

## **6 Nutzen der Reduzierung von Störquellen und der Signalverarbeitungsmethoden für optische Partikelzähler**

In den Kapiteln 4.4 und 5 sind Methoden, die den Signal-Rauschabstand vergrößern, vorgestellt und miteinander verglichen worden. Die Verbesserung des Signal-Rauschabstandes gibt jedoch keinen direkten Aufschluß darüber, in welchem Maß die Qualitätsmerkmale des Partikelzählers sich verbessert haben.

Die vorgestellten Signalverarbeitungsmethoden und Möglichkeiten zur Reduzierung des Rauschens an den Quellen, werden in diesem Kapitel auf den Einfluß auf die Qualitätsmerkmale eines kommerziellen optischen Partikelzählers (LPC 3751 von der Firma TSI, Anhang B.2 ) und der Eigenentwicklung untersucht.

Die Eigenentwicklung entspricht dem selben Aufbau wie bei der Messung der Molekülstreuung und wird im Anhang B.1 näher beschrieben.

Für die Untersuchung der Qualitätsmerkmale eignet sich das gemessene Signalgemisch eines realen Aerosols mit definierten Eigenschaften. Aerosole können z.B. durch eine Zerstäubung einer Suspension, bestehend aus künstlichen Partikeln mit einem bestimmten Durchmesser und reinem Wasser, künstlich hergestellt werden. Sie besitzen jedoch immer eine Partikelgrößenverteilung mit einer Varianz, und ihre Anzahlkonzentration unterliegt zeitliche Schwankungen. Es kann deshalb keine Aussage darüber gemacht werden, zu welchem Zeitpunkt ein Partikelsignal vorhanden ist und welche Größe es besitzt. Dadurch kann nicht festgestellt werden, ob die Signalverarbeitung das Signal richtig ausgewertet hat.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein simuliertes Signalgemisch zu verwenden. Das Signalgemisch enthält das gemessene Rauschen des jeweiligen Partikelzählers und die meßtechnisch ermittelten Partikelsignale. Die Anzahl, der Ort und die Höhe der Partikelsignale sind bekannt und können variiert werden. Die Zählrate,

Klassiergenauigkeit, das Auflösungsvermögen und die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße können vor und nach der Filterung genau berechnet werden. Die Signalverarbeitungsmethoden und die Möglichkeiten zur Reduzierung des Rauschens an den dominanten Quellen, können bzgl. der Erweiterung des Meßbereichs, exakt miteinander verglichen werden.

Für die folgenden Untersuchungen sind 524.288 digitalisierte Meßwerte des Rauschens mit 511 überlagerten Partikelsignalen verwendet und mit einem Schwellwertvergleich ausgewertet worden. Die Signalamplituden der Partikel werden mit der jeweiligen Kalibrierkurve des optischen Partikelzählers (Abbildung B.7 und Abbildung B.12) in die richtige Partikelgröße umgerechnet.

Der Schwellwert des Komparators für die Simulationen ist auf der Basis der Fehlzählrate des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 berechnet worden.

Seine Fehlzählrate von  $3,5 \text{ Partikel/m}^3$  (Herstellerangabe) entspricht, bei einer maximal zu messenden Partikelanzahlkonzentration von  $3,5 \cdot 10^6 \text{ Partikel/m}^3$ , eine Fehlerwahrscheinlichkeit von  $10^{-6}$ . Mit dieser Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet sich der Schwellwert mit Gleichung 5.15 zu dem 5,92-fachen Wert des Effektivwertes bzw. der Standardabweichung des Rauschens.

Zur Berechnung des Schwellwertes ist das Rauschen als gaußverteilt angesehen worden. Ein Photomultiplier mit einer großen Anzahl von Störimpulsen (Abbildung 4.7) besitzt jedoch eine Wahrscheinlichkeitsdichte, die von der Gaußverteilung verschieden ist. Im positiven Spannungsbereich tritt eine größere Anzahl von Spannungswerten durch die Störimpulse auf als im negativen Bereich (Abbildung 5.5). Deswegen werden oberhalb des Schwellwertes mehr Signalamplituden gezählt, als bei einem gaußförmigen Rauschen.

Die Abbildung 6.1 stellt die relative Häufigkeitsverteilung  $f_n(U)$  der verrauschten Signalamplituden vom Photomultiplier vor und nach unterschiedlichen Filterungen dar. Die ursprünglichen unverrauschten Signalamplituden betragen 3 V.

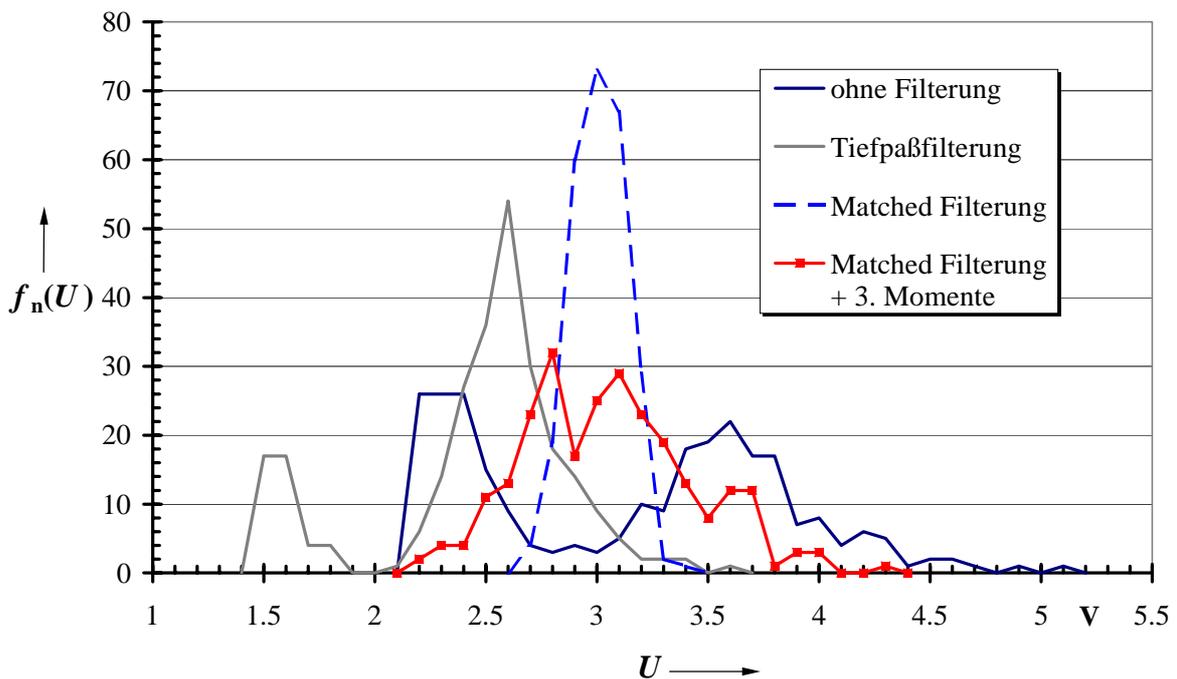


Abbildung 6.1 Relative Häufigkeitsverteilung  $f_n(U)$  von Partikelsignalen vor Filterung, nach Tiefpaßfilterung, nach Matched Filterung und nach Matched Filterung mit Berechnung der dritten Momente

Obwohl der Schwellwert für eine geringe Fehlzählrate bzw. Fehlerwahrscheinlichkeit berechnet worden ist, werden vom Komparator eine große Anzahl von Fehlimpulsen, aufgrund der Störimpulse vom Photomultiplier, gezählt. Die vorgegebene Fehlzählrate kann dann nur mit Erhöhung des Schwellwertes erreicht werden.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte des Rauschens verändert sich durch die Matched Filterung zu einer nahezu gaußförmigen (Abbildung 5.6). Es werden keine Fehlimpulse aufgrund der Störimpulse gezählt, so daß die Höhe des berechneten Schwellwertes für die vorgegebenen Fehlzählrate beibehalten werden kann.

Weiterhin ist zu erkennen, daß die Verteilung nach einer Matched Filterung schmaler geworden ist und mit der Berechnung der dritten Momente wieder breiter. Die Anzahlverteilung nach der Matched Filterung mit Berechnung der dritten Momente ist jedoch immer noch deutlich schmaler als vor der Filterung und nach der Tiefpaßfilterung.

## 6.1 Genauigkeit der Größenanalyse

Die Genauigkeit der Größenanalyse wird aus dem Verhältnis des Mittelwertes der gesamten ermittelten Partikelgrößen mit der Signalverarbeitung zu der künstlich erzeugten Partikelgröße berechnet.

Die Abbildung 6.2 stellt die Klassiergenauigkeit  $K_G$  des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit von der Partikelgröße  $D_p$  mit und ohne Rauschreduzierung an der dominanten Störquelle (Photodiode) dar.

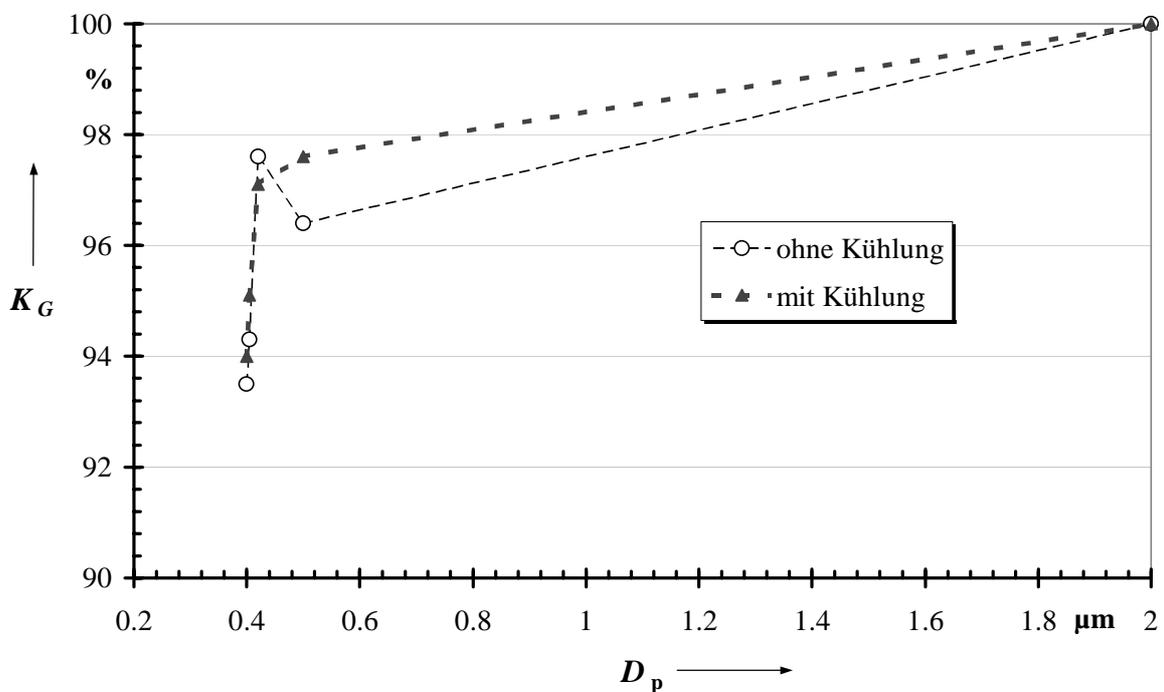


Abbildung 6.2 Klassiergenauigkeit  $K_G$  des LPC 3751 in Abhängigkeit von der Partikelgröße mit und ohne Reduzierung des Rauschens durch Kühlung des Photodetektors von 22 °C auf -20 °C

Die Abbildung 6.2 zeigt, daß die Partikel mit Kühlung der Photodiode um einen kleinen Faktor genauer klassiert werden. Die Klassiergenauigkeit nimmt mit abnehmender Partikelgröße ab, weil der Signal-Rauschabstand sich mit kleineren Partikelgrößen verringert.

Die Abbildung 6.3 zeigt die Klassiergenauigkeit der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Partikelgröße für verschiedene Strahlfallen. Für die Messung des Rauschens mit unterschiedlichen Strahlfallen ist ein Photomultiplier (PMT 5702-02, Kapitel 4.2.1.1) mit einer geringeren Verstärkung verwendet worden. Mit dem ursprünglich eingesetzten Photomultiplier (PMT 5701-50), mit einem sehr hohen Verstärkungsfaktor konnte das Streulicht in der Meßkammer nicht mehr gemessen werden. Die Strahlfalle aus Schaumstoff und der Kegel streuen soviel Licht, daß der Photodetektor übersteuert wird.

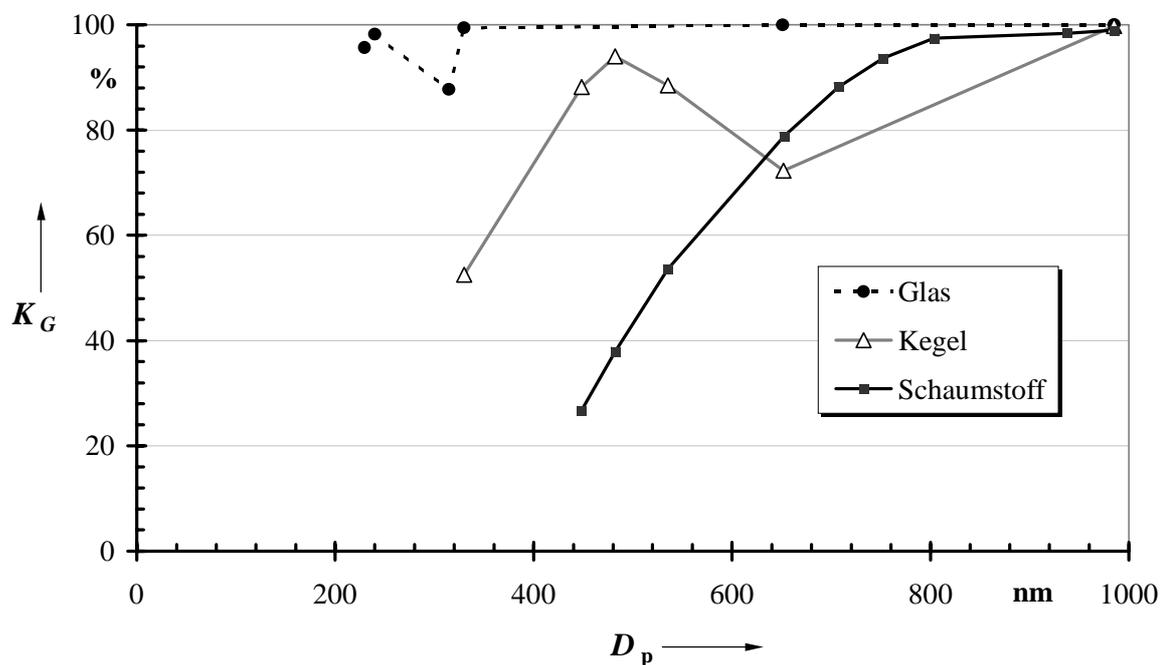


Abbildung 6.3 Klassiergenauigkeit  $K_G$  der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Partikelgröße für verschiedene Strahlfallen

Die Klassiergenauigkeit der Eigenentwicklung (Abbildung 6.4) ist mit der Strahlfalle aus lichtabsorbierendem Glas höher als mit Schaumstoff und Kegel. Das lichtabsorbierende Glas streut am wenigsten Licht und erzeugt im Photomultiplier ein geringeres Schrotrauschen. Das Gesamtrauschen des Partikelzählers ist kleiner und der Signal-Rauschabstand größer. Die Signalamplituden sind weniger verrauscht, und die Klassiergenauigkeit ist höher.

Die folgende Abbildung 6.4 stellt die Klassiergenauigkeit der Eigenentwicklung in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser, vor und nach einer Filterung, dar. Die Filterung mit dem Matched Filter ist mit den Filterordnungen 256 und 512 durchgeführt worden. Es wurde der Photomultiplier PMT 5701-50 mit der größeren Empfindlichkeit verwendet.

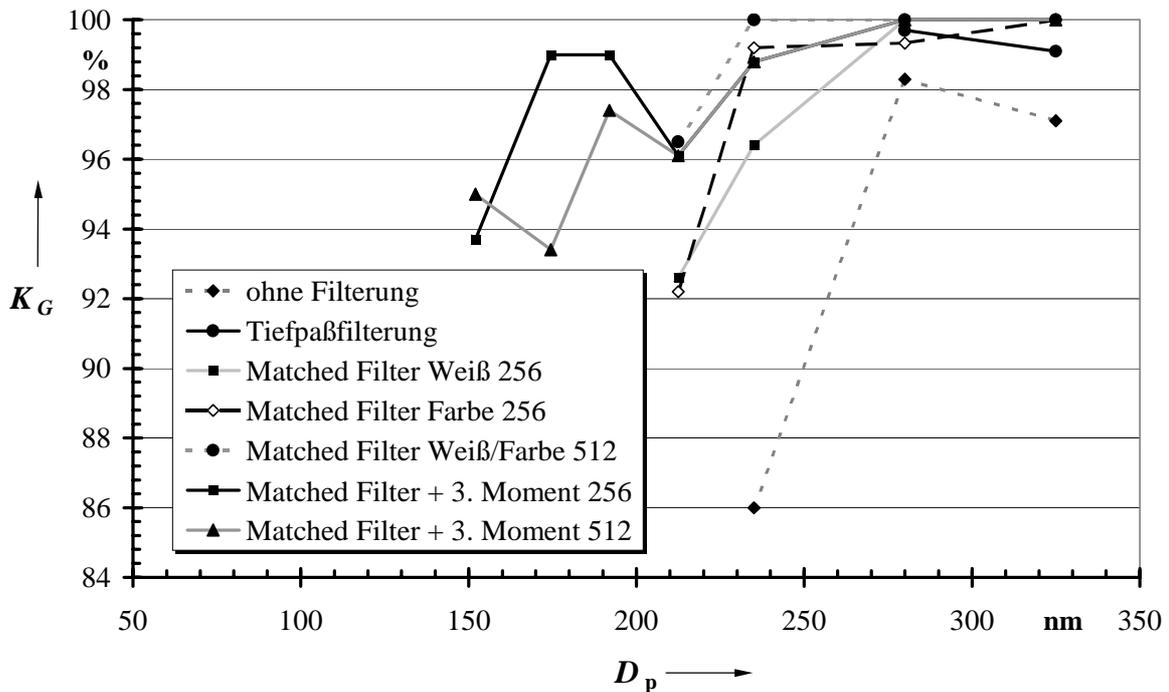


Abbildung 6.4 Klassiergenauigkeit  $K_G$  der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Signalverarbeitungsmethode und vom Partikeldurchmesser  $D_p$

Die Klassiergenauigkeit nimmt bei allen Signalverarbeitungsmethoden mit kleiner werdenden Partikelgröße bzw. Signalamplitude ab. Mit der digitalen Filterung des Signalgemisches erhöht sich die Klassiergenauigkeit gegenüber der Tiefpaßfilterung.

Die maximale Abweichung der ermittelten Partikelgröße von der realen liegt bei der digitalen Filterung unter 8 % und entspricht hier einem absoluten Fehler von 18,4 nm. Ohne Filterung beträgt die maximale Abweichung 14 % und entspricht einer Partikelgröße von 35 nm.

Die folgende Abbildung 6.5 stellt die Klassiergenauigkeit des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser, vor und nach einer Filterung, dar. Der Volumenstrom des LPC 3751 ist fest vorgegeben und somit auch die Signallänge des Partikels. Die Filterung mit dem Matched Filter ist mit der Filterordnung 128, das dem realen Partikelsignal entspricht, durchgeführt worden.

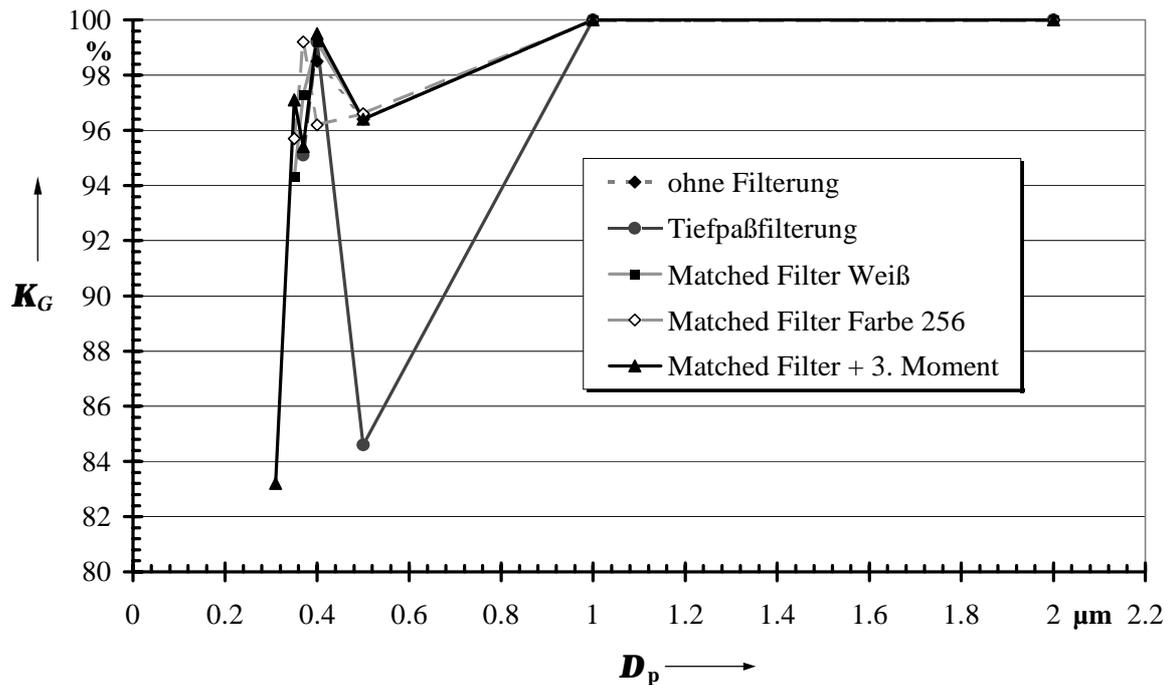


Abbildung 6.5 Klassiergenauigkeit  $K_G$  des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit von der Signalverarbeitungsmethode und vom Partikeldurchmesser  $D_p$

Die Klassiergenauigkeit ist in der Regel mit der digitalen Filterung des Signalgemisches höher als mit einer Tiefpaßfilterung und ohne Filterung.

Die maximale Abweichung der ermittelten Partikelgröße von der realen liegt bei der digitalen Filterung unter 18 % (bei  $D_p = 310$  nm) und entspricht hier einem absoluten Fehler von 52,1 nm. Ohne Filterung beträgt die maximale Abweichung 3,6 % (bei  $D_p = 500$  nm) und entspricht einer Partikelgröße von 18 nm. Die relativ große Abweichung nach der Matched Filterung mit Berechnung der dritten Momente liegt bei einer kleinen

Partikelgröße vor, bei der der Signal-Rauschabstand sehr viel kleiner ist als bei der maximalen Abweichung ohne eine Filterung.

## 6.2 Verbreiterung der realen Partikelgrößenverteilung

Das Auflösungsvermögen des Partikelzählers wird durch die Verbreiterung der Partikelgrößenverteilung, aufgrund des Rauschens, reduziert. Als Maß für das Auflösungsvermögen wird die relative Standardabweichung  $s_{\text{rel}}$  der durch die Simulation ermittelten Partikelgrößen berechnet.

Die folgende Abbildung 6.6 stellt die relative Standardabweichung als Maß für das Auflösungsvermögen des kommerziellen Partikelzähler (LPC 3751) in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser, vor und nach der Kühlung der Photodiode, dar. Das entstandene Gesamttrauschen durch die Kühlung ist wie im Kapitel 6.1 simuliert worden.

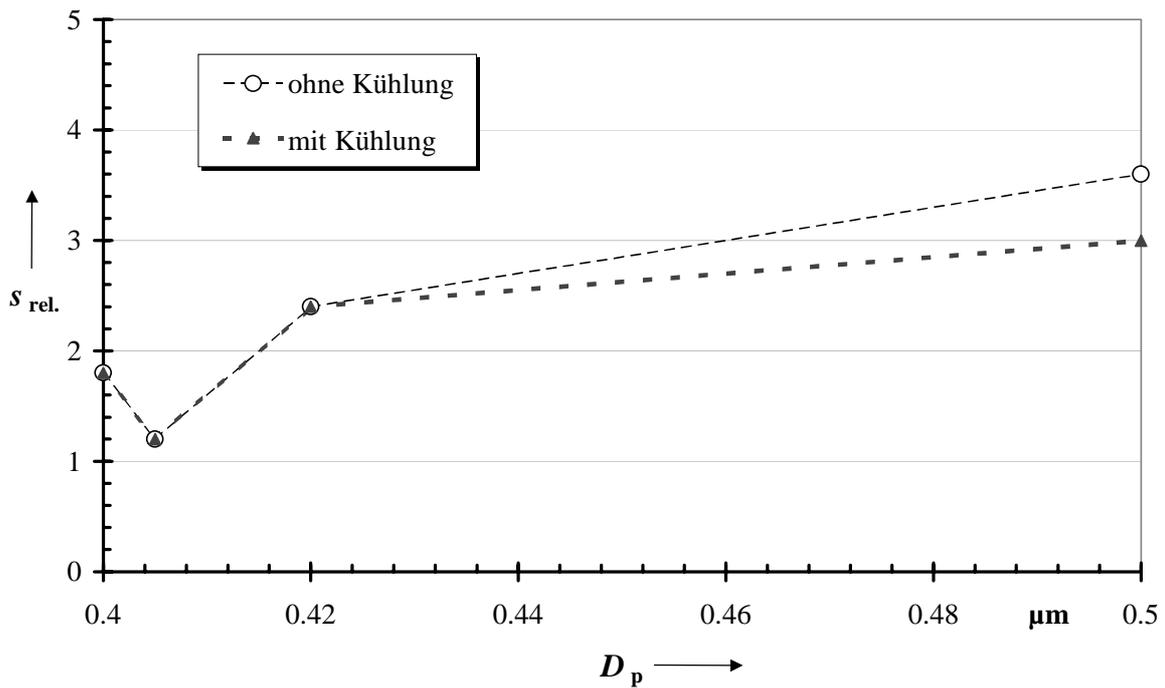


Abbildung 6.6 Auflösungsvermögen  $s_{rel.}$  des LPC 3751 in Abhängigkeit von der Partikelgröße  $D_p$  mit und ohne Reduzierung des Rauschens durch Kühlung des Photodetektors von 22 °C auf -20 °C

Das Auflösungsvermögen des Partikelzählers LPC 3751 hat sich trotz Kühlung nahezu nicht verändert. Mit der Partikelgröße nimmt das Auflösungsvermögen ab.

Die Abbildung 6.7 stellt die relative Standardabweichung als Maß für das Auflösungsvermögen der Eigenentwicklung mit dem Photomultiplier PMT 5702-02 in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser für verschiedene Strahlfallen dar. Der PMT 5702-02 mit der geringeren Empfindlichkeit ist deshalb verwendet worden, weil die Strahlfallen Kegel und Schaumstoff sehr viel Licht streuen und den Photomultiplier PMT 5701-50 übersteuern.

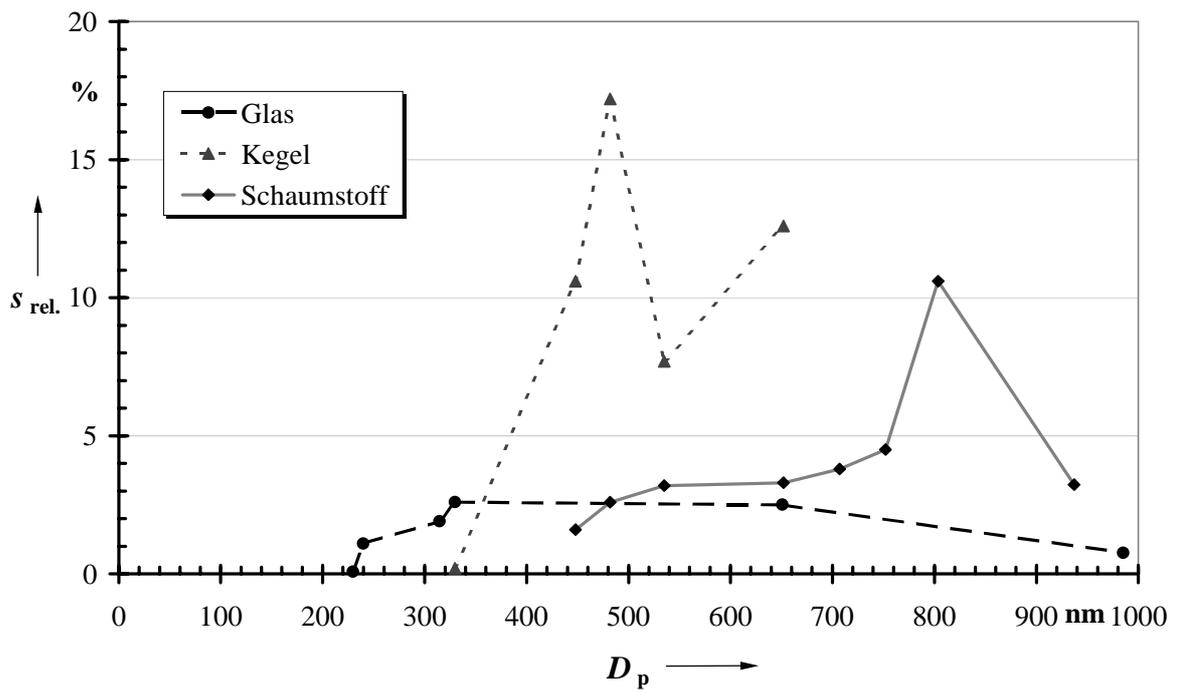


Abbildung 6.7 Auflösungsvermögen  $s_{rel.}$  der Eigenentwicklung in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser  $D_p$  für verschiedene eingesetzte Strahlfallen

Die folgende Abbildung 6.8 stellt die relative Standardabweichung als Maß für das Auflösungsvermögen der Eigenentwicklung in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser, vor und nach einer Filterung, dar. Als Photodetektor wurde der Photomultiplier PMT 5701-50 eingesetzt.

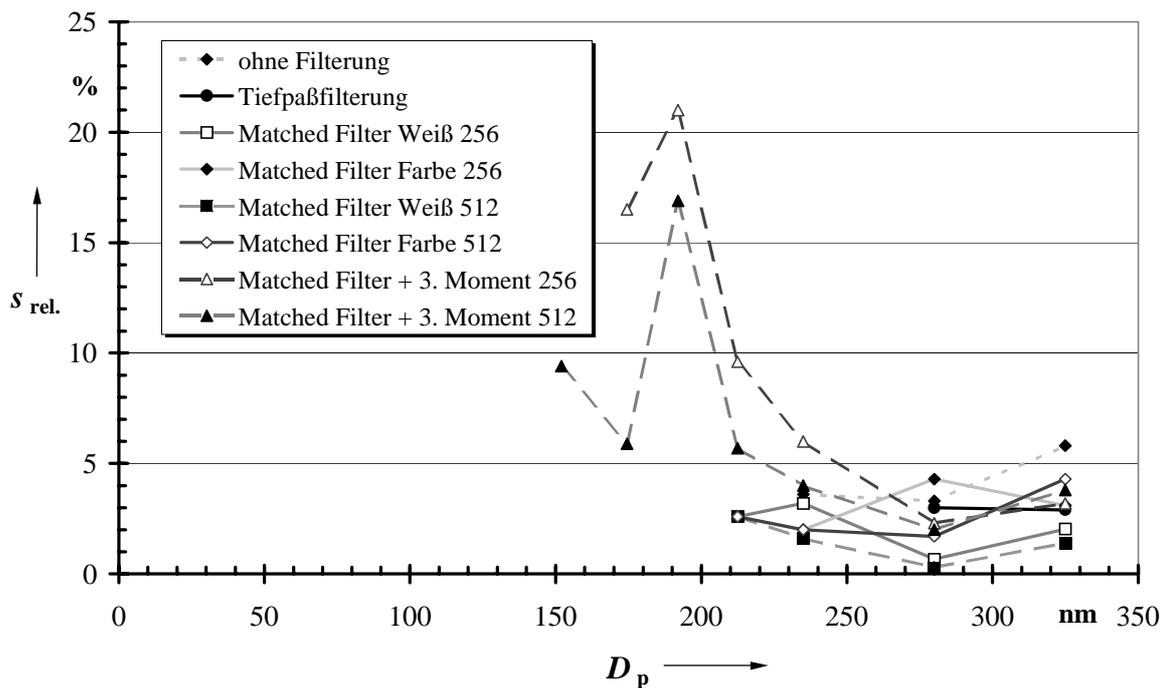


Abbildung 6.8 Auflösungsvermögen  $s_{rel.}$  der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Signalverarbeitungsmethode und vom Partikeldurchmesser  $D_p$

Im Größenbereich von 250 nm bis 350 nm sind die Standardabweichungen der Verteilungen, nach den digitalen Signalverarbeitungsmethoden in der Regel kleiner als bei den herkömmlichen Methoden und somit ist auch das Auflösungsvermögen größer. Unterhalb von 250 nm nimmt die Standardabweichung nach der Matched Filtering mit Berechnung der dritten Momente relativ stark zu, da der Signal-Rauschabstand in diesem Bereich sehr gering ist und unterhalb von 5 dB liegt. Mit Erhöhung der Filterordnung verringert sich zusätzlich die Standardabweichung und das Auflösungsvermögen erhöht sich.

Die folgende Abbildung 6.9 stellt die relative Standardabweichung als Maß für das Auflösungsvermögen des Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser, vor und nach einer Filterung, dar. Die digitalen Filtermethoden sind dem Partikelsignal des LPC 3751 angepaßt.

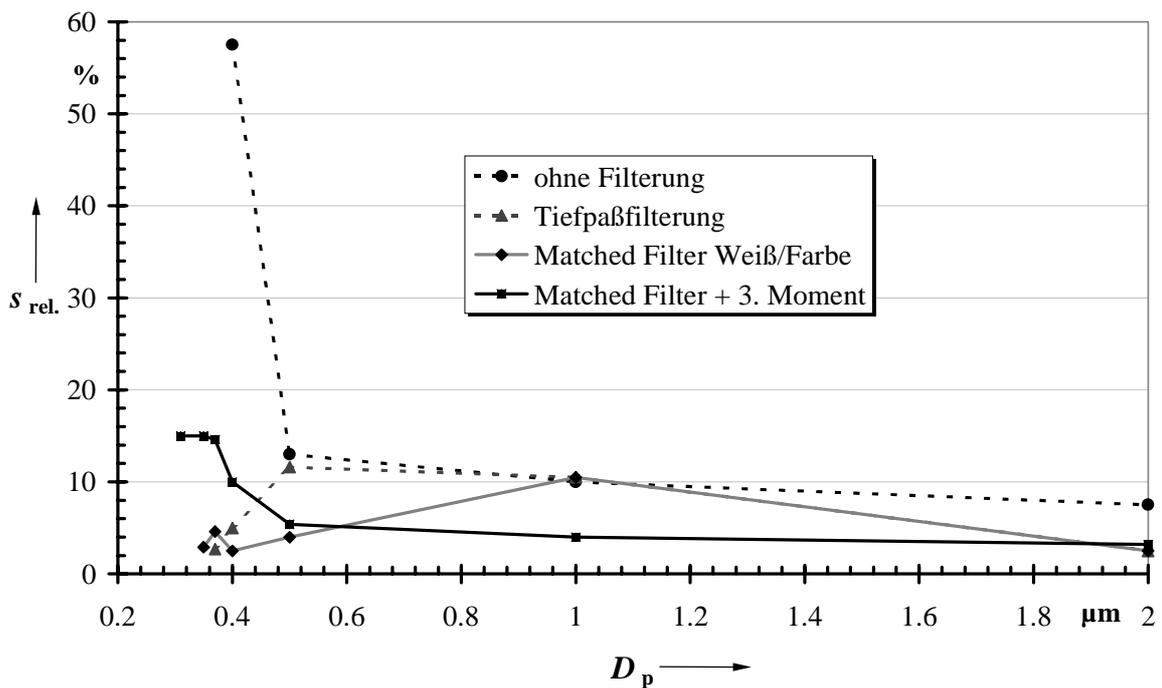


Abbildung 6.9 Auflösungsvermögen  $s_{rel.}$  des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit von der Signalverarbeitungsmethode und vom Partikeldurchmesser  $D_p$

Im Größenbereich von 0,5  $\mu\text{m}$  bis 2  $\mu\text{m}$  sind die Standardabweichungen der Verteilungen nach den digitalen Signalverarbeitungsmethoden kleiner als bei den herkömmlichen Methoden und somit ist auch das Auflösungsvermögen größer. Unterhalb von 0,5  $\mu\text{m}$  nimmt die Standardabweichung nach der Matched Filterung mit Berechnung der dritten Momente zu, da der Signal-Rauschabstand in diesem Bereich sehr gering ist und unterhalb von 5 dB liegt.

Das Auflösungsvermögen bzw. die relative Standardabweichung nach der Filterung mit einem Matched Filter für weißes und farbiges Rauschen ist fast identisch.

### 6.3 Zählwirkungsgrad

Der Zählwirkungsgrad  $\eta$  gibt an, wieviel Prozent der tatsächlich vorhandenen Partikel vom Partikelzähler gezählt werden.

Zur Berechnung des Zählwirkungsgrades ist die Anzahl der ermittelten Partikel durch die Signalverarbeitung auf die Gesamtanzahl (511) der simulierten Partikel ins Verhältnis gesetzt worden.

Die Abbildung 6.10 stellt den Zählwirkungsgrad  $\eta$  des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit von der Partikelgröße mit und ohne Rauschreduzierung an der dominanten Störquelle dar.

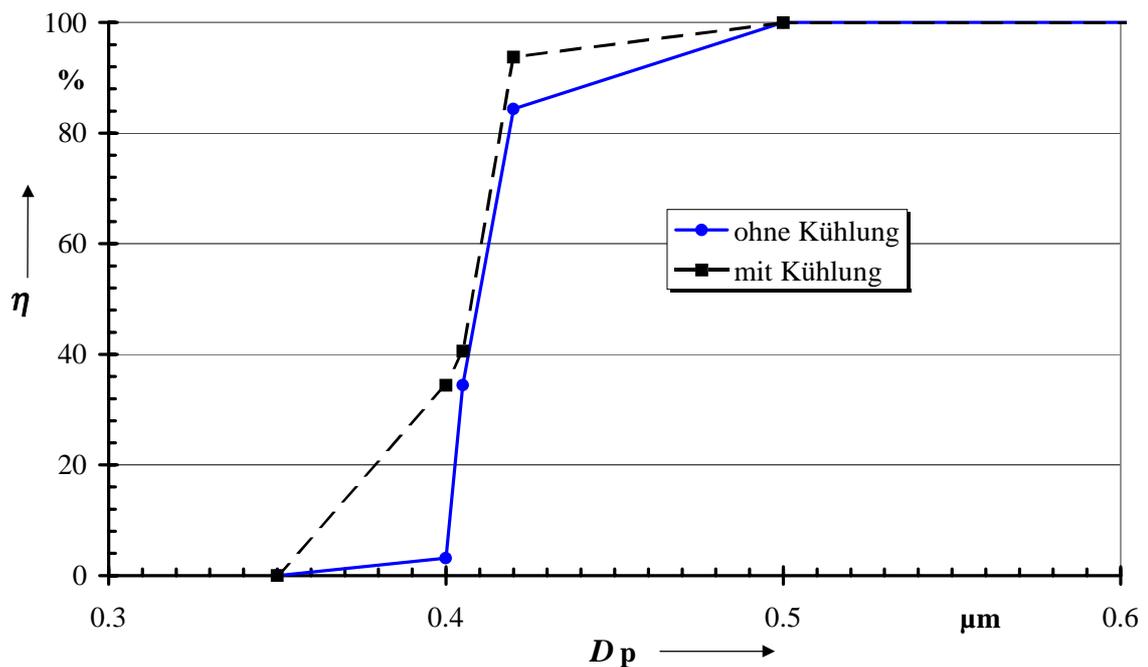


Abbildung 6.10 Zählwirkungsgrad  $\eta$  des LPC 3751 in Abhängigkeit von der Partikelgröße  $D_p$  mit und ohne Reduzierung des Rauschens durch Kühlung des Photodetektors von 22 °C auf -20 °C

Es ist zu erkennen, daß die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße mit Kühlung der Photodiode abnimmt.

Die folgende Abbildung 6.11 zeigt die Zählrate der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Partikelgröße für verschiedene Strahlfallen. Als Photodetektor wurde der Photomultiplier PMT 5702-02 verwendet.

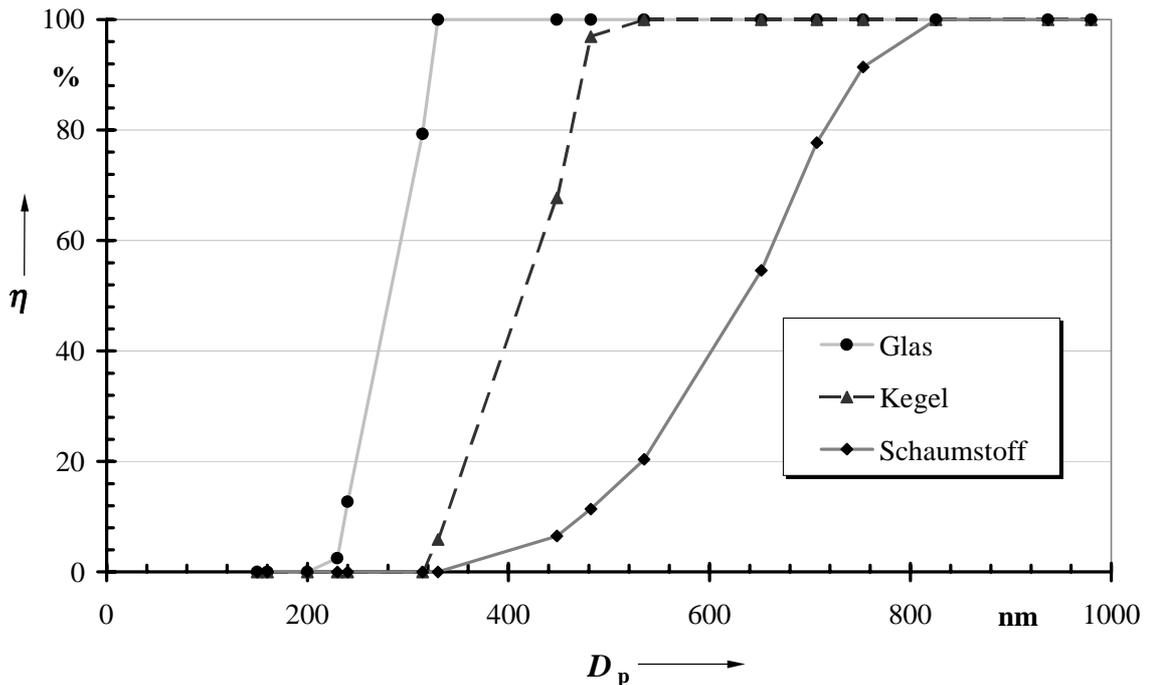


Abbildung 6.11 Zählwirkungsgrad  $\eta$  der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Partikelgröße  $D_p$  für unterschiedliche Strahlfallen

Der Zählwirkungsgrad fällt mit Verwendung des lichtabsorbierenden Glas als Strahlfalle mit kleiner werdender Partikelgröße sehr viel steiler ab als mit den Strahlfallen Kegel und Schaumstoff. Die untere Nachweisgrenze ist mit dem lichtabsorbierenden Glas schärfer definiert. Weiterhin ist zu erkennen, daß die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße mit weniger stark streuenden Lichtfallen abnimmt.

Die Abbildung 6.12 stellt die Zählrate der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Partikelgröße für verschiedene Signalverarbeitungsmethoden dar.

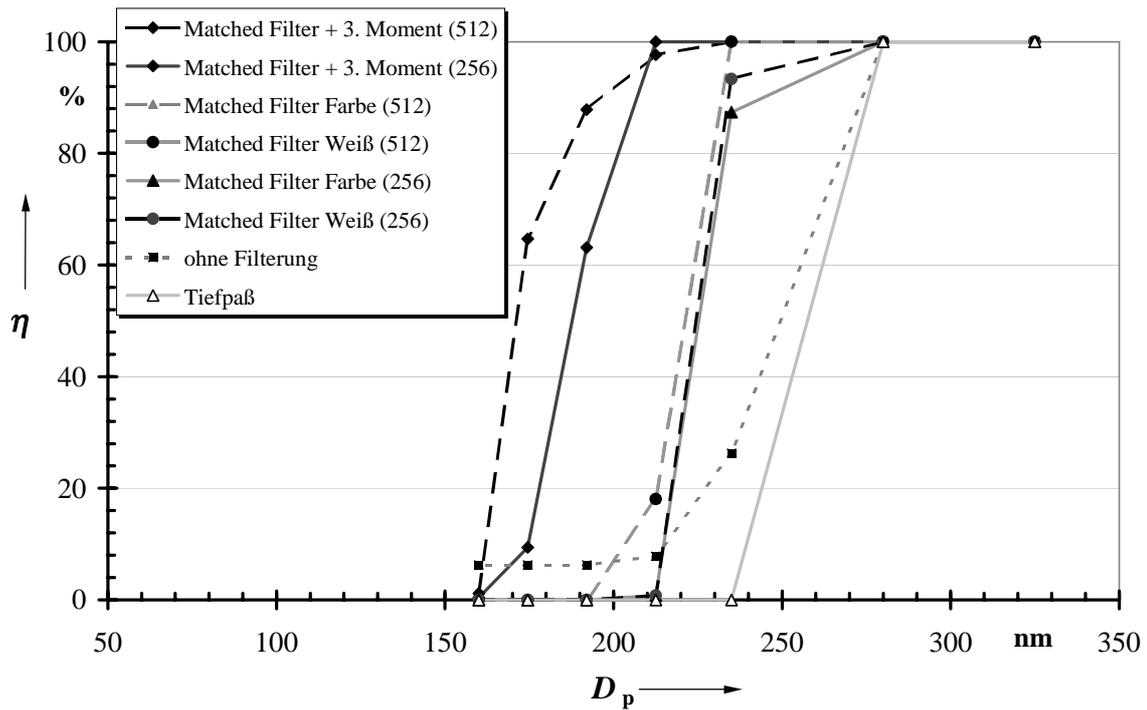


Abbildung 6.12 Zählwirkungsgrad  $\eta$  der Eigenentwicklung in Abhängigkeit von der Signalverarbeitungsmethode und vom Partikeldurchmesser  $D_p$

Mit den digitalen Filtern fällt die Zählrate mit kleiner werdender Partikelgröße sehr viel steiler ab als bei herkömmlichen Signalverarbeitungsmethoden. Die untere Nachweisgrenze ist mit den digitalen Filtern schärfer definiert. Weiterhin ist zu erkennen, daß die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße mit den Matched Filtern deutlich abnimmt.

Die Abbildung 6.13 stellt die Zählrate des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit von der Partikelgröße dar.

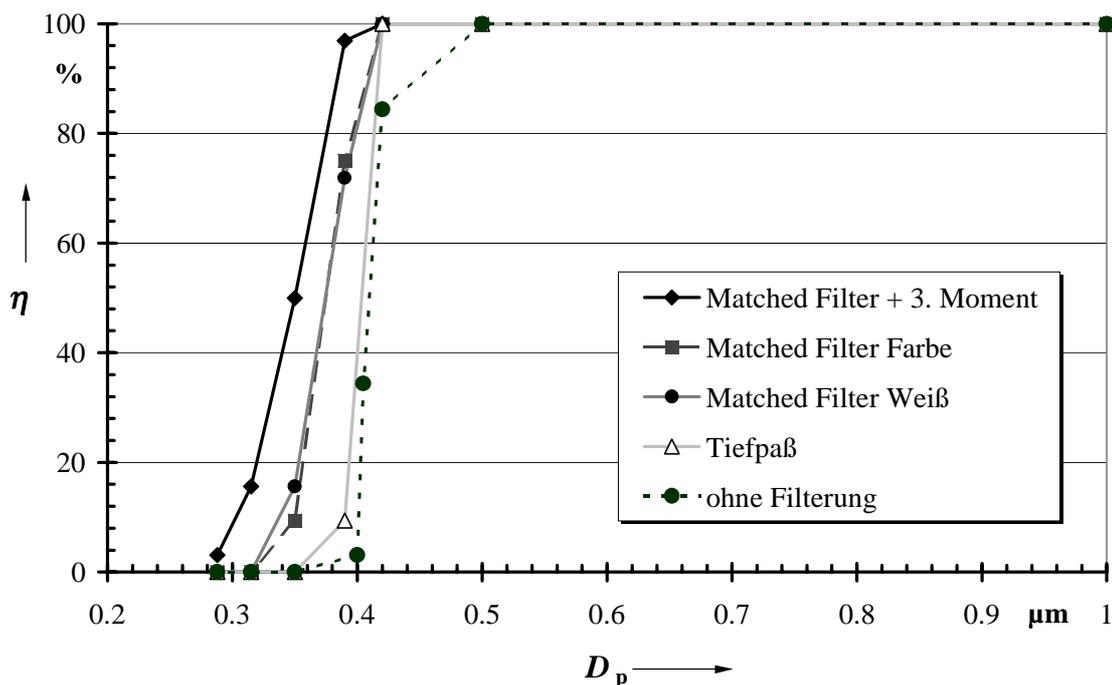


Abbildung 6.13 Zählwirkungsgrad  $\eta$  des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 in Abhängigkeit von der Signalverarbeitungsmethode und vom Partikeldurchmesser  $D_p$

Mit den Matched Filtern fällt die Zählrate mit kleiner werdender Partikelgröße sehr viel steiler ab als bei den herkömmlichen Signalverarbeitungsmethoden. Die Zählrate nach der Matched Filterung mit Berechnung der dritten Momente fällt am flachsten ab, besitzt jedoch die kleinste untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße.

Weiterhin ist zu erkennen, daß die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße bei allen Matched Filtern deutlich geringer ist als bei den herkömmlichen Methoden.

## 6.4 Untere Nachweisgrenze bezüglich der Partikelgröße

Die Tabelle 6.1 gibt die kleinste noch detektierbare Partikelgröße für den kommerziellen Partikelzähler LPC 3751, mit und ohne Kühlung der Photodiode von  $22^\circ\text{C}$  auf  $-20^\circ\text{C}$ , an.

Tabelle 6.1 *Kleinste noch detektierbare Partikelgröße  $D_P$  für den LPC 3751 mit und ohne Kühlung des Detektors*

|                         | <b>untere Nachweisgrenze</b> |
|-------------------------|------------------------------|
| ohne Kühlung (t = 22°C) | 410 nm                       |
| mit Kühlung (t = -20°C) | 408 nm                       |

Die untere Nachweisgrenze des Partikelzählers LPC 3751 hat sich durch die relativ aufwendige Kühlung der Photodiode nur um 0,5 % verringert.

Die folgende Tabelle 6.3 gibt die kleinste noch detektierbare Partikelgröße der Eigenentwicklung für verschiedene Strahlfallen an. Für diese Untersuchung wurde der Photomultiplier PMT 5702-02 als Detektor verwendet.

Tabelle 6.2 *Kleinste noch detektierbare Partikelgröße  $D_P$  der Eigenentwicklung mit dem Photomultiplier PMT 5702-02 für verschiedene Strahlfallen*

| <b>Strahlfalle</b> | <b>untere Nachweisgrenze</b> |
|--------------------|------------------------------|
| Schaumstoff        | 636,3 nm                     |
| Kegel              | 414,15 nm                    |
| Glas               | 273,34 nm                    |

Die untere Nachweisgrenze der Eigenentwicklung mit dem Photomultiplier PMT 5702-02 konnte durch Verwendung lichtabsorbierenden Glas, anstatt Schaumstoff als Strahlfalle, maximal um 57 % verringert werden.

Die Tabellen 6.3 und 6.4 geben die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße nach Filterung mit den verschiedenen Signalverarbeitungsmethoden für die Eigenentwicklung und für den kommerziellen optischen Partikelzähler LPC 3751 an. Für die Eigenentwicklung wurde für diese Simulation der hochempfindliche Photomultiplier PMT 5701-50 eingesetzt.

Tabelle 6.3 *Kleinste noch detektierbare Partikelgrößen  $D_P$  nach Filterung durch verschiedene Signalverarbeitungsmethoden für die Eigenentwicklung*

| <b>Filter</b>                       | <b>untere Nachweisgrenze</b> |
|-------------------------------------|------------------------------|
| ohne Filterung                      | 249 nm                       |
| Tiefpaßfilterung                    | 258,5 nm                     |
| Matched Filterung Weiß (256)        | 224,5 nm                     |
| Matched Filterung Farbe (256)       | 227,4 nm                     |
| Matched Filterung Weiß (512)        | 221,3 nm                     |
| Matched Filterung Farbe (512)       | 221,3 nm                     |
| Matched Filterung + 3. Moment (256) | 187,7 nm                     |
| Matched Filterung + 3. Moment (512) | 169,3 nm                     |

Tabelle 6.4 *Kleinste noch detektierbare Partikelgrößen  $D_P$  nach Filterung durch verschiedene Signalverarbeitungsmethoden für den kommerziellen optischen Partikelzähler LPC 3751*

| <b>Filter</b>                 | <b>untere Nachweisgrenze</b> |
|-------------------------------|------------------------------|
| ohne Filterung                | 410 nm                       |
| Tiefpaßfilterung              | 381,48 nm                    |
| Matched Filterung Weiß        | 361 nm                       |
| Matched Filterung Farbe       | 361 nm                       |
| Matched Filterung + 3. Moment | 350 nm                       |

Die untere Nachweisgrenze nimmt mit der digitalen Filterung ab und mit der Erhöhung der Filterordnung kann sie noch weiter gesenkt werden. Bei den Ergebnissen mit den Matched Filtern für weißes und farbiges Rauschen gibt es keine relevanten Unterschiede.

Eine weitere Reduzierung der unteren Nachweisgrenze kann durch eine Erhöhung der Filterordnung erfolgen.

Die kleinste untere Nachweisgrenze wurde vom Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente um den Faktor 2 gegenüber der herkömmlichen Methoden verringert.

## 6.5 Fehlzählrate

Bei den vorangegangenen Ergebnissen war der Schwellwert des Komparators so festgelegt, daß die Fehlzählrate nach Filterung der des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 entspricht. Die Filterung verringert das Rauschen und somit muß der Schwellwert herabgesetzt werden, um die gleiche Fehlzählrate zu erhalten. Wird die Höhe des Schwellwertes nach der Filterung beibehalten, verringert sich die Fehlzählrate.

Die folgende Tabelle 6.5 zeigt, daß mit Kühlung der Photodiode des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 von 22°C auf -20°C die Fehlzählrate  $F_{Z,V}$  sich nur geringfügig verringert.

Tabelle 6.5 *Fehlzählrate  $F_{Z,V}$  des kommerziellen optischen Partikelzählers LPC 3751 mit und ohne Reduzierung des Rauschens durch Kühlung des Photodetektors von 22 °C auf -20 °C*

| <b>Filter</b> | $F_{Z,V} \frac{\text{Partikel}}{m^3}$ |
|---------------|---------------------------------------|
| ohne Kühlung  | 3,5                                   |
| mit Kühlung   | 3,24                                  |

Die Tabelle 6.6 zeigt die Fehlzählrate der Eigenentwicklung für verschiedene Strahlfallen. Als Photodetektor wurde der Photomultiplier PMT 5702-02 eingesetzt.

Tabelle 6.6 Fehlzählrate  $F_{Z,V}$  der Eigenentwicklung für verschiedene Strahlfallen

| Filter      | $F_{Z,V} \frac{\text{Partikel}}{m^3}$ |
|-------------|---------------------------------------|
| Schaumstoff | 3,5                                   |
| Kegel       | 1,65                                  |
| Glas        | 0,063                                 |

Die Fehlzählrate der Eigenentwicklung mit dem Photomultiplier PMT 5702-02 hat sich mit Verwendung des lichtabsorbierenden Glases als Lichtfalle anstatt des Schaumstoffes sehr stark um den Faktor 55,6 bzw. um 98,2 % verringert.

Die folgende Tabelle 6.7 gibt die Fehlzählrate der Eigenentwicklung für unterschiedliche Signalverarbeitungsmethoden an. Als Photodetektor ist der hochempfindliche Photomultiplier PMT 5701-01 verwendet worden.

Tabelle 6.7 Fehlzählrate  $F_{Z,V}$  der Eigenentwicklung nach Filterung mit verschiedenen Signalverarbeitungsmethoden

| <b>Filter</b>                       | $F_{Z,V} \frac{\text{Partikel}}{m^3}$ |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ohne Filterung                      | 3,5                                   |
| Tiefpaßfilterung                    | 2,19                                  |
| Matched Filterung Weiß (256)        | 1,75                                  |
| Matched Filterung Farbe (256)       | 1,71                                  |
| Matched Filterung Weiß (512)        | 1,25                                  |
| Matched Filterung Farbe (512)       | 1,25                                  |
| Matched Filterung + 3. Moment (256) | 0,12                                  |
| Matched Filterung + 3. Moment (512) | $8,5 \cdot 10^{-3}$                   |

Die Fehlzählrate des kommerziellen optischen Partikelzählers LPC 3751 für unterschiedliche Signalverarbeitungsmethoden ist in der Tabelle 6.8 dargestellt.

Tabelle 6.8 Fehlzählrate des kommerziellen optischen Partikelzählers LPC 3751 nach Filterung mit verschiedenen Signalverarbeitungsmethoden

| <b>Filter</b>                 | $F_{Z,V} \frac{\text{Partikel}}{m^3}$ |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| ohne Filterung                | 3,5                                   |
| Tiefpaßfilterung              | 2,45                                  |
| Matched Filterung Weiß        | 2,43                                  |
| Matched Filterung Farbe       | 2,26                                  |
| Matched Filterung + 3. Moment | $2,7 \cdot 10^{-2}$                   |

Die Tabellen 6.7 und 6.8 zeigen, daß mit einer digitalen Filterung die Fehlzählrate herabgesetzt werden kann. Die Fehlzählrate nach einer Matched Filterung mit Berechnung der dritten Momente verringert die Fehlzählrate am stärksten, maximal um den Faktor 412 bzw. um 99,8 %.

## 6.6 Fazit

Der Meßbereich eines optischen Partikelzählers kann durch Reduzierung der Störungen an den Quellen erweitert und die Qualitätsmerkmale verbessert werden.

Bei dem kommerziellen optischen Partikelzähler LPC 3751 können mit einer Kühlung der Photodiode von 22°C auf -20°C die Qualitätsmerkmale nur geringfügig verbessert werden., weil sich der Effektivwert  $U_a$  der Rauschspannung nur um 6,7 % verringert hat.

Für die Eigenentwicklung mit Verwendung eines Photomultipliers ist mit besseren Strahlfallen eine deutliche Erweiterung des Meßbereiches erzielt worden. Das Hintergrundlicht konnte in der Meßkammer sehr stark herabgesetzt werden, das sehr rauschmindernd für den lichtempfindlichen Photomultiplier wirkte

Die Untersuchung von herkömmlichen und digitalen Signalverarbeitungsmethoden hat gezeigt, daß Filteralgorithmen, die einen großen Signal-Rauschabstand erzielen, die Qualitätsmerkmale des optischen Partikelzählers deutlich verbessern. Bei gleichbleibender Fehlzählrate erhöhte sich die Klassifizierungsgenauigkeit und das Auflösungsvermögen. Die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße ist mit dem Matched Filter und dem Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente stark verringert worden.

Bei einem gleichbleibenden Schwellwert konnte die Fehlzählrate erheblich reduziert werden.

Das Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente erreichte die deutlich größte Verbesserung der Qualitätsmerkmale des optischen Partikelzählers.

Die erzielten Verbesserungen bei der Zählung und Klassierung von Partikeln kann durch eine Erhöhung der Filterordnung noch weiter gesteigert werden.