

Partikelpenetration von der Außenluft in die Raumluft: Durchlässigkeitskoeffizienten in Abhängigkeit von Partikelgröße und Luftdichtheit der Untersuchungsräume

Detlef Laußmann und Dieter Eis

Robert Koch-Institut, Abteilung Epidemiologie und Gesundheitsberichterstattung, Fachgebiet Epidemiologie nicht übertragbarer Krankheiten, Umweltmedizin, General-Pape-Straße 62-66, 12101 Berlin

Korrespondenzautor: Detlef Laußmann; E-Mail: LaussmannD@rki.de

Zusammenfassung

Hintergrund: Um das Ausmaß der Penetration von Außenluftpartikeln in Innenräume zu bestimmen, wurde eine Feldstudie in sechs vorübergehend ungenutzten Büroräumen durchgeführt, die unterschiedlich hohe Luftdichtheiten aufwiesen. Fünf Büroräume mit relativ niedriger Luftdichtheit waren mit Kastendoppelfenstern ausgestattet. Der Büroraum mit relativ hoher Luftdichtheit verfügte über Fenster mit Isolierverglasung und umlaufenden Dichtungstreifen.

Methode: Die Durchlässigkeitskoeffizienten oder Penetrationsfaktoren für Teilchen mit aerodynamischen Äquivalentdurchmessern zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $> 5 \mu\text{m}$ wurden auf der Grundlage eines Steady-State-Modells ermittelt, das im Beitrag beschrieben wurde. Die dafür notwendigen Luftwechsel- und Partikeleliminationsraten wurden aus den Abklingkurven des CO_2 und der Teilchen nach vorheriger kurzzeitiger Konzentrationserhöhung bestimmt. Nach Erreichen konstanter Innenraumkonzentrationen erfolgten Messungen der Partikel-Außenluftkonzentrationen zur Ableitung größenspezifischer Innen-/Außenluft-Relationen.

Ergebnisse: Die unterschiedlich hohe Luftdichtheit der Räume spiegelt sich sowohl in den gemessenen mittleren Luftwechselraten ($0,42 \text{ h}^{-1}$ durchschnittlicher Luftwechsel in Räumen mit Kastendoppelfenstern, gegenüber $0,17 \text{ h}^{-1}$ im Raum mit Isolierverglasung) als auch in den Innen-/Außenluftquotienten wider. In Abhängigkeit von der Partikelgröße waren die Quotienten um den Faktor 2-30 höher in Räumen mit Kastendoppelfenstern als im Raum mit Isolierglasfenstern. Dem entsprechend liegen auch die Penetrationsfaktoren partikelgrößenabhängig in diesen Räumen etwa um den Faktor 1,3-10 oberhalb der Penetrationsfaktoren des Raumes mit Isolierglasfenstern.

Schlussfolgerungen: Wie erwartet besitzen luftdicht gebaute Gebäude mit sehr dichten Fenstern gegenüber Außenluftpartikeln eine höhere Abschirmwirkung. Dies führt partikelgrößenabhängig zu einer Expositionsminimierung der Bewohner gegenüber partikulären Außenluftverunreinigungen. Infolge der eingeschränkten Exfiltrationseigenschaften dicht schließender Fenster kann jedoch die Luftqualität durch Innenraumquellen in den betreffenden Räumen beeinträchtigt werden.

Schlagwörter: Feinstaub, Durchlässigkeitskoeffizient, Penetrationsfaktor, Luftdichtheit, Gebäude, Büroraum

Abstract

Penetration of particles from outdoor into indoor air. Penetration factors in relation to particle size and air tightness of rooms

Background: In order to determine the penetration rate of outdoor particles into indoor environments a study was performed on six unoccupied office rooms with different air tightness. Five office rooms had older wooden framed double-glazed windows. The office room with relatively high air tightness was equipped with single insulating-glazed vinyl framed windows with rubbery weather strips.

Method: The penetration factors for particles in the size range of aerodynamic equivalent diameters between $> 0.3 \mu\text{m}$ and $> 5 \mu\text{m}$ were derived on the base of a steady-state model, described in the present contribution. The required model parameters, air change rate and size specific particle deposition rates, were estimated from the appropriate decay curves (CO_2 concentration and particle number concentrations, respectively). After declining the indoor particle concentration to equilibrium, outdoor measurements of particles were undertaken for estimation of size specific indoor/outdoor concentration ratios.

Results: The different air tightness of the investigated rooms manifests in the measured average air change rates ($0,42 \text{ h}^{-1}$ vs. $0,17 \text{ h}^{-1}$ in the room with vinyl framed windows) as well as in the different indoor/outdoor particle ratios. Depending on the particle size the I/O ratios were about a factor of 2 to 30 higher in the rooms with old wooden framed windows than in the room with vinyl framed windows. The corresponding penetration factors differed about a factor 1.3 to 10 between both room types.

Conclusions: As expected, airtight buildings equipped with tight windows are better sealed against outdoor particles. Depending on their particle sizes this diminishes the exposure of the occupants to particulate matter of outdoor origin. Although, as a result of limited exfiltration capacity of tight closing windows, the air quality can be affected in the presence of indoor sources in such rooms.

Keywords: Fine particles, penetration factor, air tightness, buildings, office rooms

1 Einleitung

In der Außenluft vorhandene Staubpartikel können selbst bei geschlossenen Fenstern über Undichtheiten im Fensterbereich oder über Leckagen der Gebäudehülle in die Innenräume von Gebäuden gelangen (Nazaroff 2004). Der damit verbundene Partikeltransfer hat eine große Bedeutung sowohl für die Raumluftqualität in Innenräumen als auch für den Schutz der Raumnutzer gegenüber potenziell gefährlichen Außenluftaerosolen wie sie im Gefolge von terroristischen Anschlägen, kerntechnischen oder anderen industriellen Unfällen oder bei Bränden auftreten können. Das Ausmaß des Transfers von Partikeln aus der Außen- in die Innenraumluft kann somit die Höhe der Exposition der Raumnutzer durch suspendierte Partikel und den Grad der Oberflächenkontamination durch deponierte Partikel mit bestimmen. Aufgrund ihrer Bedeutung für Expositions- und Kontaminationsschätzungen ist die Ermittlung von Durchlässigkeitskoeffizienten (Penetrationsfaktoren) sowohl Gegenstand von Modellrechnungen (Liu und Nazaroff 2001) als auch von Untersuchungen in Prüfkammern (Lewis 1995, Mosley et al. 2001, Liu 2002, Liu und Nazaroff 2002, 2003) und Feldstudien (Thatcher und Layton 1995, Long et al. 2001, Chao et al. 2003).

Der Partikeltransfer von der Außenluft in die Innenraumluft kann unter bestimmten Bedingungen erhebliche Ausmaße annehmen. So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass es im Gefolge von Silvesterfeuerwerken, bei denen regelmäßig Partikel mit einem breiten Teilchengrößenspektrum gebildet werden, zu einer drastischen Zunahme der Partikelkonzentration in der Luft von Innenräumen kommt (Bake 2002, Bake et al. 2004). Dies umfasst Teilchen unterschiedlicher Größe, wobei allerdings kleine Partikel unter $PM_{1,0}$ oder unter $PM_{2,5}$ deutlich leichter penetrieren. Diese Penetration erfolgt selbst noch bei relativ dicht schließenden Fenstern (Laußmann und Eis 2007, 2009).

Aufgrund dieser Beobachtungen stellte sich die Frage nach einer Quantifizierungsmöglichkeit beziehungsweise nach dem Grad der Durchlässigkeit von Raumumschließungen für Außenluftpartikel, insbesondere von geschlossenen Fenstern für luftgetragene Teilchen. Auch im deutschsprachigen Raum sind in letzter Zeit zu dieser Problematik bereits Untersuchungen durchgeführt worden (Franck et al. 2003, 2006).

Eine Maßzahl, die die Durchlässigkeit von Gebäudestrukturen beschreibt, ist der Durchlässigkeitskoeffizient (engl.: penetration factor). Er gibt an, in welchem Anteil die Außenluftteilchen bei geschlossenen Fenstern in den jeweiligen Innenraum penetrieren können. Da offenbar nicht nur Räume mit relativ niedriger Luftdichtheit für kleine wie auch größere Teilchen aus der Außenluft penetrieren sind

(Bake et al. 2004), sondern auch Räume mit sehr dichten Fenstern, wie zum Beispiel Isolierglasfenstern mit Gummi-lippendichtungen, noch in gewissem Umfang für größere Partikel aus der Außenluft penetrierbar zu sein scheinen (Laußmann und Eis 2009), wurden orientierende Bestimmungen von Durchlässigkeitskoeffizienten für luftgetragene Teilchen in vorübergehend ungenutzten Büroräumen mit unterschiedlicher Luftdichtheit und Fensterbauart durchgeführt. Dabei haben wir uns auf Modelle und Messprotokolle gestützt, die bereits von anderen Untersuchern im internationalen Schrifttum publiziert worden sind. Die Ergebnisse unserer Untersuchungen werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt.

2 Material und Methoden

2.1 Partikelkonzentration in der Raumluft

Für die Bestimmung des Beitrags, den Außenluftteilchen zur Partikelkonzentration in der Innenraumluft leisten, sind die Quellen und der Verbleib der Teilchen im Innenraum zu betrachten. Wenn man eine gleichförmige Vermischung der Luft in einem Raum annimmt, dann kann die Partikelkonzentration in der Innenraumluft durch eine Massenbilanzgleichung beschrieben werden (Alzona et al. 1979). In diesem Modell lassen sich vier Vorgänge definieren, die die Partikelmasse in der Innenraumluft bestimmen (Dockery und Spengler 1981).

1. Die Penetration von Außenluftteilchen in das Gebäude über Fenster, Türen, Lufteinlässe, Lüftungsschächte, Leckagen oder sonstige Undichtheiten der Gebäudehülle. Der Massenstrom der penetrierenden Teilchen ist definiert als das Produkt aus Zuluftvolumenstrom, Außenluftkonzentration der Teilchen und dem Anteil von Teilchen (Penetrationsfaktor), die bei der Passage durch die Gebäudehülle nicht durch Filtrationsvorgänge zurückgehalten werden.
2. In Innenräumen laufen eine Reihe von Vorgängen ab, die zur Konzentrationsverringerung der suspendierten Partikel führen (Senken). Hierzu gehören physikalische Prozesse wie Depositionsvorgänge durch turbulente Diffusion, Thermophorese und Sedimentation, die Exfiltration der Teilchen über den Luftwechsel und chemische wie z.B. oxidative Reaktionen. Die durch die einzelnen Vorgänge bedingte Konzentrationsverminderung ist als das Produkt der jeweiligen prozessspezifischen Zeitkonstanten multipliziert mit der Innenraumpartikelmasse definiert.
3. In Innenräumen kann es durch vorhandene Quellen zur Partikelneubildung und damit zum Konzentrationsaufbau kommen. Hierzu gehören Erhitzungs-/Verbren-

nungsprozesse, Kondensationsvorgänge, Abrieb und/oder Resuspension abgelagerter Teilchen. Diese Vorgänge können durch die jeweiligen Partikelbildungsrate beschrieben werden.

4. Nach Erreichen eines dynamischen Gleichgewichtes sind der Teilchenmassenstrom in Zuluft und Abluft betragsmäßig gleich. Der Abluftmassenstrom ergibt sich aus dem Produkt von Raumluftvolumenfluss und Partikelkonzentration der Raumluft.

Die Massenbilanzgleichung kann dann geschrieben werden als:

$$dQ_k(t)/dt = (1 - F_k)qC_{ok}(t) - qC_k(t) - \lambda_{dk} Q_k(t) + S_k(t) \quad (1)$$

dabei ist:

$Q_k(t)$	Masse der Innenraumpartikel mit Durchmesser k
F_k	Anteil der Partikel mit Durchmesser k , die beim Übertritt von der Außenluft in den Raum herausgefiltert werden
$(1 - F_k) = P_k$	Durchlässigkeitskoeffizient für Außenluftteilchen mit Durchmesser k
q	Zuluft- oder Abluftvolumenstrom (Volumen/Zeit)
V	Raumvolumen
t	Zeit
λ_v	Luftwechselrate = q/V (1/Zeit)
λ_{dk}	Depositionsrate der Partikel mit Durchmesser k (1/Zeit)
S_k	Partikelbildungsrate (Masse/Zeit)
$C_{ok}(t)$	Außenluftkonzentration (Masse/Volumen) der Partikel mit Durchmesser k
$C_k(t)$	Raumluftkonzentration (Masse/Volumen) der Partikel mit Durchmesser k

Dividiert man Gl. 1 durch das Raumvolumen V , so ergibt sich die Gleichung für die zeitliche Veränderung der Partikelmassenkonzentration im Innenraum:

$$d C_k(t)/dt = P_k \lambda_v C_{ok}(t) - \lambda_v C_k(t) - \lambda_{dk} C_k(t) + S_k(t)/V \quad (2)$$

Auf der rechten Seite der Gleichung repräsentiert der Term nach dem Pluszeichen die Partikelquellen in Innenräumen und die Glieder mit den negativen Vorzeichen die Senken. Die Infiltration von Außenluftteilchen in den Raum hinein wird durch den Term hinter dem Gleichheitszeichen ($P_k \lambda_v C_{ok}(t)$) beschrieben. Wobei λ_v die Luftwechselrate und P_k der Durchlässigkeitskoeffizient oder Penetrationsfaktor für Teilchen mit dem Durchmesser k ist. Der Term $\lambda_v C_k(t)$ beschreibt die Exfiltration von Raumluftpartikeln über den Luftwechsel und der Term $\lambda_{dk} C_k(t)$ mit λ_{dk} als Depositionskonstanten stellt die Abnahme von Raumluftpartikeln aufgrund von Depositionsvorgängen dar.

Wenn die Untersuchungen in Räumen ohne Partikelquellen durchgeführt werden, keine Personen während der Messungen sich im Raum aufhalten und somit Resuspensionseffekte ausgeschlossen werden können, kann der Term $S_k(t)/V$ für die Partikelbildungsrate vernachlässigt werden und Gl. 2 verkürzt sich auf:

$$dC_k(t)/dt = P_k \lambda_v C_{ok}(t) - (\lambda_v + \lambda_{dk}) C_k(t) \quad (3)$$

Nach Integration erhält man:

$$C_k(t) = [C_k(t_0) - P_k \lambda_v C_{ok}/(\lambda_v + \lambda_{dk})] \exp - (\lambda_v + \lambda_{dk})t + P_k \lambda_v C_{ok}/(\lambda_v + \lambda_{dk}) \quad (4)$$

Gleichung 4 setzt sich rechts vom Gleichheitszeichen aus einem komplexen Exponentialterm und einem absoluten Glied $P_k \lambda_v C_{ok}/(\lambda_v + \lambda_{dk})$ zusammen. Mit wachsender Zeit verschwindet der Einfluss des Exponentialterms und die Raumluftkonzentration der Partikel nähert sich ihrem Steady-State-Wert $C_k(eq)$. Die Steady-State-Konzentration $C_k(eq)$ entspricht dem Term $P_k \lambda_v C_{ok}/(\lambda_v + \lambda_{dk})$ in Gl. 4. Wird dieser Ausdruck durch $C_k(eq)$ ersetzt, erhält man:

$$C_k(t) = [C_k(t_0) - C_k(eq)] \exp - (\lambda_v + \lambda_{dk})t + C_k(eq) \quad (5)$$

Die Größe $C_k(t_0)$ entspricht dabei der Anfangskonzentration der Partikel mit Durchmesser k in der Raumluft.

Ein typisches Abklingprofil von Raumluftpartikeln der untersuchten Größenklassen im Raum mit Kastendoppelfenstern bei einem Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ ist in **Abbildung 1** grafisch dargestellt. In dieser Messreihe werden die Steady-State-Konzentrationen nach etwa 8 h für Partikel $> 5 \mu\text{m}$ oder 11 h für Partikel $< 5 \mu\text{m}$ erreicht. Diese Zeitspanne entspricht etwa 4-5,5 Luftaustauschen des gesamten Raumvolumens.

Unter Bedingungen des stationären Zustandes, d.h. konstanter oder nahezu konstanter Außenluft- und Innenluftkonzentration, kann aus der Beziehung $C_k(eq) = P_k \lambda_v C_{ok}/(\lambda_v + \lambda_{dk})$ durch umstellen

$$P_k = [C_k(eq)/C_{ok}] [(\lambda_{dk} + \lambda_v)/\lambda_v] \quad (6)$$

der Durchlässigkeitskoeffizient oder Penetrationsfaktor P_k ermittelt werden, da alle Größen direkt oder indirekt messtechnisch zugänglich sind. Aus Gl. 6 kann geschlossen werden, dass unter Bedingungen des Fließgleichgewichts der Penetrationskoeffizient P_k immer größer sein muss als der Innenluft-/Außenluftquotient $C_k(eq)/C_{ok}$ der Teilchen, wenn die Teilchen Depositionsvorgängen verschiedenster Art unterliegen. Nur unter Bedingungen sehr hoher Luftwechselraten ist der Einfluss der Deposition vernachlässigbar, sodass der Penetrationsfaktor dem Indoor-/Outdoor-Quotienten entspricht. Man kann den Penetrationsfaktor auch auffassen, als den Anteil der Außenluftpartikel in Innenräumen, der nach Passage der Gebäudehülle in der

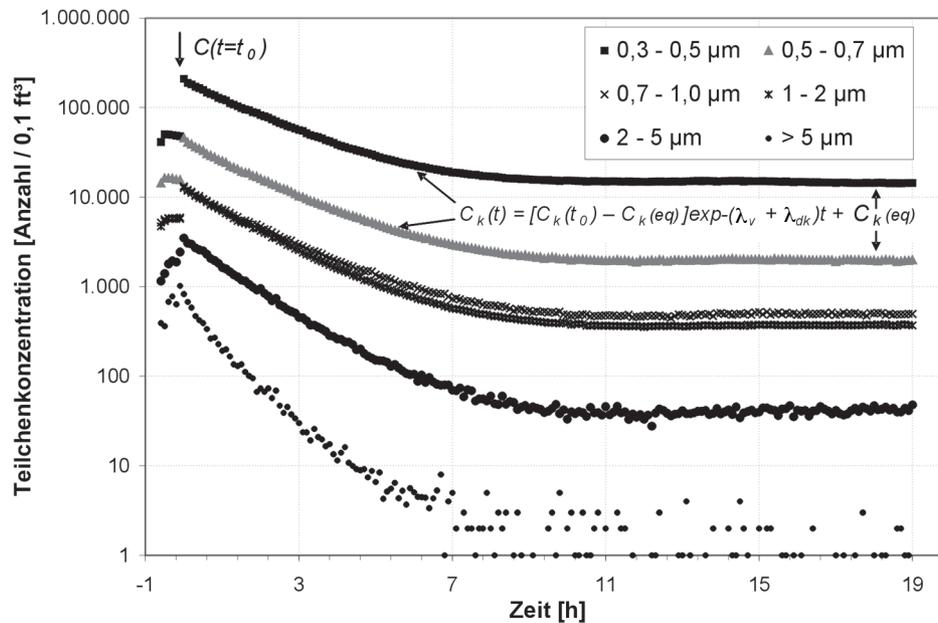


Abb. 1: Abklingkurven von Raumluftteilchen (Größenbereich 0,3 bis > 5 µm) bei einer Luftwechselrate von 0,5 h⁻¹ bis in den Steady-State-Bereich hinein nach vorheriger Konzentrationserhöhung

Raumluft suspendiert bleibt zusätzlich zu dem Anteil, der sich auf Oberflächen abgelagert hat. Während der Indoor-/Outdoor-Quotient oder auch Infiltrationsfaktor genannt (Long et al. 2001) nur durch den Anteil der Außenluftteilchen definiert ist, der in Innenräume hinein penetriert und in der Raumluft suspendiert bleibt (Wilson und Suh 1997, Wilson et al. 2000).

2.2 Untersuchungsräume und -zeiten

Die Messungen wurden in Berlin von Mai bis September 2007 in zwei Bürogebäuden durchgeführt, deren Räume mit Fenstern unterschiedlicher Bauart ausgestattet waren. Die fünf Räume in Gebäude 1 (Baujahr um 1900) waren leer stehend und wiesen Kastendoppelfenster auf, der Raum in Gebäude 2 (Baujahr 1978) war möbliert und besaß drei Fenster aus Kunststoffrahmen mit umlaufenden Gummilippendichtungen.

Während der Messungen waren die Räume ungenutzt, um eine Aufwirbelung von Bodenstaubteilchen zu vermeiden oder sonstige personengebundene Quelleneffekte auszuschalten. Fenster und Türen waren geschlossen. Des Weiteren erfolgten die Messungen in Anlehnung an Long et al. (2001) vorwiegend über Nacht oder an Wochenenden bei stabilen Wetterlagen, d.h. bei möglichst gleicher Hauptwindrichtung und konstanter Windstärke, damit die Raumluftpartikelkonzentrationen ungestört bis zum Erreichen (nahezu) konstanter Steady-State-Konzentrationen abklingen konnten.

2.3 Messmethoden und -geräte

Um die Durchlässigkeitskoeffizienten der verschiedenen Fenstereinbauten für verschiedene Partikelgrößenklassen zu bestimmen, wurde eine indirekte Methode angewendet: Zunächst wurde die Teilchenkonzentration der Räume künstlich erhöht, indem eine geringe Menge Zigarettenrauch in die Räume eingebracht wurde (Offermann et al. 1985, Xu et al. 1994). Dabei wurde die Anfangskonzentration so eingestellt, dass ein Wert von $2 \cdot 10^6$ Partikel pro ft³ (28,3 l) nicht wesentlich überschritten wurde, um den gerätebedingten Koinzidenzfehler von 5% nicht zu überschreiten. Darüber hinaus sind in diesem Konzentrationsbereich Koagulationsvorgänge ultrafeiner Tabakrauchpartikel, die zu Konzentrationsverschiebungen im messbaren Partikelspektrum führen können, vernachlässigbar, da solche Effekte für Partikel < 0,5 µm erst bei Partikelkonzentrationen von > 8.000/cm³ relevant werden (Xu et al. 1994). Tabakrauch als Modellaerosol wurde gewählt, da er leicht herstellbar ist und die physikalische Dichte der Tabakrauchteilchen mit ungefähr 1 g/cm³ der physikalischen Dichte von Standardaerosolen entspricht (Lipowicz 1988, Chen et al. 1990). Zusätzlich wurde mit einer Scheuerbürste eine Bodenfläche von ca. 1 m² etwa 30 s lang gebürstet, um die Konzentration von Teilchen des Supra-µm-Bereichs zu erhöhen, da der Anteil von Partikeln > 2 µm im Zigarettenrauch sehr gering ist. Im Anschluss daran wurde die Raumluft gründlich vermischt und die Konzentrationsabnahme der Partikel in sechs Größenklassen (0,3-0,5 µm, 0,5-0,7 µm, 0,7-1,0 µm, 1-2 µm, 2-5 µm und > 5 µm) mit einem Laserpartikelzähler Met One 237B der Fa. Pacific

Scientific Instruments/USA kontinuierlich in Abständen von 5-10 min bei einer Flussrate von 2,8 l/min (Messdauer 1 min) bis zum Erreichen konstanter oder quasikonstanter Endkonzentrationen aufgezeichnet. Zeitgleich zu den Partikelkurven wurde die CO₂-Abklingkurve mit einem Testo 400, Fa. Testo, Lenzkirch, Deutschland aufgenommen.

Die Gesamtdauer der aufzunehmenden Abklingkurven ist vom Luftwechsel abhängig. Als Faustregel für die Gesamtdauer der Messung kann $3/\lambda_v$ angenommen werden, dann ist beispielsweise die CO₂-Konzentration auf etwa 5% der Ausgangskonzentration abgefallen. Aufgrund der höheren Eliminationsraten der Raumluftpartikel haben die Konzentrationen in dieser Zeitspanne praktisch Steady-State-Werte erreicht. Bei einer Luftwechselrate von 0,1 h⁻¹ wäre eine Messdauer von mindestens 30 Stunden, bei einer Luftwechselrate von 1 h⁻¹ von mindestens drei Stunden notwendig, um in den Bereich der Hintergrundkonzentrationen zu gelangen.

2.4 Bestimmung der Eliminationsraten der Partikel, Ermittlung des Luftwechsels

Aus den Abklingkurven der Partikelkonzentrationen und des Tracergases (CO₂) wurden sowohl die Eliminationsraten (Summe aus der Depositionsrate der Teilchen und dem Luftwechsel) für einzelne Partikelgrößenklassen als auch der Luftwechsel mittels nichtlinearer Regression (SPSS Version 14) nach Gl. 5 bestimmt (Laußmann 2005). **Abbildung 2** zeigt ein typisches Beispiel.

2.5 Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten für einzelne Partikelgrößenklassen

Im unmittelbaren Anschluss an die Raumluftmessungen wurde die Konzentration der Partikel in der Außenluft über einen Zeitraum von ca. 30-50 min gemessen. Aus dem Verhältnis der größen-spezifischen Gleichgewichtskonzentrationen der Partikel in der Raumluft zu den jeweiligen Konzentrationen in der Außenluft zusammen mit dem Verhältnis der Eliminationsraten der Partikel in den Räumen zum Luftwechsel lässt sich unter Zugrundelegung eines Fließgleichgewichtsmodells nach Gl. 6 der Durchlässigkeitskoeffizient der Fenster für einzelne Partikelgrößenklassen ermitteln (Thatcher und Layton 1995, Tung et al. 1999, Thornburg et al. 2001, Chao et al. 2003).

2.6 Statistische Auswertung

Die Innen-/Außenluftquotienten und die Eliminationsraten der Partikel wurden für jede Größenklasse mithilfe der einfachen Varianzanalyse auf Unterschiede zwischen den Räumen mit unterschiedlicher Luftdichtheit geprüft. Als Signifikanzschwelle wurde ein p-Wert von 0,05 bei zweiseitiger Fragestellung zugrunde gelegt.

3 Ergebnisse

Der Vergleich zwischen Gebäuden/Räumen mit unterschiedlicher Fensterbauart erbrachte die folgenden Resultate, wobei zunächst die zur Berechnung der Durchlässig-

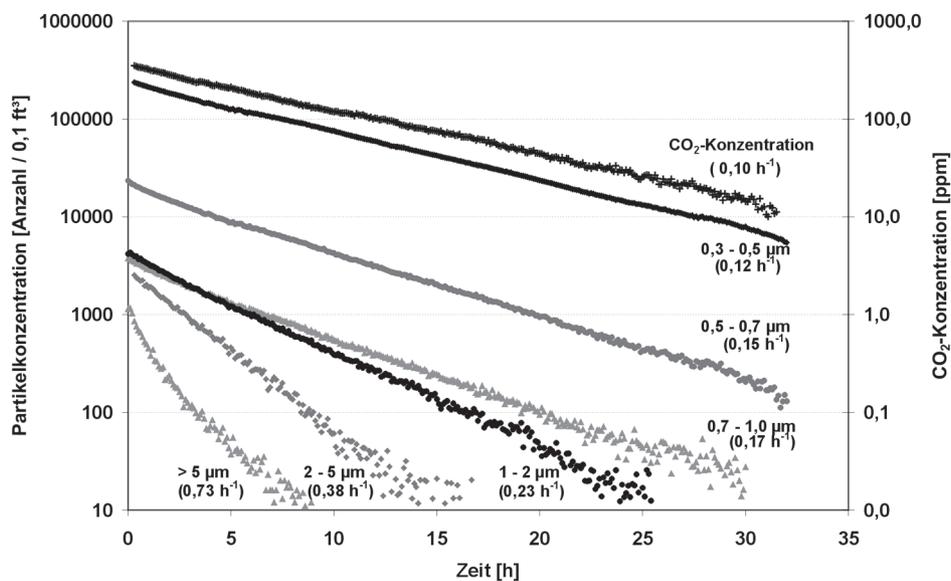


Abb. 2: Abklingkurven und Eliminationsraten [h⁻¹] von Teilchen verschiedenen Durchmessers [µm] und Luftwechselrate (CO₂-Konzentrationskurve) nach vorheriger künstlicher Erhöhung der Raumluftkonzentrationen

keitskoeffizienten benötigten Größen dargestellt und sodann die Koeffizienten selbst mitgeteilt werden.

3.1 Luftwechsel

Die vier Räume mit Kastendoppelfenstern wiesen gegenüber dem Büroraum mit Fenstern aus Kunststoffrahmen und Gummilippendichtungen deutlich höhere Luftwechselraten auf. Der geometrische Mittelwert betrug in den Räumen mit Kastendoppelfenstern $0,42 \text{ h}^{-1}$ bei einer Spannweite der Einzelmesswerte von $0,22 \text{ h}^{-1}$ bis $1,40 \text{ h}^{-1}$ ($n = 19$). Die große Schwankungsbreite der Luftwechselraten in diesen Räumen ist auf Windeinflüsse zurückzuführen. Im Vergleich dazu lag der geometrische Mittelwert des Luftwechsels im Raum mit Isolierglasfenstern bei $0,18 \text{ h}^{-1}$ bei einer Spannweite $0,10 \text{ h}^{-1}$ bis $0,29 \text{ h}^{-1}$ ($n = 20$). Auch hier führen höhere Windgeschwindigkeiten tendenziell zu höheren Luftwechselraten (Abb. 3).

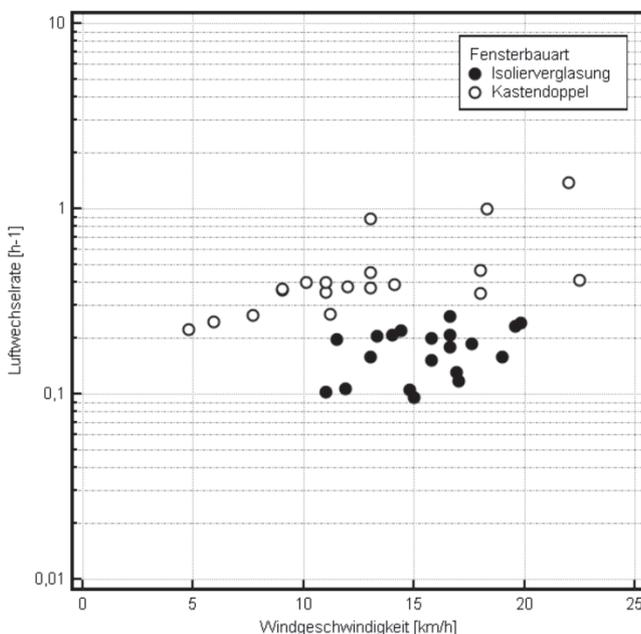


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Luftwechselrate und Windgeschwindigkeit bei Räumen mit unterschiedlicher Fensterausstattung

3.2 Indoor-Outdoor-Ratios

Nach Erreichen quasikonstanter Innenraumkonzentrationen sind in Räumen mit Kastendoppelfenstern die Innenluft-Außenluftquotienten bei allen Partikelgrößenklassen statistisch signifikant höher als im Raum mit Isolierglasfenstern (Tabelle 1). Hierin spiegelt sich die unterschiedlich hohe Luftdichtheit der Räume aufgrund der verschiedenen Fenstereinbauten wider.

Tabelle 1: Innen-Außenluft-Quotienten verschiedener Partikelgrößen in Räumen mit Fenstern unterschiedlicher Bauart nach Erreichen quasikonstanter Innenraumkonzentrationen

Partikelgröße	Isolierverglasung		Kastendoppelfenster	
	n	MW (95% CI)	n	MW (95% CI)
0,3-0,5 μm	20	0,27 (0,17-0,37)	19	0,53 (0,43-0,63)
0,5-0,7 μm	20	0,17 (0,11-0,23)	19	0,44 (0,33-0,56)
0,7-1,0 μm	20	0,11 (0,08-0,14)	19	0,43 (0,31-0,54)
1-2 μm	20	0,07 (0,05-0,09)	19	0,37 (0,26-0,48)
2-5 μm	20	0,02 (0,01-0,04)	19	0,23 (0,18-0,28)
> 5 μm	20	0,003 (0,002-0,005)	19	0,12 (0,08-0,16)

MW: arithmetischer Mittelwert; 95% CI: 95% Konfidenzintervall

3.2 Eliminations- und Depositionsraten

Die Eliminationsraten der Teilchen aller untersuchten Größenklassen, die im Raum mit Isolierglasfenstern gemessen wurden, unterscheiden sich statistisch signifikant von denen der Räume mit Kastendoppelfenstern (Ergebnisse nicht dargestellt). Dies ist auf den unterschiedlich hohen Beitrag der Luftwechselraten zur Elimination der Teilchen zurückzuführen, da der Luftwechsel – neben der Deposition die zweite wesentliche Partikelsenke – die Gesamtelimination der Teilchen aus der Raumluft mitbestimmt. In Tabelle 2 sind die Partikeldepositionsraten $[\text{h}^{-1}]$ aufgeführt. Sie ergeben sich durch Subtraktion des Luftwechsels von den jeweiligen Partikeleliminationsraten.

Im Vergleich zu den Innenluft/Außenluftquotienten in Tabelle 1 und den Eliminationsraten finden sich bei den Depositionsraten zwischen den Untersuchungsräumen geringere Unterschiede. Tendenziell wurden jedoch im Raum mit Isolierglasfenstern bei allen Partikelgrößen etwas höhere Depositionsraten bestimmt, die ab einem Durchmesser von $1 \mu\text{m}$ und darüber statistisch signifikant ausfallen. Dies ist wahrscheinlich auf das größere Oberflächenvolumenverhältnis des mit Möbeln ausgestatteten Raumes zurückzuführen.

Tabelle 2: Depositionsraten ($\lambda_e - \lambda_i$) [h^{-1}] luftgetragener Teilchen und Fensterbauart

Partikelgröße	Isolierverglasung		Kastendoppelfenster	
	n	MW	n	MW
		(95% CI)		(95% CI)
0,3-0,5 μm	20	0,09 (0,07-0,12)	19	0,07 (0,05-0,09)
0,5-0,7 μm	20	0,12 (0,10-0,14)	19	0,10 (0,07-0,13)
0,7-1,0 μm	20	0,13 (0,11-0,14)	19	0,11 (0,08-0,14)
1-2 μm	20	0,18 (0,16-0,20)	19	0,13 (0,10-0,15)
2-5 μm	20	0,35 (0,31-0,39)	19	0,24 (0,20-0,28)
> 5 μm	20	1,03 (0,84-1,22)	19	0,69 (0,60-0,78)

MW: arithmetischer Mittelwert; 95% CI: 95% Konfidenzintervall

führen. Durch die Möblierung können sich Partikel schneller an Oberflächen absetzen.

3.3 Durchlässigkeitskoeffizienten

Tabelle 3 und Abbildung 4 zeigen die aus den Innen-/Außenluftquotienten und aus den kinetischen Messgrößen nach Gl. 6 ermittelten Durchlässigkeitskoeffizienten für luftgetragene Teilchen in den Untersuchungsräumen in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser. In beiden Messreihen zeigt sich eine deutliche inverse Abhängigkeit der Penetrationsfaktoren von der Partikelgröße. Darüber hinaus weist der Raum mit Isolierglasfenstern für alle untersuchten Partikelgrößen statistisch signifikant niedrigere Durchlässigkeitskoeffizienten auf. Verglichen mit den korrespondierenden Innenluft-/Außenluftquotienten sind die Durchlässigkeitskoeffizienten in beiden Messreihen jedoch betragsmäßig größer. Dieser Unterschied ist auf den Einfluss der Partikeldeposition zurückzuführen.

4 Diskussion

In einigen experimentellen Studien bzw. bei Untersuchungen in Kammern wurden Penetrationsfaktoren in Abhängig-

Tabelle 3: Durchlässigkeitskoeffizienten für Außenluftteilchen verschiedener Größen und Fensterbauart

Partikelgröße	Isolierverglasung		Kastendoppelfenster	
	n	MW	n	MW
		(95% CI)		(95% CI)
0,3-0,5 μm	20	0,4 (0,27-0,53)	19	0,6 (0,50-0,71)
0,5-0,7 μm	20	0,29 (0,19-0,39)	19	0,55 (0,41-0,70)
0,7-1,0 μm	20	0,19 (0,14-0,24)	19	0,53 (0,39-0,67)
1-2 μm	20	0,14 (0,10-0,17)	19	0,48 (0,35-0,61)
2-5 μm	20	0,07 (0,04-0,10)	19	0,37 (0,29-0,44)
> 5 μm	20	0,02 (0,01-0,03)	19	0,31 (0,20-0,42)

MW: arithmetischer Mittelwert; 95% CI: 95% Konfidenzintervall

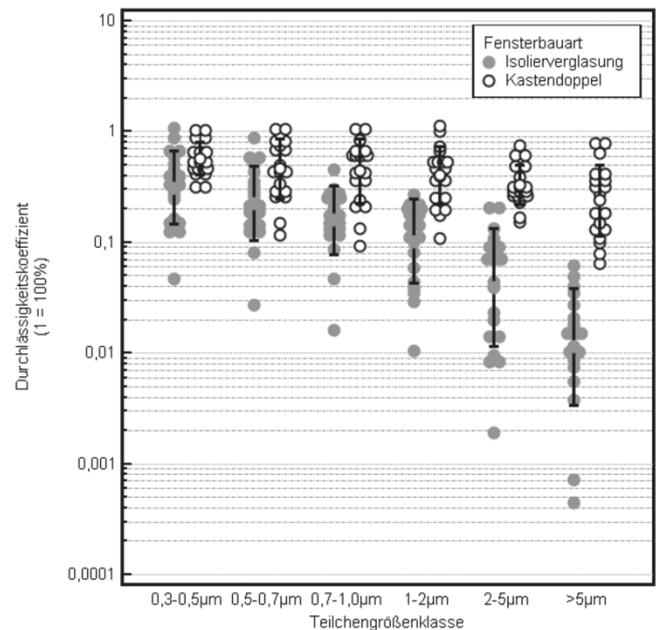


Abb. 4: Durchlässigkeitskoeffizienten für Außenluftteilchen in Räumen mit Fenstern unterschiedlicher Bauart. Fehlerbalken: Mittelwerte \pm 1 Standardabweichung. Durchschnittlicher Luftwechsel in 5 Büroräumen mit Kastendoppelfenstern: $0,42 \text{ h}^{-1}$ ($n = 19$). Durchschnittlicher Luftwechsel im Büroraum mit dichten Fenstern (Isolierverglasung): $0,17 \text{ h}^{-1}$ ($n = 20$)

keit von der Spaltgeometrie der Lecks und von angelegten Druckdifferenzen über einen weiten Partikelgrößenbereich bestimmt (Lewis 1995, Liu und Nazaroff 2002, Mosley et al. 2001). Zieht man die Resultate dieser Untersuchungen

zum Vergleich mit unseren Ergebnissen heran, so bewegen sich die von uns gefundenen Penetrationsfaktoren, die in den Räumen mit Kastendoppelfenstern bestimmt wurden in einem Wertebereich, die unter experimentellen Bedingungen in etwa Leckagen mit einer Spaltbreite von $< 0,25$ mm und einer Ausdehnung von < 10 cm bei Druckdifferenzen von < 10 Pa entsprechen. Im Untersuchungsraum, der mit Isolierglasfenstern ausgestattet war, dürften aufgrund der ermittelten Penetrationsfaktoren die Undichtheiten von noch geringerer Ausdehnung sein. Auch die von Lewis (1995) für Lecks mit einer Spaltbreite von $< 0,1$ mm bei Druckdifferenzen von etwa 10 Pa ermittelten Penetrationsfaktoren zwischen 0 und 0,8 (0 und 80%) für Partikel im Größenbereich von 1-7 μm Durchmesser, stimmen recht gut mit unseren Ergebnissen überein. Lewis hat ebenfalls gezeigt, dass mit wachsendem Differenzdruck zwischen Innenluft und Außenluft oder mit zunehmender Spaltöffnungsweite der Penetrationsfaktor für alle untersuchten Partikelgrößen ansteigt und bei Spaltbreiten von 1 mm bereits 1 (100%) beträgt.

Verglichen mit den Ergebnissen publizierter Feldstudien (vgl. **Tabelle 4**) fällt auf, dass die von uns ermittelten Penetrationsfaktoren, wenn der gleiche Partikelgrößenbereich betrachtet wird, eher im unteren Wertebereich angesiedelt sind. So liegen die Penetrationsfaktoren für Partikel $> 0,5$ μm bis > 10 μm in der Studie von Thatcher und Layton (1995) durchgängig bei 1 (100%) oder darüber, d.h. die Partikel passieren ungehindert die Gebäudehülle und

Tabelle 4: Partikelgrößen-spezifische Penetrationsfaktoren verschiedener Feldstudien

Größenbereich	Penetrationsfaktor	Quelle
ultrafeine Partikel		
0,005 bis $< 0,02$ μm	0,1-0,5	Zhu et al. 2005
0,02 bis $< 0,2$ μm	$\approx 0,5$	Zhu et al. 2005
0,017-0,109 μm	0,3-0,4	Franck et al. 2006
0,02-0,03 μm	0,68	Long et al. 2001
feine und grobe P.		
0,5 bis > 10 μm	1	Thatcher und Layton 1995
0,3 bis < 1 μm	0,9-1	Long et al. 2001
0,54-0,78 μm	0,7	Chao et al. 2003
0,85-1,38 μm	0,79	Chao et al. 2003
2 bis > 5 μm	0,3 bis 0,6	Long et al. 2001
4,7-9,6 μm	0,48	Chao et al. 2003

werden nicht herausgefiltert. Long et al. (2001) fanden Penetrationsfaktoren von 0,9 bis < 1 für Partikel im Größenbereich von 0,3 bis < 1 μm und von 0,6-0,3 für Partikel ab 2 μm bis > 5 μm für Messungen in den Sommermonaten. Chao et al. (2003) ermittelten Penetrationsfaktoren von etwa 0,7 für Partikel mit einem Durchmesser von 0,54-0,78 μm . Der höchste Penetrationsfaktor von 0,79 wurde in dieser Studie für Partikel mit Durchmessern von 0,85-1,38 μm bestimmt. Mit wachsendem Partikeldurchmesser verringern sich aufgrund des Einflusses von Sedimentation oder Impaktion die Penetrationsfaktoren. Partikel mit einem Durchmesser zwischen 4,7 und 9,6 μm passieren nur noch zu 48% die Gebäudehülle.

Betrachtet man den gleichen Partikelgrößenbereich, so ist festzustellen, dass die in den einzelnen Studien gemessenen Penetrationsfaktoren erheblich variieren. Neben den unterschiedlichen Leckagegrößen und -geometrien, den gerade herrschenden Druckverhältnissen und damit der Luftdichtheit der Untersuchungsräume spielen hier die gemessenen, errechneten oder veranschlagten Depositionsraten der Partikel für die Bestimmung der Penetrationsfaktoren eine große Rolle (Thornburg et al. 2001). Wie in Gl. 6 gezeigt wurde, ist der Penetrationsfaktor P_k der Partikeldepositionsrate λ_{dk} direkt proportional. Der Penetrationsfaktor kann aus Gl. 6 nicht unabhängig von der Depositionsrate bestimmt werden. Somit können dann im Ergebnis hohe Depositionsraten zu hohen Penetrationsfaktoren führen und umgekehrt. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass Thatcher und Layton (1995) Penetrationsfaktoren von 1 gefunden haben, da deren gemessene Depositionsraten hoch waren, während Koutrakis et al. (1992) und Tung et al. (1999) mit geringeren Depositionsraten auch zu Penetrationsfaktoren von < 1 kamen. Lewis (1995) hat für Partikel des gleichen Durchmesserbereichs Depositionsraten ermittelt, die um den Faktor 4 bis 8 niedriger lagen als die Werte von Thatcher und Layton (1995) und leitete somit auch niedrigere Penetrationsfaktoren ab.

Die von uns bestimmten Depositionsraten sind bei ähnlichen Partikeldurchmessern im Vergleich zu den Felduntersuchungen von Long et al. (2001) tendenziell niedriger und liegen deutlich unterhalb der Werte, die Chao et al. (2003) in Wohnungen von Hongkong gemessen haben.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse beschränken sich, bedingt durch die eingesetzte Messtechnik, auf Partikel mit einem Durchmesser $> 0,3$ μm . Der vom Wirkungspotenzial her unter allgemeinen Immissionsbedingungen epidemiologisch bedeutsamere Bereich der ultrafeinen Partikel wurde hier nicht angesprochen. Modellrechnungen zur Penetration durch die Gebäudehülle für diese Teilchengrößen haben gezeigt, dass Penetrationsfaktoren von deutlich < 1 zu erwarten sind (Liu und Nazaroff 2001, Liu 2002, Tian et al 2009). Die Ergebnisse von Feldstudien

bestätigen dies (Long et al. 2001, Zhu et al. 2005, Franck et al. 2006), s. **Tabelle 4**. Ultrafeine Partikel werden somit etwa im gleichen Ausmaß in Leckagen zurückgehalten wie grobe Teilchen. Die Ursache für dieses Verhalten wird im Einfluss der Brownschen und turbulenten Diffusion auf die Deposition dieser kleinen Teilchen gesehen, die zu einer verstärkten Abscheidung an Oberflächen beim Durchgang durch die Gebäudehülle beitragen (Liu und Nazaroff 2001, Tian et al. 2009). Darüber hinaus kommt es offenbar auch zur Koagulation ultrafeiner Teilchen während des Penetrationsvorganges und in deren Folge zur Verschiebung des Partikelgrößenspektrums in Innenräumen hin zu größeren Durchmessern (Franck et al. 2003, 2006). Ob die Koagulation von ultrafeinen Partikeln in der Innenraumluft selbst zu einer relevanten Erhöhung der Konzentration von Partikeln größeren Durchmessers führen kann, ist in jüngster Zeit untersucht worden (Hussein et al. 2009). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die Konzentration von Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von 0,3 µm und darüber nicht messbar beeinflusst wird. Zudem scheinen signifikante Koagulationsvorgänge erst stattzufinden, wenn die Gesamtraumluftkonzentration von Teilchen mit aerodynamischen Durchmessern < 0,5 µm größer als 10⁴/cm³ ist. Damit werden die Ergebnisse von Xu et al. (1994) bestätigt.

Ebenso wie bei den Penetrationsfaktoren bestehen auch bei den Depositionsraten von Studie zu Studie erhebliche Unterschiede, die bei gleichem Partikeldurchmesser mehr als eine Zehnerpotenz betragen können (Lai 2002). Zu den diskutierten und nachgewiesenen Einflussgrößen auf die Variabilität der Messwerte zählen die Geschwindigkeit der Luftströmung innerhalb der Untersuchungsräume, der Luftwechsel, die Gesamtoberfläche von Möbeln, das Oberflächen/Volumenverhältnis der Untersuchungsräume, Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Raumumschließungsflächen sowie die Oberflächenrauigkeit der Räume (Lai and Nazaroff 2000, Lai 2002, Thatcher et al. 2002). Diese Einflüsse lassen sich in Feldstudien nicht eliminieren und nur schwer kontrollieren. Die (zumindest teilweise) rechnerische Berücksichtigung dieser genannten Störfaktoren führt zwar zu einer Verringerung der Abweichungen zwischen den Ergebnissen einzelner Studien, kann aber die Diskrepanzen nicht völlig erklären (Lai 2002, Howard-Reed et al. 2003).

Unter Beachtung der vorgenannten methodischen Unschärfen ergeben sich aus den eigenen Untersuchungen folgende Schlussfolgerungen.

5 Schlussfolgerungen

Luftdicht gebaute Gebäude mit sehr dichten Fenstern besitzen gegenüber Außenluftpartikeln eine höhere Abschirm-

wirkung. Dies führt partikelgrößenabhängig zu einer Expositionsminderung der Bewohner gegenüber Außenluftverunreinigungen. Kleine Partikel (0,3-0,5 µm) penetrieren durch "dicht schließende" Fenster ähnlich gut wie durch weniger dicht schließende Fenster. Größere Partikel (ab 0,5 ... 1,0 µm) können demgegenüber Undichtheiten bei Isolierglasfenstern weniger gut durchdringen als die bei Altbauten noch relativ häufigen Kastendoppelfenster. Infolge der eingeschränkten Exfiltrationseigenschaften dicht schließender Fenster kann jedoch die Luftqualität in den betreffenden Räumen durch Innenraumquellen beeinträchtigt werden. So können sich die Feinstaubkonzentrationen um mehrere Zehnerpotenzen erhöhen, wenn in Räumen geraucht wird, Kerzen abgebrannt werden oder Koch- und Bratvorgänge stattfinden. Ebenso können Reinigungsmaßnahmen wie Staubsaugen oder einfaches Herumlaufen bereits abgelagerten Staub wieder aufwirbeln und zu deutlich messbaren Konzentrationserhöhungen insbesondere von Teilchen mit Durchmessern > 1 µm führen.

6 Literatur

- Alzona J, Cohen BL, Rudolph H, Jow NH, Frohlinger, JO (1979): Indoor-outdoor relationship for airborne particulate matter of outdoor origin. *Atmos Environ* 13, 55-60
- Bake D (2002): Schwebstaub in der Innenraumluft im Verhältnis zur Außenluft. *Umweltmed Informationsdienst (UMID)* 3, 16-18
- Bake D, Moriske H-J, Süßenbach B (2004): Feine und ultrafeine Partikeln im Innenraum. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 64, 84-87
- Chao CHYH, Wan MP, Cheng ECK (2003): Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences. *Atmos Environ* 37, 4233-4241
- Chen BT, Namenyi J, Yeh HC, Mauderly JL, Cuddihy RG (1990): Physical characterization of cigarette smoke aerosol generated from a walton smoke machine. *Aerosol Sci Technol* 12, 364-375
- Dockery DW, Spengler JD (1981): Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. *Atmos Environ* 15, 335-343
- Franck U, Herbarth O, Wehner B, Wiedensohler A, Manjarrez M (2003): How do the indoor size distributions of airborne submicron and ultrafine particles in the absence of significant indoor sources depend on outdoor distributions? *Indoor Air* 13, 174-181
- Franck U, Tuch T, Manjarrez M, Wiedensohler A, Herbarth O (2006): Indoor and outdoor submicrometer particles: Exposure and epidemiologic relevance ("the 3 indoor Ls"). *Environ Toxicol* 21, 606-613
- Howard-Reed C, Wallace LA, Emmerich SJ (2003): Effect of ventilation systems and air filters on decay rates of particles produced by indoor sources in an occupied townhouse. *Atmos Environ* 37, 5295-5306
- Hussein T, Hruska A, Dohanyosova P, Dzumbova L, Hemerka J, Kulmala M et al. (2009): Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber. *Atmos Environ* 43, 905-914
- Koutrakis P, Briggs SLK, Leaderer BP (1992): Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga counties, New York. *Environ Sci Technol* 26, 521-527
- Lai ACK (2002): Particle deposition indoors: a review. *Indoor Air* 12, 211-214
- Lai ACK, Nazaroff WW (2000): Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. *J Aerosol Sci* 31, 463-476

- Laußmann D (2005): Luftwechselfmessungen mit Tracergasen. In: Moriske H-J, Turowski E (Hrsg.): Handbuch für Bioklima und Lufthygiene. 14. Ergänzungslieferung 6/2005, Kapitel III-6.2.6
- Laußmann D, Eis D (2007) [Poster P-GBW-2]: Durchlässigkeitskoeffizient von Fenstern unterschiedlicher Bauart für Außenluftteilchen des Submikrometer- und Supramikrometer-Größenbereichs. Vorläufige Ergebnisse. *Umweltmed Forsch Prax* 12, 311-312
- Laußmann D, Eis D (2009): Verlaufsmessungen der Partikelkonzentration in einem Gebäude mit sehr luftdicht schließenden Fenstern vor, während und nach einem Silvesterfeuerwerk – Eine Kurzmitteilung. *Umweltmed Informationsdienst (UMID)* 1, 28-30
- Lewis S (1995): Solid particle penetration into enclosures. *J Haz Materials* 43, 195-216
- Lipowicz P (1988): Determination of cigarette smoke particle density from mass and mobility measurements in a millikan cell. *J Aerosol Sci* 19, 587-589
- Liu DL (2002): Air pollutant penetration through airflow leaks into buildings. Doctoral Thesis, University of California, Berkeley
- Liu DL, Nazaroff WW (2001): Modelling pollutant penetration across building envelopes. *Atmos Environ* 35, 4451-4462
- Liu DL, Nazaroff WW (2002): Particle penetration through windows. In: Levin H, ed.: *Indoor Air 2002. Proceedings of the 9th international Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, California, Vol. 1*, 862-867
- Liu DL, Nazaroff WW (2003): Particle penetration through building cracks. *Aerosol Sci Technol* 37, 565-573
- Long VM, Suh HH, Catalano PJ, Koutrakis P (2001): Using time- and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behaviour. *Environ Sci. Technol* 35, 2089-2099
- Mosley RB, Greenwell DJ, Sparks LE et al. (2001): Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Sci Technol* 34, 127-136
- Nazaroff WW (2004): Indoor particle dynamics. *Indoor Air* 14, 175-183
- Offermann FJ, Sextro RG, Fisk WJ et al. (1985): Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners. *Atmos Environ* 19, 1761-1771
- Thatcher TL, Layton DW (1995): Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmos Environ* 29, 1487-1497
- Thatcher TL, Lai ACK, Moreno-Jackson M, Sextro RG, Nazaroff WW (2002): Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmos Environ* 36, 1811-1819
- Thornburg J, Ensor DS, Rodes CE, Lawless PA, Sparks LE, Mosley RB (2001): Penetration of Particles into Buildings and Associated Physical Factors, Part I: Model Development and Computer Simulations. *Aerosol Sci Technol* 34, 284-296
- Tian L, Zhang G, Lin Y, Yu J, Zhou J, Zhang Q (2009): Mathematical model of particle penetration through smooth/rough building envelop leakages. *Building Environ* 44, 1144-1149
- Tung TCW, Chao CH, Burnett J (1999): A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell. *Atmos Environ* 33, 881-893
- Wilson WE, Suh HH (1997): Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies, *J Air Waste Manag Assoc* 47, 1238-1249
- Wilson WE, Mage DT, Grant LD (2000): Estimating separately personal exposure to ambient and nonambient particulate matter for epidemiology and risk assessment: Why and how. *J Air Waste Manag Assoc* 50, 1167-1183
- Xu M, Nematollahi M, Sextro RG, Gadgil AJ (1994): Deposition of tobacco smoke particles in a low ventilation room. *Aerosol Sci Technol* 20, 194-206
- Zhu Y, Hinds WC, Krudysz M, Kuhn Th, Froines J, Sioutas C (2005): Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments. *J Aerosol Sci* 36, 303-322