

DEZERNAT LUFTREINHALTUNG: EMISSIONEN

Emission ultrafeiner Partikel durch Kaminöfen

Dominik Wildanger, Jens Cordes



Im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag des Umweltbundesamtes hat das HLNUG ein Messverfahren für die Ermittlung der Konzentration ultrafeiner Partikel im Abgas von Kaminöfen validiert und die zugehörigen Verfahrenskenngrößen ermittelt. Außerdem wurde die Emissionsminderung durch einen elektrostatischen Staubabscheider im Kamin untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Feinstaubemissionen durch den Einsatz eines einfach nachrüstbaren Elektrofilters erheblich reduziert werden können.



Durch den Einsatz eines Elektrofilters können die UFP-Emissionen eines Kaminofens um **97 %** reduziert werden.

Hintergrund

Kaminöfen werden einerseits als gemütliche Wärmequelle, die man im heimischen Wohnzimmer nicht missen möchte, und andererseits aufgrund ihrer Emissionen als nachbarschaftliches Ärgernis und Gesundheitsrisiko wahrgenommen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes hat das HLNUG die Emissionen ultrafeiner Partikel (UFP) und die Minderungsmöglichkeit durch Elektrofilter untersucht.

Als ultrafeine Partikel bezeichnet man kleinste Staubteilchen, die bis tief in die Lunge eindringen können. Sie entstehen beispielsweise bei Verbrennungsprozessen wie in einem Kaminofen. Im Rahmen eines durch das Umweltbundesamt geförderten Forschungsprojekts wurde am HLNUG ein Messverfahren für die Bestimmung ultrafeiner Partikel in Kaminofenabgasen validiert. Weiterhin wurde untersucht, in welchem Umfang die Partikelemissionen von Kaminöfen durch den Einsatz eines elektrostatischen Partikelabscheiders gemindert werden können.

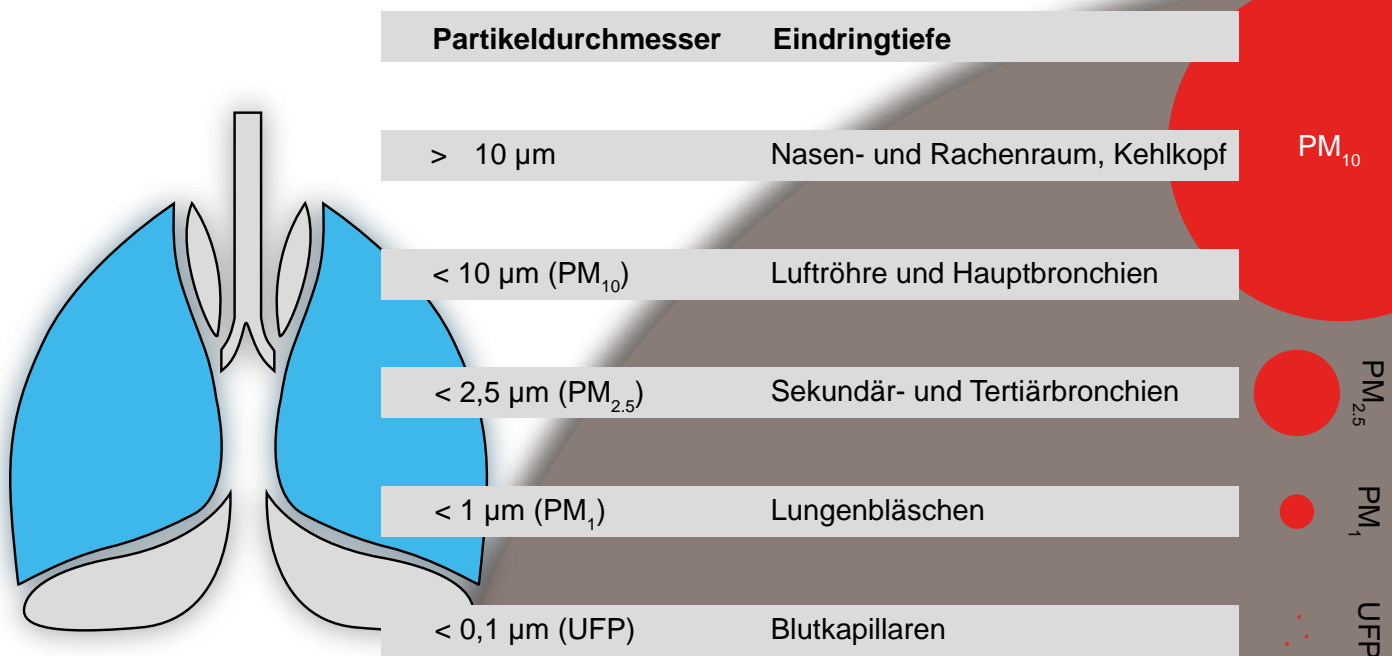
Um die Emission von Staubpartikeln aus Kaminöfen zu begrenzen, existiert ein gesetzlicher Grenzwert für Staubemissionen von Kaminöfen von 40 mg/m^3 . Aufgrund ihres geringen Volumens haben ultrafeine Partikel nur sehr geringe Massen. UFP tragen daher zur emittierten Staubmasse kaum bei und werden vom vorgenannten Grenzwert praktisch nicht reguliert. Gleichzeitig können diese Partikel jedoch tief in die menschliche Lunge eindringen. Entsprechend ist es wichtig, mehr über diese Emissionen zu lernen, und es bedarf eines Messverfahrens, das die Charakterisierung der Emissionen ultrafeiner Partikel und somit auch die Beurteilung von Minderungsmaßnahmen erlaubt. Ein solches Messverfahren erfasst nicht die freigesetzte Masse, sondern die Anzahl freigesetzter ultrafeiner Partikel.

Messung von Partikelanzahlkonzentrationen

Luftgetragene Staubemissionen, sogenannter Feinstaub, werden im Bereich des Umweltschutzes in verschiedene Größenklassen eingeteilt. Klassischerweise sind dies PM_{10} und $PM_{2,5}$. Dabei steht PM für „Particulate Matter“ (engl. für „partikelförmige Materie“, also Staub) und die Zahlen dahinter geben den maximalen aerodynamischen Durchmesser der berücksichtigten Staubteilchen in Mikrometer (μm) an. Entsprechend gehören zur Größenklasse PM_{10} alle Staubteilchen bis zu einem aerodynamischen Durchmesser von $10 \mu m$, und zur Größenklasse $PM_{2,5}$ alle Staubteilchen bis zu einem aerodynamischen Durchmesser von $2,5 \mu m$. $10 \mu m$ entsprechen nur ungefähr einem Sechstel des Durchmessers eines Haares, ultrafeine Partikel sind noch einmal um mehrere Größenordnungen kleiner.

Üblicherweise werden Staubemissionen anhand ihres Gewichts bestimmt. Dazu wird eine definierte Menge des zu analysierende Abgases durch geeignete Messfilter gesaugt. Die Staubteilchen werden vom Filter zurückgehalten und durch die Massenzunahme des Filters kann die Staubbelastung des Abgases in Bezug auf die Staubmasse quantifiziert werden. Ultrafeine Partikel sind jedoch so klein, dass sie kaum eine Masse

Abb. 1: Größenvergleich von Staubpartikeln verschiedener Durchmesser und ihre Eindringtiefe in die menschliche Lunge (7)





Aerodynamischer Durchmesser:

Da Staubteilchen beliebige Formen haben können, ist der geometrische Durchmesser nicht definiert und auch messtechnisch nicht zugänglich. Daher wird der sogenannte aerodynamische Durchmesser verwendet. Dieser gibt an, welchen Durchmesser ein kugelförmiger Partikel gleicher Dichte haben müsste, um in einem Luftstrom dasselbe (aerodynamische) Verhalten zu zeigen, wie das untersuchte Partikel.

tragen. Ein ultrafeines Partikel mit einem Durchmesser von 100 nm ist 1 000 000 mal leichter als ein PM_{10} Partikel mit einem Durchmesser von 10 μm . Entsprechend erlauben die massebezogenen Staubemissionsmessungen kaum Rückschlüsse auf die Emission ultrafeiner Partikel. Für die Bestimmung des Emissionsverhaltens ultrafeiner Partikel ist daher die Angabe der Anzahl der Partikel aussagekräftiger. Um Partikel zählen zu können, müssen diese irgendwie detektiert werden können. Aufgrund ihrer geringen Größe (der Durchmesser ist deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichts im sichtbaren Spektrum) sind ultrafeine Partikel allerdings für optischen Verfahren nicht direkt zugänglich, also quasi „unsichtbar“. Daher bedarf es eines Tricks, um diese Partikel „sichtbar“ und somit einfach zählbar zu machen. Der Trick besteht darin, die ultrafeinen Partikel größer zu machen, um sie dann mit optischen Verfahren detektieren zu können. Genau das passiert in einem Kondensationspartikelzähler (engl. Condensation Particle Counter, kurz CPC): In diesem wird das zu untersuchende Abgas bei erhöhter Temperatur mit einem Lösungsmittel gesättigt. Anschließend wird das mit Lösungsmittel gesättigte Abgas im sogenannten Kondensator leicht abgekühlt. Dies hat zur Folge, dass das gasförmige Lösungsmittel kondensiert. Dabei fungieren die ultrafeinen Partikel als Kondensationskeime, das heißt, dass sich an die ultrafeinen Partikel Lösungsmitteltropfen anlagern und die Partikel dadurch deutlich größer werden. Diese sind dann optisch detektierbar und können gezählt werden. Dieses in der Theorie einfach klingende Verfahren ist in der technischen Umsetzung relativ kompliziert. Dies gilt insbesondere, wenn die Messungen an Abgasen komplexer Zusammensetzung, wie beispielsweise an einem Kaminofen, durchgeführt werden. In diesen Fall bedarf es einer umfangreichen Aufarbeitung des Abgases, bevor die eigentliche Messung stattfinden kann.

Das Forschungsprojekt

Bisher gibt es nur in wenigen Bereichen, etwa dem Automobilsektor, Regulierungen für die Emission ultrafeiner Partikel durch Verbrennungsprozesse. Allgemein verbindliche Vorgaben existieren für die Emissionen von ultrafeinen Partikeln aus Kaminöfen bislang nicht. Besonders „saubere“ Kaminöfen mit einer entsprechenden Abgasreinigung können allerdings mit dem Umweltzeichen Blauer Engel ausgezeichnet werden. Die Vergaberichtlinie für den Blauen Engel für Kaminöfen sieht eine Obergrenze für die emittierte Partikelanzahlkonzentration vor, die ein Kaminofen für den Erhalt des Blauen Engels einhalten muss. Entsprechend bestand der Bedarf nach einem belastbaren Messverfahren, um die Vergabekriterien umsetzen zu können. Dazu wurde ein Messverfahren aus dem Automobilbereich auf die Bedingungen der Kamin-

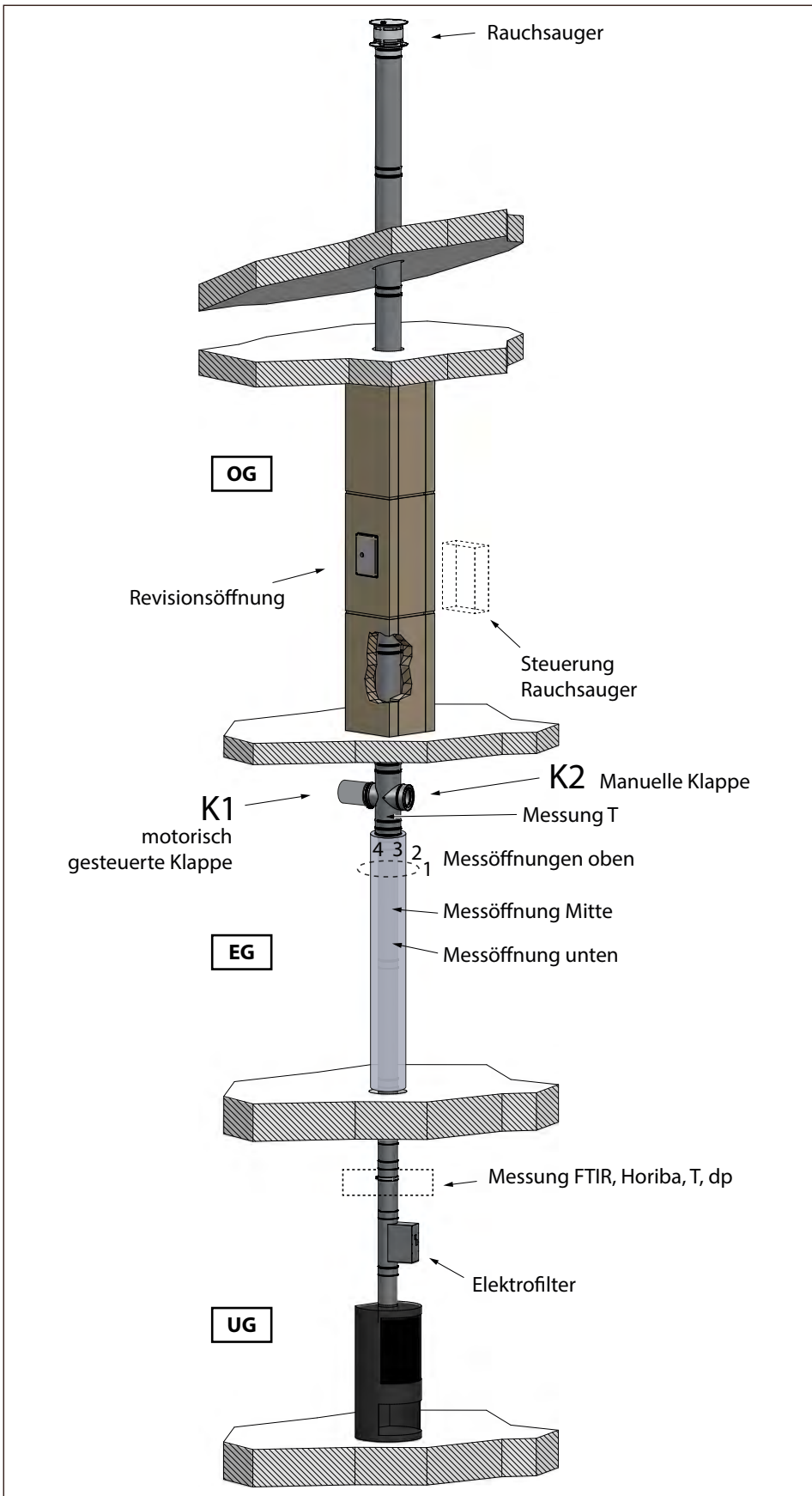


Abb. 2: Kaminofenprüfstand des HLNUG in Kassel

ofenabgase angepasst. Zur Validierung dieses Messverfahrens hat das HLNUG auf Grundlage seiner Erfahrungen mit Emissionsringversuchen einen Kaminofenprüfstand errichtet und einen Ringversuch vorbereitet und organisiert. Weiterhin wurden Untersuchungen durchgeführt, um das Emissionsminderungspotential von Elektrofiltern in Bezug auf Feinstaub und Ultrafeinstaub zu untersuchen.

Der Kaminofenprüfstand

Der Kaminofenprüfstand wurde im Keller eines Gebäudes des HLNUG in Kassel eingebaut, mit einem bis zum Kaminauslass senkrechten Abgasrohr (siehe Abbildung 2).

Im Erdgeschoss wurde ein Messraum eingerichtet, in dem über Messöffnungen Probenahmesonden für verschiedene Messgeräte in den Abgaskanal eingeführt werden können. In mehreren Voruntersuchungen sowie im Ringversuch wurden kontinuierlich die Konzentrationen von O_2 , CO_2 , CO , NO_x und H_2O gemessen. Außerdem wurden der Zug im Kamin, die Temperaturen in der Brennkammer und im Messquerschnitt, sowie die Partikelanzahlkonzentration im Abgas kontinuierlich erfasst. Zusätzlich wurden im Rahmen von Voruntersuchungen auch die Konzentrationen von gasförmigem Kohlenstoff (OGC) sowie der Partikelmasse untersucht. Die Durchführung dieser Messungen richtete sich dabei nach den Vorgaben der Vergabekriterien für den Blauen Engel für Kaminöfen.

Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde ein Kaminofen mit einer Nennwärmeleistung von 6 kW in Verbindung mit einer Software zur Abbrandsteuerung und einem elektrostatischen Staubabscheider verwendet. Der Betrieb des Kaminofens einschließlich des Nachlegens von Brennholz erfolgte nach Herstellerangaben ohne manuelle Eingriffe (wie dem Öffnen oder Schließen von Luftklappen), abgesehen von der Umstellung von Nennlast auf Teillast nach dem fünften Abbrand.

Das bei der Holzverbrennung im Kaminofen entstehende Rauchgas strömt in den Schornstein und durchströmt dort zunächst den Elektrofilter (ESP), der die Partikel elektrisch auflädt. Diese aggregieren dadurch zu größeren Flocken und lagern sich dann an den Wänden des Schornsteins ab.

Im nächsten Abschnitt des Kamins befindet sich eine beheizte Sonde mit Partikelfilter, die über eine beheizte Leitung einen Probengasstrom zu verschiedenen Gasanalysatoren leitet. Diese sind zum einen ein Gasanalysator mit vorgeschaltetem Gaskühler zur Messung von NO_x , CO , CO_2 und O_2 , ein FTIR (Fourier-Transformations-Infrarotanalysator) zur Messung des Wassergehaltes und ein Gesamtkohlenwasserstoffanalysator (FID).



Anzahl der
Kaminöfen in
Deutschland
2022:
11,5 Mio.

<https://www.schornsteinfeger.de/erhebungen.aspx>

Im nächsten Stockwerk des Gebäudes folgen die Messöffnungen zur Messung der Partikelanzahlkonzentration. Darüber befinden sich größere Öffnungen mit Klappen zur Zugregelung und am Ende des Schornsteins schließlich ein Rauchsauger.

Das zur Messung von Partikelanzahlkonzentrationen verwendete System besteht aus einem Zyklon zur Abscheidung großer Partikel und einer beheizten Leitung zur Verdünnungseinrichtung und zum Messgerät. Die für die Verdünnung benötigte Druckluft wurde vor ihrer Verwendung mit Filtern und Trocknern aufbereitet.

Der ESP wurde mit Werkseinstellungen betrieben und schaltet sich bei diesem Modell automatisch ein, wenn ein bestimmter Temperaturanstieg im Kamin registriert wird.

Der Ringversuch und seine Ergebnisse

Ziel des Ringversuches war die Validierung des Messverfahrens für ultrafeine Partikel. Unter einer Validierung versteht man die Bestimmung der sogenannten Verfahrenskenngrößen. Diese beschreiben, wie stark die Ergebnisse eines Messverfahrens streuen, wenn es mit gleichem Personal und gleicher Ausstattung wiederholt auf eine vergleichbare Probe (Wiederholstandardabweichung) bzw. wenn die gleiche Probe mit verschiedener Ausstattung und von unterschiedlichen Personen aber nach der gleichen Messvorschrift (Vergleichstandardabweichung) untersucht



i
Zyklon:
Als „Zyklon“ werden nicht nur Tropische Wirbelstürme, sondern in der Technik auch Flehkraftabscheider bezeichnet. In einem solchen Zyklon wird ein Gasstrom in einem speziell geformten Bauteil in eine Spiralbewegung gezwungen. Durch die dabei entstehenden Fliehkräfte werden schwere Teilchen (z. B. große Staubpartikel) an die Außenwände gedrückt und können so abgetrennt werden. Ein solcher Zyklon wird auch in „beutellosen“ Staubsaugern genutzt.

Abb. 3: Schichtung von Brennholz und Anzündern (paraffinetränkte Holzwole) zum Anzünden des Kamins

wird. Dazu war es erforderlich, den Kaminofen möglichst reproduzierbar in verschiedenen Zuständen zu betreiben. Um dies zu erreichen, wurde der Kaminofen mit genau definierten Holzstücken beladen und immer nach dem gleichen Verfahren angezündet und betrieben.

Für die Bestimmung der Wiederholstandardabweichung wurde der Kaminofen wiederholt gemäß den Vergaberichtlinien für den Blauen Engel betrieben und die Emission ultrafeiner Partikel gemessen. Dabei ergab sich eine relative Wiederholstandardabweichung von 16 Prozent. Das bedeutet, dass bei ein und demselben Kaminofen und unter Einsatz der immer gleichen Ausrüstung die Ergebnisse um 16 Prozent streuen. Anders ausgedrückt liegen bei wiederholten Messungen unter gleichen Voraussetzungen ungefähr 19 von 20 Messergebnissen in einem Bereich von $\pm 32\%$ um den Mittelwert der Messergebnisse.

Im nächsten Schritt wurde die Vergleichstandardabweichung bestimmt. Diese gibt an, wie sehr die Ergebnisse streuen, wenn verschiedene

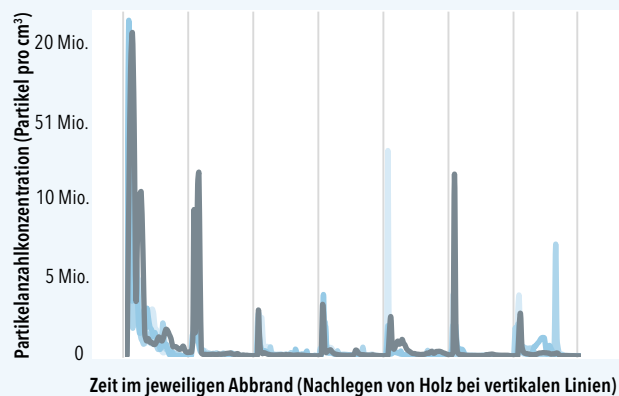


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Partikelanzahlkonzentration in vier verschiedenen Abbrandreihen mit eingeschaltetem Staubabscheider

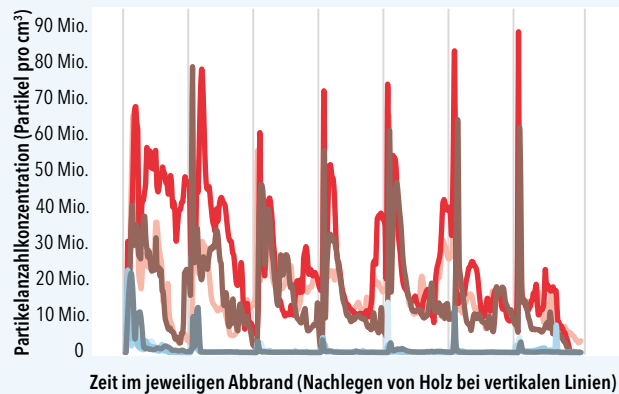


Abb. 5: Verlauf der Partikelkonzentration in vier Abbrandreihen mit eingeschaltetem (blaue Linien), sowie in drei Abbrandreihen mit ausgeschaltetem Staubabscheider (rote Linien)



Labore den gleichen Kaminofen bezüglich seines Emissionsverhaltens ultrafeiner Partikel charakterisieren. Dazu wurden acht Labore aus dem In- und Ausland (Deutschland, Dänemark und Schweiz) eingeladen, um mit ihren Messgeräten und ihrem Personal gleichzeitig Emissionsmessungen am Kaminofenprüfstand in Kassel durchzuführen. Diese Untersuchungen ergaben eine Streuung von 25 Prozent. Das heißt, dass bei Messungen durch verschiedene Labore, also mit unterschiedlichem Personal und unterschiedlicher Ausstattung, ungefähr 19 von 20 Messergebnissen in einem Bereich von $\pm 50\%$ um den Mittelwert der verschiedenen Laborergebnisse liegen.

Neben den Verfahrenskenngrößen wurden im Rahmen der Messungen auch zahlreiche Erkenntnisse über das Emissionsverhalten eines modernen Kamins mit Elektrofilter in Bezug auf ultrafeine Partikel gewonnen. In Abbildung 4 ist der zeitliche Ablauf der Emission ultrafeiner Partikel über mehrere Abbrandreihen illustriert. Jede Kurve stellt 7 Abbrände dar. Die einzelnen Versuche sind zeitlich so skaliert, dass die Zeitpunkte des Anzündens (1. Abbrand) bzw. des Nachlegens von Holz zusammenfallen und auf den vertikalen Gitterlinien liegen. Aus den Daten erkennt man, dass die höchsten Emissionen ultrafeiner Partikel während des Anzündens sowie dem Nachlegen von Holz während der ersten beiden Abbrände entstehen. Im Mittel über sieben Abbrände wurden Partikelanzahlkonzentrationen von 400 000 bis 700 000 Partikel pro cm^3 festgestellt.

Emissionsminderung durch Elektroabscheider

Der untersuchte Kaminofen bot die Möglichkeit, den Elektroabscheider einfach außer Betrieb zu nehmen. Dadurch ergab sich die Möglichkeit zu untersuchen, welches Emissionsminderungspotential Elektrofilter für ultrafeine Partikel und Feinstaub haben. Dazu wurden mehrere Versuche mit abgeschaltetem Elektrofilter durchgeführt und die Partikelemissionen bestimmt. Abbildung 5 zeigt den Vergleich mehrerer Abbrandreihen mit (blaue Kurven) und ohne (rote Kurven) Elektrofilter. Die Ergebnisse der Partikelmessungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Im Ergebnis beträgt die Minderung der Staubmassenkonzentration durch den Elektrofilter 84 Prozent und die Minderung der ultrafeinen Partikel 97 Prozent. Dieses Ergebnis ist sehr erfreulich, da Elektrofilter mit geringem Aufwand an praktisch jedem Kamin nachgerüstet werden können. Damit besteht eine einfache Möglichkeit, das Emissionsverhalten von bereits installierten Kaminöfen deutlich zu verbessern.

Tab. 1: Gemessene Partikelmassenkonzentrationen und Partikelanzahlkonzentrationen mit und ohne eingeschalteten Staubabscheider

Zeitraum	Partikelmassenkonzentration [mg/m ³]			Partikelanzahlkonzentration [#/cm ³]		
	Ohne Abscheider	Mit Abscheider	Minde- rungs- faktor (Abscheide- grad)	Ohne Abscheider	Mit Abscheider	Minde- rungs- faktor (Abscheide- grad)
Abbrand 1 (Anbrand- phase)	49,9	9,0	6 (82 %)	46,1 Mio.	3,43 Mio.	13 (93 %)
Abbrand 2 (Anbrand- phase)				28,0 Mio.	0,668 Mio.	42 (98 %)
Abbrand 3 (Volllast)	23,2	8,4	3 (64 %)	22,4 Mio.	0,164 Mio.	136 (99 %)
Abbrand 4 (Volllast)	71,0	2,7	26 (96 %)	18,2 Mio.	0,191 Mio.	96 (99 %)
Abbrand 5 (Volllast)	52,9	7,2	7 (86 %)	21,4 Mio.	0,245 Mio.	87 (99 %)
Abbrand 6 (Teillast)	7,8	1,8	4 (77 %)	22,1 Mio.	0,291 Mio.	76 (99 %)
Abbrand 7 (Teillast)	17,5	4,5	4 (74 %)	22,8 Mio.	0,398 Mio.	57 (98 %)
Mittelwert	38,6	6,3	6 (84 %)	25,4 Mio.	0,661 Mio.	38 (97 %)



Fazit

Im Rahmen des Forschungsprojektes im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde ein Messverfahren für die Charakterisierung der Emission ultrafeiner Partikel durch Kaminöfen validiert und die zugehörigen Verfahrenskenngrößen ermittelt. Außerdem wurde mit diesem Verfahren der Umfang der Emissionsminderung partikelförmiger Emissionen durch einen Elektrofilter untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Emissionen ultrafeiner Partikel und von Feinstaub durch den Einsatz eines einfach nachrüstbaren Elektrofilters erheblich reduziert werden können. Durch eine flächendeckende Nachrüstung von Kaminöfen könnte die von diesen ausgehende Umweltbelastung signifikant reduziert werden.



Literatur

- (1) World Health Organization. Regional Office for Europe (2021): Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report. (<https://iris.who.int/handle/10665/341712>)
- (2) NAEHER, L.P., BRAUER, M., LIPSETT, M., ZELIKOFF, J.T., SIMPSON, C.D., KONIG, J.Q. & SMITH, K.R. (2007): Woodsmoke Health Effects: A Review. – Inhalation Toxicology, 19: 67-106.
- (3) BIRMILI, W., PIETSCH, A., NIEMEYER, T., KURA, J., HOFFMANN, S., DANIELS, A., ZHAO, J., SUN, J., WEHNER, B., WIEDENSOHLER, A. (2020): Vorkommen und Quellen ultrafeiner Partikel im Innenraum und in der Außenluft – Aktueller Kenntnisstand. – Gefahrstoffe 80 Nr. 01-02: 33-43.
- (4) Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) vom 26. Januar 2010 (BGBl. I S. 38). (https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010)
- (5) RAL gGmbH (2020): Blauer Engel – Das Umweltzeichen – Kaminöfen für Holz – DE-UZ 212- Vergabekriterien – Ausgabe Januar 2020 – Version 8 (<https://www.blauer-engel.de/de/produktwelt/kaminofen-fuer-holz>)
- (6) CORDES, J., STOFFELS, B. & WILDANGER, D. (2015): Die neuen Emissionsringversuche des HLUg – größer, schneller, besser. – Jahresbericht 2014 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie: 99-104, Wiesbaden. (www.hlnug.de/?id=13369)
- (7) CARVALHO, T.C., PETERS, J.I., WILLIAMS, R.O. 3RD (2011): Influence of particle size on regional lung deposition – what evidence is there? Int. J. Pharm. 406(1-2): 1-10.

