

## **B Optische Partikelzähler**

In den folgenden Unterkapiteln wird der Versuchsaufbau zur Messung von Streulichtsignalen, das PC gestützte Meßsystem und der kommerzielle Partikelzähler LPC 3751 in seiner Funktion beschrieben.

### **B.1 Versuchsaufbau zur Messung von Streulicht**

Es ist ein optisches Meßsystem zur Detektion kleinster Partikel bei extremen Änderungen des thermodynamischen Zustandes entwickelt worden. Die Elektronik, Laserdiode und Photodetektor befinden sich außerhalb des Gehäuses. Sie sind somit von dem thermodynamischen Zustand des Aerosols unabhängig. Das Licht wird mit Lichtwellenleitern in bzw. aus dem Meßvolumen geführt. Die Abbildung B.1 zeigt den Versuchsaufbau zur Messung, Analyse und Filterung von Streulichtsignalen.

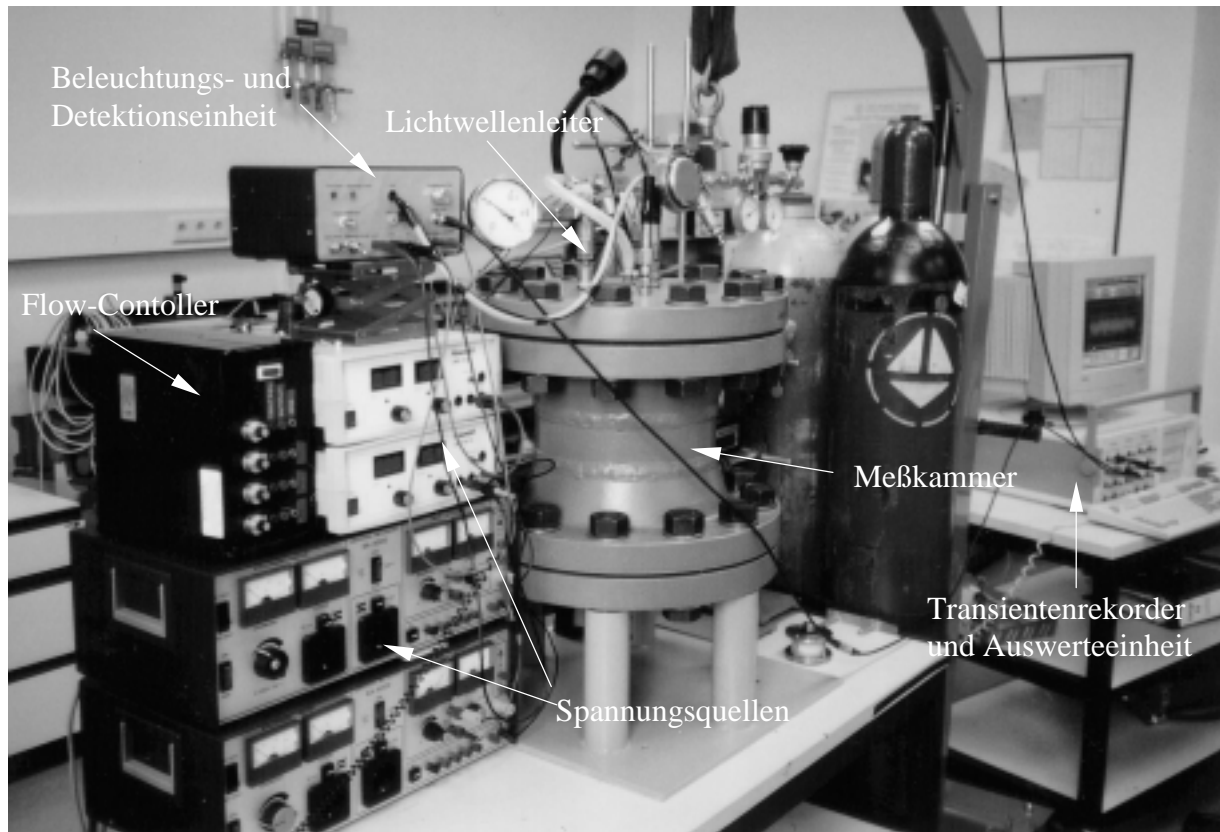


Abbildung B.1 Versuchsaufbau zur Messung, Analyse und Filterung von Streulichtsignalen

### B.1.1 Beleuchtung des Meßvolumens

Zur Beleuchtung des Meßvolumens wird eine Laserdiode verwendet, die eine maximale Lichtleistung von 40 mW bei einer Wellenlänge von 777 nm liefert. Der Laserstrahl wird kollimiert und in einen 1,5 m langen Lichtwellenleiter mit einem Außendurchmesser von 1 mm eingekoppelt. Beim Austreten des Lichtes beträgt die Lichtleistung nur noch 30 mW. Die Ein- und Auskopplungseffektivität liegt somit bei 75 %. Der ausgetretene Laserstrahl wird mit einer asphärischen Linse auf das Meßvolumen fokussiert. Die Lichtleistung in dem Meßvolumen beträgt 27,3 mW und besitzt einen Durchmesser von 2,45 mm. Der Durchmesser des Lasers wurde dadurch bestimmt, indem das Profil der Bestrahlungsstärke

mit einem Laser Beam Diagnostic System gemessen worden ist. Der Strahldurchmesser ist definiert durch den Abfall der Bestrahlungsstärke auf den  $1/e^2$ -fachen Wert des Maximalwertes einer Gaußschen Kurve. Die Abbildung B.2 zeigt das Profil der Bestrahlungsstärke des Laserstrahls mit einer gaußförmigen Verteilung in der Meßebe.

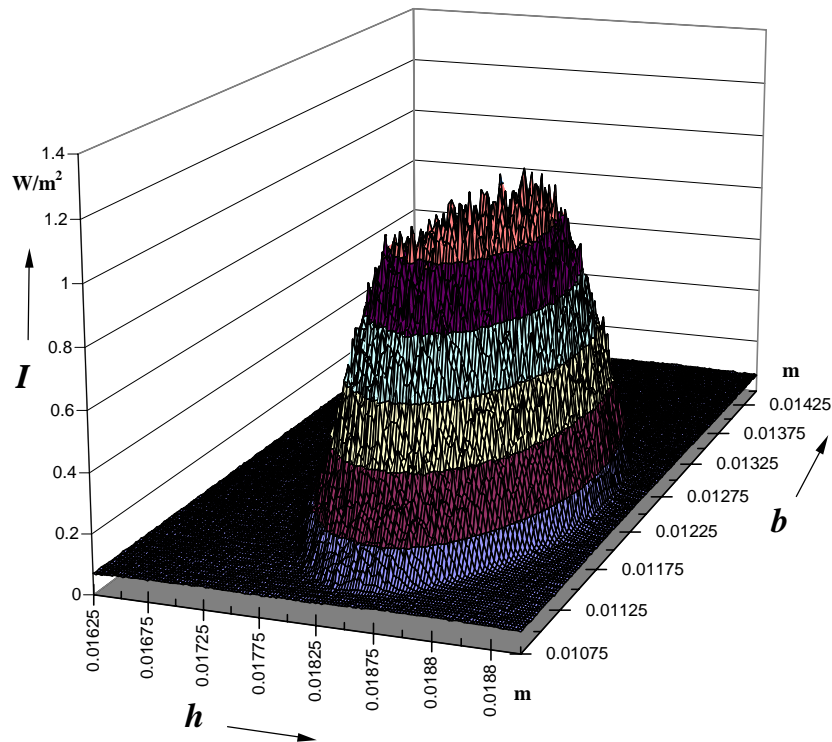


Abbildung B.2 *Dreidimensionale Darstellung des Profils der Bestrahlungsstärke  $I$  des Laserstrahls*

Zur Bestimmung des Durchmessers des Laserstrahls im Meßvolumen wird das Profil der Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit vom Abstand zur Linse gemessen. Die Messung zeigt, daß der Durchmesser des Laserstrahls zum Meßvolumen abnimmt und danach zunimmt (Tabelle B.1, Abbildung B.3). Der Durchmesser in dem Brennpunkt beträgt 2,45 mm.

Tabelle B.1 Durchmesser  $d_L$  des Laserstrahls in Abhängigkeit vom Abstand  $l_{\text{Abstand}}$  zur Optik

Abstand	Durchmesser des Laserstrahls
30 mm	4,09 mm
40 mm	2,67 mm
45 mm	2,52 mm
45,6 mm	2,45 mm
45,8 mm	2,49 mm
46 mm	2,53 mm
47 mm	2,61 mm
50 mm	3,38 mm

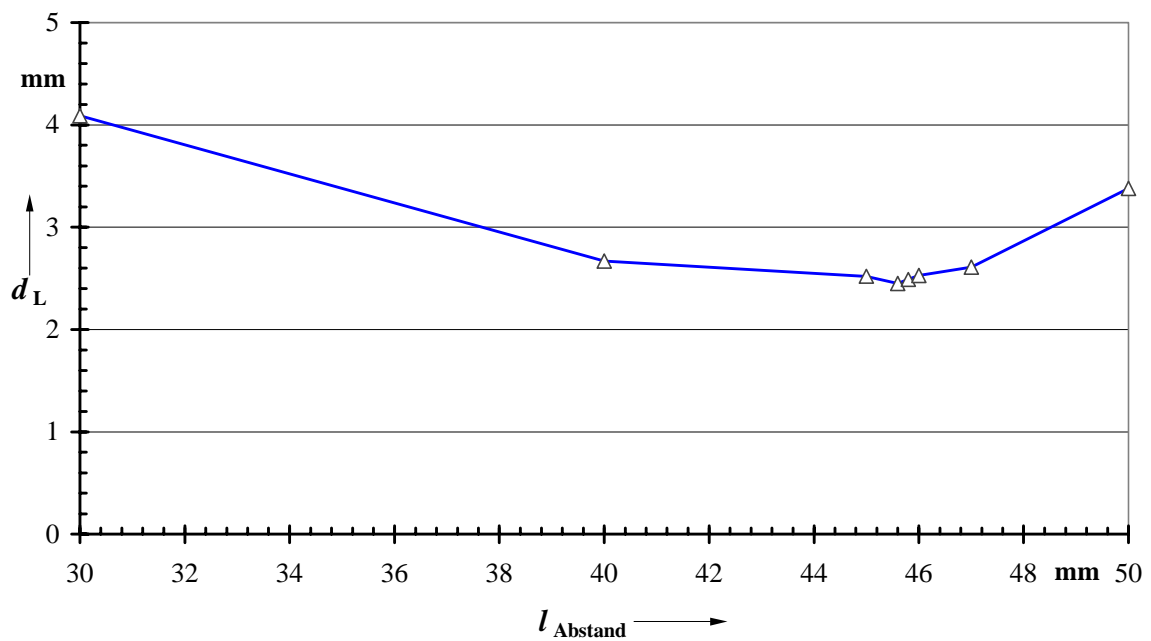


Abbildung B.3 Durchmesser  $d_L$  des Laserstrahls in Abhängigkeit vom Abstand  $l_{\text{Abstand}}$  zur Optik

Der Laserstrahl wird hinter dem Meßvolumen, im Abstand von 60 mm, durch eine Strahlfalle absorbiert.

### B.1.2 Streulichtdetektion

Das Streulicht vom Meßvolumen wird mit einem Achromat gesammelt und in einen Lichtwellenleiter (LWL) mit einem Durchmesser von 1 mm, eingekoppelt. Am Ende des LWL wandelt ein Photodetektor das Streulicht in elektrische Signale um.

Das Einkoppeln des Lichtes in den Lichtwellenleiter darf einen bestimmten Winkel nicht überschreiten, da er durch die numerische Apertur des LWL's festgesetzt wird. Die Größe der Linse und der maximale Winkel  $\alpha'$  legen den Abstand  $a'$  zwischen dem LWL und der Linsenordnung fest.

Die Linsenordnung zur Sammlung des Streulichtes ist so dimensioniert worden, daß der Streulichtwinkel  $\alpha$  maximal ist ( $90^\circ$ ). Die folgende Abbildung B.4 zeigt schematisch die Anordnung.

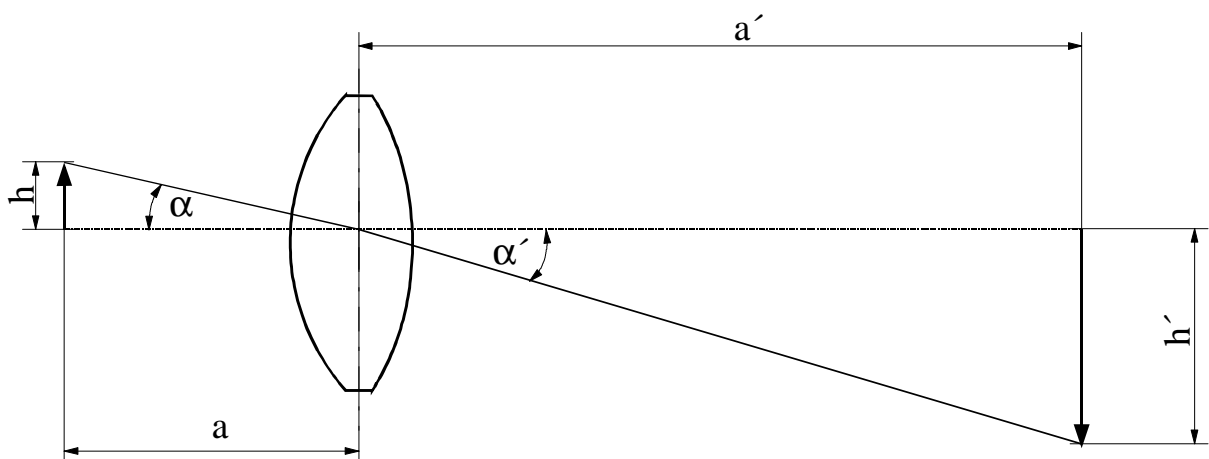


Abbildung B.4 Schematische Darstellung eines Linsensystems zur Sammlung und Fokussierung von Streulicht

Die gegebene Anordnung vergrößert die Objekte im Meßvolumen mit der Größe  $h$  wie ein Mikroskop um den Faktor  $\Gamma'$  auf die Größe  $h'$ . Der Faktor berechnet sich mit der Gleichung B.1 bzw. mit der Gleichung B.3.

$$\Gamma' = \frac{\tan \alpha'}{\tan \alpha} \quad (\text{B.1})$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{a}\right) \quad (\text{B.2})$$

$$\Gamma' = \frac{a'}{a} \quad (\text{B.3})$$

Mit den Gerätekenngößen  $a'=47,93$  mm,  $a=11,8$  mm und dem Radius des LWL's von  $h'=0,5$  mm ergibt sich ein Vergrößerungsfaktor von  $\Gamma'=4,062$  und  $h=123$   $\mu\text{m}$ . Das Meßvolumen hat somit einen Durchmesser von 246  $\mu\text{m}$ .

Eine absolut scharfe Abbildung in der Abbildungsebene ist nur dann möglich, wenn der Gegenstand sich in der Objektebene befindet [25, 26]. Punkte, die vor oder hinter der Objektebene liegen, werden in der Abbildungsebene als Unschärfekreis dargestellt. Bis zu einem Wert  $U'$  kann die Unschärfe toleriert werden. Die Grenzen  $a_h$  und  $a_v$  geben den Bereich an, der auf der Abbildungsebene scharf dargestellt wird (Abbildung B.5).

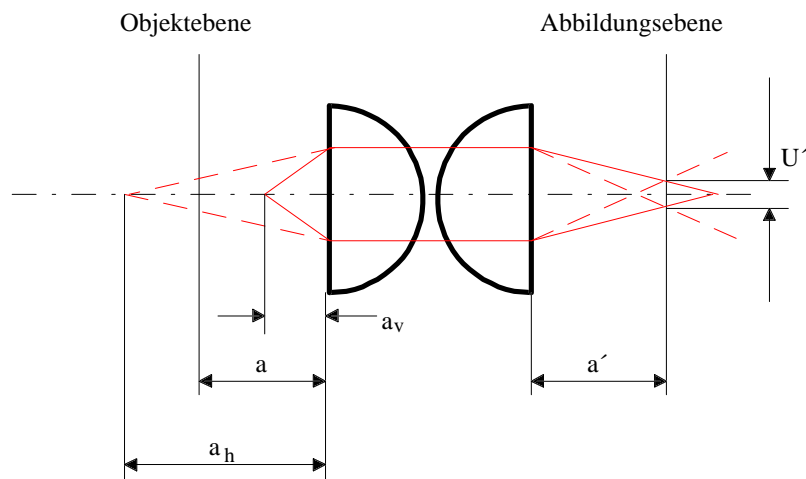


Abbildung B.5

Schärfentiefe  $\Delta a$

Die Grenzen werden durch

$$a_h = \frac{a \cdot a'^2}{a'^2 + u' \cdot K \cdot (a + a')} \quad \text{und} \quad (\text{B.4})$$

$$a_v = \frac{a \cdot a'^2}{a'^2 - u' \cdot K \cdot (a + a')} \quad (\text{B.5})$$

berechnet, wobei sich die Blendenzahl  $K$  aus der Division von der Brennweite  $a'$  und dem Objektivdurchmesser  $d$  berechnet.

$$K = \frac{a'}{d} \quad (\text{B.6})$$

Die *Schärfentiefe*  $\Delta a$  errechnet sich aus der Subtraktion der Grenzen.

$$\Delta a = a_v - a_h \quad (\text{B.7})$$

Für einen optischen Partikelzähler, der nach dem Streulichtmeßverfahren arbeitet, besitzt die Detektionsoberfläche den Durchmesser des Unschärfekreises. Auf dem Detektor fällt nur das Streulicht, das sich zwischen den Grenzen  $a_h$  und  $a_v$  befindet. Das Meßvolumen berechnet sich aus der Querschnittsfläche des Lichtstrahls und der Schärfentiefe.

Mit den gegebenen Werten berechnet sich die Schärfentiefe oder die Länge des Meßvolumens zu  $\Delta a = 4,71$  mm. Da der berechnete Wert größer ist als der Durchmesser des Laserstrahls, ist  $\Delta a$  gleich dem Durchmesser des Laserstrahls ( $\Delta a = 2,45$  mm).

Das Meßvolumen wird hier durch die Breite des Laserstrahls und mit dem Durchmesser des Lichtwellenleiters auf die Höhe von  $246 \mu\text{m}$  und auf eine Länge von  $2,45$  mm begrenzt. Die folgende Abbildung B.6 zeigt das Profil der Bestrahlungsstärke des Laserstrahls im Meßvolumen.

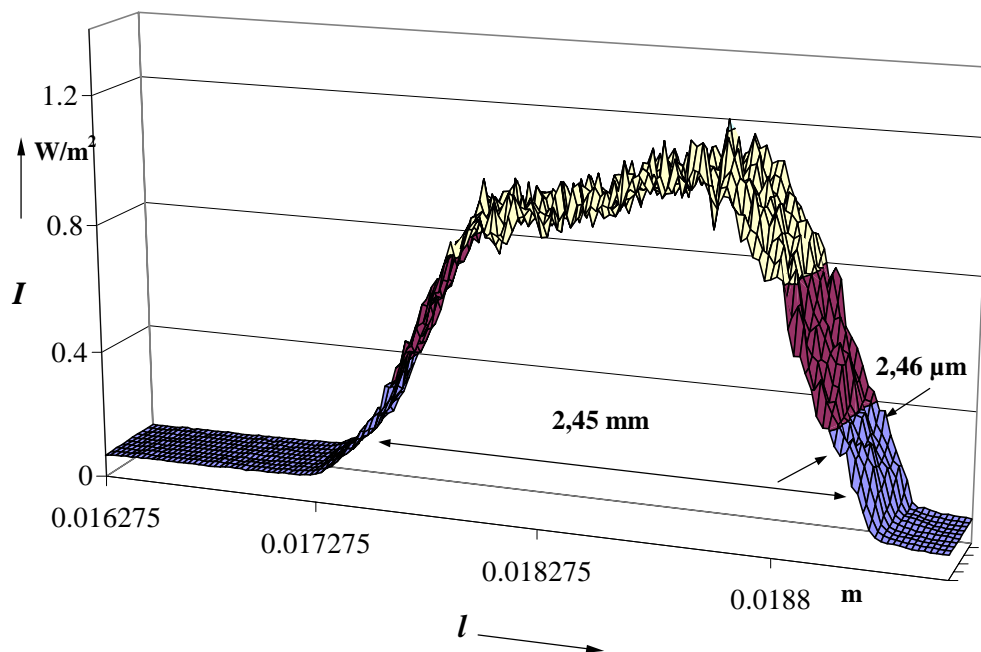


Abbildung B.6 Bestrahlungsstärkeprofil des Laserstrahls im Meßvolumen

### B.1.3 Gehäuse

Die Meßeinrichtung soll Streulicht von Aerosolen mit unterschiedlichen thermodynamischen Zuständen messen können. Die zu verändernden Zustände sind Druck, Temperatur und Gasart. Für die Variation des Druckes bis 50 bar muß das Gehäuse der Meßeinrichtung nach den AD-Merkblättern ausgelegt und berechnet werden. Zum Aufbau des Gehäuses sind zwei Vorschweißflansche, ein nahtloses Stahlrohr und zwei Blindflansche verwendet worden. Alle verwendeten Bauelemente entsprechen der DIN-Normen für den Nenndruck von 64 bar. Die Abbildung B.1 zeigt den Behälter auf seinem Gestell.



### **B.1.4 Aerosolführung**

Das Aerosol wird für die jeweiligen Messungen unterschiedlich dem Meßvolumen zugeführt. Zur Messung des Streulichtes von verschiedenen Gasen, bei unterschiedlichen Drücken müssen diese vorher gefiltert werden. Das Gas wird mit einem radial gefaltetem Filter gereinigt. Das Gas strömt in die Mitte des Filters ein und strömt radial heraus. Das radiale Ausströmen hat den Vorteil, daß das Gas in dem Behälter gut verteilt wird.

Zur Messung des Streulichtes in Abhängigkeit der Temperatur oder zur Funktionsprüfung mit Latex-Partikel, wird das Aerosol mit einer Kapillare bis zum Rand des Meßvolumens geleitet. Der Innendurchmesser der Kapillare beträgt nur 1 mm.

### **B.1.5 Justierung der Optik auf das Meßvolumen**

Die Optiken zur Fokussierung und zur Detektion müssen so justiert werden, daß die Brennpunkte sich im Meßvolumen befinden. Durch die Mitte des Meßvolumens ist ein Faden mit einem Durchmesser von  $25\mu\text{m}$  gespannt worden. Das Meßvolumen wurde dann jeweils von den optischen Systemen beleuchtet. Mit einer Mikroskopoptik ist dann das Meßvolumen mit dem Faden vergrößert auf eine Ebene abgebildet worden. Die Linsensysteme sind so eingestellt worden, daß das Meßvolumen und der Faden scharf auf die Ebene abgebildet wurden.

### B.1.6 Funktionsprüfung und Kalibrierung

Das optische Meßsystem ist mit unterschiedlichen Partikelgrößen kalibriert und mit der berechneten Kalibrierkurve verglichen worden. Die Abbildung B.7 zeigt die Kalibrierkurve des optischen Meßsystems für Latex-Partikel mit Brechungsindex von 1,59.

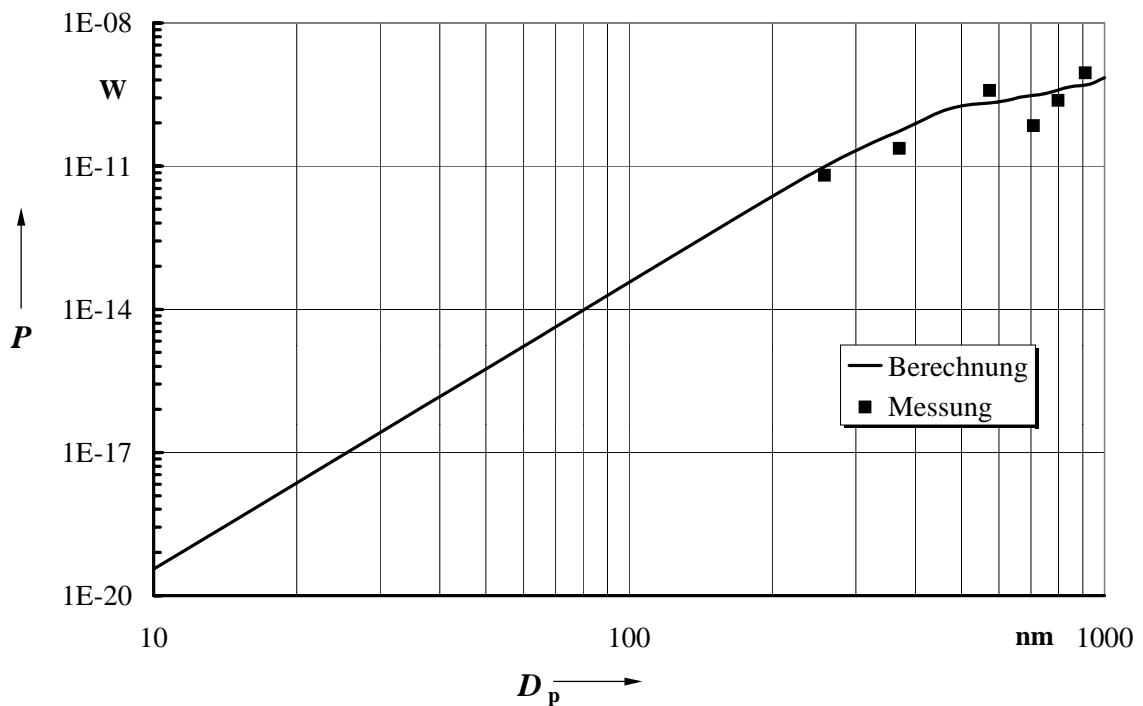


Abbildung B.7 *Kalibrierkurve der Eigenentwicklung*

Die Abbildung B.8 zeigt ein typisches gemessenes Partikelsignal mit einem Durchmesser von 899 nm. Der Verstärkungsfaktor des Photomultipliers ist bei dieser Messung auf 40 V/nW eingestellt worden. Der Verstärkungsfaktor  $V_{\text{PMT}}$  des Photomultipliers PMT 5751-50 von Hamamatsu kann mit der angelegten Hochspannung in der Röhre, bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 777$  nm, eine maximale Verstärkung von 200 V/nW erreichen (Abbildung B.9).

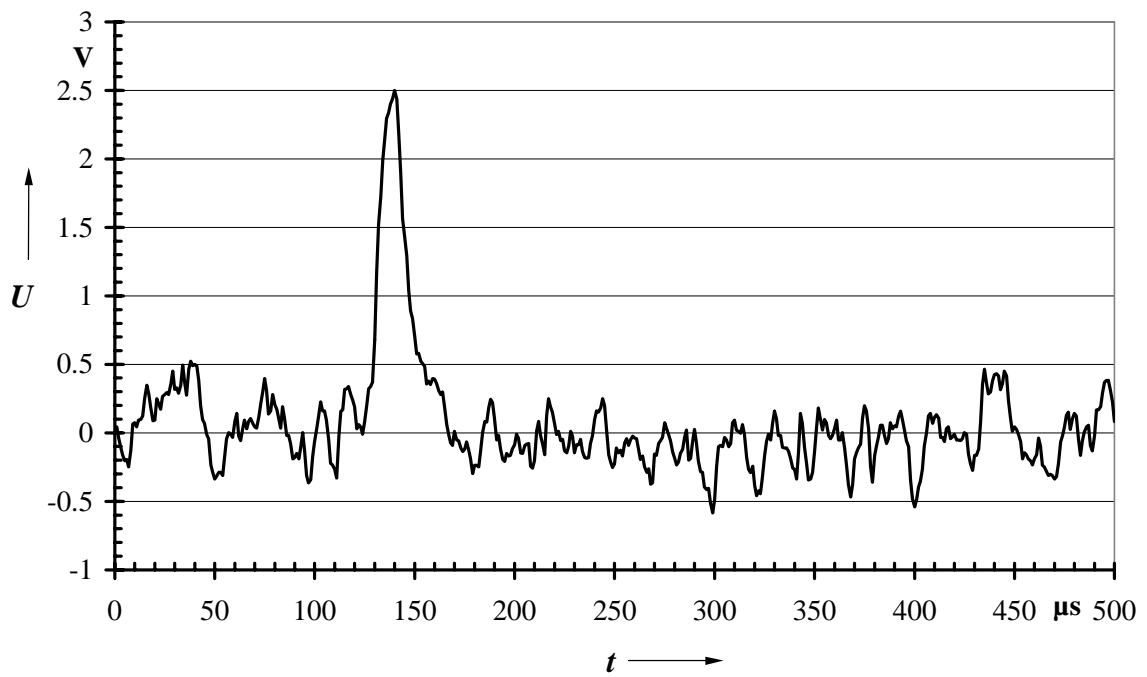


Abbildung B.8

Typisches Partikelsignal

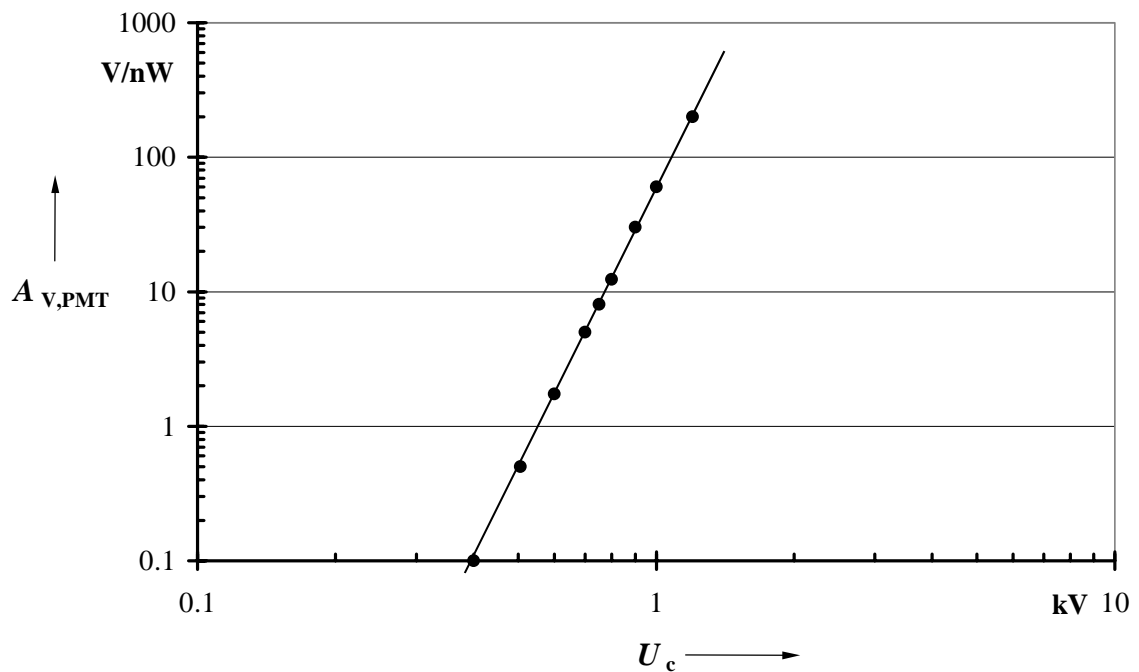


Abbildung B.9 Empfindlichkeit  $A_{V,PMT}$  des Photomultipliers in Abhängigkeit von der Spannung in der Röhre

### **B.1.7 Auswerteeinheit für die Streulichtsignale**

Zur Messung der Streulichtsignale ist ein Transientenrekorder aufgebaut worden. Er besteht aus einem herkömmlichen PC mit einem A/D-Wandler und einem Meßverstärker (Abbildung B.10). Der A/D-Wandler diskretisiert die analogen Signale mit einer maximalen Abtastfrequenz von 1 MHz. Die abgetasteten Werte werden in einem Speicher (FIFO) zwischengespeichert und nach der Messung in den Speicher des Computers eingelesen. Die Signalgemische werden nach der Messung mit dem Transientenrekorder analysiert und gefiltert

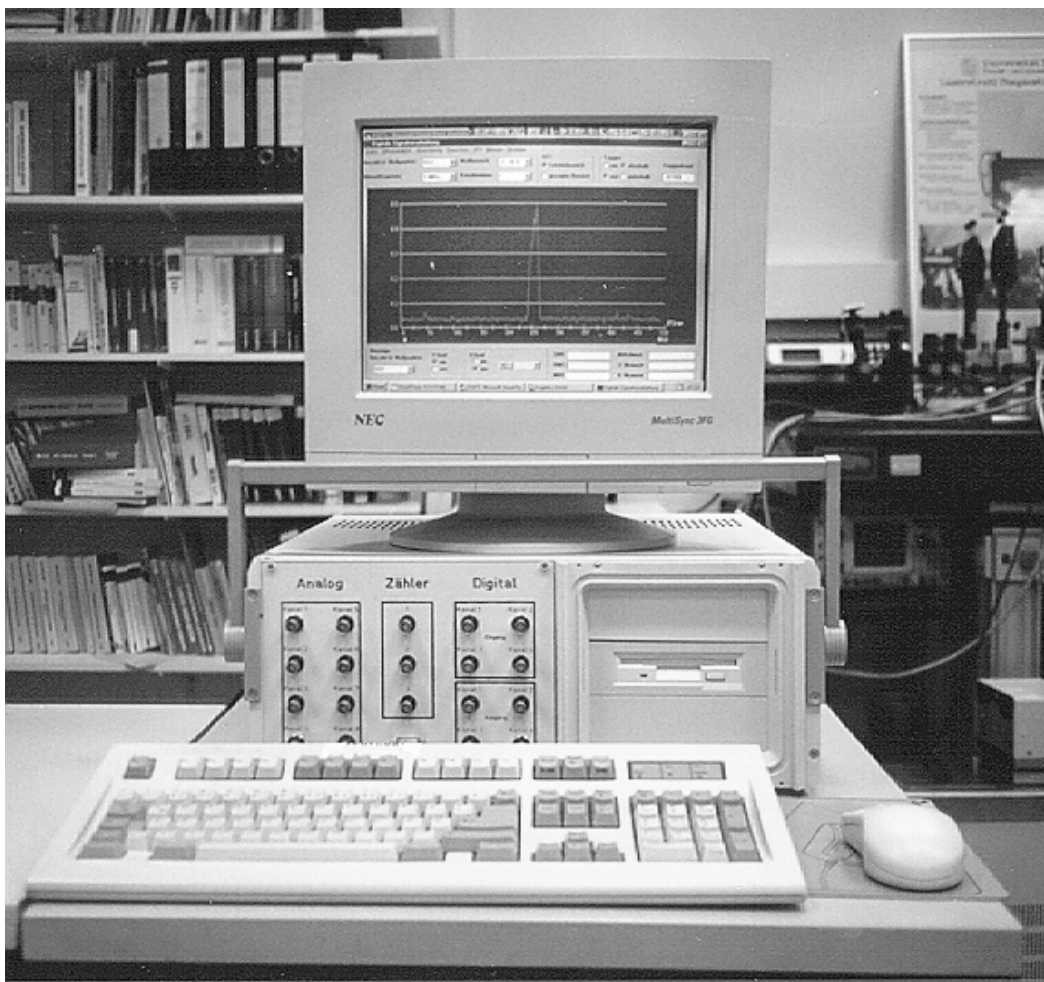


Abbildung B.10 *Transientenrekorder mit Algorithmen zur Analyse und Filterung von Streulichtsignalen*

## B.2 Kommerzieller optischer Partikelzähler LPC 3751 von TSI

Der optische Partikelzähler LPC 3751 der Firma TSI arbeitet nach dem Streulichtprinzip (Abbildung B.11). Er ist für die Überwachung von Reinräumen ausgelegt worden. Seine Fehlzählrate beträgt  $3,5 \text{ Partikel/m}^3$  und besitzt zwei Größenklassen  $0,5 \mu\text{m}$  und  $5 \mu\text{m}$ . Der Verstärkungsfaktor des Detektors und des Verstärkers beträgt  $73,5 \text{ mV/nW}$  bei einer Bandbreite von  $12 \text{ kHz}$ .

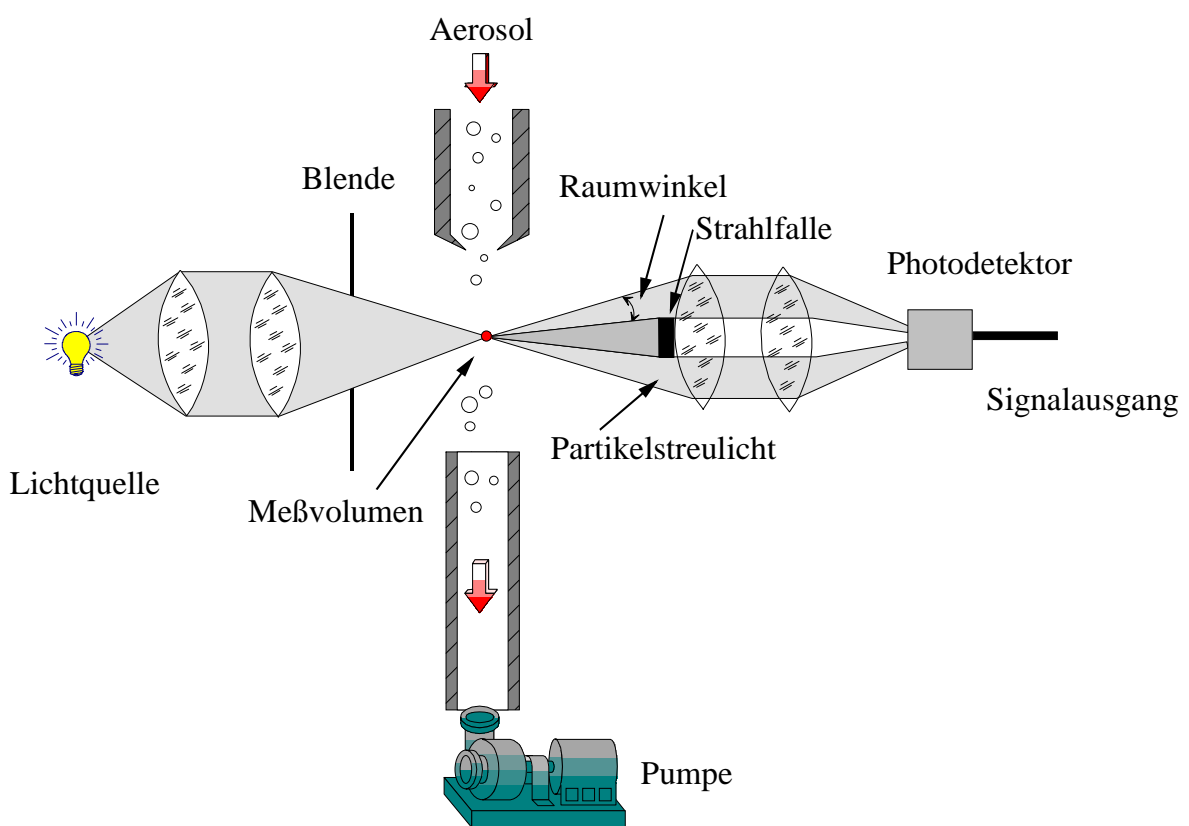


Abbildung B.11 Schematischer Aufbau des optischen Partikelzählers LPC 3751

Die berechnete Kalibrierkurve des Partikelzählers LPC 3751 für Latex-Partikel mit dem Brechungsindex von  $1,59$  ist in den Abbildungen B.12 und B.13 dargestellt. Sie ist mit synthetisch erzeugten Kalibrier aerosolen, die eine definierte Partikelgröße besitzen, überprüft worden.