

Partikelabscheidung in Probennahmesystemen

Dohm Pharmaceutical Engineering, 2019

Dr. Stefan Schenderlein

April 2019; 1. Auflage

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung des Reports außerhalb der Grenzen der Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Nachdrucke, Mikroverfilmungen oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung und Bearbeitung in Datenverarbeitungsanlagen.

Ein Warenzeichen kann urheberrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Warenzeichen fehlt.

1 Einleitung

Die Bestimmung der Reinheitsklasse erfordert die Ermittlung der Partikelkonzentration. Mit speziell geformten Sonden wird Luft aus dem Reinraum angesaugt und mit Hilfe von Schläuchen zum Detektor eines Partikelzählers gefördert. Die Messunsicherheit wird von Faktoren wie der Detektionsgrenze des Partikelzählers, der Differenzierung der Partikel in Größenklassen, der Kalibriergenauigkeit bezüglich dieser Größenklassen, dem Grundrauschen bei der Signalverarbeitung durch die Einstrahlung elektromagnetischer Wellen, den Strömungsverhältnissen bei der Probenahme und dem Transport des Aerosols zum Sensor beeinflusst [2]. Die ISO 21501-4:2007 [11] regelt daher die Anforderungen an Partikelzähler während ISO 14644-1:2015 [1] die Vorgehensweise bei der Klassifizierung der Luftreinheit festlegt.

Bei der Ansaugung und dem Transport der Aerosolprobe treten Abscheideeffekte auf, wodurch die gemessene Partikelkonzentration niedriger als die tatsächliche ist. Der Federal Standard 209E (Anhang B40.2) [6] enthielt bereits 1992 Hinweise zur isokinetischen Probenahme und der Verweildauer in den Probenahmeschläuchen (<10 s). Seit der letzten Aktualisierung der Norm ISO 14644-1:2015 [1] findet man jetzt im Anhang C.4.1.2 eine konkrete Längenangabe:

For sampling of particles larger than and equal to 1 μm , the transit tube length should not exceed the manufacturer's recommended length and diameter, and will typically be no longer than 1 m in length.

Die Überwachung zum Nachweis der Reinraumleistung bezüglich Luftreinheit anhand der

Partikelkonzentration wird durch ISO 14644-2:2015 [10] geregelt. Im Anhang A.4 wird auf die Effektivität der Probenahme hingewiesen u.a. findet sich folgende Anmerkung:

The use of long sample transport tubes as required by multiplexing manifold systems is inappropriate for monitoring particle sizes $\geq 5 \mu\text{m}$.

Zur festen Installation von Monitoringsystemen werden Strecken von mehreren Metern überbrückt sowie vielfach Bögen und Kupplungen eingesetzt. Weiter findet man verschiedene Schlauch- und Rohrdurchmesser zwischen 1/8" bis 3/4" in Gebrauch. Die genannten Parameter haben einen Einfluss auf den Transport der Probe zum Partikelzähler.

Mit diesem Report soll der Probenahmefehler bei der Reinheitsklassenbestimmung mit mobilen und fest installierten Partikelzählern quantitativ abgeschätzt werden. Dabei wird auf Berechnungsmodelle aus der Literatur zurückgegriffen. Es werden zuerst die Abscheideeffekte einzeln untersucht und danach kombiniert. Um einen direkten Vergleich zur Definition der Reinheitsklassen nach ISO 14644-1:2015 [1] vorzunehmen, wird die kumulative Darstellung der Verteilungsfunktion eingeführt. Danach wird eine normierten Darstellung des kumulativen Durchdringungsgrades vorgestellt und der Probenahmefehler für einige Beispiele berechnet.

2 Abscheideeffekte

2.1 Durchdringungsgrad

Der Übersichtsartikel von Brockmann [4] nennt mehrere Mechanismen für die Abscheidung von Partikeln:

1. Kraftfelder
 - a) Gravitation
 - b) Trägheit/Beschleunigung
 - i. im geraden Rohr
 - ii. in Bögen
 - iii. an Querschnittsveränderungen
 - c) Elektrische Felder
2. Konzentrationsunterschiede
 - a) Diffusion durch Brownsche Molekularbewegung
 - b) Thermophorese
 - c) Diffusophorese

Davon werden hier folgende Abscheideeffekte berücksichtigt:

1. Trägheit im geraden Rohr
2. Trägheit in Bögen
3. Trägheit Querschnittsveränderungen
4. Diffusion durch Brownsche Molekularbewegung

Auf eine vollständige Herleitung der Berechnungsgleichungen wird hier verzichtet. Diese können folgenden Veröffentlichungen entnommen werden: Baron und Willeke [3], Brockmann [4], Friedlander [7], Hinds [9], Liu und Agarwal [12], Pui u. a. [13], Vauck und Müller [14], Willeke und Baron [15], Ye und Pui [16]. Bei hohen Abscheidegraden wird oft der Durchdringungsgrad \mathcal{P} (engl. *pass through, penetration*) verwendet. Dieser stellt anschaulich dar, welche Partikel einen Abscheider passieren [5]. In der deutschen Fachliteratur wird

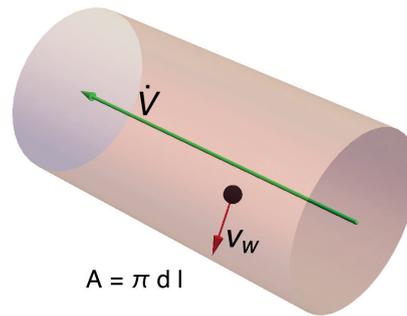


Abb. 1: Transportgeschwindigkeit zur Wand

der Begriff auch im Zusammenhang mit der Probenahme verwendet [8]. Abscheide- und Durchdringungsgrad sind wie folgt miteinander verknüpft.

$$\mathcal{P} = 1 - \mathcal{E} \quad (1)$$

Der dimensionslose Abscheidegrad \mathcal{E} (engl. *effectiv removal, efficiency*) wurde von den zitierten Autoren entweder mit Hilfe einer Transportgeschwindigkeit v_{Wand} in Richtung der Schlauchwand mit der Fläche $A = \pi dl$ aus dem Gasvolumenstrom \dot{V} hergeleitet (Abb. 1) oder empirisch aus experimentellen Daten ermittelt.

2.2 Diffusion

Im Bereich sehr kleiner Partikel, muss die Kontinuität des Gases als Annahme verworfen werden. Die Gasmoleküle stoßen ständig aufeinander. Sie können sich nur für eine bestimmte Zeit ungestört entlang der freien Weglänge bewegen. Die Gasmoleküle stoßen wiederum mit den dispergierten Partikeln zufällig zusammen. Die resultierende Partikelbewegung entspricht der Brownschen Bewegung. Die relative Geschwindigkeit zwischen dem Gas und der Partikeloberfläche ist von Null verschieden, so dass in die Berechnung des Diffusionskoeffizienten die so genannte Cunningham-Korrektur eingeht.

Der Stofftransport wird mit Hilfe einer dimensionslosen Kennzahl ausgedrückt, der Sherwood-Zahl Sh , welche durch die Strömungsverhältnisse und Gaseigenschaften geprägt ist. Die Sherwoodzahl wird berechnet als Funktion der Reynolds- und der Schmidtzahl.

$$Sh = f(Re, Sc) \quad (2)$$

Mit Hilfe des Diffusionskoeffizienten D , des Innendurchmessers d_i und der Sherwoodzahl Sh wird die Transportgeschwindigkeit v_{diff} ermittelt.

$$v_{diff} = \frac{Sh D}{d_i} \quad (3)$$

Damit erhält man den Durchdringungsgrad in einem Rohr der Länge l und der Geschwindigkeit der Rohrströmung u wie folgt:

$$\mathcal{P}_{diff} = Exp \left[-4 \frac{l}{d_i} \frac{v_{diff}}{u} \right] \quad (4)$$

Da praktisch alle Partikelzähler mit einem konstanten Volumenstrom von 28,3 l/min arbeiten, ist die Strömungsgeschwindigkeit u

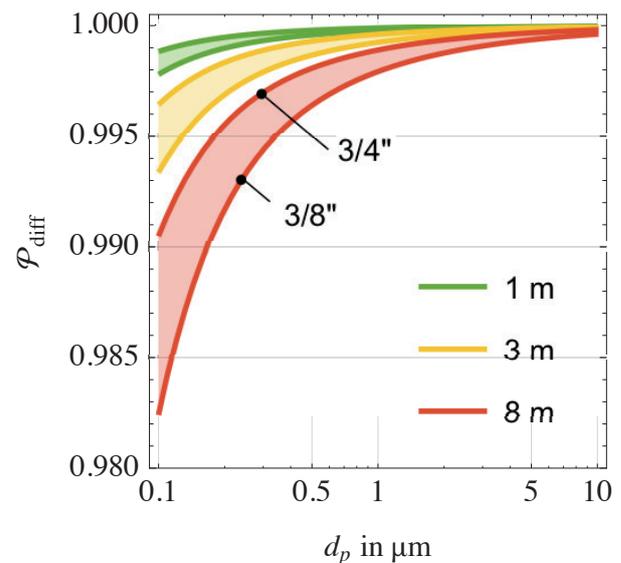


Abb. 2: Durchdringungsgrad bei Diffusion

nur vom gewählten Schlauchdurchmesser abhängig und die folgenden Überlegungen zur Abscheidung im Schlauch können auf die meisten kommerziell erhältlichen Partikelzähler angewendet werden. Die ISO 14644-1:2015 [1] empfiehlt eine Schlauchlänge von kleiner gleich 1 m. Als Beispiel für einen Partikelzähler wurde das Gerät Lasair III (PMS) ausgewählt. Im Lieferumfang befindet sich ein Schlauch mit einem Durchmesser von 3/8" und einer Länge von 3 m. Gemäß Bedienungsanleitung ist die Verwendung von Schläuchen bis zu 8 Metern Länge mit Innendurchmessern von 3/8", 1/2" und 3/4" zulässig. Die Abb. 2 zeigt den berechneten Diffusions-Durchdringungsgrad für die drei genannten Schlauchlängen jeweils für den kleinsten und größten zulässigen Schlauchdurchmesser.

Erwartungsgemäß werden umso mehr Partikel abgeschieden, desto länger der Schlauch ist. Ebenso nimmt die Abscheidung mit steigendem Innendurchmesser ab. Die Kombination des kleinsten Durchmessers mit der größten Länge bewirkt einen Probenahmefehler bei $0,5 \mu\text{m}$ von höchstens 0,4 %. Nach ISO 21501-

4:2007 [11] sind $\pm 5\%$ als Messunsicherheit bei der Durchflussrate (Volumenstrom) von Partikelzählern zulässig, d.h. es erreichen 5 % mehr oder weniger Partikel den Sensor und verfälschen das Ergebnis entsprechend. Somit kann man den Probenahmefehler durch Diffusion als vergleichsweise unbedeutend einstufen.

2.3 Turbulente Strömung in geraden Rohren

In einer turbulenten Strömung stoßen die Partikel häufiger gegeneinander und werden in Richtung der weniger turbulenten Strömung getrieben. Partikel mit einer hohen Trägheit können die laminare Grenzschicht bis hin zur Wand durchdringen und werden dort abgeschieden. Die Transportgeschwindigkeit zur Wand v_{tube} wird mit Hilfe der Reynolds-Zahl Re , der Stokes-Zahl Stk und der Geschwindigkeit u des Gases im Schlauch wie folgt formuliert:

$$v_{tube} = 1.86113 \cdot 10^{-7} u Re^{11/8} Stk^2 \quad (5)$$

Der Durchdringungsgrad infolge der Abscheidung durch turbulente Bewegung in geraden Schläuchen kann damit wie folgt berechnet werden:

$$\mathcal{P}_{tube} = Exp \left[-4 \frac{l}{d_i} \frac{v_{tube}}{u} \right] \quad (6)$$

Abb. 3 zeigt den berechneten Durchdringungsgrad für verschiedene Schlauchdurchmesser und Schlauchlängen. Bei einem Durchmesser von 3/8" ist eine Abscheidung für Partikel der Größe 5,0 μm von bis zu 20% zu beobachten, d.h. dieser Abscheideeffekt darf nicht vernachlässigt werden.

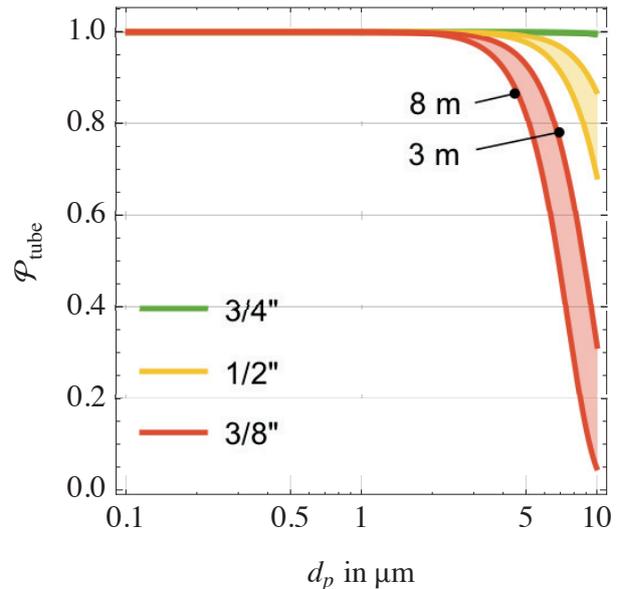


Abb. 3: Durchdringungsgrad bei turbulenter Strömung

2.4 Rohrbögen

In Rohrbögen ist die Abscheidung durch Trägheit abhängig von der Geometrie des Bogens (Radius und Winkel) sowie den Wechselwirkungen der Partikel mit dem dispergierenden Gas und des Gases mit der Rohrwand. Anhand experimenteller Daten wurde von Pui u. a. [13] eine Korrelation ermittelt, in welcher der Durchdringungsgrad von der Stokes-Zahl Stk und dem Biegewinkel ϕ abhängt, jedoch nicht von der Reynolds-Zahl und nicht vom Biegeradius. Die Gültigkeit beschränkt sich auf Anwendungsfälle, in denen der Biegeradius mindestens um Faktor vier größer als der Innendurchmesser des Rohres ist ($r_B/d_i > 4$). Von den o.g. Autoren wird die empirische Gleichung für den Durchdringungsgrad von Bögen wie folgt angegeben:

$$\mathcal{P}_{bend} = Exp[-2.823 Stk \phi] \quad (7)$$

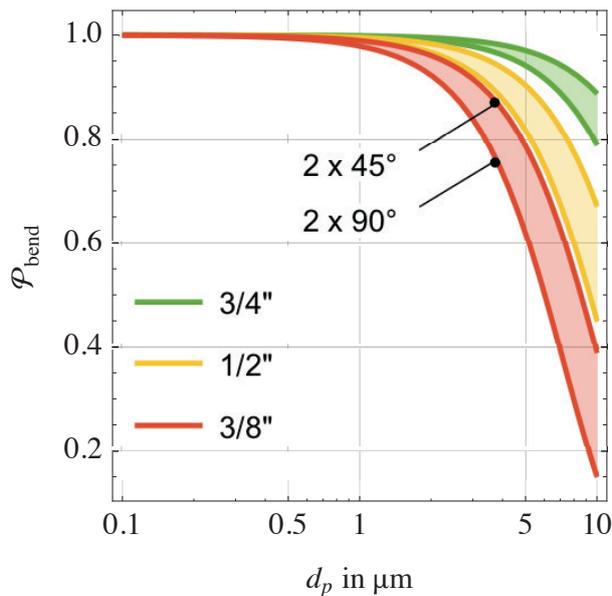


Abb. 4: Durchdringungsgrad als Folge von Abscheidung in Bögen

Abb. 4 zeigt den Durchdringungsgrad für verschiedene Schlauchdurchmesser und zwei Bögen. Die Grenzen der Bereiche werden durch die Krümmung der Bögen (45° oder 90°) markiert. Selbst bei großen Schlauchdurchmessern (grün dargestellt), beträgt die Abscheidung für die Partikelgröße $5,0 \mu\text{m}$ noch ca. 5 %. Der Durchdringungsgrad sinkt um bis zu 40 % für eine Schlauchlänge von 8 m und einen Durchmesser von $3/8''$ (rot dargestellt). Der Abscheideeffekt durch Bögen hat demnach einen sehr großen Einfluss auf die Probenahme.

2.5 Querschnittsveränderungen

Änderungen des Querschnitts bewirken kurzfristig eine Änderung der Strömungsrichtung. Es kommt zu einer Verwirbelung des Gasstroms, d.h. die Partikel können dem Strom nur begrenzt folgen und werden teilweise abgeschieden. Der umgekehrte Fall der Aufweitung des Durchmessers führt ebenso wie die Verengung zu einem Druckverlust, jedoch kön-

nen sich die Partikel nun freier bewegen und die Abscheidung ist vernachlässigbar.

Brockmann [4] gibt eine empirisch ermittelte Korrelation für die Abscheidung an Querschnittsänderungen an, in welche die Durchmesser vor (d_1) und nach (d_2) der Verengung eingehen. Die dimensionslose Größen c_x und w wurden von dem Autor aus experimentellen Daten abgeleitet.

$$\mathcal{P}_{contract} = 1 - \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{c_x}{0.413}\right)^w \quad (8)$$

In Abb. 5 ist der Durchdringungsgrad für verschiedene Kombinationen von Querschnitten dargestellt. Bei einer Änderung ausgehend von einem großen Durchmesser ($3/4''$) beginnt eine deutliche Abscheidung erst ab ca. $15 \mu\text{m}$. Alle Kurven zeigen bei etwa $20 \mu\text{m}$ eine Abscheidung von mind. 20 %. Bei ca. $50 \mu\text{m}$ bewirken Querschnittsänderungen eine Verringerung des Durchdringungsgrads von 50 % bis 80 % mit steigendem Kontraktionsverhältnis.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn der Ausgangsdurchmesser auf $1/2''$ verringert wird. Allerdings beträgt die Abscheidung bei $10 \mu\text{m}$ bereits 20 %.

Startet man mit dem kleinsten Durchmesser von $3/8''$ und geht auf $1/4''$, so beginnt eine merkliche die Abscheidung bei ca. $4 \mu\text{m}$ und beträgt bei $10 \mu\text{m}$ schon 40%. Dieser Abscheideeffekt sollte bei einer Verringerung des Durchmessers auf $1/4''$ berücksichtigt werden.

3 Kombination von Abscheideeffekten

Die Durchdringungsgrade in einem Schlauchabschnitt können als Wahrscheinlichkeiten aufgefasst werden, dass ein Partikel einer be-

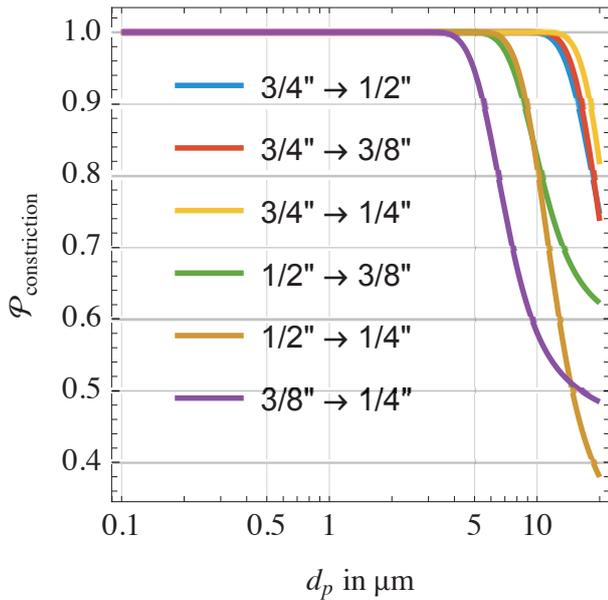


Abb. 5: Verringerter Durchdringungsgrad verursacht durch Querschnittsverengungen

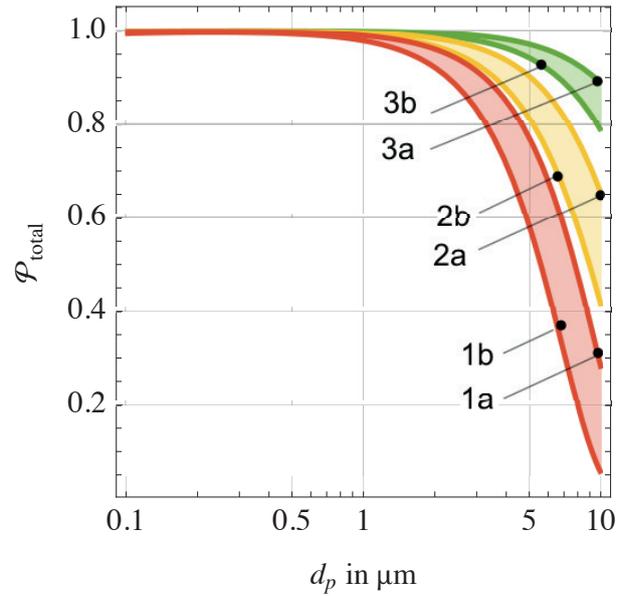


Abb. 6: Gesamtdurchdringungsgrad für die Parameterkombinationen nach Tab 1

stimmten Größe das Rohr passieren kann. Im Sinne einer UND-Verknüpfung werden diese Wahrscheinlichkeiten miteinander multipliziert. Die gesamte Durchdringung in einem Schlauchabschnitt mit dem Index j ergibt sich für i Abscheideeffekte wie folgt:

$$\mathcal{P}_{j=const}(d_p) = \prod_{i=1} \mathcal{P}_{i,j}(d_p) \quad (9)$$

Betrachtet man nur einen bestimmten Abscheideeffekt, so ergibt sich die Wahrscheinlichkeit einer Passage durch alle j Schlauchabschnitte ebenfalls durch Multiplikation.

$$\mathcal{P}_{i=const}(d_p) = \prod_{j=1} \mathcal{P}_{i,j}(d_p) \quad (10)$$

Die Berücksichtigung aller i Abscheideeffekte UND aller j Schlauchabschnitte des Systems führt zum Gesamtdurchdringungsgrad \mathcal{P}_{total} .

$$\mathcal{P}_{total}(d_p) = \prod_{i=1} \prod_{j=1} \mathcal{P}_{i,j}(d_p) \quad (11)$$

Die Tab. 1 listet Kombinationen der Verlegung für verschiedene Schlauchdurchmesser bei Verlegung von zwei Bögen, verschiedenen Schlauchlängen und einer Querschnittsverengung auf. Abb. 6 zeigt die zugehörigen Ergebnisse. Die Grenzen der Bereiche werden durch die Krümmung des Bogens von 45° bei einer Schlauchlänge von 1 m und der Krümmung von 90° bei einer Länge von 3 m und einer Verengung auf $3/8''$ markiert. Wie erwartet, führt Parameterkombination 1b zum schlechtesten und 3a zum besten Gesamtdurchdringungsgrad.

Tab. 1: Kombination von Abscheideparametern

Var.	d_i	Länge	Bögen	Verengung
1 a	3/8"	1 m	2x45°	keine
1 b	3/8"	3m	2x90°	keine
2 a	1/2"	1 m	2x45°	keine
2 b	1/2"	3 m	2x90°	auf 3/8"
3 a	3/4"	1 m	2x45°	keine
3 b	3/4"	3 m	2x90°	auf 3/8"

4 Kumulative Betrachtung

Eine Reinheitsklasse ist so definiert, dass die Anzahl aller Partikel größer oder gleich einer definierten Partikelgröße nicht überschritten werden darf. Als einfache Näherung dieser kumulativen Häufigkeitsverteilung hat sich eine Potenzverteilung durchgesetzt. Die ISO 14644-1:2015 [1] gibt diese mit der Gleichung 12 an. Darin bedeuten N die ISO-Klasse und d_p die Partikelgröße in μm .

$$C_n(\geq d_p) = 10^N \left(\frac{0,1\mu\text{m}}{d_p} \right)^{2,08} \quad (12)$$

Es ist zu beachten, dass die Verteilungsfunktion eines Aerosols in der Statistik so definiert ist, dass sie für alle Partikel kleiner einer bestimmten Partikelgröße gilt. Beide Definitionen sind gemäß Gleichung 13 miteinander verknüpft.

$$C_n(< d_p) = 1 - C_n(\geq d_p) \quad (13)$$

Somit erhält man die Verteilungsfunktion einer Reinheitsklasse aus der Umformung von Gleichung 12.

$$C_n(< d_p) = 1 - 10^N \left(\frac{0,1\mu\text{m}}{d_p} \right)^{2,08} \quad (14)$$

Der Durchdringungsgrad wurde hier bisher für Partikel einer bestimmten Partikelgröße angegeben. Kennt man die Häufigkeitsdichte der Partikel in dem zu prüfenden Aerosol, lässt sich die zahlenmäßige Verringerung der Partikel aus der Multiplikation der relativen Häufigkeit (Verteilungsdichte bei d_p) und des Durchdringungsgrads für jede Partikelgröße d_p berechnen. Diese Werte können noch nicht mit einer Reinheitsklasse verglichen werden. Dazu benötigt man die Verteilungsfunktion $C(< d_p)$ des Aerosols im Reinraum. Unter der Annahme, dass das Aerosol im Raum exakt die Definition einer bestimmten Reinheitsklasse erfüllt, kann Gleichung 14 zur Berechnung verwendet werden.

Die Verteilungsdichte $c(d_p)$ erhält man dann durch Bildung der ersten Ableitung nach d_p .

$$c_n(d_p) = \frac{dC(< d_p)}{dd_p} \quad (15)$$

$$c_n(d_p) = 0,0173007 \cdot 10^N \left(\frac{1}{d_p} \right)^{3,08} \quad (16)$$

Nun kann die Verteilungsdichte einer Partikelgröße d_p mit dem Durchdringungsgrad bei dieser Größe multipliziert werden. Anschließend wird durch Integration von Null bis kleiner als die Partikelgröße der Wert der Verteilungsfunktion $C_{real}(< d_p)$ berechnet. Vertauscht man die Integrationsgrenzen von der Partikelgröße bis unendlich (siehe Glg. 17), spart man sich den Umweg der Rückrechnung über Gleichung 13. So erhält man eine kontinuierliche Kurve der realen kumulativen Häufigkeitsverteilung $C_{real}(\geq d_p)$, welche sich direkt mit der Reinheitsklasse vergleichen lässt.

$$C_{real}(\geq d_p) = \int_{d_p}^{\infty} c_n(d_p) \mathcal{P}(d_p) d(d_p) \quad (17)$$

Tab. 2: Abweichung von der Reinheitsklasse bei verschiedenen Schlauchdurchmessern und Reynoldszahlen.

Zoll	d_i in mm	u in m/s	Re
1/4	6,4	14,9	6090
3/8	9,5	6,6	4060
1/2	12,7	4,7	3045
3/4	19,1	1,6	2030
1	25,4	0,9	1520

Die berechnete, reale Verteilung stellt sich im doppelt logarithmischen Netz nicht mehr als Gerade dar, wie es für die Reinheitsklassendefinition der Fall ist. Die Kurve weicht mit zunehmender Partikelgröße von der Reinheitsklasse ab. Die so verzerrte Kurve liegt unterhalb der zu bestimmenden Reinheitsklasse, d.h. eine fehlerhafte Messung suggeriert eine bessere Reinheitsklasse, als tatsächlich vorhanden ist.

Die Kurve soll zuerst gemäß Angabe der ISO 14644 für eine Schlauchlänge mit 1 m berechnet werden. In der ISO 14644-1 ist kein Schlauchdurchmesser vorgegeben, so dass die Berechnung für die üblichen fünf Durchmesser durchgeführt wurde. In Tab. 2 sind die Schlauchdurchmesser in Zoll (Spalte 1) und Millimeter (Spalte 2) angegeben. Da der Volumenstrom konstant ist, herrschen unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten (Spalte 3), woraus sich die entsprechenden Reynoldszahlen ergeben (Spalte 4).

Die Ergebnisse für ISO 8 zeigt Abb. 7. Markant ist, dass bei Reynoldszahlen unter 3045 die Abscheidung für die Praxis im Bereich von 0,5 bis 5,0 μm vernachlässigbar ist. In der Strömungstechnik gilt die Grenze von $Re = 2330$ für den Umschlag von linearer in eine turbulente Strömung. Scheinbar ist der Umschlag zur turbulenten Strömung ein ähnlicher Orientierungspunkt für die Ausprägung der Abschei-

deeffekte von Partikeln bei der Probenahme.

Die Abb. 8 zeigt die Situation für die ISO Klassen 5 bis 8. Die prozentualen Abweichungen zwischen definierter Reinheitsklasse und real gemessener sind für alle ISO-Klassen gleich. Daher genügt es die Quantifizierung des Probenahmefehlers anhand der ISO-Klasse 8 abzuschätzen. Die Tabelle 3 listet die erwarteten und real ermittelten Partikelzahlen für einen geraden Schlauch mit einer Länge von 1 m und einem Durchmesser von 3/8" auf. Der Probenahmefehler beträgt für Partikel größer gleich 5 μm noch ca. 12 %.

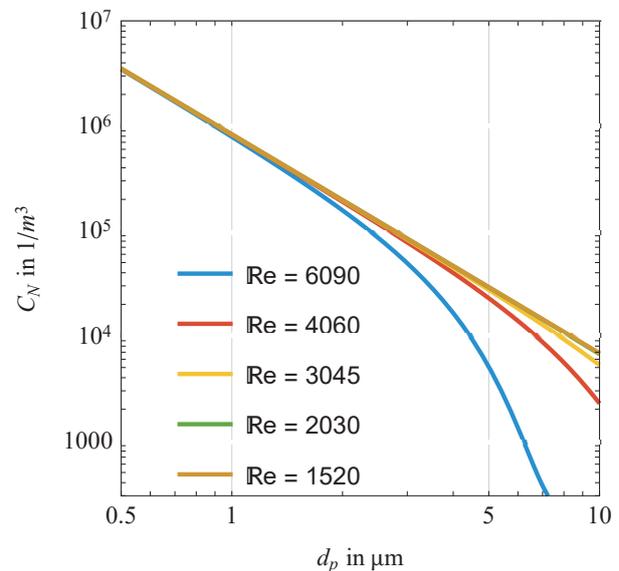


Abb. 7: Reale Reinheitsklasse ISO 8 bei versch. Reynoldszahlen und Schlauchlänge 1 m ohne Bögen und Querschnittsverengungen

Die Tab. 4 soll verdeutlichen, wie der Probenahmefehler bei einer Verringerung des Innendurchmessers auf 1/4" zunimmt. Es tritt eine Reduktion der Partikel größer gleich 1,0 μm um ca. 5% und für Partikel größer gleich 5,0 μm um ca. 83% auf. Bezüglich der Partikelgröße 5,0 μm wird die Partikelanzahlkonzentration nahezu um eine Klasse „besser“ gemessen.

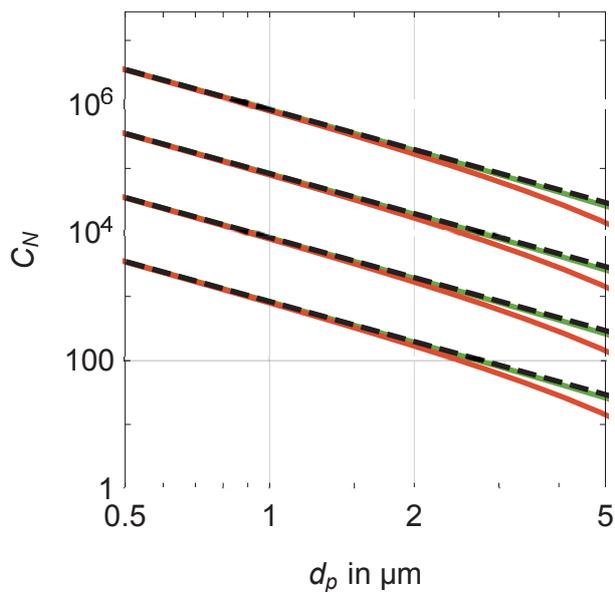


Abb. 8: Reale Reinheitsklasse ISO 5 bis 8

Tab. 3: Erforderliche Klassengrenzen und berechnete Partikelzahlen für ISO-Klasse 8 bei Schlauchlänge 1 m und Innendurchmesser 3/8"

d_p (µm)	$n_{erl.}$	n_{real}	% Abw.
0.1	100000000	99850175	0
0.2	23651441	23627539	0
0.3	10176251	10164003	0
0.5	3516757	3500348	0
1	831764	824352	1
5	29251	22571	12

5 Normierte Darstellung des Probenahmefehlers

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, welche reale kumulative Verteilung sich durch die Abscheidung im Schlauch einstellt. Die prozentuale Quantifizierung musste jedoch immer durch konkrete Berechnungen für die einzelnen Partikelgrößen ermittelt werden. Bildet man den Quotienten aus realer und kumulativer Verteilung, so erhält man direkt eine normierte Darstellung des Probenahmefehlers.

Tab. 4: Erforderliche Klassengrenzen und berechnete Partikelzahlen für ISO-Klasse 8 bei Schlauchlänge 1m und Innendurchmesser 1/4"

d_p (µm)	$n_{erl.}$	n_{real}	% Abw.
0.1	100000000	99752625	0
0.2	23651441	23583709	0
0.3	10176251	10125260	1
0.5	3516757	3471508	1
1	831764	788825	5
5	29251	4883	83

$$C_{norm}(d_p) = \frac{C_{real}(d_p)}{C_n(N, d_p)} \quad (18)$$

$$C_{norm}(d_p) = \frac{\int_{d_p}^{\infty} f(d_p) \mathcal{P}(d_p) d(d_p)}{10^N \left(\frac{0,1 \mu m}{d_p}\right)^{2,08}} \quad (19)$$

Die in Abb. 9 dargestellten Varianten wurden mit den Parameterkombinationen der Tab. 1 berechnet. Durch Vergleich der Abbildungen 6 und 9 erkennt man den Vorteil der normierten kumulativen Darstellung. Statt einer Verringerung des Durchdringungsgrads kann sofort der Probenahmefehler des betrachteten Systems für alle Partikelgrößen direkt prozentual abgelesen werden.

6 Beispielrechnungen

Die ISO14644-2:2015-12 [10] gibt die Gestaltung von Monitoring-Systemen vor. Im Abschnitt A.4.2 wird gefordert, dass die Probenahmefeffizienz für die gewählten Partikelgrößen abgeschätzt werden muss. Insbesondere für Partikel größer gleich 5,0 µm werden lange Transportwege als ungeeignet bezeichnet. Es wird dabei nicht explizit auf Bögen und Schlauchdurchmesser hingewiesen, jedoch implizit in Abschnitt B.3.2.3.

Treten Partikelzahlen auf, welche deutlich un-

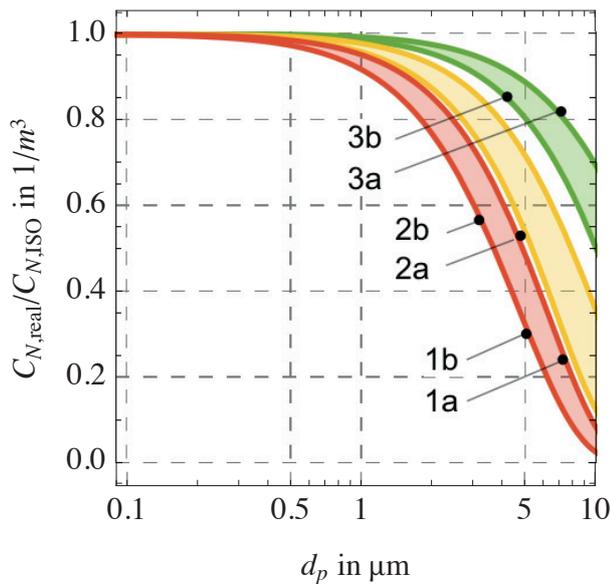


Abb. 9: Normierte, kumulative Darstellung des Probenahmefehlers mit den Parametern aus Tab. 1

ter den erwarteten Grenzen für die überwachte Reinheitsklasse liegen, so sollte nach ISO 14644-2 eine Untersuchung vorgenommen werden, da die Ursache u.a. im Probenahmesystem liegen könnte. Dies ist mit der hier vorgestellten Methode möglich. Folgende Konfigurationen von Monitoring-Systemen sollen beispielhaft bewertet werden:

- A) ein langer Schlauch von 30 m, Durchmesser 3/4" mit sechs 90°-Bögen zu einem entfernten Partikelzähler
- B) ein langer Schlauch von 10 m, Durchmesser 1/2" mit drei 90°-Bögen zu einem Partikelzähler im Nachbarraum
- C) ein kurzer Schlauch von 0,5 m, Durchmesser 3/8" mit zwei leichten 15°-Umlenkungen durch Schlauchversatz zwischen Sonde und Partikelzähler im selben Raum

In Abb. 10 ist deutlich zu erkennen, dass die Konfiguration A trotz des Innendurchmessers von 3/4" zu einem deutlichen Probenahme-

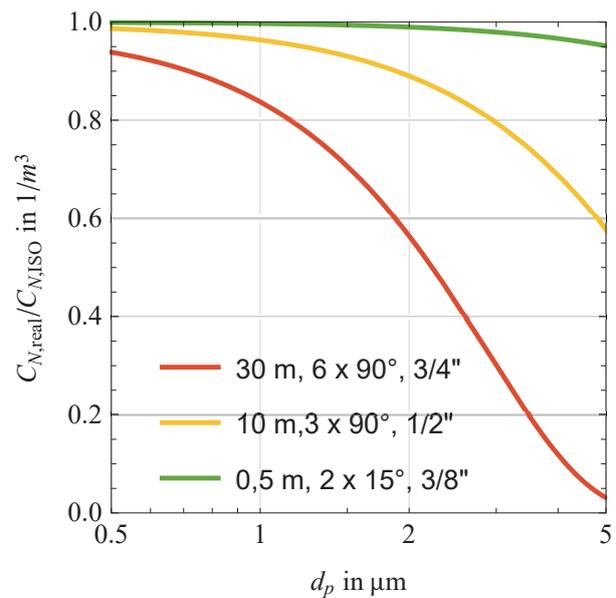


Abb. 10: Normierte, kumulative Darstellung des Probenahmefehlers für drei ausgewählte Monitoring-Systeme

fehler für Partikel größer gleich 5,0 μm von ca. 95 % führt. In der Konfiguration B wurde bei der Verlegung ein kleinerer Innendurchmesser von 1/2" gewählt und die Anzahl der Bögen durch optimierte Verlegung halbiert. Der Probenahmefehler beträgt hier immer noch ca. 40 %. Die Konfiguration C zeichnet sich durch eine kurzen Schlauch und kleine Biegewinkel aus. Der Probenahmefehler verringert sich auf einen akzeptablen Wert von ca. 5 %. Bezüglich der Partikelgröße größer gleich 0,5 μm beträgt der Probenahmefehler für alle Konfigurationen maximal ca. 5 %, also kleiner oder gleich als die von ISO21501-4:2007-05 [11] erlaubte Toleranz des Volumenstroms von Partikelzählern.

7 Zusammenfassung

Es wurde die Verringerung des Durchdringungsgrades in Probenahmeschläuchen in Folge von Diffusion, turbulenter Bewegung, Trägheit in Bögen und Querschnittsverengungen gezeigt. Zur Abscheidung tragen hauptsächlich die turbulente Bewegung und die Trägheit in Bögen bei. Der Durchdringungsgrad wird bei üblichen Systemen für Partikelgrößen ab $1\ \mu\text{m}$ verringert. Bei Partikeln größer gleich $5,0\ \mu\text{m}$ muss jedoch immer mit einem Probenahmefehler gerechnet werden.

Durch die kumulative Berechnung des Durchdringungsgrades konnte ein direkter Vergleich zwischen der Verteilungsfunktion gemäß Reinheitsklassendefinition und der durch die Partikelabscheidung real zu erwartenden Verteilungsfunktion vorgenommen werden. Die Kurven der Reinheitsklassendefinition werden dabei mit wachsender Partikelgröße zunehmend verzerrt, woraus eine falsch positive Bestimmung der Reinheitsklasse resultiert. Bei ungünstiger Wahl des Probenahmesystems kann bezüglich der Partikelgröße $5,0\ \mu\text{m}$ der Fehler in der Größenordnung einer Reinheitsklasse liegen.

Die ISO 14644-1 gibt in ihrer letzten Aktualisierung 2015 konkrete Hinweise zur Länge von Schläuchen, welche bei der Probenahme zulässig sind. Es wurde hier gezeigt, dass die Bestimmung der Reinheitsklasse für Partikel größer gleich $5,0\ \mu\text{m}$ immer fehlerbehaftet ist, sofern Schläuche eingesetzt werden. Der Probenahmefehler lässt sich reduzieren, indem die Entfernung zwischen Probenahmesonde und Partikelzähler klein und der Innendurchmesser des Schlauches groß gewählt werden. Die beste Wahl besteht in einer Probenahmesonde, die ohne Schlauch direkt auf den Partikelzähler aufgesetzt wird.

Da die Abscheidung von Partikeln in Schläuchen von den Strömungsbedingungen abhängig ist, genügt die Vorgabe einer Schlauchlänge nicht. Zur Kontrolle der Auslegung sollte eine Ermittlung des Turbulenzgrades über die Reynolds-Zahl erfolgen.

Die ISO 14644-2 gibt zur Zeit nur vage Hinweise zur Installation von Monitoring-Systemen. Auf die Verlegung bezüglich der Vermeidung von Bögen und Querschnittsverengungen wird nicht explizit hingewiesen. Anhand der Berechnungen kann abgeleitet werden, dass Partikelzähler am Probenahmeort mit direkt angeschlossener Sonde verwendet werden sollten. Ist man auf Schläuche angewiesen und will die Partikel größer gleich $5,0\ \mu\text{m}$ überwachen, so müssen die Alarmgrenzen entsprechend der Verringerung des Durchdringungsgrades nach unten korrigiert werden.

Die Berechnung des normierten kumulativen Durchdringungsgrades vereinfacht die Auslegung des Probenahmesystems. Aus dem normierten Diagramm kann für jede Partikelgröße der Probenahmefehler für eine beliebige Reinheitsklasse direkt abgelesen werden.

Abschließend lassen sich die Grundprinzipien der Auslegung leicht zusammen fassen: kurzer Schlauch, großer Durchmesser, wenige Umlenkungen und wenige Querschnittsverengungen minimieren den Fehler der Probenahme.

Literatur

- [1] ISO 14644-1:2015-1 *Cleanrooms and associated controlled environments - Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*
- [2] BARON, P A. ; WILLEKE, K: Factors Affecting Aerosol Measurement Quality. In: BARON, A. (Hrsg.): *Aerosol Measurement - Principles, Techniques, and Applications*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993, Kap. 8, S. 23–40
- [3] BARON, P A. ; WILLEKE, K: Gas and Particle Motion. In: WILLEKE, P.A. (Hrsg.): *Aerosol Measurement - Principles, Techniques, and Applications*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993, Kap. 3, S. 23–40
- [4] BROCKMANN, J E.: Sampling and Transport of Aerosols. In: WILLEKE, P.A. (Hrsg.): *Aerosol Measurement - Principles, Techniques, and Applications*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993, Kap. 6, S. 77–111
- [5] DIALER, K ; ONKEN, U ; LESCHONSKI, K.: *Grundzüge der Verfahrenstechnik und Reaktionstechnik*. 1st. München : Carl Hanser Verlag, 1984
- [6] FEDSTD209E: *Airborne Particulate Cleanliness Classes In Cleanrooms and Clean Zones*. 1992
- [7] FRIEDLANDER, Sheldon K.: *Smoke, Dust, and Haze - Fundamentals of Aerosol Dynamics*. New York : Oxford University Press, 2000
- [8] GAIL, L. ; GOMMEL, U. ; HORTIG, H.-P.: *Reinraumtechnik*. 3. Aufl. Heidelberg : Springer, 2012
- [9] HINDS, W C.: *Aerosol Technology Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 1st. New York : John Wiley & Sons, 1982
- [10] ISO14644-2:2015-12: *Cleanrooms and associated controlled environments - Part 2: Monitoring to provide evidence of cleanroom performance related to air cleanliness by particle concentration*
- [11] ISO21501-4:2007-05: *Determination of particle size distribution - Single particle light interaction methods - Part 4: Light scattering airborne particle counter for clean spaces*
- [12] LIU, B Y H. ; AGARWAL, J K.: Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow. In: *J. Aerosol Sci.* 5 (1974), S. 144–55
- [13] PUI, D Y H. ; F, Romay-Novas ; LIU, B Y H.: Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section. In: *Aerosol Sci. Technol.* 7 (1987), S. 301–15
- [14] VAUCK, R A. ; MÜLLER, H A.: *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1992
- [15] WILLEKE, K (Hrsg.) ; BARON, P A. (Hrsg.): *Aerosol Measurement - Principles, Techniques, and Applications*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993
- [16] YE, Y ; PUI, D Y H.: Particle deposition in a tube with an abrupt contraction. In: *J. Aerosol Sci.* 21 (1990), Nr. 1, S. 29–40

IMPRESSUM

Dr. Stefan Schenderlein

Dohm Pharmaceutical Engineering
Machandelweg 7
14052 Berlin

E-Mail: stefan.schenderlein@dphe.de

DIENSTLEISTUNGEN VON DPHE

Engineering & Consulting

- > Planung
- > Ausführung
- > Inbetriebnahme
- > Risikoanalysen
- > Gutachten
- > Studien

Reinraum-Prüfung

- > Reinheitsklassenbestimmung
- > Erholzeitmessung
- > Filterlecktest
- > Strömungsvisualisierung
- > Raumluftwechsel
- > Turbulenzarme Verdrängungsströmung

Qualifizierungen / Validierungen

- > Prozessvalidierung
- > Lasten- und Pflichtenheft
- > Risikoanalyse
- > Design Qualification (DQ)
- > Installation Qualification (IQ)
- > Operational Qualification (OQ)
- > Performance Qualification (PQ)

DPhe

Dohm Pharmaceutical Engineering
Machandelweg 7
14052 Berlin

Telefon: +49-30-300 964-0
www.dphe.de