

F2.2

Verdrängungsströmung

F2.2.1

Vertikale Verdrängungsströmung

Vertikale Verdrängungsströmungen kommen im Bereich der Komfortklimatisierung nicht vor. Man trifft sie eher im industriellen Bereich an. Verdrängungsströmungen sind bei kleinen Volumenströmen nur bei isothermen Bedingungen stabil. Wärmequellen mit geringer Leistung, wie sie beispielsweise Personen darstellen, reichen schon aus, die Stabilität einer solchen Verdrängungsströmung zu gefährden. Bei einer vertikalen Verdrängungsströmung von unten entsteht, wie schon erwähnt, eine Quellluftströmung, wenn die Wärmequelle mehr Luft nach oben fördert als an Zuluft für die Wärmequelle in den Raum gelangt.

Für die vertikale Verdrängungsströmung von oben und von unten gibt Linke [F-26] Strömungsbilder in Abhängigkeit von einer charakteristischen Temperaturdifferenz und dem Massenstrom an (Bild F2-25). Die Verdrängungsströmung von unten schlägt in ein torusförmiges Strömungsbild, die Verdrängungsströmung von oben in eine Raumwalze um. Die von Linke angegebenen Temperaturdifferenzen zwischen einer mittleren Temperatur auf der Raumachse und der Zuluft gestattet zunächst nicht die Berechnung der dazugehörigen Kühllast oder der Archimedeszahl (s. Bd. 1, Gl. J1-19).

Regenscheit [F-27] hat später Archimedeszahlen für die Stabilitätsgrenzen der Strömungsformen für die Versuche von Linke angegeben. Darin ist die Geschwindigkeit v die Luftgeschwindigkeit, die sich aus dem Volumenstrom der Luft bezogen auf die Grundfläche des Raumes ergibt. $\Delta\vartheta$ ist die Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft und der Zuluft und L ist die Höhe des Raumes.

Eine stabile Verdrängungsströmung von oben existiert nach Regenscheit [F-27] bis zu einer Archimedeszahl < 46 (4-13). In Klammern Ergebnisse einer

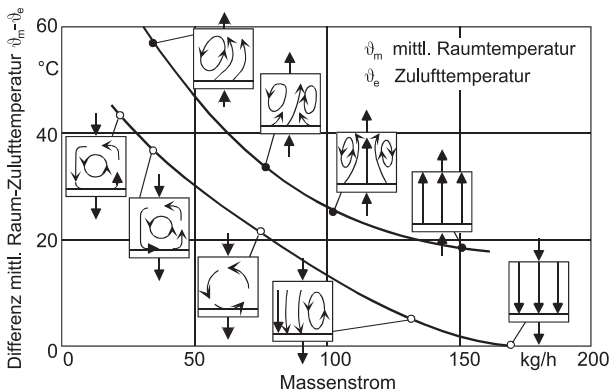


Bild F2-25 Strömungsbilder abhängig von Massenstrom und Temperaturdifferenz nach Linke [F-26]

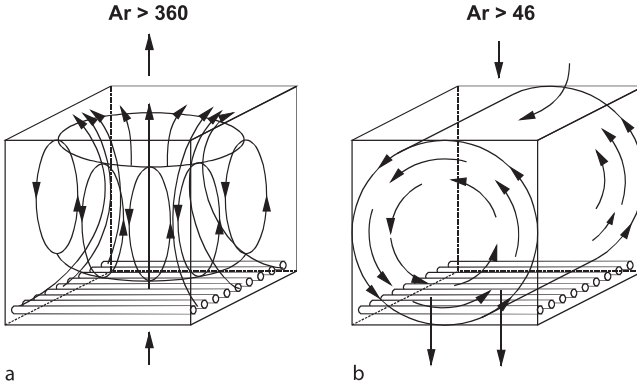


Bild F2-26 Typische Strömungsformen im Kubusraum nach Linke [F-26]

neueren Untersuchung [F-28] mit ähnlichem Aufbau. Bei größeren Archimedeszahlen schlägt die Strömung in eine Walzenströmung um, wie auf der Bild F2-26b dargestellt. Die Strömung von unten ist stabil bis zu einer Archimedeszahl < 360 (200–300) und geht dann in die torusförmige Strömungsform über. Sie ist auf Bild F2-26a dargestellt.

Mit diesen Stabilitätsgrenzen ergeben sich für einen 3 m hohen Raum die auf Bild F2-27 angegebenen Stabilitätsbereiche für den bezogenen Volumenstrom und die Kühllastdichte. Um eine stabile Verdrängungsströmung von unten bei einer Kühllastdichte von 10 W/m^2 zu erhalten, ist schon ein Volumenstrom von $50 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ erforderlich. Für 100 W/m^2 müsste der Volumenstrom auf $110 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ steigen. Die Werte liegen vollkommen außerhalb der üblichen Volumenströme für Büro- oder Versammlungsräume.

Beispiel:

1) Reinraum:

$$\frac{\dot{V}}{A} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3 / (\text{hm}^2);$$

$$\dot{q}_w = 7 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2.$$

2) Person in Quellluft:

$$\frac{\dot{V}}{A} = 100 \text{ m}^3 / (\text{hm}^2);$$

$$\dot{q}_w = 90 \text{ W/m}^2.$$

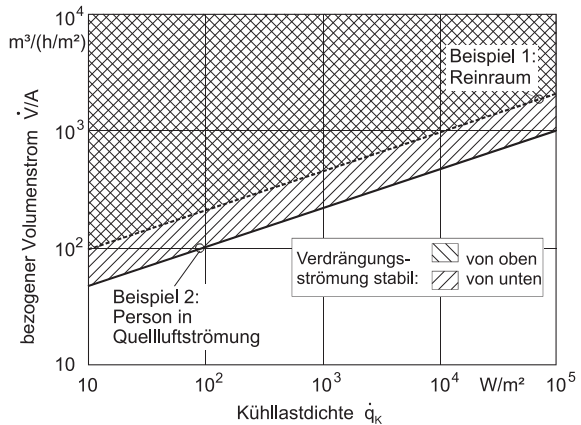


Bild F2-27 Bereiche der stabilen vertikalen Verdrängungsströmung

Obwohl die Strömung von oben instabiler ist als die von unten, wird sie in Industriehallen, vor allem in Reinräumen mit Volumenströmen bis $1800 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$, angewendet. Bei einem so hohen Volumenstrom würde das Stabilitätskriterium erst bei 70 kW/m^2 verletzt. Bei den Versuchen von Linke war die Last gleichmäßig über die Bodenfläche verteilt. Man kann aber davon ausgehen, dass die lokale Kühllastdichte entscheidend ist. Wenn eine ungleichmäßige Verteilung existiert, muss die lokale Kühllastdichte verwendet werden. Als Beispiel für die Strömung von unten ist in Bild F2-27 die Quellluftströmung eingetragen. Wenn man sich als Wärmequelle eine Person mit einer Kühllastdichte von 100 W/m^2 vorstellt, dann würde die Verdrängungsströmung ungefähr bis zu einem Volumenstrom von $100 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ existieren.

Als Beispiel für die stabile Strömung von oben: bei der Reinraumströmung mit $1800 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ kann eine Heizplatte mit einer Leistung von 1 kW und einer auf ihre Fläche bezogenen Leistungsdichte von 70 kW/m^2 noch keine Auftriebsstörung erzeugen, wenn die Geschwindigkeit $0,45 \text{ m/s}$ beträgt, wie Bild F2-39 links zeigt.

Die angegebenen Stabilitätskriterien können selbstverständlich nur als ungefährere Werte angenommen werden und sind deshalb hauptsächlich für Abschätzungen nützlich. Zusätzlichen Einfluss auf die Stabilität haben die Temperaturbedingungen an den Wänden, die infolge der Strahlung beispielsweise bei adiabater Wand anders als bei isothermer Wand sind. Das erklärt vermutlich auch die Unterschiede in den Ergebnissen von Linke und den Angaben in Klammern.

F2.2.2

Horizontale Verdrängungsströmung

Ähnliche Stabilitätsuntersuchungen wie für die vertikale Verdrängungsströmung liegen für die horizontale Verdrängungsströmung nicht vor. Die horizontale Verdrängungsströmung wird durch thermische Lasten in jedem Falle sehr stark gestört, so dass man sie eigentlich nur für isotherme oder nahezu isotherme Fälle anwenden sollte. Sie wird angewendet für kleinere Tischarbeitsplätze, bei denen das zu schützende Produkt zwischen Durchlass und der Verunreinigungs- und Störstelle liegt. Es hat auch Versuche gegeben, in Operationsräumen horizontale Verdrängungsströmungen zu verwenden, bei denen eine ganze Wand des Operationsraumes als Verdrängungsluftdurchlass ausgebildet wurde. Diese Anwendungen haben sich aber nicht durchgesetzt, weil sie zusätzliche Anforderungen an die Aufstellung des OP-Teams stellten und vermutlich auch weniger effektiv waren.

Eine spezielle Variante stellen sogenannte Schrägschirme dar, bei denen eine partielle Verdrängungsströmung von der Oberseite einer Seitenwand eines Operationsraumes schräg nach unten zum OP-Tisch eingblasen wird. Vom Standpunkt der Stabilität der Strömung und der zu vermeidenden Kontamination sind diese Durchlässe für ihre Aufgabe aber nicht geeignet.

F2.2.3

Anwendung in der Reinraumtechnik

F2.2.3.1

Verhalten kleiner Teile

In der Reinraumtechnik [F-92] mit sehr hohen Anforderungen (besser oder gleich Klasse 4 nach Bild F2-30) werden häufig so teure Produkte verarbeitet, dass der hohe Aufwand einer Verdrängungsströmung gerechtfertigt ist. Zur Erklärung wird zunächst auf die Besonderheiten der Reinnräume eingegangen.

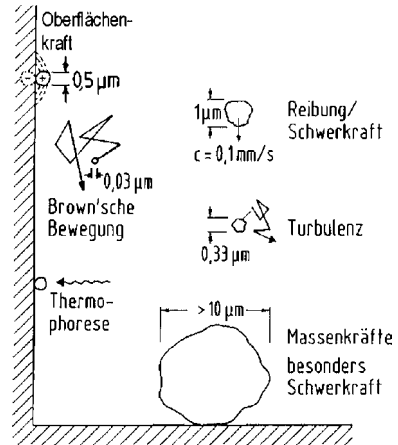
Reinnräume sind Räume, in denen der Aerosolgehalt der Luft extrem niedrig gehalten wird. Näheres über Aerosole (s. Bd. 1, N2.2). Die Besonderheiten der Reinnräume lassen sich am besten verstehen, wenn man einige Grundregeln der Aerosolphysik betrachtet. Die Besonderheiten erwachsen aus den unvorstellbar kleinen Abmessungen der Aerosole. Hierzu zunächst eine einfache Rechnung zur Veranschaulichung: Ein Kubikmillimeter eines Stoffes mit der Dichte 1 g/cm^3 wiegt ein Milligramm. Zerteilt man diesen Kubikmillimeter in Teile mit der Abmessung 1 Mikrometer, so erhält man 10^9 – eine Milliarde – Teile, von denen jedes 10^{-6} Mikrogramm wiegt. Bild N2-1 in Bd. 1 veranschaulicht die Abmessungen von Aerosolen.

Wenn Gegenstände in unserer täglichen Erfahrungswelt stören, werden sie entfernt. Das ist in der Mikrowelt nicht so leicht möglich, weil sich die Partikel schwer finden lassen. Dazu ein Beispiel: Ein Partikel mit der Abmessung $0,3 \mu\text{m}$ auf einem Wafer mit einem Durchmesser von 150 mm wäre nach Vergrößerung um den Faktor 10^6 mit einem Ball von $0,3 \text{ m}$ Durchmesser auf einer Fläche mit dem Durchmesser 150 km vergleichbar. Man kann sich leicht ausmalen, wie schwer es ist und wie lange es dauert, selbst mit den besten technischen Hilfsmitteln diesen Ball zu finden.

Gegenstände mit Abmessungen von Millimetern, Zentimetern oder Metern fallen nach unten, wenn sie nicht festgehalten werden. In der Mikrowelt ist das anders. Die Oberfläche der Mikrometerpartikel ist, bezogen auf ihr Volumen, tausendmal größer als das der Millimeterpartikel. Entsprechend größer werden auch die Wirkungen aller Oberflächenkräfte im Verhältnis zu den Volumenkräften. So werden die Reibungskräfte tausendmal wirksamer als die Massenkräfte. Ein Ergebnis ist, dass sich Mikrometerpartikel in Luft wie in einem zähen Brei bewegen, sie bewegen sich mit der Luft und sedimentieren fast gar nicht. Man sagt, wenn das auch nicht ganz richtig ist, dass sie schweben, und nennt sie Schwebstoffe. Die Sedimentationsgeschwindigkeit v_p eines Mikrometerpartikels ist kleiner als $0,1 \text{ mm/s}$. Gl. N2-1 in Bd. 1 gestattet, die Sedimentationsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Partikelgröße zu berechnen. Aus der geringeren Sedimentationsgeschwindigkeiten der kleineren Partikel erklärt sich, weshalb in der Luft mehr kleine als große Partikel schweben.

Bild F2-28 zeigt noch einige weitere Besonderheiten kleiner Teile. In Wandnähe werden sie von Oberflächen-Kräften angezogen. Am Beispiel eines $0,6 \mu\text{m}$ -Partikels [F-29] sind diese Kräfte in Abhängigkeit vom Wandabstand berechnet

Bild F2-28 Kräfte, die auf Partikel mit verschiedenen Durchmessern wirken



und mit dem Gewicht des Partikels verglichen worden. Die Oberflächen-Kraft beträgt in unmittelbarer Wandnähe ein Vielfaches der Schwerkraft. Ein Grund, weshalb solche Teilchen nur schwer von einer Oberfläche entfernt werden können, selbst wenn man sie „entdeckt“ hätte. Mit weiter abnehmender Abmessung der Partikel kommen weitere Kräfte ins Spiel, die auf die Turbulenz der Strömung, die Brown'sche Bewegung oder auf thermische Strahlung (Thermophorese) zurückzuführen sind. Auf Einzelheiten zur Wirkung weiterer Kräfte wie Thermophorese, elektrostatische Aufladung sei auf die Fachliteratur verwiesen (u. A. Suter [F-30], Hinds [F-31], Gail [F-92]).

Die im Verhältnis zu den Massenkräften großen Reibungskräfte, die auch auf Mikrometerteilchen wirken, erklären, weshalb die Teile fast trägheitslos jeder Strömungsbewegung folgen, ein Grund, weshalb man Strömungen mit Rauch gut sichtbar machen kann. Das gelingt umso besser, je geordneter die Strömung verläuft, also besonders gut bei der laminaren Strömung.

Schwebstoffe sind in der Fertigung von Mikrochips schädlich, weil die Strukturen von Mikrochips im Bereich von Mikrometern liegen und Partikel in dieser Größenordnung entweder Kurzschlüsse zwischen Leiterbahnen erzeugen oder den Aufbau der Mikrostrukturen behindern können.

Es gibt noch andere Gebiete, wo speziell lebende Schwebstoffe (Mikroorganismen) sehr unerwünscht sind und ihre Ausbreitung verhindert werden muss: Überall, wo Sterilität gefordert wird, besonders also in Operationsräumen und Fertigungshallen für das Abfüllen und Verpacken steriler Medikamente oder Geräte und auch verderblicher Lebensmittel und dort, wo vom Produkt keine Mikroorganismen auf den Menschen übertragen werden dürfen. Mikroorganismen haben ebenfalls Abmessungen im Mikrometerbereich (vgl. Bd. 1, Bild N2-1 und Abschn. N2.4 in Bd. 1).

Die besten Hochleistungs-Schwebstofffilter (englisch „Ulpa-Filter“) haben statistisch gesehen je nach Filterstufe (s. Bd. 1, Tab. N7-3) einen Anfangsdurchlassgrad von $5 \cdot 10^{-6}$ bis $5 \cdot 10^{-8}$. Wenn Luft durch solche Schwebstofffilter geleitet wird, ist sie praktisch partikel- und keimfrei. In den Reinnräumen selbst befinden

sich aber Partikelquellen, hauptsächlich Personen, Maschinen und Materialien. Aufgabe der Lüftungstechnik im Reinraum ist es deshalb, die Partikel, die von diesen Quellen ausgehen, daran zu hindern, an die partikelempfindlichen Stellen zu gelangen. Dafür ist die Verdrängungsströmung besonders gut geeignet. Es kann sich dabei um den Schutz des Produktes, aber auch um den Schutz der Personen vor dem Produkt handeln.

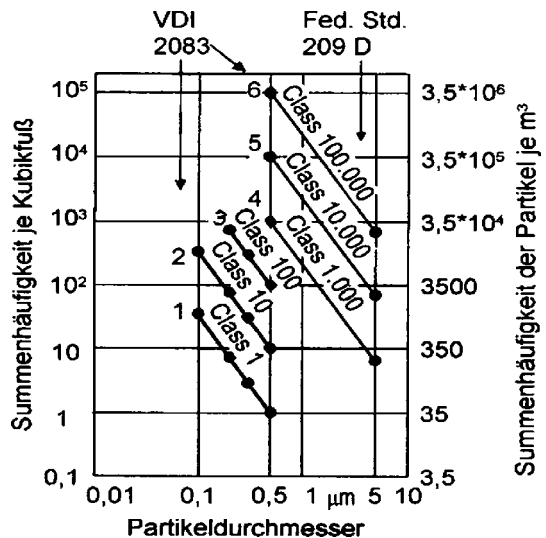
F2.2.3.2

Reinraumklassen

Als Kriterium für die Qualität eines Reinraumes wurden „Reinraumklassen“ eingeführt. Bei ihrer Definition ist man davon ausgegangen, dass die Zahl der Partikel im Luftvolumen der wesentliche Qualitätsmaßstab ist. Man hätte besser die auf einem Produkt sedimentierten Partikel als Maßstab eingeführt. Aber häufig werden Grenzwerte nach den Möglichkeiten der vorhandenen Messtechnik festgelegt, und mit Partikelzählern kann man ganz gut die Anzahl von Partikeln in einem abgesaugten Teilvolumenstrom ermitteln, und zwar genau in dem ursprünglich sehr wichtigen Durchmesserbereich der Partikel von 0,1 bis 10 Mikrometern. Heute lassen sich mit Kondensationskernzählern auch noch viel kleinere Partikel zählen.

Die erste Norm für Reinräume wurde in USA mit dem Federal Standard 209 gemacht, Bild F2-29 gibt Version D wieder. Die Kurven geben Summenhäufigkeiten verschiedener Partikelkonzentrationen je Volumeneinheit als Klassengrenzen an von Partikeln, die kleiner oder gleich dem Durchmesser auf der Ordinate sind. Die Steigung der Grenzkurven ergibt sich aus Erfahrungswerten für die Korngrößenverteilung von Schwebstoffen.

Bild F2-29 Reinraumklassen nach Fed. Stand. 209 D und VDI 2083



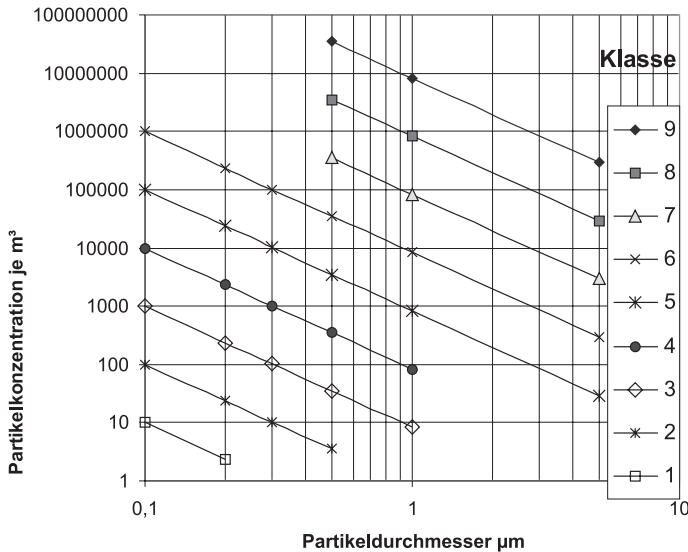


Bild F2-30 Reinraumklassen nach ISO 14644 [F-32]

Die Reinraumklassen werden benannt nach der Konzentration der Partikel, die kleiner oder gleich 0,5 Mikrometer sind, in einem Kubikfuß Luft unter Normbedingungen.

Der Durchmesser ist ein äquivalenter Durchmesser, den ein Lichtstrahlpartikelzähler ermittelt, der mit kugelförmigen monodispersen Aerosolen kalibriert wurde. Die Einzelheiten der Messtechnik sollen hier nicht näher erläutert werden, sie sind eingehend in der ISO-Norm beschrieben [F-32] beschrieben.

Der Federal Standard 209 D nahm die Anzahl der Partikel je cfm (Kubikfuß) als Klassenbezeichnung. Der Federal Standard 209 E wurde auf metrische Einheiten umgeschrieben. Es wird die Anzahl der Partikel in einem Kubikmeter gemessen und für die Klassenbezeichnung wird nicht die Anzahl der Partikel, sondern der Logarithmus der Partikelzahl verwendet, wie das zuvor auch schon von anderen Vorschriften, etwa der Richtlinie VDI 2083 gemacht wurde. In Bild F2-29 sind die verschiedenen Grenzkurven wiedergegeben. Die Steigungen der Grenzkurven unterscheiden sich geringfügig. Alle nationalen Standards werden jetzt durch die neue ISO-Norm EN ISO 14644 [F-32] ersetzt. Danach sind die Reinraumklassen nach folgender Formel festgelegt:

$$C_n = 10N \cdot \left(\frac{0,1}{D} \right)^{2,08} \quad (\text{F2-11})$$

- mit C_n – größte erlaubte Konzentration von Partikeln mit einer Abmessung gleich oder größer als die gegebene Partikelabmessung, Partikel je m^3
 N – Klassennummer nicht größer als 9; Zwischenklassen bis zu einer Unterteilung von 0,1
 D – Partikelabmessung in μm

Bild F2-30 „Reinraumklassen“ zeigt die entsprechenden Grenzkurven.

Bei der ISO-Norm wird der Logarithmus der Konzentration der Partikel größer oder gleich $0,1 \mu\text{m}$ als Klassenbezeichnung verwendet.

Für die pharmazeutische und die Nahrungsmittelindustrie ist nicht die Konzentration der Partikel, sondern die der lebenden Mikroorganismen maßgebend. Deshalb gibt es eine weitere Richtlinie zu beachten, GMP, Good Manufacturing Practices [F-33]. Die folgende Tabelle F2-1 gibt eine Zuordnung der Klassen wieder:

Tabelle F2-1 Zuordnung von Reinraumklassen nach ISO zum GMP-Standard

| GMP-Klasse | Reinraumkriterium Maximale Partikelkonzentration | | | | Mikroorganismen mit Luftsammlern KBE/m ³ |
|------------|--|--------------|---|--------------|--|
| | Partikel/m ³ > 0,5 μm | | Partikel/m ³ > 5 μm | | |
| | at rest | in operation | at rest | in operation | |
| A | 3.500 | 3.500 | 0 | 0 | <1 |
| B | – | 350.000 | 0 | 2.000 | 10 |
| C | 350.000 | 3.500.000 | 2.000 | 20.000 | 100 |
| D | 3.500.000 | keine Angb. | 20.000 | keine Angabe | 200 |

Dort werden 4 Klassen A bis D unterschieden und die Partikelkonzentration wird unterschieden danach, ob im Raum eine Aktivität (in operation) oder keine Aktivität (at rest) stattfindet, weitere Details siehe [F-92].

Die Unterscheidungen zwischen Betrieb (in operation) und Ruhe (at rest) deuten darauf hin, dass nicht eine laminare Verdrängungsströmung vorausgesetzt wird; denn bei laminarer Strömung darf sich durch den Betrieb nichts ändern.

F2.2.3.3

Laminare und turbulente Verdrängungsströmung

Die Reinraumströmung hat so zu erfolgen, dass Partikelbewegungen von Quellen schädlicher Partikel zu Produkten oder Personen möglichst unterbunden werden. Partikelquelle kann der Mensch oder das Produkt sein. Bei giftigen Produkten ist der Mensch vor Aerosolen der Produkte, im OP vor Keimen des OP-Personals zu schützen. Das wird mit Verdrängungsströmungen seit langem erfolgreich gemacht. Im folgenden soll gezeigt werden, was dabei zu beachten ist.

Die besten Erfolge können mit einer geordneten Verdrängungsströmung erzielt werden, also am besten mit einer laminaren Verdrängungsströmung. Den Erfindern der ersten Reinräume muss diese Idee vorgeschwebt haben, denn es wird bei den ersten Reinräumen häufig von laminarer Verdrängungsströmung gesprochen, später meist nur noch von „unidirectional flow“, also Strömung in einer Richtung, was nach unserem Verständnis eine Verdrängungsströmung ist, die aber nicht laminar sein muss. Dabei wird häufig auch etwas verwirrend von

quasi laminarer Strömung gesprochen. Ebenso wird die nicht vollkommen laminare Strömung auch als „turbulenzarme“ Strömung bezeichnet. Die Erklärung für die Sprachverwirrung mag darin bestehen, dass es verhältnismäßig schwierig ist, eine wirklich laminare Strömung zu realisieren.

Laminare Strömung soll so verstanden werden wie bei den Versuchen von Reynolds vor über 100 Jahren. Immer, wenn eine Strömung durch einen langen Rauchfaden sichtbar gemacht werden kann, weil er sich nicht durch Turbulenz auflöst, liegt eine laminare Strömung vor, unabhängig davon, ob die Strömung nach den Stabilitätskriterien stabil ist oder nicht. Es ist allerdings nicht leicht, die Laminarität nachzuweisen; denn wenn man mit einem Rauchröhrchen Rauch in die Strömung einbringt, muss die Reynolds-Zahl der Röhrchenströmung kleiner als 40 sein, weil sonst bereits die Störungen durch das Rauchröhrchen Turbulenz erzeugen. Der Durchmesser des Rauchröhrchens muss deshalb kleiner als 1 mm sein.

Zwei andere Methoden haben sich besser bewährt, qualitativ die Laminarität nachzuweisen. Man kann entweder gegen die Strömung mit Rauchröhrchen Rauchringe ausblasen. Wenn die Ringe mit der Strömung schwimmen, ohne zu zerfallen, liegt eine laminare Strömung vor. Oder man kann eine Methode anwenden, die Leder [F-34] entwickelt hat. Er verdampft Wachs oder eine andere Substanz auf einem beheizten sehr dünnen Draht. Die Substanz kondensiert sofort wieder in der Strömung und macht die Stromfäden so sichtbar. Das hierzu aufgenommene Bild F2-31 zeigt, dass es möglich ist, in einem 3 m hohen Raum die Strömung von der Decke bis zum Boden laminar zu halten, obwohl die Reynolds-Zahl, mit der Raumhöhe als Länge gebildet, ungefähr 10^6 beträgt. Das steht nicht im Widerspruch dazu, dass eine Kanalströmung bei einer Reynolds-Zahl von 2300 turbulent wird; denn hier im Reinraum fehlt die erforderliche

Bild F2-31 Laminare Verdrängungsströmung von oben nach unten in einem 3 m hohen Reinraum mit Rauch sichtbar gemacht



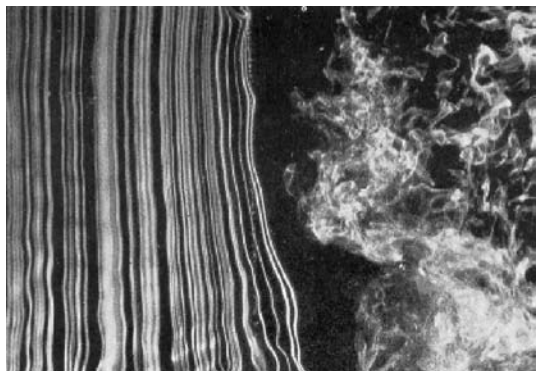
Einlauflänge der Kanalströmung. Wenn man den Reinraum zwischen den Wänden als einen Kanal betrachtet, dann ist der Raum nicht hoch genug, um den laminar-turbulenten Umschlag zu erreichen.

Voraussetzung ist allerdings ein Laminarisor in der Strömung am Eintritt in den Raum, der aus einem engmaschigen monofilen Gewebe bestehen kann. Und es dürfen sich stromab vom Laminarisor keine Störstellen befinden. Die Rahmen der Laminarisatoren selbst dürfen keine Störungen verursachen. Das lässt sich erreichen, indem Rahmen mit schmalem Austrittsquerschnitt verwendet werden. Mit der Maschenweite des Laminarisorgewebes gerechnet liegt die Reynolds-Zahl unter 1, und es ist einleuchtend, dass die Strömung laminar ist. Auf dem dargestellten Bild F2-31 ist rechts eine leichte Störung zu erkennen, die vom Laminarisorrahmen verursacht wird.

Im Folgenden werden einige Phänomene der turbulenten und der laminaren Verdrängungsströmung detaillierter dargestellt [F-35]. Um den Unterschied zwischen einer turbulenten, häufig bei kleinen Turbulenzgraden auch als „quasilaminar“ oder „turbulenzarm“ bezeichneten, und einer laminaren Strömung zu verdeutlichen, wird auf Bild F2-32 ein Foto der Strömung unter zwei benachbarten Auslässen gezeigt, ebenfalls mit der Heizdrahtmethode sichtbar gemacht. Links durchströmt die Luft oberhalb des Bildausschnittes einen Laminarisor, rechts ein Lochblech mit einem freien Querschnitt von etwa 40% und einem Lochdurchmesser von 4 mm, wie es häufig als Abdeckung von Verdrängungsluftdurchlässen verwendet wird. Die Strömung in den einzelnen Öffnungen des Lochbleches liegt im Übergangsbereich von der laminaren zur turbulenten Strömung. Der Turbulenzgrad der Strömung rechts beträgt ungefähr 5%, links weniger als 1%. Man erkennt deutlich, wie durch die Turbulenz ein Austausch von Partikeln quer zur Hauptströmungsrichtung erfolgt.

Es liegen empirische Aussagen über den Queraustausch in Abhängigkeit vom Turbulenzgrad vor [F-36]. In der Mitte einer Verdrängungsströmung, oder Grundströmung mit konstanter Geschwindigkeit über den ganzen Querschnitt, wurde ein dünner Partikelstrahl dicht über einem Laminarisor eingebracht, und die Profile der Partikelkonzentration wurden in verschiedenen Abständen stromab vom Einbringungsort bei verschiedenen Turbulenzgraden der Strömung

Bild F2-32 Strömung von oben nach unten unter einem Laminarisor (*links*) und einem Lochblech (*rechts*)



gemessen. Die Turbulenz wurde durch unterschiedliche Turbulenzgitter 180 mm hinter dem Laminarisor erzeugt. Es ergeben sich ähnlich wie für Geschwindigkeiten von Freistrahlen in ruhender Luft normalverteilte Profile der Partikelkonzentrationen $c(y)$, wie auf Bild F2-33 für einen Abstand x von 380 mm vom Laminarisor dargestellt.

Mit steigendem Turbulenzgrad verringert sich die Konzentration c_m in der Partikelstrahlmitte und die Profildbreite bzw. die Standardabweichung s des Profils nimmt zu. Das Profil der Partikelkonzentration $c(y)$ lässt sich darstellen:

$$c(y) = \frac{2P}{u\pi s^2} e^{-\frac{2y^2}{s^2}} \quad (\text{F2-12})$$

- mit y – Koordinate quer zur Strömungsrichtung mm
 $c(y)$ – Partikelkonzentration
 P – Quellstärke der Partikelquelle P/s
 u – Geschwindigkeit der Grundströmung m/s
 $s = 2 \sigma$ – Standardabweichung des Profils mm.

Zwischen der Konzentration in Strahlmitte c_m und der Quellstärke P sowie der Geschwindigkeit der Grundströmung besteht folgender Zusammenhang:

$$c_m = \frac{2P}{u\pi s^2} \quad (\text{F2-12})$$

Die Standardabweichung des Profils nimmt mit der Entfernung x von der Partikelquelle und mit dem Turbulenzgrad zu. Das Ergebnis ist in Bild F2-34

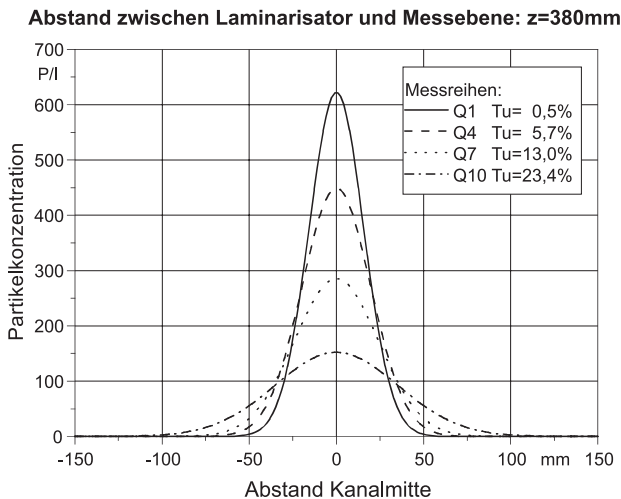


Bild F2-33 Partikelverteilungen einer Verdrängungsströmung mit unterschiedlichen Turbulenzgraden nach Scheer [F-36]

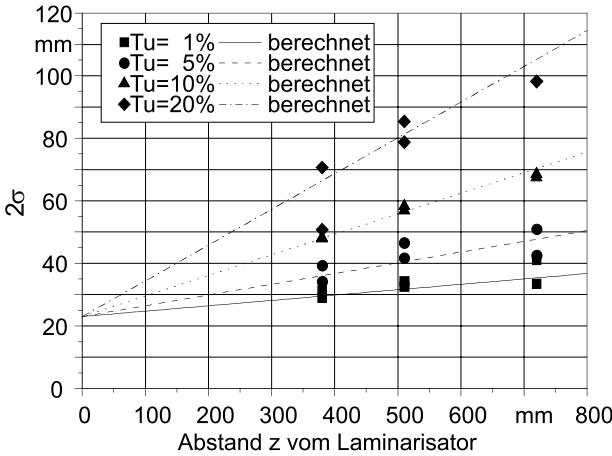


Bild F2-34 Standardabweichung des Partikelkonzentrationsprofils

dargestellt. Der Zusammenhang lässt sich ausdrücken durch folgende Gleichung:

$$s = k_1 + x \frac{Tu}{k_2} \quad (\text{F2-13})$$

Die anwachsende Standardabweichung kann man auch als eine Zunahme der Querausbreitung interpretieren. Die Querausbreitung nimmt also mit der Turbulenz und der Entfernung zu. Diese Ergebnisse dürften auch für andere Anwendungsfälle wie Ausbreitung von Dampf hinter einem Dampfbefeuchter von Interesse sein.

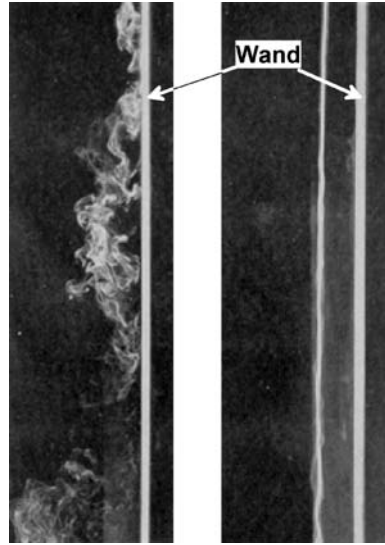
k_1 und k_2 in Gl. F2-13 sind experimentell ermittelte Konstanten, die von den Abmessungen des Versuchsaufbaus abhängen. Scheer fand $k_1 = 23$ mm und $k_2 = 175$.

Noch entscheidender wirkt sich die turbulente Bewegung bei Strömungen auf den Partikeltransport in Wandnähe aus, wie die Fotos Bild F2-35 qualitativ zeigen. In beiden Fällen wird Rauch im gleichen Abstand von einer Wand in die Strömung oberhalb des Bildausschnittes eingebracht. Die Luft strömt von oben nach unten parallel zur Wand. Auf der rechten Abbildung mit der laminaren Strömung erkennt man, dass sich der Rauch parallel zur Wand bewegt, ohne sie zu berühren. Auf der linken Abbildung mit der turbulenten Strömung berührt der Rauch durch den turbulenten Austausch immer wieder die Wand.

Wenn die Wand ein empfindliches Produkt wäre, würde es in der turbulenten Strömung reichlich kontaminiert. Dieser Effekt erklärt auch die Schmutzfahnen an den Wänden ganz normaler Räume oberhalb der Halterungen von Heizkörpern oder anderen Wärmequellen an der Wand oder auf Tragflächen von Flugzeugen hinter den Spoilern.

Aber auch im umgekehrten Fall, wenn die Wand eine Partikelquelle wäre, hätte die turbulente Strömung Nachteile, weil mehr Partikel aufgewirbelt und

Bild F2-35 Rauchfaden in Wandnähe,
links in turbulenter,
rechts in laminarer Strömung



– insbesondere quer zur Strömung – fortbewegt würden. Das ist besonders wichtig bei der Umströmung von Personen im Reinraum. Bild F2-36 zeigt die laminare Umströmung einer Person von oben mit einer Geschwindigkeit von 0,40 m/s. Vor der Person wurde die Partikelverteilung im Abstand von der Oberfläche in laminarer und in turbulenzarmer Strömung in Tischhöhe gemessen [F-35]. In der turbulenten Strömung ist die Schicht gleicher Partikelkonzentration ca. 10-mal dicker als bei der laminaren Strömung oder in gleicher Entfernung von 3 bis 10 cm ist die Konzentration in der turbulenten Strömung ungefähr 10-mal so groß. Empfindliche Produkte in Personennähe werden also 10-mal so stark kontaminiert.

Bild F2-36 Umströmung einer Person
in laminarer Verdrängungsströmung



Störungen der Verdrängungsströmung

Eine häufig vorkommende Störung der Strömung stellen Konstruktionsprofile im Luftstrom dar. Entweder sind es Filtrerrahmen, Leuchten oder gar, wenn die Schwebstofffilter ohne Abdeckung verwendet werden, die Falten der Schwebstofffilter selbst. Stromab von den Störungen bilden sich Nachlaufgebiete, s. z. B. Bild F2-37. In diese Nachlaufgebiete gelangen besonders gut Partikel von Quellen, die gleichzeitig Wärme abgeben. Infolge des Auftriebs bewegen sie sich im Nachlaufgebiet nach oben und finden dann gute Möglichkeiten, sich über große Entfernungen im Raum quer zur Strömung auszubreiten. Messungen mit einer Partikelquelle im Nachlaufgebiet eines horizontalen Profils haben ergeben, dass die Konzentration etwa bis zum Abstand der fünffachen Profilbreite von der Quelle proportional zur Entfernung abnimmt. Die Partikelkonzentration nimmt bei größerem Abstand von der Partikelquelle noch stärker ab, in der Entfernung der 10-fachen Hindernisbreite ist die Partikelkonzentration ungefähr auf ein Zehntel und bei der 100-fachen Entfernung ungefähr auf ein Tausendstel der Anfangskonzentration zurückgegangen. Wegen der großen Partikelzahl, die von Partikelquellen abgegeben wird, schaffen trotz der starken Konzentrationsabnahme immer noch viele Partikel eine „erfolgreiche“ Querbewegung im Raum.

Bild F2-37 zeigt die Umströmung eines Profils von oben mit gleicher Geschwindigkeit in laminarer und turbulenter Strömung. Der Vergleich zeigt zwei Effekte: In der laminaren Strömung werden die Stromfäden schon in größerem Abstand vom Hindernis umgelenkt, und sie gelangen nicht an die Oberfläche des Hindernisses. Das Nachlaufgebiet ist größer, aber partikelfrei. Das Nachlaufgebiet der turbulenten Strömung ist kleiner, aber stark kontaminiert. Die Bilder zeigen deutliche Vorteile der laminaren Strömung. Bei der turbulenten Strömung ist das Staugebiet schmaler. Durch die turbulente Strömung gelangen

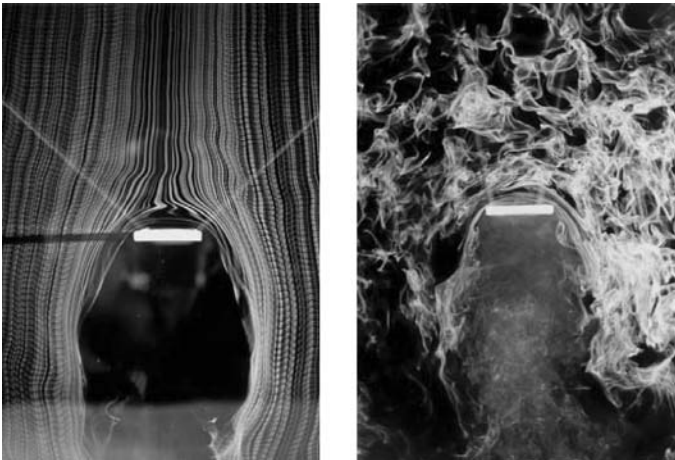


Bild F2-37 Profilumströmung in laminarer (*links*) und turbulenter (turbulenzarmer) Strömung (*rechts*)

viele Partikel in unmittelbare Wandnähe, was hohe Kontamination der Oberfläche bedeutet, falls die Strömung Partikel enthält. Das wird durch verschiedene Messungen der Sedimentationsgeschwindigkeit von Partikeln in Staupunktströmung und Strömungen parallel zu einer Wand nachgewiesen.

Immer wenn sich Ablöse- und Nachlaufgebiete der Strömung bilden können, ist zu unterscheiden, ob sich Partikelquellen innerhalb oder außerhalb des Ablösegebietes befinden. Das größere Nachlaufgebiet in der laminaren Strömung ist vorteilhaft, wenn keine Partikelquellen im Nachlaufgebiet liegen, es ist aber von Nachteil bei Partikelquellen im Nachlaufgebiet.

Sedimentation als Funktion des Turbulenzgrades

Es gibt einige Messungen, die den Turbulenzeinfluss auf die Sedimentation belegen. Wegen der unterschiedlichen Versuchsbedingungen lässt sich nur für den jeweiligen Fall eine Aussage machen und noch keine allgemein gültige Rechenregel angeben. Tendenziell wird durch steigenden Turbulenzgrad die Sedimentation vergrößert, wie Bild F2-37 vermuten lässt.

Es gibt verständlicherweise unterschiedliche Ergebnisse für vertikale und horizontale Staupunktströmungen, weil bei der vertikalen Staupunktströmung von oben auf eine horizontale Fläche die Schwerkraft einen zusätzliche Anteil liefert. Das Gleiche gilt bei Strömungen parallel zu einer Wand. Auf einer vertikalen Wand sedimentieren weniger Partikel als auf einer horizontalen Fläche unter einer Strömung.

Im Staupunkt einer horizontalen Strömung auf eine vertikale Fläche wurden bei verschiedenen Turbulenzgraden der Strömung [F-37] die in Bild F2-38 gezeigten Messergebnisse gefunden, bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1 m/s und Turbulenzgraden von 2 und 22%. Bei dem höheren Turbulenzgrad ist die Sedimentation ungefähr 10 mal so groß wie bei dem geringen Turbulenzgrad. Die Sedimentationsgeschwindigkeit ist proportional zur Sedimentation.

In eine ähnliche Richtung hatten auch schon frühere Messungen an OP-Decken gewiesen (s. Abschn. F2.2.3.4).

Bild F2-38 Sedimentationsgeschwindigkeit von Partikeln in einer Staupunktströmung bei verschiedenen Turbulenzgraden nach Schneider et al. [F-37]

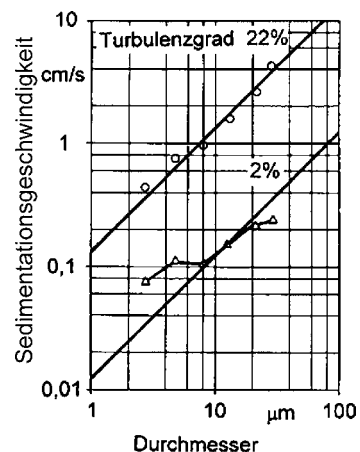
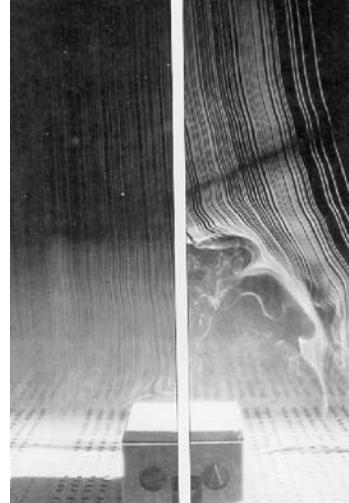


Bild F2-39 Verdrängungsströmung von oben nach unten über einer Wärmequelle bei verschiedenen Geschwindigkeiten



Messungen in einer vertikalen Strömung parallel zu senkrecht aufgestellten Wafern und Messungen in einer senkrechten Staupunktströmung von oben auf einen waagrecht gelagerten Wafer von Fischbacher [F-38] ergaben in beiden Fällen bei einer Erhöhung des Turbulenzgrades von 1 auf 10% eine Zunahme der Sedimentation um etwa 40%. Wobei in der Staupunktströmung auf die horizontale Fläche ungefähr 10 mal mehr Partikel sedimentierten als an dem senkrecht aufgestellten Wafer.

Scheer [F-36] hat die Sedimentation von Keimen in einer Staupunktströmung auf horizontale Petrischalen untersucht. Ein Anstieg des Turbulenzgrades von 1% auf 20% erhöht die Sedimentation ungefähr auf das Doppelte. Darauf wird später beim Abschnitt über OP-Decken noch näher eingegangen (F2.2.3.4).

Neben den Störungen durch Hindernisse spielen Wärmequellen eine große Rolle. Bild F2-39 zeigt die laminare Strömung von oben über einer Heizplatte mit einer Leistung von 1 kW bei zwei verschiedenen Geschwindigkeiten. Der linke Bildausschnitt zeigt eine linke und der rechte eine rechte Seite der Staupunktströmung. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 45 cm/s (linke Bildhälfte) ist keine Störung zu beobachten, während sie bei 33 cm/s (rechte Bildhälfte) schon schädliche Ausmaße erreicht. Hier wird qualitativ bestätigt, was anfangs über die Stabilität der Verdrängungsströmung gesagt wurde.

Die relativ hohe Geschwindigkeit von 45 cm/s, die in Reinnräumen für hohe Anforderungen angewendet wird, ist gegen thermische Störungen dieser Größenordnung stabil. Bei einer Geschwindigkeit der Verdrängungsströmung von 33 cm/s ist schon eine deutliche Störung durch den Auftrieb zu erkennen.

Einfluss der Abluftöffnungen auf die Verdrängungsströmung

Großflächige Verdrängungsströmungen, wie sie in Reinnräumen vorkommen, werden auch von der Abluftöffnung beeinflusst. Deshalb werden in Reinnräumen mit Verdrängungsströmung von oben großflächige perforierte Doppelböden

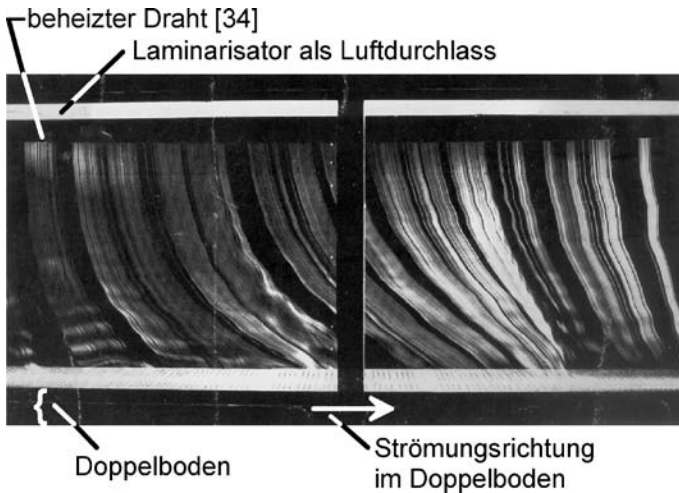


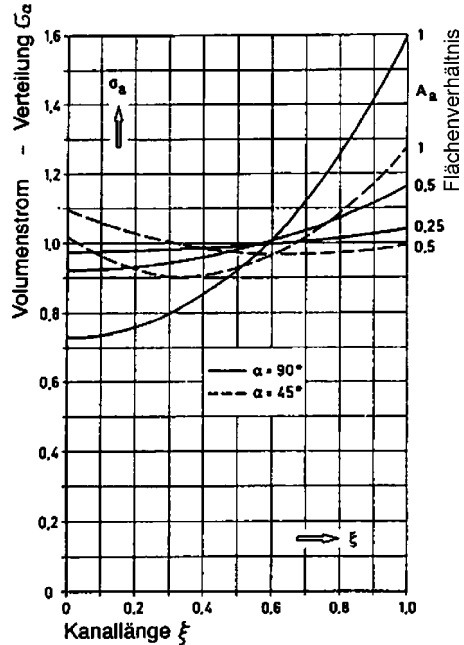
Bild F2-40 Verdrängungsströmung in einem Reinraum

zum Absaugen verwendet (s. 5.3.5 in [F-92]). Ein solcher Doppelboden allein reicht aber nicht aus, um eine vertikale Raumdurchströmung sicherzustellen. Die Absauggeschwindigkeit muss über die gesamte Fläche des Doppelbodens gleich groß sein. Bild F2-40 zeigt die übliche Durchströmung eines Reinraumes, bei dem das nicht der Fall ist. Der Hohlraum unter dem Doppelboden dient als Absaugkanal. Die Raumbreite und damit die Länge des Absaugkanals ist im vorliegenden Falle 11,5 mal größer als die lichte Höhe des Doppelbodens bzw. des Absaugkanals, eine häufig vorkommende Abmessung. Der relative freie Querschnitt des Lochbleches beträgt 14%, die Druckdifferenz am Doppelboden 34 Pa. Besonders in Raummitte weicht die Strömungsrichtung fast mit einem Winkel von 45° von der gewünschten vertikalen Strömungsrichtung ab.

Die Verteilung der von einem Abluftkanal abgesaugten Luft längs des Kanals wurde von Haerter [F-40] berechnet. Auf Bild F2-41 ist der Verlauf für 5 verschiedene Fälle dargestellt.

Die dimensionslose Kanallänge ξ ist die Entfernung vom Kanalanschluss bezogen auf die gesamte Kanallänge, die Verteilungszahl σ_a stellt den örtlich abgesaugten Teilvolumenstrom bezogen auf den mittleren Volumenstrom dar. Der Parameter A_a stellt das Verhältnis der gesamten gleichwertigen Eintrittsfläche in den Abluftkanal bezogen auf den Kanalquerschnitt am Ende dar. Die gleichwertige Fläche ist das Produkt aus der freien Fläche und dem Einschnürungsfaktor, s. auch Bd. 1, J2.3.5. $A_a = 1$ bedeutet, dass die Summe aller gleichwertigen Eintrittsöffnungen in den Kanal genau so groß ist wie der Kanalquerschnitt am Ende. Die durchgezogenen Linien zeigen die drei Fälle $A_a = 1; 0,5; 0,25$ für senkrechten Eintritt der abgesaugten Luft. Mit abnehmendem Eintrittsquerschnitt wird die Verteilung der abgesaugten Luft gleichmäßiger. Bei einem Flächenverhältnis von $A_a = 0,25$ stellt sich eine fast gleichmäßige Verteilung ein. Der Nachteil bei dieser Art der Vergleichmäßigung ist, dass der Druckverlust an der

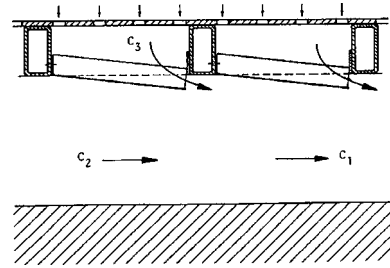
Bild F2-41 Verteilung des Volumenstromes längs eines Abluftkanals



Eintrittsöffnung um den Faktor $(1/0,25)^2 = 16$ gegenüber $A = 1$ steigt. Bild F2-41 zeigt auch eine andere Methode der Vergleichmäßigung auf: Einblasen der Luft unter einem möglichst flachen Winkel. Die gestrichelten Kurven geben die Verteilungen für einen Eintrittswinkel von $\alpha = 45^\circ$ für ein Flächenverhältnis von $A_a = 1,0$ und $0,5$ wieder.

Zurück zur Raumströmung auf Bild F2-40. Der Grund für die Strömungsablenkung ist die ungleichmäßige Absaugung des Abluftvolumenstromes am Boden. Für den Fall, dass die gesamte Einströmfläche des Doppelbodens gleich dem Querschnitt des Absaugkanals ist ($A_a = 1$) – das ist ungefähr der im Beispiel gezeigte Fall – werden am Kanalende ungefähr 160% des mittleren Volumenstromes abgesaugt, wie auf Bild F2-41 zu erkennen. Da die Zuströmung von der Decke des Raumes gleichmäßig verteilt erfolgt, wird die Strömung im Raum auf der von der Absaugung entfernten Seite verzögert. Die einzelnen Stromröhren werden dort bei der Raumdurchströmung von oben nach unten breiter. Weil sich die Stromröhrenbreiten addieren, wird die Ablenkung der Stromlinien von links nach rechts immer größer. Erst etwa ab der Raummitte wird der abgesaugte Volumenstrom größer als der Mittelwert, und die Stromröhren verengen sich wieder, so dass am Raumende der Gesamtvolumenstrom ausgeglichen ist und die Strömung wieder wandparallel erfolgt [F-39]. Eine Vergleichmäßigung der Absaugung lässt sich durch Reduzierung des Flächenverhältnisses A_a erreichen, also entweder durch Verkleinern des Überströmquerschnittes der Luft in den Absaugkanal oder durch Vergrößern der Absaugkanalhöhe. Das verkleinerte Flächenverhältnis führt zu großem Druckanstieg und damit zu erhöhten Be-

Bild F2-42 Doppelboden mit „Treibdüsen“



triebskosten, die größere Kanalhöhe erhöht die Baukosten. Hier wird eine bessere Lösung gezeigt, ursprünglich von Haerter für Tunnelentlüftung vorgeschlagen [F-40], die sich durch sogenannte „Treibdüsen“ erreichen lässt.

Die Luft strömt unter einem möglichst flachen Winkel in den Kanal ein. Bild F2-42 zeigt, wie solche Treibdüsen aussehen können. Die Treibdüsen führen durch ihren Eintrittsimpuls der Strömung im Absaugkanal ungefähr so viel Energie zu, wie durch Reibung im Kanal verloren geht. Dadurch bleibt der statische Unterdruck und damit auch die Einströmgeschwindigkeit im Kanal ungefähr konstant. Der Strömungswiderstand aus der Kombination der Öffnung im Doppelboden und der Düse einzeln betrachtet ist größer als der einer einfachen Öffnung. Trotzdem ist der Gesamtwiderstand des Kanals mit Düsen kleiner als der ohne, weil die Zuströmung gleichmäßig verteilt über die Kanallänge erfolgt. Auf diese Weise lässt sich bei Abluftleitungen auch einfach eine gleichmäßige Verteilung der Abluftvolumenströme erreichen (s. dazu negative Verlustbeiwerte Bd. 1, Bild J2-29b und G7.3.1).

Dies ist ein interessantes und seltenes Beispiel, bei dem durch erhöhten Einzelwiderstand der Gesamtwiderstand einer Anlage kleiner wird!

Bild F2-43 zeigt das Strömungsbild bei gleichen Raumabmessungen und gleichem Druckverlust des Doppelbodens wie bei dem in Bild F2-40 dargestellten

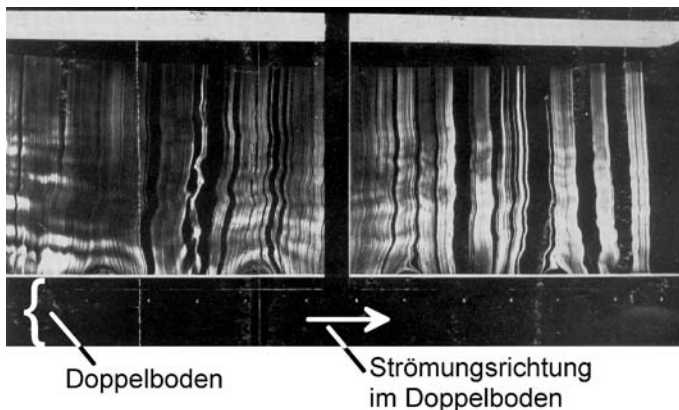


Bild F2-43 Verdrängungsströmung in einem Reinraum mit Treibdüsen im Doppelboden zur Vergleichmäßigung der Absaugung mit gleichem Druckverlust wie auf Bild F2-40

Fall. Die größte Winkelabweichung beträgt hier in Raummitte etwa 7° . Um eine ähnlich kleine Abweichung nur durch Drosselung zu erreichen, müsste etwa die dreifache Druckdifferenz am Doppelboden aufgebracht werden.

Die bisherigen Ausführungen gelten im wesentlichen für Verdrängungsströmungen, die den gesamten Raum vollflächig ausfüllen. Das ist nicht immer erforderlich. Im Folgenden werden Lösungen mit nur teilweise beaufschlagten Reinraumdecken behandelt.

F2.2.3.4

Partiell beaufschlagte Reinraumdecken

Aus wirtschaftlichen Gründen werden Reinnräume nicht immer mit einer vollflächig beaufschlagten Reinraumdecke hergestellt. Bekannte Lösungen dieser Art stellen die „Reinen Bänke“ dar und Insellösungen, wie sie bei Abfüllstationen in der Lebensmittelindustrie oder als Zuluftdecken in Operationsräumen verwendet werden. Streng genommen ergeben partiell beaufschlagte Reinraumdecken nur in ihrem Kern eine Verdrängungsströmung, denn sie induzieren immer Luft und Partikel aus ihrer Umgebung. Durch entsprechende Konstruktion muss versucht werden, diese Ansaugung so gering wie möglich zu halten.

Reine Bänke

Als „Reine Bänke“ werden Verdrängungsluftdurchlässe bezeichnet, die sich längs einer Raumwand in niedriger Höhe über Arbeitstischen oder dem „Reinraum-equipment“ erstrecken. Unter dem Durchlass soll in dem „Reinfeld“ eine sehr hohe Reinraumklasse verwirklicht werden, die im umgebenden Raum, dem Graubereich, nicht erforderlich ist. Die Austrittsgeschwindigkeit richtet sich nach den Wärmequellen unter dem Durchlass. Sie liegt zwischen 0,15 und 0,5 m/s.

Damit möglichst keine verunreinigte Luft aus dem Graubereich in das Reinfeld gelangt, kommt es hier besonders darauf an, dass keine Nachlaufgebiete durch Rahmen oder andere Strömungshindernisse unter der Ebene des Lamina-risators gebildet werden, die Verbindung zum Graubereich haben. Abdeckungen aus üblichen Lochblechen mit Lochdurchmessern über 3 mm oder aus Gittern sind aus diesem Grunde ungeeignet. Die Bilder F2-9, F2-10 veranschaulichen die Unterschiede.

Operationsraumdecken

In Operationsräumen mit „sehr hohen Anforderungen“ nach [F-45] an die Keimarmut der Luft werden häufig auch partielle Verdrängungsströmungen verwendet. Sie werden erzeugt von Operationsraumdecken, die sich über dem OP-Tisch befinden. Das sind Verdrängungsluftdurchlässe mit einer Breite von 1,2 bis 3,2 m und einer Länge von 2 bis 3,2 m. Die Austrittsgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,15 und 0,25 m/s, also niedriger als bei der Reinraumanwendung, die Temperaturdifferenzen zwischen Ab- und Zuluft je nach Kühllast und Luftstrom bei ungefähr 0,3 bis 3 K. Die Differenz von 3 K ergibt sich z. B. bei einer Kühllast von 3 kW im Raum und einem Luftvolumenstrom von $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ (vgl. F2, Beispiel 4).

Die Anforderungen an die Keim- bzw. Partikelfreiheit sind bei Operationsräumen für viele Disziplinen deutlich geringer als in Reinräumen mit sehr hohen Anforderungen. Sie variieren aber in einer sehr großen Bandbreite, vor allem im internationalen Vergleich. Seit 1998 werden wieder Überlegungen angestellt, ob die Anforderungen nicht erhöht werden sollten. Wegen der Zunahme antibiotikaresistenter Keime kann das erforderlich werden. So schlägt Seipp [F-41] vor, im Schutzbereich eine Keimreduktion gegenüber der Umgebung um den Faktor 10^8 vorzuschreiben, was mit Laminar-OP-Decken durchaus realisierbar ist.

Zu den Ländern mit relativ hohen Anforderungen zählt die Schweiz. In der dort geltenden Richtlinie [F-42] werden Werte für die Reduktion der Partikelkonzentration im Arbeitsbereich von Operationsräumen mit hohen Anforderungen angegeben. Inzwischen gibt es eine neue Richtlinie [F-43], die vom VDI als Richtlinie VDI 2167 [F-44] weitgehend übernommen wurde. Beide werden zur Zeit zu einer neuen Ausgabe von DIN 1946/4 zusammengeführt. Sie laufen darauf hinaus, dass eine Keimreduktion von 10^{-3} bis 10^{-5} zwischen der Grauzone außen und dem Schutzbereich innen gefordert werden.

In der zur Zeit (Juli 2007) noch gültigen deutschen DIN 1946/4 [F-45] wurden die Anforderungen nicht über Keimkonzentrationen definiert, sondern über Kontaminationsgrade (s. Abschn. B3.3.3). Die Norm geht von zwei Anforderungsstufen bei Mischströmung (Kontaminationsgrad 1,0) aus. Die „hohe Anforderung an die Keimarmut“ wird dabei mit einem Volumenstrom von $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ und die „sehr hohe“ Forderung mit $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht. Wenn die Kontaminationsgrade niedriger als 1 sind, darf der Volumenstrom so weit reduziert werden, dass das Produkt aus Volumenstrom und Kontaminationsgrad konstant bleibt. Die sich so ergebenden Grenzkurven sind in Bild F2-45 als $\epsilon_s = 1$ und $\epsilon_s = 2/3$ eingezeichnet. In DIN 4799 [F-81] wird ein Prüfverfahren vorgegeben, wie man den Kontaminationsgrad bestimmen kann, wenn eine Verdrängungsströmung verwendet wird. Die DIN 1946/4 [F-45] wie schon erwähnt wird zur Zeit überarbeitet. Sie nimmt Abschied vom linearen Kontaminationsgrad und geht im Prinzip davon aus, dass der Kontaminationsgrad so niedrig sein soll, dass man besser den negativen Logarithmus des Kontaminationsgrades zur Kennzeichnung verwendet. Hinter den Testmethoden steht der Wunsch, den Wert 3 bis 5 zu erreichen, also bis 10 000-fach niedrigere Werte als bisher.

Die möglichen Luftdurchlässe, mit denen man das früher vorgeschriebene Ziel erreichen kann, sind auf Bild F2-44 im Prinzip dargestellt [F-47]. Sie erzeugen entweder turbulente oder laminare Verdrängungsströmungen. Die linke Skizze steht für turbulente Luftdurchlässe (s. dazu F2.1.2.2), die mit einem Mischluftdurchlass eine Verdrängungsströmung erzeugen.

Es kann sich dabei im einfachsten Fall um eine Lochdecke, aber auch um eine Düsen- oder Filterdecke handeln. Bei Filterdecken ohne Abdeckung unter dem Filter ist die Strömung nach Austritt aus dem Filter nicht mehr laminar, obwohl die Durchströmung des Filtermaterials selbst laminar verläuft. Die Filterfalten stören die Strömung. Diese Mischluftdecken saugen durch Induktion viel Umgebungsluft an. Dadurch erhöht sich die Temperatur der Strömung dicht hinter der Durchlassebene, aber auch der Kontaminationsgrad.

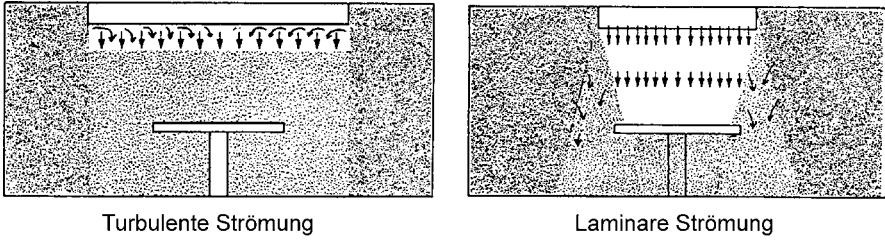


Bild F2-44 Mögliche OP-Decken für Verdrängungsströmung

Die durch Personen im Raum verunreinigte Umgebungsluft kontaminiert dabei die Zuluft. Man erreicht am Operationstisch im besten Falle Kontaminationsgrade um 0,5 (Bild F2-45, Decke 1). Das ist kaum besser als eine Mischströmung im ganzen Raum [F-49] ohne spezielle OP-Decke, aber durchaus noch zu verbessern. Eine laminare Verdrängungsströmung (Decken 2 bis 8 in Bild F2-45) kann niedrigere Kontaminationsgrade erreichen. Auf Bild F2-45 sind gemessene Kontaminationsgrade für verschiedene Deckensysteme wiedergegeben [F-49]. Die Messwerte bestätigen die großen Unterschiede. Man erkennt bei den verschiedenen Deckenarten auch den starken Einfluss der Kühllast. Das ist darauf zurückzuführen, dass die partiell beaufschlagte Verdrängungsströmung im Prinzip einen anisothermen Freistrahldarstellt. Mit steigender Untertemperatur wird die Luftbewegung zunehmend beschleunigt und der Strahlquerschnitt dadurch eingeschnürt. Allerdings ist die Einschnürung geringer als theoretisch bei einem Freistrahld zu erwarten, denn durch den Raum, noch mehr aber durch den OP-Tisch, entsteht ein Stau, der die Strömung wieder verzögert.

Aus den Messwerten, wie sie auf Bild F2-45 dargestellt sind, ließ sich entsprechend DIN 4799 der für die Decke erforderliche Mindestluftvolumenstrom ermitteln. ϵ_s stellt einen bezogenen Volumenstrom dar. Der Schnittpunkt der

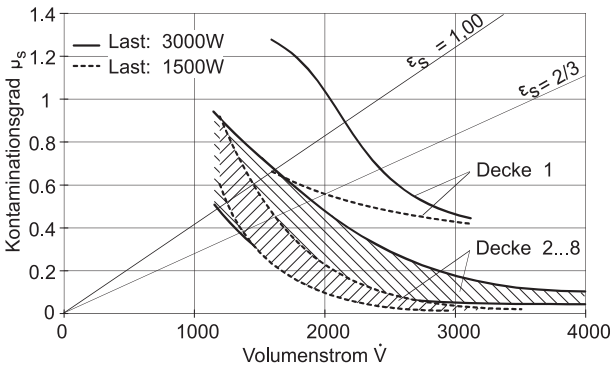


Bild F2-45 Gemessene Kontaminationsgrade unter OP-Decken (Beispiele). Der Kontaminationsgrad μ_s stellt einen lokalen Stoffbelastungsgrad dar [F-49]

Messkurve mit $\varepsilon_s = 1,0$ ergibt den Mindestvolumenstrom für Anforderung I, der mit $\varepsilon_s = 2/3$ den für Anforderung II.

OP-Decken müssen immer mit geringen Untertemperaturen betrieben werden, denn die Luft würde den OP-Tisch sonst nicht erreichen. OPs können deshalb mit der Luft aus OP-Decken nicht beheizt werden. Wenn zu irgendeiner Zeit Wärmebedarf besteht, muss eine separate Heizung vorgesehen werden.

Es gibt noch einen weiteren erwähnenswerten Punkt, auf den im Zusammenhang mit OP-Decken hinzuweisen ist: Der Kontaminationsgrad der Luft im Schutzbereich allein gibt noch keine Auskunft, wie viele Keime beim Patienten sedimentieren. Wie schon erwähnt, ist in einer turbulenten Mischströmung die Sedimentation von Keimen größer als in einer laminaren. Koller [F-50] hat bei Vergleichsmessungen festgestellt, dass die Sedimentation in der turbulenten Strömung um eine Zehnerpotenz größer als in der laminaren ist.

Scheer [F-36] hat experimentell die Sedimentation von Mikroorganismen (*micrococcus luteus*) in einer Staupunktströmung über einer horizontalen Fläche bei unterschiedlichen Turbulenzgraden untersucht. Die Sedimentation nimmt unabhängig von der Geschwindigkeit proportional zum Turbulenzgrad zu und erreicht bei einem Turbulenzgrad von 20% ungefähr den doppelten Wert der laminaren Strömung.

Bild F2-46 zeigt die mit Rauch sichtbar gemachte laminare Strömung über einem OP-Tisch.

Mit laminarer Strömung unter OP-Decken lassen sich sehr große Reduzierungen der Kontaminationsgrade erreichen, wie Messungen von Seipp zeigen. Kontaminationsgrad-Reduzierungen von 10^6 bis 10^8 wurden lokal gemessen und

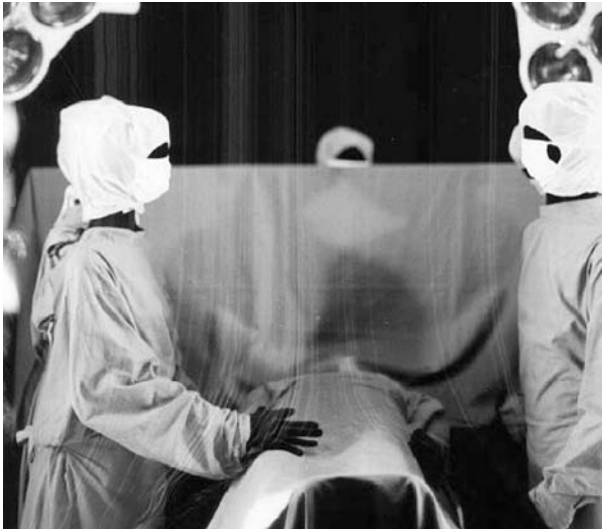


Bild F2-46 Strömung von oben nach unten unter einer laminaren OP-Decke, durch Rauch von einem beheizten Draht oberhalb der Bildebene sichtbar gemacht

lassen sich bei entsprechender Vergrößerung des Deckenfeldes im gesamten Schutzbereich erreichen. Die laminare Verdrängungsströmung ist außerdem stabiler gegen Störungen, die durch geöffnete Türen oder Personenbewegungen entstehen [F-51].

Der Trend geht zur Zeit, wie die neuen schweizerischen und deutschen Richtlinien zeigen, zu größeren Decken mit niedrigeren Kontaminationsgraden, was die gesamte Organisation des OP-Bereiches vereinfacht. Die endgültige Abstimmung der Richtlinien ist im Augenblick noch nicht erfolgt, so dass darüber noch keine Details angegeben werden können. Eine guten Überblick über die Fragen zur OP-Belüftung gibt eine Literaturübersicht von Kapstein [F-82].

F3

Quellluftströmung

F3.1

Beurteilungsmethoden

Zur Beurteilung besonders der Quellluftströmung (s. auch B4.4.2) werden nicht nur Temperatur und Luftgeschwindigkeit, sondern auch die Konzentration von Verunreinigungen in der Luft herangezogen. Die örtliche Konzentration wird als Raumbelastungsgrad oder nur als Belastungsgrad μ dargestellt.

In Abschn. B4.4.5 wird der Raumbelastungsgrad μ behandelt, der in Abschn. F häufig auftritt unter den Bezeichnungen:

- Kontaminationsgrad (bei OP-Decken),
- Stoffbelastungsgrad,
- Belastungsgrad.

$$\mu = \frac{c_{AZ}}{c_{AB}} \quad (\text{F3-01})$$

Indizes AZ – Anforderungszone

AB – Abluft

Als Lüftungseffektivität wird der Kehrwert des Belastungsgrades bezeichnet.

$$\varepsilon = \frac{1}{\mu} \quad (\text{F3-02})$$

Es sind weitere Bewertungsgrößen für die Wirksamkeit der Raumlüftung bekannt.



<http://www.springer.com/978-3-540-57011-0>

Raumklimatechnik

Band 2: Raumluf- und Raumkühltechnik

(Eds.)H. Rietschel; K. Fitzner

2008, XXX, 770 S. 545 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-540-57011-0