

Christian Ruger

Die Wege von Staub

Im Umfeld des Menschen



Springer Spektrum

Die Wege von Staub

Christian Ruger

Die Wege von Staub

Im Umfeld des Menschen

Christian Rüger
Leverkusen,
Deutschland

ISBN 978-3-662-47840-0
DOI 10.1007/978-3-662-47841-7

ISBN 978-3-662-47841-7 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Anhaltender Husten meiner heranwachsenden Tochter führte mich zu der Frage, ob mangelnde Staubbeseitigung als Ursache für die Beschwerden infrage käme. Selbst Ingenieur, begannen meine Gedanken um den Staub zu kreisen, besonders in Hinblick auf die gesundheitlichen Auswirkungen. Es zeigte sich, dass bei Behandlung der Themen Gesundheit und Staub allein viele Fragen offen blieben. Erst die Erweiterung um das Kapitel Luft lieferte die notwendige Klammer für den Stoff; wegen seiner zentralen Rolle ist dieses Kapitel vorangestellt.

Vorbilder hat das Buch nicht, es ist vielmehr das Ergebnis einer Entwicklung längs des Pfades Staub und Gesundheit. Die Natur hat selbst für die Lungenhygiene Vorsorge getroffen, indem sie Einrichtungen zur Entfernung von Staub aus der Lunge geschaffen hat. Ohne unser Zutun verfügt sie dort über wirksame Strategien zur Aufrechterhaltung hygienischer Verhältnisse. In seinem Umfeld muss sich der Mensch dagegen selbst mit dem Staub auseinandersetzen.

Der fortlaufende Text kommt ohne Formeln aus. Zur präzisen Beschreibung der Bewegungsgesetze der Luft sind natürlich einige Formeln unverzichtbar. Sie werden zusammengefasst in Formelboxen wiedergegeben.

Mein Dank an dieser Stelle gilt meiner Tochter Adele, inzwischen Neurologin, für fachliche und praktische Anregungen. Ärzte und Ingenieure sind gut vernetzt, wie schon Anne I. Hardy in ihrem Buch *Ärzte, Ingenieure und städtische Gesundheit* gezeigt hat. Für die Gestaltung der Grafiken und Tabellen danke ich Jürgen Achatz und Ruddle Kind.

Leverkusen, im Oktober 2015

Christian Rüger

Inhalt

1	Das Fluid Luft	1
1.1	Komponenten der Luft	1
1.1.1	Reine Luft	1
1.1.2	Dämpfe	2
1.1.3	Partikel	4
1.2	Luftbewegung und Energieerhaltung	8
1.2.1	Energieformen der Luft	8
1.2.2	Bernoulli-Gleichung	10
1.2.3	Stromlinien an Hindernissen	11
1.2.4	Thermischer Auftrieb	14
1.2.5	Tiefdruckgebiete	16
1.2.6	Ausgebildete Strömung	17
1.3	Vermischung durch Transportvorgänge	17
1.3.1	Diffusion von Gasen und Dämpfen	17
1.3.2	Reibung und Turbulenz	19
1.4	Besondere Strömungsformen bewegter Objekte	22
1.4.1	Druckwellen	22
1.4.2	Schließen und Trennen	23
1.4.3	Schütteln und Klopfen	24
	Literatur	24
2	Staubentstehung	25
2.1	Nanostaub und Mikrostaub	25
2.1.1	Größenbereiche	25
2.1.2	Oberfläche	27
2.2	Der Weg über gasförmige Ausgangsstoffe – Sekundäre Partikel	27
2.2.1	Gas	27
2.2.2	Flüssigkeit	29
2.2.3	Feststoff	31
2.3	Zerkleinerung fester und flüssiger Ausgangsstoffe – Primäre Partikel	31
2.3.1	Beanspruchungsmechanismen	31
2.3.2	Depotstaub	33
2.3.3	Druck	33
2.3.4	Reibung	33
2.3.5	Schneiden	34
2.3.6	Prall, Schlag	34
2.3.7	Thermische Spannung	35

VIII Die Wege von Staub

2.3.8	Verwitterung	35
2.4	Ablösung anhaftenden Staubes	35
2.4.1	Haftmechanismen	35
2.4.2	Windkräfte	38
2.4.3	Fliehkräfte	39
2.4.4	Flüssigkeitszerstäubung	41
2.5	Biogener Staub	42
2.5.1	Lebendiges	42
2.5.2	Abgestorbenes	42
2.6	Resümee der Staubbildung	42
	Literatur	42
3	Staubbindung	45
3.1	Transport zur Oberfläche	45
3.1.1	Nahkräfte	45
3.1.2	Fernkräfte	48
3.1.3	Zubringerfunktion der Luftströmung	51
3.1.4	Fliehkraft bei Strömungsumlenkung/Prallabscheidung	52
3.2	Haften auf Oberflächen	55
3.2.1	Trockene Haftung	55
3.2.2	Nasse Haftung	57
3.3	Staubkreisläufe	60
3.3.1	Außenbereich	60
3.3.2	Innenraum	63
	Literatur	64
4	Gesundheit und Staub	67
4.1	Luftströmung im Atemtrakt	67
4.1.1	Sauerstoffversorgung	67
4.1.2	Bronchialbaum	68
4.1.3	Der Azinus	70
4.1.4	Alveolen, Lungen- oder Atembläschen	71
4.1.5	Abscheidung von Partikeln	73
4.1.6	Atempumpe	74
4.1.7	Aussteifung der Lunge	75
4.1.8	Lungenkreislauf	76
4.2	Reinigungssystem des Atemtraktes	77
4.2.1	Obere Atemwege und Bronchien	77
4.2.2	Azini und Alveolen	79
4.2.3	Der Makrophage, Fresszelle für Mikroorganismen und leblosen Staub	79
4.2.4	Partikelwanderung im Körper	82
4.3	Versagen des Abwehrsystems und Krankheitsbilder	83
4.3.1	Allergien	83
4.3.2	Fibrose, Alveolitis, Krebs	84
4.3.3	Bronchitis und Bronchiolitis	86
4.3.4	Chronische Bronchitis, Lungenemphysem	87
4.3.5	Infektionen	90

4.4	Wie viel Staub verträgt die Lunge?	94
4.4.1	Arbeitswelt	94
4.4.2	Krebsrisiko	96
4.4.3	Biologische Arbeitsstoffe	98
4.4.4	Hintergrundbelastung der Umwelt	99
4.4.5	Innenräume	100
	Literatur	103
5	Reinigungsstrategie	105
5.1	Staub und Schmutz	105
5.2	Sauberkeit und ergebnisorientierte Reinigung	107
5.3	Wohnflächen	109
5.3.1	Außenbereich	109
5.3.2	Eingangsschleusen	110
5.3.3	Innenbereich	111
5.4	Raum und Raumkomponenten	113
5.4.1	Raumarten	113
5.4.2	Raumkomponenten	113
5.5	Verschmutzungsart	114
5.6	Reinigungsart	114
5.6.1	Unterhaltsreinigung	114
5.6.2	Grundreinigung	114
5.6.3	Sonderreinigung	115
5.6.4	Pflegemaßnahmen	115
5.6.5	Glasreinigung	115
5.7	Arbeitsverfahren (=Arbeitsmethoden)	116
5.7.1	Oberflächen	116
5.7.2	Geräte und Maschinen	118
5.7.3	Krafteinsatz	120
5.7.4	Arbeitsgeschwindigkeit	120
5.8	Häufigkeit der Reinigung	121
5.9	Qualität der Reinigung	122
	Literatur	123
6	Gesellschaft und Hygiene	125
6.1	Hygiene	125
6.2	Mikroorganismen	126
6.3	Fundstellen pathogener Keime	128
6.3.1	Infizierte Quellen	128
6.3.2	Kontaminierte Quellen	129
6.4	Das Geheimnis der Römer	131
6.5	Hygiene stagniert im Mittelalter	133
6.5.1	Seuchenzüge	134
6.6	Zuspitzung und Durchbruch im Industriezeitalter	135
6.6.1	Ursachenforschung	136
6.6.2	Entdeckung der Mikroorganismen	137
6.6.3	Reinheitsideal	139
6.6.4	Lebensmittelhygiene	139
6.6.5	Bauhygiene	140

X Die Wege von Staub

6.7 Aufstieg der Reinigungsbranche – Gesellschaftliche Stellung	141
6.7.1 Ausbildung	141
6.7.2 Wege zur gesellschaftlichen Anerkennung	142
Literatur	143
Sachverzeichnis	145

Zeichenerklärung

b	Linearbeschleunigung, Kreisbeschleunigung (Zentrifugalbeschleunigung)
c	Konzentration von Fremdstoff oder Partikeln in der Luft
d	Charakterisierende Abmessung, z. B. Durchmesser
D	Diffusionskoeffizient
F	Kraft
F_G	Gewichtskraft
F_H	Haftkraft
g	Erdbeschleunigung
g	Gramm, Einheit der Masse, $1 \text{ g} = 10^3 \text{ mg}$; $10^6 \text{ } \mu\text{g}$; 10^9 ng
J	Joule, Einheit der Energie
J	Partikelstrom
m	Einheit der Länge, $1 \text{ m} = 10^3 \text{ mm}$; $10^6 \text{ } \mu\text{m}$; 10^9 nm
mg	Milligramm
N	Newton, Einheit der Kraft
ng	Nanogramm
nm	Nanometer
p_{ges}	Gesamtdruck (Summe aller Energiebestandteile eines Luftvolumens)
Pa	Pascal, Einheit des Druckes
Re	Reynolds-Kennzahl, charakterisiert das Bild der Umströmung
$PM_{0,1}$	Particle Matter 0,1; Masse aller Partikel $< 0,1 \text{ } \mu\text{m}$
$PM_{2,5}$	Masse aller Partikel $< 2,5 \text{ } \mu\text{m}$
PM_4	Masse aller Partikel $< 4 \text{ } \mu\text{m}$, Arbeitsschutz: Alveolengängiger A-Staub
PM_{10}	Masse aller Partikel $< 10 \text{ } \mu\text{m}$, häufigster Feinstaub-Grenzwert im Umweltschutz
T	Absolute Temperatur
u	Luftgeschwindigkeit
v	Geschwindigkeit
x	Weglänge
z	Höhe

Griechische Buchstaben

Δ	Differenz
ρ	Dichte der Luft
ρ_G, ρ_S	Dichte von Gas und Feststoff
μg	Mikrogramm
μm	Mikrometer
ν	Kinematische Viskosität

1

Das Fluid Luft

1.1 Komponenten der Luft

1.1.1 Reine Luft

1.1.1.1 Bestandteile reiner Luft

Wer die Wege des Staubes verstehen will, der sollte sich dessen innigsten Partner, die Luft, ansehen. Luft ist immer in Bewegung, nimmt Staub auf, trägt ihn als Schwebstaub fort und entlässt ihn wieder auf leicht oder schwer zugänglichen Oberflächen. Physikalisch gehört Luft zu den Fluiden wie Wasser. Der Luft wohnt eine Energie inne, mit deren Hilfe sie in neue Räume einfließt. Denken Sie an das Lüften der Wohnung oder das Ein- und Ausatmen. Das Fluid Luft mit seinen Eigenschaften soll uns beschäftigen.

Die Luft selbst ist kein reiner Stoff, sondern ein Gemisch. Stickstoff stellt mit 78 % den größten Anteil, gefolgt von Sauerstoff mit knapp 21 %. Aus dem Verbrauch von Sauerstoff ziehen wir die Energie für alle Stoffwechselprozesse. Wir können das Sonnenlicht nicht wie die Pflanzen zur Energiegewinnung nutzen. Luft ist deshalb unser wichtigstes Lebensmittel. Ständige Begleiter der Luft sind Edelgase mit 1 % und Kohlendioxid mit knapp 0,04 %. Vor 100 Jahren lag sein Gehalt noch bei 0,03 %. Seitdem steigt er unaufhaltsam – bedrohlich – weiter an. Sauerstoff siedet bei -183°C . Er gilt als ideales Gas, weil er bei Umgebungstemperatur etwa 200°C über seinem Siedepunkt liegt. Ideale Gase kondensieren nicht, wenn sie unter Druck gesetzt werden, wie etwa die verdichtete Luft im Autoreifen. Aus dem Wetterbericht wissen Sie, dass die Luft auf Meereshöhe unter einem mittleren Druck von 1013 hPa steht. Die einzelnen Komponenten der Luft tragen mit ihrem Volumenanteil zum Gesamtdruck der Luft bei. Der Volumenanteil entspricht dem Druckanteil. So steuern die 21 Vol.-% Sauerstoff der Luft den Teildruck 217 hPa zum Gesamtdruck von 1013 hPa bei.

1.1.1.2 Haftvermögen der Luftmoleküle

Obwohl Luft als komplett gasförmig anzusehen ist, hindert es die Gasmoleküle nicht daran, sich auf Oberflächen, auch auf Staub, in dünner Schicht festzusetzen. In Sonderfällen hat der Effekt praktische Bedeutung, was auch mit Gefahren verbunden sein kann, wie z. B. der Umgang mit reinem Sauerstoff. Oberflächen binden dabei im Übermaß Sauerstoff bis zu etwa drei Schichten übereinander. Sind die eigenen Kleider betroffen, können sie nach einer eventuellen Zündung explosionsartig abbrennen. Bei der Erzeugung von Vakuum in technischen Anlagen verzögert die Abgabe adsorbierter Luft das Erreichen des gewünschten Unterdrucks. Die Luftschicht wird durch „Ausheizen“ von den Oberflächen entfernt.

1.1.2 Dämpfe

1.1.2.1 Eigendruck von Flüssigkeiten

Von einer Flüssigkeitsoberfläche heben stets Moleküle ab, schweben als Gas über der Flüssigkeit und kondensieren wieder. Im Gleichgewicht halten sich Abheben (Verdampfen) und Kondensieren die Waage. Die Energieform, mit der eine Flüssigkeit Moleküle aus ihrem Verband in den Gasraum schickt, nennt man Dampfdruck. Er ist eine charakterisierende Eigenschaft von Flüssigkeiten. Jede Flüssigkeit zeigt einen charakteristischen Dampfdruck, der mit der Temperatur zunehmend, d. h. progressiv, ansteigt, bis die Siedetemperatur erreicht ist. In diesem Zustand erreicht der Dampfdruck den Umgebungsdruck. Er verdrängt die Luft und nimmt ihren Platz ein. Viele Flüssigkeiten erreichen die Siedetemperatur nicht, weil sie sich vorher zersetzen. Die von einer Flüssigkeit aufsteigenden Dämpfe sind thermodynamisch gesehen noch kein ideales Gas, denn bei geringer Abkühlung kondensiert Wasserdampf unter Taubildung aus.

Der Dampfdruck einer Flüssigkeit ist ein Maß für deren Flüchtigkeit. Alle flüssigen, meist organischen Stoffe wie Nagellack, Putzmittel, Benzin oder Diesel geben Teile ihrer flüssigen Substanz gasförmig ab. Auch über manchen Feststoffen gibt es merklichen Dampfdruck wie über Eis, CO_2 -Trockeneis oder Mottenkugeln. Wenn Flüssigkeiten in Feststoffe eingearbeitet sind, können sie sich langsam aus dem Verband lösen und in die Luft entweichen wie Weichmacher aus Plastikmaterial oder Formaldehyd aus Möbeln. Eine Auswahl der in die Luft drängenden Stoffe zeigt Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Luftbestandteile und ihre Siedepunkte

Luft	78 %	Stickstoff	-196 °C
	0,9 %	Edelgas Argon	-186 °C
	21 %	Sauerstoff	-183 °C
	0,04 %	Kohlendioxid	-57 °C
Reiz- und Schadgase in der Luft	Stickstoffmonoxid, NO ^a		-152 °C
	Ammoniak, NH ₃		-33 °C
	Formaldehyd		-19 °C
	Schwefeldioxid, SO ₂		-10 °C
Flüssigkeiten als Gasquelle	Stickstoffdioxid, NO ₂ ^a		21 °C
	Methanol		65 °C
	Wasser		100 °C
	Textilpflegemittel „P“ (Tetrachlorethan)		121 °C
Feststoffe als Gasquelle	Butterfett (Rauchpunkt)		200 °C
	Mottenkugeln (Naphthalin)		218 °C
	Benzo(a)pyren (Teer)		495 °C

^a Bestandteil von NO_x

1.1.2.2 Wasserdampf

Wasser ist wegen seiner grenzenlosen Verfügbarkeit der wichtigste dampfförmige Bestandteil der Luft. Der Dampfdruck des Wassers schießt gewaltige Mengen Wasserdampf aus dem Meer in die Luft. Dabei verzögert die Luft das Vordringen des Dampfes in die Luft, ein Vorgang, der unter dem Namen Verdunstung geläufig ist. Der Vorgang läuft langsam ab, im Gegensatz zum Sieden, bei dem Luft einfach verdrängt wird. Die Luft über einer Wasseroberfläche kann höchstens so viel Wasserdampf aufnehmen wie dem Dampfdruck über dem Wasser entspricht. In diesem Zustand ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt. Bei 20 °C kann die Luft so maximal 2,3 Vol.-% Wasserdampf aufnehmen. In der Dampfsauna bei 50 °C steigt der Feuchtigkeitsgehalt auf maximal 12,2 Vol.-%. Das Atmen fällt schwerer, denn der Wasserdampf verdrängt einen Teil der Luft und auch der Sauerstoffanteil sinkt entsprechend ab. Bei der geringsten Abkühlung des gesättigten Dampf-Luft-Gemisches kondensiert Wasserdampf als Nebel aus. Der Sättigungspunkt kippt zum Taupunkt. Beim Kochen ziehen Wrassen, Brodem bzw. Brüden durch die Küche; sie alle sind das Ergebnis von Taupunktepisoden. In der Natur begegnen wir dem Phänomen in Form von Morgentau, Nebelschwaden oder Eisblumen.

Öle und Fette erzeugen nur geringen Dampfdruck und sind deshalb wenig flüchtig. Beim Kochen sorgt der Effekt der Wasserdampfdestillation für den verstärkten Übergang in die Luft. Ein kochendes Gericht gibt Wasserdampf

ab und durch ihren innigen Kontakt steuern Öl und Fett entsprechend ihrer Dampfdrücke bei 100 °C ihren Anteil zum ölhaltigen Wasserdampf bei. Der entstehende Wasserdampf sättigt sich fortwährend mit Öl und Fett und transportiert seine Ladung in die Umgebungsluft. Neben der Kochstelle kühlt das ölbeladene feuchte Luftgemisch ab und setzt fetthaltige Nebel frei.

Für Innenräume wird für die Luft ein Sättigungsgrad mit Wasserdampf von maximal 65 % vorgeschrieben. Bei einer Raumtemperatur von 23 °C entspricht das einem Wassergehalt von 13,8 g/m³. Raumluftfeuchten unter 30 % sollten vermieden werden; einmal trocknen die Bronchien aus und zusätzlich nimmt der Staubgehalt der Luft zu, beides fördert Erkältungskrankheiten. Die Schaffung eines angenehmen Raumklimas ist Aufgabe der Klimatechnik (Baumgarth et al. 2011; Hörner und Schmidt 2014).

1.1.2.3 Haftvermögen

Wasser nimmt wegen seines hohen Lösungsvermögens eine verstärkende Funktion ein. Ein Staubkorn sammelt auf seinem Weg durch die Luft alle ihm begegnenden Dampfmoleküle ein. Das Staubkorn wird so zur „Apotheke“ mit breitem Angebot ungezählter Chemikalien.

1.1.3 Partikel

Staub, der sich über längere Zeit in der Luft halten kann, rechnen wir zum Schwebstaub. Die Frage, welche Staubkörnchen dazu gehören, beantwortet ein Blick auf eine Sanddüne. Zu den Eigenschaften einer Sanddüne gehört ihre Staubfreiheit. Stetiger Wind lagert die Sandkörner einer Düne fortwährend um. Dabei bewegen sich die Partikel ein bis zwei Meter hoch springend von der Luvseite der Düne über ihren Kamm hinweg zur Lee-seite. Bei einem moderaten Sandsturm ragen idealerweise die Köpfe von Wanderern und ihren Kamelen aus dem Meer fliegender Sandkörner heraus. Die bei der Sandbewegung entstehenden kleineren Bruchstücke werden vom Wind erfasst und in die Atmosphäre ausgetragen. Der abgelagerte Sand bleibt staubfrei. Gebietsweise unterscheiden sich die Dünen in der mittleren Korngröße. Der feinste Wüstensand weist mittlere Korndurchmesser von 80 µm auf. Damit gibt die Natur die obere Grenze des Schwebstaubes vor, sie ist fließend. Für die freie Natur wird sie bei 60 µm gesehen, in Innenräumen mit geringen Luftgeschwindigkeiten bei etwa 20 µm. Die Korngröße des beim Ferntransport über tausende Kilometer verfrachteten Staubes bleibt meist unter 20 µm, in der Regel zwischen 5 und 10 µm. Bagnold (1941) hat das Flugverhalten von Sand beim Aufbau von Sanddünen beschrieben.

Die Kleinheit des Staubes erfordert – zweckmäßigerweise – auch kleine Maßeinheiten. 1 μm (Mikrometer) ist der millionste Teil eines Meters. Für den Staubgehalt der Luft bedeutet 1 μg (Mikrogramm)/ m^3 (Kubikmeter) ein Millionstel Gramm je m^3 Luft. Noch kleinere Teilchen werden in nm (Nanometer) gemessen. Gasmoleküle sind knapp 1 nm groß.

Sobald sich Flüssigkeitströpfchen unter den Schwebstaub mischen, spricht man von einem Aerosol. Aerosolpartikel flüssigen Ursprungs sind normalerweise in Kugelform unterwegs. Das Flugverhalten aller Partikel wird wesentlich von ihrer Masse bestimmt, in guter Annäherung also von ihrer Größe und weniger von den Aggregatzuständen fest bzw. flüssig oder von der chemischen Zusammensetzung. Schwebstaub umfasst den riesigen Größenbereich von fast fünf Zehnerpotenzen, angefangen bei 1 nm großen gasähnlichen Molekülzusammenballungen, Cluster genannt, bis zu 60 μm großen Partikeln, die schnell zu Boden sinken. Ein systematischer Überblick über den gesamten Größenbereich gelingt mit der Darstellung der Verweilzeiten aller Partikel nach ihrer Größe Friedlander (2000, S. 367). Beispielhaft zeigt Abb. 1.1 die Verweildauer aller Partikel in der Atmosphäre. Die Verweilzeiten wurden in großer Höhe gemessen und basieren auf einer Staubbelastung von $1,5 \times 10^{10}$ Partikeln pro m^3 Luft, was einer Durchschnittsbelastung entspricht. Im ländlichen Raum ist die Luft mit 10^8 Partikeln pro m^3 sauberer, in Bal-

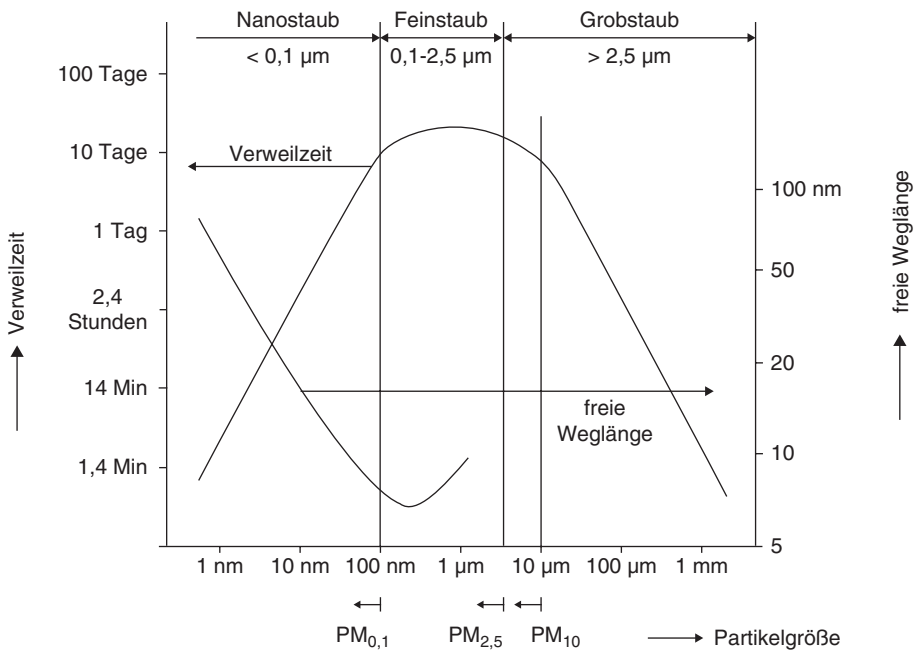


Abb. 1.1 Verweilzeit von Aerosol in der Atmosphäre. (Modifiziert nach Friedlander 2000, Abb. 13.4)