

Über das Absetzen kleiner, in der Luft suspendierter Teilchen in der menschlichen Lunge bei der Atmung¹.

Von

W. Findeisen, München.

Mit 8 Textabbildungen.

(Eingegangen am 27. Juni 1935.)

In der vorliegenden Arbeit wird durch überschlagsmäßige Rechnungen auf Grund vereinfachender (schematisierender) Annahmen festgestellt, in welcher Anzahl die Teilchen eines Aërosols (Rauch, Nebel) beim Durchgang durch die menschlichen Lungenwege an den verschiedenen Stellen des Bronchialbaumes ausgefiltert werden. Das Ausfiltern geschieht dadurch, daß die Teilchen durch vier im folgenden näher zu behandelnde Vorgänge zum Absetzen an den Wandungen der Bronchien und Bronchiolen veranlaßt werden und dort haften bleiben. Das Ziel der Rechnungen, die hier besprochen werden sollen, ist, das Problem der Lungeninhalation, wenn auch zunächst nur überschlagsmäßig, so doch auf quantitativer Grundlage zu lösen. Auf Grund der Rechnungsergebnisse soll entschieden werden können, welche Größe die Teilchen eines Aërosols haben müssen, damit sie sich in beabsichtigter Weise an bestimmten Stellen der Lunge in großer Zahl absetzen und dort so zur Wirkung gelangen können. Diese Frage dürfte hohe medizinische Bedeutung haben.

1. Schema des Bronchialbaumes und der Atmung.

Um die Strömungsvorgänge, die durch die Atmung in der menschlichen Lunge erzeugt werden, quantitativ behandeln zu können, ist es erforderlich, ein vereinfachtes Schema des Bronchialbaumes anzunehmen. Das Schema wird in Tabelle 1 dargestellt (die Maßzahlen zum Teil nach *Sieglbauer*).

Die einzelnen Teile des Bronchialbaumes werden hier zur Abkürzung mit den Buchstaben A, B, C usw. bezeichnet. Es wird angenommen, daß die Bronchien und Bronchiolen zylindrische Rohre sind, die *Sacculi alveolarii* hingegen Kugeln, ferner, daß die Bronchien und Bronchiolen gleicher Ordnung gleich weit und gleich lang sind. Über die Verzweigungswinkel an den Verzweigungsstellen der Bronchien und Bronchiolen werden weiter unten noch zusätzliche, vereinfachende Annahmen gemacht. Weil auch die Strömungsgeschwindigkeiten in den Lungenwegen für die Rechnungen gegeben sein müssen, wird die in Abb. 1 gezeigte, schematisierte Atemkurve angenommen, die einer ruhigen, tiefen Atmung entspricht. Die schematischen Annahmen ergeben die in Tabelle 1 aufgeführten Strömungsgeschwindigkeiten und

¹ Die Anregungen zu dieser Arbeit erhielt ich während meiner Tätigkeit als Physiker am Institut für Luftfahrtmedizin und Klimaforschung zu Hamburg (Eppendorfer Krankenhaus) in den Jahren 1931/32. Ich verdanke die Anregungen und die medizinische Beratung in erster Linie dem Direktor, Herrn Prof. Dr. *L. Brauer*, und dem Herrn Dr. *Zeplin*.

Tabelle 1. Schema des Bronchialbaumes.

| Lungenteile | Verzweigungs-faktor | Anzahl | Innerer Durch-messer cm | Länge cm | Gesamt-querschnitt qcm | Störungs-geschwin-dig-keiten * cm/sec | Durch-strö-mungs-zeiten sec |
|---------------------------|---------------------|------------------|----------------------------|-------------|---------------------------|--|--------------------------------|
| A Trachea | 1 | 1 | 1,3 | 11,0 | 1,3 | 150 | 0,07 |
| B Hauptbronchien . . . | 2 | 2 | 0,75 | 6,5 | 1,1 | 180 | 0,04 |
| C Bronchien 1. Ordnung | 6 | 12 | 0,4 | 3,0 | 1,5 | 130 | 0,02 |
| D Bronchien 2. Ordnung | 8 | 100 | 0,2 | 1,5 | 3,1 | 65 | 0,02 |
| E Bronchien 3. Ordnung | 8 | 770 | 0,15 | 0,5 | 14 | 14 | 0,04 |
| F Bronchioli terminales . | 70 | $5,4 \cdot 10^4$ | 0,06 | 0,3 | 150 | 1,3 | 0,22 |
| G Bronchioli respiratorii | 2 | $1,1 \cdot 10^5$ | 0,05 | 0,15 | 220 | 0,9 | 0,17 |
| H Ductuli alveolarii . | 240 | $2,6 \cdot 10^7$ | 0,02 | 0,02 | 8200 | 0,025 | 0,82 |
| I Sacculi alveolarii . . | 2 | $5,2 \cdot 10^7$ | 0,03 | 0,03 | (147 000)** | etwa 0 | 1,2 |

* Für 200 cm/sec Ventilationsgeschwindigkeit.
 ** Gesamtoberfläche der kugelförmigen Sacculi alveolarii.

„Durchströmungszeiten“ in den einzelnen Abschnitten der Lungenwege. Aus Gründen der rechnerischen Einfachheit wird angenommen, daß die Strömungs-

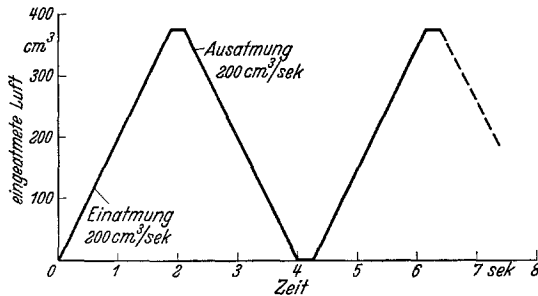


Abb. 1. Schematische Atemkurve.

geschwindigkeiten jeweils im ganzen Rohrquerschnitt gleich sind. Diese Annahme ist zwar in Wirklichkeit nicht erfüllt, kann aber die unten genannten Ergebnisse keinesfalls in der Größenordnung fälschen; die Endwerte werden nur fälschlich ein wenig zu hoch.

Durch vier voneinander unabhängige Vorgänge werden die in der

Luft suspendierten Teilchen zum Berühren der Wandungen der Lungenwege veranlaßt. Wie aus ähnlichen Vorgängen bekannt ist, hat jede Berührung eines Teilchens mit den feuchten Wandungen (Schleimhäute) zur Folge, daß das Teilchen haften bleibt. Die im folgenden besprochenen vier Vorgänge stellen also die Ursachen für das Absetzen der Teilchen in den Lungenwegen dar.

2. Die Vorgänge, die das Absetzen der Teilchen in den Lungenwegen verursachen.

a) Brownsche Bewegung.

Infolge der Molekularbewegung ist ein in Luft suspendiertes Teilchen unregelmäßigen Veränderungen seiner Lage unterworfen. Aus der kinetischen Gastheorie folgt, daß die Strecke $\bar{\Delta}$, um die ein Teilchen vom Radius r „im Mittel“ in der Zeit t verschoben wird, die Größe hat:

$$\bar{\Delta} = 4,86 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{t}{r} \left[1 + \frac{10^{-5}}{r} (0,846 + 0,290 \cdot e^{-1,25 \cdot 10^5 \cdot r}) \right]}. \quad (1)$$

(Der Formel liegt eine Ableitung von *A. Einstein*¹ zugrunde, in die die *Millikan*-sche Formel vom Luftwiderstand kleiner Teilchen eingeführt wurde.) Die Definition „im Mittel“ bedeutet wie in der mathematischen Statistik, daß in $\frac{2}{3}$ aller Fälle die Verschiebung geringer, in $\frac{1}{3}$ größer ist als \bar{A} . Neben \bar{A} , das die Verschiebung des Teilchenmittelpunktes angibt, ist für die Frage, welchen Rohrquerschnitt ein Teilchen beim ungehinderten Durchgang durch ein Rohr benötigt, auch seine Ausdehnung von Bedeutung. Die Strecke, innerhalb der ein Teilchen vom Radius r in seiner Gesamtheit während der Zeit t mit der Wahrscheinlichkeit $\frac{2}{3}$ verbleibt, ist

$$G = \bar{A} + r. \tag{2}$$

G sei der „mittlere Grenzbereich“ genannt.

Ein rohes, aber doch anschauliches Bild von der verschieden guten Eig-

nung verschieden großer Teilchen zum Durchdringen von engen Rohren gibt Abb. 2. Dort sind die Werte G als Funktion vom Teilchenradius r bei verschiedenen Zeiten t dargestellt. Es zeigt sich, daß Teilchen von der Größe etwa $r = 10^{-4}$ cm ($= 1 \mu$) die geringsten Werte G haben, also anscheinend am besten enge Rohre zu durchdringen vermögen. Hierbei sind aber die weiter unten unter b) und c) zu besprechenden Vorgänge noch nicht berücksichtigt.

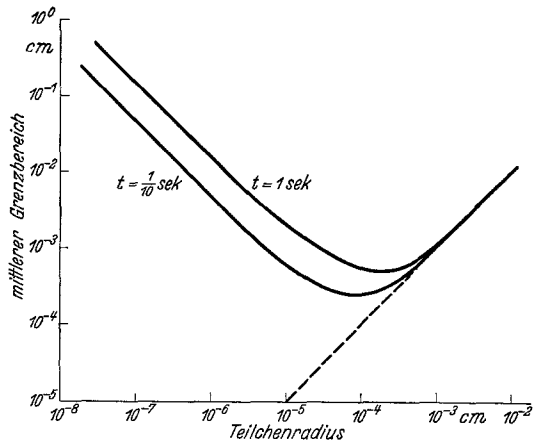


Abb. 2. Mittlerer Grenzbereich und Teilchenradius.

bei sind aber die weiter unten unter b) und c) zu besprechenden Vorgänge noch nicht berücksichtigt.

Aus \bar{A} ergibt sich auf Grund des *Gauß*schen „Fehlerintegrals“

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx, \tag{3}$$

dessen Wert $\Phi(\bar{A}) = \frac{2}{3}$ hier vorgegeben ist, die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Teilchen irgendeine Strecke x zurücklegt die kleiner oder größer ist als \bar{A} . Graphisch erhält man z. B., daß mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,37 ein Teilchen eine kleinere Verschiebung erfährt als $\frac{1}{2} \bar{A}$, daß sich also 37% aller Teilchen um weniger als $\frac{1}{2}$ von \bar{A} ihrer Anfangslage entfernen; für $\frac{1}{8} \bar{A}$ ergibt sich analog die Wahrscheinlichkeit 0,098. Wenn sich die zu betrachtenden Teilchen zu Anfang immer in der Mitte des Rohres (*Bronchius*) befinden, könnte schon so die Wahrscheinlichkeit für das Absetzen eines Teilchens an der Wandung des Rohres infolge der Molekularbewegung angegeben werden. Es muß jedoch angenommen werden, daß sich die Teilchen an beliebigen Stellen des Rohrquerschnittes befinden, und daher der Abstand jedes Teilchens von der Wandung des Rohres nach verschiedenen Richtungen verschieden ist. Ein aus der analytischen Geometrie bekannter Satz ergibt,

¹ *Einstein, A.*: Ann. Physik 17, 549 (1905); 19, 371 (1906).

daß der Abstand ϱ eines Teilchens (Teilchenmittelpunkt betrachtet) von der Rohrwandung, senkrecht zur Achse des Rohres gemessen,

$$\varrho = \left| \delta \cdot \cos \alpha \pm \sqrt{a^2 - \delta^2 \cdot \sin^2 \alpha} \right| \quad (4)$$

ist, wobei δ die Entfernung des Teilchens von der Achse des Rohres (Exzentrizität), a den Radius des Rohres und α (das die Werte von $0-360^\circ$ annehmen kann) die betrachtete Richtung bedeutet; für $\alpha = 0$ ist $\varrho = a - \delta$. Aus der Länge der Strecke ϱ für eine betrachtete Richtung kann mit Hilfe des Wertes A und Gl. (3) die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, mit der in dieser Richtung ein Auftreffen eines Teilchens auf die Rohrwandung zu erwarten ist. Dabei ist eine gewisse Sektorbreite vorzugeben. Die Wahrscheinlichkeit (P) dafür, daß das Teilchen mit irgend-einer Stelle der Rohrwandung in Berührung kommt, ergibt sich durch Summation. Man erhält allgemein für eine willkürliche Anfangslage des Teilchens im Rohrquerschnitt, die durch δ gegeben ist,

$$P = \frac{1}{90 a^2} \int_{\delta=0}^{\delta=a-r} \delta \int_{\alpha=0}^{\alpha=180} [1 - \Phi(z)] d\alpha d\delta, \quad (5)$$

wobei $z = 0,684 \cdot \frac{\varrho - r}{A}$ oder besser, weil die eigene Ausdehnung des Teilchens zu berücksichtigen ist,

$$z = 0,684 \frac{\varrho - r}{A} \quad (6)$$

einzusetzen ist. Weil das Fehlerintegral $\Phi(z)$ [s. Gl. (3)] analytisch nicht auflösbar ist, muß Gl. (5) auf dem umständlichen graphischen Wege gelöst werden. Für den Rohrradius a und die Durchströmungszeit t sind die nach Tabelle 1 für die verschiedenen Teile des Bronchialbaumes geltenden Werte einzusetzen; der Teilchenradius r ist innerhalb der zur Diskussion stehenden Größenordnungen zu variieren. Für die kugelförmigen Alveolen gelten, wie leicht einzusehen ist, ganz ähnliche Ansätze wie für die zylindrischen Bronchien und Bronchiolen.

Die Rechnungen und graphischen Auswertungen ergaben die in Tabelle 2 enthaltenen Werte der Wahrscheinlichkeiten (in Prozent angegeben) für das Absetzen der suspendierten Teilchen in den einzelnen

Tabelle 2. Absetzen der suspendierten Teilchen in den einzelnen Lungenabschnitten infolge der *Brownschen* Bewegung (in Prozenten).

| Lungenteile | $r = 0,03 \mu$ | $r = 0,1 \mu$ | $r = 0,3 \mu$ | $r = 1 \mu$ | $r = 3 \mu$ | $r = 10 \mu$ | $r = 30 \mu$ |
|-------------|----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| A | 0,12 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 |
| B | 0,16 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | < 0,01 | < 0,01 |
| C | 0,21 | 0,08 | 0,04 | 0,07 | 0,01 | < 0,01 | < 0,01 |
| D | 0,41 | 0,16 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | < 0,01 |
| E | 0,77 | 0,31 | 0,15 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| F | 4,54 | 1,78 | 0,84 | 0,43 | 0,24 | 0,13 | 0,07 |
| G | 4,80 | 1,89 | 0,89 | 0,45 | 0,25 | 0,14 | 0,08 |
| H | 26,3 | 10,4 | 4,91 | 2,48 | 1,40 | 0,76 | 0,44 |
| I | 21,2 | 8,4 | 3,95 | 2,00 | 1,10 | 0,59 | 0,34 |

Lungenabschnitten, das durch die *Brownsche* Bewegung verursacht wird. Die „Wahrscheinlichkeiten“ haben, sobald die große Teilchenzahl eines Aërosols betrachtet wird, nicht mehr die Bedeutung von Zufälligkeiten,

sondern sie stellen zuverlässige Prozentsätze dar. Die Tabelle gibt für jeden Lungenabschnitt die dort abgesetzte Teilchenmenge an, in Prozenten der Gesamtmenge der Teilchen, die in diesen Lungenabschnitt eintreten.

Naturgemäß tritt das durch die Molekularbewegung verursachte Absetzen bei kleinen Teilchenradien und bei kleinen Weiten der Lungenwege, also relativ großer Oberfläche, in hohem Maße auf. Bei großen Teilchenradien spielt die Molekularbewegung nur eine unbedeutende Rolle.

b) Sedimentation.

Während des Durchganges durch die Lungenwege sind die suspendierten Teilchen der Sedimentation, hervorgerufen durch die Fallbewegung infolge der Erdbeschleunigung, unterworfen, die auch zum Absetzen der Teilchen an den Wandungen der Bronchien und Bronchiolen beiträgt. Das Absetzen durch Sedimentation hängt außer von der Fallgeschwindigkeit der Teilchen, der Weite der Bronchien oder Bronchiolen und der Zeit, während der das Fallen vor sich geht („Durchströmungszeit“), auch von der Richtung ab, in der die Bronchien oder Bronchiolen im Vergleich zur Horizontalen verlaufen. Je stärker die Neigung gegen die Horizontale ist, um so weniger macht sich der Einfluß der Sedimentation bemerkbar. Weil alle Bronchien und Bronchiolen (von Stufe C des Schemas ab) verschiedene Neigungen gegen die Horizontale haben, ist also die Sedimentation in ihnen verschieden.

Für den Neigungswinkel ψ , den Teilchenradius r , die Durchströmungszeit t , den Radius des Rohres (Bronchius, Bronchiolus) a ergibt sich mit Hilfe der oben genannten Millikanschen Formel, daß die Wahrscheinlichkeit für das Absetzen der suspendierten Teilchen in dem Rohr ist:

$$P = \frac{180 - \beta}{180} + \frac{\sin \beta}{2\pi}, \quad (7)$$

wobei

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{1,15 \cdot 10^6 \cdot r^2 \cdot t}{2a} \cos \psi \left[1 + \frac{10^{-5}}{r} (0,864 + 0,290 e^{-1,25 \cdot 10^5 \cdot r}) \right]. \quad (8)$$

Dabei wurde angenommen, daß die Teilchen Kugelgestalt¹ haben und ihr spezifisches Gewicht gleich Eins ist. Da P nicht für jeden Bronchius und Bronchiolus mit dem zugehörigen Werte $\cos \psi$ einzeln errechnet werden kann, muß ein mittlerer Wert $\cos \psi$ eingesetzt werden, der hier durch

$$\cos \psi = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \psi \cdot d\psi = \frac{2}{\pi} = 0,64$$

bestimmt wird. Für die Trachea (A) und die Hauptbronchien (B) wird $\cos \psi = 1$ eingesetzt; das entspricht der Rückenlage des menschlichen Körpers.

¹ Diese Annahme ist bei allen Nebeln erfüllt. Bei sehr kleinen Teilchen (z. B. feinen Rauchteilchen) ist übrigens die Gestalt nur von geringem Einfluß auf die Fallgeschwindigkeit.

Die Wahrscheinlichkeit für die Sedimentation in den als kugelförmig angenommenen Alveolen ergibt sich zu

$$P = \frac{3}{2} \cdot \cos \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2} \cos^3 \frac{\beta}{2} \tag{9}$$

mit dem Wert $\cos \frac{\beta}{2}$ nach Gl. (8), in die $\cos \psi = 1$ einzusetzen ist; a ist nun der Radius der Alveolen. Die Wahrscheinlichkeiten P für das Absetzen durch Sedimentation, ausgerechnet nach den Gl. (7) und (9) sind in der gleichen Art, wie es oben in Tabelle 2 geschehen ist, in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3. Absetzen infolge der Sedimentation.

| Lungenteile | r = 0,03 μ | r = 0,1 μ | r = 0,3 μ | r = 1 μ | r = 3 μ | r = 10 μ | r = 30 μ |
|-------------|------------|-----------|-----------|---------|---------|----------|----------|
| A | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 0,09 | 0,8 | 7,8 | 67,0 |
| B | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 0,09 | 0,7 | 7,6 | 67 |
| C | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 0,05 | 0,45 | 4,5 | 40,7 |
| D | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 0,10 | 0,9 | 9,0 | 78,8 |
| E | < 0,01 | < 0,01 | 0,03 | 0,27 | 2,2 | 24,8 | 100 |
| F | < 0,01 | 0,06 | 0,39 | 3,6 | 30,8 | 100 | 100 |
| G | < 0,01 | 0,06 | 0,36 | 3,4 | 28,7 | 100 | 100 |
| H | 0,13 | 0,69 | 4,3 | 40,5 | 100 | 100 | 100 |
| I | 0,31 | 1,67 | 10,4 | 84 | 100 | 100 | 100 |

c) Trägheitswirkung.

Überall dort, wo die Strömung Richtungsänderungen unterworfen ist, führen die suspendierten Teilchen vermöge ihrer Trägheit Relativbewegungen zum umgebenden Medium aus. Dieser Effekt tritt bei der Atmung an allen Verzweigungsstellen der Bronchien und Bronchiolen auf und hat zur Folge, daß sich eine Anzahl der Teilchen in unmittelbarer Nähe der Verzweigungsstellen an den Wandungen absetzt. Das Absetzen hängt von der Größe der Teilchen (Radius r), von der Strömungsgeschwindigkeit (u), vom Winkel der Richtungsänderung (φ) und vom Radius des Rohres (a) ab. Es ergibt sich mit Hilfe des *Stokesschen* Gesetzes für den Weg s, den ein Teilchen (kugelförmig, vom spezifischen Gewicht 1) relativ zum Medium zurücklegt,

$$s = \int_0^{\frac{u \cdot \sin \varphi}{2 r^2}} \frac{2 r^2}{9 \eta} d(u \cdot \sin \varphi) = \frac{2 r^2 u \cdot \sin \varphi}{9 \eta} \tag{10}$$

wobei η die Konstante der inneren Reibung der Luft ist ($= 1,9 \cdot 10^{-4}$ [cm⁻¹ g sec⁻¹] für 37° C). Die Wahrscheinlichkeit für das Absetzen ist

$$P = \frac{180 - \alpha}{180} + \frac{\sin \alpha}{2 \pi} \tag{11}$$

wenn
$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{r^2 u \sin \varphi}{9 \eta a} \tag{12}$$

Für den Umlenkungswinkel wird für die Verzweigungsstellen der Bronchien und Bronchiolen A → B, B → C, F → G der Wert 30° ein-

gesetzt, für den Übergang von den Bronchioli respiratorii zu den Ductuli alveolarii $G \rightarrow H$ jedoch 90° und beim letzten Übergang $H \rightarrow I$ in die kugelförmigen Sacculi 0° . Das dürfte den natürlichen Verhältnissen befriedigend entsprechen. Die Wahrscheinlichkeiten P , die sich nach Gl. (11) so ergeben, enthält Tabelle 4.

d) Randeffekt.

Ein vierter Vorgang des Absetzens der in der Luft suspendierten Teilchen, der ebenso wie der eben besprochene an die Verzweigungsstellen der Bronchien und Bronchioli gebunden ist, ist zwar quantitativ nur von geringer Bedeutung, muß aber hier der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Er ist immer dann wichtig, wenn die Teilchengrößen mit den Rohrweiten vergleichbar sind.

Wegen der Raumausdehnung der Teilchen besteht nahe der Rohrwandungen immer eine Zone, in der das Vorhandensein eines Teilchens im suspendierten Zustand unmöglich ist; die Breite dieser Randzone ist gleich dem Teilchenradius. Beim Eintritt eines Aërosols in ein Rohr muß ein gewisser Anteil der suspendierten Teilchen abgesetzt werden, nämlich so viele, wie anteilmäßig auf die Randzone entfallen.

Der Randeffekt hängt vom Verhältnis des Teilchenradius zum Rohrradius ab. Mit der Annahme, daß die Randzonen eines Rohres nicht unmittelbar in die des nächstfolgenden übergehen, wie sie für die Verzweigungen in der Lunge berechtigt ist, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für das Verschwinden der Teilchen an den Verzweigungsstellen:

Tabelle 4.
Absetzen infolge der Trägheitswirkung.

| Lungenteile | $r = 0,3 \mu$ | $r = 1 \mu$ | $r = 3 \mu$ | $r = 10 \mu$ |
|-------------|---------------|-------------|-------------|--------------|
| A—B | 0,010 | 0,114 | 1,02 | 11,4 |
| B—C | 0,023 | 0,258 | 2,31 | 25,6 |
| C—D | 0,034 | 0,372 | 3,35 | 36,7 |
| D—E | 0,022 | 0,248 | 2,24 | 24,8 |
| E—F | 0,016 | 0,175 | 1,56 | 17,3 |
| F—G | 0,002 | 0,022 | 0,20 | 2,1 |
| G—H | 0,006 | 0,066 | 0,61 | 6,6 |
| H—I | — | — | — | — |
| rückwärts | | | | |
| I—H | — | — | — | — |
| H—G | — | — | 0,01 | 0,1 |
| G—F | 0,001 | 0,011 | 0,10 | 1,2 |
| F—E | 0,001 | 0,006 | 0,06 | 0,6 |
| E—D | 0,004 | 0,039 | 0,36 | 3,9 |
| D—C | 0,008 | 0,091 | 0,84 | 8,9 |
| C—B | 0,009 | 0,101 | 0,89 | 9,8 |
| B—A | 0,007 | 0,081 | 0,72 | 7,9 |

Tabelle 5.
Absetzen infolge des Randeffektes.

| Lungenteile | $r = 1 \mu$ | $r = 3 \mu$ | $r = 10 \mu$ |
|-------------|-------------|-------------|--------------|
| A—B | 0,05 | 0,16 | 0,53 |
| B—C | 0,10 | 0,30 | 1,00 |
| C—D | 0,20 | 0,60 | 2,00 |
| D—E | 0,27 | 0,80 | 2,65 |
| E—F | 0,67 | 2,00 | 6,55 |
| F—G | 0,80 | 2,39 | 7,84 |
| G—H | 2,0 | 5,91 | 19,0 |
| H—I | 2,00 | 5,90 | 18,7 |

$$P = 2 \frac{r}{a} - \left(\frac{r}{a}\right)^2. \tag{13}$$

Für a ist immer der Radius des Rohres einzusetzen, in das das Aërosol eintritt. Die Werte P nach (13) sind in Tabelle 5 angegeben; sie sind nur klein.

3. Zusammenfassung der Einzelergebnisse.

Die im Abschnitt 2 beschriebenen vier Einzelvorgänge finden beim Eindringen eines Aërosols in die menschliche Lunge alle gleichzeitig statt und die durch sie hervorgerufenen Wirkungen, die zum Absetzen der Teilchen an den Wandungen der Lungenwege führen, addieren sich. Durch Addition der Wirkungen von Molekularbewegung und Sedimentation ergibt sich das Absetzen in den Rohren (Trachea, Hauptbronchien usw.), durch Addition der Wirkungen der Trägheit und des Randeffektes ergibt sich das Absetzen an den Verzweigungsstellen (von der ersten Bifurkation angefangen). Jedoch muß bei der Benutzung der Prozentsätze der Tabellen 2—5 beachtet werden, daß sie jeweils auf 100% Teilchenmenge an den betreffenden Stellen bezogen sind. Um die wahre Verteilung der abgesetzten Teilchenmengen eines eingeatmeten Aërosols in den einzelnen Lungenabschnitten zu erhalten, muß das Absetzen der Teilchen von der Trachea an schrittweise unter Berücksichtigung der vorausgegangenen Verringerung der Teilchenmenge betrachtet werden; es muß der Weg des Aërosols von der Trachea bis zu den Sacculi alveolarii und wieder zurück bis zur Trachea verfolgt werden¹. Auf diese Weise ist die Tabelle 6 gewonnen worden, deren Zahlenwerte für

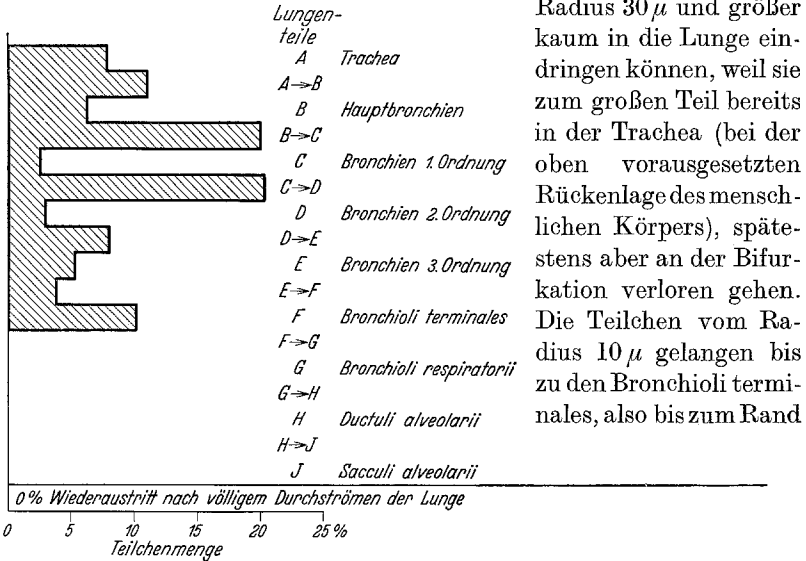
Tabelle 6. Summenwerte für das Absetzen der suspendierten Teilchen in Prozenten der beim Eintritt in die Trachea vorhandenen Teilchenmenge.

| Lungenteile | $r = 0,03 \mu$ | $r = 0,1 \mu$ | $r = 0,3 \mu$ | $r = 1 \mu$ | $r = 3 \mu$ | $r = 10 \mu$ | $r = 30 \mu$ |
|-------------------------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| A Trachea | 0,16 | 0,08 | 0,03 | 0,10 | 0,8 | 7,8 | 67 |
| A—B | < 0,01 | < 0,01 | 0,02 | 0,16 | 1,2 | 11,0 | 33 |
| B Hauptbronchien | 0,21 | 0,10 | 0,05 | 0,11 | 0,7 | 6,2 | — |
| B—C | < 0,01 | < 0,01 | 0,03 | 0,27 | 2,5 | 20,0 | — |
| C B onchien 1. Ordnung | 0,28 | 0,13 | 0,07 | 0,07 | 0,4 | 2,5 | — |
| C—D | < 0,01 | < 0,01 | 0,04 | 0,57 | 3,8 | 20,3 | — |
| D Bronchien 2. Ordnung | 0,55 | 0,26 | 0,13 | 0,14 | 0,8 | 2,9 | — |
| D—E | < 0,01 | < 0,01 | 0,02 | 0,52 | 2,7 | 8,0 | — |
| E Bronchien 3. Ordnung | 1,03 | 0,51 | 0,29 | 0,35 | 2,0 | 5,3 | — |
| E—F | < 0,01 | < 0,01 | 0,02 | 0,84 | 3,1 | 3,8 | — |
| F Bronchioli terminales | 6,1 | 3,1 | 2,0 | 4,0 | 25,4 | 10,2 | — |
| F—G | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 0,79 | 1,5 | — | — |
| G Bronchioli respiratorii | 6,3 | 3,2 | 2,0 | 3,7 | 16,0 | — | — |
| G—H | < 0,01 | < 0,01 | 0,01 | 1,8 | 2,5 | — | — |
| H Ductuli alveolarii | 37,2 | 19,1 | 15,8 | 40,3 | 36,6 | — | — |
| H—I | < 0,01 | < 0,01 | < 0,01 | 1,1 | — | — | — |
| I Sacculi alveolarii | 14,1 | 8,6 | 12,7 | 41,6 | — | — | — |
| Wiederaustritt aus der Lunge | 34,0 | 65,0 | 65,8 | 2,6 | — | — | — |

¹ Daß beim Atmungsvorgang in Wirklichkeit ein Teil der frisch eingeatmeten Luft nicht bis in die Alveolen vordringt, sondern bereits von den Bronchien aus wieder ausgeatmet wird, soll hier nicht berücksichtigt werden.

die einzelnen Teilchengrößen von $10\ \mu$ abwärts durch die Abb. 3—8 veranschaulicht werden.

Die Tabelle und die Darstellungen zeigen, daß sehr große Teilchen vom



Radius $30\ \mu$ und größer kaum in die Lunge eindringen können, weil sie zum großen Teil bereits in der Trachea (bei der oben vorausgesetzten Rückenlage des menschlichen Körpers), spätestens aber an der Bifurkation verloren gehen. Die Teilchen vom Radius $10\ \mu$ gelangen bis zu den Bronchioli terminales, also bis zum Rand

Abb. 3. Das Absetzen der suspendierten Teilchen in den einzelnen Lungenteilen. Teilchenradius $10\ \mu$.

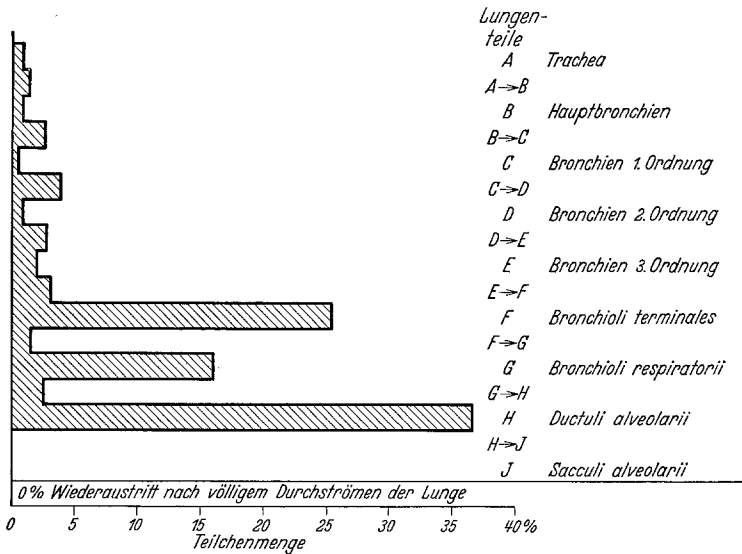


Abb. 4. Teilchenradius $3\ \mu$.

des respiratorischen Teiles der Lunge. Die $3\ \mu$ -Teilchen werden zum größten Teil im respiratorischen Teil abgesetzt, erreichen aber nicht mehr die Sacculi

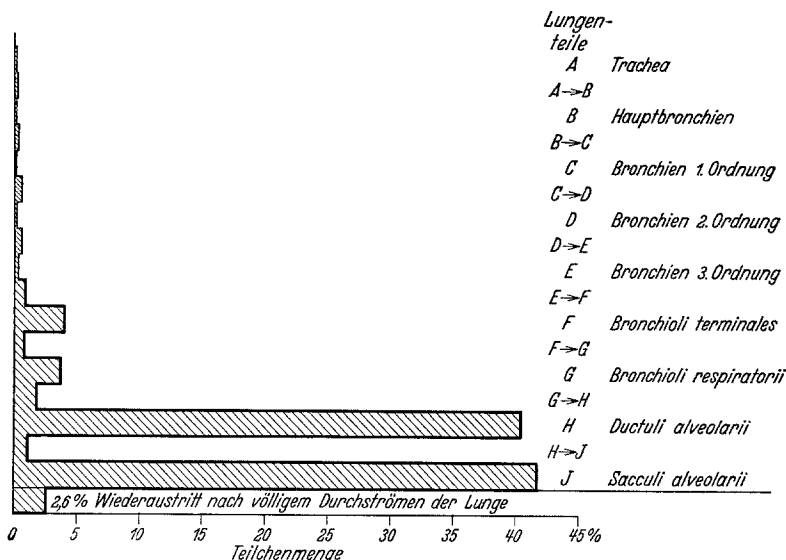


Abb. 5. Teilchenradius 1 μ .

alveolarii, in denen erst die 1 μ -Teilchen in großer Anzahl haften bleiben. Von den 1 μ -Teilchen durchlaufen 2,6% den ganzen Weg von der Trachea bis zu den Sacculi und wieder zurück ohne abgesetzt zu werden, d. h. sie

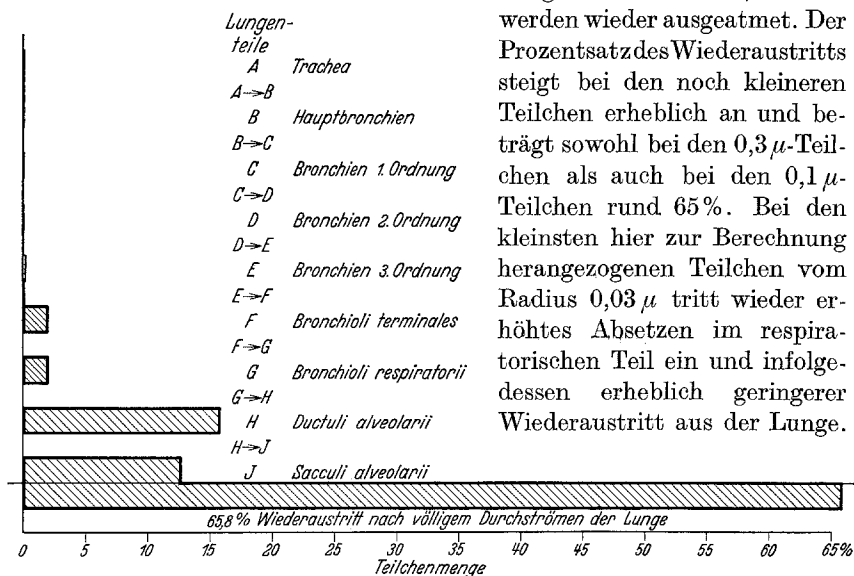


Abb. 6. Teilchenradius 0,3 μ .

werden wieder ausgeatmet. Der Prozentsatz des Wiederaustritts steigt bei den noch kleineren Teilchen erheblich an und beträgt sowohl bei den 0,3 μ -Teilchen als auch bei den 0,1 μ -Teilchen rund 65%. Bei den kleinsten hier zur Berechnung herangezogenen Teilchen vom Radius 0,03 μ tritt wieder erhöhtes Absetzen im respiratorischen Teil ein und infolgedessen erheblich geringerer Wiederaustritt aus der Lunge.

Während sich bei den größeren Teilchen starkes Absetzen an den Verzweigungsstellen zeigt, fehlt dies bei den kleinen Teilchen wegen der

geringen Trägheit ganz. Bei den großen Teilchen überwiegt die Wirkung von Trägheit und Fallbewegung, bei den kleinen Teilchen hingegen die der Molekularbewegung. Beiden

Teilchen vom Radius 0,1 bis 0,3 μ sind beide Wirkungen nur relativ gering und deshalb werden diese Teilchen am wenigsten von allen in der Lunge abgesetzt. (Gegenüber der Abb. 2 ergibt sich hier eine kleinere Teilchengröße für die größte Durchtrittswahrscheinlichkeit, weil die Fragestellung anders ist.)

Bei den Zahlenwerten ist die Teilchenmenge 100% des

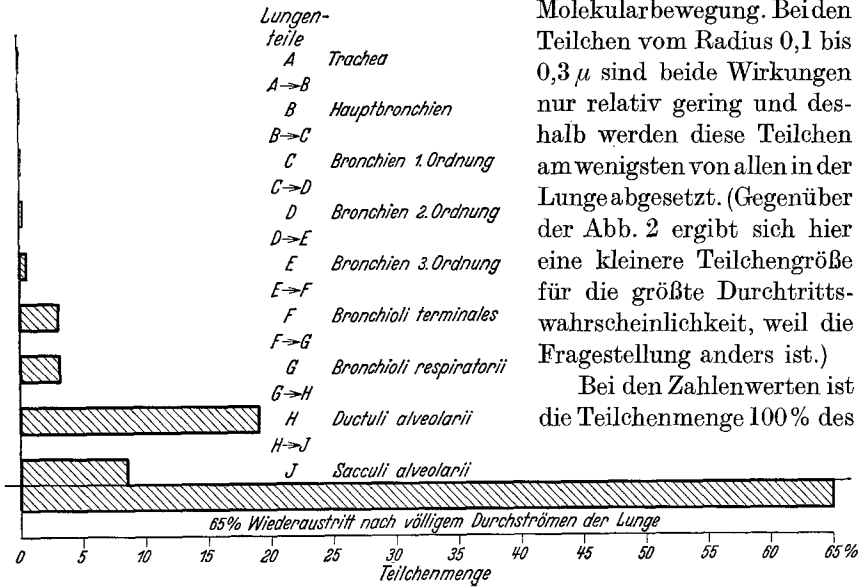


Abb. 7. Teilchenradius 0,1 μ .

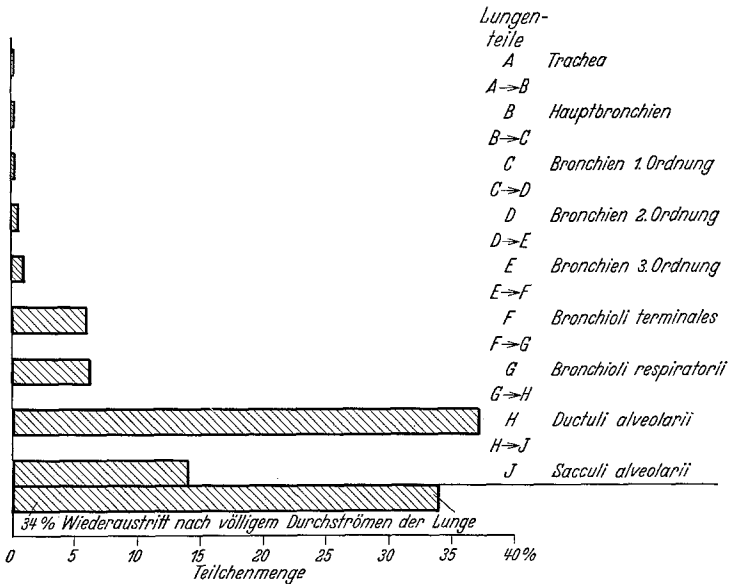


Abb. 8. Teilchenradius 0,03 μ .

Aërosols an der Stelle des Eintritts in die Trachea angesetzt worden. Bei Versuchen und Beobachtungen an lebenden Menschen wird hingegen die

Fragestellung nach den in den einzelnen Lungenteilen abgesetzten Teilchenmengen im Vergleich zur Teilchenmenge (Dichte des Aërosols) außerhalb des menschlichen Körpers wichtig sein. Diese Fragestellung ist aber nicht sehr verschieden von der hier behandelten; denn, wie nach den obigen Ergebnissen unschwer entschieden werden kann, findet bei kleinen Teilchen nur ein unbedeutendes Absetzen im Rachen und im Kehlkopf statt; andererseits haben die großen Tropfen, die sich auch bereits in beachtlichen Mengen im Rachen und im Kehlkopf absetzen, erwiesenermaßen nur geringe Bedeutung für die Lungeninhalation.

Zu den Zahlenergebnissen ist zu bemerken, daß natürlich die eingangs beim Ansatz der Rechnungen gemachten vereinfachenden Annahmen über den Bau des Bronchialbaumes und den Atmungsvorgang hohe Genauigkeitsforderungen von den Zahlenwerten keinesfalls zulassen (die mehrstellige Angabe der Zahlenwerte soll nur Vergleichsmöglichkeiten bieten), aber dennoch wird durch die Annahmen die festgestellte Größenordnung der besprochenen Vorgänge nicht gefälscht. Zu beachten ist folgendes: Die für die 3μ -Teilchen errechnete Tatsache, daß überhaupt kein Eindringen und Absetzen in den Sacculi alveolarii erfolgt, ist in Wirklichkeit nicht erfüllt; der in der Rechnung für die Sedimentation eingesetzte mittlere Neigungswinkel der Ductuli alveolarii wird bestimmt teils überschritten, so daß dort ein restloses Absetzen der 3μ -Teilchen in den Ductuli nicht erfolgt und mithin auch einzelne 3μ -Teilchen in die Sacculi gelangen. Ähnliche kleine Fälschungen, allerdings in meist noch geringerer Weise, können auch noch an anderen Stellen vorliegen. Mengenmäßig wird das aber wohl bei den meisten Betrachtungen keine Rolle spielen.

4. Experimentelle Prüfung ¹.

Durch experimentelle Untersuchung sollte entschieden werden, ob die mit den oben genannten Rechnungen gewonnenen Ergebnisse größenordnungsmäßig mit den wahren Verhältnissen übereinstimmen, insbesondere sollte festgestellt werden, ob von vorgegebenen Teilchengrößen tatsächlich ein den hier genannten Zahlenwerten entsprechender Anteil in den respiratorischen Teil der Lunge gelangt. Bei den Versuchen wurde ein durch Zerstäubung von Kochsalzlösung gewonnener Nebel benutzt, dessen Teilchengrößen (die naturgemäß gleichzeitig sehr verschieden waren) und ebenso die Häufigkeiten, mit denen die verschiedenen Teilchengrößen auftraten, auf Grund physikalischer Untersuchungen bekannt waren. Der Nebel wurde durch eine möglichst frische Lunge eines größeren Tieres (Hund, Kalb, Schaf) von der Trachea bis zu den Bronchioli terminales hindurchgesaugt, die durch Abtrennen der Pleura und des größten Teiles der Alveolen eröffnet waren. Das Durchsaugen der nebelhaltigen Luft erfolgte nach dem Prinzip des Lungenautomaten, jedoch nur in der Einatmungsrichtung. Die Geschwindigkeit des Luftstromes wurde der natürlichen Ventilationsgeschwindigkeit angepaßt.

¹ Daran ist Herr Dr. med. *S. Zepelin* beteiligt.

Die Dichte des Nebels (Teilchenmenge pro Volumeneinheit der Luft) wurde vor und nach dem Durchströmen der nebelhaltigen Luft durch die Lunge mit Hilfe von quantitativer Kochsalzanalyse bestimmt, unter Benutzung von Glaswolle-Filtern für das Abfangen der Nebeltropfen. Es ergab sich, daß eine Tropfenmenge durch die Lunge hindurch gelangte, die unter Berücksichtigung der verschiedenen Tropfengrößen des vorgegebenen Nebels recht befriedigend mit den oben genannten Rechnungsergebnissen übereinstimmte. Das experimentelle Ergebnis kann somit als Stütze für die oben wiedergegebene Theorie gelten.

Schlußbemerkung.

Das Anwendungsgebiet der hier dargestellten Theorie und ihrer Ergebnisse dürfte in erster Linie die Lungeninhalation zu therapeutischen Zwecken sein. Die Abb. 3—8 ergeben ein anschauliches Bild davon, wo sich die Teilchen eines Aërosols (Inhalationsnebels) je nach der Größe in der Lunge absetzen und lassen es umgekehrt zu, für eine beabsichtigte Behandlung eines bestimmten Teiles der Lunge die bestgeeignete Teilchengröße, also einen bestgeeigneten Inhalationsnebel auszusuchen. Z. B. ergibt sich unschwer, daß für die Behandlung der Bronchien ein Nebel vom Tropfenradius etwa 10μ am besten geeignet ist, während sich für die ausschließliche Behandlung der Alveolen die Tropfengröße $r = 1\mu$ gut eignet (dabei ist für die Flüssigkeit das spezifische Gewicht 1 vorausgesetzt).

Ein weiteres Anwendungsgebiet, dem die Theorie ursprünglich allein dienen sollte, ist das Problem der Lungenkontrastfüllung durch Inhalation zum Zwecke röntgenologischer Diagnose. Das Problem ist bereits vom Verfasser in enger Zusammenarbeit mit Herrn Dr. *Zepin* (früher im Krankenhaus Barmbeck, Hamburg) experimentell bearbeitet worden; die Versuche lieferten verheißungsvolle Ergebnisse.

Zusammenfassung.

Auf Grund physikalischer Überlegungen wurde für ein der menschlichen Lunge möglichst weitgehend angepaßtes Lungenschema zahlenmäßig ausgerechnet, in welcher Menge sich in der eingeatmeten Luft suspendierte Teilchen verschiedenster Größe („Schwebstoffe“) an den einzelnen Stellen des Bronchialbaumes absetzen. Die Ergebnisse zeigen, daß gröbere Teilchen (Radius größer als 10μ) bereits in der Trachea und in den größeren Bronchien an die Schleimhäute gelangen, kleinere (Radius etwa 1μ) hingegen zur Hauptsache im respiratorischen Teil der Lunge ausgefiltert werden; noch kleinere Teilchen (Radius zwischen $0,1$ und $0,3\mu$) werden größtenteils wieder ausgeatmet, von den kleinsten in Betracht kommenden Teilchen setzt sich jedoch wieder eine größere Menge ab. Die Rechnungsergebnisse dürfen auf Grund experimenteller Nachprüfung als gesichert gelten. Sie können deshalb bei medizinischen Verfahren benutzt werden, wenn es sich um die Frage der Wahl einer günstigsten Größe der Schwebeteilchen für die Inhalationsbehandlung eines bestimmten Teiles des Bronchialbaumes handelt.