

HOLZFEINSTAUB UND DIESELRUSS

Gleiche Korngrösse mit teilweise unterschiedlicher Wirkung

Feinstaub ist auch für den VHP und seine Mitglieder ein Thema. Dieser Artikel kommentiert ausführlich woher Feinstaub kommt, seine Wirkung im Vergleich auch zu Dieseleruss und zeigt schlussendlich Massnahmen auf. **TEXT: DR. THOMAS NUSSBAUMER**

Staubpartikel mit einer Grösse von weniger als 10 Tausendstelmillimetern (kurz PM 10 für Particulate Matter kleiner als 10 Mikrometer) werden als Feinstaub bezeichnet und von zahlreichen technischen Prozessen emittiert. Feinstaub ist um ein Vielfaches kleiner als ein Menschenhaar oder ein feines Sandkorn, welche rund 100 Mikrometer oder 0,1 Millimeter Durchmesser aufweisen (siehe Abbildung 1). Feinstaub zeigt denn auch ein ganz unterschiedliches physikalisches Verhalten in der Atmosphäre. Während ein Sandkorn unter normalen Bedingungen nach kurzer Zeit durch Sedimentation auf den Boden zurückfällt, verbleibt Feinstaub wegen der geringen Masse und der grossen Oberfläche während langer Zeit in Schwebelage und wird deshalb auch als Schwebestaub bezeichnet. Neben festen Partikeln sind in der Umgebungsluft auch kleine Flüssigkeitstropfen enthalten, wobei die Mischung von Feinstaub, Tröpfchen und Gas auch als Aerosol bezeichnet wird. Nicht sedimentierte Partikel und Tröpfchen treten ab einer gewissen Konzentration als sichtbarer Smog in Erscheinung.

Quellen von Feinstaub

Die wichtigsten Quellen von Feinstaub sind Verbrennungsprozesse, Abrieb von Reifen, Strassen und Bremsbelägen, industrielle Prozesse sowie

die Aufwirbelung von Staub durch Verkehr und Bodenbearbeitung in Landwirtschaft und Bauwesen. Feinstaub aus Verbrennungsprozessen stammt vor allem von Dieselmotoren sowie aus der Verbrennung von Kohle, Biomasse und Abfall in Feuerungsanlagen und – was zu verhindern ist – von offenen Feuern. Natürliche Aerosole stammen von Vulkanausbrüchen und Waldbränden, von Salztropfen aus dem Meer sowie von der Absonderung von pflanzlichen Mikroorganismen wie Sporen von 1 bis 50 Mikrometern. Pollen sind demgegenüber bereits zwischen 20 und 100 Mikrometer gross und zählen somit nicht zum Feinstaub.

Sekundäre Aerosole

Nebst primären Aerosolen von emittierten Feststoffen und Tröpfchen können in der Atmosphäre auch sekundäre Aerosole durch Umwandlung von gasförmigen Schadstoffen entstehen. Von Bedeutung sind zum Beispiel aus Stickstoffoxiden (NO_x) gebildete Nitrate sowie aus Schwefeldioxid (SO₂) gebildetes Sulfat. Weil Feinstaub während langer Zeit in der Umgebungsluft schweben, können sie mit dem Wind über Hunderte von Kilometern transportiert werden. Durch physikalische und chemische Vorgänge verändern sich die Eigenschaften der Stäube in der Atmosphäre zum Teil erheblich, was auch als Alterung

bezeichnet wird. Es gibt Hinweise, dass frische, direkt am Auspuff oder Kamin austretende Partikel am schädlichsten sind, da ihre Reaktivität in der Atmosphäre zum Beispiel durch Oxidation vermindert wird.

Gesundheitswirkungen von Feinstaub

Feinstaub kann allein und in Kombination mit gasförmigen Luftverunreinigungen zu starken gesundheitlichen Schädigungen führen. Da mit der Umgebungsluft eingeatmete Feinstäube nur zu einem geringen Teil in Nase und Rachen abgeschieden werden, kommen sie mit dem gesamten Atemstrahl in Kontakt und gelangen über die Bronchien bis in die Lungen. Feinstaub führt deshalb zu Husten, Bronchitis und Asthma und kann andere chronische Lungenerkrankungen auslösen. Im Weiteren sind zumindest Feinstäube wie Dieseleruss oder Zigarettenrauch kanzerogen und können somit zum Beispiel Lungenkrebs auslösen. Je feiner die Teilchen sind, umso weiter können sie sich im Körper ausbreiten. Ultrafeine Partikel kleiner als 0,1 Mikrometer können über das feinverästelte System von der Luft in das Blut übertreten. Via Blut breiten sie sich im ganzen Körper aus und führen so unter anderem zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen und zu möglichen Schädigungen des Zentralnervensystems. Besonders bedenklich ist, dass ultra-

feine Teilchen auch direkt von der Nase ins Gehirn gelangen können. Die Gefährlichkeit von Feinstäuben ist deshalb unter anderem eine Folge ihrer geringen Grösse, welche die Aufnahme im Körper begünstigt. Feinstaub angegeben als PM 10 oder PM 2,5 gilt deshalb seit den 1990er Jahren als wichtigster Indikator der Gesundheitsschädigung durch Luftschadstoffe. So zeigt zum Beispiel eine Studie in den USA einen Zusammenhang zwischen Todesfallrate und Feinstaubbelastung (Abbildung 2), während eine Untersuchung in der Schweiz eine Abhängigkeit zwischen nächtlichem Husten bei Kindern und Feinstaub in der Umgebungsluft nachweist (Abbildung 3).

Es ist heute unbestritten, dass Feinstäube gesundheitsschädlich und deshalb an der Quelle zu verhindern sind. Dies ist umso dringlicher, als die zum Schutz der Menschen eingeführten Grenzwerte in der Umgebungsluft zum Teil erheblich und oft überschritten werden.

Massnahmen zur Partikelminderung

Zur Verminderung der Feinstäube kommen einerseits Primärmassnahmen wie optimierte Verbrennungstechniken oder abriebfestere Bremsbeläge in Frage. Für viele Anwendungen bieten sich anstatt oder in Ergänzung zu Primärmassnahmen auch Sekundärmassnahmen an. Dazu zählen zum Beispiel Partikelfilter für Dieselmotoren, die eine hocheffiziente, durch innermotorische Verbesserungen nicht annähernd erreichbare Reduktion erzielen können. Das Gleiche gilt für Abscheidesysteme für feste Brennstoffe, da zum Beispiel aus der Biomasseverbrennung allein schon als Folge der Aschebestandteile hohe Feinstaubemissionen resultieren, die durch feuerungstechnische Massnahmen allein nicht auf ein für Grossanlagen tolerierbares Mass reduziert werden können. Im Zuge der weiteren Anstrengungen zur Luftreinhaltung werden deshalb Abscheideverfahren für Feststofffeuerungen an Bedeutung gewinnen. Für Anwendungen über 1 MW stehen dazu heute bereits Abscheidesysteme als Stand der Technik zur Ver-

fügung. So erreichen vor allem Gewebefilter eine fast vollständige Abscheidung auf Staubgehalte im Abgas von bis zu unter $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 11 Vol.-% O_2 . Derzeit werden allerdings bevorzugt Elektrofilter eingesetzt, die typische Reingaswerte zwischen $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erzielen. In Zukunft ist denkbar, dass auch kleinere Anlagen, möglicherweise bis hin zu häuslichen Heizsystemen, mit Abscheidesystemen ausgerüstet werden. Dies setzt die Entwicklung und Praxiseinführung von für kleine Leistungen optimierten Abscheidern voraus. Erste Anstrengungen dazu wurden in der Schweiz in einem Projekt der Empa Dübendorf mit einem Industriepartner gemacht, aber auch in Norwegen und anderen Ländern werden Klein-Elektrofilter für häusliche Heizsysteme angeboten.

Messung von Partikeln im Abgas

Obwohl die Notwendigkeit der Feinstaubminderung unbestritten ist, bestehen bezüglich Zielgrössen und Messverfahren noch Unsicherheiten, die begleitend zur Einführung von Reduktionsmassnahmen zu klären

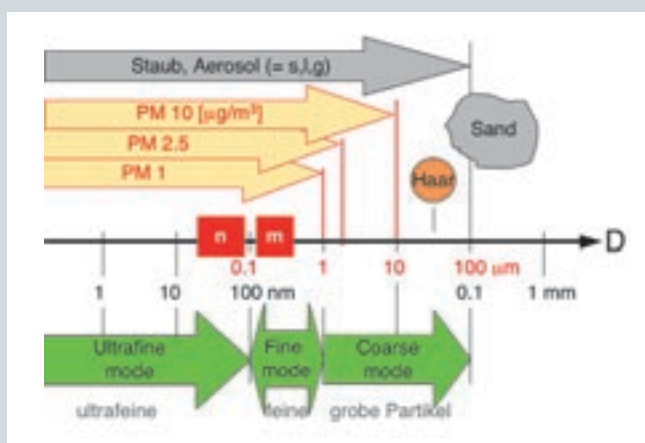


Abb 1: Grössenbereich und Bezeichnung von Stäuben bzw. Aerosolen (Partikel und Tröpfchen in einer Gasphase, d.h.: s=solid, l=liquid, g=gas in Mischung).

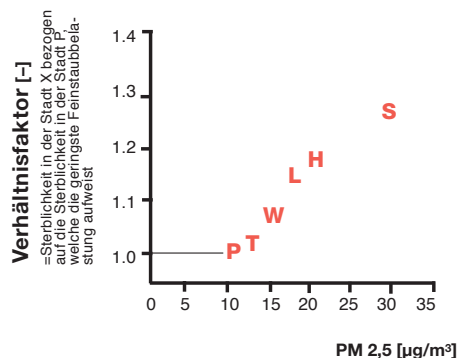


Abb 2: Sterblichkeit in sechs Städten der USA bezogen auf die Sterblichkeit in der Stadt mit der geringsten Feinstaubbelastung in Abhängigkeit des Feinstaubgehalts in der Umgebungsluft angegeben als PM 2.5 nach [Dockery et al. 1993]. Der Verhältnissfaktor ist = 1 für die Stadt P. Die Buchstaben stehen für P = Portage, T = Topeka, W = Watertown, L = St. Louis, H = Harriman, S = Steubenville.

sind. So beziehen sich heutige Emissionsgrenzwerte ausschliesslich auf die Masse an Feinstaub im Abgas. Das Gefährdungspotenzial der Stäube wird aber durch die Masse allein nur unvollständig beschrieben, da ihre Schädlichkeit durch weitere Faktoren beeinflusst wird. Weil feine Partikel bis in die Lunge gelangen und Feinstpartikel in das Blut übergehen können, ist vor allem auch die Korngrösse von besonderer Bedeutung. Mit abnehmender Grösse nimmt auch die spezifische Oberfläche zu, welche als potenzielle Reaktionsfläche wirksam werden kann. Beide Effekte werden durch die Bewertung der Masse nicht erfasst. So weist eine bestimmte Masse von Partikeln mit einer Grösse von 0,1 Mikrometern die zehnfache Oberfläche der gleichen Masse von Partikeln mit 1 Mikrometer Grösse auf. Bezüglich Anzahl beträgt der Unterschied gar das Tausendfache.

Entscheidend die Korngrösse

Für die Festlegung künftiger Emissionsgrenzwerte ist deshalb zu prüfen, ob zusätzlich zur Masse weitere Para-

meter berücksichtigt werden sollen.

Bei Immissionsgrenzwerten geschieht dies ansatzweise bereits durch die Unterscheidung verschiedener Grössenklassen wie PM 10, PM 2,5 und PM 1. Bei Emissionsmessungen können dagegen nebst der Partikelmasse auch die Partikelanzahl und die Korngröszenverteilung erfasst werden. Heutige Messverfahren erlauben so auch einen direkten Vergleich zwischen Abgas und Umgebungsluft. Damit wurde zum Beispiel gezeigt, dass das Abgas einer mit Erdgas befeuerten Gasturbine weniger Feinstaub enthält als die Umgebungsluft (Abbildung 4). Dies zeigt, dass in der Luft vorhandener Russ in der Gasturbinenbrennkammer verbrannt wird. Im Vergleich dazu zeigt das Abgas einer Holzfeuerung oder eines Dieselmotors einen um mehrere Zehnerpotenzen erhöhten Gehalt an Feinstaub, den es in Zukunft zu vermindern gilt.

Nebst der Korngrösse steht für künftige Messverfahren auch die Erfassung weiterer Einflussgrössen wie der reaktiven Oberfläche zur Diskussion. Daneben kann aber auch die chemische Zu-

sammensetzung die Gesundheitswirkung von Feinstäuben beeinflussen, was mit heutigen Emissionsgrenzwerten ebenfalls nicht berücksichtigt wird. So werden bei Feinstaub-Inventaren zum Beispiel Dieseleruss und Staub von automatischen Holzfeuerungen lediglich anhand der Masse verglichen, obwohl die chemische Zusammensetzung völlig unterschiedlich ist.

Vergleich Dieseleruss und Holzfeuerungen

Da Holzfeuerungen insgesamt relativ hohe Staubemissionen aufweisen, tragen sie zum Beispiel in der Schweiz in vergleichbarem Mass zur PM-10-Belastung bei wie sämtliche Dieselmotoren, obwohl Diesel dreimal so viel zur Energieversorgung beiträgt wie Holz. Dass verschiedene Feinstäube stark unterschiedliche Umweltauswirkungen verursachen können, ist allerdings bei einem solchen Vergleich anhand der Masse nicht berücksichtigt. So besteht Dieseleruss vorwiegend aus Kohlenstoff und er kann zudem gesundheitsschädliche organische Substanzen wie kanzerogene polyzyklische

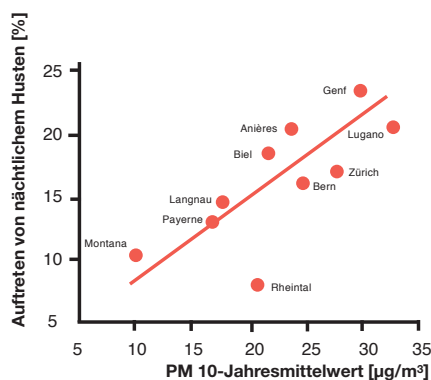


Abb 3: Auftreten von nächtlichem Husten bei Kindern in verschiedenen Ortschaften der Schweiz in Abhängigkeit der Feinstaub-Belastung angegeben als PM 10 nach [Braun-Fahrländer et al. 1997].

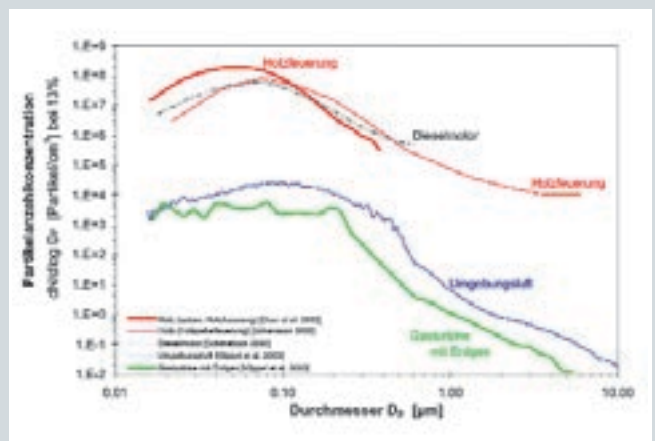


Abb 4: Korngröszenverteilung von Feinstaub angegeben als Anzahlkonzentration für Umgebungsluft im Vergleich zum Abgas einer mit Erdgas befeuerten Gasturbine und dem Abgas von zwei Holzfeuerungen und einem Dieselmotor. Messungen von [Klippel et al. 2003] mit SMPS und OPC, wobei Umgebungsluft und Gasturbine in der Nähe von Baden (CH) gemessen wurden. Messungen [Oser et al. 2000] und [Schmatloch 2000] mit SMPS, Messungen [Johansson 2002] mit ELPI umgerechnet auf Stokes-Durchmesser.

aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) enthalten. Staub aus vollständiger Holzverbrennung besteht dagegen hauptsächlich aus Salzen wie zum Beispiel Kaliumchlorid, das auch als Düngemittel verwendet wird und eine geringere Gefährdung als Russ darstellt. Zudem verkürzt die Wasserlöslichkeit der Salze möglicherweise die Aufenthaltzeit in der Atmosphäre. Der grundlegende Unterschied zwischen Dieseleruss und Staub aus quasi-vollständiger Holzverbrennung ist bereits visuell sofort erkennbar, wie Abbildung 5 zeigt.

Während die Gesundheitswirkungen von Dieseleruss bereits vielfach untersucht wurden, ist bis heute kein Vergleich zwischen Dieseleruss und salzartigen Partikeln aus Holzfeuerungen bekannt. Diese Thematik ist deshalb Gegenstand eines laufenden Forschungsprojekts, das vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützt wird. Die bisherigen in-vitro Tests mit Partikeln an Lungenzellen von Hamstern zeigen,

dass Dieseleruss eine deutlich höhere Toxizität aufweist als Partikel aus vollständiger Holzverbrennung (Abbildung 6). Untersuchungen zur Toxizität der Partikel aus unvollständiger Holzverbrennung sowie Analysen zur Kanzerogenität der Partikel sind derzeit im Gang.

Unverbrannte Stäube aus Holzfeuerungen

Auch bei der Holzverbrennung kann Russ als Folge einer unvollständigen Verbrennung gebildet werden, was zum Beispiel bei Verwendung von feuchtem Holz in einem Holzofen typisch ist. Die Flugasche zeigt dann bereits eine dunkle Verfärbung, wie die Partikel aus dem einfachen Holzofen in Abbildung 7 zeigt. In modernen Holzfeuerungen lässt sich dieser Staubanteil bei korrektem Betrieb allerdings weitgehend vermeiden. Gute handbeschickte Holzfeuerungen können zumindest während der stationären Verbrennungsphase zum Teil tiefere Staubwerte erzielen als automatische Holzheizungen. So sind Werte von deutlich unter $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 13

Vol.-% O_2 möglich, unter optimalen Bedingungen werden im Holzofen mit zweistufiger Verbrennung nach Abbildung 7 gar Werte bis zu unter $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht. Wenn dagegen Holz mit zu hohem Wassergehalt verwendet oder die Luftzufuhr zur Leistungsminde- rung unzulässig stark gedrosselt wird, weisen handbeschickte Holzfeuerungen hohe Staubemissionen auf, wobei der Anteil an unverbrannten Verbindungen dann bis zu mehr als 50% der Gesamtfracht ausmachen kann. Als Folge davon ist sichtbarer Rauch erkennbar, welcher zudem kondensierbare organische Substanzen (Teer) enthält und zu erheblichen Geruchsbelästigungen führen kann.

Fazit

Staub aus Holzfeuerungen und Dieselmotoren weisen ähnliche Korngrößen auf. Beide sind als lungengängige Partikel potenziell gesundheitsschädigend und deshalb so weit als möglich zu vermeiden. Aufgrund ihrer Bildungsart weisen sie allerdings teilweise grundsätzlich unterschiedliche Eigenschaften auf. Während Dieselmotoren

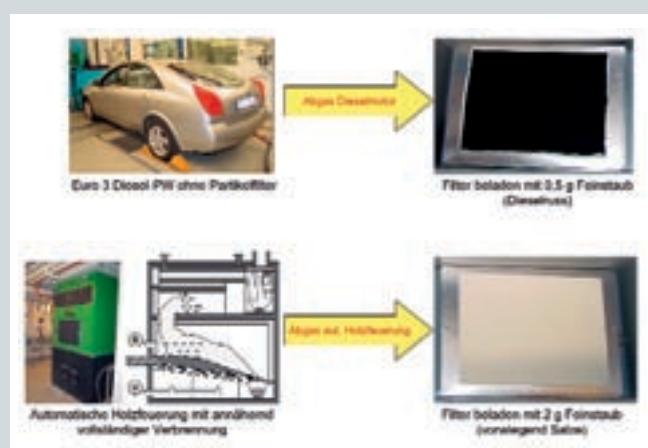


Abb 5: Versuchsanordnungen und auf für anschließende Zelltests auf Probenahme-Filter gesammelte Partikel aus Dieselmotor (oben) und aus automatischer Holzfeuerung.

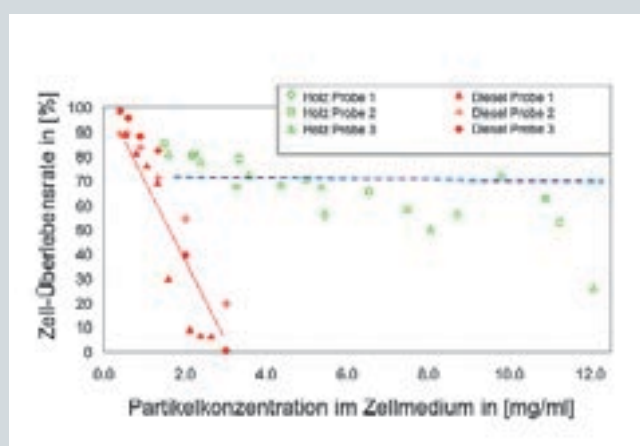


Abb 6: Vergleich der Zell-Überlebensrate von Dieseleruss und Partikeln aus einer automatischen Holzfeuerung in Zytotoxizitätstests nach [Nussbaumer et al. 2005]. Die Zelltests mit Partikeln aus einem Holzofen bei unvollständiger Verbrennung liegen noch nicht vor.

ausschliesslich Russ emittieren, weisen Holzfeuerungen bei optimalen Verbrennungsbedingungen in erster Linie anorganische, salzartige Staubemissionen auf. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass diese salzartigen Partikel eine wesentlich geringere Schädlichkeit für Zellen aufweisen als Dieselruss, was die Bedeutung von Dieselruss bestätigt. Dennoch gilt es, auch vorwiegend salzartige Feinstäube, wie sie zum Beispiel von automatischen Holzfeuerungen in vergleichsweise hohen Konzentrationen emittiert werden, zu vermindern.

Vermeiden: schlechte Feuerung und falsche Betriebsweise

Daneben können bei der Holzverbrennung zusätzlich Russ und organische Verbindungen emittiert werden, wenn die Verbrennungsbedingungen mangelhaft sind. Unter schlechten Bedingungen wie zum Beispiel bei der Verbrennung von feuchtem Holz in einem einfachen Holzofen können die Staubemissionen dadurch auf ein Mehrfaches ansteigen. Obwohl die Resultate dazu somit noch nicht vorliegen, ist davon

auszugehen, dass diese Partikel schädlicher sind als die salzartigen Feinstäube, weshalb entsprechende Verbrennungsbedingungen unbedingt zu vermeiden sind.

Handeln ist wichtig

Energieholz sollte deshalb nur in optimal ausgelegten und korrekt betriebenen Feuerungen eingesetzt werden, welche einen annähernd vollständigen Feststoffausbrand erzielen und den Auswurf an Russ auf ein Minimum reduzieren. Die dann noch als anorganische Verbindungen verbleibenden Feinstäube gilt es zumindest bei grösseren Anlagen mit geeigneten Abscheideverfahren auf ein tolerierbares Mass zu vermindern. Für Holzheizanlagen besteht deshalb in den kommenden Jahren noch erheblicher Handlungsbedarf zur Entwicklung und Einführung von effizienten Staubabscheidesystemen. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, kann Holz als erneuerbarer Energieträger vermehrt genutzt werden und einen maximalen Beitrag zur Energieversorgung und zur Erreichung der Klimaziele leisten.

PD Dr. Thomas Nussbaumer ist Inhaber der Firma Verenum in Zürich sowie Privatdozent an der ETH Zürich. Er befasst sich mit der Forschung und Entwicklung von Energie aus Biomasse.

E-Mail: thomas.nussbaumer@verenum.ch,
Internet: www.verenum.ch

Verdankung

Die vorliegende Untersuchung wurde vom Bundesamt für Energie (BFE) und vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) unterstützt. Die Probenahme erfolgte an der EMPA Dübendorf und die Zelltests wurden von der Firma RCC Cytotest Cell Research GmbH in Rossdorf (Deutschland) durchgeführt.

Literatur

Die Quellenangaben sind beim Autor erhältlich.

Neu an der Fachtagung

Vorträge und Diskussion zum Thema Feinstaub

am Freitag, 17. März 2006

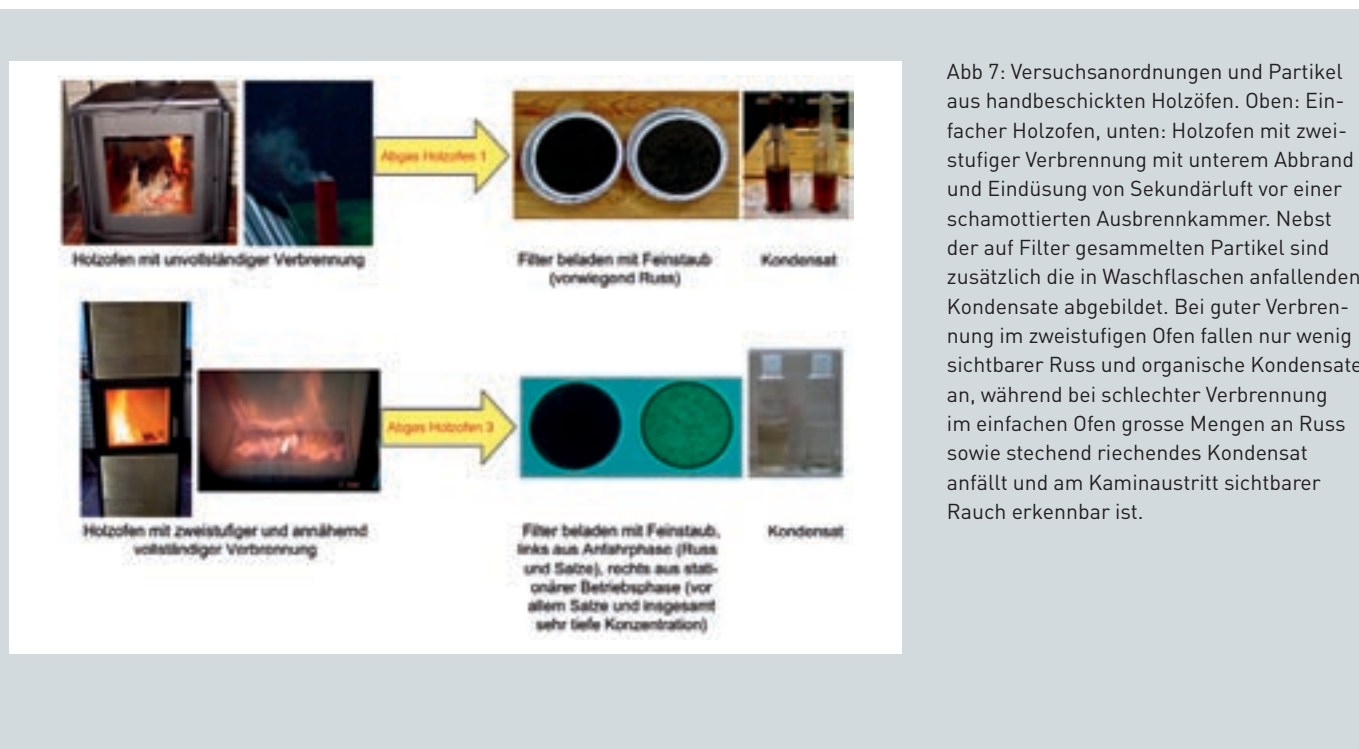


Abb 7: Versuchsanordnungen und Partikel aus handbeschrifteten Holzöfen. Oben: Einfacher Holzofen, unten: Holzofen mit zweistufiger Verbrennung mit unterem Abbrand und Eindüsung von Sekundärluft vor einer schamottierten Ausbrennkammer. Nebst der auf Filter gesammelten Partikel sind zusätzlich die in Waschflaschen anfallenden Kondensate abgebildet. Bei guter Verbrennung im zweistufigen Ofen fallen nur wenig sichtbarer Russ und organische Kondensate an, während bei schlechter Verbrennung im einfachen Ofen grosse Mengen an Russ sowie stechend riechendes Kondensat anfällt und am Kaminaustritt sichtbarer Rauch erkennbar ist.