

## 3 Funktionsweise optischer Partikelzähler

Optische Partikelzähler verwenden als Meßgröße das Streulicht von Partikeln im Meßvolumen, um Partikel zu zählen und nach der Größe zu klassieren.

### 3.1 Lichtstreuung an Partikeln

Die Lichtstreuung an Partikeln kann mit verschiedenen Theorien beschrieben werden, die das Licht als elektromagnetische Welle betrachten. Die Lichtstreuung wird in drei Bereiche klassiert, die jeweils durch eine andere Theorie beschrieben wird. Als Kriterium für die Klassierung wird das Verhältnis  $d/\lambda$  der mittleren Abmessung  $d$  des betrachteten Streusystems zur Wellenlänge  $\lambda$  des von der Lichtquelle emittierten, sogenannten Primärlichtes verwendet. Im Grenzfall

$$d/\lambda \rightarrow \infty$$

verhält sich das Streulicht wie ein Bündel von Lichtstrahlen, dessen optischer Weg und Krümmung vom Brechungsindex im Streusystem abhängen. An der Grenzfläche zweier Medien ändert sich der Brechungsindex sprunghaft, wodurch eine Reflektion oder Brechung des Lichtstrahls erfolgt. Dieser Bereich wird als geometrische Optik bezeichnet. Bleibt das Verhältnis  $d/\lambda$  endlich,

$$0 < d/\lambda < \infty,$$

so werden zur Beschreibung der Streuung von Lichtstrahlen nunmehr elektromagnetische Wellen verwendet, die durch die elektrischen und magnetischen Feldkomponenten  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  beschrieben werden. Es kommt zur Reflektion und Brechung noch die Beugung an der Grenzfläche zweier Medien hinzu. Die erste, umfassende theoretische Beschreibung für

kugelförmige Körper in einem monochromatischen Wellenfeld, wurde erstmals von Gustav Mie (1908) [49] aufgestellt.

Folgende Voraussetzungen werden für die Mie-Theorie getroffen:

- das Partikel ist ideal optisch homogen, durchsichtig und elektrisch nicht leitend
- die einfallende Lichtwelle des Primärlichtes ist eben, linear polarisiert und monochromatisch
- der Streukörper ist kugelförmig
- Mehrfachstreuung durch andere Partikel wird ausgeschlossen
- die Wellenlänge des gestreuten Lichtes ist mit der des einfallenden Lichtstrahls identisch

Ausgangspunkt der mathematischen Beschreibung des Partikelstreulichtes ist das in Abbildung 3.1 dargestellte Koordinatensystem.

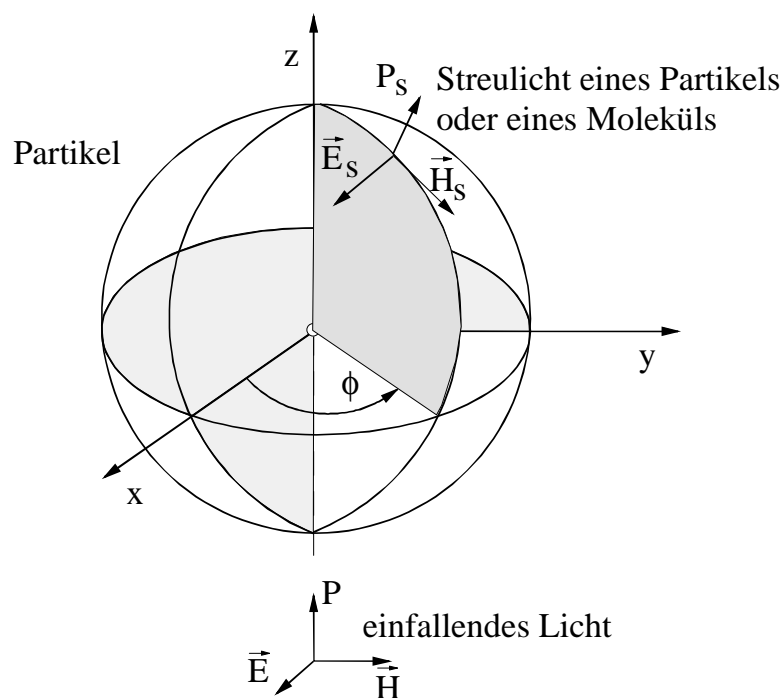


Abbildung 3.1 Koordinatensystem zur mathematischen Beschreibung des Streulichtes

Das einfallende Licht, eine monochromatische ebene elektromagnetische Welle wird durch die elektrischen und magnetischen Feldkomponenten  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  beschrieben. Die Einfallsebene wird parallel zur Schwingungsrichtung des elektrischen Feldvektors  $\vec{E}$  definiert. Die Streuebene ist durch den Azimutstreuwinkel  $\phi$  festgelegt, wobei die zusätzliche Angabe des Streuwinkels  $\theta$  die Raumrichtung beschreibt, in der das gestreute Licht, bestehend aus den Feldkomponenten  $\vec{E}_s$  und  $\vec{H}_s$ , betrachtet wird.

Aufgrund der genannten Definitionen kann die Bestrahlungsstärke  $I_s$  nach der Mie-Theorie mit folgender Gleichung beschrieben werden.

$$I_s = I_0 \cdot \left( \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot f(\phi, \theta) \quad (3.1)$$

Hierbei ist  $I_0$  die Bestrahlungsstärke und  $\lambda$  die Wellenlänge des einfallenden Primärlichtes. Die Funktion  $f$  ist die dimensionslose Streufunktion, die ein Maß für das gestreute Licht ist und von der Polarisation  $\phi$  des einfallenden Lichtes und der Raumrichtung  $\theta$  abhängig ist.  $f$  wird mit folgendem Ausdruck beschrieben:

$$f(\phi, \theta) = I_2(\theta) \cdot \cos^2 \phi + I_1(\theta) \cdot \sin^2(\theta) \quad (3.2)$$

$I_2(\theta)$  und  $I_1(\theta)$  sind die Streulichtanteile für die senkrechte und parallele Polarisation des Lichtes. Sie werden durch die komplexen Funktionen  $S_1(\theta)$  und  $S_2(\theta)$  mit der Betragsbildung und anschließender Quadrierung berechnet.

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot n + 1}{n \cdot (n + 1)} \cdot [a_n \cdot \pi_n \cdot \cos(\theta) + b_n \cdot \tau_n \cdot \cos(\theta)] \quad (3.3)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot n + 1}{n \cdot (n + 1)} \cdot [b_n \cdot \pi_n \cdot \cos(\theta) + a_n \cdot \tau_n \cdot \cos(\theta)] \quad (3.4)$$

Die Größen  $\pi_n$  und  $\tau_n$  charakterisieren dabei die Ausbreitungsrichtung des Streulichtes und werden wie folgt berechnet:

$$\pi_n(\cos(\theta)) = \frac{dP_n(\cos(\theta))}{d\cos(\theta)} \quad (3.5)$$

$P_n \hat{=}$  Legendre- Polynom  $n$ -ter Ordnung

$$\tau_n(\cos(\theta)) = \cos(\theta) \cdot \pi_n(\cos(\theta)) - \sin^2(\theta) \cdot \frac{d\pi_n(\cos(\theta))}{d\cos(\theta)} \quad (3.6)$$

$a_n$  und  $b_n$  (Gl. 3.7 und Gl. 3.8) beinhalten den Brechungsindex  $m$ , der auch eine komplexe Zahl sein kann. Der imaginäre Teil beschreibt das Absorptionsvermögen und der Realteil das Streuvermögen. Die Funktion  $\psi'_n(x)$  entspricht der Ableitung der Funktion  $\psi_n(x)$  nach  $x$ .

$$a_n = \frac{\psi'_n(x) \cdot \psi_n(y) - m \cdot \psi_n(x) \cdot \psi'_n(y)}{\psi'_n(x) \cdot \zeta_n(y) - m \cdot \psi_n(x) \cdot \zeta'_n(y)} \quad (3.7)$$

$$b_n = \frac{m \cdot \psi'_n(x) \cdot \psi_n(y) - \psi_n(x) \cdot \psi'_n(y)}{m \cdot \psi'_n(x) \cdot \zeta_n(y) - \psi_n(x) \cdot \zeta'_n(y)} \quad (3.8)$$

Die Parameter  $x$  und  $y$  werden durch das Verhältnis Partikeldurchmesser  $D_p$  zur Wellenlänge beschrieben, das auch zur Klassifizierung der Lichtstreuung verwendet wird.

$$x = \frac{\pi \cdot D_p}{\lambda} \quad (3.9)$$

$$y = m \cdot \frac{\pi \cdot D_p}{\lambda} \quad (3.10)$$

Die Funktionen  $\psi_n$  und  $\zeta_n$  (Gl. 3.11 und Gl. 3.12) werden mittels der Bessel- und der Hankel-Funktion berechnet.

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{\pi \cdot x}{2}} \cdot J_{n+1/2}(x) \quad (3.11)$$

$$\zeta_n(x) = \sqrt{\frac{\pi \cdot x}{2}} \cdot H^{(2)}(x) \quad (3.12)$$

Zur Berechnung der Streulichtleistung  $P_s(\phi, \theta)$  eines Partikels, die auf den Photodetektor mit einer bestimmten Apertur trifft, muß die Bestrahlungsstärke über die hier als kreisrund angenommene Detektorfläche  $A_{\text{Detektor}}$  integriert werden.

$$P_s = \iint_{A_{\text{Detektor}}} I_s dA_{\text{Detektor}} \quad (3.13)$$

Die Abbildung 3.2 zeigt als Beispiel die berechnete Partikelstreulichtleistung  $P_s$  eines kommerziellen optischen Partikelzählers (LPC 3751 von TSI, Anhang B.2) mit monochromatischem Licht in Abhängigkeit der Partikelgröße  $D_p$ . Die Streulichtleistung ist mit dem Programm „MIEVO Version“ berechnet worden, das im Rahmen einer Ringuntersuchung verschiedener Codes zum 2. Mie Seminar an der Technischen Universität Clausthal am 8.7.1993 überprüft worden ist. Auffallend sind die starken Fluktuationen im gesamten Größenbereich, die eine eindeutige Zuordnung der Lichtleistung zu einer bestimmten Partikelgröße verhindern. Die Schwankungen der Lichtleistung resultieren aus der Interferenz zwischen reflektierten und gebrochenen Lichtstrahlen.

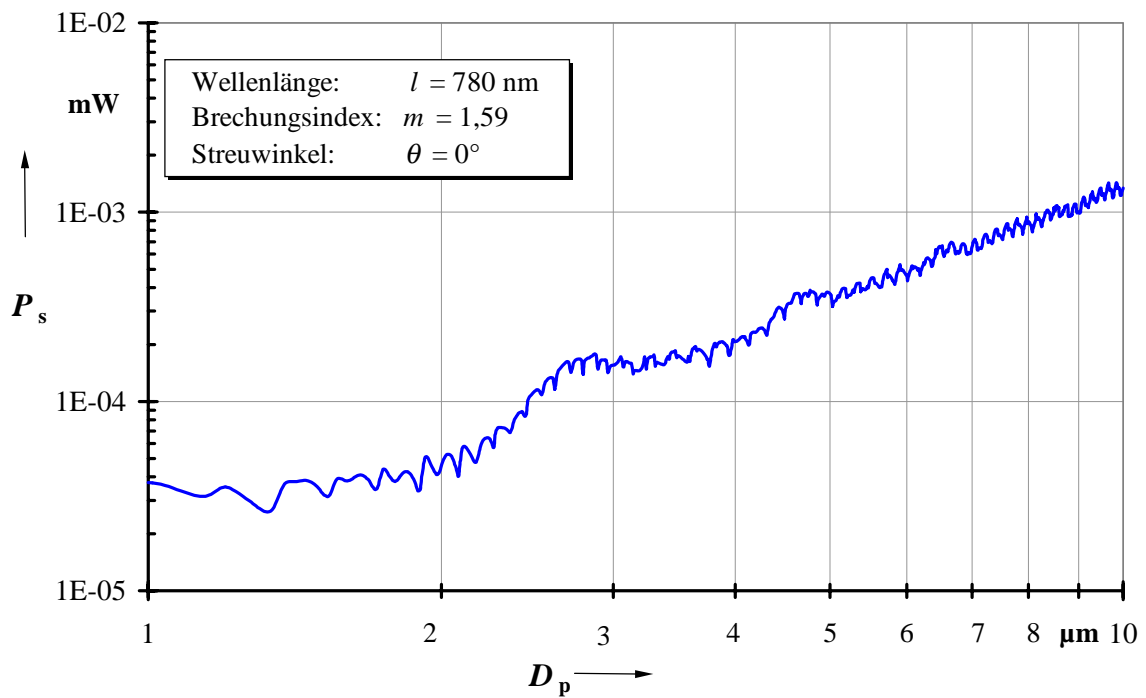


Abbildung 3.2 Partikelstreuleistung  $P_s$  in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser  $D_p$  eines kommerziellen optischen Partikelzählers (LPC 3751, TSI)

Eine Glättung des Kurvenverlaufs kann durch Mittelung der Leistungsschwankungen erzielt werden, die durch eine Vergrößerung der Apertur des Detektionssystems erreicht wird. Eine Glättung ist auch mit der Verwendung einer weißen Lichtquelle möglich. Die Abbildung 3.3 zeigt die berechnete Partikelstreuleistung  $P_s$  in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser  $D_p$  für weißes Licht des kommerziellen optischen Partikelzählers HC-15 (Polytec).

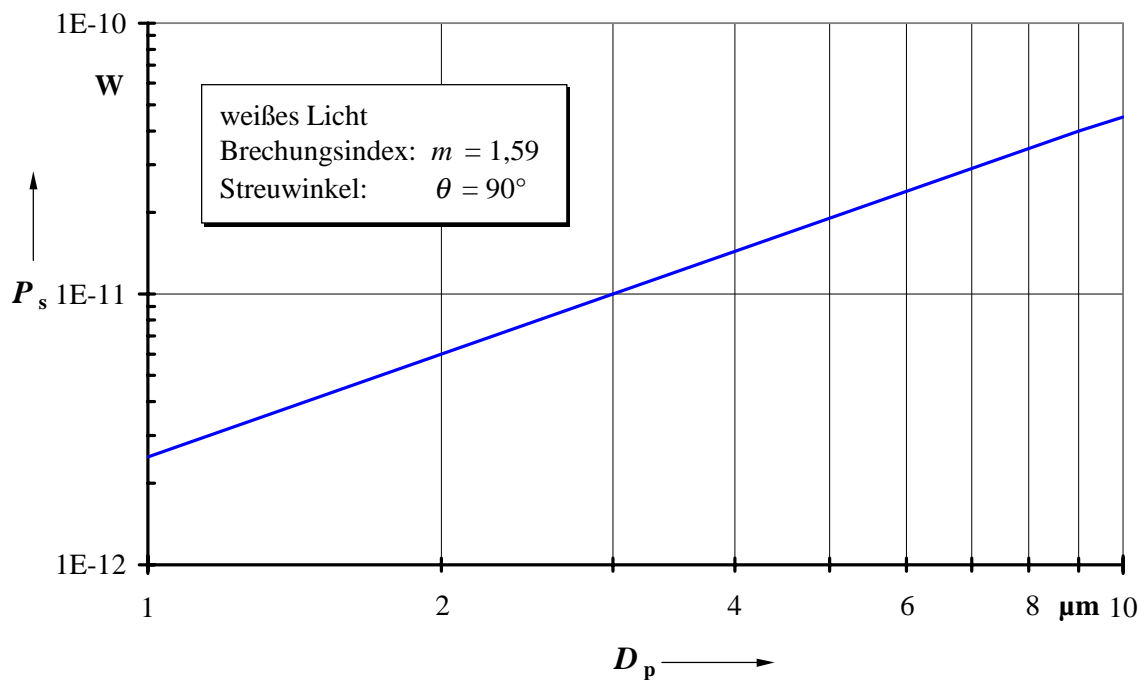


Abbildung 3.3 Partikelstreuleistung  $P_s$  in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser  $D_p$  des kommerziellen optischen Partikelzählers HC-15 (Polytec) mit einer Weißlichtquelle

Die Lichtstreuung geht für  $d \ll \lambda$ ,

$$0 < d / \lambda \ll 1$$

in die Dipolstreuung bzw. in die Rayleigh-Streuung über, die auf schwingende Dipole zurückzuführen ist. Bei Molekülen und Atomen findet die Rayleigh-Streuung ihre Anwendung.

Mit der Kraftwirkung der elektrischen Feldstärke eines elektromagnetischen Außenfeldes wird die Elektronenhülle des Atoms relativ zum Kern hin verschoben. Es entstehen zwei getrennte Ladungen, die mit der Frequenz des Lichtes schwingen. Der dazu gehörige Dipolmomentvektor erzeugt dann ein Sekundärfeld, das dem Streulicht entspricht.

Die Bestrahlungsstärke  $I_s$  der Rayleigh-Streuung berechnet sich mit der Gleichung 3.14, unter der Einschränkung, daß das Licht unpolarisiert, monochromatisch und die Polarisierbarkeit des Streukörpers isotrop ist.

$$I_s = I_0 \cdot \frac{\pi^4 \cdot D_p^6}{8 \cdot \lambda^4} \cdot \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \cdot (1 + \cos^2(\theta)) \quad (3.14)$$

Hierbei ist  $I_0$  die eingestrahlte Bestrahlungsstärke des Lichtes im Meßvolumen mit der Wellenlänge  $\lambda$ ,  $D_p$  der Partikeldurchmesser,  $m$  der Brechungsindex und  $\theta$  der Raumwinkel.

Die Streulichttheorie von Rayleigh und der geometrischen Optik können in die Mie-Theorie überführt werden.

### 3.2 Aufbau und Arbeitsweise des Partikelzählers

Der optische Partikelzähler ermöglicht die Messung der Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit von der Partikelgröße in Verbindung mit einer Volumenstrommessung.

Die einzelnen Partikel werden mit dem Probenahmevolumenstrom durch das Meßvolumen des Partikelzählers (Abbildung 3.4) transportiert. Das Meßvolumen wird mittels einer Lichtquelle beleuchtet und die Lichtstrahlen hinter dem Meßvolumen von einer Strahlfalle absorbiert. Die Partikel und die Moleküle in dem optisch abgegrenzten Meßvolumen bilden das Meßobjekt des Partikelzählers. Ein Linsensystem sammelt einen Teil des Streulichtes vom Meßobjekt und fokussiert es auf einen Photodetektor. Der Photodetektor wandelt das Streulicht in elektrische Signale um. Eine nachgeschaltete Signalverarbeitung zählt die Partikelsignale, klassiert sie anhand der Signalamplituden und erstellt eine Partikelgrößenverteilung. Die Signalamplituden werden in der Regel bei kommerziellen optischen Partikelzählern anhand von definierten Schwellwerten ausgewertet. Wenn das Signal einen festgelegten Schwellwert übersteigt, wird der Spitzenwert des Signals ermittelt.



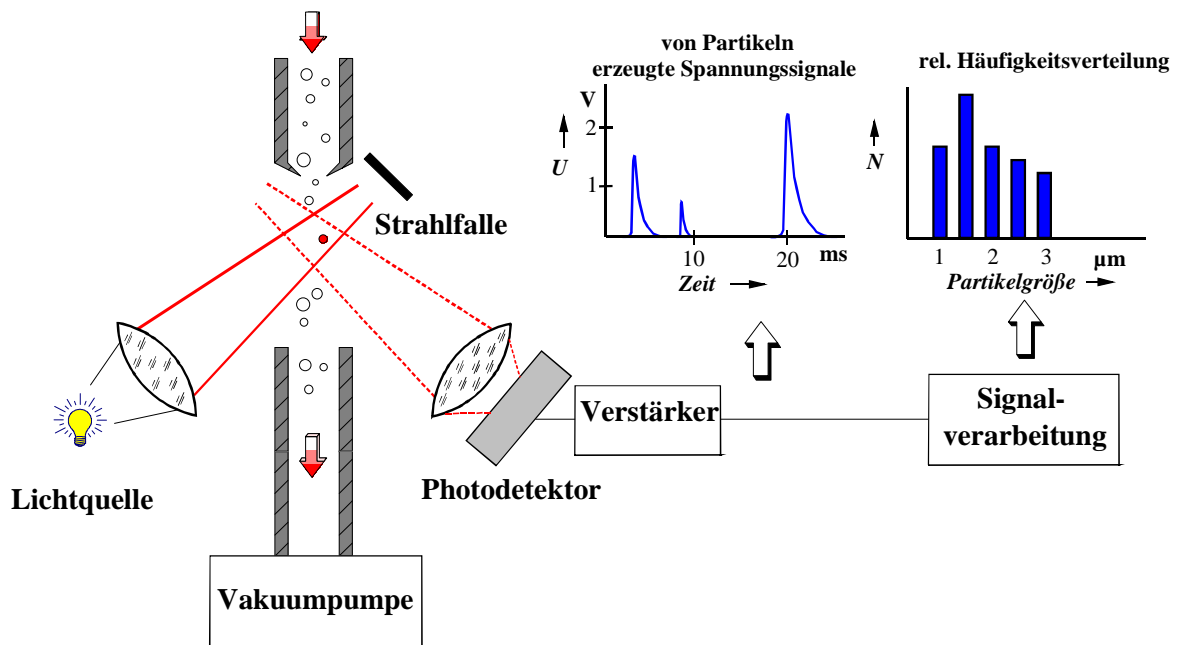


Abbildung 3.4 Funktionsweise optischer Partikelzähler

In der Regel arbeiten optische Partikelzähler nach dem hier vorgestellten Prinzip. Es gibt jedoch bei den einzelnen Partikelzählern Unterschiede in ihrer Konfiguration. Für die einzelnen Komponenten der Meßkette des Partikelzählers werden unterschiedliche Lichtquellen und Photodetektoren verwendet, die unterschiedliches Störverhalten zeigen.

Die Volumenströme der einzelnen Partikelzähler unterscheiden sich und können bei vielen, in gewissen Grenzen, dem Meßobjekt angepaßt werden. Die unterschiedlichen Volumenströme verändern die Geschwindigkeit der Partikel durch das Meßvolumen. Eine höhere Partikelgeschwindigkeit verkürzt die Verweildauer im Meßvolumen und verkleinert die Signallänge. Eine kürzere Signallänge erhöht die spektrale Bandbreite des elektrischen Signals.

Für den optischen Partikelzähler ist es unumgänglich, durch eine Kalibrierung den Zusammenhang der Streulichtleistung eines Partikels im Meßvolumen und der Partikelgröße herzustellen.

In der VDI-Richtlinie 3489 Blatt 3 werden zwei Verfahren zur Kalibrierung von optischen Partikelzählern angegeben. Eine Methode verwendet künstlich erzeugte monodisperse Aerosole mit definiertem Partikeldurchmesser. Zur Erzeugung monodisperser Aerosole werden kugelförmige Partikel aus Latex mit einem definierten Durchmesser in einer Suspension zerstäubt und in der Luft getrocknet. Die gemessenen Signale der Partikel können aufgrund der einfachen kugelförmigen Struktur mit den theoretischen Daten verglichen werden. Die Abbildung 3.5 zeigt die künstlichen Partikel aus Latex mit einem Durchmesser von  $1,03\ \mu\text{m}$ , aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop. Die symmetrische Anordnung der Partikel auf den Probenträger hat sich rein zufällig ergeben.

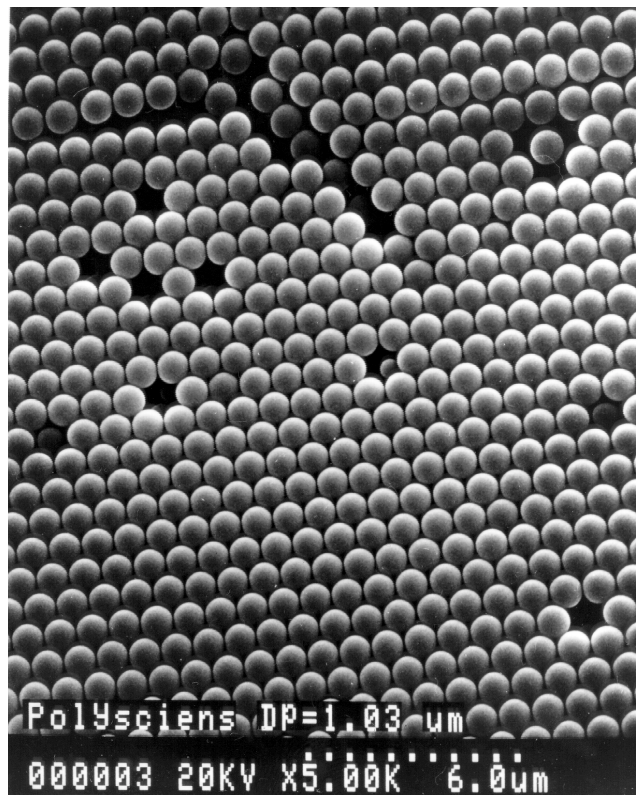


Abbildung 3.5 *Monodisperse Partikel zur Kalibrierung optischer Partikelzähler*

Mit monodispersen Aerosolen verschiedener Partikelgrößen wird eine Kalibrierkurve erstellt, die den Zusammenhang zwischen Streulichtleistung des Partikels und der Partikelgröße herstellt. Als Beispiel für den Zusammenhang ist in der Abbildung B.13 die

Streulichtleistung in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser eines kommerziellen Partikelzählers (TSI LPC 3751) dargestellt.

### 3.3 Qualitätsmerkmale

Optische Partikelzähler werden durch folgende Qualitätsmerkmale charakterisiert (VDI-Richtlinie 3489 Blatt 3) [74]:

- obere  $D_{P50,u}$  und untere Nachweisgrenze  $D_{P50,o}$  bzgl. der Partikelgröße
- Zählwirkungsgrad  $\eta$
- Klassiergenauigkeit  $K_G$
- Auflösungsvermögen  $s_{rel.}$
- Fehlzählrate  $F_Z$

#### Obere und untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße

Die Nachweisgrenze gibt die noch detektierbare Partikelgröße an. Der optische Partikelzähler besitzt eine obere und untere Grenze. Sie entsprechen der Partikelgröße, bei der nur noch 50 % der vorliegenden Partikelanzahlkonzentration gemessen wird. Die untere Grenze  $D_{P50,u}$  wird durch immer kleiner werdende Streulichtsignale und dem Rauschen gesetzt. Die obere Meßgrenze  $D_{P50,o}$  ist hauptsächlich durch die Probenahme vorgegeben. Ab einer bestimmten Partikelgröße werden die Partikel aufgrund von Sedimentation im Probenahmesystem abgeschieden und können somit nicht ins Meßvolumen gelangen.

### Zählwirkungsgrad

Der Zählwirkungsgrad  $\eta$  ist das Verhältnis der gemessenen Partikelanzahlkonzentration  $C_{n, \text{gemessen}}$  zur tatsächlich vorhandenen  $C_{n, \text{real}}$  (Gl. 3.15).

$$\eta = \frac{C_{n, \text{gemessen}}}{C_{n, \text{real}}} \quad (3.15)$$

Er ist ein Maß dafür, wieviele Partikel pro Volumeneinheit tatsächlich in die Meßzelle gelangen und gemessen werden, oder wieviele den Schwellwert noch überschreiten. Zur Bestimmung des Zählwirkungsgrades wird die Konzentration verschiedener monodisperser Aerosole gemessen. Für jede einzelne Partikelgröße wird die gesamte Anzahl der gemessenen Partikel vom Prüfobjekt zur tatsächlichen ins Verhältnis gesetzt (Abbildung 3.6).

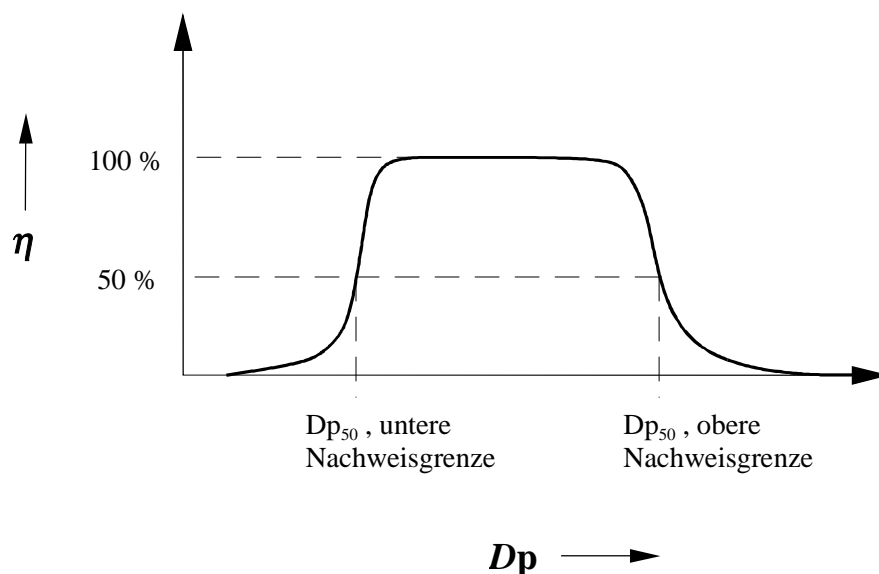


Abbildung 3.6 Zählwirkungsgrad  $\eta$  eines optischen Partikelzählers

In der Praxis gibt es jedoch kein Verfahren, um die Referenzkonzentration exakt zu bestimmen. Zum Beispiel wird in der Literatur [15] beschrieben, daß als Referenzmeßgerät ein Laser-Aerosolspektrometer und ein Kleinwinkelmeßgerät verwendet

wurde. Die Meßgeräte sind vorher mit einem elektrostatischen Sammelgerät (Modell TSI 3100) überprüft worden. Die gemessene Partikelanzahlkonzentration der Aerosolspektrometer wich um 5 % von der ermittelten Partikelanzahlkonzentration des Sammelgerätes ab.

#### **Klassiergenauigkeit**

Die Klassiergenauigkeit  $K_G$  gibt an, wie genau eine bekannte Größenverteilung durch einen Partikelzähler erfaßt wird. Sie berechnet sich mit der Gleichung 3.16.

$$K_G = \frac{D_{p, gemessen} - D_{p, real}}{D_{p, real}} \quad (3.16)$$

$D_{p, gemessen} \hat{=}$  gemessene Partikelgröße

$D_{p, real} \hat{=}$  reale Partikelgröße

#### **Auflösungsvermögen**

Das Auflösungsvermögen  $s_{rel}$  ist ein Maß dafür, welche benachbarten Partikelgrößen noch voneinander unterschieden und voneinander getrennt aufgezeichnet werden können. Es hängt ab von der Steilheit der Kalibrierungskurve (Impulshöhe als Funktion der Partikelgröße), der Intervallbreite der Kanäle, der Homogenität der Ausleuchtung des Meßvolumens, den Strömungsverhältnissen im Meßvolumen sowie der elektronischen Verarbeitung der Partikelsignale. Die gemessene Partikelanzahlverteilung wird aufgrund der beschriebenen Einflüsse verbreitert dargestellt. Zur Bewertung des Auflösungsvermögens eines Partikelzählers wird die relative Standardabweichung  $s_{rel}$  der ermittelten Verteilung, also die Varianz  $s$  bezogen auf den mittleren Partikeldurchmesser  $\bar{D}_p$ , berechnet.

$$s_{rel.} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot (D_{p,i} - \bar{D}_p)} / \bar{D}_p \quad (3.17)$$

Bei einigen kommerziellen Partikelzählern wird durch Aufteilung des Meßbereichs in nur wenige Größenklassen das physikalische Auflösungsvermögen nicht vollständig ausgenutzt. Als Ersatzgröße für das Auflösungsvermögen kann die relative Breite einer Größenklasse herangezogen werden.

Der kommerzielle Partikelzähler LPC 3751 besitzt z.B. nur zwei Größenklassen  $0,5 \mu\text{m} \geq D_p \geq 5 \mu\text{m}$  und  $D_p > 5 \mu\text{m}$ . Sein kleinstes Auflösungsvermögen beträgt somit  $4,5 \mu\text{m}$ .

### Fehlzählrate

Die Zählung der Partikel wird durch Störimpulse beeinträchtigt, die durch das elektronischen Rauschen des Gerätes und/oder von externen Störquellen herrühren können (z.B. Schaltprozesse). Treten diese Störimpulse in einer bestimmten Art und Größe auf, so wird der Partikelzähler die Impulse als Partikelsignale einordnen. Um ein Maß zu bekommen, welchen Einfluß die Fehlimpulse auf das Meßergebnis haben, wird die Fehlzählrate bestimmt. Die Fehlzählrate  $F_{Z,t}$  ist nach den Richtlinien VDI 3489 B1.3 [74] und JIS B9921 [34] durch das Verhältnis der Anzahl der Fehlzählungen  $N_{\text{Fehlzählungen}}$  pro Zeit  $t$  definiert.

$$F_{Z,t} = \frac{N_{\text{Fehlzählungen}}}{t} \quad (3.18)$$

Einige Hersteller von Partikelzählern definieren die Fehlzählrate  $F_{Z,V}$  als Verhältnis der Anzahl der Fehlzählungen zum Volumen  $V$ .

$$F_{Z,V} = \frac{N_{\text{Fehlzählungen}}}{V} \quad (3.19)$$

Mit dem Volumenstrom  $\dot{V}$  des Aerosols, das durch den optischen Partikelzähler strömt, kann die Fehlzählrate  $F_{Z,V}$ , die auf das Volumen bezogen ist, in die Fehlzählrate  $F_{Z,t}$ , die auf die Zeit bezogen ist, umgerechnet werden.

$$F_{Z,t} = \dot{V} \cdot F_{Z,V} \quad (3.20)$$

Zur Bestimmung der Fehlzählrate ist nach den Richtlinien VDI 3489 B1.3 [74] und JIS B9921 [34] der Partikelzähler mit partikelfreier Luft zu beaufschlagen. Die gemessenen Signale bzw. Partikel werden als Fehlimpulse bzw. Fehlzählung interpretiert und auf die Zeit bezogen.

Der Partikelzähler wird bei dieser Vorgehensweise nicht nur Fehlimpulse sondern auch Partikel zählen, weil es technisch kaum möglich ist partikelfreies Gas zu erzeugen. Um dennoch eine sehr geringe Partikelkonzentration zu bekommen, muß die Luft aufwendig gefiltert werden. Die Fehlzählrate kann mit den bisherigen Methoden nicht exakt bestimmt werden und ihre Bestimmung ist zudem noch sehr aufwendig, zeit- und kostenintensiv.

Es ist eine neue Methode entwickelt worden [4], die es ermöglicht, die gezählten Impulse des Partikelzählers eindeutig einem Partikel oder einer Störung zuzuordnen. Die Signalverläufe der Partikel und die Störimpulse sind so verschieden, daß sie visuell einfach unterschieden werden können. Jeder Signalverlauf wird mit einem Transientenrekorder gemessen, wenn ein Partikel oder Störimpuls vom Partikelzähler registriert wird. Die einzelnen Signale und Störungen können nach den Messungen visuell überprüft werden, weil nur wenige Impulse zu erwarten sind. Der typische Spannungsverlauf eines Partikelsignals und einer Störung vom kommerziellen Partikelzähler LPC 3751 ist in der Abbildung 3.7 dargestellt. Das Partikelsignal unterscheidet sich wesentlich vom Verlauf der typischen Störung. Die hier dargestellte Störung ist von der Signalverarbeitung des Partikelzählers (TSI LPC 3751) als ein Partikel gezählt worden.

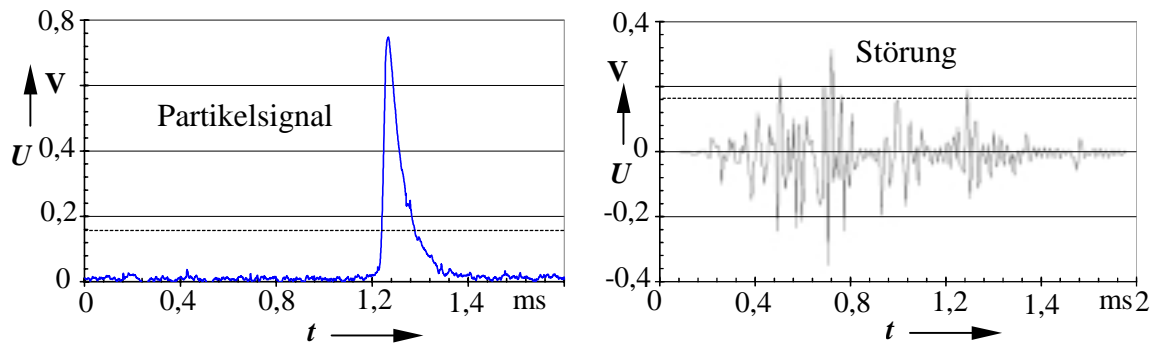


Abbildung 3.7 Vergleich eines realen Partikelsignals und einer Störung des optischen Partikelzählers TSI LPC 3751

In der Regel sind Fehlimpulse im Gegensatz zu einem Partikelsignal von relativ kurzer Dauer, und es folgen in kurzen Abständen hintereinander weitere. Die Signalverarbeitung eines Partikelzählers kann nicht in allen Fällen zwischen solchen Signalen unterscheiden, und es folgen Fehlzählungen der Fehlimpulse.

Die visuelle Prüfung der Signalverläufe kann in wenigen Minuten durchgeführt werden, da nur einige Partikel- und Fehlimpulse zu erwarten sind. Zur Angabe der Fehlzählrate wird die Anzahl der tatsächlich vorhandenen Partikel von der gesamten Anzahl, die der Partikelzähler gemessen hat, subtrahiert und auf die Zeit bezogen. Diese Methode erlaubt eine endliche Partikelkonzentration in der Luft, die keinen großen Aufwand zur Filterung erfordert.

### 3.4 Auswirkungen von Störungen

Die Zählung und Klassierung von Partikeln wird im optischen Partikelzähler durch Störungen verfälscht. Im idealen Fall sind die Partikelsignale unverrauscht. Bei einem monodispersen Aerosol besitzen alle idealen Partikelsignale gleich große Signalamplituden, deren Höhe durch die Signalverarbeitung einer Partikelgröße zugeordnet wird. Somit erzeugen die idealen Signale eine Größenverteilung mit nur einer Partikelgröße. Die Abbildung 3.8 a zeigt unverrauschte reproduzierte Partikelsignale vom



Partikelzähler LPC 3751 und die dazugehörige Häufigkeitsverteilung. Die Abbildung 3.8 b zeigt verrauschte Partikelsignale, die aus der Addition reproduzierter Signale von Abbildung 3.8 a und dem gemessenen Rauschen vom LPC 3751 berechnet worden sind. Reale Partikelsignale sind mit Störungen überlagert (Abbildung 3.8 b). Das Rauschen verfälscht die Signalamplituden stochastisch. Da die Signalamplituden für die Partikelgröße ausgewertet werden, wird die gemessene Partikelgrößenverteilung verbreitert dargestellt.

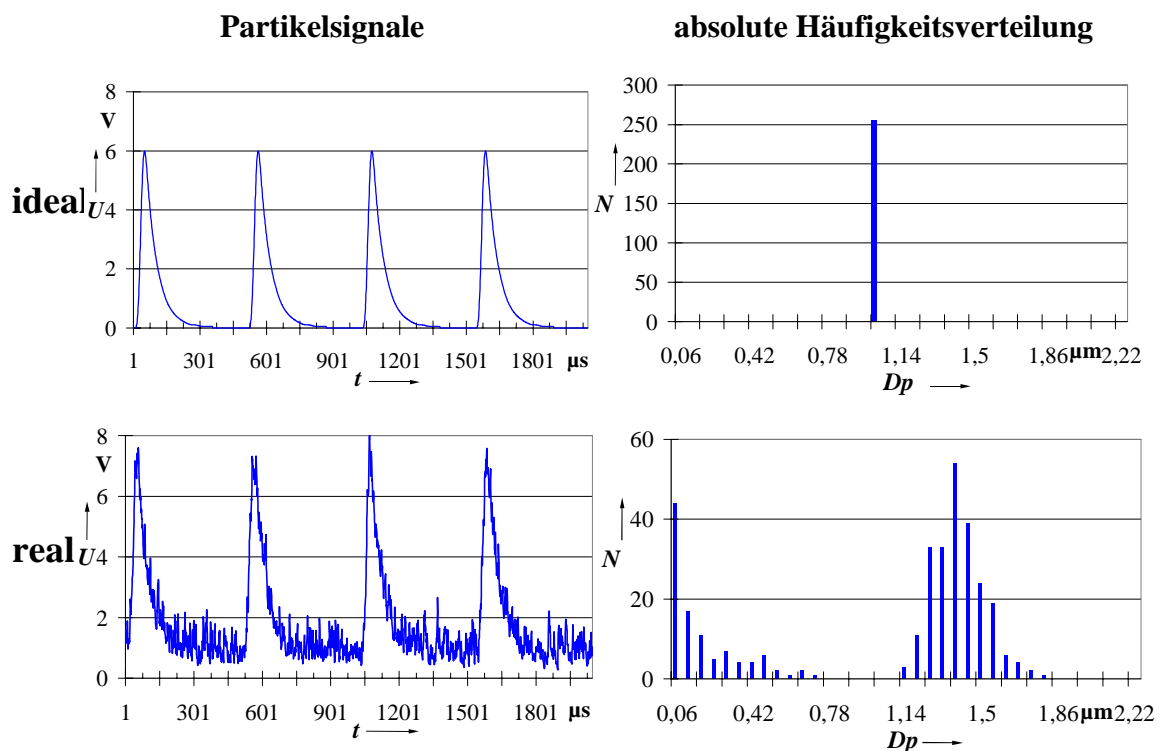


Abbildung 3.8 Auswirkungen von Störungen auf die absolute Häufigkeitsverteilung (Intervallbreite  $\Delta D_p = 60 \text{ nm}$ )

Die Störungen beinhalten zusätzlich kurze Impulse mit einer relativ hohen Amplitude. Übersteigt dieser Störimpuls einen Schwellwert, so wird die Störung als Partikel gezählt und klassiert. Die Störimpulse sind in der Regel nur so groß, daß sie im unteren Partikelgrößenbereich einklassiert werden. Die Anzahl der gezählten Störimpulse pro Zeiteinheit wird in den Normen VDI 3489, JIS B9921 und ASTM F 649 als Fehlzählrate bezeichnet. Einige Hersteller von optischen Partikelzählern definieren die Fehlzählrate  $F_{Z,V}$  mit dem Verhältnis der Anzahl von Fehlzählungen pro Volumen.

Ein herkömmlicher Reinraumzähler mit einer Fehlzählrate von  $70 / \text{m}^3$  (Herstellerangabe) verfälscht schon bei der Überwachung eines Raumes der Reinheitsklasse 2 das Meßergebnis sehr stark. Die folgende Tabelle 3.1 zeigt die prozentualen Zählfehler  $Z_f$  dieses Partikelzählers für die Reinheitsklassen 0 bis 2 nach VDI 2083 Blatt1. Der Zählfehler  $Z_f$  berechnet sich aus dem Verhältnis der Fehlzählrate  $F_{Z,V}$  zur maximalen Partikelanzahlkonzentration  $C_{n,\text{max}}$  für die jeweilige Reinheitsklasse.

Tabelle 3.1 Auswirkung der Fehlzählrate  $F_{Z,V}$

| Reinheitsklasse<br>VDI 2083 | max. Konzentration<br>$C_{n,\text{max}}$      | Fehlzählrate eines<br>Reinraumzählers | Zählfehler<br>$Z_f$ |
|-----------------------------|---|---------------------------------------|---------------------|
| 2                           | $450 / \text{m}^3$ $D_p \geq 0,5 \mu\text{m}$ | $70 / \text{m}^3$                     | 15,6%               |
| 1                           | $45 / \text{m}^3$ $D_p \geq 0,5 \mu\text{m}$  | $70 / \text{m}^3$                     | 155,6%              |
| 0                           | $14 / \text{m}^3$ $D_p \geq 0,3 \mu\text{m}$  | $70 / \text{m}^3$                     | 500,0%              |

Die Werte der Tabelle 3.1 zeigen deutlich, daß das Meßergebnis schon bei der Überwachung ab Reinheitsklasse 2 stark verfälscht wird. Bei Überwachung von Räumen der Reinheitsklasse 0 und 1 ist der Fehler so groß, daß Aussagen über die Partikelanzahlkonzentration nicht gemacht werden können. Für dieses Beispiel begrenzt die Fehlzählrate den unteren Bereich der Partikelanzahlkonzentration auf  $450 / \text{m}^3$ .

Neben der Beeinflussung der Klassierung von Partikeln durch stochastische Anteile, ist noch der Gleichanteil der Störungen zu betrachten. Erhöht sich der Gleichanteil, so erhöht sich die Signalamplitude des Partikels am Ausgang des Detektors um den gleichen Betrag (Abbildung 3.9).

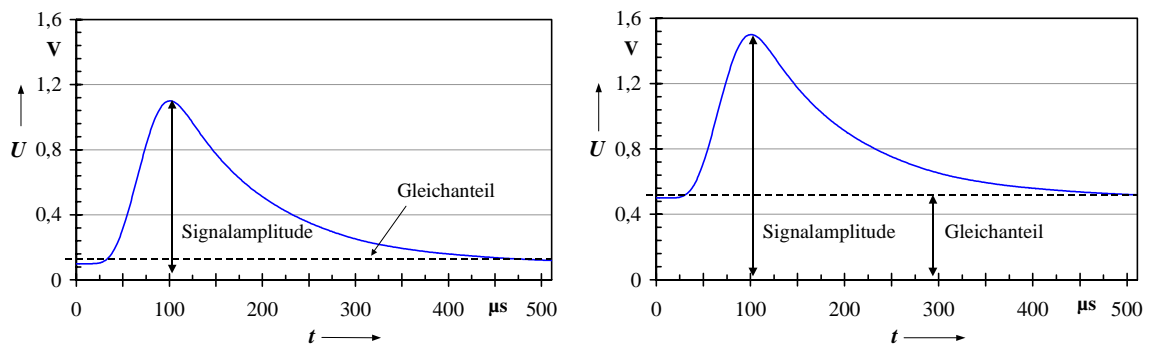


Abbildung 3.9 Auswirkung des Gleichanteils der Störungen auf das Partikelsignal

Die realen Größenverteilungen werden zu größeren Partikeldurchmessern verschoben angezeigt. Der Gleichanteil der Störungen hat einen weiteren Einflußfaktor auf den Meßbereich. Er verringert sich mit der Zunahme des Gleichanteils und kann sogar den Photodetektor übersteuern. Mit einem übersteuerten Photodetektor können keine Partikel detektiert werden.

Der Gleichanteil wird hauptsächlich durch das Hintergrundlicht in der Meßkammer erzeugt. Das Hintergrundlicht entsteht aus dem Streulicht von Oberflächen und den Molekülen im Meßvolumen, das dann in den Photodetektor gelangt. Die Linsen zur Fokussierung des Lichtstrahls und zur Detektion des Streulichtes besitzen eine raue Oberfläche, die einen Teil des Lichtes diffus reflektieren. Einen weiteren Streulichtanteil reflektiert die Strahlfalle, die auch eine raue Oberfläche besitzt und in der Praxis nicht die ganze Strahlleistung absorbieren kann.

Die Molekülstreuung im Meßvolumen ist vom thermodynamischen Zustand des Gases (Druck, Temperatur und Gasart) abhängig. Das Streulicht eines einzelnen Moleküls ist sehr gering, jedoch ist es wegen der großen Anzahl der Moleküle im Meßvolumen meßbar.

Optische Partikelzähler müssen u. a. Aerosole untersuchen, deren thermodynamischer Zustand des Trägergases von den Normalbedingungen stark abweicht. Der thermodynamische Zustand z.B. von Prozeßgasen zur Herstellung von Halbleitern weicht stark vom Normalzustand ab [38, 69]. Eine Veränderung des thermodynamischen Zustandes des Aerosols verändert die reflektierte Strahlleistung der Moleküle im Meßvolumen des Partikelzählers und kann sich negativ auf die Messung von Partikeln

auswirken [40]. Unter anderem kann sich der Meßbereich verkleinern, die Klassiergenauigkeit verschlechtern und die Fehlzählrate erhöhen [4].

Zur Fehlervermeidung in der Auswertung von Partikelsignalen müssen die Störungen verringert werden. Es ist deswegen notwendig, die einzelnen Störgrößen des Partikelzählers zu untersuchen.