

# Zur Entstaubung der Luft in Wohnräumen

G. SÖLLNER



A 222

## Einleitung

Wenn von Verunreinigung der Luft in Wohnräumen gesprochen wird, so denkt man zunächst an Formaldehyd, Radon, Lösungsmitteldämpfe, usw., an Kohlenmonoxid durch Zigarettenrauchen und an das vom Menschen ausgeatmete Kohlendioxid. Um diese Schadstoffe auf ein unbedenkliches Maß zu reduzieren, muß dem Raum Außenluft zugeführt werden. Das geschieht bisher überwiegend durch Undichtigkeiten der Fenster und Türen und durch beabsichtigte Fenster- und Türlüftung. In Zukunft wird man mehr und mehr eine auf den Bedarf abgestimmte Zwangsbelüftung anwenden. In Nichtraucherhaushalten ist im allgemeinen ein halber bis ein ganzer Luftwechsel pro Stunde mit Außenluft ausreichend.

In zunehmendem Maße werden auch in Wohnungen Einrichtungen betrieben, mit denen die partikelförmige Verunreinigung – der Staub – aus der Luft entfernt werden soll. Dazu werden auf dem Markt zahlreiche Geräte angeboten; über ihre Wirkung im Raum weiß man wenig. Nachfolgend wird über experimentelle Untersuchungen berichtet, deren Ergebnisse es ermöglichen, Voraussagen über die Entstaubung zu machen und die Geräte zur Entstaubung zweckdienlich zu dimensionieren.

Die Empfindung der Qualität der Raumluft wird in starkem Maße von der Wahrnehmung von Gerüchen beeinflusst. Essensgerüche, Tabakrauch, menschliche Ausdünstungen, usw. führen zum Eindruck verbrauchter, schlechter, schädlicher Luft und zum Bedürfnis, dem Raum Frischluft zuzuführen. Die Beseitigung von Gerüchen ist zwar nicht Thema dieser Arbeit, aber da manche Geruchsstoffe an Partikeln angelagert sind und somit, wenigstens zunächst, in Entstaubern abgeschieden werden können, sind manche Ergebnisse dieser Arbeit auch auf die Geruchsbekämpfung in Wohnungen übertragbar. Da ferner die Ausbreitung gasförmiger Geruchsstoffe in einem Raum derjenigen feiner Partikeln (Aerosole) ähnlich ist, sind die quantitativen Maßnahmen der Entstaubung übertragbar; man muß nur die geeigneten Filter einsetzen.

Zur Abrundung sei bemerkt, daß verschiedene Duftstoffe den Eindruck von Frische hervorrufen. Man kann mit ihnen unangenehme Gerüche überduften und damit die Illusion frischer Luft hervorrufen.

## Welche Partikeln sollen aus der Luft entfernt werden?

In der Atemluft war und ist stets Staub enthalten. In den meisten Fällen wird das nicht bemerkt, denn der „normale“ Staub riecht und schmeckt nicht.

Die Staubkonzentration in Nichtraucherwohnungen liegt überwiegend zwischen 25 und 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  Luft [1; 2]. Der Durchschnittsmensch unserer Lebenszone verbringt 85–90% seiner Zeit in geschlossenen Räumen, 50–70% seiner Zeit in der Wohnung [2; 3; 4; 5]. Bei ruhiger Tätigkeit atmet er etwa 0,5  $\text{m}^3/\text{h}$  Luft ein. Daraus errechnet sich (Staubkonzentration 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Aufenthaltszeit 70%) eine pro Jahr in der Wohnung inhalierte Staubmenge von 0,15 g. Ein Teil davon wird wieder ausgeatmet oder anderweitig aus dem Körper transportiert. Die inhalierte bzw. die im Körper verbleibende Staubmenge ist so unbedeutend, daß daraus keine Veranlassung zur Entstaubung der Raumluft entsteht.

Warum will man dann die Wohnungsluft entstauben? Es sind die belästigenden und gesundheitsschädlichen Partikeln, die gelegentlich bis häufig im Staub vorkommen, die den Wunsch nach Entstaubung auslösen.

Es handelt sich um Pollen (Blütenpollen von Pflanzen), die Allergien hervorrufen können, z. B. den Heuschnupfen. Ihre Größe beträgt 10–50  $\mu\text{m}$ . Sie dringen mit der Außenluft in den Raum ein und sedimentieren dort rasch. Unsere Untersuchungen (siehe später) zeigten, daß durch normale Fensterundichtigkeiten praktisch keine Partikeln über 5  $\mu\text{m}$  Korngröße so in den Raum eindringen, daß sie in der Raumluft schwebend nachgewiesen werden konnten (in einem „ruhigen“ Raum), obwohl in der Außenluft zahlreiche größere Partikeln vorhanden waren. Dagegen zeigte sich, daß die Konzentration der kleinen Partikeln, unter etwa 3  $\mu\text{m}$  Größe, deutlich von der Konzentration der Partikeln entsprechender Größe in der Außenluft und deren Variation beeinflusst war.

Die sedimentierten Pollen können im Raum aufgewirbelt werden und dann in den Atmungstrakt gelangen. Das gilt natürlich auch für die während der Fenster- bzw. Türlüftung in den Raum gelangten Pollen, deren Zahl im allgemeinen die der durch Luftlecks eingedrungenen Pollen weit übersteigt. Unsere Untersuchungen (siehe später) zeigten, daß von einer mechanischen Aufwirbelung hauptsächlich Partikeln betroffen wurden, die größer als 3  $\mu\text{m}$  waren, während die Konzentration der kleineren Partikeln dadurch kaum beeinflusst wurde.

Hausstauballergene (z. B. Ausscheidungen von Milben), Bakterien, Sporen, Keime (Größe 0,5–50  $\mu\text{m}$ ) und Viren

(0,005–0,1  $\mu\text{m}$ ) befinden sich stets im Hausstaub; oft sind sie an Partikeln angelagert, die größer als 3  $\mu\text{m}$  sind. Sie werden, gegebenenfalls mit den Trägerpartikeln, durch mechanische und thermische Kräfte aufgewirbelt.

Überall, wo sich Menschen in geschlossenen Räumen aufhalten, tritt eine aerogene Verteilung von Keimen auf, die vom Menschen emittiert wurden [5; 6]. Zahlreiche Krankheiten werden hauptsächlich durch die Atemluft in geschlossenen Räumen übertragen, weil dort die Konzentration der Krankheitserreger in der Luft hoch sein kann und weil die Überlebenschancen der Erreger in der Wohnungsluft wegen der geeigneten Temperatur und Feuchte besonders günstig sind.

Tabakrauch gehört zu den häufigsten und am meisten als störend empfundenen Luftverunreinigungen in Innenräumen. Er enthält außer Partikeln (Korngrößen von kleiner als 0,5  $\mu\text{m}$  bis ca. 10  $\mu\text{m}$ ), deren Anzahl beträchtlich ist und die Staubkonzentration in Raucherräumen nicht selten auf 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  hochtreibt [2; 7], zahlreiche Schad- und Geruchsstoffe. Die Belastung eines Raumes durch Tabakrauch tritt zumeist stoßartig auf und ebbt dann ab, es sei denn, der Raum ist mit Kettenrauchern bevölkert.

Schließlich empfehlen verschiedene Hersteller von Entstaubern den Gebrauch ihrer Geräte wegen der zunehmenden Verschmutzung der Außenluft. Tatsächlich ist der Staubgehalt der Außenluft seit Jahren eher zurückgegangen [8; 9; 10]. Allerdings hat ihr Anteil an lungengängigen Feinstäuben, die unter anderem toxische Schwermetallstäube enthalten, zugenommen. Die Feinstäube unter ca. 5  $\mu\text{m}$  Korngröße stammen überwiegend aus Verbrennungsprozessen [11].

Eine Rangliste der Partikelarten in der Wohnungsluft nach ihren negativen Einflüssen auf die Gesundheit sieht wie folgt aus [5]:

1. Bakterien, Keime, Viren.
2. Allergene (Pollen, Pilze, Sporen, Hautabrieb, Tierhaare, Hausstaubmilbe)
3. Verbrennungsprodukte (Tabakrauch)
4. Sonstige Staubkomponenten (ohne Bedeutung).

Nimmt man die Belästigung der Menschen als Maßstab, so wird die Rangliste:

1. Tabakrauch (für Nichtraucher)
2. Allergene (für empfindliche Allergiker an erster Stelle)
3. Gerüche (sie werden in dieser Arbeit nicht behandelt)
4. Sonstige Staubkomponenten (werden im allgemeinen nicht wahrgenommen).

Es sind also die im Raum aufgewirbelten Partikeln und der Tabakrauch, die die meisten Störungen oder Schädigungen hervorrufen. Will man eine Entstaubungsmaßnahme in Wohnräumen bezüglich ihrer Bedeutung für das Wohlbefinden des Menschen beurteilen, so muß man ihre Wirkung an diesen beiden Staubarten überprüfen.

Am längsten hält sich der Mensch in den Schlaf-, den Kinder- und den Wohnräumen auf. Dort hat die Luftreinigung in einem Wohnhaus die höchste Priorität. Sie wird üblicherweise mittels eines kompakten Entstaubergerätes (Steckdosengerät), das irgendwo im Raum, zumeist in Fußbodennähe, steht, vorgenommen.

### Versuchsanordnung

Die experimentelle Untersuchung der Wirkung von Entstaubern fand in einem quadratischen Raum (3,6  $\times$  3,6 m) eines Fertighauses statt, das Volumen des Raumes betrug 32,5  $\text{m}^3$ . Das Fenster war mit den heute üblichen Lippendichtungen versehen und zur Vermeidung unkontrollierbarer Thermik durch eine Außenjalousie verdunkelt. Zum Wohnungsflug führte eine normale, nicht abgedichtete Zimmertür (Bild 1). Der Fußboden war mit Teppichboden belegt. Im Zimmer standen 2 Betten mit Matratze.

In der Mitte einer Wand, 1,10 m über dem Fußboden und ca. 0,1 m zum Rauminnen hin, wurden die Luftproben entnommen (nur während der wenigen Minuten einer Messung). Sie wurden mittels eines im Nebenraum stehenden Partikelzählers (Kratel, Partoscope R 0,5  $\mu\text{m}$ ) fraktioniert nach den Korngrößenbereichen 0,5–1,4  $\mu\text{m}$ , 1,4–3,0  $\mu\text{m}$ , 3,0–5,0  $\mu\text{m}$ , 5,0–7,0  $\mu\text{m}$ , > 7,0  $\mu\text{m}$  analysiert.

Nahezu zeitgleich mit jeder Luftprobenentnahme im Versuchsraum wurde auch eine Außenluftprobe genommen und analysiert.

Vor der Mitte einer Wand, etwa 1 m über dem Fußboden, blies ein kleiner Tischventilator (Leistung ca. 10 l/s) senkrecht nach oben. Dieser Ventilator war immer in Betrieb, damit stets vergleichbare Raumluftbewegungen beibehal-

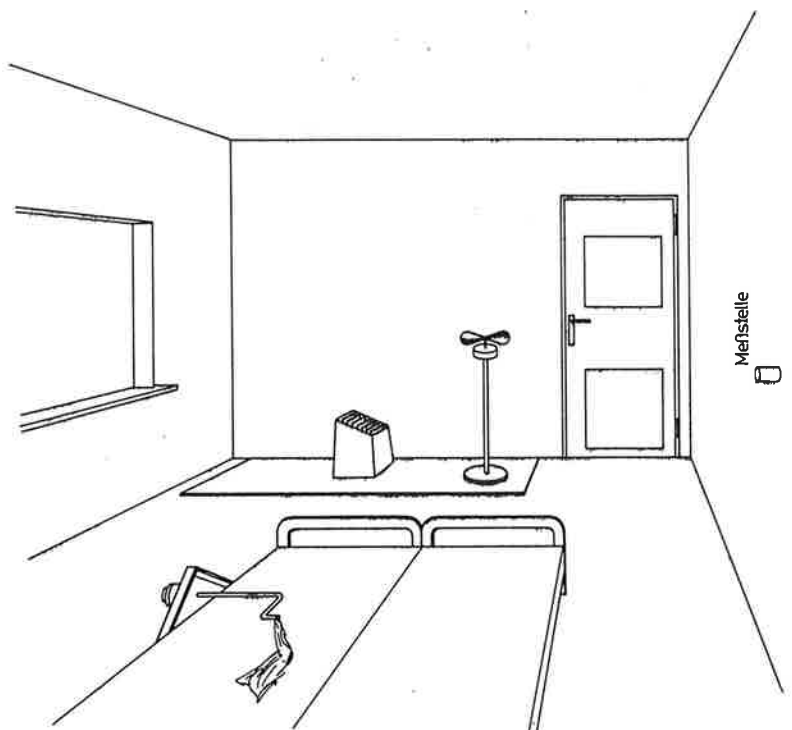


Bild 1. Skizze des Raumes, in dem die Staubuntersuchungen durchgeführt wurden.

ten wurden. Der Raum mit dem laufenden Ventilator wird als „ruhiger Raum“ bezeichnet.

Neben dem Ventilator wurden auf ein großes Brett auf dem Fußboden die Entstaubungsgeräte gestellt.

Es wurden zwei unterschiedliche Untersuchungsreihen durchgeführt:

➔ A) *Messung des Entstaubungsgrades im Raum bei kontinuierlicher Staubaufwirbelung*

Dazu wurde über den Betten ein Elektromotor montiert, an dessen Achse ein Hebelarm so angebracht war, daß er ein an ihm befestigtes Tuch langsam hochheben und dann aus ca. 0,6 m Höhe auf die Matratze fallen lassen konnte. Diese Anlage war ständig in Betrieb. Dennoch war es nicht möglich, die Staubkonzentration im Raum konstant zu halten. Es griffen Einflüsse von außen (Wind usw.) und vom Hausinnern (Begehen des Hauses, Öffnen und Schließen von Türen, usw.) in den Versuchsraum über, insbesondere aber zeigte sich ein Tagesgang der Staubkonzentration. Zwischen etwa 7<sup>00</sup> und 19<sup>00</sup> war mehr Staub in der Luft als in der übrigen, der Nachtzeit, auch wenn das Haus tagelang nicht betreten wurde. Um den Einfluß dieser Inkonzanz auf die Meßergebnisse weitgehend zu eliminieren, wurde für jedes Entstaubungsgerät eine Testzeit von 48 Std. festgesetzt, innerhalb deren es alternierend 8 Std. lief, 8 Std. außer Betrieb war, wieder 8 Std. lief, usw., während der Staubaufwirbler und der kleine Ventilator im Raum ständig in Betrieb blieben. Der Raumluft wurden stündlich Proben entnommen. Zur Ermittlung des Entstaubungsgrades wurden die gemittelten Staubzählungen während der Perioden mit laufendem Entstauber zu denjenigen, in denen der Entstauber nicht in Betrieb war, in Beziehung gesetzt. Die ersten beiden Messungen nach dem Ein- bzw. dem Ausschalten des Entstaubers, wurden dabei nicht berücksichtigt.

➔ B) *Messung der Entstaubung bei Tabakrauch*

Der Staubaufwirbler war nicht in Betrieb, der kleine Ventilator im Raum lief jedoch stets. Jeden Morgen um 9<sup>20</sup> wurde durch eine Klappe in der Zimmertür, 1 m über dem Fußboden, eine brennende Zigarette in den Raum geschoben. Am ersten Tag war kein Entstauber in Betrieb, am zweiten Tag lief von 0<sup>00</sup> bis 24<sup>00</sup> ein Entstauber, dann war wieder kein Entstauber in Betrieb, danach lief ein anderes Entstaubungsgerät von 0<sup>00</sup> bis 24<sup>00</sup>, usw.

Nach dem Zünden der Zigarette wurden zunächst bis 9<sup>00</sup> minütlich Luftproben entnommen und fraktioniert analysiert, danach bis 12<sup>00</sup> viertelstündlich, für den Rest des Tages stündlich. Daraus konnte die Erhöhung der Staubkonzentration über den „Normalpegel“ entnommen werden und der zeitliche Verlauf des Rückganges der Staubkonzentration ohne und mit Entstaubungsgerät.

Die zahlreichen Messungen der Partikelkonzentration und ihres zeitlichen Verlaufes ohne Betrieb eines Entstaubers gestatteten eine Kontrolle der Konstanz der Versuchsbedingungen. Es zeigte sich über die Versuchszeit von einigen Monaten, daß die durch das Abbrennen einer Zigarette

(stets dieselbe Marke) erzeugte Erhöhung der Staubkonzentration und der zeitliche Verlauf ihres Rückganges in hohem Maße reproduzierbar waren.

Die Entstauber waren dem Markt entnommene Geräte: elektrostatische Abscheider und Geräte mit Vlies- und Elektretfiltern. Bei jedem Gerät wurde der Luftdurchsatz gemessen und der Filterabscheidungsgrad in den einzelnen Korngrößenbereichen ermittelt, indem am Lufteinlauf und am Luftaustritt des Gerätes Luftproben entnommen und analysiert wurden. Diese Prozedur wurde in einem Raum mit aufgewirbeltem Staub und gesondert in einem Raum mit Tabakrauch durchgeführt. Häufig ergaben sich in den gleichen Korngrößenbereichen unterschiedliche Filterwirkungsgrade bei aufgewirbeltem Staub und bei Tabakrauch: insbesondere wurden häufig die kleineren Tabakrauchpartikeln wirkungsvoller ausgefiltert als gleichgroße Partikeln des aufgewirbelten bzw. atmosphärischen Staubes.

Mit Hilfe des Filterwirkungsgrades  $\eta_F$  konnte der wirkliche Luftdurchsatz  $\dot{V}_w$  des Gerätes auf den effektiven Luftdurchsatz  $\dot{V}_e$  umgerechnet werden, der zur gleichen Staubabscheidung in der Zeiteinheit führte, wenn der Filter einen Wirkungsgrad von 1 hätte, d. h. wenn das Entstaubungsgerät völlig gereinigte Luft lieferte.

$$\dot{V}_e = \dot{V}_w(1 - \eta_F)$$

$\dot{V}_e$  ist bei einem Gerät im allgemeinen für jeden Korngrößenbereich des Staubes und für aufgewirbelten Staub und für Tabakrauch unterschiedlich.

Der effektive Luftdurchsatz  $\dot{V}_e$  wird als Charakteristikum für jedes Entstaubergerät benutzt. Bezogen auf das Volumen des Versuchsraumes wird daraus ein „Luftwechsel (Filterdurchgänge) mit 100% gereinigter Luft“. Dieser Luftwechsel wird in den nachfolgend beschriebenen Messungen in Beziehung gesetzt zum Entstaubungsgrad der Raumluft, den das Entstaubungsgerät bewirkte. Damit sind die Geräte mit verschiedenen Staubabscheidungsgraden untereinander vergleichbar.

### Kontinuierlich aufgewirbelter Staub

Der im Versuchsraum durch die mechanische Staubaufwirbelung in die Luft gebrachte Staub überlagert sich dem dort bereits vorhandenen Staub der teilweise durch andere Erschütterungen, Thermik usw. aufgewirbelt und teilweise von außen eingedrungen war.

Die Zusammenstellung zeigt ein typisches Beispiel von Staubkonzentrationen (Anzahl Partikeln in m<sup>3</sup> Luft) in den verschiedenen Korngrößenbereichen:

0,5–1,5 µm	1,4–3,0 µm	3,0–5,0 µm	5,0–7,0 µm	> 7,0 µm
in der Außenluft				
3600000	150000	5000	1000	500
in der Innenluft in „ruhigem Raum“				
2700000	15000	500	120	30
in der Innenluft bei Staubaufwirbelung				
2700000	20000	2000	800	500

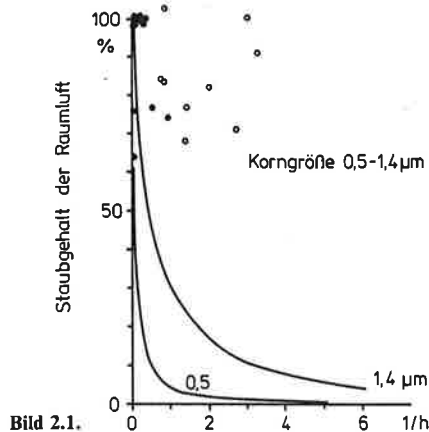


Bild 2.1.

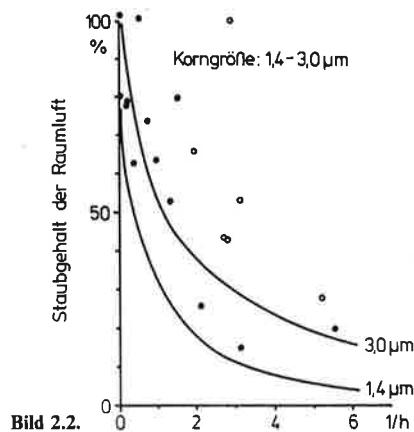


Bild 2.2.

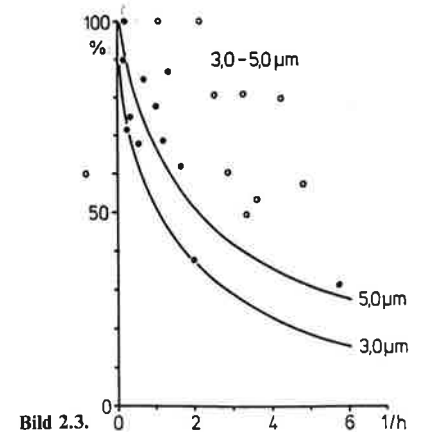


Bild 2.3.

Luftwechsel (Filterdurchgänge) mit 100% gereinigter Luft

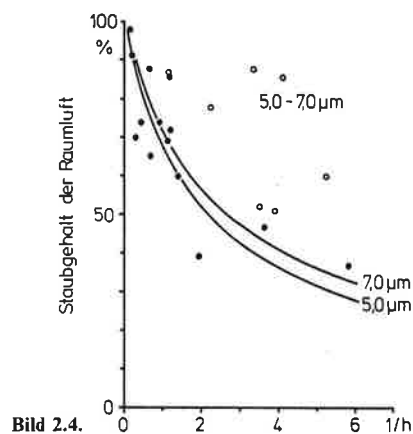


Bild 2.4.

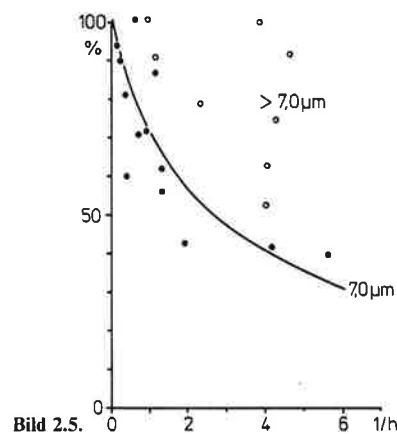


Bild 2.5.

Luftwechsel (Filterdurchgänge) mit 100% gereinigter Luft

Bild 2.1–2.5. Staubgehalt der Raumluft bei kontinuierlich aufgewirbeltem Staub während des Betriebs von Luftreinigern als Funktion des Luftwechsels im Raum mit vollständig gereinigter Luft. Die Ergebnisse sind für verschiedene Bereiche von Staubkorngrößen getrennt dargestellt.

Die Kreise kennzeichnen Situationen, in denen der Luftreiniger einen hohen Luftdurchsatz (z. B. wegen schlechten Filterwirkungsgraden) hatte und/oder in denen die Luft in kräftigem Strahl ausgeblasen wurde.

Die in die Bilder eingetragenen Kurven wurden mit Hilfe einer Modellvorstellung ermittelt (siehe Anhang und Bild 6).

Die mechanische Staubaufwirbelung schleudert hauptsächlich die größeren Partikeln ( $> ca. 3 \mu m$ ) in die Luft, kleinere Partikeln werden nur in unbedeutendem Maße geliefert. Das traf auch zu, wenn sich Menschen in dem Raum bewegten. Die Anzahl der aufgewirbelten Partikeln hängt natürlich von der Intensität und der Häufigkeit der Bewegung ab.

Die Verminderung des Staubgehaltes der Raumluft durch den Einsatz von Entstaubungsgeräten ist in den Bildern 2.1 bis 2.5 für die verschiedenen Korngrößenbereiche dargestellt. Die Punkte und Kreise markieren die Messungen. Die Kreise bezeichnen Messungen mit Entstaubern, deren wirklicher Luftdurchsatz mindestens einen dreifachen Luftwechsel im Raum erzeugte, wobei der effektive Luftwechsel wegen des manchmal geringen Abscheidewirkungsgrades der Filter oft beträchtlich geringer war. Aus vielen dieser Geräte trat die Luft zudem in einem kräftigen Strahl aus.

Die in die Bilder 2.1 bis 2.5 eingezeichneten Kurvenzüge stellen den nach einer Modellvorstellung (siehe Anhang) ermittelten Staubgehalt der Luft für verschiedene effektive Luftwechsel (mit 100% gereinigter Luft) und für verschiedene Staubkorngrößen dar. Die Meßwerte (Punkte) entsprechen der Theorie einigermaßen, wenn jedoch der Luftdurchsatz durch die Geräte hoch wird bzw. die gereinigte Luft in starkem Strahl austritt, besteht die Gefahr von

Staubaufwirbelung. Manche Geräte wirbeln offenbar mehr Staub auf, als sie selbst ausfiltern (Kreise in den Bildern 2.1 bis 2.5).

Wir stellen fest:

- Der Staubabscheidegrad der meisten Entstauber war für kleine Partikeln ( $1,4 \mu m$ ) so schlecht, daß praktisch keine Entstaubung festzustellen war. Wir können dabei nicht unterscheiden, ob die kleinen Partikeln die Filter unbehelligt passieren oder ob sie nachträglich von der starken Luftströmung wieder mitgerissen wurden. Ein gewisser Teil der kleinen Partikeln wird aus der Außenluft nachgeliefert.
- Der Staubgehalt der Luft wird mit steigendem effektiven Luftwechsel (mit 100% gereinigter Luft) immer mehr vermindert. Die Verminderung ist für kleine Partikeln stärker als für größere Partikeln (Erklärung: siehe Anhang).
- Der Staubgehalt der Luft wird zunächst durch die Staubproduktion (Staubaufwirbelung) bestimmt. Die Entstaubung reduziert den Staubgehalt auf einen dem Luftwechsel und der Korngröße entsprechenden Bruchteil.
- Es spielt keine Rolle, ob zur Entstaubung der Raumluft ein Luftstrom durch einen Filter im Raum gesaugt wird oder ob dem Raum von außen gereinigte Luft zugeführt

und ebensoviel Raumluft nach außen abgeführt wird. Wenn beide Maßnahmen mit demselben effektiven Luftwechsel durchgeführt werden, ist die Entstaubung dieselbe.

- e) Soll eine deutliche Verminderung des Staubgehaltes der Luft erreicht werden, so sind beträchtliche Lüfterneuerungen (bzw. Filterdurchgänge) in der Stunde erforderlich. Bild 3 (aus der Modellvorstellung entwickelt: siehe Anhang) zeigt, daß eine Verminderung der Konzentration der größeren Staubpartikeln (um 8 µm) auf etwa die Hälfte einen etwa dreifachen Luftwechsel erfordert, während die Anzahl der Partikeln um 3 µm Größe bereits mit einem einfachen Luftwechsel halbiert wird.
- f) Entstauber mit großem Luftdurchsatz und strahlförmigem Luftaustritt können selbst zu Staubaufwirblern werden.

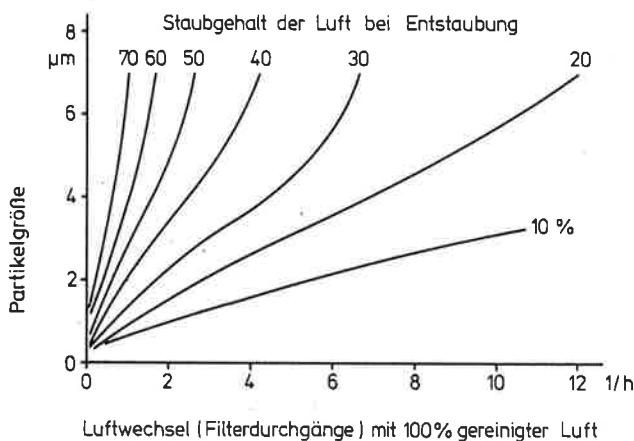


Bild 3. Staubgehalt der Luft während des Gebrauchs von Luftreinigern als Funktion der Staubpartikelgröße und des Luftwechsels mit reiner Luft. Die Darstellung des Bildes wurde aus den Kurven in Bild 2 entwickelt.

**Stoßbelastung mit Tabakrauch**

Ein typisches Beispiel der nach dem Einbringen einer brennenden Zigarette auftretenden maximalen Konzentration von Partikeln (Anzahl in m<sup>3</sup> Luft), aufgliedert nach Korngrößenbereichen, zeigt die Tabelle. Sie enthält zudem Angaben über den zeitlichen Verlauf des Anstiegs und des Abklingens der Partikelkonzentration.

Von der Zigarette werden außerordentlich viele Partikeln emittiert, weit mehr als durch gewöhnliche mechanische Bewegungen aufgewirbelt werden. Besonders zahlreich sind die Partikeln mit Durchmessern unterhalb etwa 3 µm.

Tabelle

0,5-1,4 µm	1,4-3,0 µm	3,0-5,0 µm	5,0-7,0 µm	> 7,0 µm
Anzahl Partikeln vor dem Einbringen der Zigarette.				
2 700 000	15 000	500	120	30
Maximal auftretende Partikelkonzentration				
10 000 000	6 900 000	200 000	1 200	90
Zeit zwischen Einbringen der brennenden Zigarette und maximaler Partikelkonzentration (Stunden)				
ca. 2	1/4	1/4	1/4	1/4
Zeit, in der die durch Tabakrauch erhöhte Partikelkonzentration auf 10% abgeklungen ist (Stunden)				
15	10	2	1 1/4	nicht zu ermitteln

Sie bleiben besonders lange in der Luft; die durch Tabakrauch verursachte Partikelkonzentration im Korngrößenbereich von 1,4-3,0 µm ist erst nach etwa 10 Std. auf ein Zehntel abgeklungen.

Die Brenndauer der Zigarette betrug etwa 8 min. Innerhalb der ersten Minuten nach dem Einbringen der Zigarette nahm die Partikelkonzentration an der Meßstelle sehr stark zu, erreichte nach etwa 1/4 Std. ein Maximum und klang dann langsam ab.

Ein merkwürdiger Befund zeigte sich bei den Partikeln im Größenbereich von 0,5-1,4 µm. Ihre Konzentration nahm auch nach dem Erlöschen der Zigarette langsam weiter zu, erreichte erst nach etwa 2 Std. ein Maximum und klang dann sehr langsam ab. Nach etwa 12 Std. war die Konzentrationserhöhung dieser kleinen Partikeln erst auf die Hälfte abgesunken. Dieser langsame weitere Anstieg der Partikelkonzentration nach dem Verlöschen der Zigarette ist auch in den Experimenten von Klotz und Wanner [12] zu sehen.

Nach dem Verlöschen der Zigarette entstehen also noch lange Zeit Partikeln der Korngröße 0,5-1,4 µm. Das ist nur so zu erklären, daß die Zigarette zahlreiche Partikeln mit Korngrößen unter 0,5 µm emittierte, die von unserem Meßgerät nicht erfaßt wurden. Diese kleinen Partikeln agglomerieren untereinander zu größeren, nun meßbaren Partikeln. Dieser Vorgang überlagert sich der Sedimentation der Partikeln; das betrifft sicher auch die Partikeln, die größer als 1,4 µm sind.

Die Tabakrauchpartikeln haben also Eigenschaften, die sie besonders zum Agglomerieren befähigen. Das können z. B. anhaftende klebrige Bestandteile sein oder elektrische Ladungen. Verbrennungsrauch enthält besonders viele Grobionen [13] und beim Einbringen von Tabakrauch in einen Raum wird dort die Zahl der negativen Kleinionen schlagartig stark vermindert [13; 14; 15]. Nach Varga [16] ist die elektrische Ladung des Zigarettenrauches „bekanntlich“ negativ.

In unseren Experimenten war es sogar möglich, den Staubpegel eines Raumes, in dem geraucht worden war, durch den Einsatz eines Entstaubers fast um eine Größenordnung niedriger abzusenken als das ohne vorheriges Rauchen im Raum möglich war. Vor allem betraf das die kleineren Partikeln (0,5-1,4 µm). Das läßt darauf schließen, daß die kleinen Partikeln des Tabakrauches (Korngröße unter 0,5 µm) auch mit den ebenso kleinen Partikeln des atmosphärischen



Staubes agglomerieren und diese mit zur Abscheidung bringen. Es tritt also der paradoxe Vorgang auf, daß eine erhöhte Verschmutzung der Luft durch Tabakrauch letztendlich zu einer besseren Reinigung der Luft führt, indem der Tabakrauch den atmosphärischen Staub aus der Luft „auswäscht“.

Wird eine Zigarette abgebrannt, während ein Entstaubungsgerät läuft, so wird die Abklingzeit der Partikelkonzentration in der Raumluft verkürzt. Die *Bilder 4.1 bis 4.4* zeigen für verschiedene Korngrößenbereiche die Zeiten (in Std.), nach denen die erhöhte Partikelkonzentration auf 10% zurückgegangen war, als Funktion des effektiven Luftwechsels. Die Abklingzeiten der Konzentration der Partikeln mit Größen über  $7\ \mu\text{m}$  konnten nicht ermittelt werden, weil der Zigarettenabbrand zu wenige Partikeln dieser Größe lieferte.

Die Experimente zeigen:

- Beim Zigarettenrauch werden auch die kleinen Partikeln ( $0,5-1,4\ \mu\text{m}$ ) wirksam ausgefiltert, im Gegensatz zum atmosphärischen bzw. aufgewirbelten Staub, der die Filter weitgehend passierte. Das läßt auf eine besondere Haftfähigkeit des Tabakrauches schließen.
- Bei der Entstaubung der mit Zigarettenrauch kontaminierten Raumluft spielt die parallel ablaufende Sedimentation der Partikeln eine große Rolle, vor allem bei den größeren Partikeln. Beim Luftwechsel 0 (d. h. kein Entstaubergerät in Betrieb) brauchen Partikeln der Größe  $0,5-1,4\ \mu\text{m}$  12 bis 15 Std., um auf  $1/10$  ihrer ursprünglichen Konzentration zurückzugehen; den Partikeln der Größe  $5,0-7,0\ \mu\text{m}$  gelingt das in  $1\frac{1}{4}$  Std.

- Der Entstauber entnimmt der Raumluft parallel zur Sedimentation Staubpartikeln. Soll die erhöhte Staubkonzentration innerhalb einer Stunde auf 10% reduziert sein, so ist ein effektiver Luftwechsel nötig für die verschiedenen Korngrößenbereiche von

0,5–1,5 $\mu\text{m}$	1,5–3,0 $\mu\text{m}$	3,0–5,0 $\mu\text{m}$	5,0–7,0 $\mu\text{m}$
effektiver Luftwechsel pro Stunde etwa			
2,5	2	0,6	0,3

- Die Zeit, innerhalb derer die Staubkonzentration auf 10% zurückging, war auch bei hohen Luftwechseln nicht unter ein bestimmtes Maß zu drücken: ca. 50 min bei den Partikeln  $3,0\ \mu\text{m}$  und ca. 30 min bei den größeren Partikeln. Hier spielen sicher die Dimensionen des Raumes) eine Rolle, außerdem mag auch die Staubaufwirbelung durch die Entstauber selbst zum Reststaubgehalt der Raumluft beitragen.

#### Konsequenzen für die Entstehung der Luft im Wohnraum

Die wesentlichen Vorgänge der Beladung der Wohnungsluft mit zusätzlichem Staub sind:

##### Mechanische Staubaufwirbelung über längere Zeit

(z. B. spielende Kinder). Es werden bevorzugt Partikeln  $> 3\ \mu\text{m}$  aufgewirbelt; diese Staubteilchen können Pollen, Bakterien, Keime usw. enthalten. Eine wirkungsvolle Verminderung dieser Staubpartikeln verlangt eine hohe Luftwechselrate und großflächigen Luftaustausch. Das kann

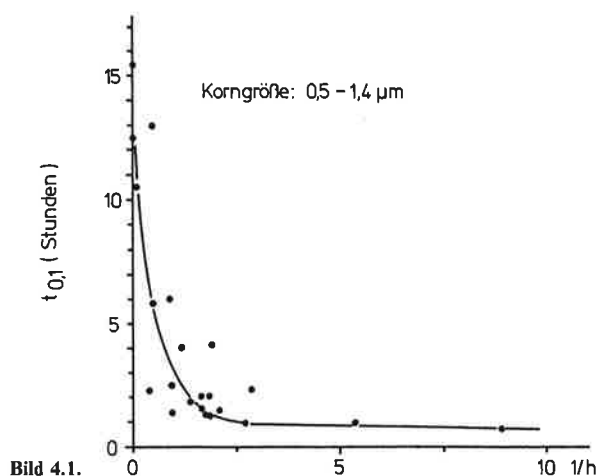


Bild 4.1.

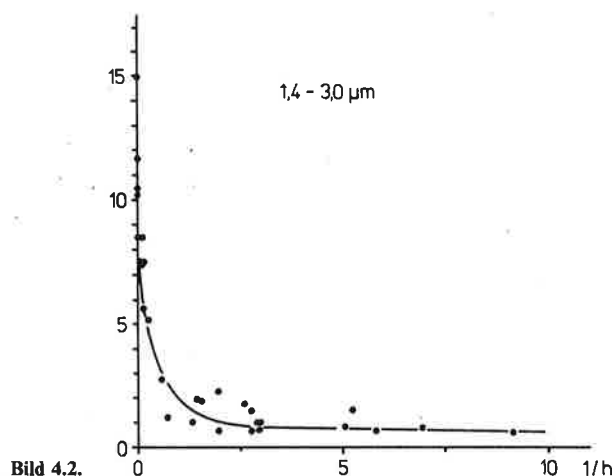


Bild 4.2.

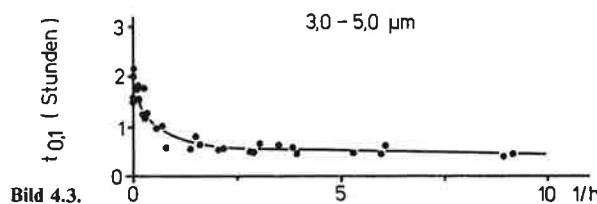


Bild 4.3.

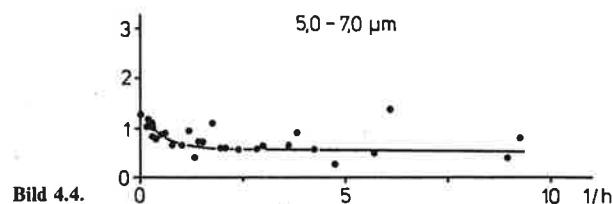


Bild 4.4.

Luftwechsel mit 100% gereinigter Luft

**Bild 4.1–4.4.** Einsatz von Luftreinigern bei Stoßbelastung mit Tabakrauch. Zeitbedarf bis zur Verminderung der Staubkonzentration auf 10% derjenigen, die ohne den Einsatz von Luftreinigern entstanden wäre, als Funktion des Luftwechsels mit 100% gereinigter Luft. Die Darstellung ist nach Korngrößenbereichen unterteilt.

mit einem kleinen, kompakten Gerät nicht erreicht werden, zumal es bei hohem Luftdurchsatz selbst Staub aufwirbeln kann. Daher sollten hier bevorzugt die Quellen des lästigen oder schädlichen Staubes bekämpft werden. Das ist allerdings zumeist ein schwieriges Unterfangen. In Haushalten mit Pollenallergikern (mehr als 15% der Bevölkerung sind Pollenallergiker [18]) lasse man keine Pflanzenpollen in den Raum eindringen. Das bedeutet, daß die Außenluft dem Raum kontrolliert und gefiltert zugeführt werden muß.

#### *Stoßartige Staubaufwirbelung oder stoßartiges Eindringen von Außenstaub*

(z. B. Fensterlüftung). Der erstere Fall betrifft vor allem die größeren Partikeln, im zweiten Fall dringen alle in der Außenluft vorhandenen Partikeln in den Innenraum. Belästigend bzw. schädlich sind vor allem die größeren Partikeln: Pollen, Bakterien, Keime, die oft an größere Trägerpartikeln angelagert sind.

Hört die Staubaufwirbelung auf oder wird das Fenster geschlossen, so sorgt die Sedimentation der Staubkörner für eine Luftreinigung. Im Korngrößenbereich von 3–5 µm sind nach etwa 2 Std. 90% der Partikeln aus der Luft verschwunden. Bei größeren Partikeln verläuft die Sedimentation schneller.

Hier kann man, wie unsere Experimente gezeigt haben, mit Entstaubern beschleunigend eingreifen: ein zweifacher effektiver Luftwechsel verkürzte die Zeit, in der die Konzentration der 3–5 µm großen Staubteilchen auf 10% zurückging, auf etwa 1/2 Std. Ein Teil der Entstaubung kann durch die Zufuhr gereinigter Frischluft besorgt werden (maximal 1 Luftwechsel), so daß die durch den Entstauber fließende Umluft mit einem etwa 1,5fachen effektiven Luftwechsel auskommt.

Auch hier trage man Sorge, daß die Entstaubungsmaßnahme nicht selbst Staub aufwirbelt.

*Stoßartiger Anfall von Tabakrauch. Dabei werden besonders stark die Partikeln mit Korngrößen < 5 µm vermehrt.*

Die maximale, durch Tabakrauch erzeugte Staubkonzentration wird mit einem effektiven Luftwechsel von 2 bis 3 pro Std. nach etwa einer Stunde auf 10% reduziert. Nehmen wir an, die Frischluftzufuhr besorgt maximal einen Luftwechsel in der Stunde, dann muß vom Entstaubergerät ein effektiver Luftwechsel von 2 oder etwas mehr gefordert werden.

Es zeigt sich also, daß Entstaubergeräte am wirkungsvollsten bei Stoßbelastung der Raumluft mit Staub eingesetzt werden können. Der Luftaustausch mit gefilterter Luft (gleichgültig ob Umluft oder Außenluft) sollte mindestens 2mal in der Stunde erfolgen. Ein Entstaubungsgerät für einen 40 m<sup>2</sup> großen Wohnraum muß also einen Luftdurchsatz von mindestens 200 m<sup>3</sup>/h haben. Eine entsprechende Lüftung mit ungefilterter Außenluft (Fenster- und Türöffnung) ist kein gleichwertiger Ersatz, wenn sich im Raum Pollenallergiker aufhalten. Das gilt zumindest für die warmen Monate des Jahres. In der übrigen Zeit ist eine intensi-

ve Fensterlüftung zur Staubreduzierung ein energievergehendes Unternehmen.

Die Luftreinigung ist nur notwendig, solange ein als störend betrachteter Staubpegel vorliegt. In der übrigen Zeit genügt der zur Frischluftzufuhr nötige Luftaustausch. Es wäre wünschenswert, wenn ein Sensor eine unerwünschte Staubkonzentration feststellte und den Entstauber einschaltete. Derartige Sensoren zu einem Preis, der ihren Einsatz in der Wohnungsluftentstaubung zuläßt, gibt es zur Zeit nicht auf dem Markt. Die Art des Filters richtet sich nach der Partikelgröße, die ausgefiltert werden soll. Für Pollen genügen Grobfilter, die Körner ab 10 µm abscheiden, für Tabakrauch sind Feinststaubfilter nötig, die bereits Staubkörner unter 0,5 µm festhalten.

Die Ausbreitung und die Ausfilterung von Geruchsstoffen in der Luft verhalten sich ähnlich wie die von Aerosolen. Zur Geruchsbekämpfung sind daher ebenfalls 3 Luftwechsel in der Stunde sinnvoll, mit Außenluft oder mit z. B. durch Aktivkohlefilter gereinigter Umluft. Damit kann der Gehalt der Raumluft an Geruchsstoffen, die kontinuierlich an sie abgegeben werden, auf etwa 10% der Konzentration reduziert werden, die man ohne Betrieb des Geruchsfilters anträte. Bei stoßartiger Emission von Geruchsstoffen wird die Konzentration in etwa 1 Std. auf 10% abgebaut; ohne den Betrieb eines Filters benötigte diese Reduzierung mehr als 10 Std.

#### **Anhang**

##### *Modell der Staubaufwirbelung und Entstaubung*

Wir betrachten den Raum als abgeschlossenes System. Der Staub entstehe dort gleichmäßig verteilt oder werde rasch (innerhalb einiger Minuten) gleichmäßig verteilt.

Der in der Luft befindliche Staub sinkt zu Boden. Eine konstante Staubkonzentration stellt sich dann ein, wenn im gleichen Zeitabschnitt ebensoviel Staub aufgewirbelt bzw. emittiert wird, wie Staub zu Boden sinkt. Dabei spielen in dem geschlossenen System Luftbewegungen keine Rolle, weil sie stets geschlossene Bahnen beschreiben und daher die mittlere Sinkbewegung der Staubkörner nicht beeinflussen.

Die Anzahl Staubaufwirbelungen und Sedimentationen in der Stunde nennen wir Staubwechsel  $m$ . Das gut schwebefähige Aerosol benötigt weniger Staubwechsel in der Stunde, wenn seine Konzentration konstant bleiben soll, als die schneller sinkenden größeren Staubteilchen.

Wird dem Raum an einer Stelle kontinuierlich staubhaltige Luft entnommen und durch staubfreie Luft ersetzt, so sinkt die Staubkonzentration der Raumluft. Man kann diese Lufterneuerung als Luftwechsel  $n$  ausdrücken, d. h. durch die Zahl der stündlich in den Raum eingebrachten Raumvolumina Luft. Ebensoviel Raumluft, d. h. Gemisch aus zugeführter und im Raum vorhandener Luft, wird abgeführt. Es spielt keine Rolle, ob dieser Luftwechsel mit gereinigter Außenluft geschieht oder durch Luft, die mittels eines Filters im Raum selbst gereinigt wurde.  $n$  ist dann die Anzahl Filterdurchgänge in der Stunde.

Die Staubkonzentration  $k$  in einem Raum, in dem Staub  $m$ mal in der Stunde aufgewirbelt wird und in dem das Volumen  $n$ mal in der Stunde durch reine Luft ersetzt wird (beide Vorgänge verlaufen kontinuierlich), wird beschrieben durch

$$k = \frac{k_0}{1 + \frac{n}{m}} \tag{1}$$

wobei  $k_0$  die Staubkonzentration ist, die sich einstellt, wenn kein Luftwechsel erfolgt.

Hat der Filter des Luftreinigers den Abscheidewirkungsgrad  $\eta_F$ , so wird die Beziehung

$$k = \frac{k_0}{1 + \frac{n(1 - \eta_F)}{m}} \tag{2}$$

Analog wird die Beziehung bei Spülung mit Außenluft, die die Staubkonzentration  $k_a$  enthält

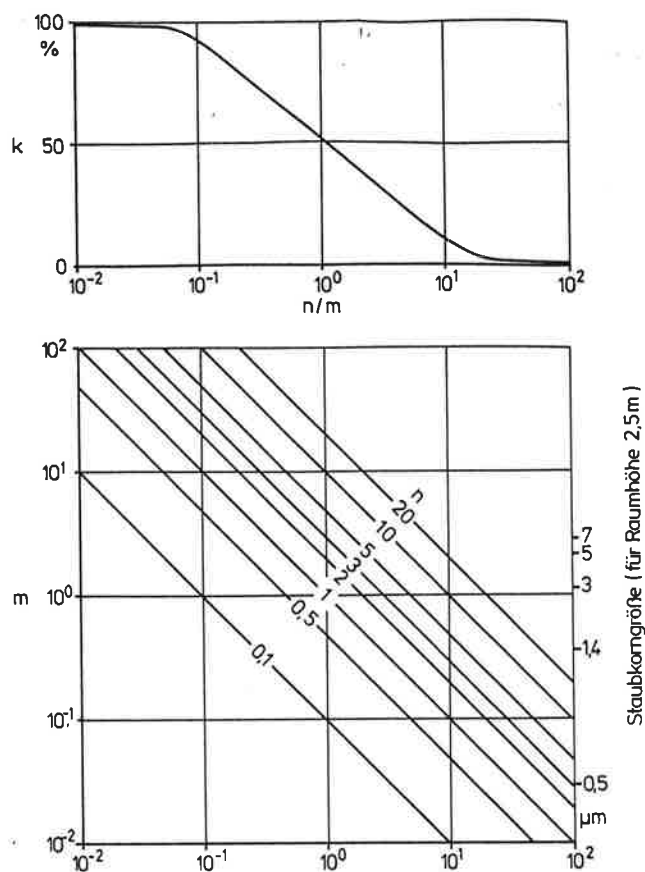
$$k = \frac{k_0}{1 + \frac{n}{m} \left(1 - \frac{k_0}{k}\right)} = \frac{k_0 + \frac{n}{m} k_a}{1 + \frac{n}{m}} \tag{3}$$

Die Beziehung (1) ist in *Bild 5* (oben) graphisch dargestellt, wobei  $k_0 = 100\%$  gesetzt wurde.

Sind Luft- und Staubwechselzahlen gleich, so wird die Staubkonzentration im Raum auf die Hälfte reduziert. Um die Staubkonzentration im Raum auf  $1/10$  zu vermindern, ist ein fast 10mal höherer Luft- als Staubwechsel nötig. Im unteren Teil des *Bildes 5* ist die Beziehung  $n/m$  dargestellt. Aus dem gesamten Nomogramm kann man nun leicht ablesen, welche Staubkonzentration  $k$  sich im Raum einstellt, wenn zu einem bestehenden Staubwechsel  $m$  ein Luftwechsel  $n$  gewählt wird.

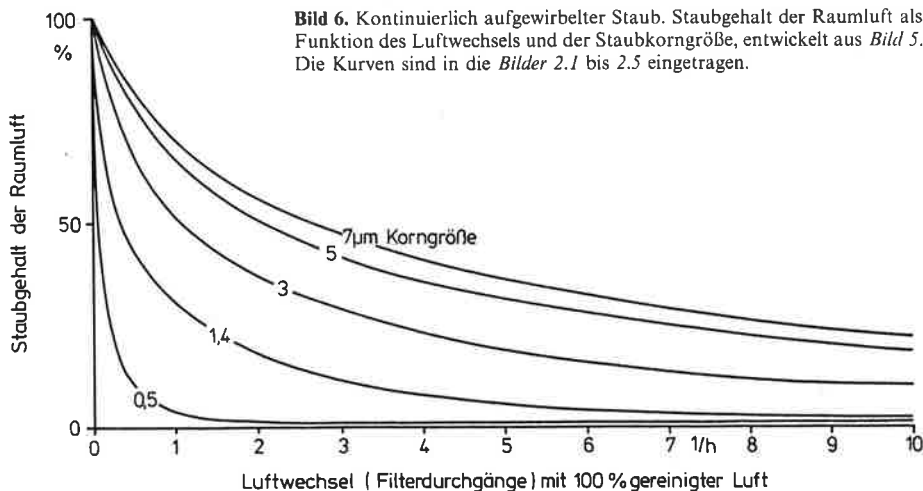
Bei der Zuordnung der Staubkorngrößen zu den Staubwechselzahlen kann man sich an der Sinkgeschwindigkeit der Staubkörner orientieren, die durch das Sedimentationsgesetz von *Stokes* bzw. *Stokes-Cunningham*, siehe z. B. [17] beschrieben wird. Ein Staubzyklus besteht aus der Zeit für die Aufwirbelung und der Zeit für die Sedimentierung: die Anzahl dieser Zyklen in der Stunde (für jede Staubkorngröße unterschiedlich) ist die Staubwechselzahl  $m$ .

Jedes Staubkorn muß bei der Sedimentation im Mittel die halbe Raumhöhe durchqueren; in unserem Fall 1,25 m. Daraus errechnet sich seine Sinkzeit. Die Aufwirbel- und Verteilzeit



**Bild 5.** Kontinuierlich aufgewirbelter Staub. Nomogramm zur Ermittlung der Staubkonzentration  $k$  in der Raumluft während des Betriebes von Luftreinigern aus der Luftwechselzahl  $n$  und der Staubwechselzahl  $m$ . Auf der  $m$ -Skala sind zusätzlich Staubpartikelgrößen eingetragen, die in einem 2,5 m hohen Wohnraum zu den entsprechenden Staubwechseln führen. Das Nomogramm wurde aus einer Modellvorstellung entwickelt.

kann man dem Experiment entnehmen, indem man die Staubkorngröße aussucht, bei der die Aufwirbelzeit genau so lang ist wie die Sinkzeit. Aus dem daraus resultierenden Staubwechsel  $m$  und dem eingestellten Luftwechsel  $n$  entnimmt man dem Nomogramm *Bild 5* die Staubkonzentration im Raum  $k$ . Wo Berechnung und Experiment übereinstimmen, waren Aufwirbel- und Sinkzeit gleich lang.



**Bild 6.** Kontinuierlich aufgewirbelter Staub. Staubgehalt der Raumluft als Funktion des Luftwechsels und der Staubkorngröße, entwickelt aus *Bild 5*. Die Kurven sind in die *Bilder 2.1 bis 2.5* eingetragen.



In unserem Fall ergab sich eine Aufwirbel- und Verteilzeit von etwa 14 min. Da Wohnräume zumeist 2,50 m hoch sind und da in ihnen gewöhnlich geringe Luftbewegungen auftreten, kann diese Aufwirbel- und Verteilzeit für Wohnräume als orientierender Wert angesehen werden. Die damit für verschiedene Staubkorngrößen errechneten Staubwechsel  $m$  sind in *Bild 5* markiert, indem die entsprechende Staubkorngröße an die  $m$ -Skala geschrieben wurde. Daraus läßt sich das Nomogramm *Bild 6* entwickeln, das den Staubgehalt der Raumluft für verschiedene Staubkorngrößen als Funktion des Luftwechsels angibt. Die Kurven aus *Bild 6* sind in die *Bilder 2.1* bis *2.5*, die die experimentellen Ergebnisse zeigen, eingetragen. Wenn keine Störung durch Selbstaufwirbelung von Staub auftritt, zeigt sich eine brauchbare Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment.

*Bild 6* zeigt deutlich, daß bei kontinuierlich aufgewirbeltem Staub mit einem bestimmten Luftwechsel, z. B. 2mal in der Stunde, die Konzentration der kleinen Staubkörner wirkungsvoller reduziert werden kann als die der größeren. Das ist verständlich, wenn man sich vor Augen hält, daß ein Aerosolteilchen während seiner langen Schwebezeit in der Luft eine viel größere Chance hat, im Luftreiniger abgetrennt zu werden (oder mit der Fortluft wegtransportiert zu werden), als ein gröberes Staubkorn, das schnell zu Boden sinkt und oft aufgewirbelt werden muß, ehe es schließlich vom Entstauber erfaßt wird.

### Zusammenfassung

Experimente mit Luftreinigern in einem Wohnraum, in dem kontinuierlich Staub aufgewirbelt wurde, zeigten, daß die Konzentration der kleinen Staubpartikeln (ca.  $3 \mu\text{m}$ ) mit etwa 3 Luftwechseln in der Stunde mit gereinigter Luft auf 25% und darunter vermindert werden konnte. Für eine wirksame Verminderung der Konzentration der größeren Partikeln benötigt man sehr hohe Luftwechsel. Sie sind technisch kaum realisierbar, zumal durch diese Maßnahmen selbst Staub aufgewirbelt werden kann. Eine Modellvorstellung der Aufwirbelung und Ausfilterung von Staub verschiedener Korngröße zeigt brauchbare Übereinstimmung mit den Experimenten.

Nach stoßartigem Einbringen von Tabakrauch in einen Raum sinkt die Konzentration der größeren Partikeln, z. B. der mit  $5-7 \mu\text{m}$  Durchmesser, durch Sedimentation nach etwa 2 Std. auf 10%. Ein etwa zweifacher Luftwechsel mit gereinigter Luft verringert diese Zeit auf eine halbe Stunde. Bei den kleinen Partikeln, unter  $1 \mu\text{m}$  Durchmesser, benötigt die natürliche Sedimentation mehr als 15 Std., um die Konzentration auf 10% zu reduzieren. Mit einem 3fachen Luftwechsel mit 100% gereinigter Luft gelingt das in 1 Std. Für die Luftreinigung in Wohnräumen, usw., benötigt man also Geräte, die einen zwei- bis dreifachen Luft-

wechsel in der Stunde mit gereinigter Luft durchführen. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Luftwechsel mit gereinigter Außenluft erfolgen oder ob die Luft im Raum selbst mittels Filtern (Luftreinigern) gereinigt wird. Der Gehalt der Raumluft an Staub wird von der Aufwirbelung bzw. Emission bestimmt. Luftreiniger können die Staubkonzentration auf einen Bruchteil davon reduzieren bzw. schneller auf einen niedrigeren Pegel herabdrücken. Im Raum aufgewirbelte große Partikeln, z. B. Pollen, werden nur ungenügend beseitigt. Man sollte sie nicht in den Raum eindringen lassen.

Der Mechanismus der Ausbreitung und Ausfilterung von Gerüchen verläuft ähnlich dem der kleinen Staubpartikeln, der Aerosole. Die Maßnahmen der Aerosolbekämpfung können daher prinzipiell – durch den Einsatz geeigneter Filter – auf die Geruchsbekämpfung übertragen werden.

### Literatur

- [1] *Yocom, J. E.*: Indoor-Outdoor Air Quality Relationships. Journ. Air Pollution Control Association 32 (1982), S. 500–520.
- [2] *Repace, J. L.*: Indoor Air Pollution. Environment International 8 (1982) S. 21–36.
- [3] *Seifert, B.*: Vergleich der innerhalb und außerhalb geschlossener Räume auftretenden Konzentrationen anorganischer und organischer Verbindungen. Luftqualität in Innenräumen (Aurand, Seifert, Wegner) 1982, S. 41–74.
- [4] *Wanner, M. U.*: Luftqualität in Wohn- und Arbeitsräumen. Sozial- und Präventivmedizin 25 (1980) S. 328–332.
- [5] *Hinkle, L. E. und Murray, S. H.*: The Importance of the Quality of Indoor Air. Bull. N.Y. Acad. Med. 57 (1981) S. 827–844.
- [6] *Kanz, E.*: Luft- und Staubkeime als Problem der Arbeitsräume. Beispiele angewandter Forschung 1966/1967. Jahrbuch der Frauenhofer-Gesellschaft S. 54–63.
- [7] *Repace, J. L. und Lowrey, A. H.*: Indoor Air Pollution, Tobacco Smoke, and Public Health. Science 208 (1980) S. 464–472.
- [8] *Laskus, L. und Lahmann, E.*: Korngrößenverteilung von Stäuben im Rauchgas von Kraftwerken und in atmosphärischer Luft. Staub – Reinh. d. Luft 37 (1977) S. 136–140.
- [9] *Mutz, G.*: Immissionsmessungen im Raum Mannheim-Ludwigshafen. Aktuelle Situation und mehrjähriger Trend der Luftbelastung. Staub – Reinh. d. Luft 43 (1983) S. 235–239.
- [10] *Kleinhorst, H.*: Entwicklung der Jahresemissionen in der Bundesrepublik Deutschland. Brennst. – Wärme – Kraft 36 (1984) S. 20.
- [11] *Sprengler, J. S., Harrington, J. J., Wilson, R., und Speizer, F.*: Analysis of Health Effects Resulting from Population Exposures to Ambient Particulate Matter. U.S. Department of Energy, Agreement No. DE-AL02-81 EV10731, (Oktober 1982).
- [12] *Klotz, F., und Wanner, H. U.*: Die Wirkung von Luftreinigungsapparaten auf die Qualität der Raumluft. Zbl. Bakt. Hyg., I. Abt. A 227, (1974), S. 554–563.
- [13] *Egloff, Kurt*: Über das Klima im Zimmer und seine Beziehungen zum Außenklima. Dissertation ETH Zürich um 1932.
- [14] *Lefere, N. M., und Ashley, M. J., und Pederson, L. L., und Klays, J. J.*: The Health Risks of Passive Smoking. CHEST 84 (1983) S. 90–95.
- [15] *Stehlik, G., uRichter, O., und Altmann, H.*: Concentration of Dimethylnitrosamine in the Air of Smoke-Filled Rooms. Ecotoxicology and Environmental Safety 6 (1982) 495–500.
- [16] *Varga, A.*: Reinraumluft durch Luftionen. HLH 33 (1982) S. 433–434.
- [17] *ASHRAE Handbook 1977, Fundamentals. Chapter 11. Air Contaminants.*
- [18] *Reed, Ch. E.*: Allergie Agents. Bull. N.Y. Acad. Med. 57 (1981) S. 897–906.