Umgang mit der Feuerungsanlage im Mittel deutlich höhere Emissionen - nämlich um 53% höher im Verhältnis zu vor der Schulung wie auch im Verhältnis zu Good Combustion.

Damit ergibt sich für die falsche Anlagenbedienung ein Faktor von $f_{\text{Bedienung}} = 1,53$.

3.3.2 Luftklappe

Bei den Bedienfehlern von Scheitholz-kaminöfen stellt eine verkehrte oder unterlassene Einstellung der richtigen Luftzufuhr die größte Fehlerquelle dar, die zu einem extrem hohen Anstieg der Staubemissionen führen kann.

Falls die Primärluft nach dem Anzünden geöffnet bleibt, so führt dies in der Folge zu einem zu raschen Abbrand des Brennstoffs, wodurch Brennkammer (und Wärmetauscher) überlastet werden. Verantwortlich für die dadurch auftretenden hohen Emissionen von unverbrannten Verbindungen und Staub ist neben der kürzeren Verweilzeit in der Brennkammer auch ein Mangel an Sekundärluft, wodurch der Gasphasenausbrand unvollständig verläuft.

In wissenschaftlichen Untersuchungen [Mack, 2019, Fachinger, 2017] wurde für einen derartigen Fehlbetrieb der Feuerstätte festgestellt, dass die Staubemissionen bis auf den 6,5-fachen Wert im Vergleich zum Regelbetrieb ansteigen können. Hierbei wurde am Versuchstand jeweils eine Dreifach-Messung unter realitätsnaher Einheizmethode, mit einer Dreifach-Messung mit Fehlbedienung verglichen.

Damit ergibt sich für die mangelhafte Luftregulierung ein Faktor von $f_{\text{Luftklappe}} = 6,5$.

3.3.3 Feuchter Brennstoff

Die Verwendung von Brennstoff mit zu hohem Wassergehalt führt ebenfalls zu signifikant erhöhten Emissionen bei Scheitholzöfen.

Feuchtes Holz, mit einem Wassergehalt über 20 %, entflammt wesentlich schwerer als trockenes, wodurch sich die emissionsreiche Zündphase wesentlich verlängert. Auch während der Brennphase bleibt bei feuchtem Holz, aufgrund der zusätzlichen Wassermenge welche verdampfen muss und aufgrund der höheren Gasmenge die Brennraumtemperatur geringer, wodurch die Reaktionsgeschwindigkeit der Verbrennung sinkt und die Brenngase nicht vollständig verbrannt werden.

Waldfrisches Holz besitzt in der Regel einen Wassergehalt von mehr als 50 %, es muss bis auf einen Wassergehalt unter 20 % getrocknet werden, wofür abhängig von Trocknungsmethode und Lagerort bei natürlicher Trocknung eine Mindesttrocknungsdauer von 12 Monaten notwendig ist. Brennholz vom Brennstoffhändler und aus Baumärkten ist aus logistischen Gründen stets getrocknet. Da Scheitholz in Österreich jedoch meist durch Selbstwerbung produziert wird, kann diese Fehlbedienung verbreitet auftreten.

Nach den Untersuchungen des tfz [Mack, 2019] betragen die Staubemissionen bei Verwendung von Holz mit einem Wassergehalt von 30 % das 2,0 bis 6,4 – fache der Emissionen mit trockenem Holz.

Für die Verwendung von zu feuchtem Holz als Brennstoff ergibt sich damit im Mittel ein Faktor von $f_{\text{Wassergehalt}} = 4,3$.

3.4 Fragebogen

Die Häufigkeit des Auftretens der signifikanten Fehlbedienungen S_{Bad} soll mittels einer Umfrage ermittelt werden. Dabei werden für Einzelöfen drei verschiedene S_{Bad} erhoben, jeweils ein Anteil für nicht Bedienungsanleitung-konforme Bedienung, einer für Fehlbedienung der Lufteinstellung und einer für die Häufigkeit der Verwendung von zu feuchtem Brennstoff.

3.4.1 Methode

Es wurde ein Fragebogen entwickelt, welcher pro potentiellm Ofen-Bedienfehler aus 3 Fragen sowie einer Ersatzfrage besteht, welche nur gestellt werden muss, falls eine Frage nicht beantwortet werden konnte und die Antworten keine eindeutige Zuweisung ermöglichen. Die Fragen sind Eindeutig zu beantworten, es gibt immer nur eine Antwort möglich. Diese werden in der Reihenfolge von oben nach unten abgefragt. Sobald die befragte Person mindestens 2

Antworten gibt, welche eindeutig entweder der Kategorie „BAD Combustion“ oder „GOOD Combustion“ zuweisbar ist, so wird diese Ofeninstallation dieser Klasse zugeteilt.

3.4.2 Anlagenbedienung

Fragen	Antworten BAD Combustion	Antworten GOOD Combustion
1: Wie informieren Sie sich über die richtige Bedienung des Einzelofens	<i>von Personen in Ihrem Umfeld (Verwandte, Freunde)</i>	<i>von Fachpersonal</i>
	<i>Eigene Erfahrung bei der Bedienung von Holzheizungen</i>	<i>Informationen aus der Bedienungsanleitung</i>
2: Betreiben Sie Ihren Ofen gemäß Bedienungsanleitung?	<i>Nein</i>	<i>Ja</i>
	<i>Weiß es nicht</i>	
3: Was ist Ihnen beim Betrieb ihres Einzelofens am wichtigsten?	<i>Es soll schnell warm werden</i>	<i>Effiziente und raucharme Verbrennung</i>
Zusatz: Wie schnell verschmutzt die Sichtscheiber Ihres Ofens	<i>nach jedem Gebrauch</i>	<i>nach mehrmaligem Betrieb bildet sich ein schwarzer Schleier</i>
	<i>Es bilden sich teerige Ablagerungen, die mit einem Reiniger entfernt werden müssen</i>	<i>weißliche Ablagerungen nach etlichen Abbränden</i>

Tabelle 3-3: Fragen zur Bedienung des Scheitholzofens

Zusatzinformationen:

Bedienungsanleitung – Die Anleitung des Einzelofen-Herstellers, in welcher die Methode zum Betreiben des Einzelofens beschrieben wird. Dies kann folgende Punkte umfassen: Gewicht an Brennstoff pro Einheizvorgang, Art und Stückigkeit des Brennstoffes, Stapelung für erstmaliges

Zünden, Arten der einsetzbaren Zündhilfe (Papier, Grillanzünder, ...), Positionierung der Zündhilfe (oben, in der Mitte, unten im Stapel), Zeitpunkt des Nachlegens, Umgang mit Luftklappen, Entleeren und Reinigung des Rostes

Fachpersonal – Kaminkehrer, Ofensetzer, Fachhändler, Ofen-Installateur, Ofen-Hersteller

Effizient – Effiziente Verbrennung legt einen besonderen Wert auf den Verbrauch des Brennstoffes im Verhältnis zur Heizleistung,

Raucharm – raucharme, schadstoffarme Verbrennung legt einen besonderen Wert auf die Luftqualitätsproblematik durch Feinstaub und Geruchsbelästigung im Außenbereich, zudem wird Verteerung oder Versottung des Kamins vermieden

Sichtscheibe – in den meisten Fällen besitzen Einzelöfen ein Sichtfenster. Bei einfachen Metalltüren, muss diese Frage übersprungen werden.

3.4.3 Luftklappe

Fragen	Antworten BAD Combustion	Antworten GOOD Combustion
1: Regeln Sie die einzelnen Abbrände durch Betätigung der Luftklappen?	Nein	Ja
		Nein wird automatisch geregelt
2: Schließen Sie die Primärluft nach dem Entzünden des Feuers	Nein	Ja
	Geringe Reduktion	Weitgehende Reduktion
3: Welche Stellung hat die Luftklappe nach dem letzten Abbrand?	Offen	geschlossen
	Geringe Reduktion	Weitgehend geschlossen
Zusatz: Betreiben Sie ihren Ofen gemäß Bedienungsanleitung	Nein	Ja

Tabelle 3-4: Fragen zur Variation der Lufteinstellungen beim Einzelofen

Zusatzinformationen

Luftklappe – Eine Luftklappe ist zumeist ein Schieber oder Drehknopf, mit welchem die Lufteinstellungen des Einzelofens verändert werden können.

Automatisch geregelte Luftklappe – diese Funktion ist in der Bedienungsanleitung des Einzelofens nachzulesen. Zumeist erfolgt diese mit elektrischen Antrieben, der Ofen benötigt daher einen Stromanschluss.

Primärluft – Luft welche durch den Rost des Feuerraumes oder im unteren Teil direkt auf den Brennstoff geleitet wird. In einigen Fällen kann diese nicht getrennt angesteuert werden. Dann einfach nach der allgemeinen Luftklappe fragen, bei diesen Technologien ist bereits vorgesehen, dass bei geschlossener Klappe nur die Primärluftklappe geschlossen wird und die Sekundärluft (Luftmenge, welche über dem Brennstoff in den Brennraum geleitet wird) geöffnet bleibt.

Offen-geschlossen – Je nach Ausführung der Technologie können auch + (für geöffnet) und oder – (für geschlossen) am Gerät angeschrieben sein. Falls keine Markierungen bei den Luftklappeneinstellungen vorhanden sind, kann der Zustand der Klappen auch über die Verbrennungsgeschwindigkeit abgeleitet werden.

3.4.4 Feuchter Brennstoff

Fragen	Antworten BAD Combustion	Antworten GOOD Combustion
1: Wo lagern Sie ihren Brennstoff?	Nicht abgedeckt im Freien	Abgedeckt im Freien
		In einer Halle oder im Keller
2: Wie lange wurde das Holz gelagert?	weniger als 1 Jahr	mindestens 1 Jahr
3: Woher beziehen Sie Ihren Brennstoff?	Selbstwerbung, eigener oder fremder Waldbesitz	von einem Händler
	von Privat gekauft	Aus regionaler Forstwirtschaft

Fragen	Antworten BAD Combustion	Antworten GOOD Combustion
Zusatz: Wie schnell verschmutzt das Sichtscheibe?	<i>Es bilden sich teerige Ablagerungen, die mit einem Reiniger entfernt werden müssen</i>	<i>nach mehrmaligem Betrieb bildet sich ein schwarzer Schleier</i> <i>weißliche Ablagerungen nach etlichen Abbränden</i>

Tabelle 3-5: Fragen zum Wassergehalt des verwendeten Brennstoffs

Zusatzinformationen

Selbstwerbung - Scheitholz wird vom Betreiber_in selbst erzeugt, die Qualität des Brennstoffs wird vor dem Verheizen nicht von einer Fachkraft kontrolliert.

Feuchter Brennstoff – waldfrisches Holz besitzt einen Wassergehalt > 50%. Für den Einsatz in Einzelraumfeuerstätten sollte der Wassergehalt < 20% liegen. Der Feuchtegehalt des Brennstoffes kann über eigene Messgeräte geprüft werden.

Teerige Ablagerungen – dabei handelt es sich um kondensierende organische Kohlenwasserstoffe, die einen braunen, schmierigen, klebrigen Belag auf der Scheibe bilden. Die Entfernung dieses Belags ist nicht mit Wasser alleine möglich.

4 Scheitholzessel

Die Datenbasis bei Scheitholzesseln ist sehr gering. Es wurden in den letzten Jahren nur sehr wenige wissenschaftliche Publikationen zu diesen Heizungsanlagen verfasst, da diese im Rahmen der Verbreitung von Biomassefeuerungen in Europa aufgrund des konstanten Marktpotentials kaum Gegenstand von Forschungsprojekten waren. Die Entwicklung dieser Feuerungen während der letzten 10 Jahren lag meist bei den Herstellern. Diese haben bedingt durch strikere Emissionsanforderungen für Kesseltausch-Förderungen wesentliche Fortschritte hinsichtlich der Feinstaubemissionen erreicht, jedoch sind diese nicht wissenschaftlich dokumentiert.

Dennoch stellen die in wissenschaftlichen Publikationen präsentierten Daten die primäre Datenquelle dar, da auch bei BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies nur wenige, größtenteils nicht veröffentlichte Messdaten mit diesem Kesseltyp vorliegen. Diese wurden aufgrund der geringen Datenbasis zur Ergänzung des Datensatzes benutzt.

Die gesamten Daten wurden bezüglich des eingesetzten Kesseltyps, der Verbrennungsbedingungen und dem Versuchsbrennstoff analysiert und in mehrere Klassen eingeteilt. Anhand der Ausführungen zum Versuchsablauf war es bei vielen Publikationen nicht möglich die Dauer der Staubmessungen sowie die erfassten Verbrennungsphasen zu bestimmen.

4.1 Kesseltypen

Abweichend von der technologischen Abgrenzung der Heizungsanlagen im Informative Inventory Report [UBA, 2023] werden folgende Kesselarten für Scheitholz vorgeschlagen. Diese entsprechen besser den im EMEP/EEA Guidebook Anhang zu Kleinf Feuerungen [EEA 1.A.4.bi Annex, 2023] vorgeschlagenen Typen.

4.1.1 Wechselbrandkessel (Allesbrennerkessel)

Synonym:	Konventioneller Scheitholzessel
Energieträger:	Stückholz, Holzbriketts (sowie andere Festbrennstoffe)
Technologie:	Durchbrandkessel, oberer Abbrand
Beschreibung:	Allesbrennerkessel
Kesseltyp:	Holz-AB

■ Einsatz:

Die Technologie dient der Beheizung von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie kleinen und mittleren Dienstleistungsgebäuden. Allesbrenner können auch mit anderen Festbrennstoffen als Stückholz beheizt werden kann (z.B. mit Holzbriketts, Kohle, Koks etc.).

Diese Feuerungen dürfen in der Regel aufgrund der hohen Emissionswerte seit der

Vereinbarung gemäß Art. 15 a B-VG über Schutzmaßnahmen betreffend Kleinfeuerungen 1995 im Betrieb mit Holz nur mehr als Zusatzkessel, und nicht mehr als alleiniges Heizsystem installiert werden.

- **Beschreibung:**
Es handelt sich eigentlich um Durchbrandkessel für Kohle, die auch für den Betrieb mit anderen festen Brennstoffen z.B. Holz geeignet sind. Diese Kessel haben aufgrund der Luftführung keinen oder nur einen kleinen Füllschacht und dadurch eine relativ kurze Brenndauer. Neben Stückholz können auch Brennstoffe wie Kohle, Braunkohle, Kohlebriketts, Hackschnitzel oder Pellets verfeuert werden. Es gibt diese in den unterschiedlichsten Ausführungen. Manche werden manuell beschickt, andere haben einen Brennstoffbehälter und werden automatisch beschickt.
Moderne Pellet-Scheitholz Kombikessel fallen nicht in diese Kategorie, da sie getrennte Brennkammern besitzen, und nur den Wärmetauscher und die Heizungsregelung gemeinsam nutzen.
- **Emissionen:**
Allesbrenner stellen immer einen Kompromiss dar und sind nicht für alle Brennstoffe gleich gut geeignet. Die Emissionen sind in der Regel hoch, und stark von der verbauten Verbrennungstechnik und dem gewählten Brennstoff abhängig.

4.1.2 Naturzug- und Saugzugkessel ohne Verbrennungsregelung

Synonym:	Moderner Scheitholzessel
Energieträger:	Stückholz, Holzbriketts
Technologie:	Naturzug- oder Saugzugkessel ohne Verbrennungsregelung mit Sturzbrand oder seitlichen Abbrand
Beschreibung:	Stückholzessel ohne elektronische Verbrennungsregelung
Kesseltyp:	Holz-oV

- **Einsatz:**
Scheitholz-Naturzug- und Saugzugkessel ohne elektronische Verbrennungsregelung sind als Alleinheizung oder kombiniert mit bestehender Öl-, Gas- oder Pelletsheizung geeignet, für kleine bis mittlere Gebäude. Diese stellen eine kostengünstige Alternative zu Kessel mit Lambdasonde dar und werden heute zumeist von Osteuropäischen Unternehmen gefertigt.
- **Beschreibung:**
Kessel konstruiert für die Verbrennung von Scheitholz, welche über eine mechanische oder elektronische Leistungsregelung verfügen. Bei diesen Kesseln handelt es sich zumeist um Feuerungen mit seitlichem Abbrand oder Sturzbrand, welche über einen großen Füllschacht verfügen, damit eine lange Abbranddauer erreicht wird.
Bei Naturzugkesseln wird die Verbrennungsluft ohne Fremdenergie durch den vorhandenen Schornsteinunterdruck in die Verbrennungskammer hereingezogen wodurch diese hinsichtlich der Emissionen empfindlicher auf den Schornsteinzug reagieren.

■ Emissionen:

Unter typischen Bedingungen weisen die Kessel mit unterem Abbrand geringere Emissionen auf als Kessel mit oberem Abbrand auf. Die Sekundärluftmenge ist bei dieser Kesselbauart fix eingestellt, die Primärluftmenge wird über die Leistungsregelung variiert. Dadurch können diese im Gegensatz zu Kesseln mit Lambdasonde die Verbrennung nicht an die Abbrandphasen sowie an wechselnde Brennstoffe anpassen und produzieren beim Einsatz von untypischen Brennstoffen (zu trockenem oder zu feuchtem Holz, zu kleinem Holz) erhöhte Emissionen.

4.1.3 Stückholzkessel mit Lambda-Regelung

Synonym:	Fortschrittlicher Scheitholzkessel
Energieträger:	Stückholz, Holzbriketts
Technologie:	Stückholz-Kessel im Sturzbrand mit Gebläseunterstützung und Sauerstoffsonde sowie elektronische Regelung
Beschreibung:	Stückholzkessel mit Lambdasonde und elektronischer Verbrennungsregelung
Kesseltyp:	Holz-mL

■ Einsatz:

Stückholz-Kessel mit Lambdasonde und elektronischer Verbrennungsregelung sind seit ca. 1995 erhältlich und haben einen stetig wachsenden Marktanteil. Sie eignen sich vorwiegend für Ein- und Mehrfamilienhäuser. Die österreichischen Biomassekesselproduzenten fertigen seit mehr als 15 Jahren nahezu ausschließlich Kessel dieser Kategorie.

■ Beschreibung:

Kessel für die Verbrennung von Scheitholz, zumeist Sturzbrandkessel mit großem Füllschacht, welche mit einem Saugzuggebläse ausgestattet sind und zusätzlich zur elektronischen Leistungsregelung auch über eine mikroprozessor-gesteuerte Verbrennungsregelung mit Lambdasonde verfügen. Für diesen Zweck kann bei diesen Kesseln das Verhältnis von Primär- zu Sekundärluftmenge zumeist mittels Klappen gesteuert werden. Dieser Kesseltyp überwacht kontinuierlich viele Parameter und kann damit Störungen im Kesselbetrieb autonom erkennen.

■ Emissionen:

Die Emissionen aufgrund unvollständiger Verbrennung sind gering, die Feuerung kann sich auf wechselnde Brennstoffeigenschaften autonom anpassen. Da Luftmenge und -verteilung während des Abbrandes kontinuierlich an die Abbrandphase angepasst werden treten wesentliche Emissionen nur während des Anzündens auf, und falls der Kessel aufgrund mangelnder Energieabnahme in den Stillstand gezwungen wird. Stückholzkessel mit Verbrennungsregelung haben relativ wenige Staubemissionen bei idealem Betrieb, da auch bei ungünstigem Schornsteineinzug stabile Strömungsverhältnisse in der Brennkammer herrschen.

4.2 Guter Anlagenbetrieb (Good Combustion)

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich zu Scheitholzkesseln ausschließlich Daten über Messungen am Prüfstand. Auch bei BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies wurden die meisten Messungen im Technikum durchgeführt, zudem liegen noch 2 Datensätze von Feldmessungen vor.

Für den Fall „Guter Anlagenbetrieb“ wurden alle Versuchsergebnisse berücksichtigt, welche mit trockenem Scheitholz (Wassergehalt 12 – 20 %) durchgeführt wurden, und welche mit Volllast gekennzeichnet waren, bzw. bei welchen die Kessellast über 65% der Nennlast lag.

Diese wurden basierend auf der Beschreibung der eingesetzten Kessel den 3 unterschiedlichen Kesseltypen zugeordnet.

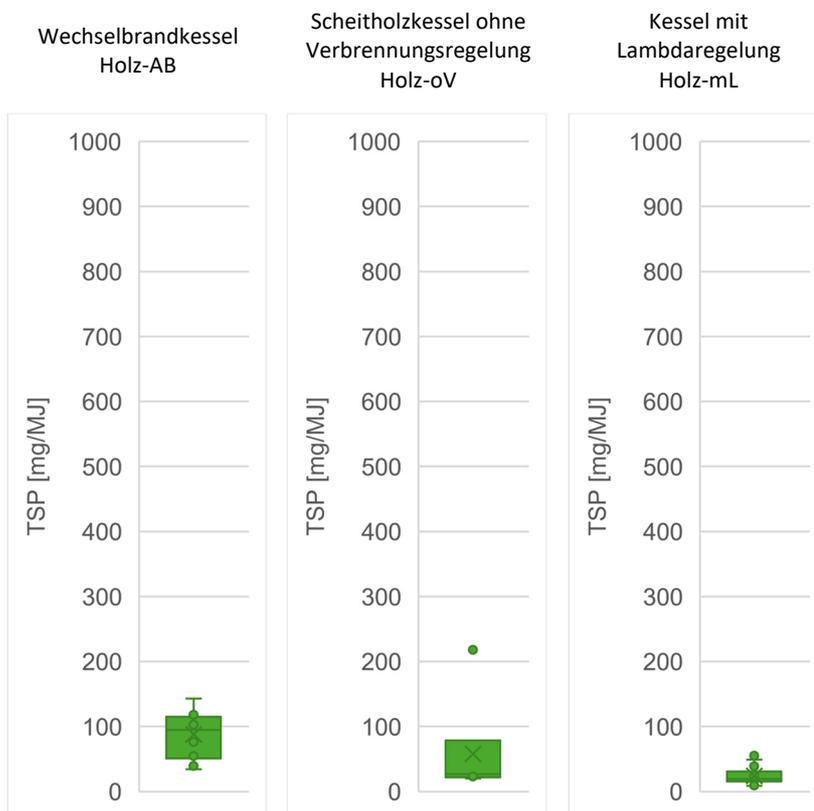


Abbildung 4-1: Boxplot der Daten zu Scheitholzkessel bei gutem Anlagenbetrieb

Good Combustion Gesamtstaub TSP [mg/MJ]	Wechselbrandkessel Holz-AB	Scheitholzessel ohne Verbrennungsregelung Holz-oV	Kessel mit Lambdaregelung Holz-mL
Anzahl	10	6	21
Mittelwert	88	58	25
Maximalwert	143	218	55
75% Quantil	115	79	32
Median	95	27	20
25% Quantil	51	22	16
Minimum	34	20	9

Tabelle 4-1: Statistische Auswertung von Scheitholzkesseleln bei gutem Anlagenbetrieb

Der Mittelwert dieser Analyse stellt den Emissionsfaktor für gute Verbrennung jeweils für die entsprechende Technologiekategorie dar.

Der Wert für Wechselbrandkesseln ist nahezu identisch mit dem vor 30 Jahren für Scheitholzessel ermittelt Emissionsfaktor [Spitzer, 1998]. Jener für die Gruppe „Scheitholzessel ohne Verbrennungsregelung“ besitzt aufgrund der geringen Anzahl an Werten eine relativ hohe Unsicherheit. Es zeigt sich, dass eine automatische Regelung der Verbrennung sich deutliche emissionsreduzierend auswirkt.

4.3 Schlechter Anlagenbetrieb (Bad Combustion)

Für Scheitholzessel wurden der Betrieb unter Teillast bzw. bei Gluterhaltung aufgrund eines fehlenden oder zu geringen Lastausgleichsbehälters und der Betrieb mit feuchtem Brennstoff als wesentliche Ursachen für einen erhöhten Schadstoffausstoß identifiziert.

4.3.1 Mangelhafter Lastausgleich, Betrieb bei Teillast oder Gluterhaltung

Da Scheitholzessel die Verbrennung nicht stoppen können, solange Brennstoff im Füllraum vorhanden ist, müssen diese die Feuerungsleistung durch Reduktion der Brennluftmenge drosseln, welches zu hohen Emissionen an Staub und unverbrannten Verbindungen führt. Für einen emissionsarmen Betrieb werden Scheitholzkesseleln daher mit ausreichend dimensionierten Pufferspeichern zum Lastausgleich betrieben. Diese vermeiden, dass der Kessel in den Teillast oder Gluterhaltungsbetrieb wechseln muss.

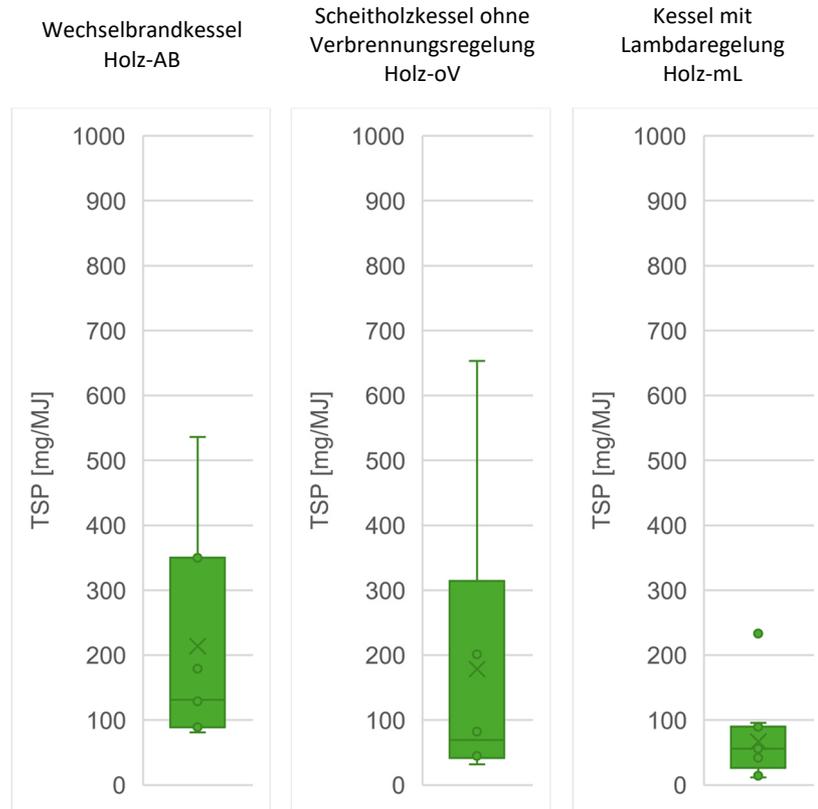


Abbildung 4-2: Boxplot der Daten zu Scheitholzkessel bei geringer Last

Auch in diesem Fall zeigt sich, dass eine Feuerung mit Verbrennungsregelung einen deutlichen Effekt auf den Emissionsfaktor besitzt.

Minimallast Gesamtstaub TSP [mg/MJ]	Wechselbrandkessel Holz-AB	Scheitholzkessel ohne Verbrennungsregelung Holz-oV	Kessel mit Lambdaregelung Holz-mL
Anzahl	7	6	11
Mittelwert	214	178	67
Maximalwert	536	653	233
75% Quantil	350	314	90
Median	131	69	56
25% Quantil	89	42	26
Minimum	81	32	12

Tabelle 4-2: Statistische Auswertung der Daten zu Scheitholzkesseln bei geringer Last

Diese Mittelwerte wurden ins Verhältnis gesetzt zum Emissionsfaktor unter Good Combustion aus Kapitel 4.2, woraus sich die Faktoren für mangelhaften Lastausgleich der Heizungsinstallation $f_{\text{Lastausgleich}}$ ergeben, die in Tabelle 4-3 für die unterschiedlichen Kesseltypen dargestellt sind.

	Wechselbrandkessel Holz-AB	Scheitholzessel ohne Verbrennungsregelung Holz-oV	Kessel mit Lambdaregelung Holz-mL
Faktor Lastausgleich $f_{\text{Lastausgleich}}$	2,43	3,09	2,63

Tabelle 4-3: Faktoren für Lastausgleich abhängig vom Kesseltyp

4.3.2 Feuchter Brennstoff

Wie auch bei den Kaminöfen führt ein zu feuchter Brennstoff zu erhöhten Emissionen an Feinstaub. Diese haben jedoch bei modernen Kesseln nicht so starke Auswirkungen, da einerseits die Brennkammer besser isoliert ist und dadurch trotzdem noch die für die vollständige Verbrennung notwendigen hohen Temperaturen erreicht werden, andererseits erkennen fortschrittliche Kessel die geänderten Verbrennungsbedingungen und passen die Luftverteilung darauf an.

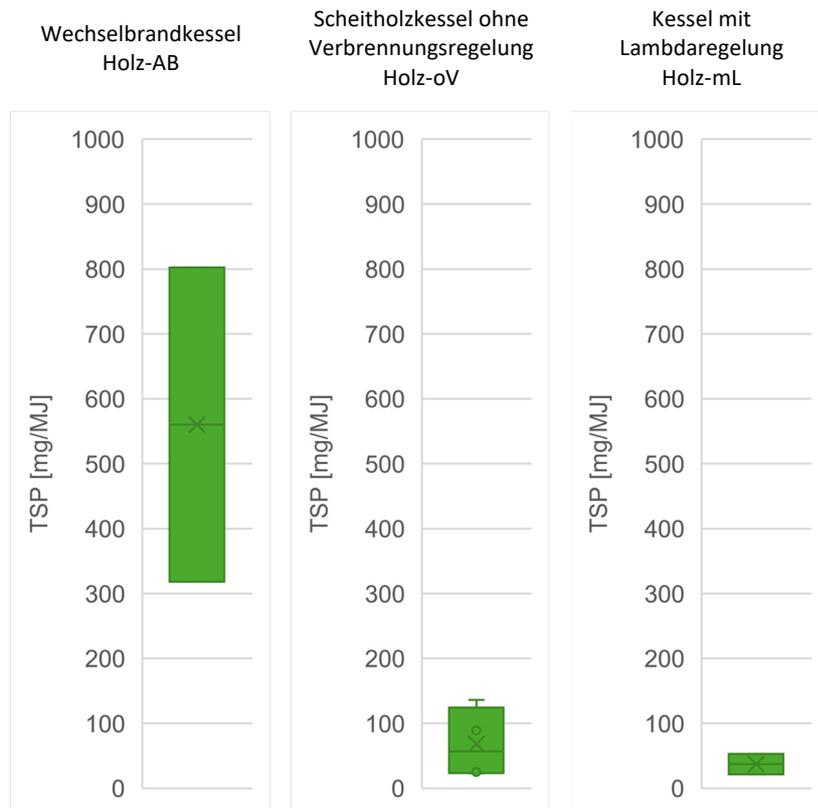


Abbildung 4-3: Boxplot der Daten zu Scheitholzessel bei Messungen mit feuchtem Brennstoff

feuchtes Holz Gesamtstaub TSP [mg/MJ]	Wechselbrandkessel Holz-AB	Scheitholzessel ohne Verbrennungsregelung Holz-oV	Kessel mit Lambdaregelung Holz-mL
Anzahl	2	4	2
Mittelwert	560	68	37
Maximalwert	802	136	53
75% Quantil	-	124	-
Median	560	57	37
25% Quantil	-	24	-
Minimum	318	23	22

Tabelle 4-4: Statistische Auswertung zu Scheitholzessel bei Messungen mit feuchtem Brennstoff

Wieder wurden diese Mittelwerte ins Verhältnis gesetzt zum Emissionsfaktor unter Good Combustion aus Kapitel 4.2 - Damit ergeben sich für den Faktor für die Verbrennung von zu feuchtem Brennstoff $f_{\text{Wassergehalt}}$ die in Tabelle 4-5 für die unterschiedlichen Kesseltypen bestimmten Werte.

	Wechselbrandkessel Holz-AB	Scheitholzessel ohne Verbrennungsregelung Holz-oV	Kessel mit Lambdaregelung Holz-mL
Faktor feuchter Brennstoff $f_{\text{Wassergehalt}}$	6,37	1,18	1,47

Tabelle 4-5: Faktoren für zu feuchten Brennstoff abhängig vom Kesseltyp

4.4 Fragebogen

Die Verteilung der Kesseltypen sowie die Häufigkeit des Auftretens von signifikanten Fehlbedienungen soll ebenfalls in einer Umfrage ermittelt werden.

4.4.1 Methode

Es werden pro potentiellm Scheitholzessel-Bedienfehler 3 Fragen gestellt, falls die befragte Person mindestens 2 Antworten gibt, welche eindeutig entweder der Kategorie „BAD Combustion“ oder „GOOD Combustion“ zuweisbar ist, so wird diese Anlage jener Klasse zugeteilt.

Hierzu wurde ein Fragebogen entwickelt, welcher pro Fehlerquelle aus 3 Fragen sowie einer Ersatzfrage besteht, welche nur gestellt werden muss falls die anderen Fragen keine eindeutige Zuweisung ermöglichen.

4.4.2 Kesseltyp

Die Befragung zur Ermittlung des Kesseltyps erfolgt mit einer alternativen Methode, da bei kundigen Bediener_innen die Hauptfrage ausreicht, um den Kesseltyp festlegen zu können. Falls diese nicht möglich ist gibt es 3 Hilfsfragen um den Scheitholzkessel über seine charakteristischen Eigenschaften identifizieren zu können.

Fragen	Antworten Wechselbrandkessel Holz-AB	Antworten Scheitholzkessel ohne Verbrennungsregelung Holz-oV	Antworten Scheitholzkessel mit Lambdaregelung Holz-mL
Hauptfrage: Welchen Typ an Scheitholzkessel betreiben Sie	Allesbrenner- oder Wechselbrandkessel	Kessel speziell für Scheitholz	Scheitholzkessel mit Lambdasonde
	Durchbrandkessel	Kessel mit Saugzuggebläse aber ohne Lambdasonde	Moderner Kessel mit Verbrennungsregelung
1: Besitzt ihr Kessel eine Abbranddauer von mehr als 3 Stunden	Nein	Ja	Ja
2: Ist Ihr Kessel auch für Kohle geeignet	Ja	Nein	Nein
3: Besitzt Ihr Kessel eine Lambdasonde	Nein	Nein	Ja

Tabelle 4-6: Fragen Kesseltypus Scheitholzkessel

Zusatzinformationen

Wechselbrandkessel – konventionelle Bauart von Kesseln, bei welchen verschiedene Festbrennstoffe (Scheitholz, Kohle, ...) in der gleichen Brennkammer verbrannt werden können.

Scheitholzkessel ohne Verbrennungsregelung – moderne Kessel mit und ohne Saugzuggebläse, welche hinsichtlich der Brennluftzuführung für den Betrieb mit Scheitholz optimiert sind, jedoch noch über keine elektronische Verbrennungsregelung verfügen.

Scheitholzkessel mit Lambdaregelung – fortschrittliche Kesselbauart, welche zur Reduktion der Emissionen über eine Sauerstoffsonde (Lambdasonde) verfügt, damit im Brennraum immer des

für die vollständige Verbrennung optimale Luftverhältnis eingestellt wird. Dafür besitzt dieser Kessel elektrisch angetriebene Stellmotoren für die Luftklappen.

4.4.3 Mangelhafter Lastausgleich

Fragen	Antworten BAD Combustion	Antworten GOOD Combustion
1: Welche Art von Lastausgleich ist für Ihren Heizkessel verbaut?	Kein Pufferpeicher	Pufferspeicher
		Kombispeicher
2: Wechselt der Kessel in Gluterhaltung oder Teillastbetrieb	Ja	Nein
3: Passen Sie die Holzmenge an den Energiebedarf an	Nein	Ja
Zusatz: Gibt es Teeransammlung im Brennraum oder kommt es zur Versottung des Kamins	Ja	Nein

Tabelle 4-7: Fragen zum Lastausgleich der installierten Biomasseheizung

Zusatzinformation

Lastausgleich – Das Gebäude benötigt über eine gewisse Zeit Energie um sich zu erwärmen, bzw. Warmwasser zu bereiten. Wird über den Brennstoff mehr Energie als in dieser Zeit benötigt wird in den Kessel eingefüllt, muss die freiwerdende Energie irgendwo zwischen-gespeichert werden. Dafür dienen z.B. Puffer- oder Kombispeicher.

Puffer- & Kombispeicher – mit Heizungswasser gefüllte Tanks im Heizkreislauf, in welchen die Energie der Verbrennung zwischengespeichert wird, bis diese entweder vom Haus zur Beheizung oder als Warmwasser benötigt wird. Von einem Kombispeicher wird insbesondere dann gesprochen, wenn für beide Zwecke (Heizung und Warmwasser), Energie in Form von heißem Wasser aus dem Speicher entnommen werden kann.

Anpassung an Energiebedarf – Wie bereits beim Lastausgleich dargestellt, benötigt jeder Haushalt eine gewisse Energiemenge für Heizung und Warmwasser. Neben dem Lastausgleich über eine Technologie, kann die Anpassung an den aktuellen Energiebedarf auch über die Veränderung der eingefüllten Brennstoff-Menge erfolgen – dies ist insbesondere zu Zeiten mit geringem Energiebedarf wichtig (Herbst und Frühling).

Gluterhalt – Gluterhalt ist bei Saugzugkessel eine technologische Möglichkeit die Feuerungsleistung, und damit die produzierte Wärmeenergie auf ein Minimum zu reduzieren. Dabei werden bei der Feuerung das Saugzuggebläse abgeschaltet und Luftklappen nahezu vollständig verschlossen damit die Verbrennung annähernd erstickt und somit in eine Art Winterschlaf versetzt wird. Ist wieder Wärmebedarf vorhanden, so kann sich der Kessel durch Zufuhr von Verbrennungsluft autonom startet.

Teeransammlung/Versottung – bei unvollständiger Verbrennung bilden sich Teere und/oder Kondensate, welche sich in der Brennkammer und auf der Brennkammertür ablagern können. Neben ihrem bräunlichen Aussehen und manchmal zähen, klebrigen Verhalten, sind diese flüssigen Produkte auch immer mit einem starken Geruch (z.B. nach „Barbecue“) verbunden. Insbesondere bei Technologien mit oberem Abbrand tritt dies vermehrt auf, da diese am schlechtesten die Feuerungsleistung reduzieren können. Dem hingegen sind bei Scheitholzkesseleln mit Sturzbrand oder seitlichem Abbrand derartige Ablagerungen im Füllraum üblich und kein Indikator für häufigen Teillastbetrieb.

4.4.4 Feuchter Brennstoff

Fragen	Antworten BAD Combustion	Antworten GOOD Combustion
1: Wo lagern Sie ihren Brennstoff?	<i>Nicht abgedeckt im Freien</i>	<i>Abgedeckt im Freien</i>
		<i>In einer Halle</i>
		<i>Im Keller</i>
2: Wie lange wurde das Holz gelagert?	<i>weniger als 8 Monate</i>	<i>mindestens 8 Monate</i>
3: Woher beziehen Sie Ihren Brennstoff?	<i>Selbstwerbung, eigener oder fremder Waldbesitz</i>	<i>von einem Händler</i>
	<i>von Privat gekauft</i>	<i>aus regionaler Forstwirtschaft</i>

Fragen	Antworten BAD Combustion	Antworten GOOD Combustion
Zusatz: Gibt es Teeransammlung im Brennraum oder Versottung des Kamins	Ja	Nein

Tabelle 4-8: Fragen zum Wassergehalt des verwendeten Brennstoffs

Selbstwerbung - Scheitholz wird vom Betreiber_in selbst erzeugt, die Qualität des Brennstoffs wird vor dem Verheizen nicht von einer Fachkraft kontrolliert.

Feuchter Brennstoff – waldfrisches Holz besitzt einen Wassergehalt > 50%. Für den Einsatz in Scheitholzkesseln sollte der Wassergehalt < 25% liegen. Der Feuchtegehalt des Brennstoffes kann über eigene Messgeräte geprüft werden.

Teeransammlung/Versottung – bei unvollständiger Verbrennung bilden sich Teere und/oder Kondensate, welche sich in der Brennkammer und auf der Brennkammertür ablagern können. Neben ihrem bräunlichen Aussehen und manchmal zähen, klebrigen Verhalten, sind diese flüssigen Produkte auch immer mit einem starken Geruch (z.B. nach „Barbecue“) verbunden. Insbesondere bei Technologien mit oberem Abbrand tritt dies vermehrt auf, da diese am schlechtesten die Feuerungsleistung reduzieren können. Dem hingegen sind bei Scheitholzkesseln mit Sturzbrand oder seitlichem Abbrand derartige Ablagerungen im Füllraum üblich und kein Indikator für häufigen Teillastbetrieb.

5 Rückwärtsprojektion

Für die Extrapolation der Gesamtstaubemissionen für die zurückliegenden Jahre muss auf bereits vorliegende Umfragen zu Biomassefeuerungen zurückgegriffen werden, in welchen die für erhöhte Emissionen verantwortliche Themen behandelt wurden.

5.1 Einzelofen

Beispielsweise wurden in den Umfragen von [Schieder, 2013], [Reichert, 2016] und [Wöhler, 2016] Fragen zu den Themengebieten Anlagenbedienung, Einstellung der Luftklappe und Einsatz von feuchtem Brennstoff gestellt.

<i>Studie</i>	<i>Schieder, 2013</i>	<i>Reichert, 2016</i>	<i>Wöhler, 2016</i>
<i>Länder</i>	<i>Österreich</i>	<i>Österreich</i>	<i>Europa</i>
<i>Befragungen</i>	<i>n=652</i>	<i>n=114</i>	<i>n=1200</i>

Tabelle 5-1: Gebietsabdeckung und Anzahl an Befragungen bei vorgeschlagenen Studien

Folgende Fragen betreffen dabei konkret das Themengebiet fachgerechter Ofenbetrieb.

<i>Schieder, 2013</i>	<i>Reichert, 2016</i>	<i>Wöhler, 2016</i>
<i>E1i. Welche Einschulung gab es eine persönliche gab es bei der Inbetriebnahme des Ofens?</i>	<i>Einschulung zur Bedienung, als Sie Ihren Ofen erhalten haben?</i>	<i>Haben Sie die Bedienungsanleitung für Ihren Ofen gelesen?</i>
	<i>Betreiben Sie Ihren Ofen nach Bedienungsanleitung?</i>	

Tabelle 5-2: Äquivalente Fragen zum Thema Anlagenbetrieb

Bezüglich der Bedienung der Luftklappen wurden in allen 3 Studien auch passende Fragen gestellt.

<i>Schieder, 2013</i>	<i>Reichert, 2016</i>	<i>Wöhler, 2016</i>
<i>Reduktion der Primärluft und eventuelles Öffnen der Sekundärluft nach etwa 15 Minute</i>	<i>Regeln Sie die einzelnen Abbrände durch Betätigung der Luftklappen selbst?</i>	
<i>vollständiges Schließen der Zuluft nach etwa 30 min</i>	<i>Wie wird die Luftzufuhr Ihres Ofens gesteuert? (Mehrfachnennungen möglich)</i>	
<i>laufende Anpassung der Zuluft gemäß Bedienungsanleitung</i>		<i>Which kind of combustion air adjustment is possible at your stove?</i>
	<i>Welche Stellung hat die Luftklappe nach dem letzten Abbrand?</i>	

Tabelle 5-3: Fragen zum Thema Bedienung der Luftklappe

Auch hinsichtlich Scheitholzbeschaffung und Trocknungsdauer gibt es aus allen Befragungen ebenfalls nähere statistische Informationen.

<i>Schieder, 2013</i>	<i>Reichert, 2016</i>	<i>Wöhler, 2016</i>
<i>E4c. Wie wird der Brennstoff gelagert</i>	<i>In welchem Zustand befindet sich das Holz, das Sie am häufigsten verwenden?</i>	
<i>E4d. Wie lange wurde das Stückholz insgesamt vor der Verbrennung gelagert</i>	<i>Wie lange wurde das verwendete Holz gelagert / getrocknet?</i>	<i>How long do you store your fuel?</i>

<i>Schieder, 2013</i>	<i>Reichert, 2016</i>	<i>Wöhler, 2016</i>
<i>E3b. Wo werden die Brennstoffe für den Ofen bezogen</i>	<i>Woher kommt dieses Holz normalerweise? (mehrere Antworten zulässig)</i>	<i>Where do you buy your fuel?</i>

Tabelle 5-4: Äquivalente Fragen über Einsatz von feuchtem Holz

5.2 Scheitholzkessel

Für Scheitholzkessel liegen nach derzeitigem Wissensstand keine öffentlich zugänglichen Studien vor. Bei BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies wurde zu diesem Thema im Jahre 2015 eine Studie verfasst, welche jedoch nicht öffentlich zugänglich ist.

<i>Studie</i>	<i>Kirchhof, 2015</i>
<i>Gebiet</i>	<i>Österreich, Deutschland</i>
<i>Befragungen</i>	<i>n=195</i>

Tabelle 5-5: Gebietsabdeckung und Anzahl an Befragungen bei vorgeschlagenen Studien

In dieser Umfrage wurden sowohl Daten zu Pufferspeichern als auch zum Brennstoff abgefragt.

<i>Lastausgleich</i>	<i>Feuchtes Brennholz</i>
<i>Verwenden Sie Ihren Kessel in Kombination mit einem Pufferspeicher?</i>	<i>Woher beziehen Sie Ihren Brennstoff?</i>
<i>Wenn Ja, welches Volumen hat dieser?</i>	
<i>Welchen Puffertyp haben Sie ? Wofür wird dieser verwendet?</i>	<i>Wo lagern Sie den Brennstoff bis zur Nutzung?</i>
	<i>Wie lange lagern Sie Ihren Brennstoff? (inkl. Lagerung beim Lieferanten)</i>

Tabelle 5-6: Äquivalente Fragen bei Scheitholzkessel

6 Datenübersicht

Die in den Publikationen für Staubemission angeführten Emissionswerte wurden auf Gesamtstaub (TSP) in der Einheit [mg/MJ] umgerechnet. Da die Staubpartikel bei den angewendeten gravimetrischen Messmethoden stets aus dem heißen Gasstrom abgeschieden wurden enthalten die Emissionsdaten keine kondensierbaren organischen Verbindungen. Für die Umrechnung der unterschiedlichen Partikelfraktionen wurden die Kapitel 1.A.4 Small combustion des EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 [EEA, 2023] für Holzbrennstoffe verwendeten Faktoren ($PM_{10} = 95\%$ TSP, $PM_{2.5} = 93\%$ TSP) verwendet.

6.1 Einzelofen

<i>Versuchsdurchführung</i>	<i>Messort</i>	<i>Gesamtstaub TSP mg/MJ</i>	<i>Quelle</i>
Anwender_in	Prüfstand	16	[Stressler, 2015]
Anwender_in	Prüfstand	22	[Stressler, 2015]
Exterte_in	Prüfstand	27	[Stressler, 2015]
Exterte_in	Prüfstand	31	[Stressler, 2015]
Anwender_in	Prüfstand	39	[Stressler, 2015]
Anwender_in	Prüfstand	68	[Stressler, 2015]
Exterte_in	Prüfstand	40	[Stressler, 2015]
Exterte_in	Prüfstand	45	[Stressler, 2015]
Exterte_in	Prüfstand	52	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	40	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	36	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	72	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	56	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	63	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	55	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	36	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	63	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	38	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	32	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	39	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	27	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	92	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	26	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	31	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	63	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	36	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	40	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	31	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	37	[BeReal, 2016]

<i>Versuchsdurchführung</i>	<i>Messort</i>	<i>Gesamtstaub TSP mg/MJ</i>	<i>Quelle</i>
Exterte_in	Prüfstand	60	[BeReal, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	70	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	46	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	37	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	52	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	37	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	99	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	78	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	35	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	43	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	27	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	60	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	55	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in	Feldmessung	23	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	62	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	43	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	40	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	61	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	27	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	83	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	74	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	35	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	63	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	40	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	50	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	25	[Rönnbäck, 2016]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	41	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	54	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	75	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Prüfstand	87	[BeReal, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	77	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	48	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	33	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	62	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	93	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	35	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	41	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	93	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	55	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	37	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	74	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	41	[Rönnbäck, 2016]
Exterte_in	Feldmessung	39	[Rönnbäck, 2016]

<i>Versuchsdurchführung</i>	<i>Messort</i>	<i>Gesamtstaub TSP mg/MJ</i>	<i>Quelle</i>
Exterte_in	Prüfstand	54	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	51	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	57	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	33	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	35	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	25	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	83	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	78	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	73	[Reichert, 2017]
Exterte_in	Prüfstand	38	[Klauser, 2018], [Kirchsteiger, 2021]
Exterte_in	Prüfstand	47	[Klauser, 2018], [Kirchsteiger, 2021]
Exterte_in	Prüfstand	63	[Klauser, 2018], [Kirchsteiger, 2021]
Exterte_in	Prüfstand	53	[Klauser, 2018], [Kirchsteiger, 2021]
Exterte_in	Prüfstand	63	[Klauser, 2018], [Kirchsteiger, 2021]
Exterte_in	Prüfstand	68	[Klauser, 2018], [Kirchsteiger, 2021]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	117	[Sturmlechner, 2019]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	60	[Sturmlechner, 2019]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	40	[Sturmlechner, 2019]
Anwender_in+Schulung	Feldmessung	111	[Sturmlechner, 2019]
Anwender_in	Feldmessung	137	[Sturmlechner, 2019]
Anwender_in	Feldmessung	175	[Sturmlechner, 2019]
Anwender_in	Feldmessung	92	[Sturmlechner, 2019]
Anwender_in	Feldmessung	254	[Sturmlechner, 2019]

6.2 Scheitholzkessel

<i>Kesseltyp</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Gesamtstaub TSP mg/MJ</i>	<i>Quelle</i>
Holz-AB	Gute Verbrennung	87,0	[Johansson, 2004]
Holz-AB	Gute Verbrennung	103,0	[Johansson, 2004]
Holz-AB	Lastausgleich	350,0	[Johansson, 2004]
Holz-AB	Lastausgleich	89,0	[Johansson, 2004]
Holz-AB	Lastausgleich	2200,0	[Johansson, 2004]
Holz-oV	Gute Verbrennung	27,0	[Johansson, 2004]
Holz-oV	Gute Verbrennung	32,0	[Johansson, 2004]
Holz-oV	Brennstofffeuchte	25,0	[Johansson, 2004]
Holz-oV	Brennstofffeuchte	89,0	[Johansson, 2004]
Holz-oV	Brennstofffeuchte	23,0	[Johansson, 2004]
Holz-mL	Gute Verbrennung	8,7	[Obernberger, 2008]
Holz-mL	Gute Verbrennung	17,9	[Obernberger, 2008]

Kesseltyp	Datentyp	Gesamtstaub TSP mg/MJ	Quelle
Holz-AB	Gute Verbrennung	143,0	[Winther, 2008]
Holz-AB	Lastausgleich	179,0	[Winther, 2008]
Holz-oV	Gute Verbrennung	23,0	[Winther, 2008]
Holz-oV	Lastausgleich	82,0	[Winther, 2008]
Holz-mL	Gute Verbrennung	16,0	[Winther, 2008]
Holz-mL	Lastausgleich	57,0	[Winther, 2008]
Holz-AB	Gute Verbrennung	118,1	[Kelz, 2010], [Kelz, 2012]
Holz-AB	Gute Verbrennung	109,7	[Kelz, 2010], [Kelz, 2012]
Holz-mL	Gute Verbrennung	15,7	[Kelz, 2010], [Kelz, 2012]
Holz-mL	Gute Verbrennung	19,6	[Kelz, 2010], [Kelz, 2012]
Holz-AB	Gute Verbrennung	114,0	[Jalava, 2012]
Holz-mL	Gute Verbrennung	19,4	[Jalava, 2012]
Holz-mL	Gute Verbrennung	28,8	[Orasche, 2012]
Holz-mL	Gute Verbrennung	48,0	[Orasche, 2012]
Holz-mL	Gute Verbrennung	32,6	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	19,5	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	49,2	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Lastausgleich	26,4	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Lastausgleich	56,0	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Lastausgleich	89,7	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Lastausgleich	95,9	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Lastausgleich	60,8	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	30,7	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	39,0	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	19,7	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	20,0	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	9,4	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	13,8	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Lastausgleich	11,6	[ScHoK, 2015]
Holz-mL	Gute Verbrennung	15,1	[Bapred, 2016]
Holz-mL	Lastausgleich	14,2	[Bapred, 2016]
Holz-mL	Gute Verbrennung	55,1	[Bapred, 2016]
Holz-mL	Lastausgleich	42,1	[Bapred, 2016]
Holz-AB	Gute Verbrennung	76,1	[Horak, 2020]
Holz-AB	Brennstofffeuchte	318,0	[Horak, 2020]
Holz-AB	Brennstofffeuchte	802,0	[Horak, 2020]
Holz-AB	Lastausgleich	536,0	[Horak, 2020]
Holz-oV	Gute Verbrennung	218,0	[Horak, 2020]
Holz-oV	Brennstofffeuchte	136,0	[Horak, 2020]
Holz-oV	Lastausgleich	653,0	[Horak, 2020]
Holz-mL	Brennstofffeuchte	21,6	[Horak, 2020]
Holz-mL	Brennstofffeuchte	52,8	[Horak, 2020]
Holz-AB	Gute Verbrennung	54,6	[Krumal, 2023]
Holz-AB	Gute Verbrennung	34,2	[Krumal, 2023]
Holz-AB	Lastausgleich	130,9	[Krumal, 2023]

<i>Kesseltyp</i>	<i>Datentyp</i>	<i>Gesamtstaub TSP mg/MJ</i>	<i>Quelle</i>
Holz-AB	Gute Verbrennung	39,4	[Krumal, 2023]
Holz-AB	Lastausgleich	81,2	[Krumal, 2023]
Holz-AB	Lastausgleich	129,0	[Krumal, 2023]
Holz-oV	Gute Verbrennung	19,7	[Krumal, 2023]
Holz-oV	Lastausgleich	31,7	[Krumal, 2023]
Holz-oV	Lastausgleich	56,0	[Krumal, 2023]
Holz-oV	Gute Verbrennung	26,5	[Krumal, 2023]
Holz-oV	Lastausgleich	45,0	[Krumal, 2023]
Holz-oV	Lastausgleich	201,5	[Krumal, 2023]
Holz-mL	Gute Verbrennung	10,8	[Krumal, 2023]
Holz-mL	Gute Verbrennung	25,4	[Krumal, 2023]
Holz-mL	Gute Verbrennung	16,5	[Krumal, 2023]
Holz-mL	Gute Verbrennung	24,2	[Krumal, 2023]
Holz-mL	Lastausgleich	233,1	[Krumal, 2023]
Holz-mL	Lastausgleich	45,9	[Krumal, 2023]

7 Verzeichnisse

7.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Statistische Auswertung der Messergebnisse zu ScheitholzKaminöfen bei guter Verbrennung	12
Tabelle 3-2: Statistische Auswertung der im Feld gemessenen Gesamtstaubemissionen klassifiziert hinsichtlich Ofenbetreiber_in	14
Tabelle 3-3: Fragen zur Bedienung des Scheitholzofens	16
Tabelle 3-4: Fragen zur Variation der Lufteinstellungen beim Einzelofen	17
Tabelle 3-5: Fragen zum Wassergehalt des verwendeten Brennstoffs	19
Tabelle 4-1: Statistische Auswertung von Scheitholzkesseln bei gutem Anlagenbetrieb	24
Tabelle 4-2: Statistische Auswertung der Daten zu Scheitholzkesseln bei geringer Last	25
Tabelle 4-3: Faktoren für Lastausgleich abhängig vom Kesseltyp	26
Tabelle 4-4: Statistische Auswertung zu Scheitholzkessel bei Messungen mit feuchtem Brennstoff	27
Tabelle 4-5: Faktoren für zu feuchten Brennstoff abhängig vom Kesseltyp	27
Tabelle 4-6: Fragen Kesseltypus Scheitholzkessel	28
Tabelle 4-7: Fragen zum Lastausgleich der installierten Biomasseheizung	29
Tabelle 4-8: Fragen zum Wassergehalt des verwendeten Brennstoffs	31
Tabelle 5-1: Gebietsabdeckung und Anzahl an Befragungen bei vorgeschlagenen Studien	32
Tabelle 5-2: Äquivalente Fragen zum Thema Anlagenbetrieb	32
Tabelle 5-3: Fragen zum Thema Bedienung der Luftklappe	33
Tabelle 5-4: Äquivalente Fragen über Einsatz von feuchtem Holz	34
Tabelle 5-5: Gebietsabdeckung und Anzahl an Befragungen bei vorgeschlagenen Studien	34
Tabelle 5-6: Äquivalente Fragen bei Scheitholzkessel	34

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Boxplot der Messergebnisse zu ScheitholzKaminöfen bei guter Verbrennung ..	12
Abbildung 3-2: Boxplot der im Feld gemessenen Gesamtstaubemissionen.....	13
Abbildung 4-1: Boxplot der Daten zu Scheitholzkessel bei gutem Anlagenbetrieb	23
Abbildung 4-2: Boxplot der Daten zu Scheitholzkessel bei geringer Last.....	25
Abbildung 4-3: Boxplot der Daten zu Scheitholzkessel bei Messungen mit feuchtem Brennstoff	26

8 Literaturverzeichnis

BeReal, 2016

Unveröffentlichte Messdaten ermittelt im Projekt BeReal
Forschungsprojekt FP7-SME-2013-606605
Bioenergy2020+, Wieselburg, 10/2013-09/2016

Bapred, 2016

Unveröffentlichte Messdaten ermittelt im Projekt BaPRed
Bioenergy2020+, Wieselburg, 10/2013-03/2016

EEA, 2023

European Environmental Agency, 2023:
EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023, 1.A.4 Small Combustion
2023.
EEA Report 06/2023, European Environment Agency, Kopenhagen 2023
Available via
https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/88a73b45a4a4483fbac7dec40fd49e75

EEA 1.A.4.bi Annex, 2023

European Environmental Agency, 2023:
EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023, 1.A.4.bi Annex Residential
Combustion 2023.
EEA Report 06/2023, European Environment Agency, Kopenhagen 2023
Available via
https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/74f24acb0c8748f59dc4887383a02420

Fachinger, 2017

Fachinger F., Drewnick F., Gieré R., Borrmann S.:
How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet
stoves: emission factors for different fuels and burning conditions.
Atmos Environ, 158 (2017), pp. 216-226
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.027>

Horak, 2020

Horák J., Laciok V., Krpec K., Hopan F., Dej M., Kubesa P., Ryšavý J., Molchanov O.,
Kuboňová L.:
Influence of the type and output of domestic hot-water boilers and wood moisture on the
production of fine and ultrafine particulate matter.
Atmospheric Environmen 229 (2020) p. 117437
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117437>

Jalava, 2012

Jalava P.I., Happonen M.S., Kelz B., Brunner T., Hakulinen P., Mäki-Paakkanen J.,
Hukkanen A., Jokiniemi J., Obernberger I., Hirvonen M.-R.:
In vitro toxicological characterization of particulate emissions from residential biomass
heating systems based on old and new technologies.
Atmospheric Environment 50 (2012), p. 24-35
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.009>

Johansson, 2004

Johansson L.S., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullin C., Potter A., 2004:
Emissions characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs
and wood pellets.

Atmospheric Environment, 38 (2004), p. 4183–4195

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>

Kelz, 2010

Kelz, J., Brunner T., Obenberger I., Jalava P., and Hirvonen M.-R.:
PM Emissions from Old and Modern Biomass Combustion Systems and Their Health
Effects.

18th European Biomass Conference, Lyon (2010) p1231-1243.

Kelz, 2012

Kelz, J., Brunner, T., Obenberger, I.:
Emission factors and chemical characterisation of fine particulate emissions from
modern and old residential biomass heating systems determined for typical load cycles.
Environ Sci Eur 24, 11 (2012).

<https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-11>

Kirchhof, 2015

Kirchhof J., Schwarz M., Sedlmayer I.:
ScHoK+ - Umfrage über Scheitholzkessel – Endverbraucher und Installateure.
Bioenergy2020+, Wieselburg, 2015 (unveröffentlicht)

Kirchsteiger, 2021

Kirchsteiger B., Kubik F., Sturmlechner R., Stressler H., Schwabl M., Kistler M., Kasper-
Giebl A.:

Real-life emissions from residential wood combustion in Austria: From TSP emissions
to PAH emission profiles, diagnostic ratios and toxic risk assessment.

Atmospheric Pollution Research 12 (8) (2021) p.101127

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101127>

Klauser, 2018

Klauser F., Carlon E., Kistler M., Schmidl C., Schwabel M., Sturmlechner R., Haslinger
W., Kasper-Giebl A.:

Emission characterization of modern wood stoves under real-life oriented operating
conditions.

Atmospheric Environment 192 (2018), p. 257-266

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.024>

Krumal, 2023

Křůmal K., Mikuška P., Horák J., Jaroch M., Hopan F., Kuboňová L.:

Gaseous and particulate emissions from the combustion of hard and soft wood for
household heating: Influence of boiler type and heat output.

Atmospheric Pollution Research 14,7 (2023) p. 101801

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101801>

Mack, 2019

Mack R., Schön C., Kuptz D., Hartmann H.
Nutzereinflüsse auf das Emissionsverhalten von Kaminöfen.

Berichte aus dem TFZ 61, Straubing 2019

https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/tfz_bericht_61_nutzereinf_luesse.pdf

- Obernberger, 2008
Obernberger I., Brunner T., Thures J., Bärnthaler G., Kanzian W., Brenner M.:
Feinstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen – Endbericht Projekt I-2-5.
Austrian Bioenergy Centre 2008
- ÖNORM EN 13240, 2007
ÖNORM EN 13240:2007-01
Raumheizer für feste Brennstoffe. Anforderungen und Prüfungen.
Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2007
- ÖNORM EN 13284-1, 2017
ÖNORM EN 13284-1:2017-12-15
Emissionen aus stationären Quellen - Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei
geringen Staubkonzentrationen - Teil 1: Manuelles gravimetrisches Verfahren.
Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2017
- ÖNORM EN 16510-1, 2023
ÖNORM EN 16510-1:2023-04
Häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und
Prüfverfahren.
Austrian Standards International, Wien 2023
- Orasche, 2012
Orasche J., Seidel T., Hartmann H., Schnelle-Kreis J., Chow J.C., Ruppert H.,
Zimmermann R.:
Comparison of Emissions from Wood Combustion. Part 1: Emission Factors and
Characteristics from Different Small-Scale Residential Heating Appliances Considering
Particulate Matter and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)-Related Toxicological
Potential of Particle-Bound Organic Species
Energy & Fuels 2012, 26 (11), p. 6695-6704
<https://doi.org/10.1021/ef301295k>
- Reichert, 2016
Reicher G., Schmiedl C., Haslinger W., Schwabl M., Moser W., Aigenbauer S., Wöhler
M., Hochenauer C.:
Investigation of user behavior and assessment of typical operation mode for different
types of firewood room heating appliances in Austria.
Renewable Energy 93, 2016, pp.245-254
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.092>
- Reichert, 2017
Reichert, G.; Hartmann, H.; Haslinger, W.; Oehler, H.; Mack, R.; Schmidl, C.; Schön, C.;
Schwabl, M.; Stressler, H.; Sturmlechner, R.; Hochenauer, C.:
Effect of draught conditions and ignition technique on combustion performance of
firewood room heaters.
Renew. Energy 105 (2017), p.547–560
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.017>
- Reichert, 2018
Reichert G., Schmiedl C., Haslinger W., Stressler H., Sturmlechner R., Schwabl M.,
Hochenauer C.:
Novel Method Evaluating Real-Life Performance of Firewood Roomheaters in Europe.
Energy Fuels, 2018, 32, p. 1874-1883
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03673>

Rönnbäck, 2016

Rönnbäck M., Persson H., Jespersen M.G., Jensen J.H.
 beReal Deliverable D7.1 - Documentation and evaluation of field data demonstration.
 Projektbericht Projekt FP7-SME-2013-2, 2016
https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/d7.1_documentation_and_evaluation_of_field_data_demonstration.pdf

Schieder, 2013

Schieder W., Storch A., Fischer D., Pia T, Zechmeister A, Poupa S, Wampl S.:
 Luftschadstoffausstoß von Festbrennstoff-Einzelöfen: Untersuchung des Einflusses von
 Festbrennstoff-Einzelöfen auf den Ausstoß von Luftschadstoffen.
 Report REP-0448, Umweltbundesamt, Wien, 2013

ScHoK, 2015

Unveröffentlichte Messdaten ermittelt im Projekt ScHoK+
 Bioenergy2020+, Wieselburg, 11/2012-03/2015

Spitzer, 1998

Spitzer J., Enzinger P., Frankhauser G., Fritz W., Golja F., Stieglbrunner R.:
 Endbericht Emissionsfaktoren für feste Brennstoffe.
 Institut für Energietechnik, Graz 1998

Stressler, 2015

Stressler, H.:
 Emissionsminderung und Effizienzsteigerung bei Scheitholzöfen durch Änderung der
 Betriebsweise und Integration von Katalysatoren.
 Master-Thesis Austrian Marketing University of Applied Sciences, Wieselburg, 2015

Sturmlechner, 2019

Sturmlechner R., Schmidl C., Carlon E., Reichert G., Stressler H., Klauser F., Kelz J.,
 Schwabl M., Kirchsteiger B., Kasper-Giebl A., Höftberger E., Haslinger W.:
 Real-Life Emission Factor Assessment for Biomass Heating Appliances at a Field
 Measurement Campaign in Styria, Austria.
 WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XXVII, 2019, pp221-
 231
<https://doi.org/10.2495/AIR190221>

UBA, 2023

Umweltbundesamt: Anderl M., Brendle C., Colson J., Gangl M., Makoschitz L., Mayer .,
 Pazdernik K., Poupa S., Purzner M., Roll M., Schieder W., Schmidt G., Stranner G.,
 Wieser M., Wankmüller R., Zechmeister A.:
 Austria's Informative Inventory Report (IIR) 2023. Submission under the UNECE
 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and Directive (EU) 2016/2284
 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants.
 Umweltbundesamt Wien, 2023 Reports, Band 0855 ISBN: 978-3-99004-688-3
<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0855.pdf>

VDI 2066-1, 2021

VDI 2066 Blatt 1:2021-05
 Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen - Gravimetrische
 Bestimmung der Staubbelastung.
 Beuth Verlag, Berlin, 2021

Winther, 2008

Winther, K.: Vurdering af brændekedlers partikelemission til luft i Danmark (in Danish)
Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 6, 2008

Wöhler, 2016

Wöhler M., Andersen J.S., Becker G., Persson H., Reichert G., Schön C., Schmidl C.,
Jaeger D., Pelz S.:

Investigation of real life operation of biomass room heating appliances – Results of a
European survey.

Applied Energy 169, 2016, pp. 240-249

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.119>